СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД при разных видах и режимах нагружения

Под редакцией
проф., д-ра техн. наук
А.И. БЕРОНА



МОСКВА "НЕДРА" 1983

УДК 622.02 :620. 16/17

Свойства горных пород при разных видах и режимах нагружения / А.И. Берон, Е.С. Ватолин, М.И. Койфман и др. Под редакцией А.И. Берона. М., Недра, 1984, 276 с.

Описаны способы и средства исследования свойств и состояния горных пород в массиве. Освещены результаты исследований закономерностей изменения показателей прочностных и деформационных характеристик горных пород при различных скоростях деформирования, видах нагружения и напряженного состояния, имитирующих поведение пород в массиве вблизи очистных и подготовительных выработок.

Для научных и инженерно-технических работников горнодобывающих отраслей промышленности.

Табл. 37, ил. 101, список лит. — 42 назв.

Авторы: А.И. Берон, Е.С. Ватолин, М.И. Койфман, М.П. Мохначев, С.Е. Чирков

Рецензент — канд. техн. наук *Р.И. Тедер* (ИПКОН АН СССР)

С $\frac{25004000000-416}{043(01)-84}$ свод. пл. подписных изд. 1983 г.

© Издательство "Недра", 1984

ПРЕДИСЛОВИЕ

В технологии горного производства, при решении вопросов, связанных с проведением и охраной горных выработок, проектированием горных предприятий, добыванием полезных ископаемых, существенное значение (порою определяющее) имеют свойства и состояние горных пород в массиве. Именно по этой причине способы их определения как в натурных, так и лабораторных условиях, приближающихся к натурным, приобретают особое значение.

Понятие свойства горных пород далеко не однозначно. Оно не может определяться только прочностью и деформируемостью при одноосном нагружении. В понятие свойства горных пород включаются также их твердость, плотность, акустические, электрические, гаммаметрические и иные физические характеристики, критическая скорость деформирования, ответственная за разрушение пород при динамическом нагружении, и ряд других характеристик.

На свойства горных пород в условиях их естественного залегания существенно влияет их состояние, предопределяемое давлением вышележащих горных пород, перераспределением напряжений, вызываемых ведением горных работ, тектоническими нарушениями, влаго- и газонасыщенностью месторождения, трещиноватостью и слоистостью пород, контактными условиями и рядом других характеристик состояния, значительно меняющихся в границах разрабатываемого шахтного поля.

Отдельно стоят вопросы скорости деформирования (отличные от нормированных ГОСТами), усталости, масштаба деформирования, связанного с параметрами трещиноватости, влияния промежуточного главного напряжения при испытаниях трещиноватых пород на сложное трехосное деформирование.

Перспективными являются методы, основанные на распространении искусственно вызванных акустических волн в массиве горных пород и возбуждаемых ими электрических потенциалов, а также влияние напряженного состояния пород на плотность потока рассеянного гамма-излучения. Эти неразрушающие методы исследований позволяют оценивать напряженное состояние, устанавливать зоны повышенных напряжений, трещиноватость, место и степень нарушенности угольных пластов и массива горных пород.

Авторы полагают, что освещенные в монографии вопросы влияния свойств и состояния горных пород в массиве на их устойчивость вблизи горных выработок окажутся полезными для горного производства, развития горной науки и в первую очередь при оценке разрушаемости угольных пластов под влиянием предельного деформированного состояния, способов безопасного ведения горных работ и управления состоянием горного массива.

Настоящая монография является авторским обобщением материалов исследований, выполненных ими в ИГД им. А.А. Скочинского. Авторы отмечают участие в ведении экспериментальных работ и благодарят за оказание помощи при оформлении рукописи тт. Соломину И.А., Чернякова А.Б., Приставша В.В., Архипова В.П., Макарова Ю.С., Якубовича И.А., Рубана А.Д., Пожидаева Н.И., Рамзаеву Е.Т., Бараб—Тарле И.Г., Коршунову В.Т.

1. ПРОЧНОСТЬ И ТВЕРДОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

Механические свойства горных пород, углей и руд в решающей степени определяют специфику строительства шахт и рудников, разработки месторождений, горной технологии. В настоящее время горная наука и горное производство располагают обширной информацией о прочностных свойствах пород большинства угольных и рудных месторождений, в том числе месторождений, залегающих на больших глубинах.

Это стало возможным благодаря разработке и широкому внедрению простых и доступных для горных и геологоразведочных целей скоростных методов массовых определений прочностных свойств. Эти методы позволили установить закономерности деформирования и разрушения горных пород, а также выявить ряд факторов, влияющих на механические свойства пород и углей (структурная анизотропия, ослабления по контактам и кливажу, влажность и др.).

Процессы деформирования и разрушения пород, углей и руд многообразны. Крупные разломы и другие геологические нарушения возникают под влиянием региональных тектонических движений в земной коре. Разрушение пород в обнажениях горных выработок происходят вследствие достижения предельных напряжений. Это проявляется и при катастрофических крупномасштабных разрушениях угольных пластов при внезапных выбросах и горных ударах. В процессе отработки угольный пласт разрушают путем сосредоточенного воздействия инструментом угледобывающей машины, горные породы — проходческой машиной или буровзрывным способом.

Явления деформирования и разрушения твердых тел, включая и горные породы, можно разделить на два вида: равномерные (объемные, захватывающие полностью рассматриваемый элемент конструкции), и локальные (сосредоточенные). Оба вида разрушения и деформаций могут быть динамическими, статическими или длительными (рис. 1.1). Для измерений твердости создано и продолжает создаваться множество методов и приборов в самых различных областях науки и техники.

Особенно широко проводят испытания твердости металлов, где действуют стандарты на отдельные методы. Понятие твердость [1, 2], принятое Комитетом технической терминологии АН СССР, вытекает из представлений о двух основных условиях деформирования и разрушения твердых тел и, соответственно, двух классах механических свойств (см. рис. 1.1). Согласно [3] твердость — комплексное явление, включающее различные виды реакции веществ разной физической природы на сосредоточенно действующие внешние силы: в одних случаях это пластическая твердость, выражающаяся только в пластических деформациях, в других — твердость разрушения, в третьих — упругая твердость. Одним из существенных вопросов физики и механики твердого тела является изучение закономерностей умень-

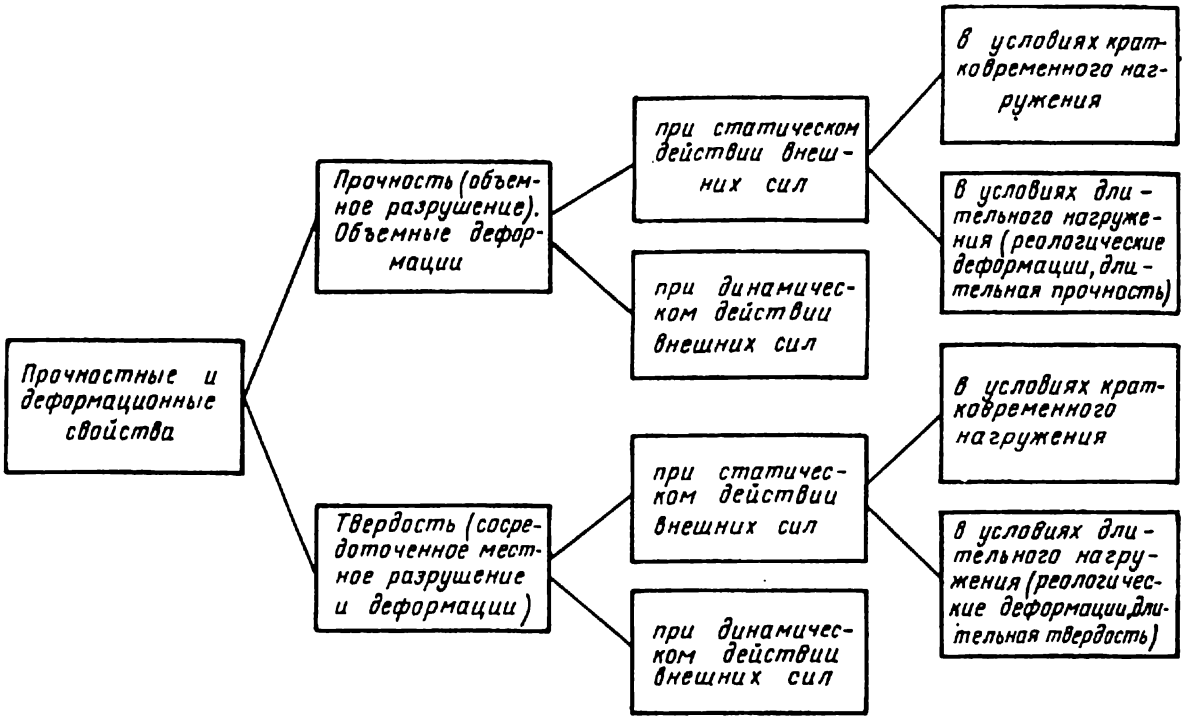


Рис. 1.1. Основные представления о прочностных и деформационных свойствах твердых тел при различных видах приложения сил и режимах нагружения

шения или увеличения прочности материалов в зависимости от масштаба. Масштабный эффект наблюдался при вдавливании инденторов в породы и угли, а также при разрушении пород рабочими органами бурильных и других горных машин.

Долгое время существовало мнение, что прочность пород в массиве или в целиках выше прочности образцов пород, которые испытываются в лабораториях. В дальнейшем на основе обобщения и анализа экспериментальных исследований, произведенных с горными породами, углями, минералами и другими веществами, была выдвинута концепция, согласно которой изменение прочности образцов и элементов горного массива определяются не одним, а двумя масштабными эффектами — объемным и поверхностным. Под влиянием первого прочностные свойства с увеличением размеров всегда уменьшаются, а под влиянием поверхностного (технологического) могут как уменьшаться, так и возрастать. Чем больше неоднородность, трещиноватость пород и углей, тем сильнее действует в них эффект уменьшения прочности с увеличением размеров. Особенно сильно он проявляется в области весьма малых размеров [4]. Численные показатели прочности горных пород и углей при растяжении, сжатии и других видах нагружения изменяются при изменении величины образцов. Деформируемость образцов зависит также от условий нагружения и напряженного состояния. Сопротивление разрушению при сжатии уменьшается или возрастает в зависимости от отношения высоты образцов к площади их поперечного сечения, а также контактных условий с плитами испытательных прессов. При всех видах и услови-

ях разрушения существенную роль играет скорость приложения нагрузки и продолжительность нагружения. В числе прочностных характеристик пород и углей ведущее место занимают пределы прочности при одноосном сжатии и растяжении. От этих характеристик зависят параметры обрушения кровли, отрыва при разрушении пород и углей горными машинами. Разрушение отрывом имеет место при горных ударах и внезапных выбросах угля и газа, при отбойке руды буровзрывным способом. В ИГД им. А.А. Скочинского предложен метод [5], посредством которого комплексно определяются характеристики прочности горных пород и углей как при растяжении; так и при одноосном сжатии (ГОСТ 21153.4—75). Сущность метода заключается в последовательном выполнении на одних и тех же образцах пород и углей определений:

предела прочности пород при растяжении по принципу направленного раскалывания плоскопараллельных пластин любых очертаний в плане (в том числе дисков, вырезанных из кернов разведочного бурения);

предела прочности пород при одноосном сжатии образцов, полученных при раскалывании пластин или дисков.

Правомерность определения прочности пород при растяжении по принципу направленного раскалывания вытекает из решения задачи теории упругости. Из решения Г. Герца следует, что в плоскости приложения сил сжатия в цилиндрическом теле возникают равномерно распределенные напряжения растяжения. Аналогичное напряженное состояние (растяжение) возникает при раскалывании образцов пород, которые имеют плоскопараллельную и иную форму при воздействии линейно распределенной нагрузки. Это осуществляется посредством сжатия образца двумя встречно направленными клиньями с закругленной вершиной или цилиндрическими стержнями небольшого диаметра. Предельное растягивающее напряжение ведет к разрыву образца породы или угля на две части. Разрыв происходит по поверхности, совпадающей или близкой к плоскости действия приложенных сил. Кроме растягивающих, в образцах породы возникают сжимающие напряжения, направленные перпендикулярно к напряжениям растяжения. В области, близкой к контакту испытуемой породы с плитами или клиньями пресса, напряжения сжатия велики. По мере приближения к оси цилиндра (равно как к середине плоскопараллельного образца) напряжения сжатия уменьшаются, достигая в средней части нагружаемого тела некоторого минимума. В приконтактной зоне, где возникает напряженное состояние местного всестороннего сжатия, деформации сочетаются с местным разрушением.

Известны и другие модификации принципа раскалывания, но все они имеют единую физическую основу — всегда возникает отрыв.

Предел прочности горных пород и других материалов при одноосном сжатии определяют большей частью на образцах-цилиндрах, высота которых равна диаметру, или на образцах кубической формы. Это соответствует сложившейся практике массовых испытаний на одноосное сжатие разных материалов, в том числе горных пород.

Создаются более широкие возможности детальных испытаний образцов пород из кернов колонкового бурения (ГОСТ 21153.4—75, ГОСТ 22450—77).

Широкие сравнительные испытания скоростного комплексного метода с другими методами испытаний при растяжении и сжатии для разнообразных пород и углей, производившиеся на протяжении нескольких лет в ИГД им. А.А. Скочинского и другими организациями, дали хорошие результаты. Измерения прочности при растяжении посредством направленного раскалывания превзошли по перспективе использования, а также по достоверности результатов (включая определения прочностной анизотропии пород) все другие методы, в том числе методы прямого растяжения. Испытания образцов кубовидной (полуправильной) формы дали величины, близкие к полученным при испытаниях образцов правильной формы. Значительно расширились возможности проведения испытаний небольших проб пород, в том числе извлеченных из геологоразведочных скважин большой глубины. Намного сократилась трудоемкость исследований.

В горных массивах часто содержатся слабые, разбитые трещинами породы.

Непосредственно определить прочность массива горных пород, представленных небольшими обломками, невозможно. Некоторые представления о его прочности можно получить при изучении отношения длины извлеченного керна к пробуренному интервалу. Но это отдаленный косвенный критерий. Он должен сочетаться с прочностью хотя бы обломков. Испытания прочности обломков можно осуществить лишь двумя путями. Первый основан на измерениях вновь образованной поверхности (зернового состава) разрушенного вещества при измельчении его в стандартизованных условиях, что можно выполнить динамическим или статическим способами. Второй путь — измерение прочности на растяжение изометричных образцов неправильной формы по принципу раскалывания при сжатии посредством плит, клиньев или инденторов (рис. 1.2). Для определения прочности породообразующих минералов в СССР и за рубежом разработаны различные устройства, в том числе полевые приборы для испытаний пород на образцах неправильной формы. Метод раскалывания образцов произвольной формы с применением встречных сферических инденторов разработан также во ВНИМИ Г.В. Михеевым (ГОСТ 24941—81).

В целях унификации метода в ИГД им. А.А. Скочинского разработана "Методика определения прочности горных пород на образцах полуправильной формы" (1976 г.), а также ГОСТ 22450—77 на методы определения прочности углей. Метод ИГД им. А.А. Скочинского включен в систему стандартов для определения механических свойств горных пород (ГОСТ 21153.4—75). В результате использования метода установлено, что крайние значения прочности пород расходятся в тысячу и более раз. К числу весьма крепких относятся плотные железистые кварциты, роговики, некоторые скарны, эгириновые породы.

Численные характеристики прочности при одноосном сжатии вме-

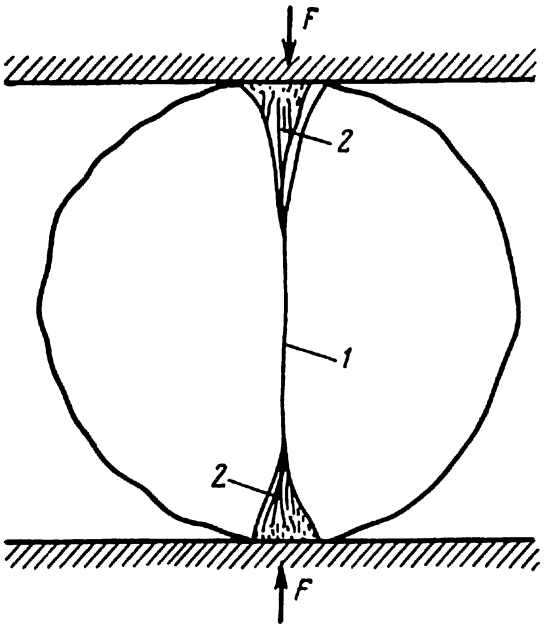


Рис. 1.2. Схема нагружения и разрушения образца неправильной формы по принципу направленного раскалывания:

1 — плоскость (поверхность) разрыва образца; *2* — зона местного разрушения вблизи контактов; *F* — усилие раскалывания

щающих пород угольных месторождений находятся в интервале от десятых долей МПа до 300 МПа. В центральных районах Донбасса средние значения пределов прочности при сжатии вмещающих пород составили в основном для аргиллитов 7 — 80 МПа, алевролитов 20—160, а для песчаников 30—200 МПа. Во вскрышной толще пород Канско-Ачинского бассейна встречаются слабые песчаники, предел прочности которых при сжатии менее 0,1 МПа.

В различных районах и на разных глубинах Кузнецкого бассейна залегают породы, пределы прочности которых изменяются в десятки раз. В Печорском бассейне породы Воркутинского района превосходят по прочности породы Интинского района в 2—3 раза.

Широк диапазон прочности пород и в угольных разрезах. Во вскрыше многих из них содержатся линзы конкреций и прослои пород, механические свойства которых, как следует из работ НИИОГР, намного превосходят основную массу углевмещающих пород.

Наличие крепких включений имеет на угольных разрезах существенное значение, так как от их механических свойств, распространения и размеров зависят многие технические решения, часто возникает необходимость предварительного рыхления, а это определяет возможность применения поточной технологии и высокопроизводительного оборудования. В Канско-Ачинском бассейне включения крепких пород превышают по прочности породы основной толщи в 15—20 раз, в Кузбассе — в 1,5—2 раза, в Минусинском бассейне — в 3—4 раза. Удельный расход взрывчатых веществ в зависимости от прочности пород для различных разрезов составляет 0,05—0,85 кг/м^3.

Использование комплексного метода и принципа направленного раскалывания позволило получить количественные характеристики прочностной анизотропии вмещающих пород и углей. Средние значения прочности ряда углей Кузбасса и Донбасса при растяжении по поверхностям, параллельным слоистости и основной прирожденной трещиноватости, оказались в 2—4 и более раз меньшими по сравнению с отрывом по поверхностям, перпендикулярным к плоскостям основной трещиноватости и слоистости. В Кузбассе прочность слоистых пород на растяжение при раскалывании по поверхностям распространения трещин в 12—30 раз, а по поверхностям наслоения

в 3—15 раз меньше по сравнению с породами массивной текстуры (Г.Г. Штумпф). Комплексные исследования пород, включавшие определения твердости в сочетании с изучением прочности, пластичности и хрупкости, упругих характеристик, а также минералогопетрографические исследования первоначально проводились методом вдавливания цилиндрического штампа с плоским основанием в плоскую поверхность образцов, предложенным Л.А. Шрейнером для количественной оценки сопротивляемости пород разрушению при бурении на месторождениях нефти и газа. Этот метод нашел применение в некоторых районах Донбасса для испытаний углевмещающих пород. В последние годы в угольной промышленности получил распространение простой способ определения контактной прочности, предложенный Л.Б. Глатманом и Л.И. Бароном. Он отличается тем, что штамп с плоским основанием вдавливают в необработанную (естественную) поверхность образцов пород. Оба метода дают хорошие результаты при определениях твердости большинства пород, но только тогда, когда при вдавливании штампа образуются лунки выкола (хрупкое разрушение). В некоторых пластичных породах лунки выкола не возникают, поэтому удается зафиксировать лишь пределы текучести. Для количественной оценки твердости пород, обладающих пластичностью при вдавливании, сопоставимые результаты могут быть получены измерением пластической твердости, посредством вдавливания выпуклых инденторов (например, сферической формы). На многих породах, занимающих среднее положение, можно измерять как твердость при хрупком контактном разрушении, так и пластическую твердость. Для измерений твердости углей и пород в массиве разработаны конструкции молотков, действующих по принципу упругого отскока. Успешно применяются для прогнозирования выбросоопасности угольных пластов портативные приборы, основанные на динамическом вдавливании инденторов (Г.Н. Фейт). На протяжении нескольких десятилетий на шахтах и рудниках всех отраслей горнодобывающей промышленности в целях нормирования производят оценку "буримости" пород бурильными машинами производственного назначения. Испытания выполняют в различных технологических режимах. К нормализованным условиям полученные результаты приводят, пользуясь поправочными коэффициентами. Поскольку техника и технология производственного бурения постоянно меняются и прогрессируют, трудно достичь твердых стабилизированных характеристик механических свойств пород. Применение разнообразных машин производственного назначения приводит к несоответствию между принятыми на шахтах и рудниках коэффициентами крепости и действительными прочностными свойствами пород.

Важной положительной стороной метрологических методов разрушения в массиве, моделирующих бурение, являются большой объем и большая поверхность раздробленной породы. Это обеспечивает значительно бо́льшую представительность результатов измерений, возрастают глубина и объем исследований массива, а условия разру-

шения породы приближаются к реальным условиям всестороннего сжатия, возникающему в массиве. Примером метрологического устройства может быть динамометрическое сверло СДМ-1 конструкции ИГД им. А.А. Скочинского, предназначенное для оценки сопротивляемости угля резанию (ГОСТ 12.47.001—73).

Для изучения механических свойств минералов, слагающих горные породы, а также небольшой величины зерен обычные способы измерений прочности непригодны. Поэтому изучение механических свойств минералов развивалось главным образом в направлении оценки их твердости. Наиболее известна десятибальная шкала Мооса, основанная на взаимном царапании минералов. Изучение твердости позволило вскрыть глубокие связи между средой, условиями образования и вещественным составом породообразующих минералов, слагающих породы и руды.

Твердость кристаллов представляет направленное свойство, что доказано многочисленным микрорезанием с применением так называемых склерометров. В ИГД им. А.А. Скочинского методом упругого отскока установлена различная динамическая твердость разных граней кварца, гипса и других кристаллов.

Изучение ингредиентов углей показало существенные различия в твердости основной цементирующей массы антрацитов, витринита и фюзинита. Для различных проб углей из ряда угольных пластов значение их микротвердости составляют 370—1550 МПа. С целью количественной оценки "микропрочности" на базе исследований кальцита, кварца, природного корунда, а также искусственных минералов разработан метод раздавливания, которым было выявлено сильное проявление масштабного эффекта, особенно в области малых размеров (от 0,5 до 0,09 мм). Так, для кварца сопротивление раскалыванию возросло с 60—70 до 600 МПа при уменьшении линейных размеров в пределах 1,2—0,09 мм. Разработанный метод был успешно применен для испытаний прочности синтетических алмазов и оценки их качества при сортировке.

Ученым и практикам известно отрицательное действие воды на устойчивость горных выработок в слабых горных породах и на пучение пород. Искусственное воздействие воды и химических реагентов на породы порой применяют на шахтах для повышения эффективности разработки угольных пластов с труднообрушаемыми кровлями. Большое значение имеет, как известно, увлажнение угольного массива для предупреждения внезапных выбросов угля и горных ударов. Атмосферные осадки в значительной мере определяют устойчивость, деформации и разрушение бортов угольных разрезов и рудных карьеров.

Несмотря на большое практическое значение, механизм воздействия воды на массив в различных горногеологических условиях изучен недостаточно. В этой связи необходимо исследовать влияние воды на породы и угли не традиционным путем (по коэффициентам размокания при одноосном сжатии), а в различных напряженных состояниях, в том числе при длительном нагружении и динамическом

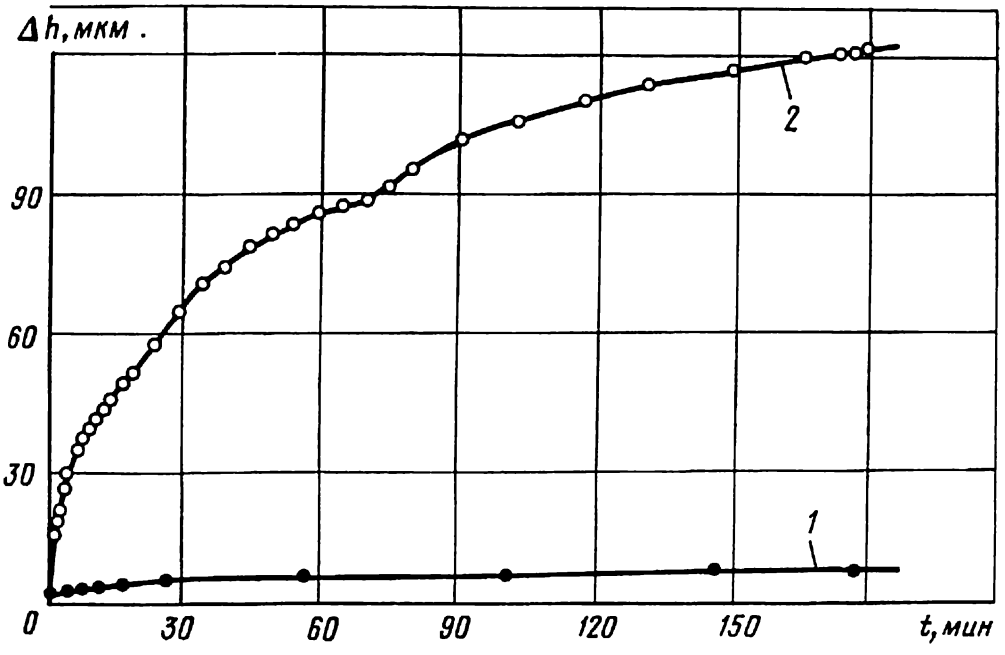


Рис. 1.3. Развитие во времени t деформаций прогиба Δh при изгибе образцов аргиллита в воздушно-сухом состоянии (*1*) и при адсорбции воды в зоне растяжения (*2*)

действии внешних сил. Экспериментальные исследования осадочных, метаморфических и магматических пород показали, что в статических условиях нагружения характеристики прочности преобладающего большинства пород, включая породы повышенной плотности и крепости, под действием воды в большей или меньшей степени уменьшаются. Для одних пород прочность снижается в 1,5—6 раза (иногда до полной потери связности), для других — только на несколько процентов. Аналогично изменяется при пропитке водой и твердость пород при статическом вдавливании. С уменьшением прочности и твердости сильнее проявляются пластические свойства пород, уменьшаются статические модули упругости.

В динамических условиях нагружения наблюдаются противоположные изменения (работы Е.С. Ватолина, М.П. Воларовича). Экспериментально установлено, что одновременное воздействие механических напряжений и адсорбции воды, проникающей в трещины и поры, ведет к значительному (в несколько раз) возрастанию упругих, остаточных и длительных деформаций пород (рис. 1.3). В числе углевмещающих пород имеются разновидности аргиллитов и алевролитов, которые сильно размокают, почти полностью теряют связность или расслаиваются в воде, хотя предел их прочности при одноосном сжатии, перпендикулярном к слоистости, в воздушно-сухом состоянии достигает иногда 40—60 МПа. В то же время некоторые известняки, обладающие гораздо меньшей прочностью (около 6—10 МПа), обладают сравнительно высокой гидростойкостью.

Степень изменения механических свойств пород под влиянием воды зависит от многих факторов:

пористости (содержания и формы пор различной величины);

текстурно-структурных особенностей самих пород (прежде все-

го от анизотропии, слоистости и развития ослаблении по контактам), а также от их трещиноватости;

вещественного (в основном минерального) состава, в значительной мере от содержания в породе гидрофильных, прежде всего глинистых минералов, сильно реагирующих на увлажнение, тонкодисперсного углистого вещества;

от продолжительности, условий и глубины насыщения.

Кинетика водного ослабления тесно связана с кинетикой насыщения пород водой. С изложенным согласуются результаты опытов, показавшие набухание пород при увлажнении и обратное их уплотнение при обезвоживании не только слабых пористых, но и существенно плотных монолитных пород. Линейные размеры образцов различных пород возрастали при набухании в воде на 0,010—0,012 %. Набухание и обратное уплотнение пород могут вызывать дополнительные напряжения в массиве.

Экспериментальными исследованиями установлено увеличение ударной прочности и ударной твердости некоторых пород при насыщении водой [6]. Это явление не согласуется с представлением только о расклинивающем и ослабляющем действии адсорбционных слоев воды и растворенных в ней, преимущественно поверхностно-активных веществ (эффект Дерягина—Ребиндера). Правомерность данного явления подтверждают результаты измерений динамической прочности (энергетических характеристик дробимости) углей в насыщенном водой состоянии, которые проведены в институтах ВостНИИ (О.И. Чернов), ВНИМИ (И.М. Петухов, А.Г. Акиньшин и др.), лаборатории внезапных выбросов ИГД им. А.А. Скочинского (Б.М. Иванов, Г.Н. Фейт, А.А. Борисенко) и УкрНИИпроекте (Н.И. Куваев, Д.В. Панченко).

Таким образом, при статическом деформировании и разрушении пород и углей всегда преобладает эффект ослабления внутренних связей, а при динамическом нагружении в зависимости от вещественного состава, структуры, физико-химических свойств пород, а также условий действия внешних сил в одних случаях преобладает эффект гидроослабления, в других, наоборот, гидроупрочнения.

2. ХРУПКО-ПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД И ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ

Пластичность и хрупкость пород определяют преимущественно по диаграммам "напряжение-деформация" одноосного сжатия образцов или статического вдавливания инденторов в плоскую (обработанную или необработанную) поверхность (рис. 2.1).

Диаграммы $\sigma—\epsilon$ могут условно охарактеризовать коэффициенты хрупкости $k_{хр}$ и пластичности $k_{пл}$. Площадь диаграммы $S_{ОМСД}$ отражает полную работу разрушения $A_{об}$. Точка M является условным пределом упругости. Работа упругих деформация $A_{уп}$ складывается из работы чисто упругого деформирования (площадь S_{AMN}) и той

части работы, которая соответствует работе упрочнения, т.е. накопления дополнительной упругой энергии до разрушения (S_{NMBE}), значит $A_{уп} = S_{ABE}$. Начальный вогнутый участок диаграммы, которому соответствует значение деформаций на отрезке OA, наблюдается при деформировании пористых горных пород. За меру хрупкости принимается отношение $k_{хр} = A_{уп}/A_{об}$, а коэффициент пластичности будет характеризоваться величиной $k_{пл} = (A_{об} - A_{уп})/A_{об}$.

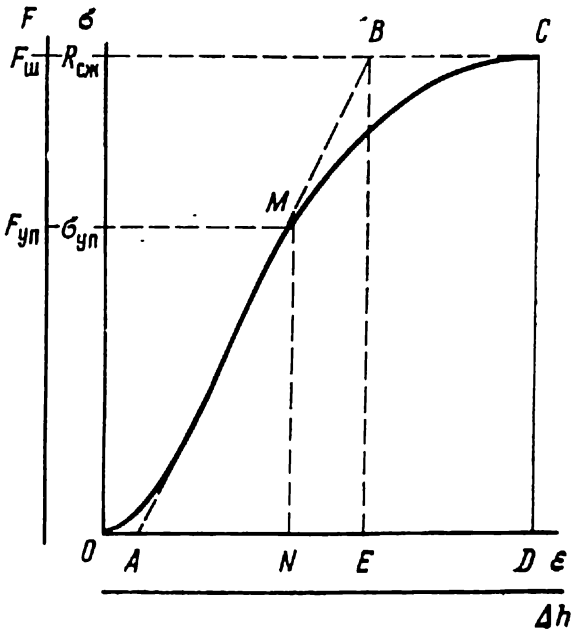


Рис. 2.1. Типичные диаграммы $\sigma - \epsilon$ деформирования образца горной породы при одноосном сжатии и $F - \Delta h$ при вдавливании пуансона:

$\sigma_{уп}$ и $F_{уп}$ — соответственно напряжение и нагрузка упругого деформирования; $R_{сж}$ — предел прочности на сжатие; $F_ш$ — предельная нагрузка при вдавливании

Л.А. Шрейнер детально разработал способ определения пластичности пород при вдавливании пуансона (цилиндрического или в виде усеченного конуса), выполненного из стали или твердого сплава.

Пластичность определяется по графику в координатах F и Δh. За меру пластичности $k_{пл}$ принимается отношение полной работы, затраченной до момента разрушения под пуансоном $A_{об}$ (S_{OMCD}), к полной работе упругих деформаций с учетом упрочнения $A_{уп}$ (S_{ABE}), т.е. коэффициент пластичности $k_{пл} = A_{об}/A_{уп}$ для пластичных или пластично-хрупких горных пород превышает единицу. Для высокопластичных пород, не дающих хрупкого разрушения при вдавливании, расчет коэффициента пластичности производят по площадям диаграммы, соответствующим общей работе внедрения пуансона на глубину, равную его диаметру, и работе упругих деформаций.

По ГОСТ 24941—81 при испытании механических свойств горных пород нагружением образцов сооснымиsферическими инденторами (Г.В. Михеев) определяют условную категорию пластичности по балльной шкале "5—0" в зависимости от среднего значения статического контактного модуля остаточной деформации.

В последнее время для оценки склонности пород к хрупкому разрушению пользуются "запредельными характеристиками", наблюдаемыми после достижения предела прочности (Б.В. Матвеев, Ю.М. Карташов и др.), угли делят на хрупкие и вязкие по энергоемкости их разрушения горными машинами (А.И. Берон, Е.З. Позин, Б.М. Лейбов, В.З. Меламед, С.М. Азовцева), углам бокового развала борозды при резании одиночным резцом, а также по измельчаемости.

Для прогнозирования горных ударов разработаны натурные способы оценки хрупкости в массиве (И.М. Петухов, Я.А. Бич и др.),

которые сочетаются с лабораторными определениями упругих и прочностных характеристик пород.

Для изучения хрупкости и пластичности пород и породообразующих минералов в ИГД им. А.А. Скочинского разработаны динамические и статические методы. Поиск путей и методов определения хрупкости и пластичности горных пород продолжается, развиваются представления о физической сущности этих явлений.

Хрупкость и пластичность часто рассматривают или как свойство, или как состояние вещества.

Одной из причин неопределенности и разноречивости взглядов является недостаточная систематизация, а часто игнорирование условий деформирования и разрушения твердых тел, особенно условий свободы или замкнутости, объемного или сосредоточенного приложения внешних сил. Если металлы в большей или меньшей степени остаются пластичными почти во всех указанных условиях, то породы и минералы свою хрупкость и пластичность показывают по разному. Так, соляные породы (каменная соль, калийные руды), будучи весьма пластичными в условиях всестороннего сжатия и вдавливания инденторов, отличаются вместе с тем значительной хрупкостью при разрыве и динамическом свободном измельчении. В отличие от металлов горные породы представляют гораздо более неоднородные по строению и вещественному составу многофазные гетерогенные полиминеральные системы. Весьма существенную роль в породах играют дефекты структуры (трещиноватость, кливаж, слоистость), характер напряженного состояния, степень насыщения водой и газами, контактные условия. При интенсивном всестороннем сжатии как образцов, так и пород в массиве, деформации, которые называют пластическими, сопровождаются внутренним разрушением. Наблюдаются местные сдвиги, отрывы. Старые связи рвутся и не восстанавливаются. Наблюдается своеобразный катаклаз, разрыхление. Местные пластические деформации, возникающие при вдавливании в породы инденторов, также характеризуются нарушениями внутренних связей. Они сочетаются с законтактным разрушением, где образуются новые трещины, развиваются старые сколы. Только внешне такие деформации пород напоминают явления, возникающие при вдавливании инденторов в металлы.

Нарушения связей, которые, как правило, не восстанавливаются, — основная черта пластичноподобных (квазипластических) деформаций большинства горных пород. Следовательно, твердые породы, равно как большинство углей, по их природе являются в различной степени хрупкими твердыми телами. Деформации, названные "квазипластическими" возникают в них только в условиях, когда имеет место всестороннее, неравнокомпонентное сжатие. Приближаются к действительно пластичным только деформации слабых глинистых и им подобных, в большей части склонных к набуханию под влиянием воды пород, которые проявляются в виде пучения и выдавливания в сторону обнажения.

Одной из главных причин того, что твердые породы в обычных

условиях разрушаются хрупко и даже при сложном напряженном состоянии сжатия содержат элементы хрупкого нарушения связей, являются физические свойства породообразующих минералов, большинство которых — хрупкие вещества и лишь некоторые в определенных условиях могут проявлять пластичноподобные местные или "всесторонние" деформации (пучение, брикетирование).

В дальнейшем, учитывая существующую традицию, мы будем пользоваться термином "пластичность", но при этом рекомендуем относиться к нему критически. Порода разрушается свободно, когда имеется пространство для развития деформаций в сторону открытых поверхностей. Свободно протекает, например разрушение пород при дроблении кусков, глыб, отделенных от массива. Свобода благоприятствует хрупкому отрыву, замкнутость — пластическим деформациям сдвига.

Сложность проявлений хрупкости и пластичности пород заключается в том, что местные, локализованные пластические деформации объемного сжатия могут сочетаться с хрупким разрушением в одной и той же породе или минерале.

Одной из существенных особенностей пород и породообразующих минералов является дискретность, их прерывистый, динамический (в большей или меньшей степени) характер разрушения разрыва связей. Повторяющиеся во времени и пространстве дискретно-микродинамические элементарные акты местного поверхностного разрушения наблюдаются при склерометрических исследованиях твердости пород и минералов. Прерывистостью отличаются разрушения микроскопического масштаба, возникающие при воздействии весьма малых сил. Микродинамические явления наблюдаются также в реологических исследованиях деформируемости пород. С позиции дискретности "кванты микро- и макронарушений" различного масштаба требуют соответствующих квантов энергии.

При испытаниях пород на разрушение и ударную твердость на стендах наблюдаются энергетические и силовые "барьеры" — критические уровни, которые определяются механическими свойствами объектов разрушения и контактными напряжениями. Скачкообразное преодоление указанных барьеров и придает разрушению дискретно-динамический характер. В хрупких породах и минералах дискретность разрушения проявляется в бо́льшей степени, в пластичных — слабее. Механизм явлений, которые возникают при статическом и динамическом вдавливании инденторов (равно как при воздействии рабочих органов породоразрушающих горных машин), в зависимости от хрупкости пород отличается сложностью и многообразием. При сосредоточенном разрушении пород малой твердости и, соответственно, пластичных (группа *а*), пластично-хрупких, большей частью средней твердости (*б*) и весьма хрупких и твердых (*в*) непосредственно в приконтактной области создается напряженное состояние близкое к всестороннему сжатию. В породах групп *а* и *б* в зоне контакта возникает уплотнение, сопровождающееся местным упрочнением (увеличением твердости). Интенсивность эффекта уплотне-

ния зависит от физико-механических свойств, плотности, структуры и вещественного состава пород, а также от величины контактных напряжений и сопротивления трению в контакте. При повторном вдавливании в одну и ту же точку поверхности породы степень твердости в этом месте возрастает до некоторого предела. Уплотнение ограничено приконтактной зоной. При вдавливании инструментов горных машин или инденторов в эти породы вместе с тем возникает законтактное хрупкое разрушение, отрывы, сколы. Это характерно и для породообразующих минералов малой твердости, склонных к пластическим деформациям в условиях всестороннего сжатия. При ударах бойков, оснащенных выпуклыми алмазами или другими инденторами сферической формы, контактная поверхность имеет ровные очертания (подобно деформациям металлов и пластичных пород при статическом вдавливании сферы), а за пределами непосредственного контакта возникают в основном радиальные трещины разрыва, которые не влекут за собой полного отрыва. Повторные удары по тому же месту ведут к углублению трещин, своеобразному выпучиванию краев лунок, возникновению дополнительных мелких трещин.

Имеются весьма пластичные породы, в которых наблюдается только контактное уплотнение (группа *а*).

У пород группы *в* в приконтактной зоне происходит только разрушение, повторные удары ведут к уменьшению твердости, а в законтактной области возникают крупные выколы. Таким образом, имеют место мелкое дробление в замкнутой зоне развития напряжений всестороннего сжатия и крупномасштабные отрывы и сколы за пределами контакта. Аналогично протекают процессы разрушения твердых хрупких пород при ударном бурении шпуров и скважин перфораторами, пневмоударниками и шарошками. Аналогичная картина наблюдается при разрушении минералов высокой твердости, например кварца. В таких минералах в законтактной области возникают выколы. Область развития значительных напряжений и разрушения представлена концентрическими прерывистыми трещинами отрыва, часть которых не доходит до поверхности, а также радиальными трещинами, уходящими в глубь кристалла. Контактное уплотнение пластичных и пластично-хрупких пород, породообразующих минералов, а также углей ведет к повышению энергоемкости их разрушения горными машинами.

Приконтактное разрушение углей и пород породообразующими горными инструментами активно влияет на развитие разрушения в целом. Трещины распространяются в сторону обнаженных поверхностей угольного пласта вперед и в боковом направлении, создавая зону разрушения более широкую, чем ширина контакной площади. Для энергетических расчетов было использовано устройство, основанное на принципе затухающих колебаний, впервые предложенное для измерений твердости Д.И. Менделеевым. Маятниковый склерометр, разрушающий орган которого представлял собой конус из вольфрамо-кобальтового твердого сплава (угол заострения 90°), отводился до определенной амплитуды (3 см) и колебался до пол-

ного затухания колебаний. Нагрузка, приложенная к рабочему острию прибора, изменялась от 6 до 30 Н. Потенциальная энергия маятника, отведенного на определенную высоту, переходя в энергию колебательного движения, затрачивалась на разрушение поверхностных слоев кристаллов, на местные пластические деформации и трение. Таким образом были определены затраты энергии без внешних потерь. Поглощалась вся потенциальная энергия колебаний маятника. Линейные размеры частиц отделенных кристаллов составляли 5 — 400 мкм. Установлено, что фактически поглощенная удельная работа превышает поверхностную энергию оторванных кристаллов в 10 000—100 000 раз. Стало очевидным, что в условиях всестороннего сжатия значительная часть энергии расходуется не только на явное разрушение — диспергирование вещества, но и на пластические деформации (вплоть до брикетирования), внутреннее трение и, по-видимому, на скрытое дробление кристаллической решетки кристаллов.

Анализируя полученные результаты [1] акад. В.Д. Кузнецов высказал предположение, что видимые размеры раздробленных частиц каменной соли могут быть значительно больше кристалликов, на которые диспергируется кристаллическая решетка. Мы полагаем, что внутреннее нарушение связей возникает не только и не столько в явно отделенных кристаллах, но также в более глубоких зонах развития всестороннего сжатия.

Разумеется, обнаруженная диспропорция столь крупного масштаба относится к веществам, проявляющим значительную пластичность, в хрупких же минералах и породах столь больших энергетических расхождений ожидать нельзя. Так, при вдавливании выпуклых алмазов в кристаллы галита (рис. 2.2) в зоне развития всестороннего сжатия имеют место глубокие пластические деформации. Хрупкое стекло в зоне контакта и за ее пределами только разрушается. Установлено, что с увеличением нагрузки в 8—10 раз, глубина внедрения в галит возрастает в 2—2,5 раза, а в хрупкий кварц и силикатное стекло в 8—15 раз.

При этом напряжения, отнесенные к проекции поверхности контакта, при внедрении в галит возросли примерно в 2 раза (с 16 до 33 МПа), а в хрупком стекле уменьшились в 9 раз (с 6000—7000 до 700 МПа).

Характерным для хрупких пород и минералов является критический "порог разрушения", который в пластичных веществах выражен слабее. Решающее значение при разрушении имеет дефекты строения твердых тел. Микротрещины, дислокации, крупные трещины и поры являются очагами хрупкого разрыва.

Хрупкие вещества гораздо хуже сопротивляются растяжению ($R_р$) по сравнению со сжатием ($R_{сж}$). Многими авторами предложены расчетные формулы для определения $R_р$ по данным измерений $R_{сж}$, выражающие линейную корреляционную связь между этими величинами. В действительности связь между прочностными характеристиками $R_р$ и $R_{сж}$ чаще всего имеет криволинейный характер, а соотношения между рассматриваемыми характеристиками прочно-

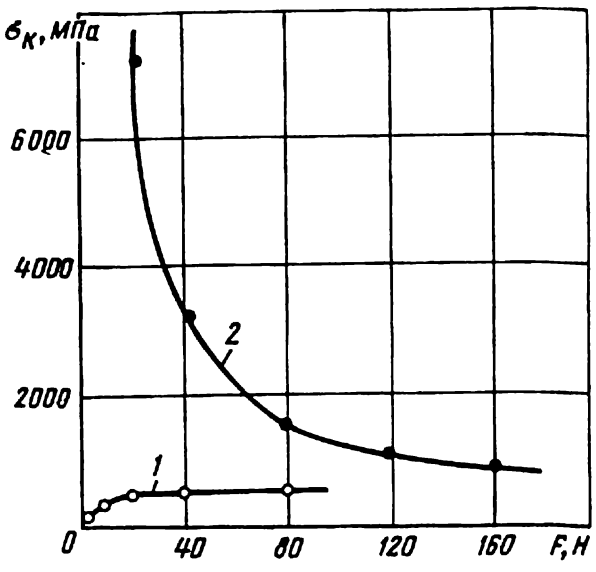
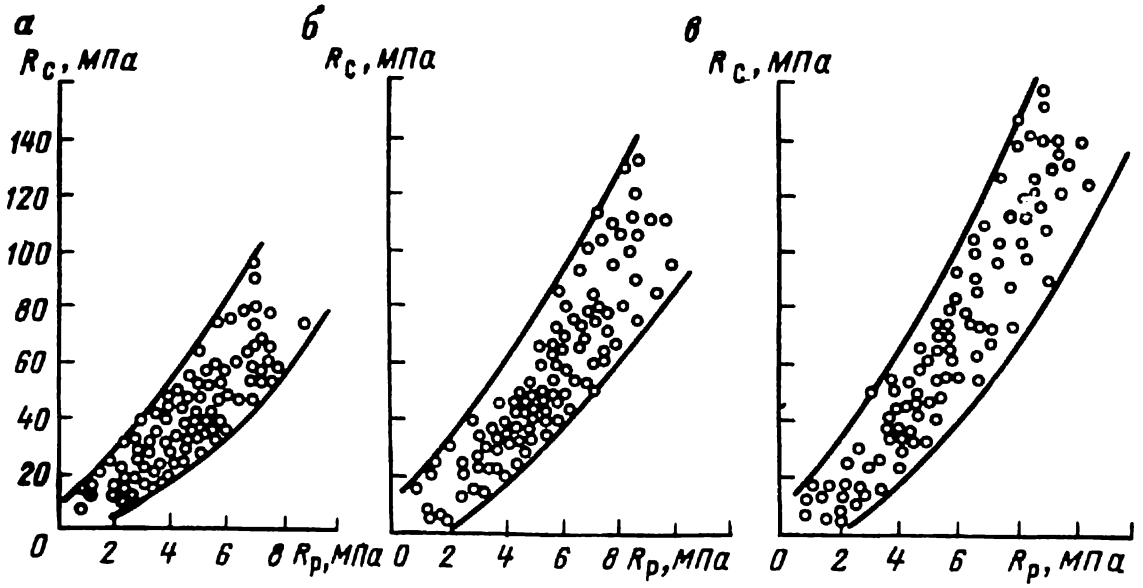


Рис. 2.2. Характер изменения контактных напряжений $\sigma_к$ с возрастанием усилий вдавливания F:

1 — в пластичное тело (галит); *2* — в хрупкое тело (силикатное стекло)

Рис. 2.3. Корреляционная зависимость между величинами прочности на сжатие $R_{сж}$ и растяжение $R_р$ для некоторых типичных пород Донбасса: аргилитов (*а*), алевролитов (*б*) и песчаников (*в*)



сти изменяются в широких пределах (рис. 2.3). Велик и разброс данных, отражающих эту корреляционную зависимость для пород различных минералого-петрографических видов.

Отношение $R_{сж}/R_р$ отражает проявление хрупкости пород и углей. Наряду с другими признаками это соотношение может дать дополнительную информацию о склонности пород к внезапным выбросам и горным ударам. Это отношение велико для некоторых углей выбросоопасных пластов Донбасса и Печорского бассейнов, повышено для выбросоопасных песчаников, а также для выбросоопасных пластов калийных месторождений.

В ИГД им. А.А. Скочинского отношение $R_{сж}/R_р$, названное "коэффициентом хрупкости", было принято в качестве одного из критериев хрупкости пород и углей. Это сочетается с применением комплексного метода определения прочности на растяжение (по принципу раскалывания) и одноосное сжатие. В условиях хрупкого раскалывания-разрыва под действием сил сжатия образуются две отличающиеся друг от друга по крупности группы минеральных зерен, о чем свиде-

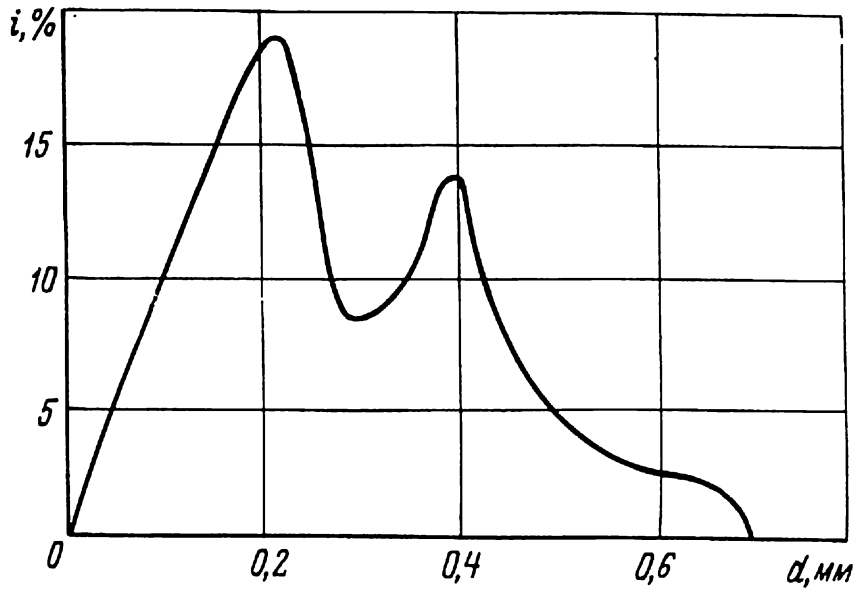


Рис. 2.4. Распределение продуктов дробления при раскалывании — разрыве кварца: i — частость распределения; d — диаметр частиц

тельствует кривая распределения, имеющая два максимума (рис. 2.4). При разрушении сжатием продукты дробления состоят, с одной стороны, из крупных обломков, образовавшихся в результате отрыва (преимущественно в области структурных дефектов), и из мелко раздробленных частиц, образовавшихся в контактных зонах, где преобладают напряжения сдвига.

Действительный характер хрупкого разрушения объясняет в значительной мере расхождения между известными энергетическими теориями. Энергетические затраты на дробление силами сжатия или ударов состоят из двух компонентов, первый из которых подчиняется закономерностям хрупкого объемного разрыва, второй — измельчению с большой вновь образованной поверхностью продуктов дробления. И то и другое характерно для реальных явлений хрупкого объемного измельчения и выражается законом акад. П.А. Ребиндера

$$A_{об} = gV + \chi S_н',$$

где $A_{об}$ — полная работа разрушения; g — удельная энергия упругопластических деформаций; V — объем разрушенного материала; χ — энергия образования единицы новой поверхности; $S_н$ — вновь образованная поверхность.

С физической точки зрения процесс разрушения, который имеет место при проведении испытаний механических свойств горных пород и углей посредством измерений их измельчаемости копровыми способами или во вращающихся камерах дробящими телами, можно рассматривать в излагаемом аспекте как совокупность множества актов раскалывания-разрыва ударно действующими нагрузками. От статических методов определения прочности пород на растяжение по принципу раскалывания определения измельчаемости в указанных выше условиях отличаются в основном динамичностью и массовым характером. По аналогии со статическим раскалыванием есть все

основания рассматривать соответствующие характеристики измельчаемости пород, породообразующих минералов, а также углей, как меру их динамической прочности при растяжении.

В ИГД им. А.А. Скочинского на основе закономерностей изменения состояния и физических свойств поверхностных слоев в области сосредоточенно-контактного динамического нагружения испытываемой породы, угля или минерала разработан метод повторных ударов [7].

Метод касается нагружения, деформаций и разрушения при локализованном приложении внешних сил, когда в зоне контакта бойка с образцом создается напряженное состояние, приближающееся к всестороннему сжатию. Метод позволяет использовать известный прибор Шора, применяемый для испытаний твердости металлов и некоторых других веществ по принципу "упругого отскока". При испытаниях методом повторных ударов боек после первого удара сбрасывают в то же место вторично, затем в третий раз и т.д. Высота упругого отскока при этом изменяется в зависимости от физических свойств и реакции испытуемой породы или минерала (контактное уплотнение или разрушение). Когда высота отражения после некоторого числа ударов становится стабильной или незначительно отклоняется от средней величины, повторные удары прекращают. Число ударов N в одну точку составляет обычно 8—20.

Мерой хрупкости и пластичности служит величина

$$K = \frac{T_{ш}^{пр} - T_{ш}^{н}}{T_{ш}^{н}} 100\ \%,$$

где $T_{ш}^{пр}$ — предельное значение твердости (наибольшее при уплотнении или наименьшее при контактном разрушении) после повторных ударов; $T_{ш}^{н}$ — соответственно начальное (минимальное в первом случае и максимальное во втором) значение твердости.

Величина K может быть положительной ($K_{упл}$) или отрицательной ($K_{разр}$). Положительные значения отражают условные значения динамической пластичности, отрицательные — высокую динамическую хрупкость. Низкие значения $K_{упл}$ свидетельствуют о приближении к хрупкости (соответственно пониженной пластичности) породы или минерала. Испытания производят в ряде точек поверхности образца породы или минерала по определенной сетке. Вычисляют средние значения. Типичные кривые динамического контактного уплотнения и разрушения пород и породообразующих минералов, полученные при проведении испытаний методом повторных ударов, представлены на рис. 2.5 и 2.6.

Метод успешно применен для изучения динамической твердости и хрупко-пластических свойств горных пород ряда месторождений, некоторых углей и распространенных минералов (табл. 2.1, 2.2).

Как видно из таблиц показатели динамических поверхностных хрупко-пластических свойств пород и породообразующих минера-

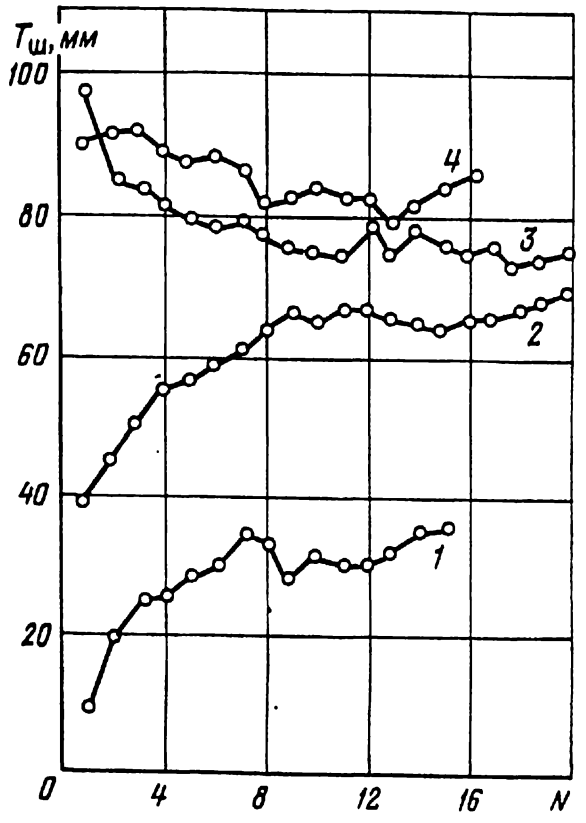


Рис. 2.5. Типичные кривые динамического контактного уплотнения (*1*, *2*) и разрушения (*3*, *4*) породообразующих минералов:

1 — графит; *2* — галит; *3* — кварц; *4* — лабрадор

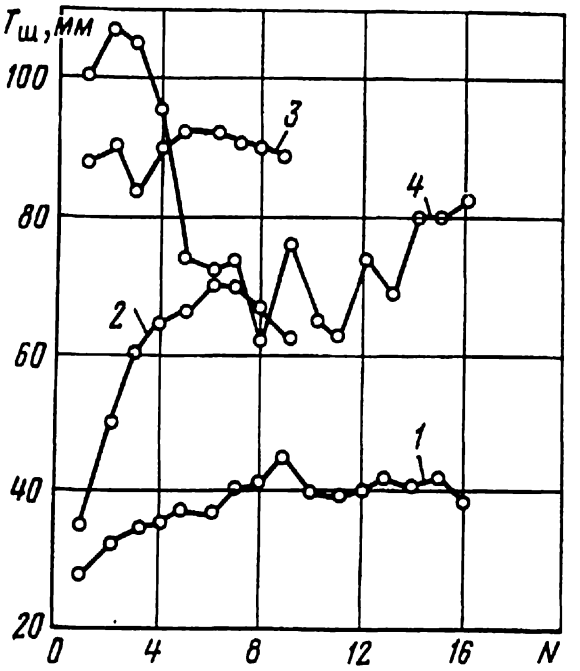


Рис. 2.6. Типичные кривые динамического контактного уплотнения (*1*, *2*) и разрушения (*3*, *4*) горных пород:

1 — уголь марки Т (Донбасс); *2* — мрамор (Коэлга); *3* — антрацит (Донбасс); *4* — песчаник (Шокша)

лов, полученные методом повторных ударов, изменяются для пород от +700 до —43, а для минералов от +800 до —74.

При испытаниях минералов обнаружены проявления анизотропии не только твердости, но и хрупко-пластических свойств. Анизотропия твердости минералов наблюдается и при испытаниях методом "царапания" (склерометрические исследования). Исследованиями на различных гранях кристаллов, в плоскостях, по-разному ориентированных относительно главных кристаллографических осей (опыты с кварцем, гипсом и др.), получены существенно разные значения хрупкости и пластичности.

Метод повторных ударов с измерениями упругого отскока использован в шахтных условиях Донбасса Н.Г. Русаковым (Донецкий политехнический институт). Для испытаний в массиве использован пружинный молоток конструкции Центрального научно-исследовательского института строительных конструкций (ЦНИИСК), разработанный по типу так называемых молотков Шмидта. Численные характеристики хрупкости или, наоборот, ударной вязкости пород и углей, можно получить посредством их динамического разрушения при дроблении. Энергетические характеристики такого процесса — удельная работа дробления, степень измельчения (вновь образован-

Таблица 2.1. Динамическая твердость и хрупко-пластические свойства горных пород, определенных методом повторных ударов

Горная порода	Динамическая твердость по Шору $T_ш$	Характеристики хрупкости и пластичности	
		$K_{разр}$	$K_{упл}$
Угли марки К (Кузбасс, шахта им. Ленина)	29—52	Не наблюдается	от 42 до 60
Уголь марки Т (Донбасс, б. шахта "Зимогорье" № 63)	39	— " —	13
Антрацит (Донбасс, шахта им. Войкова)	78	— " —	4
Антрацит — основная масса (Донбасс, шахта "Красный Партизан")	70—108	10 ÷ 43	Не наблюдается
Меломергель (КМА, Яковлевское месторождение)	6	Не наблюдается	700
Алевролит (Канско-Ачинский бассейн)	13	— " —	130
Каменная соль (УССР, Артемовское месторождение)	14	— " —	400
Аргиллит (Канско-Ачинский бассейн)	21	— " —	57
Песчаник (Кузбасс, Ленинск-Кузнецкий район)	23	— " —	108
Песчаник (Донбасс, Белая Калитва)	89	— " —	14
Джеспилит мартитовый (Кривбасс, шахта "Октябрьская")	104	— " —	4
Кварцит (Урал, Красноуральское месторождение)	105	—4	Не наблюдается

Таблица 2.2. Характеристики динамической твердости и хрупко-пластических свойств породообразующих минералов, определенных методом повторных ударов

Минерал	Индекс грани, агрегатное строение	Динамическая твердость по Шору $T_ш$	Характеристики хрупкости и пластичности	
			$K_{разр}$	$K_{упл}$
Минералы повышенной хрупкости				
Квар	$\perp L_6$	96	—32	Не наблюдается
	$1010 \parallel L_6$	101	—63	
Кварц	11—20	92	—44	Не наблюдается
Нефелин	0001	73	—14	— " —
Лабрадор	010	91	—18	— " —
Ортоклаз	010	95	—12	— " —
Микроклин	110	80	—23	— " —
Графит	Мелкозернистый агрегат	97	—15	— " —

Продолжение табл. 2.2

Минерал	Индекс грани, агрегатное строение	Динамическая твердость по Шору $T_{ш}$	Характеристики хрупкости и пластичности	
			$K_{разр}$	$K_{упл}$
Топаз	001	89	—74	Не наблюдается
Пироксен (диопсид)	100	44	—30	— ” —
То же	010	64	—59	— ” —
Флюорит	010	65	—60	— ” —
Хрупко-пластические минералы				
Кальцит	10—11	30	Не наблюдается	135
Флогопит	110	22	— ” —	110
— ” —	001	45	— ” —	29
Мусковит	001	69	— ” —	27
Гипс пластинчатый	100	3	— ” —	800
То же	010	16	— ” —	220
Галит	001	14	— ” —	380
Графит	Агрегат мелкочешуйчатый	12	— ” —	250

ная поверхность, гранулометрический состав, количество тонких фракций в раздробленном веществе) — связаны с хрупкостью пород и углей.

Существуют промышленные способы испытаний товарных проб углей, кокса, строительного и дорожного щебня, основанные на определениях их дробимости.

В горном и геолого-разведочном деле возникает необходимость проведения массовых испытаний проб небольшого объема. В связи с этим был разработан метод измерений измельчаемости, и, соответственно, удельной работы дробления небольших проб. В свое время они получили наименование микродиспергометрических. В частности, испытания измельчаемости углей и некоторых пород производились стальными шарами во вращающихся цилиндрических камерах небольшого объема. Один из первых приборов такого типа (РД-4) состоял из шести заключенных в общий кожух стальных цилиндров, внутренний диаметр которых равнялся 82 мм, а длина 50 мм. Одновременно испытывались 6 проб углей. Объем каждой (после сокращения по правилам опробования) составлял 20 $см^3$. Исходная крупность угля 5 ÷ 14 мм.

Оценка вновь образованной поверхности производилась посредством определений содержания в продуктах разрушения объема фракций мельче 0,07 мм и мельче 2,5 мм или одной из них (мельче 0,07 мм). Объем последней характеризовал приближенно степень измельчения. Соотношения численных значений характеристик измельчаемости различных углей и пород зависят, разумеется, в большой степени от условия разрушения, прежде всего от уровня разрушающих напряжений и затраченной работы (рис. 2.7).

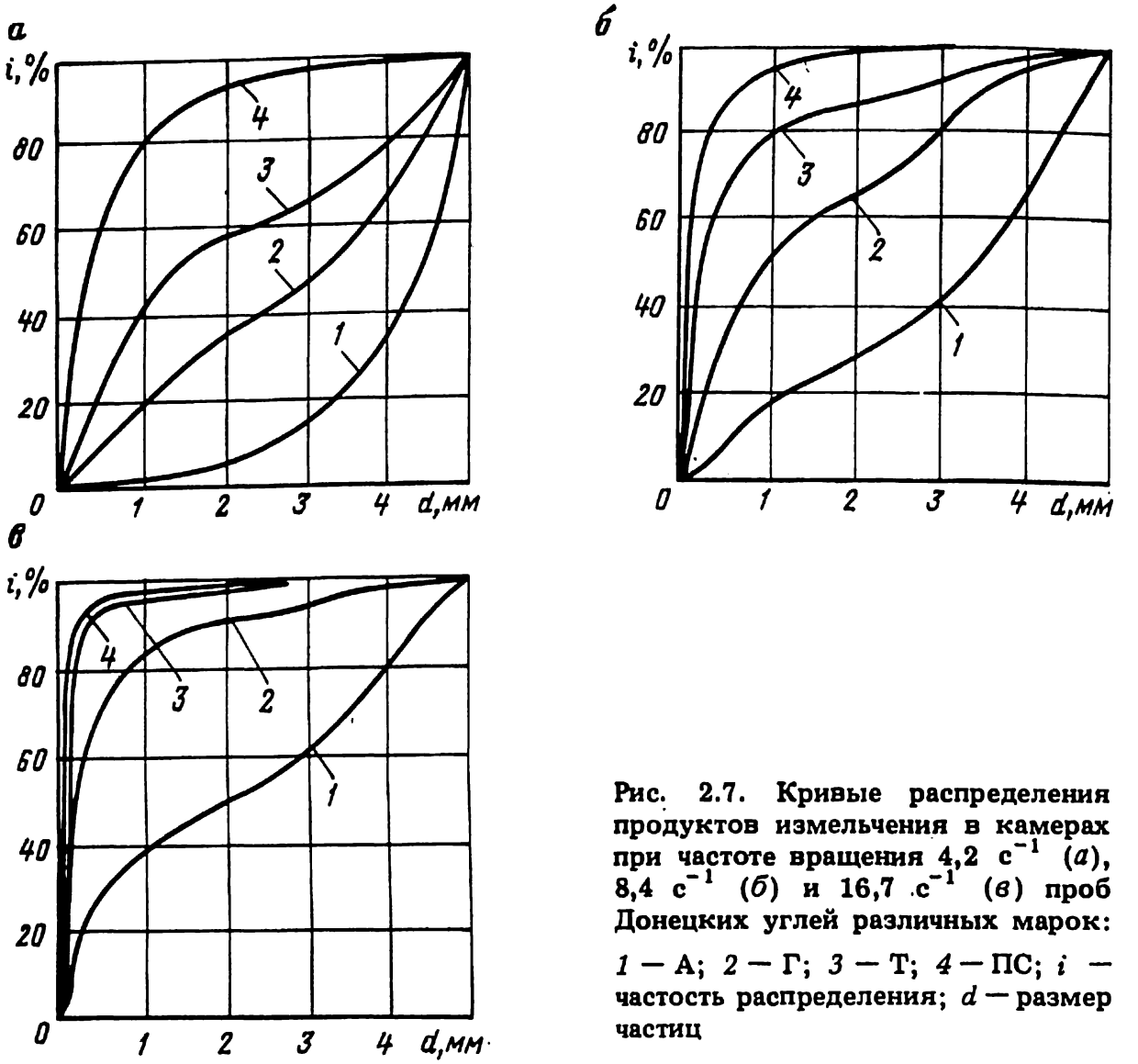


Рис. 2.7. Кривые распределения продуктов измельчения в камерах при частоте вращения 4,2 $с^{-1}$ (*а*), 8,4 $с^{-1}$ (*б*) и 16,7 $с^{-1}$ (*в*) проб Донецких углей различных марок:

1 — А; *2* — Г; *3* — Т; *4* — ПС; *i* — частость распределения; *d* — размер частиц

Другая модель такого прибора была разработана в ИГД им. А.А. Скочинского и успешно применена для изучения хрупкопластических свойств преимущественно магматических пород различного минерального состава и строения. Параллельно произведены испытания методом толчения М.М. Протодьяконова младшего.

Необходимо иметь в виду, что все динамические методы измельчения, в том числе способ толчения, дают характеристики пород, существенно отличающиеся от значений статической прочности, в том числе от величины $R_{сж}/10$ (значения $R_{сж}$ выражены в МПа), которая была рекомендована в свое время М.М. Протодьяконовым старшим в качестве коэффициента крепости.

На основании обобщения экспериментальных данных, полученных в ИГД им. А.А. Скочинского и других организациях, был разработан проект классификации пород минералого-петрографических типов по характеристикам их динамической прочности. Использованы для этой цели сведения, полученные способом толчения (с применением прибора ПОК, который вошел в дальнейшем в ГОСТ 21153.1—75). В указанной классификации [8] по динамическим прочностным характеристикам горные породы разбиты на 5 групп и 14 подгрупп.

Таблица 2.3. Характеристики хрупко-пластических свойств пород в зависимости от прочности и коэффициента крепости

Горные породы	$R_{сж}$, МПа	$f_{дин}$	$f_{дин}/R_{сж}\,10^3$
Аргиллит (Донбасс, шахта им. Челюскинцев)	27	4,6	170
Алевролит (Донбасс)	25	3,9	156
Песчаник крепкий (Донбасс)	275	14,2	51
Песчаник глинистый (Чиатура)	5	1,9	380
Уголь подмосковный (матовый)	12,5	1,4	112
Уголь (Кузбасс, шахта им. Ленина)	16,5	0,51	31

Для самых хрупких и слабых пород и углей динамические коэффициенты крепости составляют доли единицы. Для крепких и вязких мартитов и джеспилитов Кривбасса их величина достигает 35—38.

Предлагаемую классификацию целесообразно дополнить новыми опытными данными, полученными за последние 10—15 лет.

Характеристики измельчаемости динамически действующими силами были использованы для получения сопоставимых, не зависящих от прочностных свойств, показателей хрупкости пород и углей. Предпосылкой к этому было предложение, что мерами хрупкости могут служить отношения удельной работы, затраченной на измельчение ударно-действующими силами (или иной характеристики динамической прочности), к прочностным показателям, полученным при статическом нагружении. В качестве статической характеристики сопротивляемости разрушению принят предел прочности пород при одноосном сжатии $R_{сж}$, в качестве критерия динамической прочности — предусмотренный ГОСТом 21153.1—75 коэффициент крепости $f_{дин}$. Значения характеристик хрупко-пластических свойств некоторых пород и углей, определяемых отношением $f_{дин}/R_{сж}$, приведены в качестве примера в табл. 2.3. Для разных пород они расходятся в широком диапазоне.

Положительной стороной оценки хрупкости пород и углей по принципу динамического разрушения (измельчения) является доступность критериев и методик. Характеристики $R_{сж}$, $R_р$ для преобладающего числа пород и углей дают непосредственно испытания образцов полуправильной формы, выполняемые методами ИГД им. А.А. Скочинского [9, 10].

3. ВИД НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ПРОЧНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

Залегая на различных глубинах от земной поверхности горные породы испытывают давление вышележащих толщ. В зонах тектонических движений земной коры к напряжениям, вызванным весом вышележащих пород, прибавляются тектонические напряжения, приводящие

к увеличению горизонтальных напряжений, которые могут превысить вертикальные. Проведение горных выработок в массиве приводит к изменению его напряженного состояния. Вблизи горных выработок образуется зона повышенных напряжений. Разрушение пород в стенках выработок происходит вследствие достижения действующих в массиве напряжений величины прочности пород в данных условиях напряженного состояния.

Так как вид и величины напряженного состояния — изменяются по мере удаления от горной выработки, весьма важно знать влияние этого изменения на свойства горных пород. Горные породы в 10—20 и более раз прочнее при одноосном сжатии, чем при растяжении. В условиях всестороннего сжатия прочность может увеличиться в несколько раз.

Исследования свойств горных пород в условиях объемного сжатия имеют столетнюю историю [3], однако за последние годы существенных изменений в технике и методике исследований не произошло. Наиболее широкое распространение во всем мире получили приборы типа Кармана. Они представляют собой камеру высокого давления в которую помещается цилиндрический или призматический образец. Последний деформируется и разрушается посредством дополнительных сил, передаваемых на образец через шток, входящий в камеру. Для предотвращения проникновения рабочей жидкости в поры и микротрещины образец изолируется резиновыми, металлическими или другими оболочками.

При испытаниях в приборах Кармана создается определенный вид напряженного состояния, характеризующий соотношениями $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ или $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$, т.е. положением промежуточного главного напряжения σ_2 по отношению к наибольшему σ_1 и наименьшему σ_3 главным напряжениям. В общем случае вид напряженного состояния принято оценивать параметром Надаи-Лоде

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \qquad (3.1)$$

где $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

Параметр μ_σ меняется от +1 до —1. При $\mu_\sigma = -1$ промежуточное главное напряжение равно наименьшему, а при $\mu_\sigma = +1$ — наибольшему главному напряжению.

Если сжимающие напряжения, как принято в механике горных пород, считать положительными, то при одноосном сжатии и при испытании в установках типа Кармана (по схеме Кармана) $\mu_\sigma = -1$. При одноосном растяжении, при растяжении в сочетании с боковым сжатием и при всестороннем сжатии в установках типа Кармана (по схеме Бекера) $\mu_\sigma = +1$.

Понятие о виде напряженного состояния возникло в связи с несовершенством существующих теорий прочности. Наиболее широко используемой теорией прочности применительно к горным породам является теория Кулона—Мора. Однако, эта теория не учитывает промежуточного главного напряжения. Если бы наличие промежуточ-

ного главного напряжения не оказывало влияния на показатели свойств, было бы безразлично, при каком виде напряженного состояния изучать свойства горных пород. Однако, в настоящее время можно считать доказанным, что это основное условие теории прочности Мора не соответствует опытным результатам.

Прочность и деформируемость горных пород при напряженном состоянии вида $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ($\mu_\sigma = -1$) изучены весьма тщательно и широко описаны в трудах многих исследователей. Главные результаты исследований о зависимости прочности и деформируемости горных пород от величины минимальных напряжений следующие.

1. Прочность горных пород при одноосном сжатии изменяется от долей МПа до 400 МПа и более. Модуль упругости изменяется от 50 МПа до 200 000 МПа.

2. По мере увеличения минимальных главных напряжений ($\sigma_2 = \sigma_3$) прочность и сопротивление деформированию возрастают. Огибающая предельных кругов напряжений Мора постепенно выполаживается с увеличением радиуса предельного круга напряжений Мора по сравнению с одноосным сжатием в 4—7, иногда и более раз, в зависимости от типа пород и их трещиноватости. Прочность трещиноватых пород увеличивается более интенсивно, чем монолитных. Сопротивление деформированию также увеличивается. Для крепких монолитных пород наблюдается незначительное увеличение модуля упругости, а для пород высокопористых и весьма трещиноватых (например, коксовые угли) он увеличивается в несколько раз, причем статический модуль увеличивается более интенсивно, чем динамический.

3. С увеличением минимальных напряжений горные породы становятся более пластичными.

При напряженном состоянии вида $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ ($\mu_\sigma = +1$) свойства горных пород изучались в основном при растяжении. Все работы практически посвящены изучению показателей прочности. Первыми тщательно поставленными исследованиями на образцах карарского мрамора были опыты Бекера, которые показали, что прочность мрамора при $\mu_\sigma = +1$ увеличивалась на 10 % по сравнению с прочностью, определенной Карманом при $\mu_\sigma = -1$. Как показал Муррель, разница в прочности уменьшалась с уменьшением гидростатического давления.

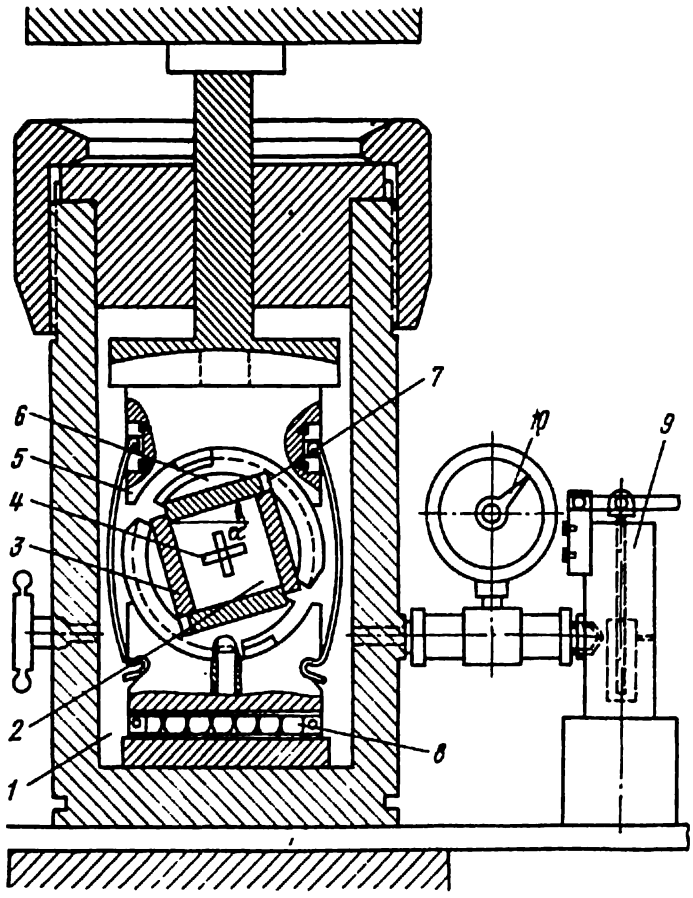
Большая работа о влиянии крайних значений вида напряженного состояния ($\mu_\sigma = \pm 1$) на показатели прочности глин выполнена Е.А. Воробьевым, который доказал, что для глин с пластическими связями показатели прочности не зависят от вида напряженного состояния. Подобное обстоятельство было отмечено ранее А.Л. Крыжановским для илов Сиваша, С.С. Бабицкой — для глин нарушенной структуры (пласт). Для серых и бурых глин с упругими связями расхождение в значениях сцепления при $\mu_\sigma = +1$ и $\mu_\sigma = -1$ составляло от 0 до 122 %. Углы внутреннего трения, полученные при крайних значениях μ_σ, различались более чем в 3 раза.

Сравнений показателей прочности скальных горных пород при значениях $\mu_\sigma = \pm 1$ крайне недостаточно и результаты их также

неоднозначны. Так А.Д. Алексеев, В.И. Журавлев, Л.П. Коган, Г.С. Сазерленд, М.С. Меддери и Моги Кийо утверждают, что промежуточное главное напряжение увеличивает прочность пород на 25—30 % и приводит к уменьшению угла разрушения. Н.А. Ландборг и Б.Т. Брэди отмечают уменьшение прочности, а в работах Г.Н. Кузнецова, М.Н. Будько, С.А. Маррел, П.Г. Дигби и Д.В. Хоббс влияния σ_2 на прочностные характеристики горных пород, их эквивалентов и бетонов не установлено. Учитывая, что горные породы вблизи выработок находятся большей частью в условиях вида $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ — при любых значениях μ_σ (от —1 до +1), а также принимая во внимание возможность поворота осей главных напряжений под воздействием нагрузок и тем самым изменение вида напряженного состояния в сравнении с начальным, в последние годы стали проводиться исследования по созданию новых приборов, позволяющих испытывать горные породы при любых значениях μ_σ и величинах нормальных напряжений [3].

3.1. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

На одной из установок для трехосного неравнокомпонентного сжатия (рис. 3.1) испытания образцов пород проводили в следующем порядке:



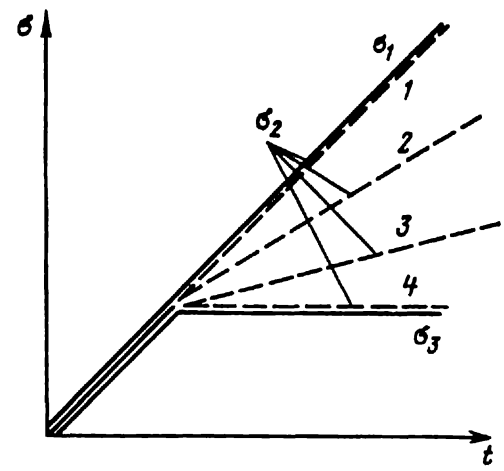


Рис. 3.2. Режим нагружения образцов в установке трехосного сжатия УТС-3

Рис. 3.1. Установка для трехосного неравнокомпонентного сжатия УТС-3:

1 — камера высокого давления; *2* — испытываемый образец; *3* — пластины; *4* — тензодатчики; *5* — клиновые матрицы со сферическими опорами *6*; *7* — пазы; *8* — опора качения; *9* — насос высокого давления; *10* — манометр

образцы для испытаний покрывали несколькими слоями клея № 88 для изоляции от проникновения в них рабочей жидкости;

контактные поверхности образцов и пластин смазывали графитовой смазкой;

образцы помещали в клиновые матрицы с пластинами таким образом, чтобы при деформировании и разрушении образцов пластины не расклинивали друг друга и клиновые матрицы, а проскальзывали одна по другой, не препятствуя деформированию и разрушению образцов;

образец в сборе с матрицами и пластинами помещали в камеру высокого давления;

в камере посредством насоса создавали давление жидкости (машинное масло) $q = \sigma_3$, затем через шток прессом прикладывали силу F, которая посредством клиновых матриц распределялась по двум осям образца. Нагружение (рис. 3.2) осуществляли до разрушения образца. Предельная разрушающая нагрузка F фиксировалась самописцем 40-тонного пресса ПД-40 (ГДР) с торсионным безинерционным силоизмерителем. В крайних случаях нагружения ($\sigma_2 = \sigma_1$ и $\sigma_2 = \sigma_3$) образцы горных пород испытывались без клиновых матриц.

Установка (УТС-2) позволяет получать и другие режимы нагружения.

Главные напряжения при испытании образцов в установке выражаются формулами

$$\sigma_1 = \frac{F - qS_{ш}}{S_{01}} \left(\sin\alpha - \frac{\cos^2\alpha f_{тр}}{\cos\alpha + \sin\alpha}\right) + q, \quad (3.2)$$

$$\sigma_2 = \frac{F - qS_{ш}}{S_{02}} \left(\cos\alpha - \frac{\sin^2\alpha f_{тр}}{\cos\alpha + \sin\alpha}\right) + q, \quad (3.3)$$

$$\sigma_3 = q, \quad (3.4)$$

где F — усилие, развиваемое прессом, Н; q — давление рабочей жидкости в камере, МПа; $S_{ш}$ — сечение штока, входящего в камеру, м^2; S_{01}, S_{02} — площадь сечений испытываемых образцов в направлениях, перпендикулярных оси σ_1 и σ_2, м^2; $f_{тр} = 0{,}12$ — коэффициент трения между пластинами и клиновыми матрицами.

Испытаниями установлено, что с изменением вида напряженного состояния, оцениваемого параметром Надаи—Лоде, предельное значение напряжений σ_1, может как увеличи-

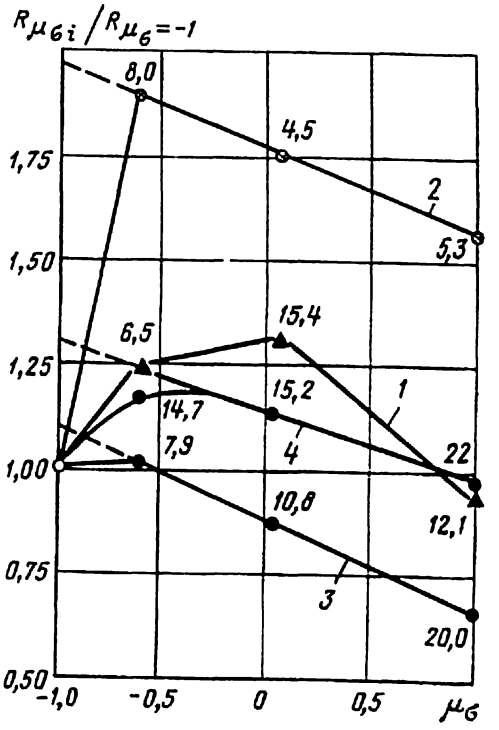


Рис. 3.3. Влияние параметра Надаи-Лоде μ_σ на относительную прочность горных пород $R_{\mu_i} / R_{\mu=-1}$ (цифрами показаны коэффициенты вариации экспериментальных данных):

1, 2 — угли с $\sigma_3 = 0$ и $\sigma_3 > 0$; *3, 4* — горные породы с $\sigma_3 = 0$ и $\sigma_3 > 0$

ваться, так и уменьшаться (табл. 3.1, рис. 3.3). В условиях плоского напряженного состояния наблюдается сначала небольшое увеличение, а затем значительное уменьшение пределов прочности при увеличении параметра μ_σ от —1 до +1.

Влияние вида напряженного состояния, оцениваемого параметром Надаи-Лоде в пределах —0,6 ÷ +1, на относительную прочность $R_{\mu\sigma_i}/R_{\mu_\sigma=-1}$ можно выразить уравнением

$$R_{\mu\sigma_i}/R_{\mu_\sigma=-1} = C - 0{,}17(\mu_\sigma + 1), \qquad (3.5)$$

где C — константа породы, принимающая значение от единицы до двух.

Таблица 3.1. Результаты испытаний образцов горных пород в условиях трехосного напряженного состояния*

Порода	Угол наклона призм α, град. (см. рис. 3.1)	Напряжения по осям, МПа		
		$\sigma_1 = R_1$	σ_2	σ_3
Аргилит № 25	90	26	0	0
	75	27	5	0
	60	21	11	0
	45	17	17	0
	45	113	113	25
	60	115	72	25
	75	115	42	25
	90	115	25	25
Аргилит № 37	90	64	0	0
	45	28	28	0
	60	46	23	0
	75	58	11	0
	45	146	146	30
	60	170	102	30
	90	183	30	30
Аргилит № 30	90	27	0	0
	60	23	12	0
	75	25	5	0
	45	16	16	0
Песчаник № 65	90	45	0	0
	45	29	29	0
	60	45	23	0
	75	51	10	0
	45	115	116	20
	60	150	87	20

*Даны средние значения из пяти определений.

Продолжение табл. 3.1

Порода	Угол наклона призм α, град. (см. рис. 3.1)	Напряжения по осям, МПа		
		$\sigma_1 = R_1$	σ_2	σ_3
Песчаник № 65	75	166	48	20
	90	164	20	20
	45	158	158	32
	60	183	110	32
	75	205	58	32
	90	200	32	32
Мрамор	90	64	0	0
	75	77	14	0
	90	190	25	25
	75	210	60	25
	60	232	132	25
	45	208	208	25
	90	230	50	50
	75	304	98	50
	60	346	188	50
	45	352	352	50
	75	360	128	75
	90	310	75	75
Известняк	90	7	0	0
	72	8	2	0
	62	7	3	3
	52	7	5	0
	45	6	6	0
	90	24	5	5
	75	28	9	5
	60	28	17	5
	45	20	20	5
	90	47	20	20
	75	56	27	20
	60	46	33	20
	45	43	43	20
Угли:				
σ_1 перпендикулярно к слоистости	90	12,7	0	0
	75	17,8	3,3	0
	60	15,6	8,1	0
	45	9,8	9,8	0
слоистость параллельна σ_1 и σ_2	90	9,5	0	0
	75	10,2	1,9	0
	60	8,9	4,6	0
	45	7,5	7,5	0

Продолжение табл. 3.1

Порода	Угол наклона призм α, град (см. рис. 3.1)	Напряжения по осям, МПа		
		$\sigma_1 = R_1$	σ_2	σ_3
Угли:				
слоистость параллельна σ_1 и перпендикулярна к σ_2	90	9,5	0	0
	45	11,6	11,6	0
	60	16,6	8,6	0
	75	11,6	2,2	0
слоистость перпендикулярна к σ_1	90	40	10	10
	75	65	20	10
	60	65	39	10
	45	58	58	10
слоистость параллельна σ_1 и σ_2	90	37	10	10
	75	68	21	10
	60	63	38	10
	45	54	54	10
слоистость параллельна σ_1 и перпендикулярна к σ_2	90	37	10	10
	75	82	23	10
	60	71	41	10
	45	66	66	10
Мергель	90	46	0	0
	75	46	9	0
	60	38	19	0
	45	23	23	0
	90	97	15	15
	75	114	33	15
	60	112	65	15
	45	94	94	15
	90	128	25	25
	75	154	49	25
	60	143	86	25
	45	125	125	25
Гипс	90	8	0	0
	75	8,2	1,5	0
	60	8,1	4,2	0
	45	7,7	7,7	0
Гранито-гнейсы	90	174	15	15
	75	222	24	15
	60	220	123	15
	45	165	165	15
	90	207	35	35
	75	330	89	35
	60	324	185	35
	45	232	232	35

Продолжение табл. 3.1

Порода	Угол наклона призм α, град (см. рис. 3.1)	Напряжения по осям, МПа		
		$\sigma_1 = R_1$	σ_2	σ_3
Песчаник (Донбасс)	90	78	0	0
	75	73	4,1	0
	60	52	271	0
	45	38	38	0
	90	160	10	10
	75	176	40	10
	60	194	106	10
	45	158	158	10
	90	155	35	35
	75	317	88	35
	60	276	160	35
	45	251	251	35

Величина C является показателем интенсивности первоначального увеличения прочности при превышении σ_2 величины σ_3. Резкое повышение прочности горных пород при небольшом превышении σ_2 над σ_3 связано со строгой ориентировкой плоскости разрушения относительно главного промежуточного напряжения. Когда $\sigma_2 = \sigma_3$, разрушение образцов происходит с реализацией всех имеющихся в образце ослаблений, открытых трещин, плоскостей наслоений и т.п. При увеличении σ_2 образец может разрушиться только по плоскостям, параллельным направлению σ_2 независимо от ориентировки имеющихся плоскостей ослабления. Плоскости разрушения не будут проходить по имеющимся ослаблениям. Этим можно объяснить отсутствие увеличения прочности у слабых пластичных гипсовых образцов и резким, до двух раз, увеличением прочности с ростом σ_2 у трещиноватых углей. Увеличению прочности способствует и рост октаэдрического сжимающего напряжения с увеличением σ_2.

Обратная закономерность — снижение прочности горных пород вытекает из уравнений II теории прочности, выведенных из закона Гука для условий трехосного сжатия:

$$R_р + \sigma_3 \geqslant \nu (\sigma_1 + \sigma_2), \qquad (3.6)$$

где $R_р$ — прочность при растяжении; ν — коэффициент Пуассона.

Уравнение (3.6) показывает, что с увеличением σ_2 произведение $\nu (\sigma_1 + \sigma_2)$ достигнет своего предела равного $R_р + \sigma_3$ при меньшем значении σ_1. Эти, одновременно действующие противоположно направленные закономерности изменения прочности приводят к сложной зависимости с максимумом при $\mu_\sigma = -0{,}6$, которые весьма условно могут быть описаны уравнением (3.5).

Сопоставление рассчитанных по формуле (3.5) значений прочно-

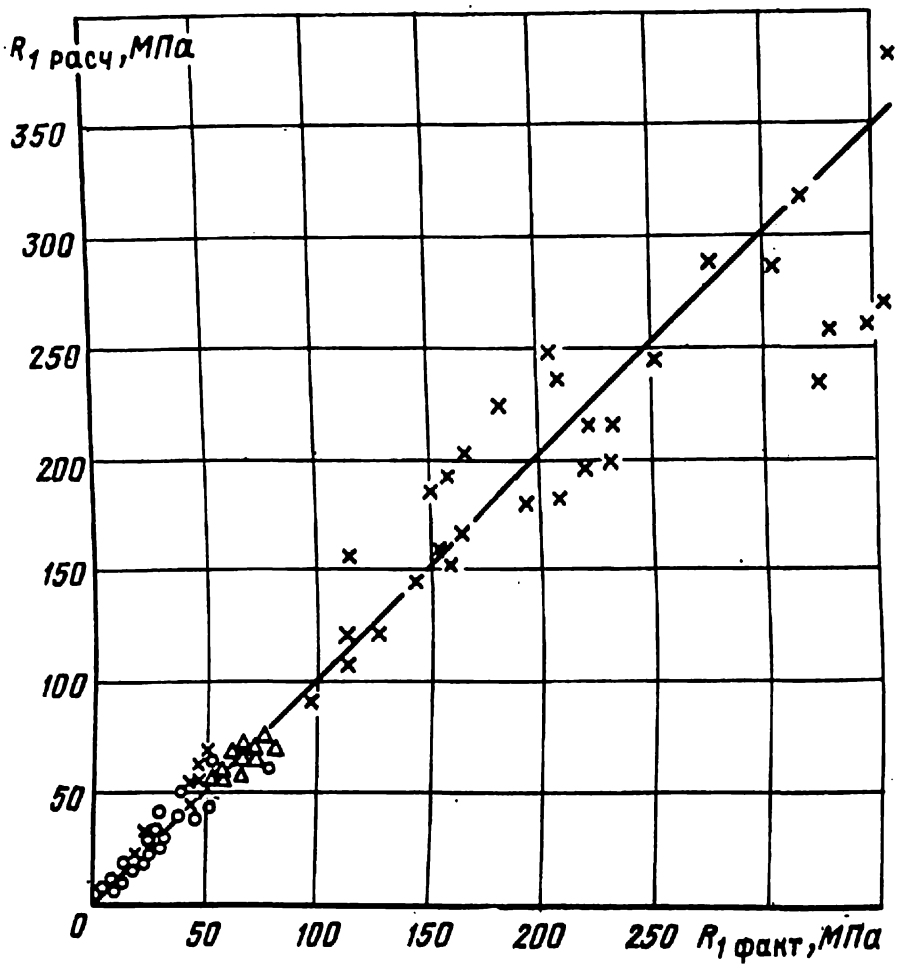


Рис. 3.4. Расчетные $R_{1\,\text{расч}}$ и экспериментальные $R_{1\,\text{факт}}$ значения прочности горных пород

сти с экспериментальными показало вполне удовлетворительное их соответствие (рис. 3.4).

Рассмотрим другой путь описания влияния промежуточного главного напряжения через октаэдрические нормальные и касательные напряжения.

Если $\sigma_2 = \sigma_1$, то согласно выражению (3.1) параметр $\mu_\sigma = +1$, а если $\sigma_2 = \sigma_3$, то $\mu_\sigma = -1$. Поэтому, считая сжимающие напряжения положительными, при испытаниях по схеме Кармана имеем $\mu_\sigma = -1$, а по схеме Бекера — $\mu_\sigma = +1$.

Записав условие прочности в виде, сходном с условием прочности Мора,

$$\tau_{ок} = \omega(\sigma_{ок}), \tag{3.7}$$

где

$$\sigma_{ок} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \tag{3.8}$$

$$\tau_{ок} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \tag{3.9}$$

и подставив в них значение σ_2 из формулы (3.1), получим влияние

вида напряженного состояния на величины нормальных и касательных октаэдрических напряжений:

$$\sigma_{ок} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\mu_\sigma}{3}\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right); \tag{3.10}$$

$$\tau_{ок} = \frac{\sqrt{2}\sqrt{3 + \mu_\sigma^2}}{3}\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right). \tag{3.11}$$

Радиус и координата центра предельного круга Мора:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{3\,\tau_{ок}}{\sqrt{2}\sqrt{3 + \mu_\sigma^2}}, \tag{3.12}$$

$$\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \sigma_{ок} - \frac{\mu_\sigma\,\tau_{ок}}{\sqrt{2}\sqrt{3 + \mu_\sigma^2}}. \tag{3.13}$$

Из формулы (3.12) видно, что при $\mu_\sigma \to 0$ радиус круга Мора увеличивается, а затем вновь уменьшается, достигая при $\mu_\sigma = +1$ своего значения при $\mu_\sigma = -1$.

Из формулы (3.12) следует, что можно построить сколько угодно кругов с различным значением параметра μ_σ. Радиусы их изменяются от

$$\frac{3}{2\sqrt{2}}\,\tau_{ок} = 1{,}061\,\tau_{ок}$$

до

$$\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}\,\tau_{ок} = 1{,}225\,\tau_{ок}$$

Согласно испытаниям (см. рис. 3.3) в подавляющем большинстве случаев отношение прочностей при $\mu_\sigma = i$ и $\mu_\sigma = -1$ характеризуется несколько другими значениями (табл. 3.2)

Таблица 3.2. Изменение относительной прочности горных пород $R_{\mu\sigma_i}/R_{\mu\sigma_1}$ от вида напряженного состояния

Напряженное состояние	Параметр μ_σ	Пределы изменения	Среднее значение
Плоское	−0,62	0,91—1,20	1,04
	+0,05	0,67—1,02	0,86
	+1,0	0,45—0,96	0,65
Трехосное	−0,62	1,0—1,72	1,24
	+0,05	0,90—1,68	1,17
	+1,0	0,67—1,68	0,98

Для сравнительно монолитных горных пород относительная прочность с увеличением параметра Надаи-Лоде сначала увеличивается, достигая максимума при $\mu_\sigma = -0{,}6$, а затем уменьшается. Минимальное значение прочности наблюдается при $\mu_\sigma = +1{,}0$. Таким образом фактическое влияние промежуточного главного напряжения не соответствует уравнениям (3.10) — (3.13), поэтому, следуя рекомендациям М.М. Филоненко-Бородича, ввели функцию параметра μ_σ. Тогда уравнение (3.11) запишется в виде

$$\frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{3+\mu_\sigma^2}\,\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2} = \tau_{ок}\,[1+\varphi(\mu_\sigma)]. \qquad (3.14)$$

При различных значениях μ_σ эта функция зависит также от степени всестороннего сжатия. С увеличением гидростатического сжатия прочность при $\mu_\sigma = +1$ стремится к прочности при $\mu_\sigma = -1$.

Величину степени напряженного состояния для пород различной прочности удобнее характеризовать безразмерным параметром K в обобщенном уравнении огибающей предельных кругов напряжений Мора. На основе вычислений безразмерных параметров огибающих и опытных данных была получена эмпирическая зависимость, учитывающая фактическое влияние вида и степени напряженного состояния:

$$\tau_{ок} = \tau_{max}\,\frac{\sqrt{2}\sqrt{3+\mu_\sigma^2}}{3\,[1+0{,}5\,(1+\mu_\sigma)(1-0{,}25\,K_n)}, \qquad (3.15)$$

где

$$\tau_{max} = \frac{3\,\tau_{ок}\,[1+0{,}5\,(1+\mu_\sigma)(1-0{,}25\,K_n)}{\sqrt{2}\sqrt{3+\mu_\sigma^2}}, \qquad (3.16)$$

где $K_n = K - (K_1 + q_1)$; $K_1 + q_1$ — координата касания кругов одноосного сжатия и растяжения в безразмерном виде.

Подставляя значение $\tau_{ок}$ из формулы (3.11), окончательно получим

$$\tau_{max} = [1+0{,}5\,(1+\mu_\sigma)(1-0{,}25\,K_n)\,\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}\,. \qquad (3.17)$$

Данное уравнение верно при условии, что при приближении огибающей предельных кругов Мора к своей асимптоте прочность при $\mu_\sigma = +1{,}0$ приближается к прочности при $\mu_\sigma = -1$. Об обоснованности такого условия говорят экспериментальные данные.

3.2. ПРЕДЕЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Обобщение экспериментальных данных о прочности материалов и анализ геометрической интерпретации теории прочности, приведенные в работах [11, 12], свидетельствуют о том, что предельная по-

верхность прочности материалов, в том числе и горных пород, в пространстве тензора напряжений должна представлять собой равнонаклоненную к осям σ_1, σ_2 и σ_3 пространственную фигуру, симметричную к направлениям главных напряжений, открытую со стороны сжимающих напряжений. В частности, предельная поверхность упрощенной теории Кулона-Мора с прямолинейной огибающей в пространстве напряжений представляет собой шестигранную равнонаклонную к осям σ_1, σ_2 и σ_3 пирамиду.

Для изучения формы предельных поверхностей прочности необходимо поэтому повернуть главные оси таким образом, чтобы одна из них совпала с пространственной диагональю. Тогда совмещая с ней ось X, получим

$$\sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} x + \frac{1}{\sqrt{2}} y + \frac{1}{\sqrt{6}} z; \tag{3.18}$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} x - \frac{2}{\sqrt{6}} z; \tag{3.19}$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} x - \frac{1}{\sqrt{2}} y + \frac{1}{\sqrt{6}} z. \tag{3.20}$$

Цилиндрические координаты l, r и μ_σ будут равны:

$$l = x = \sqrt{3}\,\sigma_{ок}; \tag{3.21}$$

$$r = \sqrt{y^2 + z^2} = \sqrt{3}\,\tau_{ок}; \tag{3.22}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \mu_\sigma / \sqrt{3}, \tag{3.23}$$

где

$$\sigma_{ок} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3};$$

$$\tau_{ок} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2};$$

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}.$$

Следовательно, форма предельной поверхности и ее свойства определяются тремя параметрами: нормальными октаэдрическими напряжениями, касательными октаэдрическими напряжениями и параметром Надаи-Лоде, учитывающим вид напряженного состояния. Уравнение этой поверхности запишется в виде

$$f(\sigma_{ок}, \tau_{ок}, \mu_\sigma, R) = 0. \tag{3.24}$$

Для установления формы и размеров предельных поверхностей прочности горных пород необходимо построить следы пересечения этой поверхности плоскостями, проходящими через пространствен-

ную диагональ $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ и плоскостями перпендикулярными к ней.

Так как в процессе испытаний свойств горных пород в условиях трехосного напряженного состояния на существующих установках при различных типах напряженного состояния предельная поверхность прочности достигается при различных значениях l (вследствие изменения величины октаэдрического напряжения), то в первую очередь следует построить в системе координат r, l сечения предельной поверхности плоскостями, проходящими через пространственную диагональ σ_1, σ_2 и σ_3 и ориентированных относительно осей главных напряжений под углом $\alpha°$, тангенс которого равен $\frac{\mu_\sigma}{\sqrt{3}}$. Нами рекомендуется следующий порядок этих вычислений и построений:

1) определяются предельные значения σ_1 и σ_2 при различных уровнях σ_3;

2) при минимальном значении σ_3 рассчитывается μ_σ и по формуле (3.23) угол $\alpha°$, который должен изменяться от +30° до —30°;

3) по формулам (3.21, 3.22) рассчитываются величины l и r для каждого фактического значения μ_σ ($\alpha°$) и уровня напряжений;

4) строятся графики зависимостей l и r от значений $\alpha°$ и по ним для одинаковых значений $\alpha°$ определяют величины l и r при всех уровнях напряжений σ_3;

5) на графиках в системе координат $r = l$ наносятся точки соответствующие одинаковым значениям $\alpha°$ (μ_σ), проводится плавная сглаживающая кривая, которая и будет соответствовать следу сечения предельной поверхности прочности, при данном значении μ_σ ($\alpha°$).

Построение сечений предельной поверхности прочности плоскостями перпендикулярными пространственной диагонали производится следующим образом.

1. На один график наносятся все следы сечений предельной поверхности плоскостями, проходящими через пространственную диагональ и соответствующих различным значениям μ_σ ($\alpha°$).

2. На выбранном уровне l определяют величины r для всех значений μ_σ.

3. Строятся проекции осей σ_1, σ_2 и σ_3 в октаэдрической плоскости. (Для изотропной горной породы достаточно построить один сектор с углом 60°).

4. Проводится биссектриса угла сектора и от нее под углом $\alpha°$, соответствующему определенному значению μ_σ приводятся вспомогательные лучи, на которых откладываются соответствующие значения r. Соединив концы отрезков плавными линиями, получим сечение предельной поверхности плоскостью, перпендикулярной пространственной диагонали. Построив аналогичные сечения при различных значениях l получим полное представление о форме и размерах предельной поверхности прочности горных пород.

Предельные поверхности прочности монолитных горных пород. Используя изложенную выше методику и экспериментальные данные, полученные при испытаниях в условиях трехосного неравнокомпо-

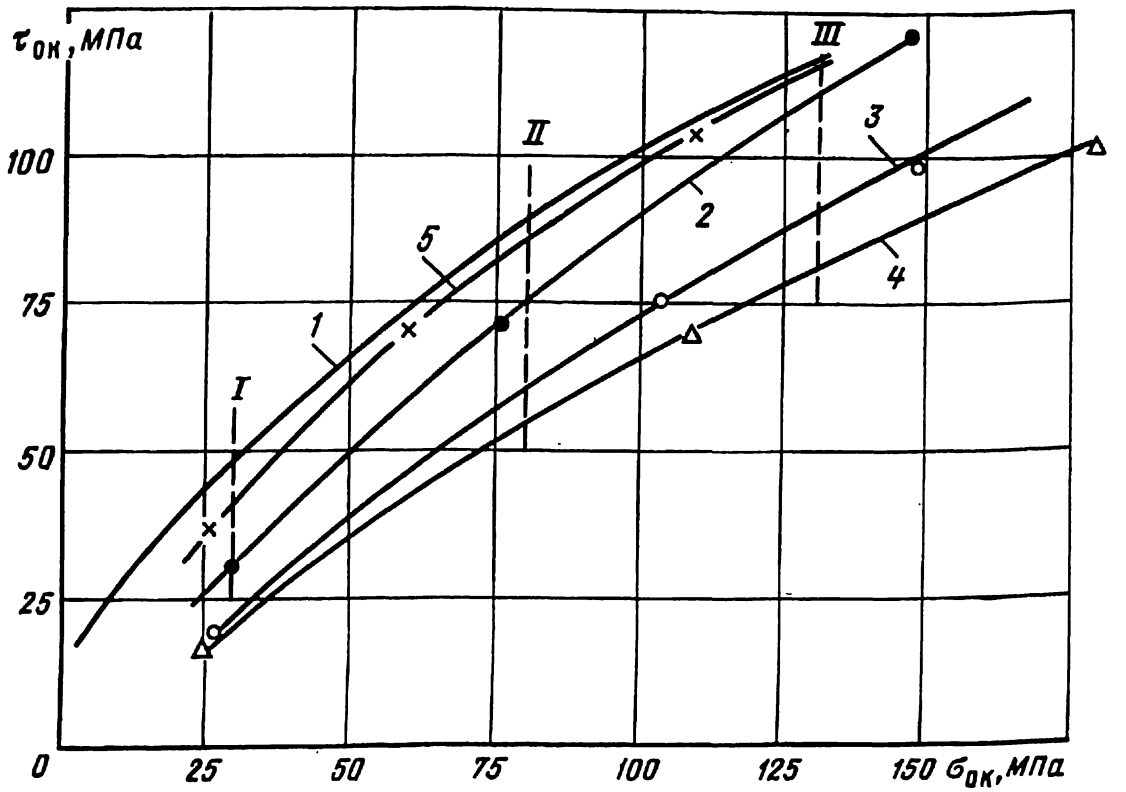


Рис. 3.5. Сечения предельной поверхности прочности песчаников (Донбасс) плоскостями, проходящими через пространственную ось главных напряжений:

1 — $\mu_\sigma = -1$; *2* — $\mu_\sigma = -0{,}62$; *3* — $\mu_\sigma = +0{,}05$; *4* — $\mu_\sigma = +1$; *5* — огибающая предельных кругов напряжений Мора; *I, II, III* — сечения октаэдрическими плоскостями (см. рис. 3.6)

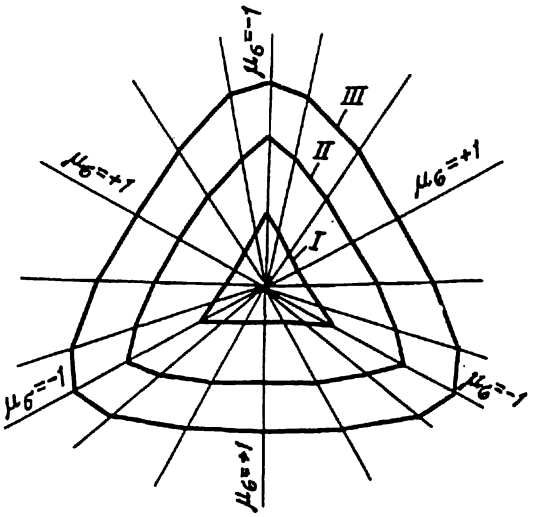


Рис. 3.6. Сечения предельной поверхности прочности песчаника (Донбасс) октаэдрическими плоскостями:

1 — $\sigma_{ок} = 30$ МПа; *2* — $\sigma_{ок} = 80$ МПа; *3* — $\sigma_{ок} = 130$ МПа

нентного сжатия с изменением параметра типа (вида) напряженного состояния построим предельные поверхности прочности некоторых горных пород, испытанных в монолитных образцах без ярко выраженных плоскостей ослабления (трещин и слоистости) и поэтому условно принятых за изотропные.

На рис. 3.5 даны сечения предельной поверхности прочности плоскостями, проходящими через пространственную диагональ и соответствующими различными значениями μ_σ для песчаников Донбасса в координатах $\tau_{ок}$, $\sigma_{ок}$, т.е. размеры сечений уменьшены на $\sqrt{3}$. Это сделано специально, чтобы показать насколько сечения предельной

поверхности плоскостями, проходящими через пространственную диагональ, отличаются от огибающей предельных кругов напряжений, построенных по методике Мора. Видно, что огибающие построенные при $\mu_\sigma = -1$ практически совпадают с огибающими, построенными по методике Мора. Последние располагаются несколько выше предельной огибающей при $\mu_\sigma = -1$. Предельные огибающие при других значениях параметра Надаи-Лоде располагаются ниже огибающей, полученной при $\mu_\sigma = -1$.

Сечения предельных поверхностей горных пород октаэдрическими плоскостями (рис. 3.6) показывают, что в отличие от широко распространенного мнения, предельные поверхности не являются поверхностями вращения, а имеют более сложную форму.

Сечения предельных поверхностей при напряжениях близких к плоскому напряженному состоянию напоминают треугольник, что соответствует II теории прочности. С увеличением октаэдрических нормальных напряжений выпуклость сторон треугольника увеличивается и сечение предельной поверхности стремится к окружности. Это подтверждает правильность выводов А.Н. Ставрогина [13] и других исследователей о том, что при расчетах прочности горных пород в условиях высокого всестороннего сжатия можно использовать III теорию прочности.

3.3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ ПРОЧНОСТИ

С целью выбора критерия прочности, наилучшим образом описывающего влияние сложного напряженного состояния на сопротивление горных пород разрушению, выполнено сравнение* экспериментальных данных о прочности горных пород с теоретическими, рассчитанными по различным критериям. При этом использованы показатели прочности горных пород, полученные при испытании в условиях сложного напряженного состояния, а также данные других исследователей, определявших прочность горных пород на установках типа Кармана.

Теоретические значения прочности пород рассчитывали по уравнениям классических и энергетических теорий прочности, а также по обобщенному условию прочности Писаренко-Лебедева (табл. 3.3).

Первые гипотезы об условиях наступления предельного напряженного состояния при произвольной системе напряжений были высказаны Галилеем, Лейбницем, Кулоном, Сен-Венаном, Мором и были широко применены для расчетов сопротивления материалов, конструкций.

Энергетические теории за критерий прочности принимают предел удельной потенциальной энергии (Бельтрами, Хейг) или ту ее часть, которая идет на изменение формы (Губер, Мизес, Генки). Теория Губера, Мизеса-Генки была видоизменена для распространения на

*При участии И.А. Соломиной.

Таблица 3.3. Основные критерии и теории прочности пород

Авторы критериев прочности	Условия прочности для трехосного неравнокомпонентного сжатия
	Классические теории прочности
Галилей-Лейбниц (теория максимальных нормальных напряжений)	$R_{сж} \leqslant \sigma_1 \leqslant R_р$ $R_{сж} \leqslant \sigma_2 \leqslant R_р$ (3.25) теория не учитывает сложного напряженного состояния $R_{сж} \leqslant \sigma_3 \leqslant R_р$
Сен-Венан, Мариотт (теория приведенных напряжений)	$R_{сж} \leqslant \sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3) \leqslant R_р$ (3.21)
Кулон, Мор (теория максимальных касательных напряжений)	$\sigma_1 - \frac{R_р}{R_{сж}} \sigma_3 \leqslant R_р$ (3.27)
	Энергетические теории прочности
Бельтрами, Хейг	$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)} \leqslant R_{сж}$ (3.28)
Губер, Мизес, Генки	$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \leqslant R_{сж}$ (3.29)
Шлейхер, Буржинский, Ягн	$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) + (R_{сж} - R_р)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \leqslant R_р R_{сж}$ (3.30)
Боткин	$\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} + \frac{\sqrt{2}(R_{сж} - R_р)}{R_{сж} + R_р}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \leqslant \frac{2\sqrt{2} R_{сж} R_р}{R_{сж} + R_р}$ (3.31)
Дощинский	$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \frac{2\nu(2-\nu)}{1-\nu^2}(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)} + \frac{R_{сж} - R_р}{R_{сж} + R_р}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \leqslant \frac{2R_{сж}R_р}{R_{сж} + R_р}$ (3.32)
	Обобщенный критерий
Писаренко, Лебедев	$\frac{R_р^2}{R_{сж}^2} \frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] + (1 - \frac{R_р^2}{R_{сж}^2})\sigma_1^2 \leqslant R_р^2$ (3.33)

материалы, по-разному сопротивляющиеся растяжению и сжатию (Шлейхер, Буржинский, Ягн и др.).

Подавляющее большинство этих гипотез представляет собой частные случаи более общей зависимости, содержащей первый инвариант тензора напряжений

$$J_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \tag{3.34}$$

и второй инвариант девиатора напряжений

$$J_2' = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2], \tag{3.35}$$

где σ_1, σ_2, σ_3 — соответственно максимальное, промежуточное и минимальное главные напряжения.

Предельная поверхность по этим гипотезам является поверхностью вращения, образующая которой представляет собой кривую второго порядка.

По предложенному Г.С. Писаренко и А.А. Лебедевым обобщенному критерию прочности условие наступления предельного состояния записывается в виде

$$x^2\sigma_i^2 + (1 + x^2)\sigma_1^2 \leqslant R_p^2, \tag{3.36}$$

где $x = R_p/R_{сж}$, σ_i — интенсивность напряжений,

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}.$$

Таким образом, условие прочности будет иметь вид

$$\frac{R_p^2}{R_{сж}^2}\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] + (1 - \frac{R_p^2}{R_{сж}^2})\sigma_1^2 \leqslant R_p. \tag{3.37}$$

Приведенные критерии прочности предполагают определение следующих величин из простейших опытов: предел прочности при одноосном сжатии $R_{сж}$; предел прочности при одноосном растяжении R_p; коэффициент Пуассона ν.

Сравнительный анализ (табл. 3.4) показывает, что все рассмотренные условия прочности не соответствуют экспериментально полученным данным о прочности горных пород в условиях трехосного неравномерного сжатия. Большинство из них более или менее удовлетворительно описывают прочность в условиях плоского напряженного состояния, для условий же трехосного неравнокомпонентного сжатия рассмотренные критерии прочности явно не приемлемы, расхождения теоретических значений прочности с экспериментальными весьма велики.

Таблица 3.4. Расчетные значения критериев (числитель) и их расхождения с экспериментальными (знаменатель)

Горная порода	Условия эксперимента			Критерии прочности							Обобщенный
				классические		энергетические					
	$\sigma_3 \cdot 10^{-5}$, Па	$\sigma_2 \cdot 10^{-5}$, Па	$R_1 \cdot 10^{-5}$, Па	Сен-Венана, Мариотта (приведенных напряжений)	Кулона-Мора (максимальных касательных напряжений)	Бельтрами-Хейга	Губера, Мизеса	Шлейхера, Буржинского, Ягна	Боткина	Дощинского	
Аргиллит № 25	0	−51	−270	80	35	262	250	−4890	−2	4,0	33
				2,4	1,06	1,0	0,96	—	—	0,07	1,0
$R_{сж} = 262 \cdot 10^{-5}$ Па	0	−170	−170	85	22	208	170	−34 510	−34	−77	22,8
$R_р = 33 \cdot 10^{-5}$ Па				2,6	0,7	0,8	0,6	—	—	—	0,7
$\nu = 0{,}25$	−250	−1130	−1130	265	103	1310	880	1 120 560	−1510	−872	274
				8,0	3,1	5,0	3,3	130	—	—	8,3
	−250	−720	−1150	220	100	1120	780	770 170	−1230	−709	270
				6,7	3,0	4,3	3,0	89,0	—	—	8,2
	−250	−250	−1150	102	100	1070	905	750 900	−550	−311	276
				3,1	3,0	4,1	3,4	86,8	—	—	8,4
Аргиллит № 37	0	−285	−285	143	34,2	350	285	−198 500	−224	485	33,6
				1,9	0,5	0,5	0,45	—	—	3,6	0,45
$R_{сж} = 637 \cdot 10^{-5}$ Па	0	−110	−580	173	69,5	565	535	−71 180	−12	−0,2	63
$R_р = 75 \cdot 10^{-5}$ Па				2,3	0,9	0,8	0,8	—	—	—	0,8
$\nu = 0{,}25$	−300	−1460	−1460	373	125	1680	1160	1039 760	−1900	−1127	328
				5,0	1,7	2,6	1,8	21	—	—	4,4

Продолжение табл. 3.4

Горная порода	Условия эксперимента			Критерии прочности							
				классические		энергетические					Обобщенный
	$\sigma_3 \cdot 10^{-5}$, Па	$\sigma_2 \cdot 10^{-5}$, Па	$R_1 \cdot 10^{-5}$, Па	Сен-Венана, Мариотта (приведенных напряжений)	Кулона-Мора (максимальных касательных напряжений)	Бельтрами-Хейга	Губера, Мизеса	Шлейхера, Буржинского, Ягна	Боткина	Дощинского	
Аргиллит № 37	−300	−1020	−1700	980 13,0	960 1,3	1650 2,6	1200 1,9	1048160 21,9	−1630 —	−961 —	332 4,4
	−300	−300	−1835	830 11,0	80 1,1	1730 2,7	1520 2,4	1583260 33,1	−530 —	−306 —	346 4,6
Песчаник № 65[Г] $R_{сж} = 450 \cdot 10^{-5}$ Па $R_р = 46 \cdot 10^{-5}$ Па $\nu = 0{,}21$	0	−233	−455	144 3,1	46 1,0	460 1,03	390 0,9	−61160 —	−187 —	−117 —	39,4 0,86
	0	−97	−510	128 2,8	51 1,1	500 1,1	464 1,03	3500 0,17	−30 —	−10 —	46,8 1,02
	−200	−1157	−1157	685 15,0	84 1,8	1400 3,1	950 2,1	945000 45,7	−1510 —	−800 —	220 4,8
	−200	−873	−1500	700 15,2	50 1,1	1500 3,4	1115 2,5	1263300 61,0	−1340 —	−710 —	230 5,0
	−200	−200	−1640	586 12,7	36 0,8	1570 3,4	1430 3,2	1660000 80,0	−290 —	−120 —	246 5,3
	−320	−1580	−1580	985 21,0	162 3,5	1900 4,2	1250 2,8	2428400 117,0	−2190 —	−1440 —	340 7,4
Песчаник (Darley Dale) $R_{сж} = 680 \cdot 10^{-5}$ Па $R_р = 50 \cdot 10^{-5}$ Па $\nu = 0{,}2$	−70	−70	−1050	—	—	—	970 1,4	297800 8,8	−60 —	−25 —	89 1,8
	−140	−140	−1400	—	—	—	1250 1,8	775200 22,8	−240 —	−145 —	167 3,3
	−210	−210	−1750	—	—	—	1525 2,2	1467000 43,1	−420 —	−260 —	235 4,7

Песчаник (Pennant) $R_{сж} = 1400 \cdot 10^{-5}$ Па $R_р = 142 \cdot 10^{-5}$ Па $\nu = 0{,}2$	−70	−70	−1820	—	—	—	1750 1,2	761 100 3,8	220 0,6	160 0,6	190 1,3
	−140	−140	−2200	—	—	—	2060 1,5	1 505 000 7,76	60 0,16	450 1,7	248 1,7
	−210	−210	−2650	—	—	—	2420 1,7	2 790 000 14,0	−60 —	−16 —	320 2,3
	−280	−280	−2950	—	—	—	2640 1,9	3 758 300 18,9	−290 —	−120 —	390 2,7
Мрамор (Коелга) $R_{сж} = 100 \cdot 10^{-5}$ Па $R_р = 60 \cdot 10^{-5}$ Па	−100	−100	−1450	—	—	—	1350 1,4	—	−145 —	—	130 2,2
	−1600	−1600	−5350	—	—	—	3750 3,8	—	−5350 —	—	1600 26,7
	−2600	−2600	−7000	—	—	—	4400 4,4	—	−9000 —	—	2600 43,0
Алевролит Д-19 (Донбасс) $R_{сж} = 1660 \cdot 10^{-5}$ Па $R_р = 96 \cdot 10^{-5}$ Па	−670	−670	−4000	—	—	—	3330 2,0	—	−1700 —	—	700 7,3
	−2700	−2700	−10 350	—	—	—	7660 4,6	—	−8100 —	—	2700 28,0
Песчаник П-0 (Донбасс) $R_{сж} = 2600 \cdot 10^{-5}$ Па $R_р = 208 \cdot 10^{-5}$ Па	−200	−200	−3600	—	—	—	3400 1,3	—	10 0,02	—	360 1,7
	−600	−600	−5100	—	—	—	4500 1,7	—	−1170 —	—	640 3,1
	−2100	−2100	−9800	—	—	—	7620 2,9	—	−5880 —	—	2180 10,5
Известняк (Эстония) $R_{сж} = 800 \cdot 10^{-5}$ Па $R_р = 38 \cdot 10^{-5}$ Па	−100	−100	−1270	—	—	—	1160 1,5	—	−220 —	—	−119 3,1
	−415	−415	−2300	—	—	—	1870 2,3	—	−1320 —	—	−425 11,1

Примечание: Знак минус в числителе показывает, что при данных условиях по расчету разрушение произойти не могло

3.4. ОБОБЩЕННОЕ УСЛОВИЕ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД, УЧИТЫВАЮЩЕЕ ВИД НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Прежде чем приступить к установлению обобщенного условия прочности горных пород, рассмотрим основные требования, предъявляемые к такому условию. Согласно последних работ по вопросам прочности различных материалов, условие прочности (называемое также в ряде работ критерием прочности) должно иметь четкий физический смысл, формулироваться уравнением с минимальным количеством констант материала, определяемых из простейших опытов. Для материалов по разному сопротивляющихся сжатию и растяжению, какими являются все горные породы, входящие в условие прочности опытные механические характеристики целесообразно отразить двумя параметрами.

Главным требованием, предъявляемым к условию прочности является удовлетворительное совпадение результатов теоретических расчетов с опытными данными. При этом идеального совпадения быть не может, так как с одной стороны вывод уравнения связан с некоторой идеализацией свойств материалов, с другой — экспериментальные данные всегда характеризуются разбросом результатов опытов.

Учитывая предъявляемые требования к условиям прочности и используя результаты исследований предельных поверхностей горных пород, выясним возможность нахождения такого условия прочности.

Предельные поверхности прочности горных пород, как показано выше, являются сложными пространственными фигурами с осью, проходящей через пространственную диагональ главных напряжений. Эти фигуры напоминают трехгранную пирамиду с криволинейными ребрами и выпуклыми боковыми поверхностями. Форма предельной поверхности между ребрами определяется степенью влияния вида напряженного состояния на прочность горных пород. Для изотропных горных пород в визуально монолитном состоянии влияние вида напряженного состояния может быть описано уравнением (3.17).

В работе [14] было показано, что огибающая предельных кругов напряжений Мора может быть с достаточно высокой точностью установлена по ее обобщенному безразмерному виду, предложенному проф. М.М. Протодьяконовым и по данным определения прочности горных пород при растяжении и сжатии.

Главные напряжения в обобщенном виде при $\mu_\sigma = -1$ согласно рис. 3.7:

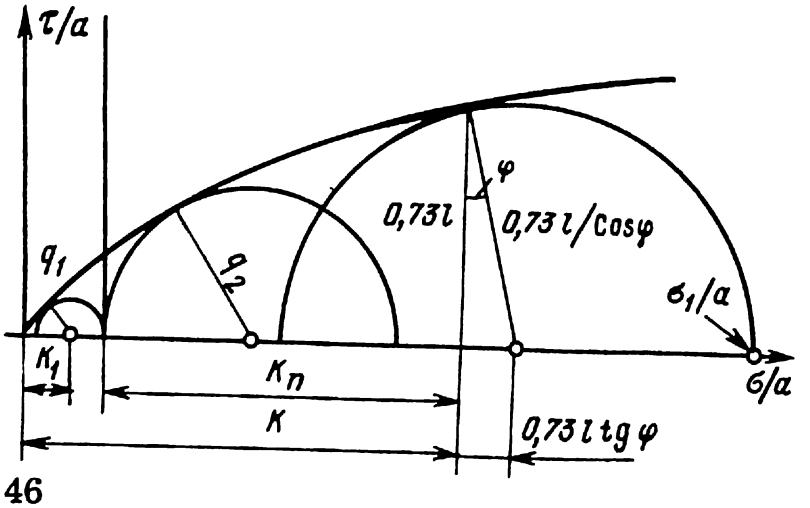


Рис. 3.7. Огибающая предельных кругов напряжений Мора с безразмерными параметрами

$$\sigma_1 = [K - (K_1 + q_1) + 0{,}73\,l\ \mathrm{tg}\,\varphi + \frac{0{,}73\,l}{\cos\varphi}]\,a; \tag{3.38}$$

$$\sigma_3 = [K - (K_1 + q_1) + 0{,}73\,l\ \mathrm{tg}\,\varphi - \frac{0{,}73\,l}{\cos\varphi}]\,a. \tag{3.39}$$

Так, как параметр Надаи-Лоде

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \text{ и } \sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \mu_\sigma \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}, \tag{3.40}$$

то подставляя в уравнение (3.40) значения σ_1 и σ_3, получим значение σ_2 в обобщенном виде:

$$\sigma_2 = [K - (K_1 + q_1) + 0{,}73\,l\ \mathrm{tg}\,\varphi + \frac{\mu_\sigma\, 0{,}73\,l}{\cos\varphi}]\,a. \tag{3.41}$$

Нормальное октаэдрическое напряжение

$$\sigma_{ок} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3); \tag{3.42}$$

$$\sigma_{ок} = [K - (K_1 + q_1) + 0{,}73\,l\ \mathrm{tg}\,\varphi + \frac{\mu_\sigma\, 0{,}73\,l}{3\cos\varphi}]\,a, \tag{3.43}$$

а тангенциальное октаэдрическое напряжение

$$\tau_{ок} = \frac{0{,}73\,l\,\sqrt{2}\sqrt{3 + \mu_\sigma^2}}{\cos\varphi\ 3}\,a. \tag{3.44}$$

Значение предельного главного напряжения σ_1 с учетом вида напряженного состояния можно найти решая совместно уравнения (3.40 и 3.42):

$$\sigma_1 = 2\sigma_{ок} - \frac{\mu_\sigma}{3}(\sigma_1 - \sigma_3) - \sigma_3. \tag{3.45}$$

Или

$$\sigma_1 = 2\sigma_{ок} - \sigma_3 - \frac{2\,\mu_\sigma}{3}\tau_{max}. \tag{3.46}$$

Введя влияние параметра вида напряженного состояния в функцию октаэдрического касательного напряжения, получим

$$\tau_{ок} = \tau_{max}\frac{\sqrt{2}\sqrt{3 + \mu_\sigma^2}}{3\,[1 + 0{,}5(1 + \mu_\sigma)(1 - 0{,}25\,K_n)}. \tag{3.47}$$

Тогда, подставив в уравнение (3.46) значение τ_{max} из уравнения (3.47) и значение $\tau_{ок}$ из уравнения (3.44), окончательно получим

$$\frac{R_1}{a} = K_n + 0{,}73\,l\ \mathrm{tg}\,\varphi + \frac{0{,}73\,l}{\cos\varphi}\left\{1 + \frac{2\,\mu_\sigma}{3}[1 + 0{,}5\,(1 + \mu_\sigma)(1 - 0{,}25\,K_n)]\right\} \tag{3.48}$$

где $K_n = K - (K_1 + q_1)$.

Это и будет уравнение прочности в обобщенном виде, учитывающее вид напряженного состояния.

Для нахождения R_1 рекомендуется следующий порядок вычислений:

1. По пределам прочности горной породы при одноосных сжатии и растяжении, определяется отношение $R_{сж}/R_р$. Используя табл. 3.5 находятся величины безразмерного радиуса круга Мора при растяжении q_1 (или q_2), координата касания кругов Мора при растяжении и сжатии $(K_1 + q_1)$, а также параметр огибающей a по формуле

$$a = \frac{R_р}{2q_1} = \frac{R_{сж}}{2q_2}. \qquad (3.49)$$

Таблица 3.5. Таблица параметров для определения прочности горных пород

K	l	$K_1 + q_1$	q_1	q_2	$\frac{R_{сж}}{R_р}$	tg φ	$\varphi°$
2,0	0,920					0,0504	2°50′
1,8	0,904					0,065	3°40′
1,6	0,865					0,085	4°50′
1,4	0,865					0,113	6°30′
1,2	0,824					0,153	8°40′
1,0	0,771					0,212	12°00′
0,9	0,740					0,249	14°00′
0,8	0,700					0,295	16°30′
0,7	0,660					0,349	19°30′
0,6	0,608	1,258	0,479	0,666	1,39	0,408	22°10′
0,5	0,547	1,133	0,443	0,661	1,49	0,308	25°40′
0,4	0,467	0,992	0,398	0,654	1,69	0,563	29°20′
0,3	0,3925	0,829	0,342	0,636	1,86	0,660	33°30′
0,2	0,2947	0,636	0,271	0,597	2,21	0,768	37°30′
0,1	0,1772	0,403	0,179	0,531	2,97	0,96	43°50′
0,08	0,1508	0,3477	0,1567	0,508	3,25	1,02	45°30′
0,06	0,1208	0,2880	0,1310	0,473	3,61	1,10	47°40′
0,05	0,1056	0,2565	0,1175	0,453	3,85	1,15	49°00′
0,04	0,0894	0,2218	0,1028	0,421	4,10	1,22	50°40′
0,03	0,0721	0,1855	0,0875	0,387	4,48	1,32	52°50′
0,02	0,0533	0,1446	0,0685	0,344	5,04	1,45	55°30′
0,01	0,0316	0,0960	0,0460	0,279	6,08	1,73	60°00′
0,008	0,0268	0,0848	0,0408	0,258	6,32	1,82	61°20′
0,006	0,0215	0,0716	0,0346	0,229	6,62	1,96	63°00′
0,005	0,0188	0,0646	0,0313	0,215	6,86	3,08	64°20′
0,004	0,0158	0,0566	0,0275	0,202	7,35	2,18	65°20′
0,003	0,0129	0,484	0,0236	0,185	7,85	3,34	66°50′
0,002	0,0094	0,0388	0,0190	0,166	8,74	2,62	69°10′
0,001	0,0056	0,0267	0,0132	0,132	10,0	3,08	72°00′
0,0009	0,0052	0,0255	0,0126	0,130	10,3	3,16	72°33′
0,008	0,0046	0,0240	0,0119	0,127	10,7	3,26	73°00′
0,0007	0,0043	0,0223	0,0110	0,123	11,2	3,37	73°30′
0,0006	0,0038	0,0205	0,0101	0,115	11,4	3,49	74°00′
0,0005	0,0033	0,0185	0,0091	0,107	11,8	3,66	74°40′
0,0004	0,0028	0,0141	0,0069	0,091	13,2	4,15	76°30′
0,0002	0,0017	0,0114	0,0056	0,081	14,5	4,61	77°40′
0,0001	0,0010	0,0080	0,0039	0,068	17,4	5,47	79°40′

Продолжение табл. 3.5

K	l	$K_1 + q_1$	q_1	q_2	$\frac{R_{сж}}{R_р}$	tg φ	φ
0,00008		0,0071	0,0035	0,0634	18,2	5,80	80°10′
0,00006		0,0062	0,0030	0,0586	19,5	6,18	80°50′
0,00005		0,0057	0,0028	0,0557	19,9	6,48	81°10′
0,00004		0,0051	0,0025	0,0537	21,5	6,92	81°50′
0,00003		0,0055	0,0023	0,0500	22,7	7,43	82°20′
0,00002		0,0037	0,0018	0,0453	25,3	8,43	83°10′
0,00001		0,0026	0,0013	0,0373	29,6	9,80	84°10′
0,000008		0,00227	0,00113	0,0362	32,0		
0,000006		0,001963	0,00098	0,0329	33,6		
0,000004		0,001603	0,00080	0,0291	36,4		
0,000002		0,001131	0,00056	0,0241	43,5		
0,000001		0,000801	0,00040	0,0203	50,7		

2. По величине суммы $\frac{\sigma_3}{a} + K_1 + q_1$, определяем сумму $K + 0{,}73l\ \text{tg}\ \varphi - \frac{0{,}73l}{\cos\varphi}$. Так как $l = \left(\frac{K^2}{K^2+1}\right)^{3/8}$, а φ есть также функция K, то чтобы избежать сложных вычислений составлен график зависимости K от суммы $K + 0{,}73l\ \text{tg}\ \varphi - \frac{0{,}73l}{\cos\varphi}$ (рис. 3.8, кривая *1*). Вычтя из величины K координату касания кругов Мора ($K_1 + q_1$) найдем K_n. Для найденного значения K и на том же графике находим значения выражений $0{,}73l\ \text{tg}\ \varphi$ (кривая 2) и $0{,}73l/\cos\varphi$ (кривая 3).

Обобщенное уравнение прочности составлено на основе теории прочности Мора, имеющей четкий физический смысл, предусматривающей разрушение как сдвигом, так и отрывом. Входящие в него через параметр a прочность $R_{сж}$ и $R_р$ учитывают степень хрупкости материалов, их неоднородность и определяются при простейших опытах.

Из анализа 3.4 и 3.6 следует, что расчетные значения прочности, определенные по предложенному обобщенному уравнению прочности наилучшим образом соответствует экспериментальным данным, т.е. предложенное уравнение лучше других критериев прочности соответствует главному требованию, предъявляемому к уравнениям прочности.

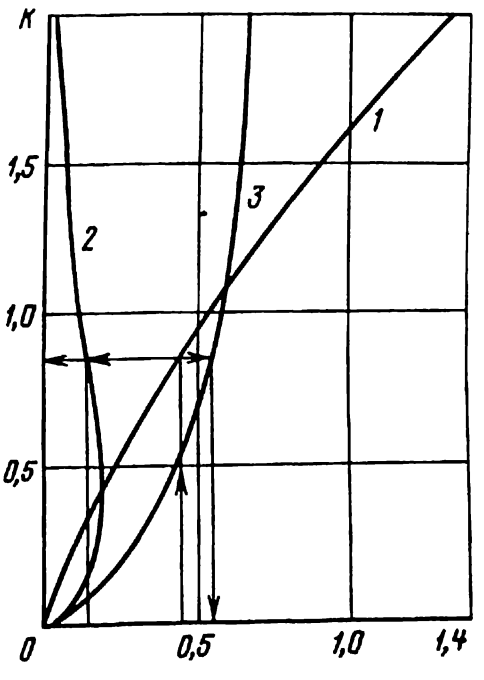


Рис. 3.8. График для определения безразмерных параметров K_n (*1*), $0{,}73l$ tg φ (*2*) и $0{,}73l/\cos\varphi$ (*3*), входящих в уравнение прочности

Таблица 3.6. Показатели прочности пород, рассчитанные по обобщенному уравнению, и экспериментальные

Порода и ее показатели прочности	Условия эксперимента		Значения R_1, МПа		Отношение расчетного значения к экспериментальному
	σ_3, МПа	σ_2, МПа	экспериментальное	расчетное	
Аргиллит № 25 $R_{сж}$ = 26,2 МПа $R_р$ = 3,3 МПа	0	5	27	28	1,03
	0	11	21	26	1,21
	0	17	17	18	1,05
	25	25	115	101	0,87
	25	42	115	104	0,90
	25	72	113	100	0,87
	25	113	114	80	0,71
Аргиллит № 37 $R_{сж}$ = 63,7 МПа $R_р$ = 7,5 МПа	0	11	58	65	1,12
	0	24	46	62	1,35
	0	28	28	42	1,50
	30	30	183	183	1,00
	30	103	170	181	1,06
	30	146	146	139	0,96
Аргиллит № 30 $R_{сж}$ = 27,0 МПа $R_р$ = 3,1 МПа	0	51	25	28	1,11
	0	12	23	21	1,13
	0	16	16	19	1,13
Песчаник № 65 $R_{сж}$ = 45,0 МПа $R_р$ = 4,6 МПа	0	10	51	48	0,94
	0	23	45	45	1,00
	0	29	29	31	1,08
	200	20	164	148	0,90
	20	48	166	152	0,92
	20	87	150	147	0,98
	20	116	116	109	0,94
	32	32	200	180	0,90
	32	58	205	186	0,91
	32	111	183	187	0,97
	32	158	158	135	0,86
Песчаник $R_{сж}$ = 68,0 МПа $R_р$ = 5,0 МПа	7	7	105	114	1,09
	14	14	100	152	1,08
	21	21	175	194	1,11
Песчаник: * $R_{сж}$ = 140,0 МПа $R_р$ = 14,2 МПа	7	7	182	205	1,11
	14	14	220	246	1,12
	21	21	265	270	1,02
	28	28	295	305	1,04
Мрамор: ** $R_{сж}$ = 100,0 МПа $R_р$ = 6,0 МПа	10	10	145	180	1,24
	160	160	535	770	1,42
	260	260	700	850	1,21
Алевролит Д-19** (Донбасс): $R_{сж}$ = 166,0 МПа $R_р$ = 9,6 МПа	67	67	400	635	1,58
	270	270	1035	1280	1,24

Продолжение табл. 3.6

Порода и ее показатели прочности	Условия эксперимента		Значения R_1, МПа		Отношение расчетного значения к экспериментальному
	σ_3, МПа	σ_2, МПа	экспериментальное	расчетное	
Песчаник П-0** (Донбасс):	20	20	360	347	0,96
$R_{сж}$ = 230,0 МПа	60	60	510	550	1,08
$R_р$ = 20,8 МПа	210	210	980	1020	1,05
Известняк** (Эстонсланец):	10	10	127	155	1,22
$R_{сж}$ = 80,0 МПа	41	41	230	380	1,65
$R_р$ = 3,8 МПа					

*Опыты Н.Дж. Прайс
**Опыты А.Н. Ставрогина

Некоторое несоответствие расчетных значений прочности с экспериментальными, полученными А.Н. Ставрогиным связано, по-видимому, с заниженными значениями прочности горных пород при растяжении. Прочность таких пород при растяжении должна быть близкой 0,1 предела прочности при одноосном сжатии. Соответствие расчетных огибающих предельных кругов напряжений Мора экспериментальным нами подтверждалось когда прочность на растяжение определялась методом раскалывания пластин клиньями и рассчитывалась по формуле $R_р = F/S$ [10].

Таким образом, вид напряженного состояния горных пород оказывает существенное влияние на их прочность. По мере увеличения степени объемного сжатия это влияние затухает. Предельная поверхность прочности из трехгранной пирамиды постепенно переходит в цилиндр Мизеса. Предложенное обобщенное условие прочности позволяет оценить прочность горных пород с учетом вида и степени напряженного состояния.

4. СТРУКТУРНОЕ НЕСООТВЕТСТВИЕ ОБРАЗЦА И МАССИВА. РАЗНИЦА ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ. МАСШТАБНЫЙ ФАКТОР

4.1. НЕОДНОРОДНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД И УГЛЕЙ

Земная кора в результате геологического формирования оказалась сложенной комплексом самых различных горных пород. Наибольшее разнообразие горных пород наблюдается вблизи земной поверхности, где в настоящее время и сосредоточена добыча полезных ископаемых.

Процессы формирования горных пород (цикличность седиментации, условия внедрения и остывания магмы) определили их первоначальную структуру и текстуру, а также их первичную трещинова-

тость (трещины усыхания, сжатия при охлаждении и т.п.). Последующие процессы диагенеза и метаморфизма, тектонические движения, многочисленные процессы выветривания, растворения и цементации определили петрографическую неоднородность горных пород. По своему происхождению горные породы принято разделять на осадочные, изверженные и метаморфические.

Угли сформировались в процессе накопления, разложения и дальнейшего преобразования (гелификации, фюзенизации, элювиации, метаморфизма) исходного растительного и другого органического материала. Вместе с тем все угли состоят из сравнительно немногочисленных микроскопических органических и неорганических компонентов. Видимые невооруженным глазом составные части углей (ингредиенты) представляют собой различные комбинации этих микрокомпонентов. В настоящее время выделяют два простых ингредиента — витрен (стеклянный) и фюзен (вытянутый) и два сложных — дюрен (твердый) и кларен (светлый).

В зависимости от преобладающего ингредиента угли разделяют на пять типов: клареновые, дюрено-клареновые, кларено-дюреновые, дюреновые и фюзено-ксиленовые. В каждом типе имеются однородные и неоднородные (полосчатые или комплексно-полосчатые) компоненты.

Эти петрографические составные части углей характеризуются различным удельным весом и крепостью. Наибольшей крепостью обладает дюрен, далее следует кларен, витрен и фюзен. Наиболее резкое различие в механических свойствах ингредиентов наблюдается на низших стадиях метаморфизма. Процесс углефикации ведет к сближению их механических свойств. Кларен и основная масса становятся неразличимыми. В антрацитах различие в твердости составных частей угля в значительной степени стирается.

4.2. ТРЕЩИНОВАТОСТЬ МАССИВА И ОБРАЗЦОВ РАЗЛИЧНОГО РАЗМЕРА

Важной характеристикой горных пород является и их дефектность (дефекты кристаллической решетки минералов, микро- и макротрещины кристаллов, зерен и пород, пористость, крупные тектонические нарушения). Изменяясь во времени, эти дефекты влияют на механические свойства пород, а в ряде случаев полностью изменяют их признаки и название.

Рассматривая горные породы в различных объемах (от микроскопических до крупных блоков, целиков и больших массивов), нетрудно заметить, что чем больший объем пород мы изучаем, тем большего размера дефекты в нем содержатся.

Это особенно хорошо заметно на углях, которые, кроме структурных и текстурных дефектов, содержат значительное число трещин.

Н.П. Аммосов и Н.В. Еремин все эндогенные трещины угля по своей протяженности делят на четыре группы:

I — пересекающие пласт на всю мощность;

Таблица 4.1. Расстояние (см) между эндогенными трещинами в каменных углях различных марок и категорий по Н.П. Аммосову и Н.В. Еремину

Марки углей	Категории углей			
	блестящие неяснополосчатые		полублестящие полосчатые	
	Группы трещин			
	II	III	II	III
Длиннопламенные	5—15	1,5—6,0	—	—
Газовые	4—15	0,5—4,0	10—20	1,5—10
Жирные	8—15	0,2—0,3	7—15	1—4
Коксовые	—	—	5—20	1,5—10

Продолжение табл. 4.1

Марки углей	Категории углей			
	полуматовые полосчатые		однородные матовые и полуматовые, полуматовые штриховатые	
	Группы трещин			
	II	III	II	III
Длиннопламенные	—		—	—
Газовые	15—30	2—10	10—30	5—20
Жирные	—	—	8—15	8—15
Коксовые	6—15	1,5—5,0	15—20	15—20

II — пересекающие отдельные пачки угля;

III — пересекающие отдельные петрографические разновидности угля внутри угольной пачки;

IV — локализованные внутри прослоев и линз витрена и витренитового угля.

В пластах простого строения трещины I группы одновременно являются и трещинами II группы. В пластах сложного строения трещины I группы располагаются довольно редко. Расстояние между трещинами IV группы зависит от степени углефикации и петрографического состава углей. Наибольшее распространение имеют трещины II и III групп (табл. 4.1). Ряд исследователей отмечает обратную связь между зиянием (раскрытием) трещин и их частостью: при меньшей частоте трещины имеют большее зияние.

Небольшие объемы породы (образцы), как правило, содержат лишь микротрещины; образцы побóльше могут дополнительно иметь трещины IV группы (малой протяженности и с небольшим зиянием); еще бóльшие образцы содержат трещины III группы (бóльшей протяженности и с бóльшим зиянием). Образцы, высота которых равна мощности пласта, подобны целикам и будут содержать трещины всех групп.

Следовательно, образцы, блоки и массивы различного размера

не являются подобными по своей структуре, поэтому их механические свойства (деформируемость, прочность и др.) не будут одинаковыми.

Массивы и образцы горных пород различного размера, не являясь подобными по своей структуре, не будут подобными и по газо- или водонасыщенности. Удельная газо- и водонасыщенность крупных блоков и массива будет выше, чем небольших образцов.

Повышенное содержание влаги в породах в свою очередь приводит к значительной разнице в механических свойствах образцов и массива.

Большинство скальных горных пород сформировалось на большой глубине при высоких температурах и давлениях. По мере поднятия к земной поверхности и эрозионного удаления вышележащих пород величина горного давления на породы и их температура уменьшались. При отделении от массива происходит дополнительная разгрузка пород, которая сопровождается увеличением их объема. При этом приповерхностный слой породы в блоках растягивается. Так как с увеличением размеров блоков (образцов) отношение объема блока к его поверхности увеличивается, то породы в блоках различного размера будут разгружаться в разной степени. У крупных блоков приповерхностный слой породы испытывает бóльшие растягивающие напряжения, чем у мелких образцов. Для весьма больших блоков эти напряжения могут достигать предельных значений, и порода будет растрескиваться.

Параллельно с разгрузкой пород от горного давления при удалении вышележащих пород эрозией происходит их охлаждение с уменьшением объема. В этом случае породы приповерхностного слоя блоков должны сжиматься. Внутри остывающего блока возникают растягивающие напряжения. Шестигранная отдельность в интрузивных породах свидетельствует о том, что и эти напряжения могут достигать предельных значений. Напряжения, вызванные охлаждением пород, могут превышать напряжения, возникшие в результате разгрузки или наоборот. И в том, и в другом случаях остаточное напряженное состояние пород в блоках и в образцах различного размера, извлеченных из массива, неодинаковое.

Так как горные породы в массиве разбиты трещинами, то их элементарные блоки (отдельности) различного размера будут напряжены по-разному. При этом величины напряжений (а в некоторых условиях и их знак) в центральной и краевой частях элементарных блоков могут быть существенно разными. Вследствие неоднородности составных частей блока (ингредиентов, зерен, кристаллов) по модулю упругости и коэффициенту расширения картина напряженного состояния элементарного блока выглядит достаточно сложной. Аналогично можно рассматривать отдельные кристаллы и зерна с их микротрещиноватостью и дефектами кристаллической решетки, что еще более усугубит сложность напряженного состояния.

Таким образом, горные породы в различных объемах, независимо от того, отделены или не отделены от земной коры, не являются

подобными по дефектности, напряженности, газо- и водонасыщенности и другим параметрам, что приводит к различию их механических, акустических, фильтрационных, электрических и многих других свойств.

4.3. ПРИЧИНЫ НАРУШЕНИЯ ПОДОБИЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ

При определении механических свойств горных пород в образцах правильной геометрической формы (кубы, цилиндры, призмы) большое значение имеют отклонения реальных рабочих поверхностей образцов горных пород от идеальной плоскости. Опыты, выполненные Б.П. Беликовым, Б.В. Залесским, М.И. Койфманом и С.Е. Чирковым, показали, что при точной обработке получаются более правильные численные значения показателей прочности. В зависимости от качества обработки образцов разница в показателях лабораторных испытаний достигает 30—50 %.

Микропрофилограммы контактных поверхностей образцов мраморизованного известняка, габбро, гранита, кварцита, песчаника и скарна показали, что контактные поверхности, формально плоские, в действительности имеют определенную выпуклость. Это объясняется тем, что при шлифовании, особенно вручную, образец горной породы истирается обычно больше по краям, чем в середине. С уменьшением размера шлифуемого образца кривизна контактных поверхностей увеличивается. При испытаниях таких образцов возникает неравномерное распределение нагрузки по торцам. Концентрация разрушающих напряжений на выпуклых участках приводит к искажению результатов, а определяемая прочность в образцах меньшего размера при обычно применяемой технологии подготовки будет заниженной.

При одноосном сжатии образцов трудно избежать эксцентричности разрушающих нагрузок, так как тщательность прилегания плит пресса к торцам образцов обычно устанавливается "на глаз". Шаровая поверхность пят большинства прессов представляет собой сферу большого радиуса и не обеспечивает тщательного прилегания образцов при их сжатии, особенно маленьких. В результате неравномерного распределения нагрузки на торец одна сторона образца деформируется более интенсивно, чем другая.

Специальными исследованиями установлено, что при испытаниях прочности одноосным сжатием образцы всегда разрушаются с некоторым эксцентриситетом e, среднее относительное значение которого (e/r) составляет 0,064.

Влияние радиуса сферической опоры пят пресса на величину эксцентриситета изучено на образцах диаметром 30, 42 и 57 мм при пяти опорах пресса с различным радиусом сфер (приложение 1). На каждой опоре разрушали по четыре образца каждого диаметра.

Установлено, что при одноосном сжатии распределение напряжений по сечению образца всегда эксцентрично. В образцах ме́ньшего размера при прочих равных условиях наблюдается бо́льший эксцент-

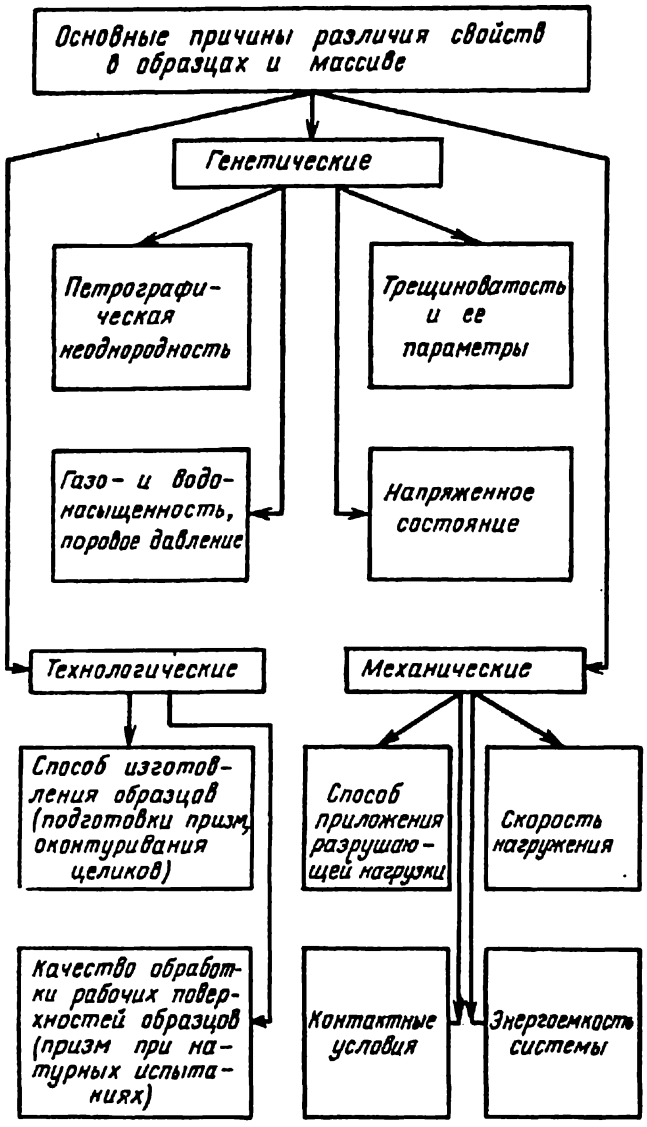


Рис. 4.1. Классификация причин, определяющих различие свойств горных пород в образцах и массиве

риситет сжимающих нагрузок. Некоторое снижение эксцентриситета имеет место у пород, дающих перед разрушением пластические деформации (алевролиты, аргиллиты, слабые песчаники), в отличие от антрацитов, кварцитов и других крепких изверженных пород.

При нагружении образца величина эксцентриситета, как правило, убывает (увеличение эксцентриситета наблюдалось лишь при испытаниях на опоре пресса с наименьшим радиусом сферы).

Наименьший эксцентриситет наблюдается при отношении радиуса образца к радиусу сферической поверхности опоры пресса 0,3—0,4.

При длительном нагружении деформирование образца горной породы сопровождается уменьшением эксцентриситета напряжений.

К первой группе причин различия свойств пород в образцах и массиве относится нарушение подобия образцов (целиков, массивов) различного размера по петрографической неоднородности (структуре, текстуре и слоистости горных пород), трещиноватости и ее параметрам (протяженности, зиянию, углу наклона, морфологии трещин), газо- и водонасыщенности, величине порового давления (газов или жидкостей), а также по остаточному напряженному состоянию (рис. 4.1). Все это можно назвать масштабным эффектом, который не зависит от исследователя и должен учитываться методикой расчета.

Так, степень насыщенности водой и газом, а также величину их порового давления можно измерить и, зная количественное их влияние на свойства горных пород, внести соответствующую поправку.

Две другие группы причин различия свойств в образцах и массиве (целиках) связаны с техникой и технологией испытаний, от которых зависит качество рабочих поверхностей образцов и натурных призм, равномерность распределения разрушающих нагрузок по сечению образцов (целиков, призм), контактные условия, скорость и динами-

ка нагружения (реальные целики и призмы при натурных испытаниях разрушаются, как правило, при значительно меньших скоростях, жесткость испытательных машин не соответствует жесткости гидроподушек, гидродомкратов, системы "порода — почва — кровля"). Первая группа причин объясняет проявление объемного (главного) масштабного эффекта, вторая группа причин — проявление поверхностного масштабного эффекта. Третья группа причин по существу не является масштабным фактором, и ее следует отнести к нарушениям механического подобия.

4.4. ХАРАКТЕР ПРОЯВЛЕНИЯ МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА

Масштабный эффект исследовали применительно к прочности горных пород в образцах различного размера. Прочность определяли методом раскалывания пластин клиньями или лежачих цилиндрических образцов плитами пресса. Анализ экспериментальных данных (табл. 4.2) показывает, что при растяжении прочность пород всегда уменьшается. Повышения прочности при увеличении размеров, как это иногда наблюдается при сжатии, не наблюдалось.

Для алевролитов, доломита и некоторых других пород эффект увеличения прочности пород при растяжении проявляется особенно сильно в области самых малых размеров (порядка 1—3 $см^2$ и меньше). Чем меньше размеры образцов, тем больше разброс показателей прочности.

Таблица 4.2. Прочность пород при растяжении (МПа) в образцах различного сечения

Горная порода, шахта, пласт, проба	Площади поперечного сечения образца, $см^2$						
	0,5	1,0	2	3	5	10	25
Песчаник, б. Полысаевская-2, проба I	—	3,3	2,1	1,4	—	—	—
То же, проба II	—	3,0	1,6	1,3	—	—	—
Песчаник, б. Полысаевская-3, основная кровля	—	—	4,5	4,1	3,5	2,5	—
Алевролит, им. Ем. Ярославского, пласт 2 Наджуринский, непосредственная кровля	—	12,0	8,2	5,9	—	—	—
Алевролит, "Комсомолец", пласт Бреевский, почва	8,3	7,2	5,3	—	—	—	—
Алевролит, б. Полысаевская-3, пласт Полысаевский II, основная кровля	—	—	—	—	3,5	2,9	1,7
Аргиллит, б. Полысаевская-2, пласт Полысаевский I, основная кровля	—	—	4,5	4,1	3,5	—	—
Аргиллит, "Комсомолец", пласт Бреевский, непосредственная кровля	—	—	1,9	1,8	1,7	1,5	—

Продолжение табл. 4.2

Горная порода, шахта, пласт, проба	Площади поперечного сечения образца, $см^2$						
	0,5	1,0	2	3	5	10	25
Мрамор, Урал	—	—	—	4,7	4,5	4,0	3,4
Доломит, Бакальское месторождение	14,0	8,2	—	—	—	—	—
Габбро, Слипчитское месторождение	—	—	11,7	11,6	11,2	10,7	—
Гранит, Жежелевское месторождение	—	—	12,3	11,0	8,8	6,5	—
Альбит с танталитом	—	—	10,0	10,0	10,0	10,0	—
Полосчатые биотитовые роговики	—	22,5	19,3	17,0	14,5	12,0	—
Роговики	—	22,0	19,0	17,0	14,5	11,0	9,0
Мелкозернистый биотитовый гранит	—	13,2	12,5	11,5	10,0	9,5	—
Мелкозернистый плагиогранит	—	12,6	12,7	12,8	—	13,3	—
Крупнозернистый биотитовый гранит	—	10,0	9,0	8,2	7,0	5,5	—

Степень проявления масштабного эффекта зависит от геолого-петрографических особенностей и прежде всего от трещиноватости и неоднородности строения горных пород. Так, в трещиноватом аргиллите она выше, чем в плотном аргиллите, значительно проявление масштабного эффекта в алевролитах и песчаниках. Слабое изменение прочности с изменением размеров наблюдается в однородном габбро и сильное в неоднородном граните.

По такой же методике большие исследования масштабного фактора были проведены применительно к ереванским туфам (табл. 4.3).

Масштабный эффект при одноосном сжатии изучался, в основном, на кубообразных образцах "полуправильной" формы, которые выкалывались из средних частей пластин. Рабочие поверхности образцов были отшлифованы с одинаковой тщательностью и имели совершенно незначительную выпуклость. Это позволяет утверждать, что образцы имели геометрическое подобие контактных поверхностей.

Боковые поверхности образцов, полученные посредством раскалывания, не обрабатывали. Можно было ожидать, что в процессе выкалывания произойдет некоторая деструкция поверхности образцов, которая может привести к проявлению так называемого поверхностного масштабного эффекта. Специальные исследования с образцами правильной и полуправильной формы показали, что поверхностный масштабный эффект при испытании образцов полуправильной формы проявляется незначительно.

Изучению прочности горных пород в образцах различного размера посвящено много работ [4], а результаты их довольно противоречивы. Одни исследователи отмечают увеличение пределов прочности

Таблица 4.3. Прочность туфов при растяжении (МПа) в образцах различного сечения по Г.Б. Кочаряну

Месторождение	Слой туфа	Площадь поперечного сечения образца, см^2						
		6	16	25	49	81	100	400
Анипемзенское	Верхний	3,6	3,0	2,4	2,1	1,8	1,7	1,6
"	Нижний	3,3	2,2	2,0	1,5	1,4	1,4	—
Артикское	Средний	1,9	1,8	1,6	1,3	12,5	1,2	—
"	Нижний	3,6	2,5	2,1	1,7	1,6	1,5	1,4
Ахтанакское	Верхний	3,5	2,4	1,9	1,6	1,6	1,5	—
"	Нижний	7,0	6,2	5,3	4,0	3,7	3,6	3,7
Маяковское	Верхний	5,7	3,7	3,3	2,4	1,8	1,7	1,6
Бюраканское	Нижний	4,3	3,3	2,8	2,0	1,8	1,8	1,7
Керплинское	Верхний	6,8	6,0	4,8	3,6	2,7	2,4	2,3

с уменьшением размеров испытываемых образцов, другие — уменьшение. Для многих однородных пород существенного проявления масштабного эффекта не обнаружено (табл. 4.4).

Согласно табл. 4.4, наиболее противоречивые результаты относятся к каменным солям. Так, по данным Стоматио и Теодореску, Г.Н. Кузнецова, А.М. Пенькова и А.А. Вопилкина, а также Г.Н. Ширко прочность каменных солей с увеличением размеров образцов увеличивается. По данным югославского исследователя М. Цветковича масштабный эффект в каменных солях отсутствует. Вместе с тем большой объем экспериментальных данных Н.С. Хачатурьяна свидетельствует о том, что прочность каменных солей с увеличением размеров образцов уменьшается. Это уменьшение, по мнению исследователя, подчиняется законам статистических теорий хрупкой прочности. С использованием вычислительного аппарата указанных теорий была оценена прочность солей в массиве.

Увеличение прочности мрамора с увеличением размеров испытываемых образцов наблюдается по данным Л.И. Барона и В.М. Курбатова, а также по результатам испытаний образцов Тырны-Аузского месторождения. И наоборот, по данным Е.И. Ильницкой, прочность мрамора с увеличением размеров испытываемых образцов уменьшается. Причин уменьшения прочности образцов с уменьшением их размера может быть много. К ним следует отнести проявление поверхностного масштабного эффекта, значительную величину эксцентриситета при сжатии образцов малого размера и кривизну рабочих торцов. Эти выводы частично подтверждены опытами Г.Б. Кочаряна на туфах Маяковского и Артикского месторождений. Полученная им прочность на образцах правильной формы малого сечения оказалась значительно меньше прочности, полученной на образцах полуправильной формы, выколотых из средних частей пластин и потому имеющих меньшую относительную выпуклость рабочих торцов.

Уменьшение прочности с уменьшением размеров образцов у пород крупнопористых и имеющих крупные включения слабых пород объясняется влиянием неоднородностей низшего порядка, размеры

Таблица 4.4. Прочность горных пород при одноосном сжатии (МПа) для образцов различного сечения

Горные породы	Площадь поперечного сечения образца, $см^2$						Данные
	2	4	10	25	50	100	
Известняк	—	—	—	160	150	140	М.И. Койфмана
Базальт	—	295	—	276	—	250	"
Базальт	—	235	—	185	170	—	Бухорца и Зенгера в обработке
Гранит	—	290	275	250	—	—	
Базальт — андезитовая лава	—	—	98	80	66	—	М.И. Койфмана
Габбро	193	190	183	174	160	—	Е.И. Ильницкой
Мрамор	—	170	160	148	140	130	"
Джеспилит	—	323	282	204	201	189	В.Г. Борисенко
Лабрадорит	—	227	200	165	150	—	"
Каменная соль рудника I	—	—	—	30	—	40	Стоматио и Теодореску в обработке М.И. Койфмана
То же, рудника II	—	—	—	22	—	29	
Каменная соль Березняковского месторождения	—	—	—	14	—	15	Г.Н. Ширко
Каменная соль Приереванского месторождения, скв. 1	—	—	—	25	22	19	Н.С. Хачатурьяна
То же, скв. 2	—	—	—	32	28	27	"
Каменная соль Лейковской площади	—	—	—	22	21	19	"
Каменная соль месторождения в Средней Азии	—	—	—	30	29	29	"
Каменная соль Аллагуватского месторождения	—	—	—	37	—	32	"
Известняк	—	45	—	53	—	—	Л.И. Барона и В.М. Курбатова
Мрамор	—	72	—	92	—	—	"
Песчаник УССР	—	72	—	77	—	—	М.И. Койфмана
Песчаник Южного Урала	103	120	—	148	—	—	"
Диабаз:							
параллельно плоскостям отдельности	182	260	—	390	—	—	Шапошникова и Залесского
перпендикулярно плоскостям отдельности	225	320	—	330	—	—	"
Роговики	237	—	—	168	—	—	С.Е. Чиркова
Алевролит шахты "Комсомолец" (Кузбасс)	82	—	—	75	—	—	"
То же, шахты Полысаевская-3	53	—	—	52	—	—	"

Продолжение табл. 4.4

Горные породы	Площадь поперечного сечения образца, $см^2$						Данные
	2	4	10	25	50	100	
Песчаник шахты им. Ем. Ярославского	54	—	—	50	—	—	С.Е. Чиркова
Песчаник шахты Полысаевская-2	60	—	—	59	—	—	"
Сланец горючий Прибалтийского бассейна	27	—	—	30	—	—	"
Известняк Прибалтийского бассейна, слой 1	44	—	—	39	—	—	"
То же, слой 3	46	—	—	50	—	—	"
То же, слой 5	53	—	—	55	—	—	"
То же, слой 6	55	—	—	53	—	—	"
Диабаз	293	—	—	309	—	—	"
Липарит	236	—	—	263	—	—	"
Тешенит	134	—	—	104	—	—	"
Габбро-норит	188	—	—	178	—	—	"
Лабрадорит	93	—	—	116	—	—	"
Гранит Токовского месторождения	175	—	—	181	—	—	"
Тырны-Аузское месторождение:							В.И. Карпова и С.Е. Чиркова
мрамор	56	—	—	72	—	—	
скарн	396	—	—	334	—	—	
гранитоид	285	—	—	222	—	—	
роговик	208	—	—	181	—	—	
Соколовское и Сорбайское месторождения:							Р.И. Тедера и Е.С. Ватолина
сиенит-порфир	150	—	—	168	—	—	
скарн скаполитовый	190	—	—	207	—	—	
бедная магнетитовая руда	149	—	—	137	—	—	
скарн оруденелый	145	—	—	123	—	—	
известняк глинистый	144	—	—	125	—	—	
туфовый порфирит	195	—	—	150	—	—	
туффит	170	—	—	136	—	—	
богатая магнетитовая руда (I)	274	—	—	180	—	—	
альбитофир	185	—	—	179	—	—	
песчаник кварцевый	166	—	—	157	—	—	
скарн гранатовый	269	—	—	285	—	—	
мартит пористый	73	—	—	95	—	—	

Продолжение табл. 4.4

Горные породы	Площадь поперечного сечения образца, $см^2$						Данные
	2	4	10	25	50	100	
диорит-порфирит (I)	200	—	—	150	—	—	
магнетит мелкозернистый	237	—	—	236	—	—	
сиенит-порфир	190	—	—	256	—	—	
скарн гранатовый с магнетитом	214	—	—	100	—	—	
эпидото-актинолитовая порода	180	—	—	150	—	—	
диорит-порфирит (II)	270	—	—	268	—	—	
роговик	272	—	—	271	—	—	
диорит-порфирит биотизированный	232	—	—	243	—	—	
пироксено-гранатовый скарн	163	—	—	205	—	—	
известняк мраморизованный	67	—	—	86	—	—	
диорит-порфирит (III)	130	—	—	135	—	—	
пироксено-эпидотовый скарн	94	—	—	42	—	—	
богатая магнетитовая руда (II)	87	—	—	110	—	—	
туф альбитофира	168	—	—	152	—	—	
Ангидриты	209	163	156	108	т/фут^2		В.Д. Скайнер
Туфы Армении:							Г.Б. Кочаряна*
Анипемзенского месторождения, верхний слой	—	17,7 / 16,5	17,5 / 16,2	16,7 / 15,0	15,4 / 14,8	— / 14,1	
то же, нижний слой	—	12,3 / 11,0	11,1 / 9,6	10,8 / 10,8	11,7 / 11,8	— / 10,2	
Артикского месторождения, верхний слой	—	2,6	2,9	3,2	3,6	—	
то же, нижний слой	—	11,4 / 18,5	16,8 / 16,7	13,5 / 13,4	11,7 / 11,3	— / 11,0	
Маяковского месторождения, верхний слой	—	20,4 / 29,5	27,7 / 25,0	26,3 / 24,5	21,5 / 21,0	— / 19,7	
Ахтанакского месторождения, верхний слой	—	12,4 / 20,9	18,0 / 17,6	17,8 / 17,0	15,2 / 14,9	— / 14,1	

* В числителе дана прочность, определенная на цилиндрических образцах правильной формы, в знаменателе — на образцах полуправильной формы.

Продолжение табл. 4.4

Горные породы	Площадь поперечного сечения образца, $см^2$						Данные
	2	4	10	25	50	100	
то же, нижний слой	—	49,4 / 51,2	57,9 / 63,6	64,5 / 70,0	74,8 / 78,0	— / 80,1	
Бюраканского месторождения, средний слой	—	24,6 / 26,0	33,0 / 30,6	41,5 / 32,6	— / 35,0	— / 35,2	
Керплинского месторождения, верхний слой	—	59,4 / 54,9	75,0 / 64,8	73,0 / 70,0	64,5 / 67,5	— / 62,2	
Породы Кавказа:							С.Е. Чиркова
аргиллит, проба 12	19,5	14,3	—	16,8	—	7,6	
аргиллит, проба 28	26,4	25,5	—	—	—	—	
аргиллит, проба 30	21,0	17,1	—	18,4	—	5,9	
песчаник, проба 52	115,0	177,5	—	90,5	—	—	
мергель, проба 60	35,7	35,2	—	20,6	—	—	
мергель, проба 62	38,4	35,8	—	26,2	—	—	

которых становятся соизмеримыми с размерами испытываемых образцов. Теоретическое обоснование такому изменению прочности имеется в работе Б.В. Матвеева. С увеличением образцов поры и включения переходят в разряд "эффективной неоднородности" (по М.В. Рацу) и, подчиняясь законам статистических теорий хрупкой прочности, способствуют уменьшению пределов прочности.

4.5. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА

Дискуссия о природе и роли масштабного эффекта, проведенная по инициативе акад. Н.Н. Давиденкова в журнале "Заводская лаборатория" (1960 г.), показала, что из всех теорий, объясняющих этот эффект, наиболее распространенными являются статистические.

В основу всех известных статистических теорий прочности положен принцип, по которому прочность всего тела определяется прочностью самого слабого места (дефекта). Дефекты внутреннего строения тела в соответствии с теорией Гриффитса можно представить в виде трещинок, расположенных внутри напряженного тела, а также пор, слабых минералов. Эти дефекты предполагаются статистически распределенными по всему объему образца, поэтому все статистические теории имеют одинаковые качественные выводы и следствия.

Основные из них следующие:

1. Рассеяние экспериментально замеряемых значений прочности закономерно.

2. Среднее значение прочности зависит от объема рабочей части нагружаемого тела. Вследствие этого прочность при переходе к более неоднородному напряженному состоянию при сохранении размеров тела повышается (например, при переходе от растяжения к изгибу).

3. Степень рассеяния характеристик прочности зависит от размеров образцов (при испытании мелких образцов она всегда выше, чем при испытании крупных).

4. Зависимость среднего значения прочности от размеров образцов имеет затухающий характер, т.е. чем крупнее испытываемые образцы, тем меньше изменение прочности, и, следовательно, масштабный эффект проявляется в наибольшей степени у мелких образцов.

Следствием первого и третьего выводов является большая чувствительность к изменению размеров верхней границы зоны рассеяния данных и малая зависимость от размеров нижней границы зоны рассеяния.

Для описания проявления масштабного эффекта предложено несколько уравнений.

Первой теоретической работой, объясняющей проявление масштабного эффекта, является работа Гриффитса, посвященная явлению разрыва и текучести твердых тел. В ней содержится вывод, что "разрывная нагрузка тонкой пластины стекла, имеющей достаточно длинную, прямую трещину, нормальную к приложенному напряжению, обратно пропорциональна квадратному корню длины трещины".

В 1939 г. В. Вейбулл предложил другую зависимость прочности от размеров испытываемых образцов в условиях растяжения, кручения и изгиба:

$$R = \sigma_0 I L V^{-1/\alpha}, \tag{4.1}$$

где σ_0, α — константы материала; I — константа для данного напряженного состояния; L — нормирующий коэффициент; V — рабочий объем образца.

Постоянная α по Вейбуллу характеризует степень однородности материала. Чем больше величина α, тем меньше зависит прочность от объемов тел.

Т.А. Конторова и Я.И. Френкель, использовав нормальный закон распределения "дефектов" по опасности их в отношении величины прочности, предложили формулы для образцов большого объема

$$R = R_0 - \sqrt{A \lg V - B} \tag{4.2}$$

и образцов малого размера

$$R = a + b/V, \tag{4.3}$$

где A, B, a, b, R_0 — константы, зависящие от напряженного состояния и природы материала.

С.Д. Волков, анализируя масштабный эффект с позиции "интенсивности масштабного эффекта", подтвердил выводы Вейбулла, а Л.Г. Седракян теоретически вывел формулу

$$R = R_{min} + \int_{R_{min}}^{R_{max}} e^{\int_0^a \int_V \lg\left[1 - w_n^{n'}(\sigma_i)\right] dV_i} d\sigma, \qquad (4.4)$$

где R_{max}, R_{min} — соответственно верхние и нижние значения местной прочности; $w_n^{n'}(\sigma_i)$ — вероятность разрушения стренги при решении вспомогательной задачи о прочности каната; a — постоянный множитель.

Для растяжения формула (4.4) принимает вид

$$R = R_{min} + A/V^{-1/a}, \qquad (4.5)$$

где A, a — константы материала.

А.П. Александров и С.Н. Журков для описания зависимости прочности стеклянных нитей от их диаметра предложили формулу

$$R = a + b/d, \qquad (4.6)$$

где a, b — константы; d — диаметр нити.

Для небольших зерен минералов М.И. Койфман [4] получены следующие зависимости:

для кварца

$$F \approx 1{,}8 \cdot 10^{-3} d + 8{,}8 \cdot 10^{-7} d^2, \qquad (4.7)$$

для кальцита

$$F = 0{,}95 \cdot 10^{-3} d + 0{,}91 \cdot 10^{-7} d^2, \qquad (4.8)$$

где F — разрушающая нагрузка, даН; d — линейные размеры, мкм.

Для одноосного сжатия кубиков угля различного размера Иванс, Померой и Биренбаум получили зависимость

$$R = A \cdot d^{-n}, \qquad (4.9)$$

где A, n — константы; d — длина ребра кубика.

Холланд для углей предложил формулу Гриффитса $R = A/\sqrt{d}$ (при d не более 200 см).

М.М. Протодьяконов для математического выражения проявлений масштабного эффекта предложил уравнение смещенной гиперболы:

$$R = R_м (d + mb)/(d + b), \qquad (4.10)$$

где $R_м$ — прочность трещиноватого массива, Па; m — коэффициент трещиноватости, показывающий, во сколько раз прочность нетрещиноватого материала выше прочности массива; d — диаметр образцов, см; b — постоянная трещиноватости, см.

В работах Р.А. Муллера, Л.Г. Седракяна и В.В. Болотина, посвя-

шенных статистическому исследованию прочности, показано, что использование кривой нормального распределения для описания разброса пределов прочности материалов (как это было использовано Г.А. Конторовой и Я.И. Френкелем и широко используется исследователями в настоящее время), является мало обоснованным, поскольку нормальный закон допускает изменение признака в пределах от $-\infty$ до $+\infty$, тогда как прочность является величиной существенно положительной, нижний предел которой не может быть меньше нуля. Поэтому, чтобы учесть физические и статистические предположения хрупкого разрушения, следует использовать третье предельное распределение наименьших значений, функция вероятностей которых имеет вид

$$F(R) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{R - R_{\min}}{\beta}\right)^{\alpha}\right], \qquad (4.11)$$

$$0 \leqslant R < \infty, \quad R_{\min} \leqslant R, \quad \alpha > 0, \quad \beta > 0.$$

Основываясь на третьем предельном распределении наименьших значений вариационного ряда в соответствии со статистической теорией прочности, В.В. Болотин [17] дает наиболее общие формулы зависимости среднего предела прочности от объема образцов:

$$\bar{R} = R_{\min} + \beta\left(\frac{V_0}{V}\right)^{1/\alpha} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right);$$

$$\Delta = \beta\left(\frac{V_0}{V}\right)^{1/\alpha} \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)}\ ; \qquad (4.12)$$

$$V = \frac{\beta\left(\frac{V_0}{V}\right)^{1/\alpha} \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)}}{R_{\min} + \beta\left(\frac{V_0}{V}\right)^{1/\alpha} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)},$$

где α, β, $R_{\min}$ — параметры функции распределения; V_0 — некоторый эталонный объем образца; $\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$ — гамма-функция.

Для использования уравнений (4.12) необходимо знать величины параметров α, β, $R_{\min}$, которые можно получить из статистической обработки массовых испытаний образцов типового, фиксированного объема на основе плотности вероятности распределения. Оценка указанных параметров распределения может быть осуществлена методом моментов. Суть этого метода состоит в требовании совпадения теоретической и эмпирической кривой с точностью до момента третьего порядка.

Для решения уравнений методом моментов находятся выборочные средние $\bar{R}$, стандарт Δ и асимметрия A по формулам

$$\bar{R} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} R_i; \qquad (4.13)$$

$$\Delta = \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (R_i - \bar{R})^2 \right\}^{1/2}; \tag{4.14}$$

$$A = \frac{1}{n \cdot \Delta^3} \sum_{i=1}^{n} (R_i - R)^3. \tag{4.15}$$

Приравнивая асимметрию ее теоретическому значению

$$A = \frac{\Gamma(1+\frac{3}{\alpha}) - 3\Gamma(1+\frac{2}{\alpha})\Gamma(1+\frac{1}{\alpha}) + 2\Gamma^3(1+\frac{1}{\alpha})}{\left\{\Gamma(1+\frac{2}{\alpha}) - \Gamma^2(1+\frac{1}{\alpha})\right\}^{3/2}}, \tag{4.16}$$

получаем нелинейное уравнение относительно α.

Решив уравнение (4.16) и подставив значение α в условие равенства эмпирического и теоретического стандартных отклонений

$$\Delta = \beta[\Gamma(1+\frac{2}{\alpha}) - \Gamma^2(1+\frac{1}{\alpha})]^{1/2}, \tag{4.17}$$

определятся β.

Значение $R_{\min}$ находится из условия

$$R_{\min} = \bar{R}_0 - \beta\Gamma(1+\frac{1}{\alpha}). \tag{4.18}$$

С помощью формул (4.16—4.18) составлен график (рис. 4.2), пользуясь которым по значениям выборочных характеристик и формулам

$$\beta = \Delta \cdot B(\alpha); \quad R_{\min} = \bar{R} - \Delta \cdot C(\alpha) \tag{4.19}$$

находятся неизвестные параметры распределения α, β и $R_{\min}$.

Для проверки этой статистической методики оценки масштабного эффекта была выполнена статистическая обработка данных о прочности ряда углей (приложения 2, 3, 4) и горных пород при сжатии (табл. 4.5).

Для сопоставления теоретического и экспериментально установленного проявлений масштабного эффекта построена табл. 4.6.

Большинство исследователей масштабного эффекта в горных породах не приводят данных об асимметрии распределения показателей прочности, а говорят о, якобы, нормальном их распределении и приводят значения вариации этих показателей. При нормальном распределении асимметрия равна нулю, а значение параметра однородности α (см. рис. 4.2) равно 3,6. Однако, нормальная кривая может описать лишь симметричные распределения, а кривые распределения прочности, как утверждает Р.А. Муллер, в большинстве своем, асимметричные или псевдосимметричные (по Э. Гумбель). Отнесение многими исследователями распределения показателей прочности к нормальным говорит о том, что величина асимметрии в большинстве своем незначительно отклоняется от нуля в стороны положительных или отрицательных значений. Величина коэффициента вариации, как и параметра однородности α, является, по существу, также характе-

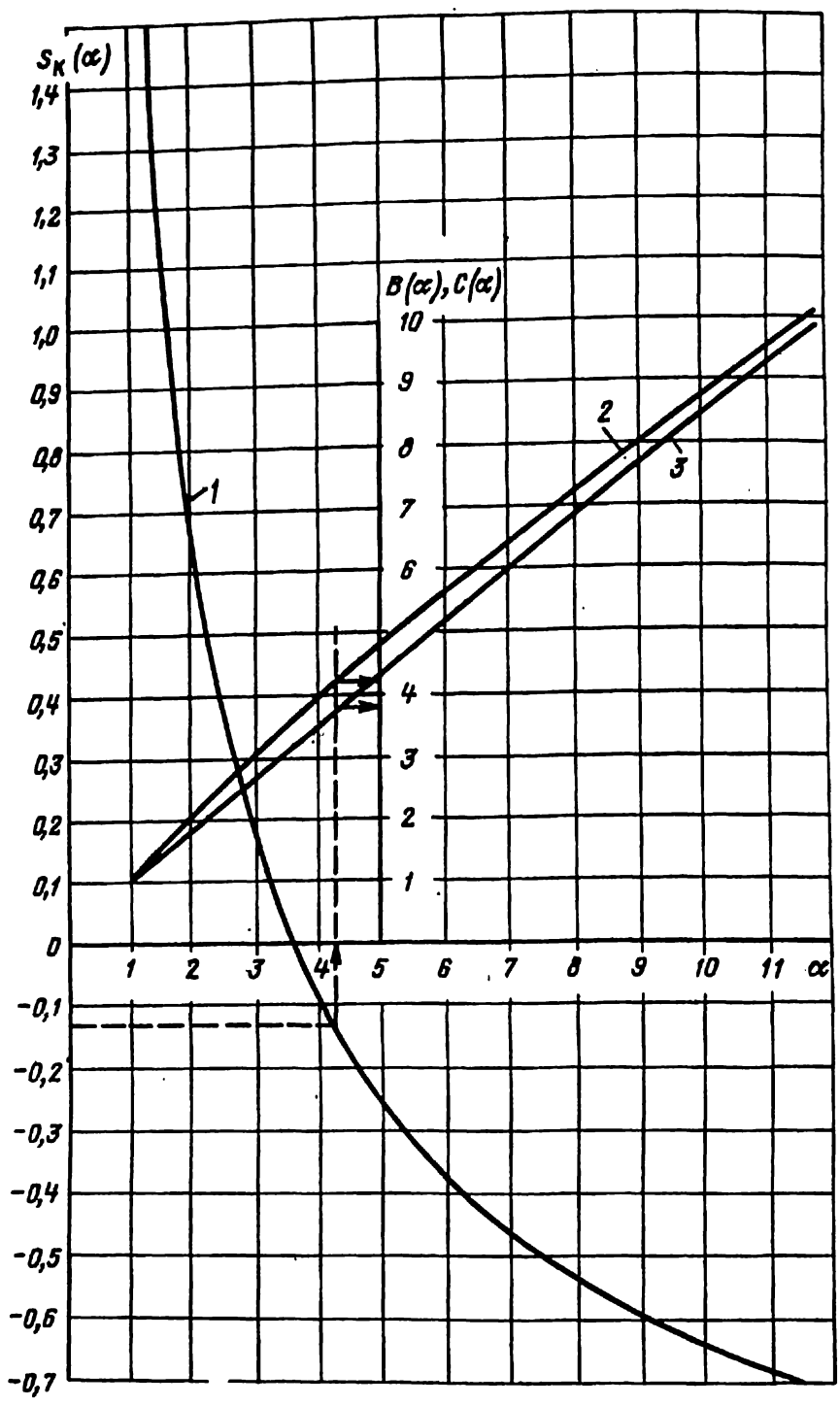


Рис. 4.2. График для определения параметров распределения:

1 — **параметр однородности** α; *2* **и** *3* — **вспомогательные коэффициенты** $B(\alpha)$ **и** $C(\alpha)$

ристикой неоднородности горных пород. Для пород неоднородных коэффициенты вариации показателей прочности всегда выше, чем для пород однородных. Попытка установить связь между двумя этими показателями для пород, испытанных при одноосном сжатии, показала, что с увеличением коэффициента вариации показателей прочности асимметрия распределения увеличивается, а параметр однородности уменьшается. Однако теснота связи низкая. Результаты испытаний явно неоднородных горных пород показали, что для наиболее однородных горных пород с коэффициентами вариации до 4 %, параметр однородности будет изменяться от 3,2 до 5,5. При этом

Таблица 4.5. Минимальные статистически вероятные значения прочности углей и горных пород

Горные породы	Исходные данные			Параметры распределения		R_{min}, МПа
	$\bar{R}$, МПа	Δ, МПа	A	α	β, МПа	
Уголь марки Ж Улуг-Хемского бассейна, пласт Улуг-2						
нижняя пачка	9,2	0,95	0,51	—	2,24	6,5
верхняя пачка	10,7	2,73	0,6	—	6,0	4,7
Уголь марки К Кузнецкого бассейна шахты им. Ленина, пласт XI	25,6	5,3	0,7	—	10,9	14,7
То же, пласт XII	22,4	4,0	0,14	—	12,1	10,3
Уголь марки СС Кузнецкого бассейна, Красногорский разрез, пласт XXX	37,0	3,0	0,14	—	9,5	27,5
Уголь марки Г Донецкого бассейна, гидрошахта "Пионер", пласт l_8^6	37,0	5,9	1,17	—	10,0	27,0
Уголь марки Г Львовско-Волынского бассейна, пласт h_7 Волынский-1	32,5	7,4	0,63	—	15,9	16,6
Туфы Армении:						
Анипемзенское месторождение, верхний слой	17,5	2,3	—	—	5,3.	14,2
Артикское месторождение, нижний слой	16,8	2,7	—	4,4	11,3	5,5
Маяковское месторождение, верхний слой	27,7	2,0	0,25	2,8	5,8	21,9
Керплинское месторождение, верхний слой	75,0	14,0	0,02	3,55	49,0	26,0
Мрамор	157,0	6,3	0	3,6	22,4	134,5
Габбро	212,0	18,2	0	3,6	65,0	147,0
Каменные соли:						
Приереванского месторождения, скв. 1	25,2	4,5	0	3,6	16,0	9,2
То же, скв. 2	32,1	3,8	0	3,6	13,5	18,6
Лейковского месторождения	22,5	4,5	0	3,6	16,0	6,5
Месторождения Ходжа-Мумын	30,2	2,8	0	3,6	10,0	20,2
Аллагуватского месторождения	37,3	7,8	0	3,6	28,0	9,3

асимметрия распределения близка к нулю, и даже может быть отрицательной. Минимальное значение параметра однородности наблюдалось у газовых углей Донбасса. По-видимому, для горных пород это значение следует признать близким к минимальному. Тогда значения параметра однородности α для горных пород будут в пределах $1{,}5 \div 5{,}5$, что почти совпадает с симметричным распределением.

Теперь посмотрим, какую ошибку допустим в расчетах по уравнению (4.12), используя нормальное распределение и известные нам коэффициенты вариации показателей прочности. Для этого уравнение (4.12) преобразуем следующим образом, подставив значения параметров распределения по уравнению (4.18, 4.19):

Таблица 4.6. Экспериментальные $R_{эк}$ и расчетные $R_{расч}$ по формуле (4.12), значения прочности горных пород в образцах различного размера, МПа

Порода	Объем образца V, см^3	$R_{расч}$	$R_{эк}$	$\frac{R_{расч}-R_{эк}}{R_{эк}}100$
Угли Улуг-Хемского бассейна, пласт Улуг-2, нижняя пачка	2,8	8,4	9,2	—8,7
	11,1	7,6	8,6	—8,6
	31,2	7,5	7,8	—3,8
	125	7,2	6,1	—18,0
	350	7,1	3,9	82
То же, верхняя пачка	2,8	9,7	10,7	—9,3
	11,1	7,9	10,3	—23
	31,2	7,2	9,4	—23
	125	6,6	8,0	—18
	350	6,4	6,6	—3
	1000	6,2	5,0	24
Угли Кузнецкого бассейна, шахта им. Ленина, пласт XI	2,8	23,8	25,6	—7
	11,1	20,6	21,3	—8
	31,2	19,3	17,7	—1
	125	18,4	16,2	11
	350	18,0	15,6	20
Угли Кузнецкого бассейна, шахта им. Ленина, пласт XII	2,8	21,6	22,4	—3,6
	11,1	18,5	19,2	—14
	31,2	16,9	15,9	—15,5
	125	15,4	13,8	2,7
	350	14,7	12,8	11,0
	1000	14,2	12,1	20,0
Угли Кузнецкого бассейна, Красногорский разрез, пласт XXX	11,1	35,1	37,0	—5
	31,2	33,8	32,6	+4
	125	32,7	22,7	44
	350	32,1	18,8	71
	1000	31,7	16,4	93
Угли Донецкого бассейна, гидрошахта "Пионер", пласт l_8^6	2,8	38,6	37,0	4
	11,1	35,5	31,5	13
	31,2	34,5	26,2	32
	125	33,8	17,5	92
	350	33,6	13,0	158
	1000	33,5	11,2	199
Угли Львовско-Волынского бассейна, пласт h_7 Волынский 1	2,8	29,7	32,5	—9
	11,1	25,0	24,0	4
	31,2	23,8	19,8	20
	125	21,6	15,4	40
	350	21,0	13,2	59
	1000	20,7	11,0	88
Туф Анипемземского месторождения, верхний слой	12,5	15,9	17,7	—10
	53	15,0	17,5	—14
	100	14,8	17,1	—13

Продолжение табл. 4.6

Порода	Объем образца V, см^3	$R_{расч}$	$R_{эк}$	$\frac{R_{расч}-R_{эк}}{R_{эк}}100$
То же, нижний слой	168	14,7	16,0	−8
	330	14,6	15,9	−8
	580	14,5	14,6	−1
Туф Артикского месторождения, нижний слой	12,5	16,8	11,4	48
	53	15,0	16,8	−11
	100	14,4	14,8	−3
	168	13,9	12,9	8
	330	13,3	11,8	13
	580	13,0	11,7	11
Туф Маяковского месторождения, верхний слой	12,5	26,2	20,4	28
	53	25,2	27,7	9
	100	24,9	27,0	−8
	168	24,7	25,8	−4
	330	24,5	24,3	1
	580	24,4	20,5	19
Туф Керплинского месторождения, верхний слой	12,5	66,7	59,4	12
	53	58,8	75,0	−21
	100	56,1	77,1	−27
	168	54,5	69,4	−21
	330	52,2	64,0	−18
	580	50,9	65,0	−22
Мрамор	1,4	163,0	143,0	14
	13,1	154,0	171,0	−10
	37	151,0	160,0	−5,6
	91	149,0	157,0	−5,1
	226	148,0	148,0	0
	475	147,0	152,0	−3,3
	900	146,0	142,0	2,8
	2850	145,0	128,0	13
Габбро	1,34	234,0	192,0	22
	14,8	204,0	194,0	5
	35,4	196,0	189,0	4
	93	190,5	212,0	−10
	230	186,0	181,0	3
	530	183,0	182,0	0,05
	1070	181,0	167,0	8
	1250	180,5	170,0	6

$$\bar{R} = \bar{R}_0\left\{1-v_0\cdot C(\alpha)\left[1-\left(\frac{V_0}{V}\right)^{1/\alpha}\right]\right\} \tag{4.20}$$

или

$$\bar{R} = A\bar{R}_0, \tag{4.21}$$

где

$$A = 1-v_0\cdot C(\alpha)\left[1-(V_0/V)^{1/\alpha}\right]. \tag{4.22}$$

Обобщение результатов испытаний горных пород при одноосном сжатии показало, что для пород с пределом прочности R_0 = 10 МПа

коэффициент вариации v изменяется в пределах 4÷40 %, а параметр a при v = 4 % может измениться от 3 до 5,5, а при v = 40 % от 1,5 до 2,5.

Нетрудно подсчитать, что для горной породы с коэффициентом вариации значений прочности 4 % коэффициент A, выраженный (2.22), изменяется всего лишь с 0,934 до 0,942 при изменении параметра a от 3,0 до 5,5, т.е. менее чем на один процент.

Для горной породы с коэффициентом вариации значений прочности 0,4 (40 %) коэффициент A изменится с 0,34 до 0,415, т.е. всего на 7 %. При "нормальном" распределении, когда a = 3,6, величина коэффициента A будет иметь промежуточное значение и поэтому ошибка в вычислении коэффициента A не будет больше нескольких процентов, что вполне допустимо в подобного рода расчетах. Это дает основание предложить для расчета масштабного эффекта в горных породах следующие выражения:

$$\bar{R} = \bar{R}_0\left\{1 - 3{,}2\,v_0\,[1-(\frac{V_0}{V})^{0,28}]\right\}; \tag{4.23}$$

$$\Delta = R_0 \cdot v_0\,(\frac{V_0}{V})^{0,28}; \tag{4.24}$$

$$v = \frac{v_0\,(\frac{V_0}{V})^{0,28}}{1 - 3{,}2\,v_0\,[1-(\frac{V_0}{V})^{0,28}]}. \tag{4.25}$$

Однако, коэффициент вариации значений прочности, рассчитанный по экспериментальным данным, является не только следствием неоднородности горных пород, но включает в себя вариацию показателей за счет несовершенства методики испытаний, качества подготовки образцов и т.д. Оценить суммарное их влияние весьма сложно. Учитывая вариацию показателей прочности за счет несовершенства методики испытаний и качества приготовления образцов уравнения масштабного эффекта I и II рода будут:

$$\bar{R} = \bar{R}_0\left\{1 - 3{,}2\,(v_0 - v_м)\,[1-(\frac{V_0}{V})^{0,28}]\right\}; \tag{4.26}$$

$$\Delta = \bar{R}_0\,(v_0 - v_м)(\frac{V_0}{V})^{0,28}; \tag{4.27}$$

$$v = \frac{(v_0 - v_м)(\frac{V_0}{V})^{0,28}}{1 - 3{,}2\,(v_0 - v_м)[1-(\frac{V_0}{V})^{0,28}]} \cdot 100. \tag{4.28}$$

Что касается масштабного эффекта III рода (по М.В. Рацу — изменение степени асимметрии распределения), то, как показывает анализ экспериментальных данных, она с увеличением размеров, вследствие уменьшения вариации значений прочности, уменьшается и стремится к нулю.

Таблица 4.7. Экспериментальные $R_{эк}$ и расчетные $R_{расч}$, по формуле (4.26), значения прочности горных пород (МПа) в образцах различного размера при $v_м = 0{,}04$

Порода	Объем образца V, см^3	$R_{расч}$	$R_{эк}$	$\frac{R_{расч}-R_{эк}}{R_{эк}}100$
Угли Улуг-Хемского бассейна, пласт Улуг-2, нижняя пачка	2,8	9,2	9,2	0
	11,1	8,0	8,6	−7,0
	31,2	7,3	7,8	−6,4
	125	6,9	6,1	+13
	350	6,7	3,9	+72
То же, верхняя пачка	2,8	10,7	10,7	0
	11,1	8,5	10,3	−17
	31,2	6,6	9,4	−30
	125	5,5	8,0	−31
	350	5,1	6,6	−23
	1000	4,9	5,0	−2,0
Угли Кузнецкого бассейна, шахта им. Ленина, пласт XI	2,8	25,6	25,6	0
	11,1	21,3	22,4	−4,9
	31,2	17,7	19,5	−9,2
	125	16,2	16,5	−1,8
	350	15,6	15,0	+4,0
То же, пласт XII	2,8	22,4	22,4	0
	11,1	19,2	21,5	−11
	31,2	15,9	20,0	−20
	125	13,8	15,0	−8,0
	350	12,8	13,2	−3,0
	1000	12,1	11,8	+2,5
То же, пласт XXX	11,1	37,0	37,0	0
	31,2	34,0	32,6	+4,3
	125	31,6	22,7	+39
	350	30,5	18,8	+64
	1000	29,5	16,4	+80
Угли Донецкого бассейна, гидрошахта "Пионер", пласт l_8^6	2,8	37,0	37,0	0
	11,1	32,2	31,5	+2,2
	31,2	29,0	26,2	+11
	125	27,8	17,5	+59
	350	27,4	13,0	+111
	1000	27,2	11,2	+143
Угли Львовско-Волынского бассейна, пласт h_7 Волынский-1	2,8	32,5	32,5	0
	11,1	26,6	24,0	+11
	31,2	21,3	19,8	+7,6
	125	19,0	15,4	+24
	350	18,0	13,2	+36
	1000	17,4	11,0	+58
Туф Анипемземского месторождения, верхний слой	12,5	23,0	17,7	+30
	53	17,5	17,5	0
	100	16,1	17,1	−6
	168	15,2	16,0	−5

Продолжение табл. 4.7

Порода	Объем образца V, см^3	$R_{расч}$	$R_{эк}$	$\frac{R_{расч} - R_{эк}}{R_{эк}} 100$
	330	14,4	15,9	—9
	580	13,8	14,6	—6
Туф Артикского месторождения, нижний слой	12,5	21,2	11,4	+86
	53	16,8	16,8	0
	100	15,3	14,8	+3,4
	168	14,0	12,9	+8,5
	330	12,9	11,8	+9,3
	580	12,0	11,7	+2,5
Туф Маяковского месторождения, верхний слой	12,5	31,7	20,4	+55
	53	27,7	27,7	0
	100	26,0	27,0	—3,7
	168	25,6	25,8	—0,8
	330	24,9	24,3	+2,5
	580	24,3	20,5	+18
Туф Керплинского месторождения, верхний слой	12,5	99,0	59,4	+64
	53	75,0	75,0	0
	100	67,0	77,1	—13
	168	61,5	69,4	—11
	330	55,2	64,0	—14
	580	51,0	65,0	—21
Мрамор	1,4	210,0	143,0	+47
	13,1	174,0	171,0	+1,7
	37	163,5	160,0	+2,2
	91	157,0	157,0	0
	226	152,0	148,0	+2,7
	475	148,0	152,0	—2,6
	900	146,0	142,0	+2,8
	2850	142,5	128,0	+4,3
Габбро	1,34	367,0	192,0	+91
	14,8	254,0	194,0	+31
	35,4	232,0	189,0	+23
	93	212,0	212,0	0
	230	197,0	181,0	+8,8
	530	187,0	182,0	+2,8
	1070	180,0	167,0	+7,8
	1250	178,0	170,0	+4,7
Каменные соли Приереванского месторождения, скв. 1	148	25,2	25,2	0
	405	11,3	22,1	—3,5
	605	20,0	19,9	+0,5
То же, скв. 2	148	32,1	32,1	0
	405	28,8	38,6	—25
	605	27,7	27,8	—0,4
Каменные соли Лейковской площади, скв. 2	148	22,5	22,5	0
	405	18,6	20,7	—10
	605	17,4	19,2	—9,4

Продолжение табл. 4.7

Порода	Объем образца V, см^3	$R_{расч}$	$R_{эк}$	$\frac{R_{расч}-R_{эк}}{R_{эк}}100$
Каменные соли Ходжа-Мумынского месторождения, скв. 5—7	148 405 605	30,2 27,8 27,0	30,2 29,4 29,2	0 —5,4 —7,5
Каменные соли Аллагуватского месторождения	21 170	37,3 25,0	37,3 32,8	0 —24

Для сопоставления значений прочности рассчитанных по выведенным упрощенным уравнениям статистической теории (4.26) с экспериментально установленными значениями построена табл. 4.7.

Зависимости масштабного эффекта в горных породах при растяжении будут аналогичны зависимостям, описывающим масштабный эффект при сжатии. Учитывая, что на показатели прочности при растяжении, определяемые методом раскалывания, окажут влияние не все дефекты раскалываемого образца, а лишь дефекты, сосредоточенные вблизи плоскости раскола, формулы (4.12) целесообразно написать в виде

$$\bar{R} = R_{p\,min} + \beta_p \left(\frac{S_0}{S}\right)^{1/\alpha_p} \Gamma(1 + 1/\alpha_p); \tag{4.29}$$

$$\Delta_p = \beta_p \left(\frac{S_0}{S}\right)^{1/\alpha_p} \sqrt{\Gamma(1 + 2/\alpha_p) - \Gamma^2(1 + 1/\alpha_p)}; \tag{4.30}$$

$$v_p = \frac{\beta_p \left(\frac{S_0}{S}\right)^{1/\alpha_p} \sqrt{\Gamma(1 + 2/\alpha_p) - \Gamma^2(1 + 1/\alpha_p)}}{R_{p\,min} + \beta_p \left(\frac{S_0}{S}\right)^{1/\alpha_p} \Gamma(1 + 1/\alpha_p)} \cdot 100 \tag{4.31}$$

или в более упрощенном виде

$$\bar{R}_p = \bar{R}_{po}\left\{1 - 3{,}2 v_{po}\left[1 - \left(\frac{S_0}{S}\right)^{0{,}28}\right]\right\}; \tag{4.32}$$

$$\Delta = \bar{R}_{po}\, v_{po} \left(\frac{S_0}{S}\right)^{0{,}28}; \tag{4.33}$$

$$v = \frac{v_{po}\left(\frac{S_0}{S}\right)^{0{,}28}}{1 - 3{,}2\, v_{po}\left[1 - \left(\frac{S_0}{S}\right)^{0{,}28}\right]} 100. \tag{4.34}$$

Уменьшая определенную при экспериментах вариацию показателей прочности за счет несовершенства методики испытаний на 0,08,

получим

$$\bar{R}_{\text{р}} = \bar{R}_{\text{ро}}\left\{1 - 3{,}2\,(v_{\text{ро}} - v_{\text{рм}})\left[1 - \left(\frac{S_0}{S}\right)^{0{,}28}\right]\right\}; \tag{4.35}$$

$$\Delta = \bar{R}_{\text{ро}}\,(v_{\text{ро}} - v_{\text{рм}})\left(\frac{S_0}{S}\right)^{0{,}28}; \tag{4.36}$$

$$v = \frac{(v_{\text{ро}} - v_{\text{рм}})\left(\frac{S_0}{S}\right)^{0{,}28}}{1 - 3{,}2\,(v_{\text{ро}} - v_{\text{рм}})\left[1 - \left(\frac{S_0}{S}\right)^{0{,}28}\right]}\,100. \tag{4.37}$$

Из табл. 4.7 следует, что для горных пород проявление масштабного эффекта может быть весьма надежно описано уравнениями статистической теории хрупкой прочности, а вот для описания проявления масштабного эффекта в углях эти уравнения явно непригодны. Минимальное значение прочности в углях, оцененное по параметрам распределения значений прочности при испытании образцов малого размера, в несколько раз больше пределов прочности, определенных при натурных крупномасштабных испытаниях.

Такое различие в закономерностях проявления масштабного эффекта в горных породах и углях связано с особенностями трещиноватости углей. С увеличением размеров испытываемых образцов в последних появляются новые, более крупные трещины, так называемые трещины низшего порядка, которые не оказали заметного влияния на параметры распределения показателей прочности при испытании образцов малого размера. Поэтому применять уравнение статистической теории хрупкой прочности для оценки прочности углей в образцах другого размера можно только в узких пределах изменения размеров образцов.

Для оценки прочностных свойств горных пород можно рекомендовать уравнения (4.12, 4.26—4.28) при условии, если параметры распределения значений прочности оценивались на достаточно представительных образцах. Минимальный размер образца должен выбираться из условия, что образующие горную породу структурные элементы входят в объем образца в количествах, достаточных чтобы получаемые показатели прочностных и деформационных свойств можно было рассматривать как свойства самой породы, а не отдельных структурных элементов.

Зависимости прочности углей от размеров образцов были установлены в работе [14]. На графиках с двойной логарифмической сеткой они приближаются к прямым линиям и описываются уравнениями

$$R_{\text{р}} = R'_{\text{р}}/\left(\frac{S}{S'}\right)^{n}; \qquad R_{\text{сж}} = R'_{\text{сж}}/\left(\frac{S}{S'}\right)^{n}, \tag{4.38}$$

где $R_{\text{р}}$, $R_{\text{сж}}$ — прочность угля соответственно при растяжении и одноосном сжатии в образцах сечением S; $R'_{\text{р}}$, $R'_{\text{сж}}$ — прочность угля соот-

ветственно при растяжении и одноосном сжатии в образцах сечением S', определенные опытным путем; n — показатель степени масштабного эффекта

$$n = \frac{\lg R_1 - \lg R_2}{\lg S_2 - \lg S_1}, \tag{4.39}$$

где R_1 — прочность в образцах меньшего размера площадью S_1; R_2 — прочность в образцах большего размера площадью S_2.

Выражения (4.38) являются по существу уравнениями Вейбулла, т.е. близки к уравнениям статистической теории хрупкой прочности. Отличие их заключается в том, что показатель неоднородности найден не по параметрам распределения показателей прочности, полученных при испытании одного размера образцов, а по зависимости прочности углей от размеров образцов, учитывающей ослабляющее влияние нескольких систем трещин.

Аналогичные закономерности проявления масштабного эффекта нами получены совместно с В.В. Шип-Стафуриным при определении контактной прочности антрацитов Восточного Донбасса. Эти закономерности не согласуются с результатами исследований проявления масштабного эффекта в горных породах вследствие влияния не одной, а ряда систем трещин низшего порядка, которые при вдавливании штампов большого сечения приводят к дополнительному снижению значений контактной прочности антрацитов.

4.6. ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ ТРЕЩИНОВАТЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ

В отличие от большинства строительных и других искусственных материалов горные породы в массиве всегда разбиты различными трещинами. Это крупные тектонические нарушения (сдвиги, надвиги, разломы, сбросы и взбросы), макротрещины (иногда значительной протяженности и зияния), микротрещины (нарушения, невидимые невооруженным глазом) и, наконец, дефекты кристаллической решетки породообразующих минералов.

В исследованиях масштабного фактора в образцах лабораторного размера в пределах структурных блоков оценивается, в основном, влияние микротрещиноватости и мелких макроскопических трещин. Для оценки свойств массивов в объемах, измеряемых десятками, сотнями и тысячами кубических метров, необходимо знать влияние макротрещиноватости и (хотя и редко) сравнительно мелких тектонических смещений и разрывов.

Структуру массива горных пород внутри крупных блоков, ограниченных тектоническими нарушениями, определяют системы макротрещин, которые принято характеризовать такими параметрами как густота (расстояние между соседними трещинами), ширина, протяженность, угол и азимут падения. По механизму их образования различают трещины отрыва и сдвига. Несколько систем трещин образуют пространственные сети трещин, разделяемые на системные, хаоти-

ческие и полигональные. Наиболее распространенные (особенно в породах, вмещающих угольные пласты) системные сети трещин, которые подразделяют на непрерывные (длина трещин более чем в 10 раз превышает поперечник структурного блока) промежуточные и прерывистые (длина трещин примерно равна поперечнику структурного блока).

Массив горных пород, как правило, разбит несколькими системами трещин. Густота трещин зависит от многих факторов (литологического состава пород, тектоники района и других). Размеры образующихся в результате пересечения различных систем трещин "элементарных блоков" (отдельностей) измеряются десятками и сотнями сантиметров. Поэтому при определении механических свойств горных пород в образцах лабораторного размера не оценивается влияние макротрещиноватости (трещиноватости "низшего" порядка), которая в основном и определяет механические характеристики (прочность, деформируемость) и другие свойства массива горных пород.

Результаты исследований влияния тещиноватости на прочностные и деформационные характеристики горных пород частично освещены в работе [3], где был описан способ нанесения искусственных систем трещин в образцах горных пород. Трещиноватая горная порода в отличие от монолитной деформируется по другим законом. При действии возрастающих сжимающих нагрузок в первую очередь смыкаются более крупные трещины, затем все более и более мелкие. Поэтому для трещиноватых массивов горных пород зависимость между напряжениями и деформациями не подчиняется закону Гука, а имеет вид вогнутой кривой, наклон асимптоты которой стремится к модулю пропорциональности монолитной части массива. Таким образом, замеряя в массиве или в обнажении величину зияния трещин, следует помнить, что она изменяется с изменением напряженного состояния. С увеличением количества трещин восходящие ветви кривых деформирования становятся более вогнутыми, предельные значения прочности уменьшаются, а нисходящие ветви кривых (запредельные) становятся положе. С увеличением объема массива он будет менее прочным и более пластичным (псевдопластичным). Изменение прочности и деформируемости от степени трещиноватости горных пород как при кратковременном, так и при длительном нагружении подчиняется прямолинейной зависимости, подобной зависимости (4.38) проявления масштабного эффекта в углях.

Прочность массива горных пород и его деформируемость зависят от прерывности трещин. Прочность массива с непрерывными системами трещин будет минимальной, а деформируемость максимальной.

Механические характеристики трещиноватого массива зависят и от морфологии трещин: их формы (прямолинейные, криволинейные, дискообразные, чечевицеобразные и т.п.); гладкости стенок (гладкие, шероховатые, с бороздами, зеркалами, штрихами и т.д.). Трещины могут быть раскрытые (зияющие) и заполненные (залеченные, например, кварцем, кальцитом, заполненные нефтью, продуктами выветривания).

Влияние заполнителей на свойства массива горных пород не изучено, но совершенно ясно, что оно велико. Трещины, залеченные прочными кристаллическими породами, могут даже упрочнить массив по сравнению с прочностью структурного блока. Наоборот, трещины, заполненные глинкой трения, нефтью, будут способствовать резкому снижению прочности массива. Изучение влияния всех многочисленных факторов на прочность трещиноватых горных пород имеет большую перспективу. В настоящей работе рассмотрим лишь частично влияние главных из перечисленных факторов: частоты трещин и их ориентировки относительно действующих нагрузок. Выполненные в этом направлении исследования показали, что влияние этих факторов весьма существенно и проявление их зависит от прочности горных пород. На гипсе, известняке, песчанике, мраморе и габбро установлено, что прочность пород с одной системой трещин зависит от всех перечисленных параметров (рис. 4.3). При повышенных скоростях нагружения более значительное увеличение прочности в сравнении с монолитными образцами вполне логично, однако при малых скоростях нагружения увеличение прочности трещиноватых пород, хотя и незначительное, противоречит экспериментальным данным, полученным при испытании монолитных образцов. Эту часть закономерности необходимо проверить. Анализ экспериментальных данных показал, что более резкое увеличение прочности трещиноватых образцов с уменьшением скорости нагружения происходит у слабых пластичных гипсовых образцов.

При оценке влияния трещиноватости на прочностные свойства горных пород одни исследователи считают, что ослабляющее влияние трещиноватости определяется главным образом элементами залегания трещин, другие оценивают прочность трещиноватого массива только по степени трещиноватости. Ряд исследователей при этом не увязывают значения коэффициентов структурного ослабления с прочностью пород в монолитном состоянии. Такие односторонние рекомендации нельзя признать правильными, так как ослабляющее влияние трещиноватости меньше в слабых пластичных породах, чем в крепких и хрупких. Ориентировка трещин к направлению сжатия оказывает существенное влияние на показатели прочности, но не учитывать при этом степень трещиноватости также нельзя.

Если кривые влияния степени трещиноватости на прочность для горных пород и искусственных материалов (рис. 4.4) продлить, то они пересекутся примерно в одной точке при $\lg H/l \cong 6{,}5$ и прочности около 0,05 МПа. При углах наклона трещин от 0 до 45° они пересекутся при меньших значениях отношения H/l. Это позволяет построить график прогноза прочности по прочности элементарного блока и параметрам трещиноватости (рис 4.5). Таким образом, чтобы найти прочность трещиноватого массива горных пород при одноосном сжатии необходимо используя уравнения статистической теории хрупкой прочности (4.12, 4.26) определить прочность в объеме структурного блока, а затем пользуясь графиком прогноза прочности по степени трещиноватости и углу наклона трещин относительно направления

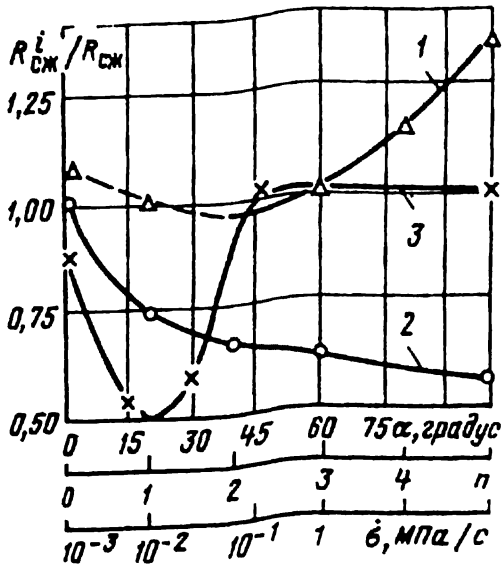


Рис. 4.3. Зависимость относительной прочности трещиноватых горных пород $R^i_{сж}/R_{сж}$ от скорости нагружения $\dot{\sigma}$ (*1*), степени трещиноватости (числа трещин) n (*2*) и угла наклона трещин к направлению сжатия α^0 (*3*)

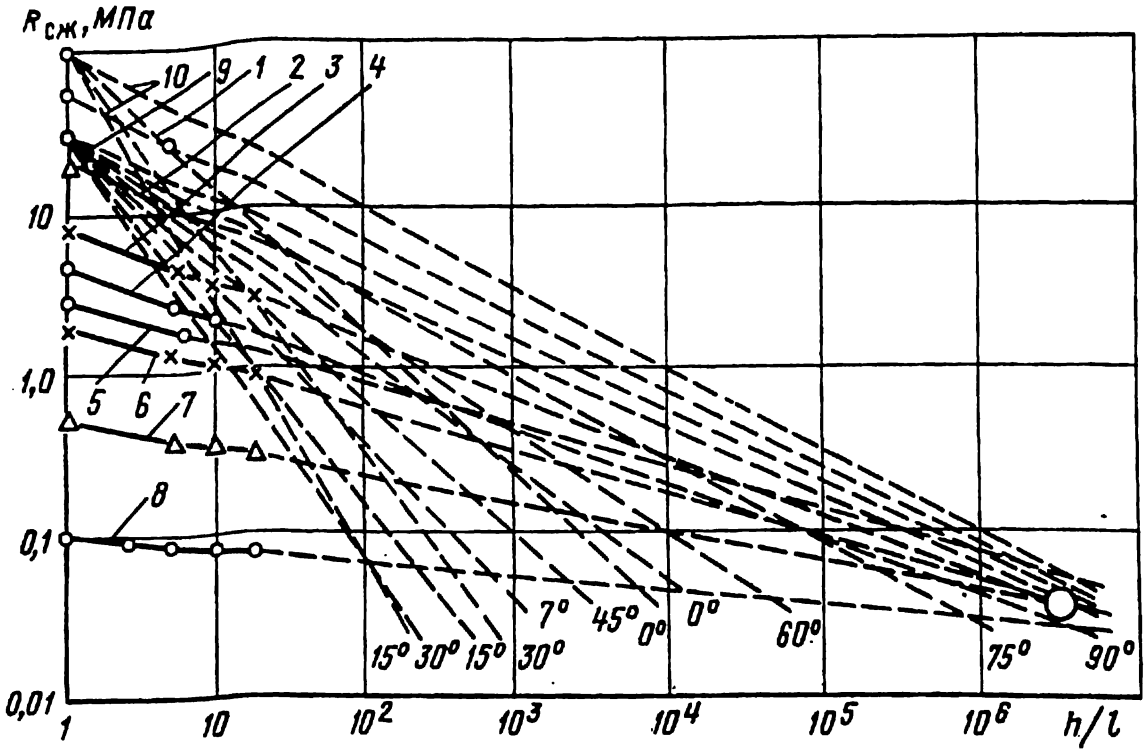


Рис. 4.4. Изменение прочности горных пород и эквивалентных материалов $R_{сж}$ в зависимости от степени трещиноватости h/l при различных углах наклона трещин α^0 к направлению сжатия:

1, 2, 4, 5, 9, 10 — опыты С.Е. Чиркова; *3, 6, 7, 8* — данные ВНИМИ и Д.Н. Ким; *1* — песчаники; *2* — известняки; *3, 6, 7, 8* — эквивалентные материалы; *4* — гипс; *5* — меломергель; *9, 10* — результаты многофакторных экспериментов; h/l — отношение линейного размера призм к линейному размеру структурного блока

сжимающей нагрузки определить прочность массива в условиях одноосного сжатия.

Для сравнения экспериментальных значений прочности с расчетными построена табл. 4.8.

Кроме изложенных факторов экспериментально установлено уменьшение прочности трещиноватых горных пород с увеличением зияния (раскрытия) трещин.

Детальное изучение влияния каждого из факторов потребовало

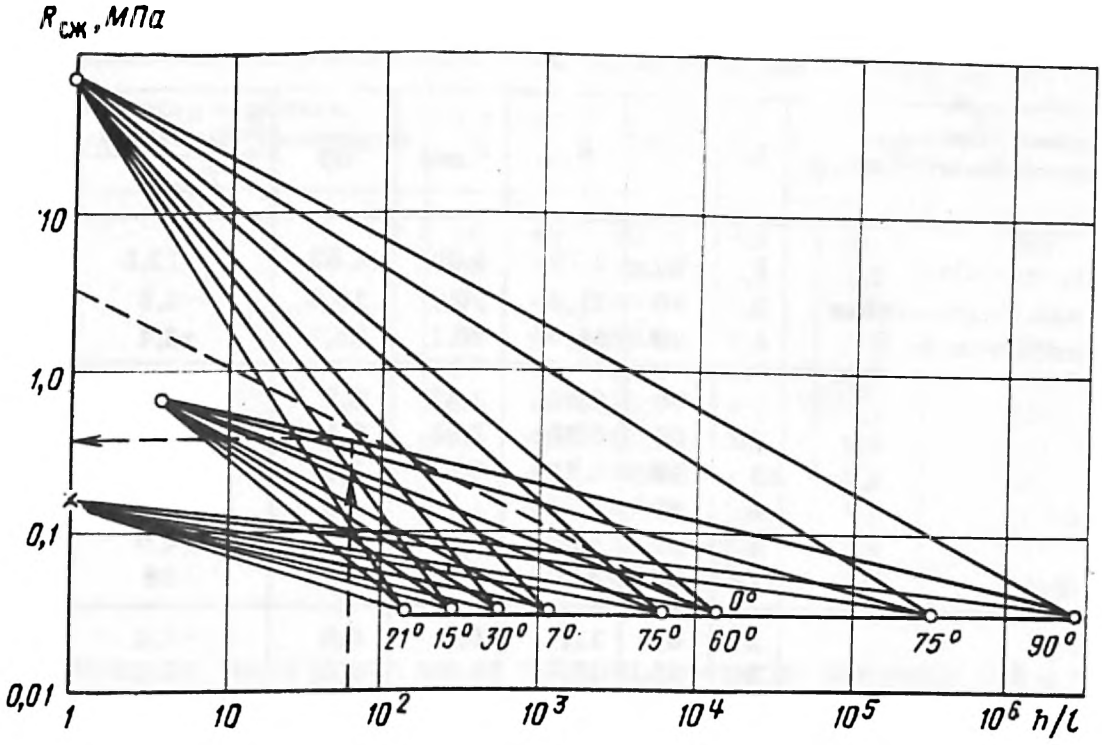


Рис. 4.5. Диаграмма для определения прочности горных пород при одноосном сжатии с учетом степени трещиноватости h/l и угла наклона трещин

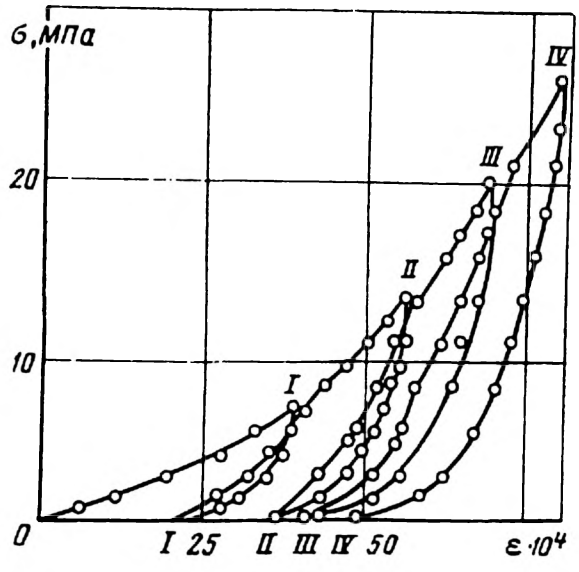


Рис. 4.6. Деформирование песчаника с пятью трещинами, ориентированными под углом 45°:

I, II, III, IV — циклы нагружения

изготовления призматических образцов с отношением ширины к высоте 1,5—2 и площадью основания 16—25 см^2. В этих образцах наносили искусственные трещины с определенным углом их наклона к оси. Полученные при сжатии диаграммы $\sigma - \epsilon$ "напряжение — деформация" с максимальным напряжением, не превышающим 50 % от разрушающих (рис. 4.6), позволяют отметить следующее.

1. Испытанные породы и гипс в монолитных образцах деформируются по зависимостям, близким к прямолинейным. Наблюдается незначительная выпуклость графика при нагружении у гипса и вогнутость как при нагружении, так и при разгрузке у известняка и песчаника.

2. Трещины, совпадающие с направлением сжатия, практически не влияют на линейное деформирование. Модуль упругости и коэффициент поперечной деформации вдоль трещин существенно не изменяются, а в направлении, перпендикулярном к трещинам, резко увели-

Таблица 4.8. Экспериментальные $R_{экс}$ и прогнозные $R_{пр}$ значения прочности трещиноватых горных пород и искусственных материалов, МПа

Горные породы и искусственные материалы	h/l	α^0	$R_{сж}$	$R_{экс}$	$R_{пр}$	$\frac{R_{пр}-R_{экс}}{R_{экс}}100$
Меломергель КМА	5	90	2,75	2,08	1,82	—12,5
Известняк Подмосковья	5	90	21,2	10,9	10,5	—3,6
Песчаник Донбасса	5	90	56,7	25,1	25,7	+2,4
Гипс,	5	90	5,38	3,43	3,2	—6,7
проба I	10	90	5,38	2,55	2,1	—17,6
Гипс,	5	90	5,75	2,87	3,3	+15,0
проба II	9	90	5,75	1,73	2,6	+50
Гипс,	5	90	3,00	1,73	1,8	+4,0
проба III	10	90	3,00	1,06	1,44	+36
Гипс	2	0	11,7	6,3	6,6	+4,8
	2	15	11,7	5,0	4,5	—10,0
	2	30	11,7	5,8	5,0	—13,8
	2	45	11,7	8,9	6,6	—26
	2	60	11,7	10,6	7,0	—34
	2	75	11,7	11,6	8,0	—31
	2	90	11,7	11,7	8,3	—29
Песчаник	2	0	90,5	51,5	50,0	—2,9
	2	15	90,5	28,1	32,0	+13,9
	2	30	90,5	35,2	40,0	+13,6
	3	45	90,5	40,0	36,0	—10,0
Мрамор	2	0	124,0	88,5	83,0	—6,2
	3	15	124,0	46,5	25,0	—46
	2	45	124,0	64,7	64,0	—1,0
	2	90	124,0	73,0	79,0	+8,2
Габбро	3	0	200,0	180,0	80,0	—55,5
	2	30	200,0	97,5	83,0	—14,9
	2	15	200,0	97,5	100,0	+2,6
	2	90	200,0	116,5	150,0	+28,7
По данным Д.Н. Ким						
Искусственные материалы с различным отношением песка и гипса	6	90	0,1	0,88	0,09	+1,0
	20	90	0,1	0,8	0,08	—1,0
	6	90	0,5	0,38	0,38	0
	20	90	0,5	0,325	0,31	—4,6
	6	90	2,0	1,25	1,20	—4,0
	20	90	20,0	1,00	0,91	—9,0
	6	90	8,00	4,10	4,20	+2,5
	20	90	8,00	3,20	2,65	—17,2
	19	90	4,9	2,21	1,85	—16,3
	5	90	4,9	2,94	2,90	—1,4
	8	90	6,12	2,94	2,90	—1,4
	12	90	4,0	1,72	1,75	+1,8
По формуле Г.Л. Фисенко для наклона трещин 45°						
Горные породы	5	45	100,0	9,4	20,0	+113

Продолжение табл. 4.8

Горные породы и искусственные материалы	h/l	α^0	$R_{сж}$	$R_{экс}$	$R_{пр}$	$\frac{R_{пр}-R_{экс}}{R_{экс}}100$
	10	45	100,0	6,8	10,5	+54
	50	45	100,0	4,1	2,5	—39
	5	45	50,0	8,6	12,6	+46
	10	45	50,0	6,3	7,6	+20
	50	45	50,0	3,9	2,0	—49
	5	45	10,0	2,4	3,1	+29
	10	45	10,0	1,8	2,0	+11
	50	45	10,0	1,14	0,8	—27
	5	45	1,0	0,5	0,6	+1,8
	10	45	1,0	0,5	0,4	—13
	50	45	1,0	0,3	0,2	—35

чивается по мере роста числа трещин, достигая значения 0,5 и более. Наблюдается также некоторое увеличение петли гистереза.

3. При угле наклона трещин к направлению сжатия 15—30° наблюдается увеличение вогнутости кривой при малых уровнях напряжений и появление выпуклости у нагрузочной ветви при более высоких напряжениях. Разгрузочная ветвь на всех уровнях напряжений резко вогнута. Модуль упругости уменьшается, а коэффициент поперечной деформации в направлении, перпендикулярном простиранию трещин, растет, достигая единицы. Значительно увеличились остаточные деформации, что связано, по-видимому, с подвижками по поверхностям трещин.

4. При угле наклона трещин 45° вогнутость кривых деформирования еще более увеличивается. Коэффициент поперечной деформации в направлении, перпендикулярном к простиранию трещин, несколько уменьшается, хотя значительно превосходит его значение в направлении, параллельном к плоскостям трещин. Наблюдаются большие остаточные деформации. Близкие закономерности деформирования получены и при ориентировке трещин перпендикулярно к оси образцов.

При угле наклона трещин к направлению сжатия 15° ÷ 45° четко проявляется свойство породного трещиноватого массива так называемой "памяти о предыдущем уровне напряжений". В процессе повторного нагружения на уровне напряжений, достигнутых в предыдущем нагружении, кривые деформирования изменяют свой наклон, как бы переламываясь. "Память" и эффект Кайзера (возникновение шума, растрескивание массива при нагружении выше уровня предыдущих напряжений) следует шире использовать в крупномасштабных натурных измерениях. Они позволяют оценить уровень напряжений в массиве до его разгрузки.

Естественно, что количественное изменение модуля пропорциональности для трещиноватых горных пород зависит не только от модуля упругости горной породы в монолитном состоянии, но и величины зияния трещин до нагружения.

Для описания деформируемости трещиноватого массива при одноосновном нагружении К.В. Руппенейт и Н.В. Тарасова предложили формулу

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_1}\left(1 + \frac{\delta_0}{h}\frac{E}{\zeta_0 E_1 + \sigma}\right), \qquad (4.40)$$

где E_1 — модуль деформации ненарушенной горной породы; δ_0 — ширина раскрытия трещины при $\sigma = 0$; ζ_0 — относительная площадь скольных контактов при $\sigma = 0$ (для трещин горных пород рекомендуется в пределах 0,0001—0,0006 при среднем значении 0,0003); ϵ — средняя относительная деформация ребра образца ($l = h + \delta$).

Сравнение расчетных значений деформаций с фактическими деформациями образцов с искусственными трещинами, нанесенными перпендикулярно к оси образцов, показало, что предложенная К.В. Руппенейтом и Н.В. Тарасовой расчетная формула удовлетворительно описывает деформируемость трещиноватых горных пород. Среднее расчетное значение деформации из 36 определений оказалось всего лишь на 5 % выше измеренного. Максимальное отклонение расчетного значения от фактического не превысило 50 %, что следует признать удовлетворительным.

4.7. ВЛИЯНИЕ ТРЕЩИНОВАТОСТИ НА ПРОЧНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ ОБЪЕМНОГО НЕРАВНОКОМПОНЕНТНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Среди советских и зарубежных исследователей принято, что наиболее полную и надежную характеристику горных пород в условиях различных напряженных состояний дают огибающие предельных кругов напряжений Мора, образно названные Г.Н. Кузнецовым паспортами прочности. Существует несколько экспериментальных методов построения паспортов прочности горных пород. Наибольшее распространение из них получили метод объемного неравномерного сжатия при $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, метод среза со сжатием и метод соосных пуансонов. М.Ф. Кунтыш и Гунь-Бень-И выполнили анализ этих методов и независимо друг от друга пришли к одинаковому выводу, что наиболее достоверные прочностные характеристики могут быть получены при испытаниях пород в объемном напряженном состоянии в приборах типа Кармана. Ряд исследователей предложили для этого уравнения, позволяющие построить расчетные паспорта прочности. Для проверки соответствия расчетных паспортов прочности экспериментальным, полученным при испытании как в камерах Кармана, так и методом соосных пуансонов нами выполнены соответствующие исследования. Установлено, что расчетные паспорта прочности, построенные по методике проф. М.М. Протодьяконова и по уравнению Г.Н. Кузнецова, удовлетворительно описывают прочностные свойства углей в пределах небольших напряженных состояний. В области сжимающих напряжений расчетные и экспериментальные кривые расходятся. Кривая, полученная по уравнению Г.Н. Кузнецова проходит, как правило,

ниже экспериментальной, а кривая, полученная по методу М.М. Протодьяконова или совпадает с экспериментальной или проходит выше. В области весьма высоких нормальных сжимающих напряжений кривые пересекутся: первая уйдет в бесконечность, а вторая, достигнув максимума, пойдет параллельно оси абсцисс. Установлено также, что имеющиеся расхождения расчетных огибающих практически не оказывают влияния на результаты аналитических расчетов. Это позволило рекомендовать для практического использования оба расчетных метода построения паспортов прочности. Учитывая, что огибающая, построенная по методике М.М. Протодьяконова, лучше соответствует экспериментальным данным и физически более обоснована, были выполнены работы по упрощению и совершенствованию методики М.М. Протодьяконова, что способствовало более широкому ее использованию [14].

М.Ф. Кунтыш на шести горных породах различной прочности сравнил огибающие к наибольшим кругам напряжений Мора, построенные расчетным методом, с огибающими, полученными при испытании этих же пород в объемном напряженном состоянии. В результате подтверждено совпадение паспортов прочности, полученных расчетным методом М.М. Протодьяконова и экспериментально.

О расположении огибающей предельных кругов напряжений Мора в условиях объемного сжатия ранее судили на основе теоретических предпосылок и испытаний модели трещиноватого массива. Так, по гипотезе М.М. Протодьяконова и В.С. Вобликова огибающая для трещиноватых горных пород должна быть круче и стремиться к одному пределу с монолитной горной породой.

Аналогичный вывод сделан Г.Л. Фисенко и С.Е. Чирковым для углей [18, 19]. Для меломергеля, известняков и песчаников были выполнены исследования как на монолитных, так и на разбитых трещинами образцах [3]. В образцах всех пород наносили три взаимно перпендикулярных системы трещин отрыва. Две из них были параллельны оси призматических образцов. Расстояние между трещинами составляло 1/5 часть стороны квадратного основания призм. Установлено, что с увеличением всестороннего сжатия степень ослабляющего влияния трещиноватости уменьшается. Коэффициенты структурного ослабления, являющиеся отношениями прочности трещиноватых образцов к нетрещиноватым, увеличиваются. Так, для меломергеля этот коэффициент при одноосном сжатии составляет 0,76, при боковом давлении в 5 МПа — 0,87, а при 10 МПа — 0,97. Огибающие предельных кругов напряжений Мора для трещиноватых и монолитных образцов немного расходятся. Аналогичные результаты получены и для известняков. При испытании трещиноватых песчаников образец не изолировали от жидкости, создающей боковое давление, и она проникала по трещинам в образец. В этом случае с увеличением бокового давления прочность песчаников увеличивалась незначительно, что согласуется с результатами исследований о влиянии порового давления на прочность горных пород в условиях объемного неравномерного сжатия. Здесь необходимо отметить, что прово-

дить огибающие к предельным кругам напряжений Мора, полученных при испытании трещиноватых образцов, как показал Г.Н. Кузнецов, физически не обосновано. При таком построении точки касания предельных кругов напряжений с огибающей не соответствуют пространственному расположению поверхностей ослабления, по которым наступает предельное состояние. Более правильно пользоваться обобщенными диаграммами прочности Мора, содержащими кривую предельного состояния монолитного материала и одну предельную кривую для всех плоскостей ослабления.

Так как в окружающем горные выработки массиве, трещиноватые горные породы находятся в условиях треосного неравномерного напряженного состояния вида $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, необходимо было изучить закономерности влияния трещиноватости с учетом совместного влияния на прочность и деформируемость горных пород восьми основных факторов (табл. 4.9)*:

1 — прочности горных пород в образцах $R_{сж}$;

2 — минимального главного напряжения σ;

3 — отношения главных напряжений σ_2 и σ_1;

4 — контактных условий (моделирующих контактные условия в слоистых массивах);

5 — угла наклона трещин β к оси σ_2;

6 — угла наклона трещин γ к оси σ_3;

7 — числа n_2 трещин, направленных вдоль оси σ_2;

8 — числа n_3 трещин, направленных вдоль оси σ_3.

С целью получения достаточно надежных данных при каждом сочетании влияющих факторов опыты повторялись по пять раз.

Для осуществления такой программы полностью необходимо было провести $5 \cdot 7^8 = 28\,824\,000$ опытов. С целью сокращения объема экспериментов они были рационально спланированы.

Эксперименты выполняли на специальной установке, разработанной С.Е. Чирковым и изготовленной Н.И. Пожидаевым. Нагружение образца осуществлялось по определенному режиму (см. рис. 3.2). Контактные условия между образцами пород и пластинами, передающими нагрузку в направлении σ_1, меняли путем использования различных прокладок, клеев и смазок. Деформации образцов измеряли посредством индикаторов часового типа с ценой деления 0,001 мм.

Обработку результатов испытаний (табл. 4.10) для нахождения основных закономерностей проводили по методике, изложенной в работах М.М. Протодьяконова (старшего), М.М. Протодьяконова и Р.И. Тедера, В.М. Мордашева. По известным формулам были вычислены средние арифметические значения разрушающих сил, средние квадратичные отклонения и коэффициенты вариации. Последние были максимальными для меломергеля (21,2 %), а в большинстве случаев колебались в интервале $1 \div 10$ %, что, учитывая большое число влияющих факторов, можно считать вполне допустимыми для дальнейшей обработки.

*Исследования и вывод формул (4.41)—(4.53), (4.66)—(4.80) выполнены совместно с проф. М.М. Протодьяконовым и канд. техн. наук Чан Нгок Тхи.

Таблица 4.9. Значения влияющих факторов

Факторы	1	2	3	4
Прочность пород, МПа	1,4 (меломергель)	32,6 (песчаник)	46,8 (мергель)	59,2 (известняк)
Напряжение σ_3, МПа	0,1	10,0	15,0	20,0
Угол наклона матрицы α, град	0	7	15	22
Контактные условия k_y в направлении оси σ_1 (прокладка)	Клей 88	Клей БФ-2	Без прокладки	Картонная прокладка
Угол наклона β трещин к оси σ_2, град	0	15	30	45
Угол наклона γ трещин к оси σ_3, град	0	15	30	45
Число трещин n_2 вдоль оси σ_2	0	1	2	3
Число трещин n_3 вдоль оси σ_3	0	1	2	3

Продолжение табл. 4.9

Факторы	5	6	7
Прочность пород, МПа	91,7 (мрамор)	146,6 (алевролит)	178,0 (габбро)
Напряжение σ_3, МПа	25,0	30,0	35,0
Угол наклона матрицы α, град	30	37	45
Контактные условия k_y в направлении оси σ_1 (прокладка)	Графитовая смазка	Резиновая прокладка	Графитовая смазка и резиновая прокладка
Угол наклона β трещин к оси σ_2, град	60	75	90
Угол наклона γ трещин к оси σ_3, град	60	75	90
Число трещин n_2 вдоль оси σ_2	4	5	6
Число трещин n_3 вдоль оси σ_3	4	5	6

Первоначально были найдены эмпирические зависимости, учитывающие влияние предела прочности пород при одноосном сжатии $R_{сж}$, минимального главного напряжения σ_3, отношения σ_2/σ_1, определяемого углами наклона матриц α, и контактные условия k_y. Произведя геометрическое усреднение (среднее логарифмическое) полученных значений результатов по каждому из четырех факторов и нанеся средние значения на графики, были получены зависимости средней силы F от каждого из четырех факторов в отдельности при средних значениях прочих факторов. Следует отметить, что хотя разрушающая сила F колебалась в весьма широких пределах (от 1250

Таблица 4.10. Сводные результаты испытаний трещиноватых горных пород

Породы	Факторы							Результаты			
	σ_3, МПа	α, град	k_y	n_2	β	γ	n_3	$F_{факт} \cdot 10^{-1}$, Н	Коэффициент вариации, %	$F_{4расч} \cdot 10^{-1}$, Н	$F_{8расч} \cdot 10^{-1}$, Н
Меломергель	0,1	0	Клей 88	0	0	0	0	126	21,16	196	268
Песчаник	0,1	7	БФ-2	1	15	15	1	1540	1,07	1806	1930
Мергель	0,1	15	Без прокладки	2	30	30	2	3180	4,17	3458	2920
Известняк	0,1	23	Картон	3	45	45	3	3400	5,88	2944	3562
Мрамор	0,1	30	Графитовая	4	60	60	4	3480	14,29	5544	3296
Алевролит	0,1	37	Резиновая	5	75	75	5	6960	12,50	8284	6340
Габбро	0,1	45	Графитовая с резиновой	6	90	90	6	7420	13,96	8134	7550
Меломергель	10	7	Без прокладки	3	60	75	6	1233	4,00	1218	1315
Песчаник	10	15	Картон	4	75	90	0	4590	2,90	4942	4480
Мергель	10	23	Графитовая	5	90	0	1	5100	2,6	6314	5872
Известняк	10	30	Резиновая	6	0	15	2	8500	5,88	7644	7885
Мрамор	10	37	Графитовая	0	15	30	3	9460	6,07	9394	9450
Алевролит	10	45	Клей 88	1	30	45	4	15 160	4,73	19 012	17 300
Габбро	10	0	БВ-2	2	45	60	5	9200	6,52	8232	8730
Меломергель	15	15	Графитовая	6	15	45	5	1286	1,6	1260	1250
Песчаник	15	23	Резиновая	0	30	60	6	3580	11,11	4914	3876
Мергель	15	30	Графитовая с резиновой	1	45	75	0	6750	8,64	5614	6890
Известняк	15	37	Клей 88	2	60	90	1	10 100	3,63	9170	9587
Мрамор	15	45	БФ-2	3	75	0	2	14 800	11,71	15 904	14 632
Алевролит	15	0	Без прокладки	4	90	15	3	10 980	4,41	8876	9323
Габбро	15	7	Картон	5	0	30	4	18 700	3,65	19 600	18 767
Меломергель	20,0	23	Графитовая с резиновой	2	75	15	4	2533	3,27	1134	1293
Песчаник	20,0	30	Клей 88	3	90	30	5	6260	4,53	5824	5999
Мергель	20,0	37	БФ-2	4	0	45	6	7900	5,96	9366	8176

Известняк	20,0	45	Без прокладки	5	15	60	0	12 600	4,23	13 524	12 600
Мрамор	20,0	0	Картон	6	30	75	1	6640	6,77	5432	5700
Алевролит	20,0	7	Графитовая	0	45	90	2	16 600	2,21	14 910	16 400
Габбро	20,0	15	Резиновая	1	60	0	3	19 840	3,03	20 692	20 209
Меломергель	25,0	30	БФ-2	5	30	90	3	2900	3,95	1890	2059
Песчаник	25,0	37	Без прокладки	6	45	0	4	8750	6,67	8526	8630
Мергель	25,0	45	Картон	0	60	15	5	10 340	6,15	10 150	10 353
Известняк	25,0	0	Графитовая	1	75	30	6	4080	20,32	3276	3520
Алевролит	25,0	15	Графитовая с резиновой	3	0	60	1	16 800	18,95	14 448	15 900
Мрамор	25,0	7	Резиновая	2	90	45	0	8800	4,55	9422	9045
Габбро	25,0	23	Клей 88	4	15	75	2	27 750	6,91	26 186	28 208
Меломергель	30,0	37	Картон	1	90	60	2	2650	1,1	2086	2032
Песчаник	30,0	45	Графитовая	2	0	75	3	8770	4,3	6748	2400
Мергель	30,0	0	Резиновая	3	15	90	4	2600	7,69	2618	2697
Известняк	30,0	7	Графитовая с резиновой	4	30	0	5	5720	4,08	5362	5791
Мрамор	30,0	15	Клей 88	5	45	15	6	142 200	8,92	12 614	13 875
Алевролит	30,0	23	БФ-2	6	60	30	0	20 000	2,0	25 312	24 806
Габбро	30,0	30	Без прокладки	0	75	45	1	35 220	0	37 688	35 804
Меломергель	35,0	45	Резиновая	4	45	30	1	2633	4,50	1708	1998
Песчаник	35,0	0	Графитовая с резиновой	5	60	45	2	1240	12,0	1596	1340
Мергель	35,0	7	Клей 88	6	75	60	3	7100	4,11	5782	6765
Известняк	35,0	15	БФ-2	0	90	75	4	10 625	2,0	10 094	10 094
Мрамор	35,0	23	Без прокладки	1	0	90	5	17 700	4,0	19 432	17 877
Алевролит	35,0	30	Картон	2	15	0	6	24 000	5,52	27 958	26 560
Габбро	35,0	37	Графитовая	3	30	15	0	30 340	3,30	29 722	31 088

до 352 200 кН или в 282 раза), после сгруппирования их по каждой из семи испытанных пород, их средние значения легли с высокой точностью возле сглаживающей прямой.

Малая вариация средних значений объясняется тем, что высокая степень усреднения заложена в самом задании условий испытаний при рациональном планировании экспериментов. При изменении прочности горных пород от 1,4 до 178 МПа (в 127 раз) средняя разрушающая сила изменялась в 11,6 раз. При увеличении минимального главного напряжения от 0,1 до 35 МПа средняя разрушающая сила увеличилась в 3,6 раза, при увеличении отношения σ_2/σ_1 от 0 до 1 увеличилась в 3,5 раза, а за счет изменения контактных условий в 1,5 раза.

Полученные закономерности могут быть описаны эмпирическими формулами

$$\bar{F} \cong 965 + 9{,}65\,R_{сж}; \tag{4.41}$$

$$\bar{F} \cong \frac{1\cdot10^4\,\sigma_3 + 33\cdot10^4}{\sigma_3 + 100}; \tag{4.42}$$

$$\bar{F} \cong 2720 + 6110\sqrt{\sin 2\alpha}\,. \tag{4.43}$$

Так как влияние контактных условий нельзя изобразить в виде непрерывной функции, был определен набор семи коэффициентов, характеризующих влияние контактных условий на разрушающую силу F. Коэффициент контактных условий вычисляли по формуле

$$k_y = \frac{\bar{F}_y}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\bar{F}_i}. \tag{4.44}$$

Следуя рекомендациям В.М. Мордашева, была найдена общая формула, являющаяся произведением частных формул парной корреляции. По ней вычисляли все 49 значений разрушающей силы F и строили диаграмму их корреляции с экспериментальными данными. После нахождения нового коэффициенты пропорциональности в конечном итоге получили зависимость

$$F \cong 14\,\frac{(R_{сж} + 100)(0{,}45 + \sqrt{\sin 2\alpha}\,(\sigma_3 + 30)k_y}{\sigma_3 + 100}. \tag{4.45}$$

По эмпирической формуле (4.45) были пересчитаны все переменные значения факторов. Эти значения были прологарифмированы и найдена разность между логарифмическими фактическими и расчетными значениями. Таким образом были получены поправочные коэффициенты для всех 49 сочетаний условий эксперимента.

Влияние числа трещин n_2, n_3 и углов их наклона в образце на величину поправочного коэффициента N_n оценивается кривыми гиперболического типа с несколько повышенным разбросом данных. Поэтому находили совместное влияние обеих систем трещин и углов их наклона на поправочный коэффициент (табл. 4.11).

Таблица 4.11. Поправочные коэффициенты для геометрической суммы трещин обоих систем

$\Sigma = n_2 \sin\gamma + n_3 \sin\beta$	0—2	2—4	4—6	6—8	8—10	10—12
N_n	1,27	0,93	0,90	0,67	0,75	0,6

Разброс значений поправочного коэффициента в этом случае оказался небольшим. Найденная закономерность может быть описана формулой

$$N_n \cong \frac{0{,}52 + n_2 \sin\gamma + n_3 \sin\beta + 3{,}2}{n_2 \sin\gamma + n_3 \sin\beta + 2}. \qquad (4.46)$$

Незначительное влияние на величину N_n минимального главного напряжения может быть описано выражением

$$N_n = \frac{1{,}2\sigma_2 + 55}{\sigma_3 + 70}. \qquad (4.47)$$

Общая зависимость поправочного коэффициента N_n от влияющих факторов описывается уравнением

$$N_n \cong \frac{2}{n_2 \sin\gamma + n_3 \sin\beta + 2} - \frac{30}{\sigma_3 + 70} + 0{,}7. \qquad (4.48)$$

Таким образом, с учетом всех восьми исследованных факторов разрушающее усилие

$$F \cong \frac{14(R_{сж} + 100)(0{,}45 + \sqrt{\sin 2\alpha})(\sigma_3 + 30)k_y}{\sigma_3 + 100} \times$$

$$\times \left(\frac{2}{n_2 \sin\gamma + n_3 \sin\beta + 2} - \frac{30}{\sigma_3 + 70} + 0{,}7\right). \qquad (4.49)$$

Анализом расчетных и фактических значений разрушающих сил (рис. 4.7) установлено, что коэффициент вариации разрушающих сил без учета влияющих факторов составляет 64 %, при учете влияния 4-х факторов — 24 %, а для всех 8 факторов — 15 %.

Для определения главных напряжений σ_1 и σ_2 использованы уравнения

$$\sigma_1 = \frac{F}{S}\left(\cos\alpha + \frac{\sin^2\alpha f_{тр}}{\cos\alpha + \sin\alpha}\right); \qquad (4.50)$$

$$\sigma_2 = \frac{F}{S}\left(\sin\alpha + \frac{\cos^2\alpha f_{тр}}{\sin\alpha + \cos\alpha}\right) \qquad (4.51)$$

или

$$\sigma_1 \cong 1{,}56 \frac{(R_{сж} + 100)(0{,}45 + \sqrt{\sin 2\alpha})(\sigma_3 + 30)k_y}{\sigma_3 + 100}\left[\frac{2}{n_2 \sin\gamma + n_3 \sin\beta + 2} - \right.$$

$$\left. - \frac{30}{\sigma_3 + 70} + 0{,}7\right] \cdot \left(\cos\alpha + \frac{\sin^2\alpha \cdot f_{тр}}{\cos\alpha + \sin\alpha}\right); \qquad (4.52)$$

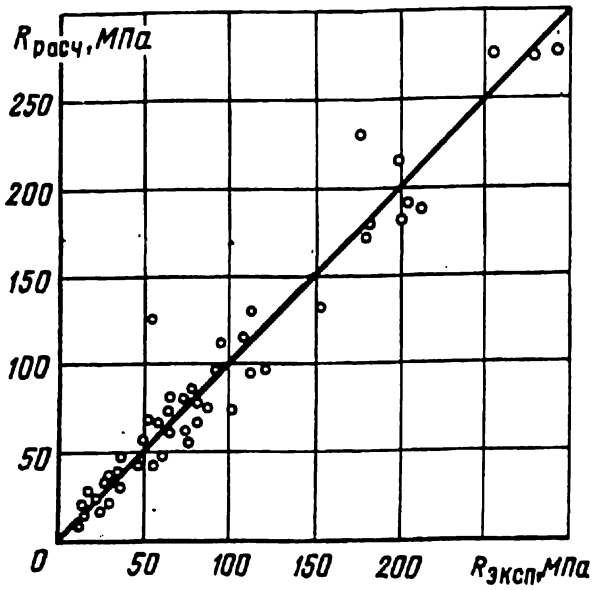


Рис. 4.7. Расчетные $F_{8расч}$ и фактические $F_{8факт}$ значения разрушающих сил для отдельных опытов при весьма учтенных факторах

$$\sigma_2 \cong 1{,}56\,\frac{(R_{сж}+100)(0{,}45+\sqrt{\sin 2\alpha})(\sigma_3+30)k_y}{\sigma_3+100}\left[\frac{2}{n_2\sin\gamma+n_3\sin\beta+2}-\right.$$

$$\left.-\frac{30}{\sigma_3+70}+0{,}7\right]\left(\sin\alpha+\frac{\cos^2\alpha\cdot f_{тр}}{\cos\alpha+\sin\alpha}\right), \qquad (4.53)$$

где $S = 9$ — площадь сечения образца, см^2.

Используя формулы (4.52) и (4.53) можно оценить влияние промежуточного главного напряжения на прочность горных пород при различных значениях минимального главного напряжения. Видно, что при $\sigma_3 < \sigma_2 < \sigma_1$ прочность пород выше, чем при $\sigma_2 = \sigma_3$ или $\sigma_2 = \sigma_1$.

Другой способ обработки экспериментальных данных заключался в следующем. По полученным средним значениям разрушающих сил вычисляли предельные значения для каждого из 49 условий испытаний. По усредненным их значениям находили влияние всех восьми факторов. Затем исключили влияние фактора, для которого была получена наиболее тесная связь путем пересчета фактических значений R_1 на найденные поправочные коэффициенты. Вновь оценивали влияние оставшихся факторов с новыми значениями R_1, измененными при исключении влияния одного из факторов. Находили наиболее тесную и существенную зависимость R_1 с другим влияющим фактором и полученные при первом пересчете значения прочности изменили с учетом новых поправочных коэффициентов. Такой пересчет выполнен в два круга.

Полученные закономерности влияния различных факторов на прочность пород (рис. 4.8—4.13) позволили найти следующие эмпирические парные зависимости:

$$\bar{R}_1 = \bar{R}_{1,сух}\left(\frac{k_{yi}}{1{,}26}\right); \quad \bar{R}_1 = 138 + 0{,}96\,\bar{R}_{сж}; \qquad (4.54)$$

$$\bar{R}_1 = R_{\sigma_3=0}\sqrt{\left(\frac{\sigma_3}{R_{сж}}+7{,}8\right)^2-60}; \qquad (4.55)$$

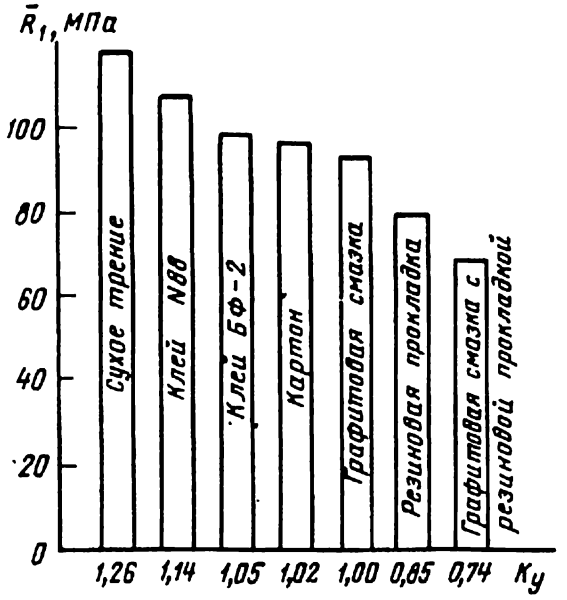


Рис. 4.8. Изменение средней прочности $\bar{R}_1$ трещиноватых горных пород в зависимости от контактных условий K_y

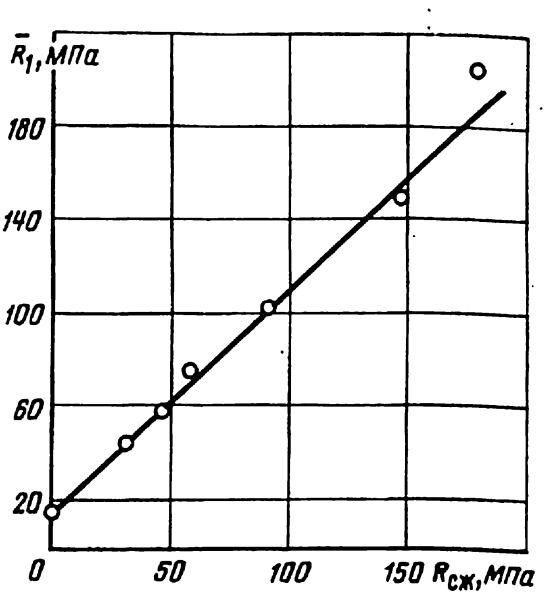
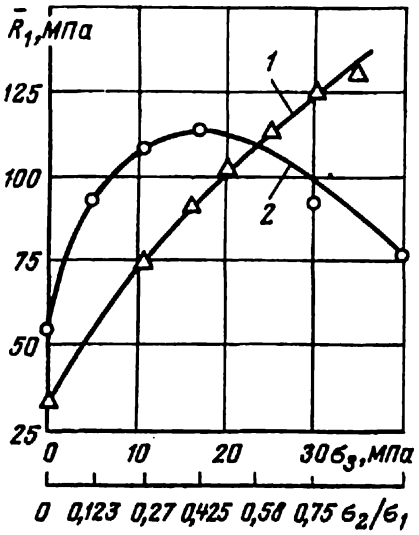


Рис. 4.9. Зависимость средней прочности $\bar{R}_1$ трещиноватости горных пород от прочности их в монолитном состоянии $R_{сж}$



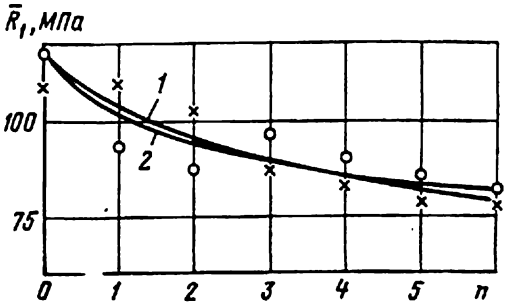


Рис. 4.11. Влияние на прочность горных пород $\bar{R}_1$ числа n трещин в образце:

1 — трещины параллельны σ_2; *2* — трещины параллельны σ_3

Рис. 4.10. Влияние на среднюю прочность трещиноватых горных пород минимального главного напряжения σ_3 (*1*) и отношения σ_2/σ_1 промежуточного главного напряжения к максимальному главному напряжению (*2*)

$$\bar{R}_1 = \bar{R}_{\frac{\sigma_2}{\sigma_1}=0}\left[1+3{,}2\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}+0{,}15\right)-2{,}6\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}+0{,}15\right)^2\right]; \qquad (4.56)$$

$$\bar{R}_1 = \bar{R}_{n_2=0}\left(1-\frac{n_2}{5{,}1+2{,}4n_2}\right); \qquad (4.57)$$

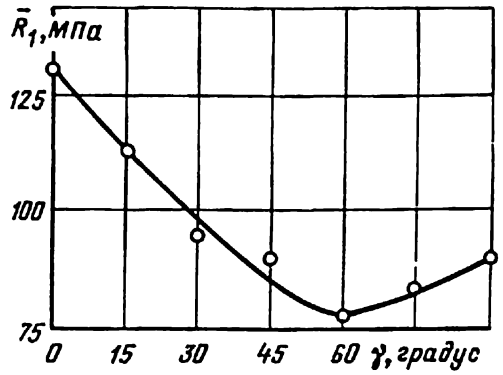


Рис. 4.12. Изменение прочности $\bar{R}_1$ трещиноватых горных пород в зависимости от угла γ наклона трещин к направлению минимального главного напряжения

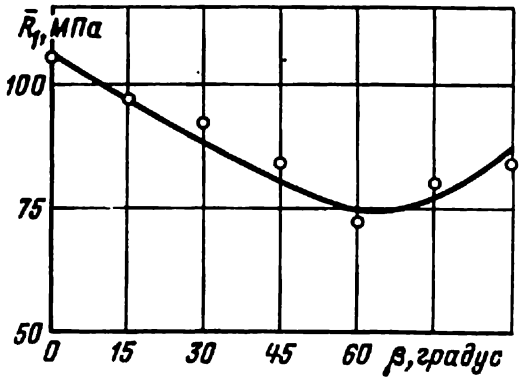


Рис. 4.13. Изменение прочности трещиноватых горных пород $\bar{R}_1$ в зависимости от угла наклона трещин β к направлению промежуточного главного напряжения

$$\bar{R}_1 = \bar{R}_{n_3=0}\left(1 - \frac{n_3}{5{,}1 + 2{,}4\,n_3}\right); \tag{4.58}$$

$$\bar{R}_1 = \bar{R}_{\beta=0}\left[1{,}37 - 0{,}74\sin(\beta + 30^\circ)\right]; \tag{4.59}$$

$$\bar{R}_1 = \bar{R}_{\gamma=0}\left[1{,}21 - 0{,}42\sin(\gamma + 30^\circ)\right]. \tag{4.60}$$

В этом случае общая формула, описывающая влияние всех изученных факторов, будет представлена в виде

$$\lim \sigma_1 = R_1 = R_{сж}\left\{\sqrt{\left(\frac{\tau_3}{R_{сж}} + 7{,}8\right)^2 - 60}\cdot\left[1 + 3{,}2\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} + 0{,}15\right) - 2{,}6\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} + 0{,}15\right)^2\right]\left(1 - \frac{n_2}{5{,}1 + 2{,}4\,n_2}\right)\cdot\left(1 - \frac{n_3}{5{,}1 + 2{,}4\,n_3}\right) \times \right.$$

$$\left. \times \left[1{,}37 - 0{,}74\sin(\beta + 30^\circ)\right]\left[1{,}21 - 0{,}42\sin(\gamma + 30^\circ)\right]\cdot\frac{k_y}{1{,}26}\right\}. \tag{4.61}$$

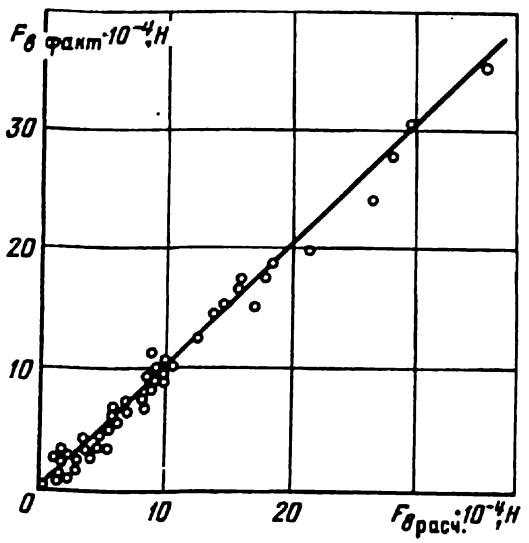


Рис. 4.14. Расчетные $R_{расч}$ и экспериментальные $R_{эксп}$ значения прочности трещиноватых горных пород

Сравнение расчетных и экспериментальных значений прочности (рис. 4.14) показало, что формула (4.61) также может быть использована для практических целей.

Влияние минимального главного напряжения можно оценить более точно, если использовать не только предел прочности при одноосном сжатии, но и отношение пре-

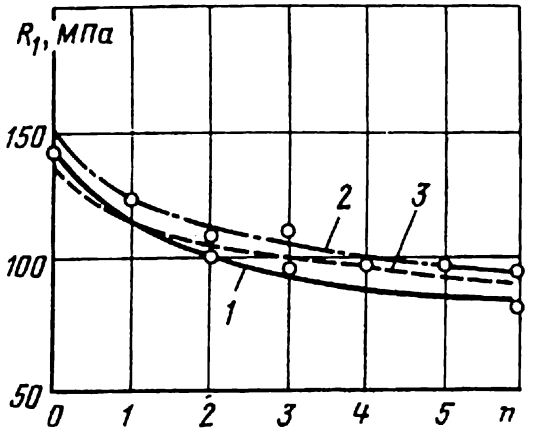


Рис. 4.15. Зависимость предела прочности известняка R_1 от количества трещин n в испытываемых образцах при $\sigma_2 = \sigma_3 = 20$ МПа:

1 — экспериментальная; *2* и *3* — рассчитанная по формулам соответственно (4.52) и (4.61)

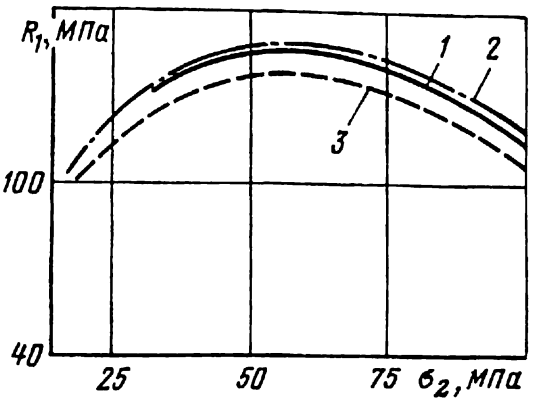


Рис. 4.16. Зависимости прочности R_1 трещиноватого известняка (три трещины) от величины промежуточного главного напряжения σ_2 при $\sigma_3 =$ $= 20$ МПа:

1 — экспериментальная зависимость; *2*, *3* — зависимости, полученные соответственно по формулам (4.52) и (4.61)

делов прочности при сжатии и растяжении. С этой целью можно использовать формулу

$$R_1 = \sigma_3 + \frac{0{,}73 l R_{сж}}{q_2 \sin(90° - \varphi)}, \qquad (4.62)$$

где l, q_2, φ — безразмерные параметры огибающей предельных кругов напряжений Мора, учитывающие $R_{сж}$, $R_р$ и их отношение (см. табл. 3.5).

Для проверки установленных зависимостей проведены специальные эксперименты на образцах известняка, в которых наносили одну систему, состоящую из 1, 2, 3, 4, 5 и 6 трещин, расположенных под углом $\gamma = 45°$. Испытания выполняли при $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3 > 0$ и $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0$, где $\sigma_3 = 20$ МПа. При каждом варианте разрушили по 5 образцов.

О соответствии расчетных значений прочности экспериментальным можно судить по рис. 4.15 и 4.16.

4.8. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТРЕЩИНОВАТЫХ ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ ТРЕХОСНОГО НЕРАВНОМЕРНОГО СЖАТИЯ

Деформации однородных изотропных горных пород до предела упругости в условиях трехосного напряженного состояния определяют по уравнениям, составленным на основе закона Гука:

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E}[\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)];$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{E}[\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)]; \qquad (4.63)$$

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E}[\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)].$$

Деформации анизотропной однородной породы могут быть определены также уравнениями на основе закона Гука, которые в самом общем виде должны содержать 36 упругих постоянных. При наличии в анизотропной среде упругой симметрии и принимая нормали к плоскостям ее за координатные оси x, y и z, обобщенный закон Гука в компонентах напряжений и деформаций, отнесенных к этим осям, записывается в форме

$$\epsilon_x = a_{11}\sigma_x + a_{12}\sigma_y + a_{13}\sigma_z;$$

$$\epsilon_y = a_{21}\sigma_x + a_{22}\sigma_y + a_{23}\sigma_z; \qquad (4.64)$$

$$\epsilon_z = a_{31}\sigma_x + a_{32}\sigma_y + a_{33}\sigma_z.$$

При $a_{ij} = a_{ji}$ коэффициенты в уравнениях (4.64) выражаются через модули пропорциональности и коэффициенты Пуассона зависимостями

$$a_{11} = E_1^{-1}; \qquad a_{12} = -\mu_{12}E_1^{-1};$$

$$a_{22} = E_2^{-1}; \qquad a_{13} = -\mu_{13}E_1^{-1}; \qquad (4.65)$$

$$a_{33} = E_3^{-1}; \qquad a_{23} = -\mu_{23}E_2^{-1},$$

где E_1, E_2, E_3 — модули пропорциональности напряжений и деформаций вдоль главных осей упругости; μ_{12}, μ_{13}, μ_{23} — коэффициенты Пуассона.

Для трещиноватых горных пород модуль пропорциональности напряжений и деформаций изменяется по мере увеличения напряжений, т.е. является функцией σ. Естественно, что и условный коэффициент Пуассона в этом случае будет функцией напряжений и параметров трещиноватости (раскрытости трещин, характеристики их поверхностей, направления трещин и других). Учесть все влияющие факторы аналитически пока не представляется возможным, поэтому на данном этапе исследований была предпринята попытка оценить влияние исследуемых факторов лишь на суммарную деформацию, рассмотреть общие закономерности изменения суммарной деформации в зависимости от уровня напряжений σ_1, σ_2; σ_3, степени трещиноватости (n_2, n_3), углов наклона трещин β и γ, контактных условий.

С этой целью при всех опытах по приведенной выше схеме рационально спланированных экспериментов строили диаграммы зависимостей абсолютной деформации от нагрузки. Эксперимент повторяли по 5 раз при каждом сочетании условий.

На графике (рис. 4.17) по оси абсцисс нанесены значения абсолютной деформации, а по оси ординат величина нагрузки. Минимальное

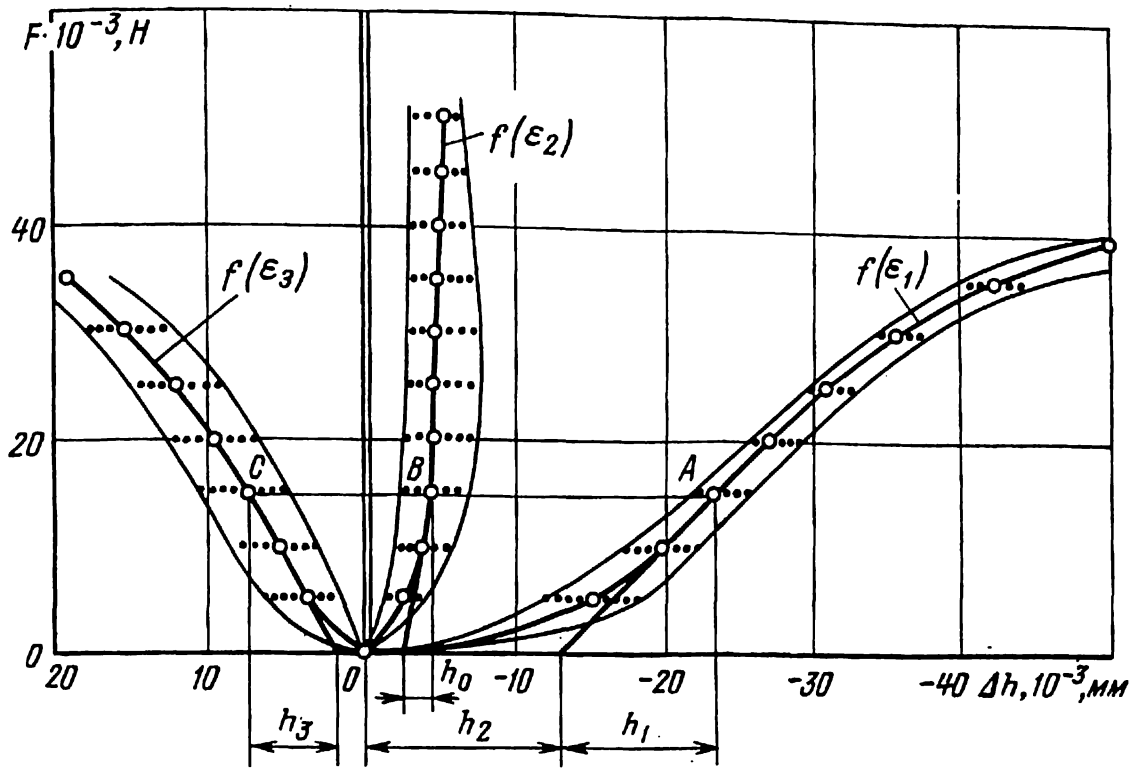


Рис. 4.17. Графический способ нахождения средних диаграмм F — Δh — нагрузка — деформация (на примере известняка)

главное напряжение при этом сохранялось постоянным, заданным по условиям эксперимента. До своего уровня оно доводилось параллельно с ростом нагрузки F. Опытные точки располагались с некоторым разбросом данных. Среднее значение находили графическим способом на каждом уровне нагрузки. По полученным средним точкам для всех участков на глаз проводили сглаживающую кривую. Расчеты показывали, что она весьма мало отличается от кривой, вычисленной по методу наименьших квадратов.

В результате, на основании 735 первичных кривых было получено 147 средних кривых, которые показали, что, как и при одноосном сжатии, в начале нагружения отсутствует прямолинейная связь между деформацией и напряжением. Можно выделить три области: область деформации обжатия h_0, когда происходит сжатие образца без появления значительных напряжений в нем; область условной упругой деформации h_1, определяемую продолжением наиболее стабильной линейной зависимости на диаграмме $\sigma = f(\epsilon)$ до пересечения с осью абсцисс (см. рис. 4.17) и область перехода к разрушению. Взяв точку A, находящуюся на середине отрезка условной упругой деформации и проведя линию, параллельную к оси абсцисс и пересекающую участки условной упругой линейной деформации по осям *2* и *3* в точках B и C, можно получить условные упругие деформации h_2 и h_3, поделив которые на размеры образцов (30×30×30 мм) можно найти относительные величины деформаций ϵ_2 и ϵ_3.

В табл. 4.12 со знаком минус выражены деформации сжатия, со знаком плюс — растяжения.

Таблица 4.12. Сводные результаты измерения упругой деформируемости трещиноватых горных пород

Породы	Факторы							Фактические деформации			Расчетные деформации		
	σ_3, МПа	α, град	K_y	n_3	β, град	γ, град	n_2	ϵ_1 факт	ϵ_2 факт	ϵ_3 факт	ϵ_1 расч	ϵ_2 расч	ϵ_3 расч
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Меломергель	0	0	Клей 88	0	0	0	0	−26,7	13,3	13,5	−20,1	12,8	16,2
Песчаник	0	7	БФ-2	1	15	15	1	−15,3	3,6	5,6	−12,4	3,5	7,4
Мергель	0	15	Без прокладки	2	30	30	2	−10,3	−2,7	10,3	−16,0	−3,2	12,3
Известняк	0	23	Картон	3	45	45	3	−11,3	−2,0	7,0	−11,5	−1,5	5,6
Мрамор	0	30	Графитовая	4	60	60	4	−14,3	−6,0	5,0	−12,4	−5,3	3,9
Алевролит	0	37	Резиновая	5	75	75	5	−11,7	−5,3	3,1	−8,2	−4,4	2,0
Габбро	0	45	Графитовая с резиновой	6	90	90	6	−7,3	−4,0	4,3	−6,9	−3,1	3,0
Меломергель	10	7	Без прокладки	3	60	75	6	−28,3	4,3	19,3	−28,7	+6,8	25,2
Песчаник	10	15	Картон	4	75	90	0	−15,9	−3,3	3,0	−11,9	−2,9	4,5
Мергель	10	23	Графитовая	5	90	0	1	−8,3	−1,7	2,0	−6,9	−1,8	2,2
Известняк	10	30	Резиновая	6	0	15	2	−5,7	−2,7	1,6	−1,7	−3,1	1,2
Мрамор	10	37	Графитовая с резиновой	0	15	30	3	−2,3	−1,7	2,0	−3,0	−1,2	1,5
Алевролит	10	45	Клей 88	1	30	45	4	−2,0	−1,3	1,0	−2,3	−1,4	0,7
Габбро	10	0	БФ-2	2	45	60	5	−5,0	−1,63	1,3	−6,1	−1,1	1,7
Меломергель	15	15	Графитовая	6	15	45	5	−24,7	−3,3	5,0	−24,8	−4,0	6,6
Песчаник	15	23	Резиновая	0	30	60	6	−10,7	−3,6	2,2	−8,0	−3,8	1,8
Мергель	15	30	Графитовая с резиновой	1	45	75	0	−5,3	−3,7	1,7	−4,7	−3,4	2,3
Известняк	15	37	Клей 88	2	60	90	1	−3,0	−2,3	2,0	−3,8	−1,8	1,4
Мрамор	15	45	БФ-2	3	75	0	2	−2,0	−0,7	1,7	−4,4	−0,9	1,8
Алевролит	15	0	Без прокладки	4	90	15	3	−2,3	1,6	1,7	−2,7	1,5	2,9
Габбро	15	7	Картон	5	0	30	4	−3,3	1,3	0,6	−3,5	1,3	1,0

Меломергель	20	23	Графитовая с резиновой	2	75	15	4	−17,7	−5,0	8,3	−15,1	6,5	7,5
Песчаник	20	30	Клей 88	3	90	30	5	−6,3	−4,3	2,3	−7,5	−4,1	2,8
Мергель	20	37	БФ-2	4	0	45	6	−7,0	−1,3	1,0	−5,0	−1,2	1,3
Известняк	20	45	Без прокладки	5	15	60	0	−4,5	−2,0	2,0	−6,6	−1,9	1,8
Мрамор	20	0	Картон	6	30	75	1	−8,3	3,3	1,3	−8,1	3,9	1,9
Алевролит	20	7	Графитовая	0	45	90	2	−3,0	−0,3	1,0	−3,4	3,4	0,7
Габбро	20	15	Резиновая	1	60	0	3	−3,0	−2,0	2,7	−2,9	−1,2	2,5
Меломергель	25	30	БФ-2	5	30	90	3	−18,0	−10,0	7,3	−16,4	−11,5	5,5
Песчаник	25	37	Без прокладки	6	45	0	4	−6,0	−2,0	2,0	−7,1	−1,8	2,6
Мергель	25	45	Картон	0	60	15	5	−12,7	−6,0	2,3	−8,8	−9,8	1,8
Известняк	25	0	Графитовая	1	75	30	6	−10,0	7,0	1,3	−12,3	7,1	2,0
Мрамор	25	7	Резиновая	2	90	45	0	−3,7	0,7	0,3	−3,4	1,0	0,6
Алевролит	25	15	Графитовая с резиновой	3	0	60	1	−2,7	0,3	0,6	−2,8	0,1	1,8
Габбро	25	23	Клей 88	4	15	75	2	−2,4	−0,7	0,7	−2,3	−0,5	0,6
Меломергель	30	37	Картон	1	90	60	2	−12,7	−11,7	5,0	−8,6	−13,5	5,1
Песчаник	30	45	Графитовая	2	0	75	3	−3,7	−4,0	4,0	−4,1	−3,5	3,6
Мергель	30	0	Резиновая	3	15	90	4	−10,6	8,6	0,7	−8,7	5,8	1,3
Известняк	30	7	Графитовая с резиновой	4	30	0	5	−7,0	−3,3	1,3	−5,0	−2,8	1,7
Мрамор	30	15	Клей 88	5	45	15	6	−3,3	−0,7	1,7	−3,6	−0,5	1,0
Алевролит	30	23	БФ-2	6	60	30	0	−2,7	−0,3	1,0	−2,5	−0,3	0,5
Габбро	30	30	Без прокладки	0	75	45	1	−1,3	−0,3	1,0	−1,9	−0,2	0,6
Меломергель	35	45	Резиновая	4	45	30	1	−9,7	−11,7	3,3	−7,6	−10,3	2,0
Песчаник	35	0	Графитовая с резиновой	5	60	45	2	−12,3	2,6	3,1	−8,8	2,0	2,8
Мергель	35	7	Клей 88	6	75	60	3	−6,0	−1,7	0,8	−6,8	−1,9	1,9
Известняк	35	15	БФ-2	0	90	75	4	−4,0	0,7	1,7	−5,5	0,5	1,1
Мрамор	35	23	Без прокладки	1	0	90	5	−2,0	−0,3	0,6	−3,0	−0,3	0,9
Алевролит	35	30	Картон	2	15	0	6	−2,0	−0,3	0,3	−1,5	−0,5	0,3
Габбро	35	37	Графитовая	3	30	15	0	−2,1	−0,3	0,3	−2,3	−0,4	0,2

Используя методику обработки экспериментальных данных, изложенную в предыдущем параграфе, получены закономерности изменения средних условных упругих деформаций при влиянии исследуемых факторов.

Величина средней упругой деформации уменьшалась при увеличении предела прочности горных пород в 7,6 раза для ϵ_1, в 4,5 раза для ϵ_2 и в 5,2 раза для ϵ_3. При увеличении напряжения σ_3, ϵ_1 уменьшалась в 2,2 раза, а ϵ_3 — в 5,5 раза. Величина ϵ_2 при этом постепенно возрастала, что вполне логично. При увеличении отношения σ_2/σ_1 (равного $\operatorname{tg}\alpha$) ϵ_1 гиперболически уменьшается в 1,7 раза, ϵ_3 уменьшалась по приблизительно прямолинейной зависимости в 2,5 раза. Деформация ϵ_2 от отношения σ_2/σ_1 изменяется также по гиперболической зависимости, пересекая ось абсцисс в точке $\sigma_2/\sigma_1 = 0{,}22$, т.е. переходит из области растягивающих деформаций при малых значениях σ_2 в область сжимающих деформаций при σ_2/σ_1 более 0,22. С увеличением степени трещиноватости, оцениваемой суммой $n_2 \sin\gamma + n_3 \sin\beta$, величины ϵ_1, ϵ_2, ϵ_3 увеличивались соответственно в 1,5, 2,0 и 1,6 раза.

Влияние контактных условий на деформации ϵ_1, ϵ_2, ϵ_3 учтено в виде коэффициентов, как это было сделано в предыдущем параграфе.

Спрямлением гиперболических зависимостей были получены следующие частные формулы парной корреляции.

1. Для условных упругих деформаций по оси σ_1

$$\epsilon_1 \cdot 10^4 \cong \frac{0{,}95 R_{сж} + 6890}{R_{сж} + 323}; \tag{4.66}$$

$$\epsilon_1 \cdot 10^4 \cong \frac{2{,}7\sigma_3 + 6{,}7}{\sigma_3 + 0{,}6}; \tag{4.67}$$

$$\epsilon_1 \cdot 10^4 \cong \frac{2{,}7\frac{\sigma_2}{\sigma_1} + 6{,}7}{\frac{\sigma_2}{\sigma_1} + 0{,}6}; \tag{4.68}$$

$$\epsilon_1 \cdot 10^4 \cong -4{,}5 - 0{,}9(n_2 \sin\gamma + n_3 \sin\beta). \tag{4.69}$$

2. Для условных упругих деформаций по оси σ_2

$$\epsilon_2 \cdot 10^4 \cong -\frac{0{,}4 R_{сж} + 657}{R_{сж} + 219}; \tag{4.70}$$

$$\epsilon_2 \cdot 10^4 \cong \frac{3{,}1\sigma_3 + 7{,}7}{\sigma_3 + 58}; \tag{4.71}$$

$$\epsilon_2 \cdot 10^4 \cong \frac{-7{,}5\frac{\sigma_2}{\sigma_1} + 1{,}5}{\frac{\sigma_2}{\sigma_1} + 0{,}30}; \tag{4.72}$$

$$\epsilon_2 \cdot 10^4 \cong -0{,}5 - 0{,}18(n_2 \sin\gamma + n_3 \sin\beta). \tag{4.73}$$

3. Для условной упругой деформации в направлении оси σ_3

$$\epsilon_3 \cdot 10^4 \cong \frac{2400}{R_{сж} + 300}; \tag{4.74}$$

$$\epsilon_3 \cdot 10^4 \cong \frac{0{,}75\,R_{сж} - 177}{\sigma_3 + 24}; \tag{4.75}$$

$$\epsilon_3 \cdot 10^4 \cong 4{,}2 - 2{,}4\,\frac{\sigma_2}{\sigma_1}; \tag{4.76}$$

$$\epsilon_3 \cdot 10^4 \cong 1{,}8 + 0{,}22\,(n_2 \sin\gamma + n_3 \sin\beta). \tag{4.77}$$

Определив, что при учете одновременного влияния всех исследуемых факторов могут быть использованы произведения частных формул парной корреляции, была получена система эмпирических формул:

$$\epsilon_1 \cong -0{,}0019\left(1 + \frac{6930}{R_{сж} + 323}\right)\left(1 + \frac{1156}{\sigma_3 + 44}\right)\left(1 + \frac{1{,}86}{\frac{\sigma_2}{\sigma_1} + 0{,}62}\right) \times$$

$$\times\,(5 + n_2 \sin\gamma + n_3 \sin\beta)\,k_y \cdot 10^{-4}; \tag{4.78}$$

$$\epsilon_2 \cong -2{,}07\left(1 + \frac{1423}{R_{сж} + 219}\right)\left(1 - \frac{55{,}5}{\sigma_3 + 58}\right)\left(1 - \frac{0{,}5}{\frac{\sigma_2}{\sigma_1} + 0{,}62}\right) \times$$

$$\times\,(2{,}8 + n_2 \sin\gamma + n_3 \sin\beta)\,k_y \cdot 10^{-4}; \tag{4.79}$$

$$\epsilon_3 \cong -35{,}1 \cdot \frac{1}{R_{сж} + 300}\left(\frac{257}{\sigma_3 + 24} - 1\right)\left(1{,}75 - \frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right) \times$$

$$\times\,(8{,}2 + n_2 \sin\gamma + n_3 \sin\beta)\,k_y \cdot 10^{-4}. \tag{4.80}$$

При сравнении величин деформаций, рассчитанных по формулам (4.78—4.80), с фактическими (см. табл. 4.12) видно, что они весьма близки между собой и оцениваются коэффициентами вариации в 9 % для ϵ_1 и в 11 % для ϵ_2 и ϵ_3.

Модуль деформации пород в зависимости от напряженного состояния и параметров трещиноватости определили на прямолинейном участке условно упругих деформаций. Методом последовательного исключения влияющих факторов были найдены основные закономерности.

Наибольшие значения модулей деформации наблюдались при сухом контакте испытываемых образцов с металлическими пластинами, наименьшие значения — при использовании картонных прокладок (рис. 4.18).

С увеличением прочности горных пород модуль деформации увеличивается, однако, интенсивность его увеличения с ростом прочности постепенно уменьшается (рис. 4.19). Эта закономерность может

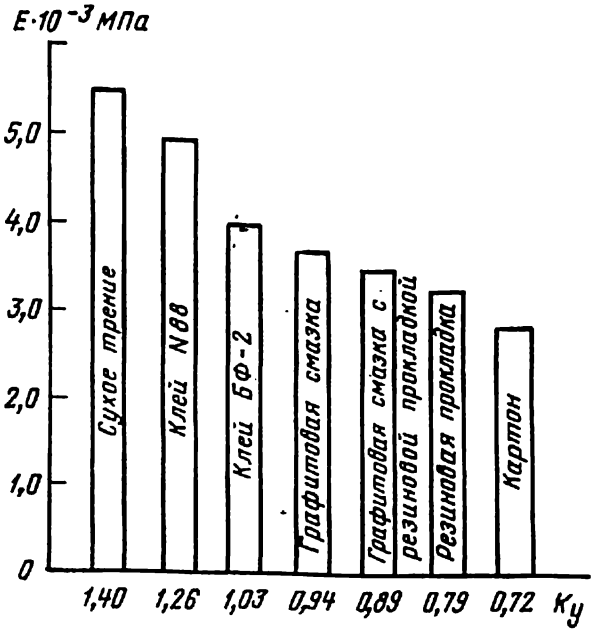


Рис. 4.18. Изменение модуля деформации E трещиноватых горных пород в зависимости от контактных условий K_y

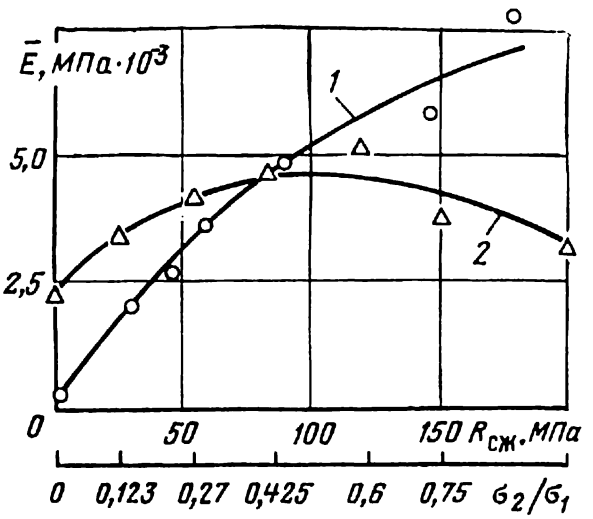


Рис. 4.19. Зависимость модуля деформаций $\bar{E}$ трещиноватых горных пород от прочности $R_{сж}$ в монолитном состоянии (*1*) и от соотношения напряжений σ_2/σ_1 (*2*)

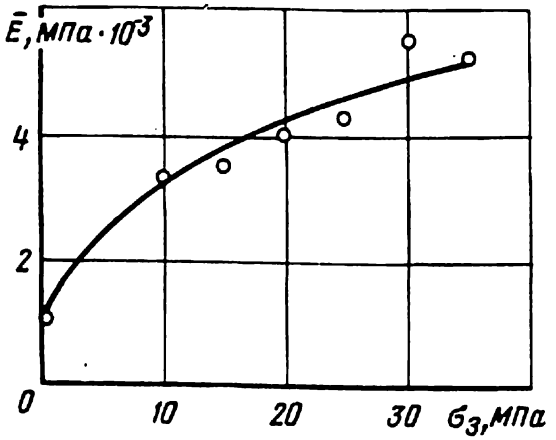


Рис. 4.20. Зависимость модуля деформации $\bar{E}$ трещиноватых горных пород от величины минимального главного напряжения σ_3

быть описана эмпирической зависимостью

$$E \cdot 10^{-4} \cong 0{,}2 + \frac{R_{сж}}{121 + 0{,}084\,R_{сж}} \cdot \quad (4.81)$$

Увеличение модуля деформации наблюдается и с повышением минимального главного напряжения (рис. 4.20), которое может быть описано формулой

$$E \cdot 10^{-4} \cong 1{,}23 + \frac{\sigma_3}{37 + 0{,}147\,\sigma_3} \cdot \quad (4.82)$$

Величина модуля деформации в зависимости от промежуточного главного напряжения (от минимального до максимального) выражается формулой

$$E \cdot 10^{-4} \cong \sqrt{6{,}97 + 50\frac{\sigma_2}{\sigma_1} - 44{,}6\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^2}\,. \quad (4.83)$$

Зависимость модуля деформации пород от числа трещин в деформируемом объеме для рассматриваемых условий оказалась прямолинейной и одинаковой для трещин, направленных как вдоль оси σ_2, так и вдоль оси σ_3. Для описания этой зависимости можно использовать уравнение прямой:

$$E \cdot 10^{-4} = 4{,}7 - 0{,}28\,n_2\,; \quad (4.84)$$

Таблица 4.13. Сводные результаты исследований модуля деформации трещиноватых горных пород

Породы, их прочность при одноосном сжатии, МПа (в скобках)	Факторы								Модуль деформации $E \cdot 10^{-10}$, МПа	
	σ_3, МПа	$\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$	Контактные условия k_y	n_2	n_3	β^0	γ^0	Уровень нагрузки $F \cdot 10^{-2}$, Н	измеренный	рассчитанный
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Меломергель (1,4)	0	0	Клей 88	0	0	0	0	40	0,17	0,17
Песчаник (32,6)	0	0,123	Клей БФ-2	1	1	15	15	100	0,71	0,98
Мергель (46,8)	0	0,27	Сухое трение	2	2	30	30	150	1,55	1,35
Известняк (59,2)	0	0,425	Картон	3	3	45	45	100	0,88	0,65
Мрамор (91,7)	0	0,6	Графитовая смазка	4	4	60	60	200	1,32	1,20
Алевролит (146,6)	0	0,75	Резиновая прокладка	5	5	75	75	150	1,08	1,10
Габбро (178,0)	0	1,0	Графитовая смазка с резиновой прокладкой	6	6	90	90	200	1,02	1,05
Меломергель (1,4)	10	0,123	Сухое трение	3	6	60	75	60	0,23	0,21
Песчаник (32,6)	10	0,27	Картон	4	0	75	90	250	1,68	1,54
Мергель (46,8)	10	0,425	Графитовая смазка	5	1	90	0	250	3,00	3,05
Известняк (592)	10	0,6	Резиновая прокладка	6	2	0	15	200	3,32	2,78
Мрамор (917)	10	0,75	Графитовая смазка с резиновой прокладкой	0	3	15	30	150	5,50	4,3
Алевролит (1966)	10	1,0	Клей 88	1	4	30	45	150	5,60	4,65
Габбро (1780)	10	0	Клей БФ-2	2	5	45	60	150	3,32	2,7
Меломергель (14)	15	0,27	Графитовая смазка	6	5	15	45	50	0,21	0,17
Песчаник (326)	15	0,425	Резиновая прокладка	0	6	30	60	150	1,38	1,67
Мергель (468)	15	0,6	Графитовая смазка с резиновой прокладкой	1	0	45	75	200	3,56	3,46
Известняк (592)	15	0,75	Клей 88	2	1	60	90	200	5,63	5,3
Мрамор (917)	15	1,0	Клей БФ-2	3	2	75	0	150	5,60	5,0
Алевролит (1466)	15	0	Сухое трение	4	3	90	15	100	4,85	5,2
Габбро (1780)	15	0,123	Картон	5	4	0	30	150	3,35	3,7
Меломергель (14)	20	0,425	Графитовая смазка с резиновой прокладкой	2	4	75	15	50	0,28	0,32

Продолжение табл. 4.13

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Песчаник (326)	20	0,6	Клей 88	3	5	90	30	150	2,98	2,85
Мергель (468)	20	0,75	Клей БФ-2	4	6	0	45	150	3,26	2,95
Известняк (592)	20	1,0	Сухое трение	5	0	15	60	250	5,0	4,8
Мрамор (917)	20	0	Картон	6	1	30	75	150	2,0	1,95
Алевролит (1466)	20	0,123	Графитовая смазка	0	2	45	90	150	7,3	6,1
Габбро (1780)	20	0,27	Резиновая прокладка	1	3	60	0	150	7,1	7,35
Меломергель (14)	25	0,6	Клей БФ-2	5	3	30	90	80	0,31	0,32
Песчаник (326)	25	0,75	Сухое трение	6	4	45	0	200	2,82	3,35
Мергель (468)	25	1,0	Картон	0	5	60	15	300	1,76	2,25
Известняк (592)	25	0	Графитовая смазка	1	6	75	30	200	2,22	2,15
Мрамор (917)	25	0,123	Резиновая прокладка	2	0	90	45	200	4,45	4,3
Алевролит (1466)	25	0,27	Графитовая смазка с резиновой прокладкой	3	1	0	60	150	7,85	8,3
Габбро (1780)	25	0,425	Клей 88	4	2	15	75	250	10,4	10,8
Меломергель (14)	30	0,75	Картон	1	2	90	60	40	0,28	0,34
Песчаник (326)	30	1,0	Графитовая смазка	2	3	0	75	150	3,02	2,95
Мергель (468)	30	0	Резиновая прокладка	3	4	15	90	150	2,11	1,9
Известняк (592)	30	0,123	Графитовая смазка с резиновой прокладкой	4	5	30	0	200	3,13	3,15
Мрамор (917)	30	0,27	Клей 88	5	6	45	15	200	4,85	4,85
Алевролит (1466)	30	0,425	Клей БФ-2	6	0	60	30	300	7,4	7,4
Габбро (1780)	30	0,6	Сухое трение	0	1	75	45	200	18,2	18,5
Меломергель (14)	35	1,0	Резиновая прокладка	4	1	45	30	40	0,31	0,24
Песчаник (326)	35	0	Графитовая смазка с резиновой прокладкой	5	2	60	45	150	1,35	1,35
Мергель (468)	35	0,123	Клей 88	6	3	75	60	200	3,67	3,2
Известняк (592)	35	0,27	Клей БФ-2	0	4	90	75	200	5,33	5,35
Мрамор (917)	35	0,425	Сухое трение	1	5	0	90	200	10,0	11,5
Алевролит (1466)	35	0,6	Картон	2	6	15	0	100	6,3	7,1
Габбро (1780)	35	0,75	Графитовая смазка	3	0	30	15	250	10,2	10,7

$$E \cdot 10^{-4} = 4{,}7 - 0{,}28 n_3 . \qquad (4.85)$$

Взаимосвязь угла наклона трещин с величиной модуля деформации менее четкая, тем не менее, ее можно приближенно описать зависимостями вида

$$E \cdot 10^{-4} = 6{,}9 - 3{,}6 \sin(\beta + 40°); \qquad (4.86)$$

$$E \cdot 10^{-4} = 6{,}9 - 3{,}6 \sin(\gamma + 40°). \qquad (4.87)$$

Общее уравнение для вычисления модуля деформации, учитывающее влияние всех восьми исследуемых факторов, можно записать в виде

$$E \cdot 10^{-4} = [0{,}2 + \frac{R_{сж}}{121 + 0{,}084 R_{сж}}] \sqrt{6{,}97 + 50 \frac{\sigma_2}{\sigma_1} - 44{,}6 (\frac{\sigma_2}{\sigma_1})^2} \times$$

$$\times (1{,}23 + \frac{\sigma_3}{37 + 0{,}147 \sigma_3}) (4{,}7 - 0{,}28 n_2)(4{,}7 - 0{,}28 n_3) \times$$

$$\times [6{,}9 - 3{,}6 \sin(\beta + 40°)][6{,}9 - 3{,}6(\gamma + 40°)] k_y : 3460. \qquad (4.88)$$

Сравнение расчетных модулей деформации с фактическими (табл. 4.13) показало, что установленная зависимость (4.88) достаточно надежна (коэффициент корреляции 0,86).

4.9. ПРЕДЕЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ПРОЧНОСТИ ТРЕЩИНОВАТЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

В главе 3 показано, что для трещиноватых, с четко выраженной слоистостью карагандинских углей, влияние промежуточного главного напряжения существенно больше, чем для монолитных изотропных горных пород. Поэтому, рассматривая предельные поверхности прочности трещиноватых горных пород, построим их для углей. На рис. 4.21 показаны сечения предельных поверхностей углей плоскостями, проходящими через пространственную диагональ напряжений σ_1, σ_2 и σ_3 при различных значениях μ в координатах $\tau_{ок} - \sigma_{ок}$. Так как испытания были выполнены только при двух значениях σ_3 (0,1 и 10,0 МПа), то сечения предельных поверхностей аппроксимированы прямыми линиями. Когда слоистость перпендикулярна σ_2 или σ_3, то сечения предельных поверхностей с ростом $\sigma_{ок}$ при $\mu = -1{,}0$ проходят не выше, как у изотропных горных пород, а ниже сечений, полученных при других значениях параметра Надаи-Лоде. Сечения предельных поверхностей октаэдрическими плоскостями в этом случае будут асимметричными относительно проекций осей главных напряжений (рис. 4.22). Это говорит о том, что форма предельных поверхностей прочности анизотропных и трещиноватых горных пород будет асимметричной и зависеть от ориентировки главных напряжений относительно плоскостей ослабления. Для таких горных пород постулат Друккера о том, что предельная поверхность прочности при сложном напряженном состоянии в пространстве тензора напряжений должна

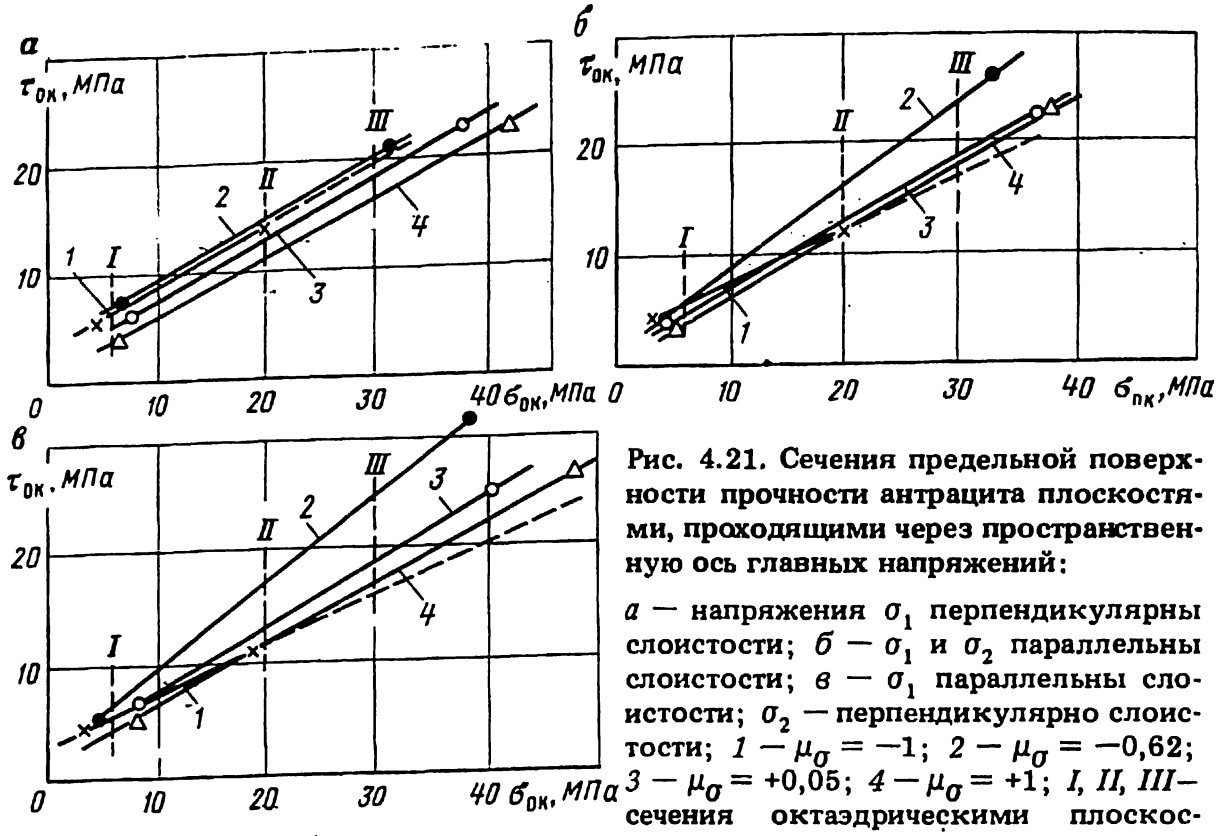


Рис. 4.21. Сечения предельной поверхности прочности антрацита плоскостями, проходящими через пространственную ось главных напряжений:

а — напряжения σ_1 перпендикулярны слоистости; *б* — σ_1 и σ_2 параллельны слоистости; *в* — σ_1 параллельны слоистости; σ_2 — перпендикулярно слоистости; *1* — $\mu_\sigma = -1$; *2* — $\mu_\sigma = -0{,}62$; *3* — $\mu_\sigma = +0{,}05$; *4* — $\mu_\sigma = +1$; *I, II, III* — сечения октаэдрическими плоскостями

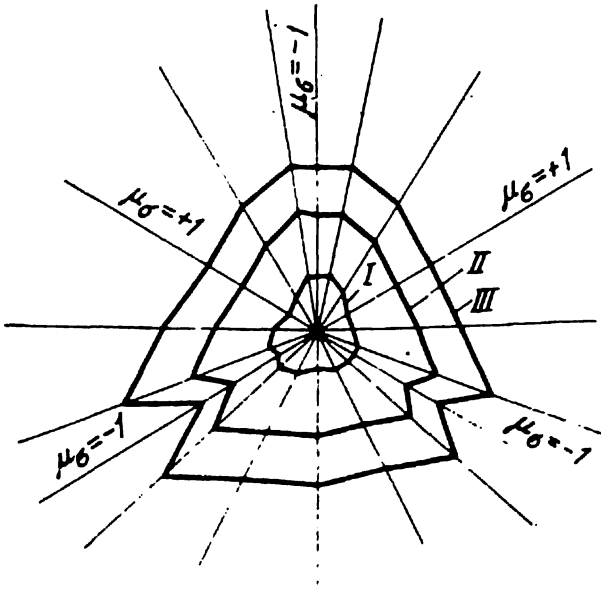


Рис. 4.22. Сечения предельной поверхности прочности антрацита октаэдрическими плоскостями *I, II, III* при $\sigma_{ок}$ = = 6; 20 и 30 МПа

быть плавной и выпуклой, не подтверждается. Сечения предельных поверхностей прочности октаэдрическими плоскостями углей и пород имеют вогнутые участки. Особенно резко они выделяются, когда σ_2 перпендикулярно к плоскостям ослабления, что вполне логично.

Установленные выше зависимости (4.52, 4.53 и 4.61) позволяют рассчитать предельные значения σ_1 при известных σ_2 (или σ_2/σ_1), σ_3 и параметрах трещиноватости, а также контактных условиях и тем самым построить предельные поверхности прочности при действии всех учтенных этими зависимостями факторов. В этом случае все вычисления и построения необходимо выполнять не для одного сектора ограниченного проекциями главных напряжений, а для всех секторов, что в значительной степени усложняет задачу построения предельной поверхности.

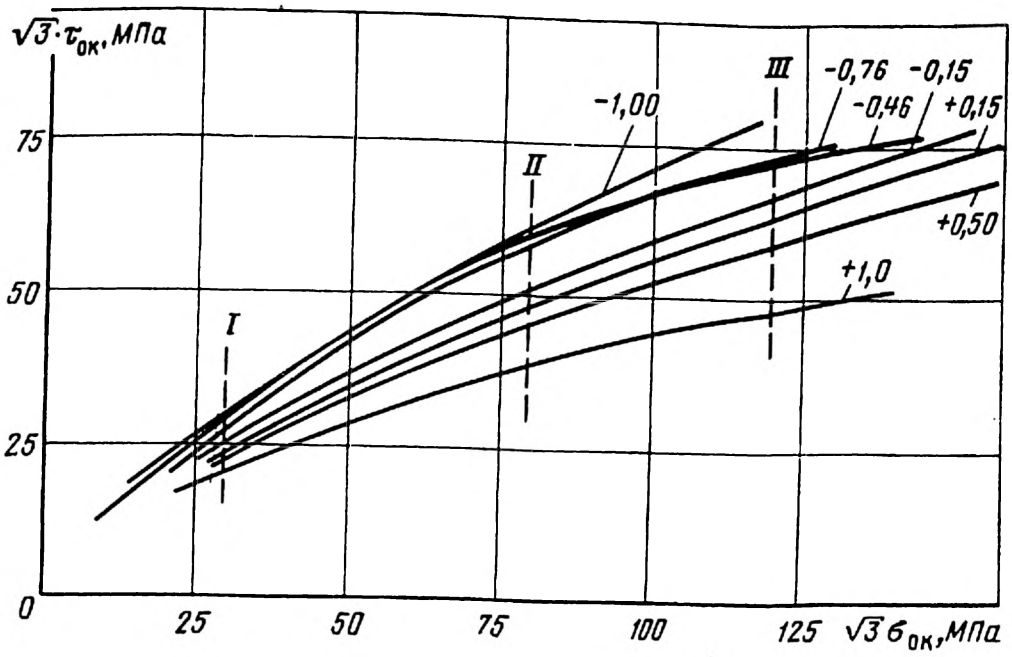


Рис. 4.23. Сечения предельной поверхности прочности трещиноватой горной породы ($\sigma_{ок}$ = 80 МПа) плоскостями, проходящими через пространственную ось главных напряжений при различных значениях параметра Надаи-Лоде (показаны цифрами) *I, II, III* — сечения октаэдрическими плоскостями

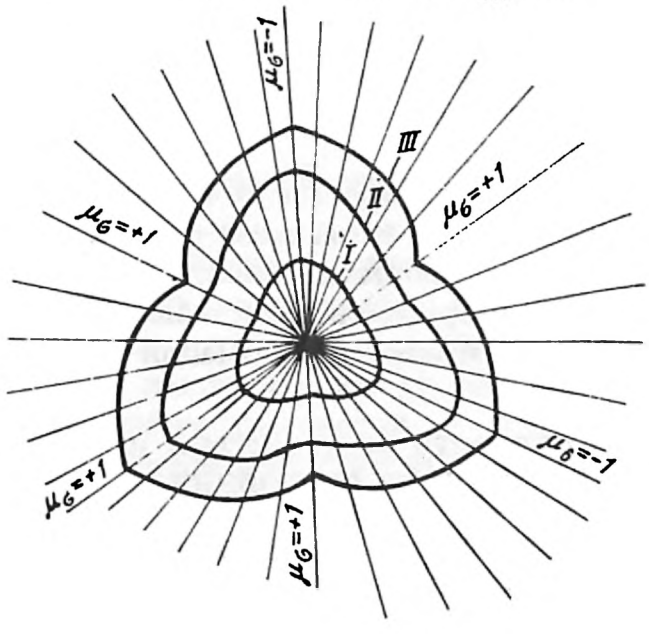


Рис. 4.24. Сечения предельной поверхности прочности трещиноватой породы ($R_{сж}$ = 80 МПа) октаэдрическими плоскостями *I, II, III* при $\sqrt{3}\,\sigma_{ок}$ = 30, 80 и 120 МПа

Рассмотрим предельную поверхность прочности горной породы с прочностью при одноосном сжатии в монолитном образце равной 80,0 МПа при средних значениях всех влияющих факторов, изученных при комплексных исследованиях. Используя зависимость (4.61) и выполнив все вычисления и построения по методике, изложенной выше, получим сечения предельной поверхности прочности трещиноватой горной породы (рис. 4.23, 4.24), которая вследствие принятых средних параметров трещиноватости близка к изотропной.

Полученные сечения предельных поверхностей прочности напоминают трехгранную криволинейную пирамиду с выпуклыми гранями. Выпуклость граней увеличивается с увеличением гидростатического давления. Для трещиноватых и изотропных пород наблюдается более резкая выпуклость при малых значениях $\sigma_2 = \sigma_3$ и некоторая вогнутость граней при $\sigma_2 = \sigma_1$. Для трещиноватых и анизотропных горных пород предельная поверхность прочности, кроме того, асимметрична. Асимметрия предельной поверхности зависит от ориентировки плоскостей анизотропии относительно осей главных напряжений.

5. ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ НА СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Исследованиями поведения материалов в разных условиях приложения нагрузок установлено, что их сопротивление разрушению при динамическом нагружении существенно выше, чем при статическом. Это относится в полной мере и к массивам горных пород.

Массивы вблизи подземных выработок находятся под воздействием сложных долговременных статических нагрузок. В процессе управления горным давлением, разрушения (отбойки) и последующих технологических операций они подвергаются интенсивным кратковременным (динамическим) нагрузкам. Для решения горнотехнических задач важен анализ явлений, связанных с изменением напряженного состояния пород как в процессах разрушения, так и деформирования под воздействием горного давления.

Следовательно, наиболее представительными для решения инженерных задач могут быть показатели механических свойств, полученные при испытаниях образцов в режимах, близких по характеру нагружения, деформирования и разрушения пород в условиях ведения горных работ.

Поэтому развитие и совершенствование лабораторных методов механических испытаний образцов для определения характеристик упругих, деформационных и прочностных свойств пород при динамическом нагружении, как наиболее доступных для накопления, анализа и обобщения информации о свойствах, являются актуальными.

5.1. СКОРОСТЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ НАГРУЗОК И ВИДЫ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Процесс нагружения образца горной породы характеризуется прежде всего условиями приложения нагрузки, в том числе скоростью воздействия (нагружения), видом напряженного состояния, характеристиками испытательной системы.

Поскольку исследуется влияние времени нагружения на прочностные и деформационные свойства горных пород, полезно ввести характеристики режимов нагружения или скоростей воздействия при одноосном деформировании образца. Механические испытания производят либо при постоянной скорости нагружения, либо при постоянной скорости деформации, либо при постоянной скорости деформирования (скорости удара).

Когда напряжение в теле растет пропорционально времени нагружения, скорость нагружения выражается приращением напряжения в единицу времени, т.е. $\dot{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt}$ (Па·с$^{-1}$).

Процесс деформирования протекает во времени, когда текущая стадия деформированного состояния переходит из близкой предшествующей стадии; линейная скорость деформации* представляет собой

*В дальнейшем изложении $\dot{\varepsilon}$ — скорость деформации.

относительное линейное удлинение, отнесенное по времени, в течение которого оно происходит: $\dot{\epsilon} = \frac{d\dot{\epsilon}}{dt}$ ($с^{-1}$).

Скорость деформирования (скорость удара) v ($м/с^{-1}$) представляет собой скорость движения одного конца образца относительно другого и задается скоростью перемещения активных элементов нагружающих устройств.

При одноосном деформировании образца эти величины связаны простыми соотношениями. Так, скорость деформации $\dot{\epsilon}$ пропорциональна скорости деформирования v :

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{\Delta l}{l}\right) = \frac{v}{l}, \tag{5.1}$$

где l — первоначальная длина образца; Δl — абсолютная продольная деформация образца в направлении нагружения; t — время приложения нагрузки.

В пределах упругих деформаций зависимость между $\dot{\epsilon}$ и $\dot{\sigma}$ определяется законом Гука, т.е.

$$\dot{\sigma} = \dot{\epsilon} E(\dot{\epsilon}), \tag{5.2}$$

где $E(\dot{\epsilon})$ — модуль упругости породы при данной скорости деформации.

Соотношение (5.1) является приближенным, поскольку предполагается, что деформации вдоль образца распределены однородно, скорости v перемещения всех сечений в направлении действия нагрузки равны между собой, а между нагружающим устройством и образцом сохраняется условие статического равновесия.

В условиях статического приложения нагрузки, когда время взаимодействия в механической системе машина—образец сравнительно велико, скорость деформации $\dot{\epsilon}$ (или скорость нагружения $\dot{\sigma}$) зависит не только от величин v и l, но и от податливости испытательного устройства C, упругости образца E и соотношения его размеров S/l (где S — площадь поперечного сечения) [21], т.е.

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{l} \frac{1}{1 + \frac{CS}{l} E(\dot{\epsilon})}.$$

При различного рода ударных нагрузках процесс деформирования носит нестационарный характер, поэтому пользуются понятием средней скорости деформации образца

$$\epsilon_{ср} = \epsilon_m / t = v/(a_0 t) \tag{5.3}$$

или средней скорости нагружения

$$\sigma_{ср} = \sigma_m / t = \epsilon_m E / t = Ev/(a_0 t), \tag{5.4}$$

а при $v = \text{const}$, $\epsilon_{ср} \sim \sigma_{ср} \sim 1/t$,

где ϵ_m — амплитудное значение деформации; t — время соударения; v — скорость соударения; a_0 — скорость упругой продольной волны в материале образца; σ_m — амплитуда импульса напряжения.

Таким образом, в формулах (5.3) и (5.4) учитываются как параметры импульса нагрузки v и t, так и физические свойства породы a_0 и E. Эти формулы применимы к условиям удара, когда длина l образца превышает длину волны импульса нагрузки ($l \gg a_0 t$). Если $l \ll a_0 t$, то результате многократных отражений волны нагрузки от торцов образца в нем устанавливается квазиоднородное деформированное состояние. Таким образом, формула (5.1) применима для оценки скорости нагружения при ударных нагрузках. Изменять скорость нагружения при ударе можно варьированием скорости v или размеров образца l при прочих равных условиях.

Из формул (5.1—5.4) видно, что между характеристиками $\dot{\epsilon}$, $\dot{\sigma}$ и v существуют функциональные зависимости, но они не в одинаковой степени характеризуют процессы, протекающие в нагружаемом образце.

Несмотря на то, что $\dot{\epsilon}$ по физическому смыслу является функцией нагрузки, действующей на образец, она определяет характер процесса деформирования в каждой точке образца независимо от способа нагружения. Поэтому в дальнейшем нагружение будем характеризовать величиной скорости деформации $\dot{\epsilon}$.

В зависимости от диапазона изменения $\dot{\sigma}$, $\dot{\epsilon}$ или v предлагались различные классификации, анализ которых показал, что принципиальных различий между ними нет. Отличаются они только числом интервалов, на которые можно разбить достигнутые к настоящему времени $\dot{\epsilon}$ или $\dot{\sigma}$ при соответствующем времени нагружения до разрушения.

Например, способы нагружения в зависимости от диапазона изменения $\dot{\epsilon}$ О.А. Кайбышев разделил на группы:

статические при $\dot{\epsilon} = 10^{-8} \div 10^{-2}$ с$^{-1}$ ($t \approx 10^4 \div 10^2$ с);

квазистатические при $\dot{\epsilon} = 10^{-1} \div 10^{2}$ с$^{-1}$ ($t \approx 10^{-3} \div 10^{-5}$ с);

динамические при $\dot{\epsilon} = 10^{2} \div 10^{5}$ с$^{-1}$ ($t \approx 10^{-5} \div 10^{-6}$ с).

Разделение способов нагружения, принятое в настоящих исследованиях, определяется скоростями статического и динамического воздействия. Так, скорость статического нагружения образцов при определении прочностных показателей соответствует принятой в ГОСТ 21153.0—75 и составляет $\dot{\sigma} = 0{,}1 \div 3$ МПа·с$^{-1}$ (или $\dot{\epsilon} \approx 10^{-6} \div 10^{-3}$ с$^{-1}$). Нагружение со скоростями деформации $\dot{\epsilon} \geqslant 10^{-3}$ с$^{-1}$ относится к динамическому.

При испытаниях горных пород в различных напряженных состояниях, наряду с рассмотренными характеристиками скоростей воздействия, необходимо учитывать и соотношения между главными нормальными напряжениями σ_1, σ_2 и σ_3 при различных схемах нагружения образцов пород. При трехосных испытаниях наиболее распространенными схемами нагружения являются сжатие при $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_б$; $\sigma_1 = \Delta\sigma + \sigma_б$ и растяжение при $\sigma_3 < \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_б$; $\sigma_3 = \sigma_2 - \Delta\sigma$, где $\sigma_б$ — внешнее гидростатическое, всестороннее давление; $\Delta\sigma$ — дифференциальное давление, передаваемое прессом параллельно оси образца.

5.2. ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

При существующих способах механического (ударного, взрывного, импульсного) разрушения пород, а также при возникновении внезапных выбросов угля, породы или газа и горных ударов скорости деформации изменяются в пределах 4—6 десятичных порядков, ($10^{-2} \div 10^{4}$ $с^{-1}$), а нагружение носит динамический характер.

Сопротивляемость горных пород деформациям и разрушению как реакция на внешние воздействия находится в зависимости от параметров нагружения. Изменение скорости воздействия при прочих равных условиях сопровождается определенным изменением технологических показателей процесса разрушения пород.

К настоящему времени накоплен значительный объем экспериментальных данных и результатов исследований горных пород при различных скоростях нагружения. Эти исследования проводились как в связи с конкретными технологическими задачами, так и с целью изучения механизма деформации и разрушения пород. При этом разрабатывались разнообразные методики и испытательно-измерительная аппаратура.

Существующие методики и аппаратура для испытаний металлов или других твердых материалов не всегда применимы к горным породам. Как правило, исследования горных пород при различных режимах нагружения направлены на изучение деформационно-прочностных свойств, определяющих устойчивость или разрушаемость пород в условиях различных технологических операций горных работ. Поэтому методы испытаний должны обеспечивать наиболее полную информацию о процессах деформации и разрушения пород при различных скоростях нагружения.

Значительный разброс результатов испытаний чаще всего объясняют неоднородностью структуры и разнообразием минералогического состава горных пород. Однако, как показывает анализ, причиной разброса могут явиться и сами методики испытаний, конструктивные особенности испытательных устройств, схемы нагружения, форма и размеры образцов, качество их подготовки и др.

Для получения сопоставимых результатов механического испытания образцов при разных скоростях воздействия проведены исследования оценки влияния указанных факторов на определяемые показатели свойств пород и предложены методики испытания образцов на одноосное сжатие и растяжение при различных скоростях деформации [20]. В их основу положен принцип составного стержня, позволяющий независимо от диапазона изменения скорости деформации соблюдать идентичность условий испытаний образцов одинакового размера, что способствует повышению точности результатов, их воспроизводимости.

По этим методикам выполнены исследования [21] при скоростях деформации статического и динамического нагружения в широ-

ком диапазоне пределов прочности пород (15÷180 МПа). Испытаниям подвергались образцы габбро, песчаников, аргиллита, известняка и антрацита, существенно отличающихся по физико-механическим свойствам, структуре и минеральному составу.

В частности, экспериментальные данные, полученные при скоростях деформации от 50 до $1{,}2 \cdot 10^3$ $с^{-1}$, показывают, что общая тенденция, характеризующая изменчивость прочности горных пород при одноосном сжатии и растяжении от скорости деформации в указанном диапазоне может быть представлена эмпирическим уравнением, выражающим зависимость отношения динамической прочности к статической $R_д/R_{ст}$ в функции $\dot{\epsilon}$:

$$R_д/R_{ст} = a + b\ln\dot{\epsilon}, \qquad (5.5)$$

где a и b — постоянные коэффициенты для каждого вида горной породы.

Значения индексов корреляции составляют 0,89÷0,98 и свидетельствуют о достаточной тесноте связи между прочностными показателями горных пород при одноосном нагружении и скоростью деформации. Кроме того, как видно из функциональной зависимости (5.5), пределы прочности как при сжатии, так и при растяжении для всех испытанных пород возрастают с увеличением скорости деформации $\dot{\epsilon}$.

Вместе с тем интенсивность роста показателей прочности заметно изменяется при переходе от одного типа пород к другому, а также в разных интервалах скоростей деформации. Наиболее резкое их увеличение наблюдается при переходе от статических нагрузок к динамическим, а при скоростях свыше 200÷400 $с^{-1}$ практически не изменяются. Установлено, что пределы прочности испытанных горных пород при увеличении скорости деформации от 10^{-3} до 10^3 $с^{-1}$ возрастают в 2,2÷4,2 раза при сжатии и в 5,2÷6,7 раза при растяжении.

Приведенные данные характеризуют прочность пород при одноосном нагружении, что является только первым приближением к напряженному состоянию пород в реальных условиях. Поэтому для оценки свойств пород при объемном напряженном состоянии на основе расчетного метода строились огибающие наибольших кругов напряжений Мора.

Статистическая обработка полученных данных показала, что параметры паспорта прочности — прочность при сдвиге, сцепление $\tau_{о.д}$ и углы внутреннего трения $\varphi_д$ также зависят от режима нагружения. В частности, при скорости деформации $10^2 \div 10^3$ $с^{-1}$ сцепление в горных породах увеличивается в 2—2,5 раза, а углы внутреннего трения уменьшаются на 25—30 % по сравнению с их статическими (стандартными) значениями. Эти зависимости можно описать корреляционными уравнениями:

$$\tau_{о.д}/\tau_{о.ст} = 0{,}11\ln\dot{\epsilon} + 1{,}7; \quad \varphi_д/\varphi_{ст} = 1 - 0{,}05\ln\dot{\epsilon}, \qquad (5.6)$$

где $\tau_{о.ст}$ и $\varphi_{о.ст}$ получены при статическом нагружении, т.е. в стандартных испытаниях.

Таким образом, сцепление и угол внутреннего трения как показатели прочности и устойчивости пород зависят не только от их физических свойств, но и от режимов нагружения. Другими словами, существуют предельные значения сцепления и угла внутреннего трения горной породы, соответствующие предельным статическому и динамическому режимам нагружения.

Для практических целей реальная огибающая к наибольшим кругам напряжений Мора может быть аппроксимирована ломаной линией. Учитывая, что наибольший интерес представляют предельные состояния породы при нормальных напряжениях, близких или превышающих $R_{сж.ст}$, огибающую $\tau_д(\dot{\epsilon}) = f[\sigma(\dot{\epsilon})]$ на отрезке $\sigma \geqslant R_{сж.ст}$ можно аппроксимировать прямой линией:

$$\tau(\dot{\epsilon}) = \tau_{о.д}(\dot{\epsilon}) + \sigma \operatorname{tg}[\varphi_д(\dot{\epsilon})],$$

где параметры паспорта прочности $\tau_{о.д}$ и $\varphi_д$ являются функциями режима нагружения (5.6).

Деформационные характеристики горных пород при различных режимах нагружения образцов определялись по диаграммам "осевое напряжение — деформации". Анализ этих диаграмм как при сжатии, так и при растяжении раскалыванием цилиндрических образцов показывает наличие нескольких стадий деформирования с разными зависимостями $\sigma = f(\epsilon)$ и общие тенденции их изменения. На достаточно большом участке изменения напряжений и деформаций связь между ними имеет линейный характер, и образцы проявляют упругие свойства, а скорость деформации практически не влияет на положение кривых $\sigma = f(\epsilon)$. Продольные и поперечные деформации изменяются равномерно при увеличении напряжения. С дальнейшим ростом напряжения нарушается равномерность роста деформаций, особенно поперечных, для которых характерен опережающий рост по сравнению с продольными. На вид кривых $\sigma = f(\epsilon)$ скорость деформации существенного влияния не оказывает. Некоторое увеличение крутизны участка упругого деформирования, уменьшения общих деформаций, а также повышение предельных (разрушающих) напряжений соответствуют более высоким скоростям воздействия при испытаниях.

Модули упругости и коэффициенты поперечных деформаций вычислялись на линейных участках диаграмм $\sigma = f(\epsilon)$. Данные показывают, что как при сжатии, так и при растяжении в диапазоне скоростей деформации от 50 до $1{,}2 \cdot 10^3$ $с^{-1}$ модули упругости и коэффициенты поперечных деформаций в пределах известного разброса данных (10÷20 %) остаются практически постоянными. Однако их величины при динамическом нагружении в указанном диапазоне $\dot{\epsilon}$ превышают значения при стандартных испытаниях. Так, отношение $E_{сж.д}/E_{сж.ст}$ для песчаников, габбро и аргиллита составляет 1,55÷1,7, а для известняка и антрацита — 1,25÷1,35.

Наибольшее увеличение коэффициента поперечных деформаций наблюдалось у антрацита — 2,3 раза, а наименьшее — 1,1 у известняка.

Таблица 5.1. Коэффициенты регрессии эмпирических зависимостей прочности и модуля упругости (5.7) от скорости деформации образцов

Показатели свойств пород	a	b	c	d	Индекс корреляции	Стандартная ошибка индекса корреляции
$R_{сж.д}/R_{сж.ст}$	0,002	0,044	0,324	1,634	0,78	0,028
$R_{р.д}/R_{р.ст}$	0,006	0,094	0,546	1,942	0,9	0,02
$E_{сж.д}/E_{сж.ст}$	−0,001	−0,015	0,075	1,44	0,91	0,02
$E_{р.д}/E_{р.ст}$	−0,001	−0,011	0,104	1,466	0,93	0,017

Для аргиллита отношение $\nu_{сж.д}/\nu_{сж.ст}$ составило 1,4, песчаников и габбро — 1,5÷1,65.

Анализ данных выполненных опытов, а также систематизация опубликованных [21] позволили обобщить имеющиеся результаты влияния режимов нагружения на прочностные и деформационные показатели свойств горных пород.

Для удобства сопоставления значения прочности $R_{сж.д}$, $R_{р.д}$ и модуля упругости $E_{сж.д}$, $E_{р.д}$ горных пород при сжатии и растяжении при любой скорости деформации отнесены к значениям этих показателей $R_{сж.ст}$, $R_{р.ст}$ и $E_{сж.ст}$ и $E_{р.ст}$ при скорости статического деформирования $\dot{\epsilon} = 10^{-3}$ с$^{-1}$.

В результате получены единые закономерности изменения прочности и деформируемости горных пород (по 26 разновидностям) при сжатии и растяжении в диапазоне скоростей от реологического $\dot{\epsilon} = 10^{-9}$ с$^{-1}$ до динамического $\dot{\epsilon} = 10^{4}$ с$^{-1}$ нагружения, которые описываются эмпирическими зависимостями вида

$$R_д/R_{ст};\quad E_д/E_{ст} = a\,(\lg \dot{\epsilon})^3 + b\,(\lg \dot{\epsilon})^2 + c \lg \dot{\epsilon} + d. \qquad (5.7)$$

Постоянные коэффициенты a, b, c, d, индексы корреляции и их стандартные ошибки для различных показателей свойств сведены в табл. 5.1.

Таким образом, зная значения $R_{сж(р).ст}$ и $E_{сж(р).ст}$ горных пород, определенные при стандартной скорости деформации, можно вычислить значения $R_{сж(р).д}$ и $E_{сж(р).д}$ этих же пород при любой другой скорости деформации, ограниченной диапазоном $10^{-9} \div 10^{4}$ с$^{-1}$ по уравнениям (5.7).

Установленные обобщенные закономерности изменения характеристик прочности при сжатии и растяжении, а также модуля упругости с достаточной для практики точностью позволяют оценивать их значения при различных скоростях нагружения по величинам пределов прочности и модулей упругости, определяемым известными методами при стандартном режиме нагружения. Данные закономерности могут быть рекомендованы при решении различных горнотехнологических задач.

На основании подобных зависимостей устанавливаются не только характеристики развития деформаций и разрушения пород во времени. Эти закономерности важны также для разработки средств и методов обеспечения заданного временного режима нагружения пород, например, для управления разрушением массива при импульсном воздействии, для расчета эффективности разрушения породоразрушающим инструментом и др.

5.3. ВЛИЯНИЕ СКОРОСТЕЙ НАГРУЖЕНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ ОБЪЕМНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Методы динамического нагружения образцов. Изучение механических характеристик горных пород при высокоскоростном ударном нагружении требует разработки специальных методов исследований и создания испытательно-измерительной аппаратуры. Поскольку основные задачи исследований горных пород направлены на совершенствование техники и технологии их разрушения и управления состоянием массива, они должны обеспечивать наиболее полную информацию о процессе разрушения.

Наиболее простым является ударный метод создания изменяющихся во времени нагрузок, поскольку, изменяя скорость, геометрические размеры и форму соударяющихся тел, можно получать импульсы, отличающиеся по продолжительности и величине в широких пределах. При переходе от оптических нагрузок к динамическим в качестве лабораторных нагружающих устройств наиболее широкое применение нашли механические и пневматические копры.

Нахождение прочностных и деформационных характеристик при высокоскоростном нагружении при различных видах напряженного состояния сопряжено с определенными трудностями. Измерить в опыте величину деформации и напряжения одновременно в любом сечении образца практически невозможно. В то же время трудно судить о достоверности расчетных значений напряжений, полученных по измеренным величинам деформаций в каком-либо сечении образца.

Одной из методик, позволяющей проводить измерения напряжений в любом контрольном сечении образца, в том числе и на торце и получившей в настоящее время широкое распространение, является методика, которая основана на испытаниях с применением составного стержня. Сущность ее заключается в регистрации напряжений в двух длинных стержнях, между которыми помещается образец горной породы. Напряжение рассчитывается по величинам нагрузок в стержнях на основании теории одномерных волн.

Этот метод распространен для динамических испытаний на сжатие, сочетает сравнительно простое нагружающее устройство с достаточно высокой точностью измерения исследуемых параметров. Весь процесс обработки экспериментальных данных может быть осуществлен при помощи вычислительной техники.

Предлагались и устройства на основе составного стержня для про-

ведения испытаний образцов на прямое растяжение, но их широкое применение по многим причинам нельзя признать целесообразным. Поэтому большинство известных испытаний горных пород на растяжение выполнено с применением явления "откола" [21].

Обычно в комплект лабораторной аппаратуры, кроме нагружающих устройств, входит электронно-измерительная аппаратура.

В динамических испытаниях горных пород при объемном напряженном состоянии применяется преимущественно схема нагружения, в которой соотношение между главными нормальными напряжениями имеет вид $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_б$.

Как правило, методы объемных испытаний отличаются от одноосных тем, что образец помещают в камеру высокого давления, которое поддерживается постоянным в течение опыта, а осевые динамические нагрузки $\sigma_1(t)$ создаются с помощью скоростных прессов или ударными способами.

Так, ВНИМИ [22] разработан скоростной пресс с гидравлическим приводом, позволяющий создавать нагрузки длительностью от 10^{-1} до 10^{-4} с. Отличительными элементами этого пресса являются гидравлический аккумулятор и быстродействующий клапан. Насосом высокого давления в аккумуляторе создается давление, несколько большее необходимого для разрушения образца. После открытия быстродействующего клапана рабочая жидкость с достаточно большой скоростью (по сравнению со скоростью в обычных прессах) перемещает шток, который передает давление нагружаемому образцу. Гидропрессом при $\dot{\epsilon} = 10^{-1} \div 10^{+2}$ $с^{-1}$ создаются осевые нагрузки до $2 \cdot 10^6$ Н. Боковые давления в камере высокого давления могут изменяться от 0 до 150 МПа.

А.В. Михалюком [23] разработана экспериментальная аппаратура для создания в образце породы сложного напряженного состояния с импульсным характером изменения всех компонент тензоров напряжений и деформаций. Динамическое нагружение создается ударом свободно падающего груза вертикального копра.

Испытательная рабочая камера представляет собой толстостенный металлический цилиндр с внутренним диаметром $5 \cdot 10^{-2}$ м. В зависимости от размеров рабочего пространства камеры и образца, наличия или отсутствия в камере рабочей жидкости в исследуемом образце может быть создан тот или иной вид напряженного состояния. Максимальная ошибка определения параметров состояния образца не превышает $\pm 5{,}1 \div 10{,}8$ %.

Заметим, что несмотря на универсальность камеры, метод обладает определенными недостатками: очень строгие требования к размерам образцов; низкая достоверность экспериментальных данных, поскольку составляющие тензоров напряжений и деформаций определяются расчетным путем.

В институте ИФЗ АН СССР создана установка гидростатического давления до 500 МПа с передачей осевой нагрузки сжатия на цилиндрический образец с заданной скоростью деформации до $\dot{\epsilon}_{max} = 10^{-4}$ $с^{-1}$ при температурах до 200 °С.

В устройстве для испытания образцов горных пород в условиях трехосного динамического сжатия (И.А. Сарафанов и др., 1972) динамическое воздействие на образец передается через систему шток—жидкость (вода, масло) — поршень-образец (помещенный в камере высокого давления). Достигаются скорости ниже ударных. Регистрация продольных и радиальных напряжений и деформаций осуществляется с помощью датчиков сопротивления.

Лабораторная методика исследования разрушения хрупких горных пород при трехосном сжатии (В.Р. Ваверсик, К. Файрхурст, 1970) предусматривает проведение испытаний на жесткой машине со скоростями $\dot{\epsilon}$ до 10^{-5} $с^{-1}$ и боковом давлении до 100 МПа с непрерывной регистрацией зависимости σ—ϵ.

При трехосных испытаниях (Р.Л. Стове, Д.Л. Аинсворт, 1972) в камеру $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ подается гидростатическое давление $\sigma_б$ = 1, 8, 7, 28, 35 МПа. Изменение скорости нагружения до $7 \cdot 10^{-3}$ МПа$\cdot с^{-1}$ до 15,8 МПа$\cdot с^{-1}$ ($\dot{\epsilon} \approx 10^{-7} \div 10^{-4}$ $с^{-1}$) создается: 1) гидравлически управляемой машиной; 2) использованием башенного копра; 3) алюминиевым снарядом, разгоняемым в стволе пневматической пушки до 300 м/с. Верхний предел давления в системе составляет $4 \cdot 10^3$ МПа. Цилиндрические образцы породы диаметром $2{,}9 \cdot 10^{-2}$ м и отношением высоты к диаметру $l/d = 2$ при помещении в камеру заключаются в эластичную оболочку. Для регистрации σ, $\epsilon = f(t)$ образцы в средней части боковой поверхности снабжены шестью тензодатчиками — по три через 120° в продольном и радиальном направлениях. Изменение скорости волны сжатия в трехосной камере также регистрируется с помощью торцевых датчиков из титаната бария. Для наблюдения скоростей частиц породы и ударной волны в пушке в четырех местах образца вмонтирована индукционная проволока. Образец ориентирован в магнитном поле таким образом, что проволока перпендикулярна к магнитным силовым линиям.

Устройство, разработанное Дж. Эрготтом (1971), позволяет испытывать образцы диаметром 76,2 мм при увеличении бокового давления до 105 МПа в течение $3 \div 10^3$ мкс (снятие за $20—10^4$ мкс). Состоит из 5 узлов: системы увеличения давления, системы снятия давления, камеры, основания и ограничителя движения штока. Динамическая осевая нагрузка прикладывается к образцу при помощи пневматического цилиндра. Приводятся результаты серии проверочных испытаний для глинистого алеврита и песчаника.

Аппаратура для создания скоростей деформации $10^{-4} \div 10^2$ $с^{-1}$ (Дж. М. Логан, Дж. Хандин, 1971) включает 100-тонный газовый высокоскоростной пресс, камеру всестороннего сжатия до $8 \cdot 10^2$ МПа при температурах до 400 °С, контрольно-измерительные приборы. Осевое напряжение и скорость деформации определяются с помощью тензодатчиков, соединенных с поршнем загружения и зачехленным образцом. Учитываются погрешности, вносимые аппаратурой и поправка на изменение площади поперечного сечения образца в процессе деформирования.

Испытания в режиме $\dot{\epsilon} = 1{,}9 \cdot 10^{-4} \div 2{,}4 \cdot 10^{-4}$ осуществлялись

(Дж. Ланкфорд, 1976) при помощи серво-контрольной гидравлической машины; при ударной скорости деформации $\dot{\epsilon} \approx 10^3$ с$^{-1}$ — прибором Б. Гопкинсона с максимальной скоростью удара 50 м/с. Гидростатическое давление в камере изменялось от 0 до 145 МПа.

Выполненный обзор основных методов динамических испытаний в объемном напряженном состоянии позволяет заключить, что к настоящему времени нет стандартных методов изучения свойств горных пород при динамических нагрузках. Существующие методы как правило разрабатывались в соответствии с конкретными задачами исследований. Имеющиеся в научных источниках данные о поведении горных пород при различных режимах нагружения не во всех случаях могут быть сопоставлены.

Экспериментальные исследования. В последние годы вопросам исследования закономерностей механического поведения горных пород в условиях объемного напряженного состояния при различных режимах нагружения уделяется все большее внимание.

Условия экспериментов приближаются к моделированию натурных условий залегания пород в зоне влияния выработок, а также моделированию параметров технологических процессов разрушения, т.е. в максимальной степени отвечают необходимости получения полного значения физико-механических свойств пород применительно к решению практических инженерных задач.

Пока обобщающих данных о влиянии сочетания факторов бокового давления и скорости нагружения в широком диапазоне их варьирования на механическое поведение многих типов пород не получено.

Вопросам совместного влияния статических и динамических напряжений посвящены немногочисленные работы отечественных и зарубежных исследователей. Выводы относятся в основном к скоростям ползучести, статического нагружения (с включением фактора температуры) и скорости деформации до $\dot{\epsilon} = 10^2$ с$^{-1}$.

В работах, выполненных в ЛГИ им. Г.В. Плеханова под руководством А.Н. Ханукаева (1976), на примере нескольких разновидностей горных пород показано, что динамические напряжения в предварительно напряженной среде действуют вместе со статическими и складываются с ними, т.е. имеет место принцип суперпозиции. Коэффициент динамического упрочнения, равный отношению прочностей, определенных при динамическом и статическом нагружении, в опытах с предварительным нагружением, как одноосным, так и объемным, близок по величине к его значению без предварительного нагружения. Аналогичный вывод получен ранее У.И. Линдхольмом (1974). Исследования проводились на базальте при скоростях деформации от 10^{-4} до 10 с$^{-1}$ и гидростатических давлениях от 0 до 70 МПа.

Этот вывод о том, что увеличение прочности от скорости деформации не зависит от величины всестороннего сжатия, имеет важное значение, так как результаты, полученные при одноосном динамическом нагружении, могут быть применены для различных напряженных состояний, особенно если учесть сложность и трудоемкость проведения таких опытов. Но он противоречит ряду работ, в которых

указывается, что боковое давление оказывает более сильное влияние на прочность, нежели скорости деформации.

Результаты испытаний 12 разновидностей горных пород приведены в работе ВНИМИ [22]. Условия экспериментов охватывали напряженные состояния одноосного и трехосного неравномерного сжатия при гидростатическом давлении до нескольких десятков тысяч МПа и вариации скорости деформации в пределах 12 десятичных порядков, до $\dot{\varepsilon} = 10^2$ с$^{-1}$. Зависимости пределов прочности и упругости в заданных условиях представлены в координатах $\lg \dot{\varepsilon} - \tau$, где τ — напряжения сдвига. Используя полученное уравнение предельных напряженных состояний

$$\tau(\dot{\varepsilon}) = \tau_0(\dot{\varepsilon})\, e^{AC},$$

где $\tau_0(\dot{\varepsilon})$ и A — константы материала при данной скорости деформации; C — параметр напряженного состояния. Для анализа экспериментальных данных А.Н. Ставрогин и Е.Д. Певзнер (1976) установили, что коэффициент A по физическому смыслу соответствует углу внутреннего трения и практически не зависит от $\dot{\varepsilon}$, а сцепление $\tau_0(\dot{\varepsilon})$ существенно изменяется. На основании этого предложены упрощенные способы напряженного состояния, скорости деформации и построения паспортов прочности с учетом влажности.

Следует однако отметить, что для кривых предельных напряженных состояний, полученных Н.Н. Павловой (1975) в аналогичных условиях испытаний, имеет место увеличение их крутизны, а значит и угла внутреннего трения с ростом $\dot{\varepsilon}$.

Зависимости прочности горных пород от скорости деформации [22] при разных величинах боковых давлений имеют аномалии. У мрамора при $\sigma_6 = 150$ МПа обнаружено снижение (на 7 %) прочности с ростом $\dot{\varepsilon}$; у диабаза падение прочности получено при $\sigma_6 = 250$ МПа в диапазоне $\dot{\varepsilon} = 10^{-2} - 10^{-1}$ с$^{-1}$. Падение прочности с ростом скорости деформации также характерно для каменной соли и Кизеловского каменного угля. Сделан вывод, что прочность с возрастанием $\dot{\varepsilon}$ может увеличиваться или уменьшаться, в зависимости от структурного состояния и состава породы.

Испытания (В.Р. Ваверсик, К. Фаирхурст, 1970) на жесткой машине со скоростями $\dot{\varepsilon}$ до 10^{-5} с$^{-1}$ и боковым давлением до 100 МПа образцов диаметром 0,05 м и высотой 0,10 м из мрамора, гранита, базальта, каменной соли и известняка показали, что прочность возрастает с увеличением бокового давления; начало отклонения от упругости практически от него не зависит. Отмечено расхождение результатов эксперимента с выводами известных теорий прочности.

Исследованиями на образцах песчаника диаметром 0,05 м и длиной 0,125 м, величине боковой нагрузки от 17 до 140 МПа и скорости деформации $2{,}5 \times 10^{-3}$, $2{,}5 \times 10^{-5}$ и $2{,}5 \times 10^{-7}$ с$^{-1}$ установлено (К.М. Зангх, Р.К. Дир, 1975), что скорости деформации оказывают наибольшее влияние на прочность песчаника только при небольшом боковом сжатии. Указанные боковые давления на величину прочности не влияют.

Исследования поведения пород при изменении скоростей деформации от 10^{-5} до 10^{-7} $с^{-1}$ на образцах кубической формы со стороной грани 0,05 м (туф, песчаник) и 0,10 м (цемент) проводилось (Т. Кавамото и Ф. Саито, 1974) в режимах: 1) одноосное сжатие с $\dot{\epsilon} = const$; 2) двухосное сжатие с различными скоростями по разным осям; 3) трехосное сжатие; 4) релаксационные трехосные испытания. Применялся жесткий режим испытаний, определялись упругие характеристики до и после разрушения. Прочность испытанных образцов увеличивалась с увеличением скорости, но деформация, соответствующая максимальной разрушающей нагрузке, оставалась постоянной: для цемента — 0,40 %, для туфа — 0,76 %, для песчаника — 0,78 % от общей (с учетом запредельной) деформации.

Количественное изменение прочности цилиндрических образцов диаметром $1 \div 2 \cdot 10^{-2}$ м и высотой $2 \div 4 \cdot 10^{-2}$ м известняка, песчаника и диорита при давлении 0—140 МПа и скоростях $\dot{\epsilon} = (10^{-5} \div 10^{-1})$ $с^{-1}$ при $t = 25$ °С, описанное в работе С. Серденгекти и Дж. Д. Бузера [24], выглядит следующим образом. При одноосном давлении и росте скорости деформации в указанном интервале прочность увеличивалась незначительно — на 15 % у известняка и песчаника и на 30 % у диорита; с увеличением бокового давления до 140 МПа при $\epsilon = const$ прочность увеличивалась более интенсивно как при низких (стандартных) скоростях, так и при более высоких — у песчаника и диорита ~ в 4 раза, известняка — в 1,6 раза. При высоких боковых давлениях влияние скорости деформации на изменение прочности очень мало, не превышало 20 % (у песчаника). Приводится уравнение механического состояния известняка, относящееся к исследованному диапазону параметров (скорости деформации, давления, температуры).

Результаты изменения прочности при трехосных испытаниях получены К.О. Хакалекто (1970) для статических скоростей нагружения образцов гранита, базальта и туфа в диапазоне $7 \cdot 10^{-3}$ МПа $с^{-1} \div$ $\div$ 15,8 МПа $с^{-1}$, что соответствует $\dot{\epsilon} \approx 10^{-7} \div 10^{-4}$ $с^{-1}$. Установлено увеличение прочности и модуля упругости с ростом $\dot{\epsilon}$ и $\sigma_б$. Для исследованных скоростей боковое давление оказывало большее влияние, чем скорость $\dot{\epsilon}$. Для коэффициента Пуассона определенной закономерности изменения от факторов $\sigma_б$ и $\dot{\epsilon}$ не получено. Применен критерий Мора для описания трехосного разрушения базальта и гранита при низких давления.

Дж. М. Логан и Дж. Хандин (1971) исследовали поведение цилиндрических образцов ($d = l = 2 \cdot 10^{-2}$ м) известняка и гранита в условиях трехосного сжатия в диапазоне изменения осевой скорости деформации $(10^{-2} \div 10)$ $с^{-1}$. Квазидинамические испытания проведены при давлении до $7 \cdot 10^2$ МПа. Гранит деформировался при $\sigma_б$ до $7 \cdot 10^2$ МПа, комнатной температуре и скоростях $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \div 1$ $с^{-1}$. Обнаружено возрастание предельной прочности при увеличении давления при $\dot{\epsilon} = const$ примерно в 6 раз. Прочность увеличивалась при возрастании $\dot{\epsilon}$ и $\sigma_б = const$ на 60—80 %. Доминирующей являлась хрупкая деформация. Образцы известняка деформировались при $\sigma_б$ до $3 \cdot 10^2$ МПа,

комнатной температуре, скорости $\dot{\epsilon}$ от 10^{-2} до $10\ с^{-1}$. При $\sigma_б = 1{,}5 \cdot 10^2$ МПа и $\dot{\epsilon} = 10\ с^{-1}$ у них наблюдался переход в вязкое состояние. Результаты представлены в виде зависимостей "осевое напряжение — осевая деформация" при различных $\dot{\epsilon}$ и пределов прочности от $\sigma_б$ при фиксированной $\dot{\epsilon}$.

В работе Дж. Ланкфорда (1976) обсуждаются результаты трехосных испытаний мелкозернистого нефтеносного сланца с различным содержанием керогена с целью получения зависимости прочности и вязкости от скорости деформации. Достигнуты скорости деформации $\epsilon = 1{,}87 \cdot 10^3\ с^{-1}$ при боковых давлениях в трехосной камере $\sigma_б = 0$, 35, 70, 140 МПа для образцов $d = 1{,}27 \cdot 10^{-2}$ м и $l = 2{,}54 \cdot 10^{-2}$ м. Выполнено 98 испытаний. Составлена таблица результатов и построены диаграммы "осевое давление — осевая деформация" с учетом $\dot{\epsilon}$ и $\sigma_б$, а также $R_{сж} = f(\dot{\epsilon})$. Отмечается, что сланец проявляет неупругие свойства при низких напряжениях и трудно установить точный модуль упругости. Подчеркивается, что зависимости $\sigma - \lg \dot{\epsilon}$ нелинейны. Прочность и вязкость сланца с увеличением давления и скорости деформации возрастают. При изменении $\dot{\epsilon}$ от $1{,}7 \cdot 10^{-4}$ до $2 \cdot 10^3\ с^{-1}$ прочность растет в 3 раза; зависимости $R_{сж} = f(\sigma_б)$ при различных $\dot{\epsilon} =$ = const прямолинейны и показывают увеличение прочности на сжатие. Приводится критерий разрушения, соответствующий экспериментальным данным.

Трехосным испытаниям при ударной осевой нагрузке (Р. Дж. Христенсен, С.Р. Свенсон, В.С. Браун, 1972) подвергали цилиндрические образцы ($d = 12{,}7 \cdot 10^{-3}$ м, $l = 25{,}4 \cdot 10^{-3}$ м) песчаника. Исследовались характеристики разрушения при $\dot{\epsilon} = 10^2 - 10^3\ с^{-1}$ и давлении $\sigma_б = \sigma_2 = \sigma_3$ до $2 \cdot 10^2$ МПа. Предельные напряжения σ_1 при ударе достигали $11{,}9 \cdot 10^2$ МПа и определялись с помощью замеров деформаций стержней Гопкинсона. Исследовалось также распределение напряжений в образце от формы ударника. Представлены: зависимость $\sigma_1 = f(\sigma_3)$ при $\dot{\epsilon} = 0{,}5 \cdot 10^3\ с^{-1}$, из которой следует, что результаты на 15—20 % выше статических для всех давлений; $\sigma_1 - \sigma_3 = f(\dot{\epsilon}_1)$ и отмечено, что увеличение скорости деформации на порядок приводит к повышению разрушающего напряжения на 2,5 %; зависимости главного сдвигового напряжения $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ от деформации сдвига $(\epsilon_1 - \epsilon_3)$ и давления $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ от объемной деформации $(\dot{\epsilon}_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3)$ (кривые дилатансии) при $\sigma_3 = 0$ и $\sigma_3 = 30$ МПа в статических и динамических условиях. Динамические кривые "напряжение—деформация" сходны с кривыми квазистатических испытаний; для всех величин бокового давления получено, что прочность песчаника при высокой скорости деформации была на 15—20 % выше статической.

Общие закономерности развития деформационных процессов при разнообразных видах динамического пространственного сжатия изучались А.В. Михалюком [23] для группы наиболее характерных вмещающих пород и пород — коллекторов, а также некоторых конструкционных и модельных материалов с целью совершенствования методов динамического воздействия на породный массив (при ударе и

взрыве. Анализируются особенности проявления дилатантных свойств пород в зависимости от уровня нагружения, порового и горного давления; влияние временных эффектов нагружения на деформационные и прочностные свойства пород. Показано существование двух предельных значений сцепления и угла внутреннего трения, соответствующих предельным статическому и динамическому режимам.

Имеются табличные данные некоторых зарубежных исследований [24], полученные при осевом сжатии пород в условиях высоких давлений и положительных температур с изменением осевой скорости деформации в пределах статического диапазона. Так, по данным испытаний Дж. Херда [24], осуществленных с цилиндрическими образцами (диаметр 10^{-2} м, длина $2 \cdot 10^{-2}$ м) мрамора, ориентированными относительно слоистости, при всестороннем ограниченном давлении 500 МПа и скорости деформации $(10^{-8} \div 10^{-1})$ $с^{-1}$, наблюдается некоторое увеличение прочности образцов при росте $\dot{\varepsilon}$. Например, при комнатной температуре получены значения прочности: 340 МПа при $\dot{\varepsilon} = 3{,}3 \cdot 10^{-7}$ $с^{-1}$, 367 МПа при $\dot{\varepsilon} = 3{,}3 \cdot 10^{-4}$ $с^{-1}$; 372 МПа при $4{,}0 \cdot 10^{-1}$ $с^{-1}$. Модуль упругости в этом диапазоне $\dot{\varepsilon}$ возрос примерно в 1,5 раза.

Из проведенного анализа данных следует:

1. Исследования поведения горных пород при всестороннем давлении, различных скоростях деформации при комнатной температуре относятся к довольно ограниченному числу пород.

2. Наиболее полные результаты исследований получены в диапазоне изменения скоростей деформации сжатия $10^{-8} \div 10^{-1}$ $с^{-1}$, которые достигаются при прессовых испытаниях. Боковое давление в опытах изменялось от единиц до сотен МПа.

3. Пределы прочности при всестороннем давлении и осевом сжатии увеличиваются при возрастании скорости деформации, пластичность уменьшается. Аномалии получены в работе [22]. Наблюдается также рост модуля упругости.

4. Закономерности механического поведения пород от факторов $\dot{\varepsilon}$, σ_6 часто описываются эмпирическими уравнениями, справедливыми для данной породы в исследованном диапазоне параметров.

Уравнения состояния породы для условий $\sigma_1(t) > \sigma_2(t) = \sigma_3(t)$ получены в исследованиях [23].

Теоретические исследования. Известно, что сопротивление горных пород деформированию и разрушение определяется сложными процессами, характер протекания которых зависит как от генетических особенностей строения пород, так и вида и режима механического нагружения, физического состояния и др.

В то же время прочность горных пород является параметром, определяющим как устойчивость (несущую способность), так и их разрушение при различных воздействиях.

Поэтому надежность результатов инженерных расчетов на прочность зависит от принятой теории прочности, хорошо согласующейся с экспериментальными данными. При этом критерий прочности должен описываться уравнением, содержащим минимальное количество констант материала, определяемых из простейших опытов.

Известные механические теории прочности, приемлемые для горных пород при статическом нагружении и произвольной системе напряжений, содержат критерии, являющиеся функциями компонент тензора напряжений, которые интерпретируются предельной поверхностью, ограничивающей область безопасных напряженных состояний.

К ним относится прежде всего теория О. Мора, по которой эмпирически определяется кривая $\tau = f(\sigma)$, огибающая семейство предельных главных кругов Мора, состоящая из двух симметричных ветвей. Абсциссы и ординаты точек касания кругов огибающими представляют нормальные σ и касательные τ напряжения, при которых начинается пластический сдвиг или хрупкое разрушение. Огибающие кругов Мора можно интерпретировать аналитически различными кривыми, чем расширяются возможности теории. Если предельная кривая, огибающая круги Мора, описывается прямой линией, то условие О. Мора совпадает с условием Кулона—Навье.

Большая группа теорий прочности основывается на линейной зависимости между касательными и нормальными напряжениями на октаэдрических площадках (равно наклоненных к главным осям). При этом учитываются величины всех главных напряжений $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Так, А.И. Боткин (1939) предложил условие прочности, при котором разрушение наступает тогда, когда величина напряжений сдвига достаточна для преодоления сил трения и сцепления между частицами материалов; основными прочностными характеристиками материала являются коэффициент трения и сцепление.

Теория прочности О. Мора обобщена в гипотезах Р. Мизеса, Ф. Шлейхера, А. Надаи в виде $\tau_{ок} = f(\sigma_{ок})$, где $\tau_{ок}$, $\sigma_{ок}$ — соответственно октаэдрические касательное и нормальное напряжения, или, то же самое, второй инвариант девиатора тензора напряжений является функцией среднего нормального напряжения (шарового тензора).

Развитие механических критериев прочности, основанных на понятиях о хрупком и вязком разрушении для широкого класса материалов, в том числе и горных пород, нашло отражение в трудах Н.Н. Давиденкова, Я.Б. Фридмана, Г.В. Ужика, Г.С. Писаренко, А.А. Лебедева, С.Е. Чиркова и др. При этом каждая теория прочности предполагает определение соотношения между предельными напряжениями при растяжении $R_{ст.р}$ и сжатии $R_{ст.сж}$.

Другая группа теорий А.А. Гриффитса и его последователей относится к "структурным" теориям прочности. В соответствии с ними определяющую роль в развитии разрушений играют микроструктурные неоднородности среды (поры, микротрещины и т.п.). Начало разрушения связано с размерами микродефектов и упругими свойствами материала. Гипотеза А.А. Гриффитса применима лишь к хрупким материалам. Она была развита рядом авторов и применительно к горным породам (Ф.Г. Улинич, Г.П. Черепанов, В.В. Панасюк и др.).

В последние годы широкое распространение получила кинетическая теория прочности С.Н. Журкова (1953). При кинетическом подходе разрушение рассматривается как процесс, развивающийся во

времени в несколько стадий: 1) образование локализованных микроочагов разрушения с сильно перегруженными межатомными связями; 2) термофлуктуационный разрыв атомных связей с образованием субмикротрещин; 3) слияние микротрещин в магистральные трещины. Она предполагает тесную взаимосвязь прочностных свойств с развитием деформационного процесса от начала нагружения под влиянием любых нагрузок; число микроразрушений в теле возрастает с увеличением времени действия нагрузок.

Таким образом, эта теория предполагает не только зависимость прочности материалов от вида напряженного состояния, но и действия временного фактора (Т.А. Конторова, 1975; В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский, 1974; И.С. Томашевская, Я.Н. Хамидуллин и др., 1974). Ее применимость для горных пород подтверждена рядом экспериментальных работ. Е.Д. Певзнер (1973) установил, что в области высоких скоростей деформации и длительной прочности наблюдается отклонение от единой зависимости, вытекающей из кинетической теории прочности.

Эффект увеличения прочности пород при возрастании скорости протекания деформационного процесса отмечен многими авторами [22, 23, 24 и др.].

В некоторых работах выдвинута гипотеза, согласно которой влияние скорости деформации на механические характеристики пород обусловлено отставанием необратимых деформаций от действующих нагрузок. Причем это отставание связано с релаксационными процессами, так как время релаксации при динамических нагрузках соизмеримо с длительностью процесса нагружения (А.Н. Павлова и Л.А. Шрейнер, 1964; С. Пенж и Е.Р. Подниекс, 1972).

Многие закономерности в изменении прочностных и деформационных свойств пород достаточно хорошо согласуются с теорией, развиваемой А.Н. Ставрогиным [22]. В основу этой теории положена статистическая модель твердого тела, которая объединяет в себе двойственную природу прочности — на отрыв и сдвиг. Согласно такой модели рост скорости деформации сопровождается повышением общего уровня напряжения во всем объеме материала. Повышение общего напряженного состояния материала приводит к вовлечению в процесс деформации все более прочных элементов сдвига.

М. Грегор (1968) анализирует зависимость прочности угля на сжатие от скорости нагружения с позиций статистической механики. Полученное им уравнение позволяет рассчитать прочность на сжатие для скоростей удара до 100 м/с.

В.Н. Николаевским (1979) на основании многочисленных экспериментальных исследований ударного разрушения материалов выдвинута теория предельной скорости фронта разрушения. Согласно этой теории между движущейся границей достижения статического предела прочности и фронтом разрушения материал выдерживает значительные динамические перегрузки. В этом случае структура волн напряжений становится двухфронтальной: вперед уходит упругий предвестник, а за ним распространяется фронт разрушения. Отсюда

следует, что амплитуда упругого предвестника должна быть больше статической прочности материала, а время "задержки" разрушения определяется разницей в скоростях движения фронта разрушения и упругого предвестника.

В работах Б.В. Соколинского (1970) в качестве причины увеличения прочности горных пород с ростом скорости деформации также рассматривается явление задержки разрушения относительно момента времени, когда напряжение достигает критической величины. При этом повышение прочности не является следствием инерционных добавок или характера внешних нагрузок, так как оно определяется микроструктурой материала и зависит от времени выхода магистральной трещины на поверхность образца.

Задержка и учет временных характеристик процесса разрушения при динамическом нагружении нашли свое выражение в разработке модели хрупкой среды (В.С. Никифоровский и Е.И. Шемякин, 1979), а также получено аналитическое выражение для времени задержки, которое хорошо описывает экспериментальные данные при динамическом нагружении (Г.М. Крюков и М.Г. Горбонос, 1978).

Следовательно, как в кинетической теории прочности, так и в гипотезах задержки разрушения учет времени как характеристики процессов динамического деформирования и разрушения осуществляется с позиций механики зарождения и развития трещин в нагружаемой среде. Другими словами, разрушение тела под действием внешней нагрузки наступит тогда, когда в нем произойдут определенные изменения, вызванные накоплением различного рода повреждений. Принцип накопления повреждений применяется достаточно широко для объяснения результатов как статических, так и динамических испытаний материалов.

Поскольку динамические нагрузки изменяются во времени, допускают, что нарушения материала необратимы, а средняя долговечность может быть определена по правилу аддитивности, согласно которому под действием постоянного напряжения σ_i в течение времени Δt_i происходит относительное уменьшение долговечности, равное $\Delta t_i/t_0\ (\sigma_i)$, а полное разрушение в результате суммирования повреждений произойдет при условии

$$\sum_i \frac{\Delta t_i}{t_0(\sigma_i)} = 1$$

или для непрерывно изменяющейся нагрузки $\sigma\ (t)$

$$\int_0^{t_0} \frac{dt}{t_0[\sigma(t)]} = 1,$$

где Δt_i — время действия нагрузки σ_1, $t_0\ (\sigma_i)$ — долговечность, соответствующая σ_i.

Кратко рассмотренные основные концепции, объясняющие изменения механических свойств материалов от режимов нагружения, способствуют более глубокому пониманию реальных процессов динамического разрушения. На их основании сформулированы критерии

прочности, учитывающие фактор времени и напряженное состояние, которые дают удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными.

5.4. МЕТОДИКА И АППАРАТУРА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАЗНЫХ СКОРОСТЯХ НАГРУЖЕНИЯ И ВИДАХ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Для разработки практических рекомендаций решения разнообразных инженерных задач, получения научных результатов в области динамики горных пород требуется еще накопление фактического материала и его теоретическое обобщение.

Известно, что стандартные методы изучения поведения пород как при динамическом нагружении, так и объемном напряженном состоянии отсутствуют. Требуют своего развития методы, позволяющие реализовать условия высокоскоростного нагружения и объемного напряженного состояния.

Поэтому ставились задачи разработки методик и комплекса аппаратуры для динамического нагружения образца породы при его трехосном, неравномерном сжатии, а также устойчивой регистрации компонент тензоров напряжений и деформаций и их изменения во времени.

Изучение поведения пород под воздействием нагрузок с различными скоростями деформации в условиях объемного напряженного состояния невозможно без применения специального экспериментального комплекса, а также обоснованных методик испытаний для получения характеристик свойств пород, определяющих их сопротивляемость деформированию и разрушению в разнообразных пространственно-временных условиях.

Диапазон исследований выбран с учетом условий, встречающихся в горном деле и включает: виды напряженного состояния в области трехосного неравномерного сжатия типа $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_б$, варьирование скоростей нагружения от статического интервала $(10^{-5} \div 10^{-3})$ $с^{-1}$ до динамического (высокоскоростного) 10^3 $с^{-1}$, т.е. около 9 десятичных порядков.

Для испытаний при скоростях осевого статического нагружения использована разработанная ранее [25] установка к испытательной машине типа ЦДМ-100Пу.

Техническая характеристика установки

Максимальное осевое статическое усилие сжатия, Н	10^6
Максимальное осевое разрушающее усилие сжатия, Н	$5 \cdot 10^5$
Максимальное осевое усилие растяжения, Н	10^4
Максимальное давление в камере высокого давления, МПа	150
Максимальное давление в камере низкого давления, МПа	9
Максимальная скорость нагружения (скорость перемещения траверсы), м/с	$4{,}2 \cdot 10^{-3}$

Размеры испытуемого образца, мм:

диаметр	42
высота с заделкой концов	145
высота без заделки концов (рабочая высота)	65
высота свободного (незащемленного) образца	65; 84

Камера высокого давления установки (рис. 5.1) состоит из основания *1*, соединенного болтами *2* с корпусом *3*, внутри которого помещены нижний захват-пуансон *4* и верхний захват-шток *5*, жестко соединенные с образцом горной породы *6* эпоксидной смолой. На внешней поверхности корпуса *3* камеры укреплен болтами *7* через крышку *8* токоввод *9* для подсоединения проводов от тензодатчиков, наклеенных на испытуемом образце *6*, и клапан *18* для слива жидкости при разборе камеры.

В верхней части камеры установлены воздушные клапаны *10*, *11* для выпуска воздуха из масляных полостей низкого и высокого давлений и помещен промежуточный цилиндр *12*, по внешней поверхно-

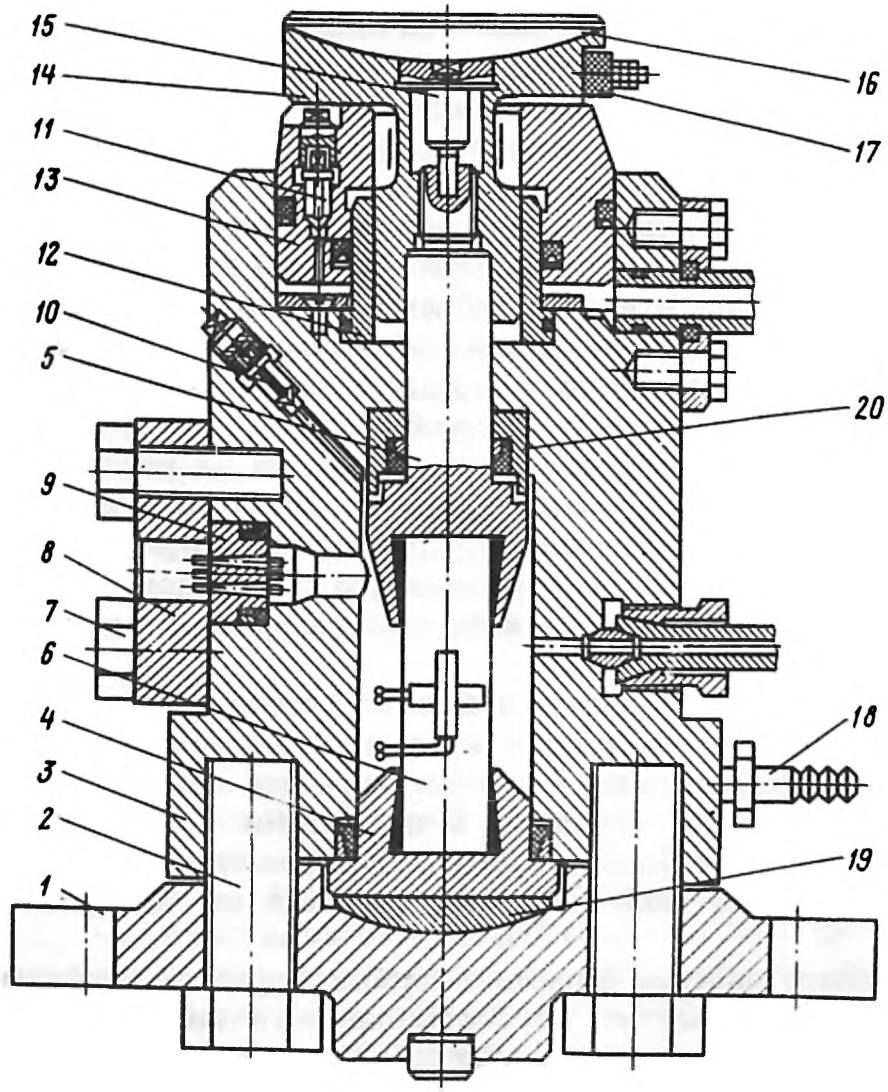


Рис. 5.1. Камера высокого давления для статических испытаний образцов горных пород

сти которого перемещается поршень *13*, а по внутренней — упор (тензометрический динамометр) *14*, связанный с верхним захватом-штоком *5* и раскрепленный винтом *15*. На тензометрическом динамометре *14* размещены опорная сфера *16* и токосъемник *17* для крепления проводов от тензодатчиков, фиксирующие приложенные к испытуемому образцу нагрузки.

Нижний захват-пуансон *4* имеет заплечики, которыми он с одной стороны упирается в корпус *3* камеры, с другой — на сферический пуансон *19* и основание *1*. Растягивающие усилия воспринимаются заплечиками опорного захвата-пуансона *4*. Сжимающие усилия передаются через испытуемый образец *6* и нижний опорный захват-пуансон *4* на сферический пуансон *19* и основание *1*. Сферический опорный пуансон *19* компенсирует возможную некоторую неперпендикулярность торца захвата-пуансона *4* при установке его в корпусе камеры.

Верхний захват-шток *5* имеет стержень с резьбой, который связан с упором *14*, являющимся одновременно и тензометрическим динамометром.

Осевое усилие сжатия передается на испытуемый образец от испытательной машины через опорную сферу *16*, упор *14* и верхний захват-шток *5*, а осевое усилие растяжения — давлением жидкости на поршень *13*, упор *14* и верхний захват-шток *5*, плотно соединенные резьбой.

Во избежание поломки образца горной породы при навинчивании упора *14* на стержень верхнего захвата-штока *5* в корпусе *3* камеры жестко вмонтирована втулка с зубцами *20*, которые при установке в камеру образца *6* горной породы с захватами плотно входят в пазы головки верхнего захвата-штока *5*. Благодаря этому устраняется возможность скручивания испытуемого образца.

При подготовке образцов к испытаниям на их боковые поверхности наклеиваются проволочные датчики сопротивления на участке между захватами для измерения продольных и поперечных деформаций. Проводка от тензодатчиков заводится с образцом до установки нижнего захвата-пуансона *4* в корпус *3* камеры и протягивается в окно токоввода *9*.

После установки образца *6* в корпус *3* камеры концы проводов от тензодатчиков подпаиваются к электродам токоввода *9*, затем токоввод *9* устанавливается в соответствующее отверстие корпуса *3* камеры, закрепляется крышкой *8* и болтами *7*. Таким образом, внешняя проводка, идущая к контрольной, измерительной и показывающей аппаратуре, может не отсоединяться от электродов токоввода.

После приготовления образцов горных пород по требуемым линейным размерам и чистоте обработки на них устанавливаются (приклеиваются) тензодатчики сопротивления для измерения продольных и поперечных деформаций, на концах образцов закрепляются металлические захваты. Эта операция производится в специальном устройстве-кондукторе, в котором эпоксидной смолой прикрепляют верх-

ний и нижний захваты к образцу диаметром 42 мм, высотой 145 мм при рабочей базе 65 мм.

Дальнейшая подготовка к испытанию каждого образца состоит в установке его в испытательной камере высокого давления и в подключении каждого тензодатчика к соответствующему тензометрическому прибору.

Методикой также предусматривается испытание на сжатие в условиях объемного напряженного состояния незащемленных (свободных) образцов диаметром 42 мм, высотой 65—84 мм. В этом случае нижний захват *4* и верхний *5* имеют плоские основания.

Подготовленные таким образом образцы устанавливаются в камере высокого давления. При этом проводка от датчиков заводится ранее в канал токоввода при снятой крышке *8* и вынутом токовводе *9*. На стержень верхнего захвата *5* навинчивается упор *14* и закрепляется основание *1* камеры болтами *2*. Проводка от датчиков подпаивается к вводам коллектора токоввода *9*, и токоввод *9* устанавливается в соответствующее отверстие корпуса камеры, поджимается крышкой *8* и крепится болтами *7*.

Камера с монтажного стола снимается подъемником, устанавливается и закрепляется на траверсе испытательной машины. Затем камера подсоединяется к насосу высокого давления и в нее подается требуемое давление, соответствующее всестороннему боковому давлению на образец горной породы в пределах $0 \div 150$ МПа.

При одном из данных боковых давлений и принятых ориентировочных скоростях нагружения $\dot{\sigma}$, равных 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100 и 1000 МПа $с^{-1}$, испытывают не менее трех образцов каждой разновидности горных пород с измерением их продольных и поперечных деформаций с помощью проволочных датчиков сопротивления через усилитель ТА-5 с записью на ленту шлейфового осциллографа Н-700, при одновременном измерении приложенного осевого усилия к образцу через тензометрический динамометр, предварительно протарированный по усилию и деформации.

Расчет из осциллограмм относительных продольных и поперечных деформаций образца производится по формуле

$$\epsilon_{изм} = \frac{2\epsilon_к A_i}{S_д A_к},$$

где $\epsilon_{изм}$ — величина измеренной относительной деформации; $\epsilon_к$ — предел измерения усилителя, отн. ед.; $S_д$ — чувствительность датчиков сопротивления; A_i — амплитуда записи измеряемого процесса, 10^{-3} м; $A_к$ — амплитуда записи контрольного сигнала, 10^{-3} м.

Истинная деформация образца в условиях объемного напряженного состояния принимается с учетом поправки $\epsilon_д/\epsilon = \epsilon_{изм} - \epsilon_д$, где $\epsilon_д$ — деформация проволоки датчика под действием бокового давления $\sigma_б$ (в МПа), определена из специальных опытов как $\epsilon_д \approx 1{,}75 \times 10^{-6} \sigma_б$ [25].

Для динамических испытаний в условиях объемного напряженно-

го состояния применена методика составного стержня, обоснованная в исследованиях [20, 21], а также аппаратура, разработанная и созданная в ИГД им. А.А. Скочинского.

Аппаратура включает камеру высокого давления для испытания цилиндрического образца крепкой горной породы в условиях объемного напряженного состояния при осевом динамическом нагружении его торца через входной динамометр-волновод действием удара пули, разгоняемой энергией сжатого газа.

Техническая характеристика аппаратуры

Максимальное давление в камере, МПа	150
Максимальное давление в газовой полости установки, МПа	25
Максимальная энергия удара, Дж	5000
Максимальная скорость приложения ударного импульса, м/с	700
Калибр ствола газовой установки, мм	42
Размеры испытуемых образцов, мм:	
диаметр	42
высота с заделкой концов	130; 145
высота без заделки концов (рабочая)	65; 84

Цилиндрический образец горной породы, предназначенный для испытаний на сжатие, предварительно жестко соединяется торцевыми поверхностями со смежными захватами — передним и задним волноводами — эпоксидной смолой типа ЭД-6. Операция производится в специальном приспособлении — кондукторе, обеспечивающем соосность системы образец—волноводы.

В целях соблюдения идентичности условий на торцах при статических и динамических испытаниях образцов горных пород на одноосное сжатие и сжатие в объемном напряженном состоянии принято одинаковое крепление торцов. При этом сделано допущение, что волновая картина в свободной (расчетной) части образца не искажается.

Производится подготовка камеры высокого давления для проведения испытаний: внутрь камеры устанавливается образец с наклеенными на нем датчиками сопротивления, выводятся провода от датчиков испытуемого образца, переднего и заднего волноводов и подсоединяются к измерительной аппаратуре. Токовводы закрепляются на корпусе камеры, камера запирается крышкой и подтягивается гайками. Камера заполняется маслом требуемого давления от маслостанции высокого давления, одновременно производится спуск воздуха посредством воздухо-спускных клапанов.

В зависимости от типа образца горной породы (его прочности) выбирается давление газа, вес и конструкция пули, производится сборка пулевой и газовой камер, установка сменных упоров с обтюраторами, и гайкой запирается ствол. Подсоединяется камера высокого давления, вся измерительная система приводится в готовность, затем открывается быстродействующий клапан газовой установки и происходит удар пули по переднему входящему волноводу.

Камера высокого давления (рис. 5.2) предназначена для проведения испытаний образцов крепких горных пород при объемном

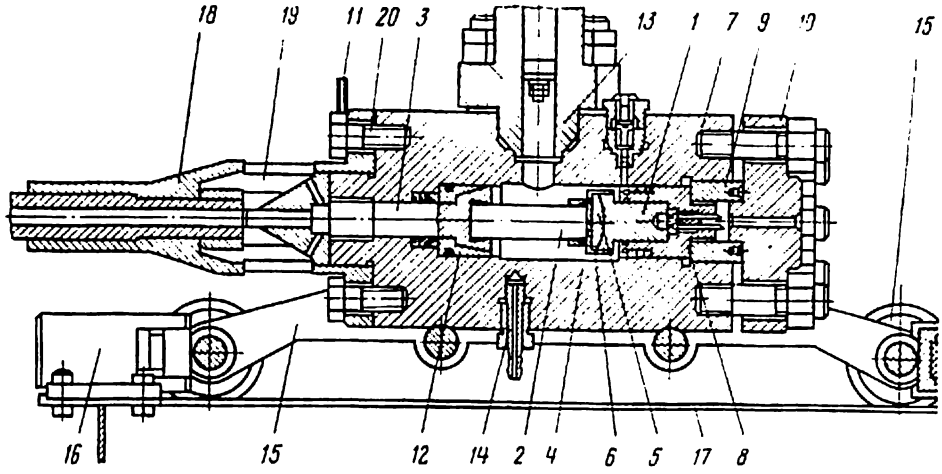


Рис. 5.2. Камера высокого давления для динамических испытаний образцов горных пород

статическом напряженном состоянии и осевом динамическом нагружении на сжатие.

В корпусе *1* устанавливается образец горной породы *2* с передним захватом — волноводом *3* и задним *4*, предварительно сцентрированные по оси с образцом и скрепленные между собой эпоксидной смолой в специальном устройстве. Образец *2* с захватами-волноводами вставляется в расточку корпуса *1* камеры, где центрируются по диаметру переднего захвата *3*. Провода от тензодатчиков при сборке заводятся предварительно через боковое отверстие камеры (на рис. 5.2 не показано), подпаиваются к контактам токоввода с внешней стороны и токоввод крепится к порпусу камеры. Провода, идущие к контрольно-измерительной аппаратуре, также подпаиваются к контактам токоввода с внешней стороны.

Далее заводится в камеру сборка, состоящая из деталей: сферической шайбы *5*, цангового держателя *6*, заднего волновода *7* с наклеенными на нем датчиками, опорной втулки *8* со специальными комбинированными уплотнениями. Втулка *8* имеет токоввод для подпайки проводов от датчиков, расположенных на волноводе *7*.

Образец *2* с передним волноводом *3* и сборкой *5*, *6*, *7*, *8* плотно поджимается гайкой *9* с целью выбора зазоров. Резьба гайки *9* одновременно предохраняет от разрушения образец *2* при установке крышки *10* и затяжке ее болтами.

На переднем захвате — волноводе *3* образца *2*, обращенном к стволу газовой установки, также установлен тензодатчик. Провода от этого датчика выводятся через фрезеровку в корпусе *1* камеры и далее защищаются кембриковой трубкой *11* от действия газов. Утолщенная шлицеобразная часть переднего захвата-волновода *3*, обращенная к газовой установке, вместе с конической втулкой *12* образуют гидротормоз в момент разрушения образца, благодаря наличию между ними масла. Для разгрузки камеры, гашения энергии и исключения повышения давления масла в момент разрушения образца на корпусе *1* установлена уширительная камера *13*.

Камера устанавливается на катках *15*, оси которых связаны с двумя амортизаторами *16* с резиновыми вкладышами. Амортизаторы *16* закреплены на металлическом стволе *17*, на которой катками опирается камера высокого давления и газовая установка.

Направляющий фланец *13* связывает ствол газовой установки с камерой высокого давления и центрирует ось ствола установки с осью образца. Между стволом и камерой установлена вставка — обтюратор *19* с окнами для выхода газов. Эта вставка служит для центровки пули до момента удара в торце переднего волновода. Кроме того, она устраняет опережение пули газами в момент удара ее по волноводу. Газы, уходящие через окна обтюратора *19*, попадают в кольцевое пространство между направляющим фланцем *18* и обтюратором *19* и выходят через окна направляющего фланца в атмосферу.

5.5. НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАЗНЫХ СКОРОСТЯХ НАГРУЖЕНИЯ И ВИДАХ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Общие закономерности поведения горных пород в условиях воздействия статических и динамических скоростей приложения нагрузки и объемного напряженного состояния изучались для трех типов монолитных пород, существенно отличающихся по прочности и деформируемости в стандартных условиях нагружения с учетом обработки данных экспериментальных исследований разных авторов.

Условия испытаний образцов включали изменение скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ в направлении оси σ_1 примерно на 9—10 порядков при начальном боковом давлении $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_б = (0 \div 50)$ МПа.

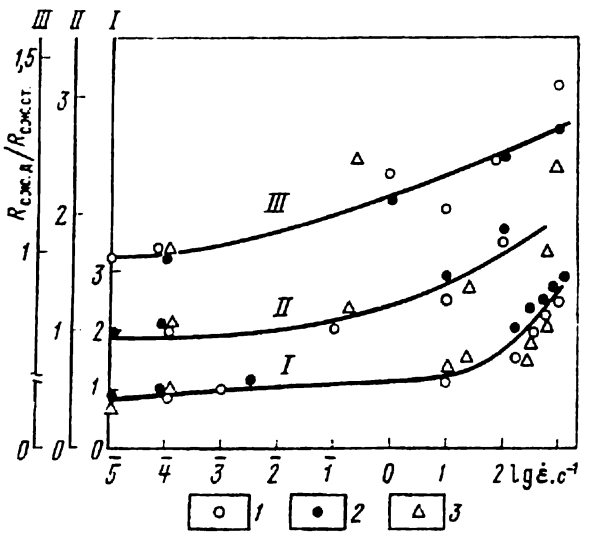


Рис. 5.3. Зависимость относительной прочности горных пород (на сжатие $R_{сж}/R_{сж.ст}$ от осевой скорости деформации образцов $\dot{\varepsilon}$ при различных (*I, II, III*) боковых давлениях $\sigma_б$:

I — $\sigma_б = 0$; *II* — $\sigma_б = 25$ МПа; *III* — $\sigma_б = 50$ МПа; *1* — габбро; *2* — песчаник; *3* — известняк

На рис. 5.3 сравниваются результаты испытаний образцов песчаника ($R_{сж.ст} = 140$ МПа), известняка ($R_{сж.ст} = 15$ МПа) и габбро ($R_{сж.ст} = 200$ МПа) в системе координат $R_{сж.д}(\sigma_0)/R_{сж.ст}(\sigma_б)$ — $\lg \dot{\varepsilon}$. Точки, представленные на графиках, получены усреднением опытных данных при испытании не менее трех образцов.

Качественные особенности поведения испытанных пород при заданных параметрах нагружения и напряженного состояния имеют определенную общность — наблюдается непрерывное возрастание $R_{сж}(\sigma_б)$ с ростом величины $\dot{\varepsilon}$, заметное при переходе от квазистатического режима нагружения к динамическому. При

разных постоянных уровнях начального давления $\sigma_б$ увеличение осевой скорости деформации в направлении σ_1 до $\sim 10^3$ с$^{-1}$ приводит к относительному изменению прочности $R_{сж.д}(\sigma_б)/R_{сж.ст}(\sigma_б)$ образцов всех пород и составило при $\sigma_б = 0$ и $\sigma_б = 50$ МПа соответственно: у габбро 2,5 и 1,4, у песчаника 2,9 и 1,3, у известняка 2,1 и 1,1 раза.

В то же время можно отметить, что как изменение скорости нагружения, так и давления в условиях трехосного сжатия приводит к значительным абсолютным изменениям прочности. Значения $R_{сж.д}$ при $\sigma_б = 50$ МПа и $\dot{\epsilon} \approx 10^3$ с$^{-1}$ превышают стандартную прочность при одноосном сжатии $R_{сж.ст}$ слабой породы — известняка — в 4,0 раза, а более крепких песчаника и габбро соответственно в 3,1 и 2,7 раза. Это подтверждается сравнением с результатами опытов при одноосном статическом нагружении и динамическом. Так, при динамическом нагружении при $\sigma_б = 50$ МПа предел прочности при сжатии известняка возрос от 15 до 59,8 МПа, габбро — от 200 до 538 МПа, а песчаника — от 140 до 432 МПа.

По результатам динамических испытаний горных пород на сжатие при изменении $\sigma_б$ построены экспериментальные зависимости $\sigma_1(\sigma_б)$. Несмотря на общий вид (рис. 5.4) они показывают различную степень упрочнения пород при давлении. Штриховыми линиями показаны $\sigma_1 = f(\sigma_б)$ при динамическом нагружении со скоростью $\epsilon \approx 10^3$ с$^{-1}$.

В исследованном диапазоне скоростей нагружения предельное напряженное состояние пород может быть аппроксимировано прямыми линиями с определением прочностных параметров пород по условию О. Мора:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} + \frac{2\cos\varphi}{1 - \sin\varphi},$$

где φ — угол внутреннего трения; C — величина сцепления, которая определяется на основании экспериментальных данных о соотношении σ_1 и $\sigma_3 = \sigma_б$.

Выполненные исследования относятся к диапазону статических и высоких скоростей деформации. Для более полного представления об изменении прочностных свойств и для построения обобщенной зависимости (рис. 5.5) использованы результаты исследований других авторов.

На графике сопоставлены данные, полученные при испытаниях образцов горных пород в условиях начального всестороннего давления $\sigma_б = (50 \div 70)$ МПа при изменении осевой скорости деформации сжатия в интервале $\dot{\epsilon} = (10^{-8} \div 10^9)$ с$^{-1}$. Несмотря на различие примененных методик испытаний, экспериментальные точки достаточно близко ложатся на статистическую зависимость, которую можно описать эмпирическим уравнением

$$R_{сж.д}(\sigma_б)/R_{сж.ст} = 0{,}009(\lg\dot{\epsilon})^2 + 0{,}19\lg\dot{\epsilon} + 2{,}45 \qquad (5.8)$$

с корреляционным отношением 0,81 и стандартной ошибкой его оценки 0,035.

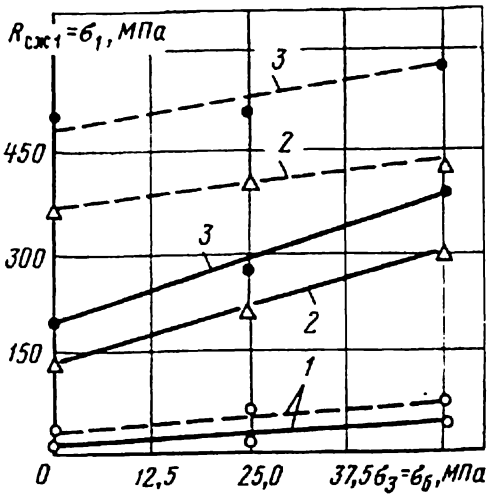


Рис. 5.4. Предельное напряженное состояние известняка (*1*), песчаника (*2*) и габбро (*3*):

сплошные линии — в статике ($\dot{\epsilon} \approx 10^{-4}$ с$^{-1}$); штриховые — в динамике ($\dot{\epsilon} \approx 10^{3}$ с$^{-1}$)

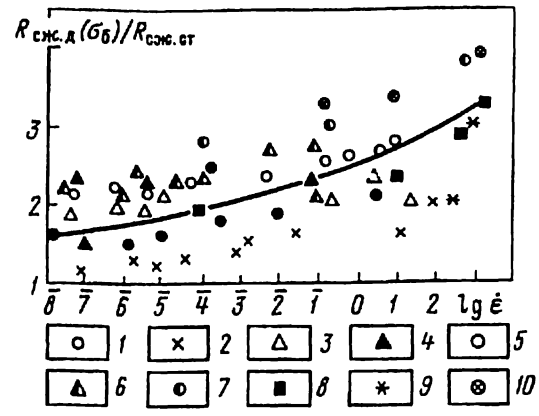


Рис. 5.5. Обобщенная зависимость относительной прочности на сжатие от скорости деформации $\dot{\epsilon}$ в объемном напряженном состоянии при $\sigma_б = 50 \div 70$ МПа:

1 — диабаз; *2* — мрамор; *3*, *4*, *9* — песчаники; *5*, *7* — известняк; *6* — кварцевый песчаник [22]; *8* — габбро; *10* — нефтеносный сланец (Дж. Ланкфорд)

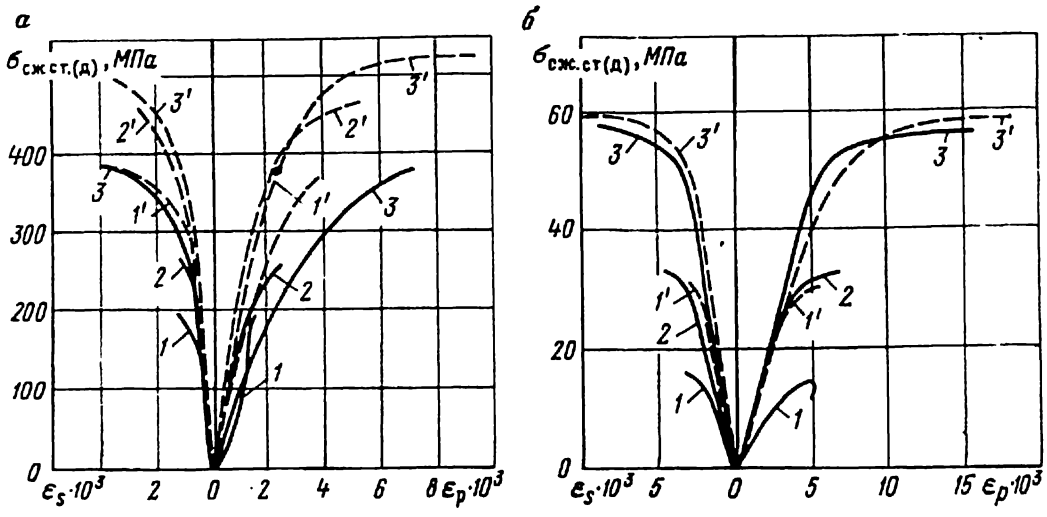


Рис. 5.6. Диаграммы деформирования габбро (*а*) и известняка (*б*) с изменением бокового давления в статике при $\dot{\epsilon} \approx 10^{-4}$ с$^{-1}$

(*1* — $\sigma_б = 0$; *2* — $\sigma_б = 25$ МПа; *3* — $\sigma_б = 50$ МПа) и динамике при $\dot{\epsilon} \approx 10^{3}$ с$^{-1}$ (*1* — $\sigma_б = 0$; *2* — $\sigma_б = 25$ МПа; *3* — $\sigma_б = 50$ МПа)

Наряду с исследованиями прочности горных пород в объемном напряженном состоянии при разных скоростях деформации изучался процесс развития и проявления деформаций в этих условиях на основе диаграмм деформирования $\sigma - \epsilon = f(\sigma_б, \dot{\epsilon})$, а именно в интервале скоростей $\epsilon = (10^{-4} \div 10^{3})$ с$^{-1}$ и давлений до 50 МПа, а также с учетом обобщения исследований других авторов для $\dot{\epsilon} = (10^{-9} \div 10^{3})$ с$^{-1}$.

Влияние скорости нагружения на соотношения между напряжениями и деформациями в породах при различных видах напряженного состояния иллюстрируется рис. 5.6.

Таблица 5.2. Упругие характеристики пород при высоких скоростях сжатия и различном боковом давлении

Порода	Боковое давление $\sigma_б$, МПа	Модуль упругости $E_{сж.д}\,10^{-4}$, МПа	$E_{сж.д}/E_{сж.ст}$	Коэффициент поперечной деформации $\nu_{сж.д}$	$\nu_{сж.д}/\nu_{сж.ст}$	Общая деформация ϵ_1, %
Известняк	0	0,83	0,97	0,44	1,10	0,42
	50	2,1	2,5	0,64	1,60	1,75
Песчаник	0	6,9	1,57	0,45	1,67	0,36
	50	11,7	1,75	0,68	1,51	1,2
Габбро	0	11,5	1,54	0,45	1,62	0,35
	50	10,5	1,40	0,67	1,49	0,9

Сравнивая между собой кривые статического и динамического разрушения образцов, полученные для данных типов пород, можно отметить, что наиболее существенное влияние давление оказало на угол наклона $\sigma(\dot{\epsilon})$ к оси деформаций при статических скоростях, а также на величину остаточных деформаций пород, которые увеличиваются с ростом давления как в статике, так и в динамике.

Механизм развития деформаций связан с процессом уплотнения пород под действием всестороннего давления, а также с накоплением повреждений при воздействии нагрузок с различной скоростью, развитием микротрещиноватости, последующего разрыхления, зависящих от структуры и текстуры горных пород, и, как закономерность, со значительным повышением сопротивляемости пород разрушению под действием внешних факторов — скорости нагружения и давления.

Во всем опробованном диапазоне начальных боковых давлений увеличение скорости деформации образцов приводит к возрастанию их несущей способности. Приведенная совокупность диаграмм процесса деформирования ограничена в основном предельными кривыми: снизу — предельными статическими, сверху — предельными динамическими при одном и том же уровне давления $\sigma_б$.

Скорость деформации образцов при сжатии влияет определенным образом и на деформационные характеристики пород. Абсолютные средние значения модулей упругости, коэффициентов поперечной деформации и их сравнения со статическими значениями сведены в табл. 5.2. Расчет $E_{сж}$ и $\nu_{сж}$ производился на линейных участках диаграмм σ — $\epsilon_{p,\,s}$ при напряжениях, составляющих 40—60 % от разрушающих.

Из табл. 5.2 следует, что при динамическом сжатии с возрастанием бокового давления абсолютные величины осевых деформаций увеличиваются. Увеличиваются также $E_{сж.д}$ и $\nu_{сж.д}$ по сравнению со стандартным нагружением. Наибольшее увеличение этих величин соответствует одноосному сжатию с высокими скоростями. Это гово-

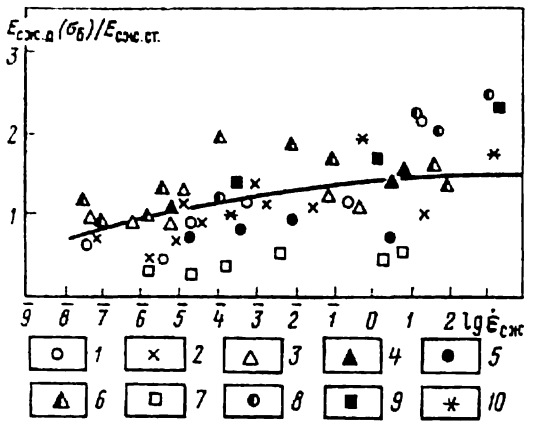


Рис. 5.7. Обобщенная зависимость модуля упругости от скорости деформации сжатия в объемном напряженном состоянии при $\sigma_б$ = = 50 МПа:

1 — диабаз; *2* — мрамор; *3, 4* — песчаники; *5, 8* — известняк; *6* — кварцевый песчаник; *7* — антрацит; *9* — габбро; *10* — песчаник [22]

рит о более сильной зависимости упругих характеристик горных пород от приложенной скорости деформации, чем от давления.

Обобщенная зависимость модуля, упругости от скорости деформации при постоянном давлении $\sigma_б$ = 50 МПа (рис. 5.7) описывается уравнением

$$E_{сж.д}(\sigma_б)/E_{сж.ст} = -0{,}005\,(\lg \dot{\varepsilon})^2 + + 0{,}021 \lg \dot{\varepsilon} + 1{,}41. \qquad (5.9)$$

По полученным экспериментальным данным, а также по данным [22] обнаружить определенную связь коэффициента поперечной деформации $\nu_{сж}$ со скоростью приложения нагрузки сжатия в условиях давления $\sigma_б$ = 50 МПа не удалось.

Обобщенные эмпирические уравнения (5.7)—(5.9), описывающие количественное изменение прочности и модуля упругости горных пород различных литотипов от скорости нагружения (деформации) на разных уровнях объемного напряженного состояния ($\sigma_б$ = 0; 50 МПа), показывают возможность приблизительной оценки этих показателей и многих других пород для приведенных уровней напряженного состояния и диапазона варьирования скорости деформации по данным испытаний образцов этих пород, проведенных в стандартном режиме. Несомненно, характеристики механических свойств пород каждого отдельного типа будут отличаться друг от друга в силу принципиальных отличий механизма деформирования и разрушения их под влиянием и вида напряженного состояния и скорости приложения нагрузки. Это хорошо отражено в тех немногочисленных и разрозненных данных, которые приведены в обзоре.

Таким образом, особенности механического поведения пород при нагрузках, прикладываемых с различными скоростями, представляются в виде зависимостей их деформационных и прочностных характеристик от скорости деформирования и разрушения. Установлено, что с ростом скорости деформации повышается как деформационная способность породы, так и ее сопротивляемость разрушению — возрастают значения модулей упругости, пределов прочности при всех уровнях достигнутого в опытах начального давления. В то же время объемное напряженное состояние обусловливает также упрочнение пород и увеличение псевдопластической составляющей деформации.

Вследствие недостаточной изученности взаимосвязи физико-механических характеристик горных пород с компонентами тензоров напряжений, деформаций и скоростей их изменения, построение

общего уравнения состояния породы невозможно. В то же время всестороннее изучение механического поведения пород в реальных условиях сложного напряженного состояния (фактор горного давления) и различных скоростей приложения нагрузок (фактор времени) необходимо с точки зрения дальнейшего развития средств и методов динамического воздействия на породный массив с целью получения заданного эффекта, а также совершенствования методов расчета устойчивости и поддержания горных выработок.

6. СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО НАГРУЖЕНИЯ

В горной практике встречаются технологические процессы, которые сопровождаются многократным воздействием нагрузок на массив горных пород. Такие нагрузки отличаются длительностью действия, носят периодический характер и изменяются во времени по различным законам, вызывая усталость горных пород. Для горнотехнических процессов характерен преимущественно синусоидальный (пульсирующий) закон нагружения горных пород в массиве.

Усталостные явления проявляются в массиве горных пород при бурении шпуров и скважин, импульсивном механическом разрушении в процессе работы очистных и проходческих машин импульсного действия, пульсирующем разрушении тонкими струями, а также от вибраций при работе разного рода горных машин и механизмов.

Уменьшение сопротивляемости горных пород разрушению от воздействия повторно-переменных нагрузок (явление усталости) должно учитываться при расчетах процессов разрушения горных пород и устойчивости горных выработок.

Практически установить предел усталости горных пород можно только в лабораторных условиях на образцах, приближая при этом условия их нагружения и деформирования к естественным.

Наибольшие напряжения, при которых образец горной породы длительное время может сохранять устойчивость (сплошность) в условиях переменных нагрузок без разрушения, называют пределом усталостной прочности $R_у$.

Цикл переменного нагружения, в частном случае пульсирующего, представляет собой совокупность последовательных значений переменных нагружений за один период процесса их изменений. Напряжение цикла $\sigma(t)$ может быть выражено уравнением

$$\sigma(t) = \sigma_{ср} + \sigma_а f(t), \qquad (6.1)$$

где $\sigma_{ср}$ — среднее напряжение цикла; $\sigma_а$ — амплитуда цикла; $f(t)$ — непрерывная периодическая функция, характеризующая форму цикла, изменяющаяся в пределах $-1 \leqslant f(t) \leqslant +1$ и, как правило, близкая к синусоиде.

Наибольшее и наименьшее нормальные напряжения цикла σ_{max} и

σ_{min}, а среднее напряжение цикла

$$\sigma_{ср} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}.$$

Амплитуда σ_a характеризует отклонение напряжения во время цикла от среднего напряжения.

В зависимости от соотношения величин наибольшего и наименьшего напряжений цикла может быть: симметричным — знакопеременным, когда σ_{max} равно по величине и противоположно по знаку σ_{max}; несимметричным, когда σ_{max} не равно σ_{min}; пульсирующим, когда $\sigma_{min} = 0$.

Величина $\rho = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ называется коэффициентом асимметрии цикла. Для симметричного цикла $\sigma_{max} = -\sigma_{min}$ и $\rho = -1$, для пульсирующего цикла $\rho = 0$.

6.1. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПОВЕДЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Механические процессы деформирования и разрушения пород, встречающиеся в горнотехнической практике, очень разнообразны. Они связаны и с условиями изменения напряженного состояния пород в зоне ведения горных работ и со способами нагружения пород в процессе добычи.

В последние годы большое значение придается исследованию характеристик прочности и деформируемости горных пород при различных видах циклической деформации, т.е. характеристик усталости, способности горных пород противостоять переменным напряжениям или, наоборот, разрушаться под их воздействием.

Известны широкие исследования усталости конструкционных материалов (металлов, бетонов, пластмасс и др.).

При этом рассматриваются такие аспекты явления усталости, как влияние числа повторных нагружений, коэффициента асимметрии цикла, скорости (частоты) нагружения на величину прочности материалов, а также деформативная способность, остаточная прочность и др.

Анализ работ ряда советских и зарубежных авторов, посвященных усталости материалов, близких по свойствам к горным породам, таких как бетоны, позволил сделать следующие выводы (И.П. Копчинский, Г.В. Беченева, 1966).

Влияние на прочность при сжатии $R_{сж.ст}$ числа нагружений до $N = 10^7$ при повторных воздействиях с частотой не менее 1 Гц (от 1 до 16,7 Гц) выражается для бетонов средней прочности прямолинейной зависимостью

$$R_{сж.д}/R_{сж.ст} = 1{,}15 - 0{,}11 \lg N, \qquad (6.2)$$

из которой вытекает, что прочность бетона $R_{сж.д}$ в случае однократного нагружения ($N = 1$) со скоростью изменения напряжений в тече-

ние цикла нагрузки (динамического нагружения) примерно на 15 % превышает величину $R_{сж.ст}$.

В формуле (6.2) $R_{сж.д} = f(\sigma_{max}, N)$; $R_{сж.д} = f(\dot{\sigma} = 2\pi\sigma_a\omega)$ при $N = 1$.

Обобщение оценок зависимости усталостной прочности бетона различных марок на сжатие от величины коэффициента асимметрии цикла ρ при числе загружений N от $2 \cdot 10^6$ до 10^7 дает корреляционную зависимость

$$2\sigma_{max}/R_{сж.ст} - \sigma_{min}/R_{сж.ст} = 1{,}05. \qquad (6.3)$$

Если экстраполировать эту прямую в область $\rho \to 1$, то прочность бетона при однократном динамическом нагружении $R_{сж.д}$ должна превысить предел статической прочности,т.е. $R_{сж.д}/R_{сж.ст} \approx 1{,}05$.

После усреднения коэффициентов, выражающих изменение прочности однократного нагружения в формулах (6.2) и (6.3) принимается его значение 1,1. Уравнение циклической прочности бетонов средней прочности при любых значениях ρ и N представляется в виде

$$R_{сж.у} = 1{,}1\left[1 - \frac{\lg N}{6{,}3}\left(1 - \frac{1}{2{,}14 - 1{,}4\rho}\right)\right] R_{сж.ст}. \qquad (6.4)$$

Подобная зависимость получена и для усталостной прочности бетонов на растяжение $R_{р.у}$

$$2{,}08\,\sigma_{max}/R_{р.ст} - 1{,}08\,\sigma_{min}/R_{р.ст} = 1{,}06. \qquad (6.5)$$

Зависимости (6.2) — (6.5) рекомендуются для практических расчетов.

Качественное влияние частоты нагружения ω на предел усталости бетонов, обнаруженное при рассмотрении данных с циклической прочности для $\rho = 0 \div 0{,}1$ с изменением ω в пределах от 0,1 до 16,7 Гц, выражается в том, что с ростом частоты нагружения величина предела усталости возрастает.

Немногочисленны пока исследования усталости горных пород, особенно при разных частотах нагружения. Это связано в основном с тем, что экспериментальная база начала развиваться сравнительно недавно; отсутствует унифицированная аппаратура, подготовка и проведение испытаний связаны со значительной затратой времени. Несмотря на это уже получен ряд важных закономерностей влияния на прочность и деформируемость горных пород режимов переменного нагружения; разработаны методы и аппаратура для циклических испытаний, а также ускоренных испытаний пород на длительную прочность, ползучесть (Ю.М. Карташов, 1973; М.П. Мохначев, 1979).

Исследования усталости крепких горных пород довольно разносторонние, хотя количество их пока нельзя признать удовлетворительным для проведения широких обобщений, подобных имеющимся, например, для бетонов. Отметим основные выводы таких исследований.

В результате испытаний на сжатие полых цилиндрических образ-

цов каменной соли и глинистого сланца под постоянной нагрузкой F_0 и при циклически изменяющейся нагрузке $F = F_0 + F\sin\omega t$ предложена формула для описания процесса развития деформаций во времени, подобная уравнению линейной ползучести (Б.В. Байдюк, А.Н. Переяслов, 1971).

Испытания образцов некоторых изверженных и метаморфических пород на сжатие, растяжение и сдвиг на универсальной машине с пульсатором ЦД-100 Пу в диапазоне частот 4,17—12,5 Гц (Л.В. Можаев, М.П. Скачков, 1972) показали изменение показателей прочности и упругости при однократном динамическом нагружении со скоростью изменения напряжений цикла нагрузки по сравнению с их значениями, определенными при статических нагрузках: отношение модулей упругости $E_д/E_{ст}$ составляло 1,1—1,79, коэффициентов Пуассона $\nu_д/\nu_{ст}$ — 1,14—1,79; отношение пределов прочности при сжатии $R_{сж.д}/R_{сж.ст}$ — 0,5—1,89, а при растяжении $R_{р.д}/R_{р.ст}$ — 0,53—1,1; сдвиговым напряжениям при статических и динамических нагрузках испытанные горные породы противостояли практически одинаково. Относительные деформации от частоты не зависели.

Экспериментальные исследования салемского известняка в режиме циклического нагружения сжатия и растяжения с частотой 2 Гц позволили установить (С.С. Пенж и др., 1974) пределы его усталостной прочности, составившие для сжатия $R_{сж.у} = 0{,}78\,R_{сж.ст}$ и для растяжения $R_{р.у} = 0{,}7\,R_{р.ст}$.

Исследование изменения объема $\Delta V/V$ (дилатансии) при одноосном пульсирующем сжатии гранита с циклической осевой нагрузкой до 200 МПа показало увеличение дилатансии при возрастании числа циклов, причем уменьшалось напряжение, при котором она возникала (Ц.Х. Шольц, Р. Кранц, 1972).

Японскими учеными на созданной испытательной установке с измерительной и записывающей аппаратурой испытаны цилиндрические образцы трех типов песчаника диаметром 25 мм и высотой 50 мм (Хорибэ, Кобаяси и др., 1968). Предельное число циклов нагружения на усталость составило 10^4—10^5. Выведены уравнения прочности вида $\lg(\sigma_а - R_{сж.у}) = c - d\lg N$, где c и d — константы; при этом $R_{сж.у} \approx 0{,}6\,R_{сж.д}$ ($R_{сж.д}$ — максимальное напряжение при однократном нагружении). Ширина петли гистерезиса диаграмм напряжение—деформация под влиянием пульсирующего сжатия сужается по мере увеличения числа циклов, вновь расширяясь при приближении к разрушению. Модуль упругости Юнга имеет тенденцию к понижению с увеличением N.

Известны исследования (Хероесевое, Нисимацу, Сузуки, 1971 — 1972) прочностных и упругих свойств на образцах андезита и песчаного туфа под действием пульсирующих нагрузок сжатия до $N = 10^6$ при среднем напряжении $\sigma_{ср}$, составляющем 35 %, и амплитуде $\sigma_а$, составляющей 30 % от предела статической прочности при сжатии, а также мрамора, гранита, андезита, песчаного туфа и туфа под действием растягивающих пульсирующих нагрузок, составивших соответственно 42, 38, 39, 49 и 34 % от предела статической прочности при

растяжении $R_{р.ст}$. Частота изменялась от 0,003 до 5 Гц. В опытах на сжатие установлено изменение упругих характеристик андезита от числа циклов N; прочность на одноосное сжатие после приложения повторной нагрузки ниже предела усталости осталась почти той же величины. Исследованы гистерезисные петли, показано влияние частоты нагружения на модуль упругости при сжатии; при растяжении модули упругости не зависели от частоты нагружения. В испытаниях горных пород с частотой 0,003—5 Гц получены качественные представления относительно зависимости между динамическим модулем упругости, динамическими потерями и частотой; сделан вывод, что реологическая модель горной породы, находящейся под повторной нагрузкой, не является простой и нуждается в более тщательных исследованиях.

Для образцов алевритового песчаника в воздушносухом и водонасыщенном состоянии и модельных образцов из гипса и гранитного песка (в соотношении 1:1) на гидравлическом прессе ПД-20 с пульсатором проведены эксперименты (Е. Аврамова-Тачева, С. Станчев, 1979) при: а) статическом одноосном сжатии; б) комбинированном нагружении — статическом с динамическим вибрационным воздействием с постоянной частотой 13,3 Гц и амплитудой для соответствующей серии образцов ± 5; 15; 25 и $35 \cdot 10^2$ Н, равной 1,5; 4,5; 7,5 и 10,3 % от $R_{сж.ст}$; в) статическом нагружении в комбинации с динамическим вибрационным воздействием с постоянной амплитудой $F_a = \pm 10 \cdot 10^2$ Н и частотой для соответствующей серии 8,3; 13,3; 16,7 и 20,0 Гц. Отмечается, что при вибрационном динамическом воздействии разрушающее напряжение уменьшается на 40 %; существенно изменяются деформационные характеристики образцов: уменьшаются модули упругости E и модули деформации M; возрастают коэффициенты поперечной деформации ν' и Пуассона ν (до 2-х раз) с увеличением амплитуды и частоты. Введено понятие коэффициента динамической устойчивости $k_{д.у} = x_д/x_{ст}$ ($x \equiv R, M, E, \nu$ и т.д.). Неблагоприятные для строительной практики экстремальные значения деформационных показателей получены при $\omega = 13{,}3$ Гц. Наличие воды в породе увеличивало описанные эффекты динамического вибрационного воздействия, не изменяя их тенденции.

Циклическими нагружениями с частотой 4,17 Гц цилиндрических образцов песчаника и известняка при коэффициенте $\rho = 0{,}8$; 0,5; 0,066; 0,044 установлено (В. Пшибилович, Т. Рынцаж, 1979), что между числом циклов N и σ_{max} существует линейная зависимость вида $\lg N = a \lg \sigma_{max} + b$, где a и b — коэффициенты, зависящие от ρ; скорость продольной деформации изменяется в процессе нагружения подобно кривым реологических испытаний и зависит от соотношения $\sigma_{max}/R_у$.

Необходимость изучения прочности и деформируемости горных пород при пульсирующих нагрузках в условиях сложного (объемного) напряженного состояния диктуется прежде всего тем, что оно характерно для естественного залегания пород, находящихся под действием различных по природе сил.

Горные породы подвержены одновременно действию геостатического давления, концентрации напряжений вследствие ведения горных работ и воздействию внешних сил, направленных на преодоление сопротивления разрушению породного массива. Режим и время воздействия внешних сил могут изменяться. Поэтому для горной науки и практики чрезвычайно важно знание закономерностей поведения пород при различных напряженных состояниях и режимах нагружения, в том числе повторно-переменного. В фундаментальных работах отмечается существенное влияние объемного напряженного состояния на механическое поведение горных пород при статических режимах нагружения. Так, увеличение бокового давления на 0,1 МПа приводит к возрастанию разрушающего главного осевого напряжения для ряда пород до 0,3—0,5 МПа, т.е. до 5 раз.

Что касается исследований свойств пород, подвергнутых переменным нагрузкам в объемном напряженном состоянии, то они как в СССР, так и за рубежом практически отсутствуют.

Из имеющихся в единичном числе экспериментальных данных [25] следует качественный вывод о том, что проявление усталостных свойств горных пород под воздействием пульсирующих нагрузок происходит более интенсивно и при значительно меньших числах нагружений, чем, например, у металлов и других материалов. Количественных зависимостей свойств горных пород при циклических нагрузках в функции амплитуды действующих напряжений, коэффициента асимметрии цикла, среднего напряжения, частоты (скорости) и числа нагружений с учетом вида напряженного состояния, дающих физическое представление о природе усталостной прочности и деформируемости, ни в СССР, ни за рубежом не установлено.

Сложность и трудоемкость экспериментов, отсутствие надежных способов, аппаратуры и методик испытаний являются причиной недостаточной изученности усталости горных пород. В то же время развитие такого направления продолжает оставаться актуальным, так как выявление закономерностей изменения сопротивления горных пород переменным нагрузкам и разработка рекомендаций по их использованию возможны только на основе обширных экспериментальных исследований. Поэтому особое внимание уделено созданию комплекса испытательной аппаратуры и разработке методов, позволяющих устанавливать количественное влияние условий циклического нагружения на процессы деформации и разрушения горных пород.

6.2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Методы измерения и регистрации параметров пульсирующего нагружения образцов. В практике циклических испытаний материалов с измерением деформаций в условиях одноосного и сложного напряженного состояния, в том числе при высоких давлениях, наиболее широкое применение получил тензометрический метод измерения деформаций, как наиболее эффективный. Главные достоинства этого

метода состоят в компактности тензометрических датчиков и удобства монтажа необходимого числа датчиков на образце, простоте тензометрических схем, высокой чувствительности и точности измерений.

Комплексно исследованы вопросы применения тензодатчиков в конкретных условиях. Это — выбор датчиков по качеству материала, длине, частотным характеристикам, оценка их работоспособности под действием пульсирующих нагрузок, учет влияния состава клея, качества наклейки, среды (влага, масло), высокого давления, температуры и др.

При циклических испытаниях целесообразно использование датчиков типа ПКБ. Они практически безынерционны, рассчитаны для работы в интервале температур $20 \div 70\,^{\circ}\mathrm{C}$; среднеквадратичная погрешность тензочувствительности их составляет не более 1,5 %.

Процесс пульсирующего нагружения образцов является динамическим. Поэтому база тензодатчика выбирается из соотношения $L/\lambda \leqslant 0{,}25$, где L — длина тензодатчика; λ — длина полуволны, определяемая по формуле $\lambda = a_0/2\omega$ (a_0 — скорость продольной волны в образце). При циклических нагрузках сжатия образцов диаметром 42 мм и длиной 65 мм с частотой $\omega \leqslant 12{,}5$ Гц база составляет 2 — 2,5 см.

На основе проведенных исследований [25] изменения деформируемости горных пород под воздействием пульсирующих нагрузок растяжения сжатием по образующей цилиндрических образцов рекомендуется оптимальная длина базы тензодатчиков ~5 мм, наклеиваемых в центре торцов образца определенных размеров: $h = d = 42 \div 60$ мм.

Основными требованиями, которым должны удовлетворять тензодатчики сопротивления при регистрации деформаций образца горной породы в процессе его пульсирующего нагружения в условиях объемного напряженного состояния, будут следующие:

механическое воздействие давления на материал тензометра не должно вносить искажений в показания измерительного устройства; для этого необходимо компенсировать воздействие давления;

должны быть устранены погрешности, возникающие в результате повышения температуры жидкости при ее сжатии, при котором возникают различия условий теплообмена при работе тензометров под высоким давлением от условий их работы при атмосферном давлении;

жидкость не должна химически воздействовать на материал тензометра и его крепление;

истинная деформация образца, находящегося в условиях объемного сжатия, должна определяться по формуле $\epsilon = \epsilon_{\text{пр}} - \epsilon_p - \epsilon_{\text{т}}$, где $\epsilon_{\text{пр}}$ — деформация, полученная на основании показаний измерительного прибора; ϵ_p — деформация проволоки датчика как результат всестороннего давления на нее; $\epsilon_{\text{т}}$ — деформация проволоки датчика от температурного эффекта.

Поправку ϵ_p рекомендуется вычислять по формуле $\epsilon_p = \sigma_б (1 -$

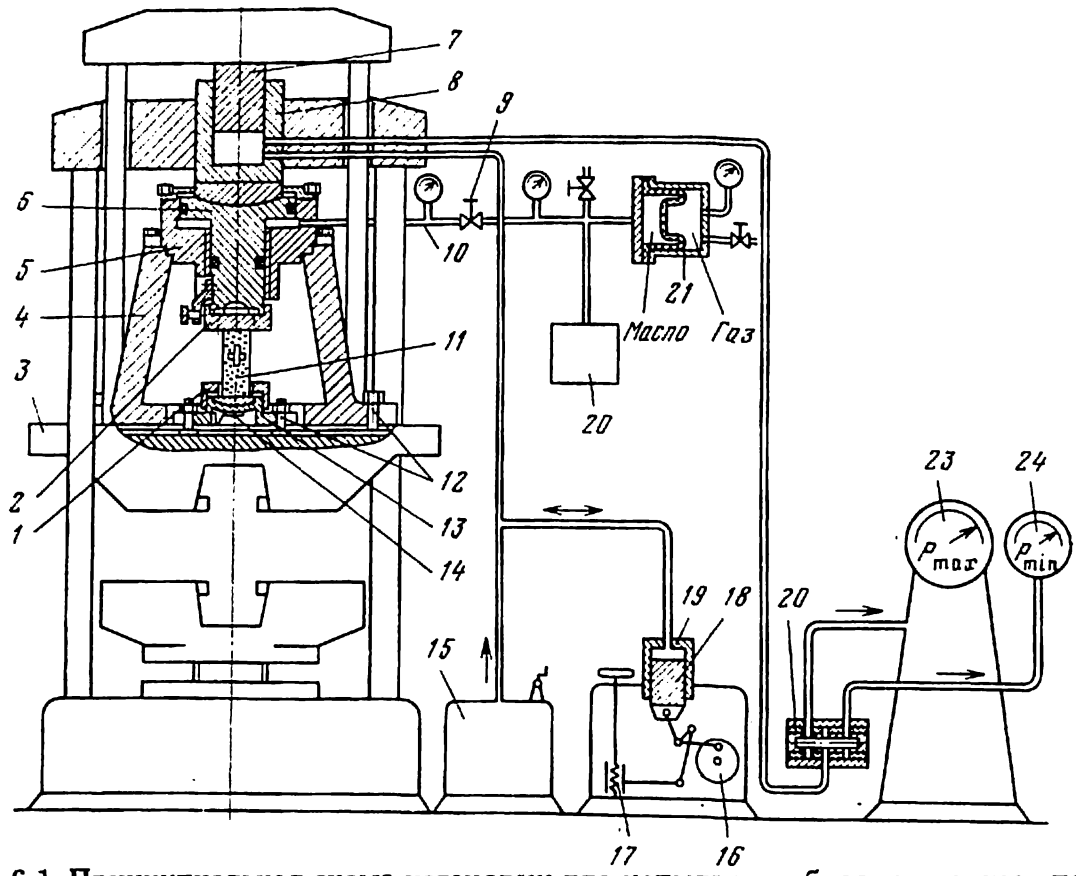


Рис. 6.1. Принципиальная схема установки для испытания образцов горных пород пульсирующими нагрузками сжатия в комплексе с испытательной машиной с пульсатором типа ПДМ-100 Пу

$-2\nu)/E$, где $\sigma_б$ — всестороннее давление, МПа; $E = 1{,}55 \cdot 10^5$ — модуль упругости константана, МПа; $\nu = 0{,}35$ — коэффициент Пуассона константана.

Учет температурного искажения $\epsilon_т$ может производиться при регистрации изменения температуры разогрева образцов во времени по методике [26].

В качестве регистрирующей аппаратуры, записывающей процесс нагружения, деформирования и разрушения образца породы, применен шлейфовый осциллограф Н-700, работающий по схеме моста Уитстона с усилителем ТА-5, обладающим высокой чувствительностью к изменению сопротивления.

Методика одноосного пульсирующего нагружения образцов. В настоящее время исследователи, изучающие поведение горных пород в условиях статического и динамического однократного нагружения, используют методы, а также испытательные машины и стенды, предназначенные главным образом для испытания металлов. Однако существенное различие в физико-механических свойствах металлов и горных пород не позволяет непосредственно использовать такие машины и стенды для испытания образцов горных пород пульсирующими нагрузками.

В целях возможности проведения испытаний образцов крепких горных пород пульсирующими нагрузками сжатия разработан способ и на его основе создана установка (Э.О. Миндели, М.П. Мохначев,

Д.И. Жуковин и др., 1972) для испытаний при частотах нагружения от 4 до 12 Гц. Установка предусматривает использование испытательной машины с пульсатором типа ПДМ-100 Пу (рис. 6.1).

Техническая характеристика установки

Величина сжимающего пульсирующего усилия, Н	От 0 до $5 \cdot 10^5$
Регулирование сжимающего усилия, Н	От 0 до $5 \cdot 10^5$
Частота пульсации (изменения нагрузки), Гц	4,17; 8,33; 10; 12,5
Максимальное давление масла в камере установки в период вывода испытательной машины на заданный режим, МПа	20
Максимальное рабочее давление (противодавление) масла в гидросистеме установки, МПа	3,2
Максимальное (требуемое) давление газа (азота) в аккумуляторе при нулевом давлении масла в гидросистеме установки, МПа	1,1
Масса установки, кг	375

Для экспериментального изучения влияния режимов пульсирующего нагружения на прочность и деформируемость горных пород в условиях одноосного приложения усилий сжатия изготавливаются цилиндрические образцы с отношением высоты h к диаметру d не менее единицы в большинстве $d = 42$ мм, $h = 65$ мм.

В целях исключения влияния чистоты обработки поверхностей образцов на показатели свойств места контакта поверхностей образцов с нагрузочными плитами тщательно обрабатываются и проверяются на выпуклость, овальность и шероховатость в соответствии с требованиями к испытанию образцов горных пород по ГОСТ 21153.0—75 и ГОСТ 21153.3—75.

На основании исследований [25] для определения прочности и деформируемости горных пород при одноосных пульсирующих нагрузках растяжения принят косвенный метод сжатия по образующей цилиндрических образцов с линейными размерами: $d = 42 \div 60$ мм, $h = 42 \div 60$ мм. В схеме нагружения используется дополнительное устройство в виде нижней опорной цилиндрической пяты с раскалывающим закругленным (радиусом 3 мм) клином, имеющих возможность поворачиваться только в одном направлении — по оси образующей образца и верхнего дифференциального поршня с плоским основанием. Образец центрируется и удерживается по оси раскалывающего клина посредством двух упругих стальных пластин равного сопротивления изгибу.

Таким образом, как для одноосного сжатия, так и для растяжения пульсирующими нагрузками приняты образцы практически одинаковых размеров и формы.

Методика проведения испытаний образцов горных пород на одноосное сжатие при разных частотах пульсирующего нагружения заключается в следующем (см. рис. 6.1).

Образец горной породы *11* с укрепленными на нем тензодатчиками сопротивления устанавливается на цилиндрическую опорную мембрану *13* через пяту 14 и центрируется кольцом *1*. Верхний горец

образца *11* соединяется с дифференциальным поршнем *6* через промежуточную давильную плиту *2*. Далее при нулевом давлении масла и полном отсутствии воздуха в гидросистеме испытательной камеры закрывается вентиль *9*, тем самым создается замкнутая масляная полость в испытательной камере, заключенная между цилиндром *5*, большим диаметром дифференциального поршня *6* и трубопроводом *10* до вентиля *9*. Полость газомасляного аккумулятора предварительно заполняется постоянным расчетным давлением газа в 1,1 МПа при нулевом давлении масла в гидросистеме испытательной камеры. Затем насосом *20* устанавливается требуемое давление масла в участке гидросистемы установки между вентилем *9* и газомасляным аккумулятором *21*.

Корпус *4* камеры, опорная сферическая мембрана 13 установочными болтами *12* крепятся на подвижной траверсе *3* испытательной машины с пульсатором, например, типа ПДМ-100 Пу.

Требуемое давление масла устанавливается в соответствии с задаваемым режимом нагружения по формуле: $Q_{тр} = F_{min}/S_к$, где $F_{min} = 0{,}5 \cdot 10^5$ — минимальное пригрузочное усилие, действующее в момент вывода испытательной машины на заданный режим только на корпус испытательной камеры, Н; $S_к = 250$ — рабочая площадь поперечного сечения масляной полости в испытательной камере, заключенная между цилиндром *5* и дифференциальным поршнем *6*, см^2.

Затем включается испытательная машина с пульсатором, устанавливается расчетная пульсирующая нагрузка сжатия, изменяющаяся в пределах от F_{min} до $F_{max} = F_{min} + F_{сж}$, и быстро открывается вентиль *9*, в результате чего испытываемым образцом горной породы мгновенно воспринимается заданная пульсирующая нагрузка сжатия.

Статическое давление масла, развиваемое насосом *15* во внутренней полости цилиндра *8* испытательной машины, воздействует одновременно на рабочий поршень *7* испытательной машины и на поршень *18* пульсатора *19*. Поступательные перемещения поршня 18 пульсатора создают дополнительно пульсирующую нагрузку, накладываемую на минимальную статическую нагрузку, развиваемую насосом *15* испытательной машины.

Эксцентриковый маховик *16* пульсатора имеет ручное управление *17*, позволяющее изменять ход поршня *18* пульсатора. При работе пульсатора поршень совершает возвратно-поступательные движения с амплитудой, устанавливаемой во время вывода испытательной машины на заданный режим. От этой амплитуды и зависит амплитуда пульсирующей нагрузки сжатия на образец.

Частота колебаний нагрузки изменяется путем смены шкивов на пульсаторе и электродвигателе в пределах от 4,17 до 12,5 колебаний в секунду.

Измерение статических и динамических пульсирующих нагрузок, действующих на образец через золотник *22*, производится визуально с помощью манометров статического *24* и динамического *23* давлений.

Определение характера изменения нагрузок в образце и их фактических величин производится с помощью проволочных датчиков сопротивления, наклеенных на опорную мембрану *13*, предварительно протарированную по усилию и деформации. Деформации (прогибы) мембраны, а также продольные и поперечные деформации образца регистрируются тензодатчиками через усилитель ТА-5 шлейфовым осциллографом Н-700.

Для расчета величины относительной деформации ϵ, соответствующей любому заданному моменту нагружения, используется формула, в которую входят основные параметры усилителя и датчиков сопротивления

$$\epsilon = 2\epsilon_к A_i / (S_д A_к), \qquad (6.6)$$

где ϵ — величина измеренной деформации, отн. ед; $\epsilon_к$ — предел измерения усилителя, отн.ед.; $S_д$ — чувствительность датчиков сопротивления; A_i — амплитуда записи измеряемого процесса, 10^{-3} м; $A_к$ — амплитуда записи контрольного сигнала, 10^{-3} м.

Испытательные нагрузки F_{max} выбираются такими, чтобы максимальные действующие напряжения σ_{max} были равными 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4 от предела статической прочности $R_{сж.ст}$. Предел статической прочности определяется предварительно разрушением не менее трех образцов каждого типа пород с измерением продольных и поперечных деформаций. При этом скорость нагружения составляет $(5 \div 10) \cdot 10^5$ Па·с$^{-1}$ (ГОСТ 21153.4—75).

Отсчеты (измерения) по приборам производятся через определенные интервалы времени, выбор величины которых зависит от типа горной породы (прочности образца) и от степени его нагруженности (максимального напряжения).

Число циклов пульсирующей нагрузки определяется по счетчику, установленному на пульсаторе, или по времени проведения опыта при заданной частоте колебаний нагрузки от момента ввода испытательной машины на заданный режим до момента разрушения образца (прекращения испытания).

Испытание считается законченным в момент разрушения образца или при достижении кривой усталостной прочности прямолинейного участка — предела усталостной прочности. Под пределом усталостной прочности $R_у$ горных пород понимается максимальное значение σ_{max}, которое может быть воспринято образцом бесконечное число раз без разрушения.

При одном из заданных значений максимальных напряжений σ_{max} и частоты нагружения ω испытывается не менее трех образцов каждого типа пород и выводится среднее арифметическое значение исследуемых показателей, соответствующих принятым условиям испытаний.

Для сопоставления показателей прочностных и деформационных свойств горных пород, определенных при действии пульсирующих нагрузок, с показателями прочностных и деформационных свойств горных пород, определенных при действии однократных статических

нагрузок, методикой предусматривается предварительное определение статических деформационных характеристик на первом цикле "нагрузка—разгрузка" в тех же пределах действующих нагрузок, что и при испытании их на пульсирующее сжатие, и лишь затем образец можно подвергать пульсирующему нагружению.

Испытательная аппаратура и методика проведения исследований прочности и деформируемости горных пород на растяжение сохраняются такими же, как и в опытах на сжатие, но с использованием дополнительного устройства. Испытательные нагрузки F_{max} выбираются из такого расчета, чтобы напряжения σ_{max} были равны 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4 предела статической прочности на растяжение $R_{р.ст}$. Методика проведения испытаний на растяжение пульсирующими нагрузками при разных частотах нагружения путем сжатия цилиндрических образцов по образующей оставалась такой же, как и при проведении испытаний на одноосное сжатие.

Величины модуля упругости $E_р$ и коэффициента поперечной деформации (Пуассона) $\nu_р$ при испытаниях образцов на растяжение косвенным методом рассчитывались по формулам:

$$E_р = (1+\nu)(1+2\nu)/\bar{\varepsilon}_x = (1+\nu)(2\nu-3)/\bar{\varepsilon}_y ; \qquad (6.7)$$

$$\nu_р = \frac{3\bar{\varepsilon}_x + \bar{\varepsilon}_y}{2(\bar{\varepsilon}_x - \bar{\varepsilon}_y)} , \qquad (6.8)$$

где $\bar{\varepsilon}_x$, $\bar{\varepsilon}_y$ — средние относительные деформации в центре образца по осям горизонтальной x и вертикальной y соответственно; ν — величина, равная 0,3.

Методика пульсирующего нагружения образцов в условиях объемного напряженного состояния. В практике испытаний конструкционных материалов хорошо известны различные испытательные машины и стенды с пульсаторами, предназначенные для испытаний материалов в различных режимах пульсирующего нагружения и сложных напряженных состояниях (растяжение с кручением, сжатие и растяжение трубчатых образцов под внутренним давлением и т.д.). Однако непосредственное использование существующих испытательных машин и стендов с пульсаторами для испытания горных пород в различных режимах пульсирующего нагружения и напряженных состояниях практически не осуществимо, как и в опытах при одноосном напряженном состоянии, вследствие существенного различия в физико-механических свойствах конструкционных материалов и горных пород и в этой связи неприспособленности их к испытанию горных пород.

В целях возможности проведения испытаний образцов горных пород пульсирующими нагрузками в условиях сложного (объемного) напряженного состояния разработан способ определения механических свойств горных пород при пульсирующих нагрузках в условиях объемного напряженного состояния (Э.О. Миндели, М.П. Мохначев, Н.В. Громова, 1974). Сущность способа заключается в том, что образец горной породы одновременно с осевым пульсирующим нагружением подвергают дополнительному воздействию всестороннего бокового давления.

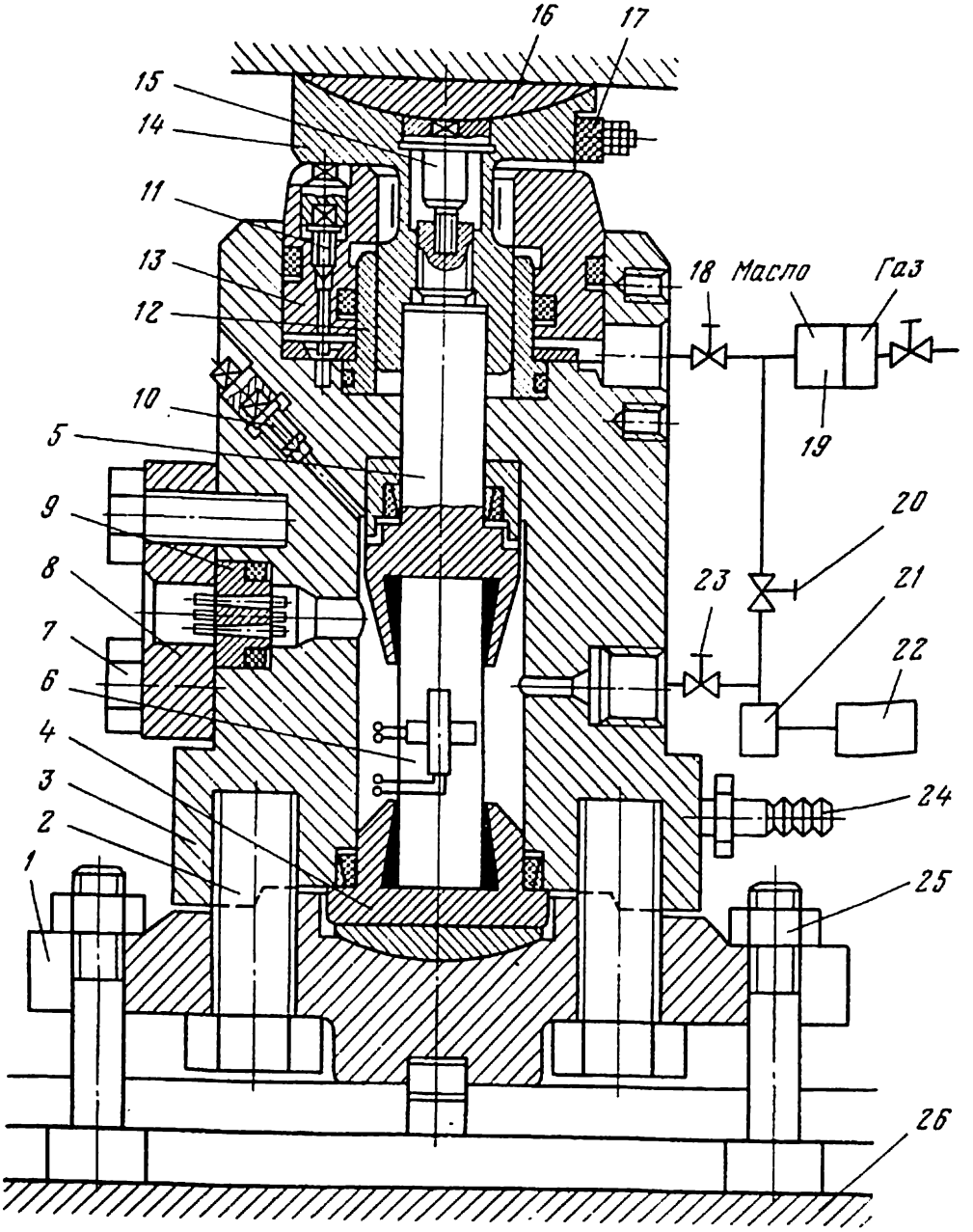


Рис. 6.2. Принципиальная схема установки для испытания образцов горных пород пульсирующими нагрузками в условиях объемного напряженного состояния

На основе способа определения механических свойств горных пород при пульсирующих нагрузках в условиях объемного напряженного состояния создана установка для испытания образцов горных пород при пульсирующих нагрузках в условиях объемного напряженного состояния (Э.О. Миндели, М.П. Мохначев, А.И. Ягодин и др., 1974).

Сущность установки (рис. 6.2) заключается в том, что с целью обеспечения возможности проведения испытаний горных пород при одновременном воздействии на образец осевых пульсирующих нагрузок и бокового давления, нагрузочное устройство снабжено камерой высокого давления и мультипликатором, полость которого сообщается с рабочей полостью камеры высокого давления.

Установка имеет основание *1*, соединенное болтами *2* с корпусом *3* камеры высокого давления, внутри которого помещены нижний захват — пуансон *4* и верхний захват — шток *5*, жестко соединенные с образцом горной породы *6* эпоксидной смолой. В верхней части корпуса *3* камеры болтами *7* закреплен в крышке *8* проходной зажим *9* для подсоединения проводов от тензометрических датчиков, наклеенных на испытуемом образце *6*, а также помещен промежуточный цилиндр *12*, по внешней поверхности которого может перемещаться поршень *13*, а по внутренней — тензометрический динамометр *14*, закрепленный винтом *15* и жестко связанный с верхним захватом — штоком *5*. На тензометрическом динамометре *14* размещены сферическая опора *16* и токосъемник *17* для крепления проводов от тензодатчиков динамометра *14*, фиксирующих приложенные к образцу осевые нагрузки. Запорные клапаны *10* и *11* служат для выпуска воздуха из масляных полостей низкого и высокого давления камеры при настройке установки.

Полость низкого давления камеры, образованная корпусом *3* камеры, промежуточным цилиндром *12* и поршнем *13*, передающим усилия растяжения к образцу 6, соединена трубопроводом вентиля *18* с газожидкостным аккумулятором *19* и сообщается через вентиль *20* и мультипликатор *21* с насосом *22*. Клапан *24* служит для слива жидкости при разборке установки.

Полость высокого давления камеры, окружающая образец горной породы *6*, соединена трубопроводом и вентилем *23* с мультипликатором *21* и насосом *22*. Клапан *24* служит для слива жидкости при разборке установки.

Основание *1* установки крепится болтами *25* к траверсе *26* испытательной машины с пульсатором.

Установка используется в комплексе с испытательной машиной с пульсатором типа ЦДМ-100 Пу, а испытания образцов горных пород производится по двум вариантам А и Б.

Вариант А — одноосное осевое пульсирующее сжатие, одноосное осевое (прямое) пульсирующее растяжение и осевое пульсирующее сжатие — растяжение цилиндрических образцов с защемленными концами в сочетании с всесторонним боковым давлением.

Вариант Б — всестороннее сжатие цилиндрических образцов давлением Q_{max} до 200 МПа в сочетании с осевым пульсирующим сжатием по образующей. В этом варианте вследствие гидравлической неуравновешенности нагрузочного штока диаметром 42 мм, расположенного в камере высокого давления, с площадью поверхности штока, соприкасающегося непосредственно с образующей испытуемого цилиндрического образца, $S_ш = 13{,}85$ см^2, наибольшее усилие противодействия $T_{max} = 200 \cdot 10^6 \cdot 13{,}85 \cdot 10^{-4} = 277$ кН.

Осевое пульсирующее усилие сжатия на образующие образца будет составлять 0—223 кН.

Весь комплекс установки при испытании цилиндрических образцов по варианту Б, как и по варианту А, остается неизменным, за исключением замены в камере высокого давления верхнего нагру-

Техническая характеристика установки

При испытании по варианту А

Максимальное осевое статическое усилие сжатия, Н	10^6
Максимальное осевое пульсирующее усилие сжатия, Н	$5 \cdot 10^5$
Максимальное осевое пульсирующее усилие растяжения, Н	10^5
Максимальное всестороннее боковое давление, МПа	200
Максимальное усилие противодействия пульсирующему усилию сжатия, развиваемому камерой низкого давления при устранении неустойчивой зоны работы пульсатора, Н	$5 \cdot 10^4$
Максимальное усилие противодействия пульсирующей нагрузке для создания пульсирующего усилия растяжения, Н	$7 \cdot 10^4$
Максимальное результирующее пульсирующее усилие сжатия, передаваемое образцу, Н	$38 \cdot 10^5$
Максимальное давление в камере высокого давления, МПа	200
Максимальное давление в камере низкого давления, МПа	9
Минимальное давление в камере низкого давления, МПа	3,6
Частота пульсации (изменения нагрузки), Гц	4,17; 8,33; 10; 12,5
Максимальное давление масла на низкой ступени мультипликатора, МПа	20
Начальное давление азота в аккумуляторе, МПа	3,6
Размеры испытуемого образца, мм:	
диаметр	42
высота с заделкой концов	145
высота без заделки концов (рабочая высота)	65

Привод насоса:

Насос эксцентриковый поршневой типа НП-500 производительностью, л/мин	1,6
Максимальное давление, МПа	40
Электродвигатель типа АОЛ2-21-4; мощность, кВт	1,1
Частота вращения в $мин^{-1}$	1400

Подъемник:

Грузоподъемная сила, Н	$3 \cdot 10^3$
Вылет стрелы, м	0,75
Привод подъемника	ручной лебедкой
Габариты установки, мм:	
высота	3050
ширина	2830
длина	3580

При испытании по варианту Б

Максимальное давление в камере высокого давления (давление всестороннего сжатия образца), МПа	200
Максимальное усилие противодействия пульсирующему усилию сжатия, Н	$27{,}7 \cdot 10^4$
Максимальное результирующее осевое пульсирующее усилие на образующие образца, Н	$22 \cdot 10^4$
Размеры испытуемых образцов, мм:	
диаметр	42; 60
высота	42

зочного штока и нижнего захвата — опорного пуансона. На нижнем опорном пуансоне установлены промежуточный сферический сегмент с раскалывающим клином радиусом закругления 3 мм, имеющий возможность поворачиваться только по длине испытуемого образца, две упругие пластины равного сопротивления изгибу, предназначенные для центрирования образца по оси раскалывающего клина и удержания его в первоначальном положении в процессе пульсирующего нагружения. Верхний нагрузочный шток в месте контакта с испытуемым образцом горной породы имеет также раскалывающий клин или может иметь плоское основание.

Методика исследования прочности и деформируемости горных пород при различных режимах пульсирующего нагружения в условиях объемного напряженного состояния аналогична одноосным испытаниям. Ее отличие состоит в изменении конструкции испытательной камеры, захватов образца и наличия всестороннего давления, вследствие чего и несколько меняется последовательность проведения опыта.

Методикой предусматривается также испытание на пульсирующее сжатие в условиях объемного напряженного состояния незащемленных (свободных) образцов диаметром 42 мм, высотой 65 ÷ 84 мм и на пульсирующее растяжение путем сжатия по образующей цилиндрических образцов диаметром 42—60 мм, высотой 42 мм с измерением продольных и поперечных деформаций.

Провода от тензодатчиков, наклеенных на образец, заводят в канал проходного зажима *9* (см. рис. 6.2) при снятой крышке и вынутом зажиме. На стержень верхнего захвата *5* навинчивают тензометрический динамометр *14* и закрепляют его винтом *15*. После этого на тензометрический динамометр *14* устанавливают опору *16*. Затем образец горной породы *6* с жестко закрепленными на его концах захватами *4* и *5* устанавливают во внутреннюю часть корпуса *3* камеры, а основание *1* соединяют с корпусом *3* камеры болтами.

В таком виде установку при помощи подъемника размещают на траверсе *26* испытательной машины с пульсатором и закрепляют на ней болтами *25*.

При испытаниях закрывают вентиль *20* и насосом *22* через мультипликатор *21* создают заданное всестороннее боковое давление на образец горной породы *6*, предварительно поджатый осевой нагрузкой. После этого вентиль *23* закрывают и при закрытом вентиле *18* и открытом вентиле *20* в газожидкостном аккумуляторе *19* создают требуемое давление газа, а в гидросистеме между мультипликатором *21* и газожидкостным аккумулятором *19* — заданное давление жидкости; включают испытательную машину с пульсатором и, регулируя ход поршня пульсатора, устанавливают требуемую осевую пульсирующую нагрузку.

После вывода испытательной машины с пульсатором на заданный режим, вентиль *18* открывают, при этом аккумулятор *19* соединяется с полостью низкого давления камеры, заключенной между корпусом *3* камеры, промежуточным цилиндром *12* и поршнем *13*.

В результате этого давление, развиваемое в газожидкостном аккумуляторе *19*, воздействует на поршень *13*, а через него — на динамометр *14*, верхний захват — шток *5* и образец горной породы *6*, создавая в образце растягивающее усилие, направленное против действующего пульсирующего усилия сжатия.

В одном из заданных режимов воздействия осевых пульсирующих нагрузок сжатия или растяжения и заданного всестороннего бокового давления происходит испытание образца горной породы.

Для предотвращения разрушения образца под действием пульсирующих нагрузок сжатия во время вывода испытательной машины в установившийся режим вентиль *18* закрывают, создавая тем самым замкнутую жидкостную полость между корпусом *3* камеры, промежуточным цилиндром *12* и поршнем *13*, рабочая площадь которой больше площади поперечного сечения образца, в результате чего основная часть развиваемого осевого усилия воспринимается корпусом *3* камеры.

Измерение статических и динамических пульсирующих нагрузок, действующих на образец, производится с помощью манометров минимального (статического) и максимального (динамического) давлений. Определение характера кривой изменения этих нагрузок во времени (для контроля) производится с помощью тензометрических датчиков опорной мембраны, соединенных через усилитель ТА-5 с осциллографом Н-700. Измерение деформаций образца осуществляется тем же осциллографом Н-700.

Для испытаний подготавливается не менее 24 образцов (только для одного из значений коэффициентов асимметрии) в соответствии с изложенными выше требованиями по подготовке цилиндрических образцов.

Испытательные нагрузки F_{max} выбираются такими, чтобы максимальные напряжения σ_{max} были равными 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3 от предела статической прочности при сжатии или растяжении в условиях соответствующих боковых давлений на образцы. Предел статической прочности при сжатии и растяжении определяется предварительно разрушением не менее трех образцов каждого типа пород для одного из заданных боковых давлений. Минимальные напряжения σ_{min} для всех значений σ_{max} принимаются в соответствии с принятым коэффициентом асимметрии цикла.

Отсчеты (измерения) по приборам берутся через определенные интервалы времени, выбор величины которых зависит от типа горной породы (прочности образца) и от степени его нагружения (максимального напряжения). Число циклов пульсирующей нагрузки определяется по счетчику, установленному на пульсаторе, или по времени проведения опыта при заданной частоте колебаний нагрузки от момента ввода испытательной машины на заданный режим.

Испытание считается законченным в момент разрушения образца или по достижении кривой циклической прочности прямолинейного участка — предела циклической прочности.

При заданной нагрузке F_{max} испытывают не менее трех образцов

Таблица 6.1. Показатели физико-механических свойств исследованных горных

Порода	Плотность ρ_0, 10^3 кг/м^3	Пористость, %	Скорость упругих продольных волн a_0, м/с	Предел прочности при сжатии, 10^5 Па		Предел при растя 10^5
				$\bar{R}_{сж.ст}$	коэффициент вариации, %	$\bar{R}_{р.ст}$
Известняк	1,90	8,3	2310	170	10,3	35
Сильвинит	2,20	—	3100	275	10,8	46
Мрамор	2,49	0,9	4100	475	10,3	65
Песчаник	2,71	1,8	4450	1400	8,7	175
Габбро	2,99	3,2	5450	2000	7,9	220

и выводят среднеарифметическое значение числа циклов, соответствующих принятым условиям испытаний. Затем продолжают испытания при других намеченных значениях σ_{max} и строят функцию σ_{max} от числа циклов нагружения при заданном значении коэффициента асимметрии и заданном неизменном боковом давлении на образец.

Момент разрушения образца можно наблюдать по показаниям регистрирующей аппаратуры. После этого пульсатор пресса отключается и производится извлечение образца из камеры с предварительным отсоединением провода от коллектора токоввода, сливом масла из камеры высокого давления через специальный клапан, отсоединением трубопровода высокого давления. Стрела крана стыкуется с камерой, после небольшого подъема для снятия с центровочного кольца поворачивается на 90 или 180° и спускается посредством ручной лебедки на специальный монтажный стол. Отсоединяется основание камеры, камера приподнимается, основание удаляется. Далее, придерживая нижний захват, отвинчивают упор в верхней части камеры (при испытании по варианту А) и извлекают остатки образца вместе с верхним захватом. В случае заклинивания стержня верхнего захвата его выталкивают через верх после удаления распорного винта.

Установку образца, испытание и разборку камеры необходимо вести осторожно, чтобы не повредить специального уплотнения и датчиков с их проводами, а также следует строго соблюдать требования по эксплуатации сосудов, стендов и установок высокого давления.

6.3. ВЛИЯНИЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО НАГРУЖЕНИЯ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Особенности деформирования и разрушения горных пород при пульсирующих нагрузках изучались на образцах нескольких типов монолитных горных пород, существенно различающихся по механическим свойствам в обычных (стандартных) условиях нагружения.

Известными методами [8, 27] определены характеристики проч-

пород

прочности жении, Па	Модуль упругости при сжатии, 10^8 Па		Коэффициент поперечной деформации (Пуассона)		Модуль упругости динамический $E_д = a_0^2 \rho_0$, 10^8 Па
коэффициент вариации, %	$\bar{E}_{сж.ст}$	коэффициент вариации, %	$\nu_{сж.ст}$	коэффициент вариации, %	
13,1	86	5,4	0,40	6,3	100
12,5	175	6,4	0,20	7,5	211
11,0	342	6,0	0,21	4,2	418
9,4	440	6,9	0,24	5,8	536
9,0	765	3,8	0,27	3,5	872

ности и упругости пород, средние значения которых приведены в табл. 6.1.

Для более полного суждения о характере изменения показателей свойств горных пород под влиянием переменных нагрузок данные, полученные при испытаниях образцов посредством изложенных методов, как правило, сопоставляются с их значениями при однократном статическом или однократном динамическом нагружении со скоростью изменения напряжения в течение одного цикла.

Такое сравнение дает возможность оценить на сколько скорость нагружения влияет на величину предела усталости пород, а также их деформационные характеристики.

Скорость нагружения $\dot{\sigma}$ при циклических нагрузках оценивается скоростью нарастания напряжения в течение цикла от 0 до σ_a. Для синусоидального цикла

$$\dot{\sigma} = 2\pi\omega\sigma_a \cos(\omega t + \varphi),$$

где ω — частота; t — время; φ — фазовый угол.

При пульсирующей нагрузке для $f(t) = \sin\omega t$ скорость нагружения цикла равна $\dot{\sigma} = 2\pi\sigma_a\omega$ и зависит как от амплитуды σ_a, так и частоты ω переменной нагрузки.

Для исследованного диапазона частот ω пульсирующего нагружения (от 4,17 до 12,5 Гц) образцов при амплитудах цикла σ_a, составивших $(0{,}25 \div 0{,}45)\ R_{сж(р).ст}$ скорость нагружения σ меняется в широких пределах (табл. 6.2), а нагрузки носят динамический характер.

Для расчета показателей при известной скорости однократного нагружения можно воспользоваться обобщенными зависимостями прочности R и модуля упругости E от скорости нагружения [27]:

$$\frac{R_{сж.д}}{R_{сж.ст}} = 0{,}002\,[\lg\dot{\sigma})^3 + 0{,}004\,(\lg\dot{\sigma})^2 + 0{,}06\lg\dot{\sigma} + 1; \qquad (6.9)$$

$$\frac{R_{р.д}}{R_{р.ст}} = 0{,}12\lg\dot{\sigma} + 1; \qquad (6.10)$$

Таблица 6.2. Скорости однократного приложения нагрузки (10^8 Па$с^{-1}$) при пульсирующем сжатии или растяжении образцов с различной частотой ω (Гц) и амплитудой σ_a (в долях от $R_{ст.сж}$ и $R_{ст.р}$)

Порода	$\omega = 4{,}17$ Гц		$\omega = 10$ Гц		$\omega = 12{,}5$ Гц		$\omega = 10$ Гц	
	$\sigma_a = 0{,}25$	$\sigma_a = 0{,}45$	$\sigma_a = 0{,}25$	$\sigma_a = 0{,}45$	$\sigma_a = 0{,}25$	$\sigma_a = 0{,}45$	$\sigma_a = 0{,}25$	$\sigma_a = 0{,}45$
	Сжатие						Растяжение	
Известняк	1,1	2,0	2,7	4,8	3,3	6,0	0,5	1,0
Сильвинит	2,0	3,2	4,3	7,8	5,4	9,4	—	—
Мрамор	3,1	5,6	7,5	13,4	9,3	16,8	1,0	1,8
Песчаник	9,2	16,5	22,0	39,6	27,5	49,5	2,7	4,9
Габбро	13,1	23,6	31,4	56,5	39,3	70,7	3,5	6,2

$$\frac{E_{сж.д}}{E_{сж.ст}} = 0{,}002\,(\lg \dot{\sigma})^3 - 0{,}003\,(\lg \dot{\sigma})^2 + 0{,}05 \lg \dot{\sigma} + 1, \qquad (6.11)$$

$$\frac{E_{сж.д}}{E_{сж.ст}} = -0{,}02\,(\lg \dot{\sigma})^2 + 0{,}15 \lg \dot{\sigma} + 1, \qquad (6.12)$$

где $R_{сж(р).д}$, $E_{сж(р).д}$ — соответственно пределы прочности и модули упругости при сжатии и растяжении при любой скорости нагружения; $R_{сж(р).ст}$, $E_{сж(р).д}$ — соответственно пределы прочности и модули упругости при сжатии и растяжении и статическом нагружении, когда $\dot{\sigma} \approx (0{,}001 \div 0{,}05) \cdot 10^8$ Па/с.

Величины $R_{сж(р).д}$, $E_{сж(р).д}$, а также коэффициенты поперечной деформации $\nu_{сж(р).д}$ можно рассчитывать и из осциллограмм нагружения образцов.

Изменение характеристик прочности и упругости в условиях одноосного пульсирующего нагружения образцов. Результаты испытаний образцов горных пород на пульсирующее сжатие и растяжение ($\rho = 0$) с частотой $\omega = 10$ Гц показали снижение прочности с ростом числа нагружений N.

Экспериментальные точки соответствуют графическим зависимостям, показанным на рис. 6.3.

Близкое расположение точек для группы исследованных пород дает основание с некоторой погрешностью получить единые эмпирические уравнения в функции числа пульсирующих нагружений при $\rho = 0$.

Закономерности (см. рис. 6.3) изменения предельного сопротивления от числа пульсирующих нагружений N аппроксимируются уравнениями (прямые 1) при сжатии

$$\sigma_{max}/R_{сж.ст} = 1{,}29 - 0{,}127 \lg N \qquad (6.13)$$

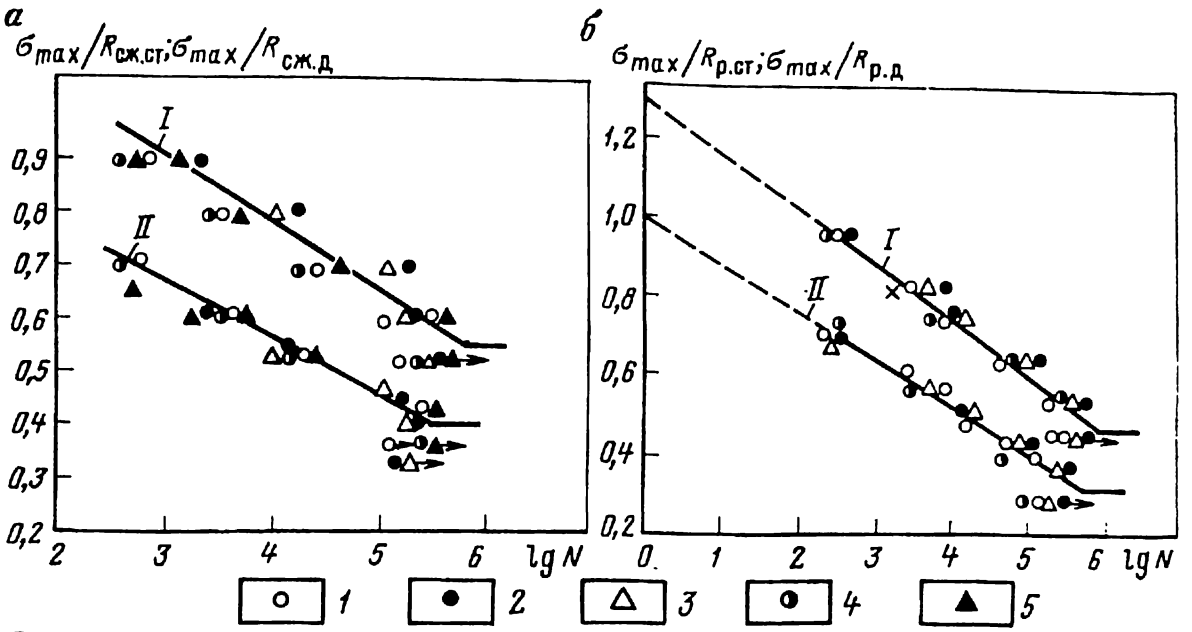


Рис. 6.3. Изменение прочности горных пород σ_{max} при пульсирующем сжатии (*а*) и растяжении (*б*) по отношению к значениям статического предела прочности $R^{ст}_{сж.р}$ (линии *I*) и динамического $R^{д}_{сж.р}$ (линии *II*), соответствующего скорости нагружения при частоте 10 Гц:

1 — мрамор; *2* — габбро; *3* — песчаник; *4* — известняк; *5* — сильвинит

и растяжении

$$\sigma_{max}/R_{р.ст} = 1{,}3 - 0{,}145 \lg N, \qquad (6.14)$$

где σ_{max} — максимальное напряжение цикла.

Коэффициенты корреляции зависимостей (6.13) и (6.14) составили соответственно 0,97 ± 0,013 (с надежностью 72) и 0,99 ± 0,006 (с надежностью 180).

Пределы усталости $R_{сж(р).у}$ опытных образцов при $\rho = 0$ имеют значения, приблизительно равные 0,50 $R_{сж.ст}$ и 0,45 $R_{р.ст}$.

При анализе зависимостей (6.13) и (6.14) на рис. 6.3 нетрудно установить, что при значениях $\sigma_{max}/R_{ст} = 1{,}0$ прямые пересекают ось ординат примерно на 30 % выше этой точки. Это значит, что предел статической прочности определяется при значительно меньших скоростях нагружения, чем при воздействии динамических пульсирующих односторонних нагрузок.

Если учесть изменение характеристик прочности от скорости динамического нагружения по уравнениям (6.13) и (6.14) и внести в расчет соответствующие коррективы на скорости изменения напряжений в течение цикла, то экспериментальные зависимости (см. рис. 6.3) пересекут ось ординат в точке $\sigma_{max}/R_{сж(р).д} = 1$, а уравнения усталости горных пород в этом случае (прямые П) принимают вид:

при сжатии

$$\sigma_{max}/R_{сж.д} = 1 - 0{,}105 \lg N, \qquad (6.15)$$

при растяжении

$$\sigma_{max}/R_{р.д} = 1 - 0{,}12 \lg N. \qquad (6.16)$$

Пределы усталости при этом составляют при сжатии $R_{сж.у} \approx \approx 0{,}4\,R_{сж.д}$, а при растяжении $R_{р.у} \approx 0{,}35\,R_{р.д}$.

При проведении усталостных испытаний исследовался вопрос влияния пределов изменения напряжений в течение цикла. При нагружении серии образцов песчаника и габбро циклическим сжатием получены уравнения прямолинеиной связи для описания зависимости изменения показателей их прочности в функции коэффициента асимметрии ρ.

Влияние коэффициента асимметрии на предел усталости выражаются уравнениями:

для песчаника

$$R_{сж.у}/R_{сж.ст} = 0{,}51 - 0{,}49\,\rho, \tag{6.17}$$

для габбро

$$R_{сж.у}/R_{сж.ст} = 0{,}56 + 0{,}44\,\rho. \tag{6.18}$$

Семейство зависимостей $\sigma_{max}/R_{сж.ст} = f(\lg N)$ при различных коэффициентах ρ описывается уравнениями вида

$$\sigma_{max}/R_{сж.ст} = a \lg N + b, \tag{6.19}$$

причем коэффициенты регрессии a и b для песчаника и габбро в исследованном интервале $\rho = 0 \div 0{,}75$ находятся приближенно в линейной зависимости от величины ρ, т.е.

$$a = k_1\rho + m_1; \tag{6.20}$$

$$b = k_2\rho + m_2. \tag{6.21}$$

Методом наименьших квадратов получены числовые связи: для песчаника $a = 2{,}42\,\rho - 4{,}11$; $b = -1{,}40\,\rho + 2{,}75$ с коэффициентами корреляции 0,94 и 0,96; для габбро $a = 0{,}21\,\rho - 0{,}18$, $b = -1{,}25\,\rho + 1{,}76$ с коэффициентами корреляции соответственно 0,92 и 0,87.

Подставляя выражения (6.20) и (6.21) в уравнение (6.19) находим общую эмпирическую зависимость между относительным изменением прочности $\sigma_{max}/R_{сж.ст}$ логарифмом числа циклов до разрушения N и коэффициентом асимметрии ρ в форме

$$\sigma_{max}/R_{сж.ст}\,(k_1\rho + m_1)\lg N + (k_2\rho + m_2). \tag{6.22}$$

На рис. 6.4, *а* в трехмерной прямоугольной системе координат представлена поверхность, соответствующая результатам испытаний образцов песчаника, а на рис. 6.4, *б* — для образцов габбро в принятом интервале ρ по уравнению (6.22).

Как видно, с увеличением коэффициента асимметрии ρ от 0 до 0,75 пределы усталости песчаника и габбро существенно возрастают и соответственно при одинаковых действующих максимальных напряжениях растет число пульсирующих нагружений.

Наряду с установлением пределов усталости, проведена серия

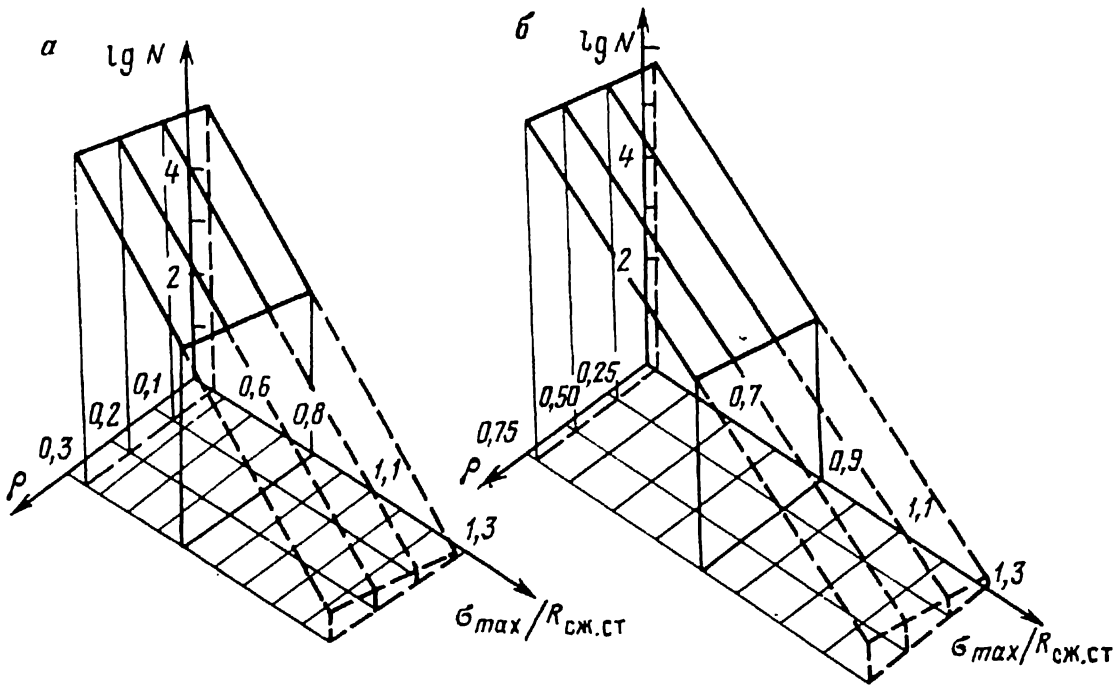


Рис. 6.4. Изменение относительной прочности $\sigma_{max}/\sigma_{сж}^{ст}$ габбро (*а*) и песчаника (*б*) от коэффициента асимметрии цикла ρ и логарифма числа циклов нагружения N при сжатии

опытов для выяснения влияния пульсирующих нагрузок на остаточную прочность горных пород.

Все неразрушенные под воздействием $0{,}5 \cdot 10^6$ циклов при нагрузках и амплитудах колебания ниже предела усталости образцы доводились до разрушения статической однократной нагрузкой. Установлено практическое совпадение прочности, полученной в этих условиях, с прочностью образцов, не подвергавшихся пульсирующим нагрузкам.

При исследовании деформационных характеристик горных пород по данным осциллограмм рассчитывались модули пропорциональности (упругости) $E_{сж.д}$ и коэффициенты поперечной деформации (Пуассона) $\nu_{сж.д}$ при тех же действующих амплитудах напряжений и коэффициентах асимметрии показателей прочностных свойств.

Анализ диаграмм деформирования напряжение — относительные деформации показывает, что при увеличении числа пульсирующих нагружений идет процесс изменения предельных значений продольных ϵ_p и поперечных ϵ_s деформаций.

На рис. 6.5 представлены опытные зависимости относительного изменения максимальных продольных $\epsilon_{p\,max}$ и поперечных $\epsilon_{s\,max}$ деформаций при разном числе нагружений N по сравнению с их значениями при однократном нагружении ϵ_{p1} и $\epsilon_{s\,1}$ образцов песчаника и известняка от величины действующего напряжения сжатия σ_{max} и логарифма числа пульсирующих нагружений при $\rho = 0$. Как следует из рисунка, деформации слабой породы (известняк) развиваются интенсивнее, чем у крепкой (песчаник) и при значительно меньших числах циклов при одном и том же уровне отношения $\sigma_{max}/R_{сж.ст}$.

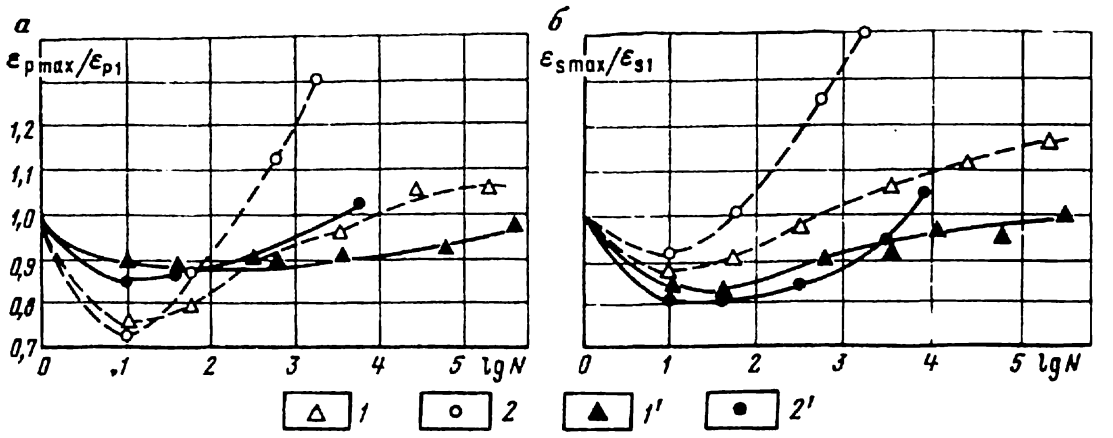


Рис. 6.5. Относительное изменение максимальных продольных (*а*) и поперечных (*б*) деформаций при пульсирующем сжатии ($\rho = 0$) образцов песчаника (*1*, *1'*) и известняка (*2*, *2'*):

1, *2* — $\sigma_{max} = 0{,}8\,R^{ст}_{сж}$; *1'*, *2'* — $\sigma_{max} = 0{,}5\,R^{ст}_{сж}$

Установлено, что продольные деформации развиваются медленнее поперечных. При первых 10 циклах абсолютные значения продольных и поперечных деформаций меньше, чем при однократном нагружении.

Исследования деформационной способности горных пород при циклических нагрузках показали также, что чем выше действующее напряжение и меньше коэффициент асимметрии ρ при $\sigma_{ср} = (\sigma_{min} + \sigma_{max})/2 = \text{const}$, тем интенсивнее процесс развития микротрещин и увеличения ширины петель гистерезиса продольных и поперечных деформаций при возрастании числа нагружений.

Изменение характера деформирования в зависимости от действующих напряжений, коэффициента асимметрии и числа нагружений естественно влияет и на величины $E_{сж.д}$ и $\nu_{сж.д}$. На рис. 6.6 на примере испытания песчаника показаны типичные кривые $E_{сж.д}(N)/E_{сж.1} = f(\lg N)$ и $\nu_{сж.д}(N)/\nu_{сж.1} = f(\lg N)$ при трех различных уровнях напряжений при $\rho = 0$, где $E_{сж.д}(N)$ и $\nu_{сж.д}(N)$ соответствуют значениям модуля упругости и коэффициента поперечной деформации при любом числе циклов переменного динамического нагружения сжатия, а $E_{сж.1}$ и $\nu_{сж.1}$ значениям этих величин при однократном нагружении.

Модули упругости всех испытанных пород до десятого цикла возрастают в среднем на 25 %, а затем резко убывают, снижаясь в момент разрушения примерно на 30 % от максимального значения.

Изменение коэффициента поперечной деформации идет в обратном порядке — с начальным уменьшением его значений на 25—30 % и последующим возрастанием к моменту разрушения до 40 %.

Рассмотрение данных о деформируемости образцов пород при усталостных испытаниях с коэффициентами ρ в интервале от 0 до 75 показало, что наиболее интенсивные изменения упругих характеристик при одном и том же значении $\sigma_{ср}$ наблюдаются при $\rho = 0$.

Характерно, что значения модуля упругости E и коэффициента

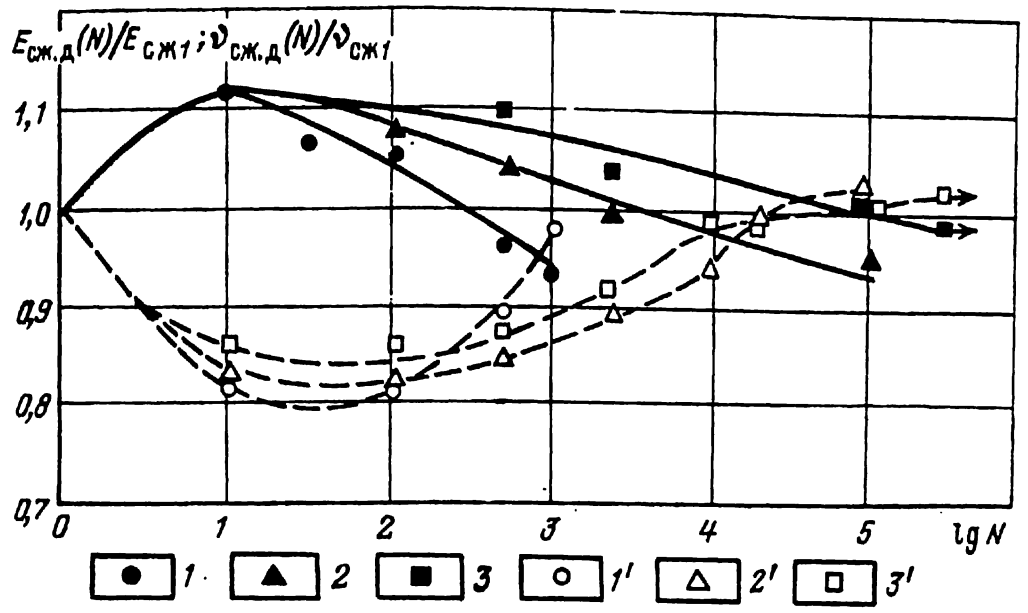


Рис. 6.6. Относительное изменение модуля упругости (*1–3*) и коэффициента поперечной деформации (*1′ – 3′*) образцов песчаника при пульсирующем сжатии ($\rho = 0$):

1, 1′ – $\sigma_{max} = 0{,}9\,R^{ст}_{сж}$; *2, 2′* – $\sigma_{max} = 0{,}7\,R^{ст}_{сж}$; *3, 3′* – $\sigma_{max} = 0{,}5\,R^{ст}_{сж}$

поперечной деформации ν образцов, подвергавшихся циклической нагрузке с напряжениями ниже предела усталости, существенно не изменялись и оставались на уровне их значений при однократном статическом нагружении.

Влияние частоты одноосной пульсирующей нагрузки. Увеличение частоты изменения нагрузки при одном и том же уровне приложенных напряжений вызывает возрастание скорости нагружения образца (см. табл. 6.2) и таким образом может привести к изменению характеристик усталости горных пород.

Описанный выше метод позволяет изучать поведение пород при пульсирующем нагружении с частотами 4,17; 8,33; 10; 12,5 Гц.

Экспериментальные данные одноосного пульсирующего сжатия образцов при разных частотах изменения действующих синусоидальных напряжений показывают, что сопротивление пород усталостному разрушению и не остается постоянным.

Для исследованных образцов габбро, песчаника, известняка и мрамора построены общие статистические зависимости и найдена довольно тесная корреляционная связь между прочностью при одноосном сжатии $R_{сж.ст}$ и числом нагружений N до предела усталости при разных частотах изменения действующих напряжений при пульсирующем нагружении ($\rho = 0$). Они описываются в исследованном интервале частот уравнениями, приведенными в табл. 6.3.

Из таблицы видно, что с возрастанием частоты (скорости) нагружения число циклов приложения нагрузок, необходимое для разрушения, увеличивается, растет и величина предела усталости. Правда, в исследованном интервале частот это изменение еще не столь значительно и достигает в среднем 10 %.

Таблица 6.3. Эмпирические уравнения усталостной прочности пород при пульсирующем сжатии ($\rho = 0$) с разной частотой

Частота, Гц	Уравнение корреляционной прямой $\sigma_{max}/R_{сж.ст} = f(\lg N)$	Коэффициент корреляции	$R_{сж.у}/R_{сж.ст}$	Число циклов нагрузки N до $\sigma_{max} = R_{сж.у}$, $N \cdot 10^{-5}$
4,17	1,25—0,126 lg N	0,87	0,47	5,5
8,33	1,28—0,135 lg N	0,97	0,49	6,6
10	1,29—0,127 lg N	0,92	0,50	8,2
12,5	1,32—0,131 lg N	0,89	0,51	10

Таблица 6.4. Относительное изменение модуля упругости и коэффициента поперечной деформации при пульсирующем сжатии с разными частотами

Порода	Отношение $E_{сж.д}/E_{сж.ст}$		Отношение $\nu_{сж.д}/\nu_{сж.ст}$	
	4,17 Гц	12,5 Гц	4,17 Гц	12,5 Гц
Известняк	1,16	1,55	1,5	2,05
Мрамор	1,08	1,20	1,46	1,80
Песчаник	1,03	1,14	1,27	1,60
Габбро	1,06	1,13	1,30	1,70

Изменение частоты многократных нагружений сказывается также и на деформационном поведении горных пород.

На основании диаграмм пульсирующего сжатия (петель гистерезиса напряжения — относительные деформации) с различной частотой при одном и том же уровне максимального напряжения $\sigma_{max} = 0{,}7\ R_{сж.ст}$ рассчитаны значения динамического модуля упругости $E_{сж.д}$ и $\nu_{сж.д}$ коэффициента поперечной деформации для частот 4,17 и 12,5 Гц (табл. 6.4).

Изменение деформационных характеристик в исследованном диапазоне частот исследованных пород (см. табл. 6.4) не одинаково. Оно составило для значений $E_{сж}$ от 13 % у габбро до 55 % у известняка; для значений $\nu_{сж}$ изменение достигало двух раз у известняка, и было не менее 60 % у всех пород при частоте 12,5 Гц по сравнению с однократным нагружением.

Таким образом, предельные зависимости сопротивления пород циклическим нагрузкам в заданном диапазоне частот от логарифма числа нагружений и величины действующих напряжений хорошо подчиняется линейному закону.

С возрастанием частоты, а значит и скорости нагружения образцов в течение одного цикла при одном и том же уровне максимальных нормальных напряжений цикла, повышается несущая способность горных пород. При этом число циклов приложения нагрузки, необходимое для разрушения, увеличивается для всех типов пород.

Таблица 6.5. Прочность горных пород на сжатие при различных значениях бокового давления и циклического нагружения

Порода	Предел прочности $R_{сж.ст}$ ($\sigma_б$), МПа		Коэффициент асимметрии ρ	Уравнение циклической прочности $\sigma_{max}/R_{сж.ст}$ ($\sigma_б$) $= f(\lg N)$	Коэффициент корреляции	$R_{сж.у}/R_{сж.ст}$ ($\sigma_б$)
	$\sigma_б = 25$ МПа	$\sigma_б = 50$ МПа				
Габбро	250	380	0,1	1,47—0,29 lg N	0,88	0,15
			0,7	1,74—0,304 lg N	0,86	0,26
Песчаник	210	320	0,1	1,44—0,261 lg N	0,94	0,17
			0,36	1,53—0,265 lg N	0,88	0,23
			0,7	1,6—0,257 lg N	0,85	0,30
Мрамор	98	178	0,1	1,52—0,288 lg N	0,84	0,20
			0,7	1,78—0,305 lg N	0,86	0,29

Влияние повышения скорости (частоты) на деформационную способность горных пород проявляется в качественно общей закономерности непрерывного увеличения их упругих характеристик и тем в большей мере, чем слабее порода.

Влияние режимов пульсирующего нагружения и объемного напряженного состояния на свойства пород. Исследования проведены на трех разновидностях горных пород (габбро, песчанике, мраморе) при частоте нагружения 10 Гц (табл. 6.5).

Для каждого типа пород и соответствующих значений ρ определены показатели прочностных свойств на сжатие и растяжение.

Найденные уравнения циклической прочности ($\omega = 10$ Гц, $\sigma_б = 50$ МПа) при различных значениях действующих напряжений σ_{max} в функции логарифма числа циклов N представляют собой прямые. Угловые коэффициенты численно отличаются для разных типов пород и кроме того зависят от коэффициента ρ в пределах одного типа. Свободный член уравнений больше единицы, поскольку скорость циклической нагрузки существенно выше скорости однократного статического испытания. При значениях $\sigma_{max} = R_{сж.у}$ зависимости (см. табл. 6.5) переходят в предельные и соответствуют горизонтальным прямым. Полученные величины пределов усталости при $\sigma_б = 50$ МПа испытанных образцов, взятые в процентном отношении к их статической прочности при том же давлении, отличаются незначительно для всех трех пород (15—20 % при $\rho = 0{,}1$).

Подобные зависимости прочности от числа циклов, коэффициента асимметрии и максимального действующего напряжения найдены для пульсирующего растяжения этих же пород при всестороннем сжатии образцов до $\sigma_б = 50$ МПа (табл. 6.6).

Таблица 6.6. Прочность горных пород при растяжении в условиях бокового давления 50 МПа и циклического нагружения

Горная порода	Предел прочности $R_{р.ст}$ ($\sigma_б$), МПа, при $\sigma_б$ = 50 МПа	Коэффициент асимметрии ρ	Уравнение циклической прочности $\sigma_{max}/R_{р.ст}(\sigma_б) = f(\lg N)$	Коэффициент корреляции	$R_{р.д}/R_{р.ст}(\sigma_б)$
Габбро	32,0	0,1	$1{,}04-0{,}212 \lg N$	0,78	0,06
— " —	32,0	0,7	$1{,}37-0{,}258 \lg N$	0,81	0,11
Песчаник	25,5	0,1	$1{,}35-0{,}255 \lg N$	0,75	0,06
Мрамор	45,0	0,1	$1{,}2-0{,}265 \lg N$	0,77	0,10

Усталостные зависимости при $\sigma_б$ = 50 МПа графически располагаются ниже прямых усталости при $\sigma_б$ = 0. Это значит, что сопротивляемость испытанных горных пород одноосным пульсирующим нагрузкам как сжатия, так и растяжения в условиях сжимающих давлений уменьшается, т.е. увеличивается их деформируемость не только от действия пульсирующих нагрузок, но и самих давлений. Происходит снижение значений усталостной прочности.

Наряду с прочностными характеристиками были исследованы и деформационные.

По данным расчета и расшифровки осциллограмм строились диаграммы напряжение σ — относительные деформации $\epsilon_{p,s}$, иллюстрирующие связь между этими величинами на всем протяжении опыта как однократного статического, так и многократного динамического сжатия или растяжения при $\sigma_б$, составляющем 0; 25; 50 МПа.

Влияние числа циклов пульсирующих нагружений, коэффициента асимметрии и максимального пульсирующего напряжения проявляется в интенсивном изменении продольных и поперечных деформаций и в условиях всестороннего сжатия.

Анализ результатов испытаний образцов показал увеличение их полных и остаточных продольных и поперечных деформаций с ростом числа нагружений N. С уменьшением коэффициента ρ и увеличением значений σ_{max} также происходит рост продольных и поперечных деформаций. Отмечается вместе с тем, что для одного и того же отношения действующих максимальных пульсирующих напряжений к пределу объемной статической прочности и при одинаковых значениях коэффициентов асимметрии у слабых пород проявляется большая доля продольных и поперечных деформаций до момента, близкого к разрушению. Этим можно объяснить монотонное разрушение мрамора от действия на него пульсирующих нагрузок в отличие от хрупкого разрушения габбро. Нарастание максимальных деформаций образцов всех пород в течение цикла подобно развитию деформаций

при постоянной нагрузке. Интенсивность роста остаточных деформаций несколько меньшем, чем полных. Изменение их аналогично изменению полных продольных и поперечных деформаций от числа циклов N, напряжений σ_{max} и коэффициента ρ.

Для всех пород, разрушившихся в процессе действия на них пульсирующих нагрузок в условиях всестороннего давления, замечена тенденция уменьшения величины модуля упругости и увеличения коэффициента поперечной деформации, особенно в момент, близкий к разрушению. Чем выше амплитуда действующих напряжений и чем ниже коэффициент асимметрии, тем существеннее изменяются величины упругих характеристик пород. Для габбро их изменение незначительно; у мрамора в отличие от габбро происходят значительные структурные изменения, которые сопровождаются более интенсивным ростом деформаций ϵ_p и ϵ_s, увеличивается площадь петель нагрузка-разгрузка, уменьшается угол наклона ветвей и оси деформаций.

По диаграммам $\sigma - \epsilon_{p,\,s}$, построенным для цилиндрических образцов, испытанных при пульсирующих нагрузках растяжения сжатием по образующей в условиях объемного напряженного состояния ($\sigma_б$ = 50 МПа), а также установлен характер изменения деформаций (продольных и поперечных, полных и остаточных), петель гистерезиса, упругих характеристик.

Так, при пульсирующем растяжении изменение площади петли с ростом числа нагружений гораздо меньше, чем при испытаниях на сжатие, не изменяется характер кривых напряжение — продольная и поперечная деформации. На рост продольных и поперечных деформаций (полных и остаточных) оказывают влияние коэффициент асимметрии и величина максимального напряжения цикла: при увеличении σ_{max} и уменьшении ρ возрастает нелинейность их зависимости от числа циклов N. Более интенсивный рост деформаций наблюдается при нагружении слабых пород.

Упругие характеристики, определенные при скоростях изменения напряжений в течение одного цикла нагрузки, $E_{р.д}$ и $\nu_{р.д}$ до момента разрушения пульсирующими нагрузками практически изменений не претерпевают — с ростом числа циклов нагружения перемещение петель нагрузка-разгрузка происходит с почти постоянным углом их наклона к оси деформаций.

Повышенная деформируемость горных пород как при сжатии, так и растяжении в режиме пульсирующего нагружения при действии боковых давлений влияет на сопротивляемость горных пород этому виду нагрузок. Численные значения $R_{сж.\,у}$ при $\sigma_б$ = 50 МПа и частоте 10 Гц составляет 15—30 % от статической прочности при том же давлении, тогда как при одноосном сжатии $R_{сж.\,у}$ достигает 50—60 % от $R_{сж.\,ст}$. Значения $R_{р.\,у}$ испытанных пород при $\sigma_б$ = 50 МПа составили всего 6—11 % от статического предела прочности при давлении в 50 МПа, в то же время при $\sigma_б$ = 0 соотношение $R_{р.\,у}/R_{р.\,ст}$ = 40 % (см. табл. 6.5, 6.6).

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ, ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВНЕДРЕНИИ ШТАМПА

7.1. ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Все виды нагружения в принципе следует относить к динамическим, тем не менее критерием оценки вида нагружения динамического или статического принят условно удельный вес инерционных сил в общем балансе действующих сил (15 % и более от статической нагрузки). Второй особенностью поведения пород при динамических нагрузках является неравномерность во времени и по величине распределения напряжений по нагруженному объему, так как распределение напряжений преимущественно носит волновой характер. Третьей особенностью поведения пород при динамическом нагружении является неравномерность деформирования нагружаемого объема, — одна часть нагружаемого объема деформируется больше, а другая часть этого же объема может быть деформирована меньше, или не деформироваться совсем.

Таким образом, при динамическом нагружении сравнительно большую роль играют волновые процессы, тогда как при статических нагрузках волновые процессы возникают лишь в первый период нагружения, а в дальнейшем они затухают и на процесс образования напряжений не влияют.

Разрушение породы при динамическом нагружении может произойти сразу в нескольких местах, тогда как при статическом нагружении разрушение произойдет в наиболее слабом месте.

Из сказанного видно, что характер, форма деформаций и величина напряжений в нагружаемом объеме зависит от способа приложения нагрузки, поэтому и показатели свойств пород, полученные при динамических и статических нагрузках имеют разные значения.

При выяснении влияния скорости нагружения на показатели свойств горных пород при динамическом внедрении пуансона процесс нагружения следует рассматривать как процесс взаимодействия двух тел — пуансона и породы. При этом следует иметь в виду, что масса пуансона или любого внедряемого тела имеет ограниченные размеры, а массу породы, как правило, принимают бесконечно большой.

Установлено [28], что не вся бесконечно большая масса породы будет принимать участие в процессе нагружения, а только его часть, обусловленная временем контакта нагружающего тела с породой, скоростью прохождения упругих волн, а также величиной и формой поверхностей тел.

Таким образом от свойств, размеров и форм нагружающего тела будет зависеть характер, закон и режим, по которому будет нагружаться испытываемая порода.

Объем породы, охваченной деформацией, в процессе нагружения будет зависеть от формы контактирующей поверхности. При точеч-

ном контакте нагружающего тела с породой объем породы будет иметь форму полусферы с радиусом, равным произведению скорости распространения волн на время нагружения. В случае линейной нагрузки форма этого объема будет близка к эллипсоиду. При равномерно распределенной нагрузке по площади, форма и размеры породы, участвующей в нагружении будут зависеть от соотношения и величины контактирующей поверхности, а также от скорости распространения продольных волн и от времени нагружения.

Таким образом при рассмотрении процесса динамического нагружения должна рассматриваться совместно взаимодействующая пара — нагружающее тело и порода.

В дальнейшем для получения сравнимых результатов и классификации пород мы будем задаваться режимом нагружения, принимая при этом нагружающее тело (пуансон или другой инструмент) с постоянными свойствами, обусловленными его формой и материалом. При этом будем иметь в виду, что массы взаимодействующих тел будут считаться сосредоточенными в центре инерции этих масс (объемов) или тел.

При динамическом нагружении породы играет роль еще и схема нагружения. Под схемой нагружения понимается такое расположение ударяющего тела и породы, когда энергия удара может передаваться породе либо непосредственно ударяющим телом, либо через промежуточный элемент (тело).

Характер нагрузки в принципе не зависит от времени нагружения, хотя количественная разница в величине и виде передаваемой энергии имеется. При этом большую роль будет играть соотношение формы и размеров всех масс.

При непосредственном ударе тела о породу вначале возникает волна напряжений, которая будет распространяться по породе со скоростью звука. Одновременно с этим возникает волна и в ударяемом теле, которая будет распространяться по нему также со скоростью звука. Как только волна дойдет до противоположного (от контакта) конца тела, она превратится из волны сжатия в волну растяжения и в отрицательной фазе вернется к месту контакта соударяющихся тел. Время контакта ударяющего тела с породой будет зависеть как от времени пробега волны по ударяющему телу, так и от формы тела и его контактирующей поверхности. Затем, если запас энергии у ударяющего тела достаточный, может произойти разрушение на контакте соударяющихся тел. После чего ударяющее тело отскочит от породы, если упругие силы ее еще будут иметь место.

Таким образом энергия удара, запасенная в виде кинетической энергии ударяющегося тела будет превращена в энергию, идущую на разрушение, на упругие деформации и диссипативные потери в волне, и на остаточную энергию, идущую на отскок ударяющего тела.

7.2. НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ЧЕРЕЗ ПУАНСОН

В настоящее время наиболее распространены:

метод определения динамической твердости по упругому отскоку на приборе Шора;

метод определения твердости, основанный на измерении энергии, требующейся на внедрение пуансона определенной длины (ударник ДорНИИ);

метод определения динамических характеристик пород на приборах типа ДП-7 (8) и ПДС-4 (5).

Сущность метода с использованием прибора Шора и аналогичных ему приборов (Тархова и др.) состоит в том, что на гладко обработанную поверхность испытываемого образца горной породы сбрасывается с определенной высоты боек со сферическим алмазным наконечником и по средней высоте отскока бойка от поверхности породы определяют твердость породы. Сбрасывание бойка производят каждый раз в различные точки образца. Отношение высоты отскока к высоте сбрасывания называется коэффициентом отскока, который характеризует упругие свойства. Образцы горной породы должны иметь две плоско параллельные шлифованные плоскости. Толщина образца должна быть не менее 40—50 мм. На этом же приборе определяется и контактная динамическая пластичность горных пород, которая основана на изменении эффекта контактного упрочнения при повторных микроударах в одну и ту же точку образца.

Сущность метода, основанного на измерении энергии для внедрения пуансона на приборах типа ударника ДорНИИ заключается в том, что в породу вбивается пуансон определенной длины, при этом энергия одного удара остается постоянной. За показатели энергоемкости принимается число ударов, необходимое для полного внедрения пуансона. Длина пуансона в ударнике ДорНИИ 100 мм, диаметр 11 мм.

Параметры удара на приборе ДорНИИ могут изменяться в зависимости от твердости породы. Для грунтов принимают массу груза 2,5 кг и высоту 40 см. Известны и другие параметры груза, при которых энергия удара выше.

Метод определения динамических контактных характеристик на приборах ДП-8 и ПДС-4 (5) основан на динамическом внедрении плоского штампа в слабо обработанную (после распиловки алмазным диском) поверхность образца горной породы. При этом высота сбрасывания груза со штампом переменная и сбрасывание производится каждый раз в разные точки образца. В принципе методика работ на этих приборах одна и та же, но метод регистрации параметров удара (глубины внедрения штампа, высоты отскока и др.) различный. В приборе ДП-7 (8) внедрение фиксируется индикатором часового типа, а отскок с помощью мерной шкалы. В приборе ПДС-4 все параметры удара фиксируются на экране электронной трубки. При этом записывается сразу график сила — внедрение.

Разработанный в ИГД им. А.А. Скочинского прибор ДП-8* предназначен для испытания пород в образцах, в условиях приближающихся к натурным.

С помощью этого прибора определяются: динамическая твердость, критическая скорость при первом выколе, динамическая жесткость, а также некоторые другие прочностные контактные характеристики хрупких горных пород.

Прибор построен по принципу механического акселерометра, позволяющего определять характеристики пород на образцах горных пород.

Техническая характеристика ДП-8

Масса ударяющего груза, г	720
Масса подвижного груза, г	115
Максимальная высота сбрасывания, м	1,1
Жесткость съемной пружины, Н/см	5; 10; 15
Индентор плоский из твердого сплава ВК-10 конической формы с углом заострения, град	60°
Диаметр штампа, мм	2
Точность отсчета величины перемещения подвижного груза, мм	1
Точность отсчета глубины внедрения штампа, мм	0,01

Прибор ДП-8 (рис. 7.1) состоит из трубы *1*, пустотелого груза *2* с толкателями *3* и *4*. Внутри пустотелого груза размещены подвижный груз *5* и пружина *6*. На нижнем конце пустотелого груза расположен индентор *7*, а верхний конец закрыт крышкой *8*, которая имеет выем для зацепления собачкой *9*, устанавливающейся на различной высоте с помощью винта *10*. Труба *1* укреплена на вертикальной стойке *11* с помощью стержня *12*.

Образец горной породы *13* устанавливается на плите *14* и зажимается винтом *15*. Пустотелый груз *2* вместе с подвижным грузом *5* и пружиной *6*, индентором *7* и толкателем *3*, поднимается вверх на заданную высоту, а затем сбрасывается на образец горной породы.

При соприкосновении индентора с горной породой пустотелый груз останавливается, а находящийся внутри его подвижный груз по инерции продолжает двигаться вниз и тем самым сжимает пружину *6*. Одновременно с этим толкатель подвижного груза *3* перемещает указатели перемещений *16* и *17*, которые фиксируют величину перемещения груза *5*, при этом указатель перемещения *17*, расположенный на пустотелом грузе, фиксирует величину перемещения подвижного груза с учетом отскока индентора (а, следовательно, и пустотелого груза) от породы, а указатель перемещения *16*, расположенный на трубе, фиксирует величину перемещения подвижного груза без учета отскока.

В момент удара пустотелого груза о породу, индентор будет внедряться в породу и толкатель *4* будет перемещать указатель перемещения *18*, который связан с индикатором часового типа *19*, последний зафиксирует глубину внедрения индентора.

---

*В разработке прибора принимал активное участие В.П. Архипов.

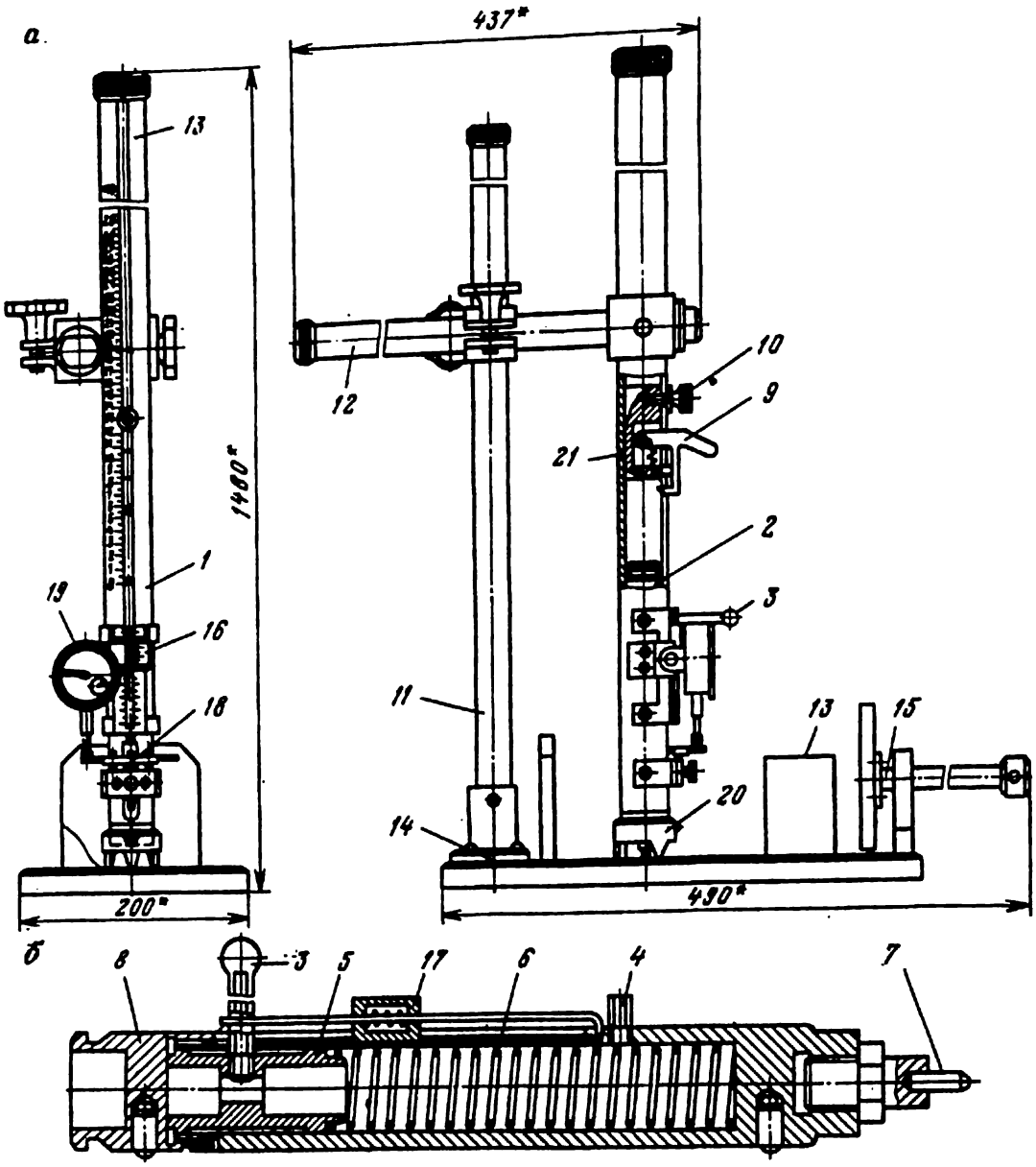


Рис. 7.1. Прибор для определения динамических контактных характеристик пород ДП-8:

а — конструкция прибора; *б* — пустотелый груз

Таким образом, при ударе индентора о породу мы получаем на приборе величину сжатия пружины, которая зависит от свойств породы (от ее сопротивляемости внедрению индентора), а также величину деформации породы под индентором.

После установки прибора и внешнего его осмотра проводят подготовку к работе в следующем порядке.

Вначале устанавливается испытываемый образец горной породы на плиту и закрепляется винтом; затем нужно опустить подвижный груз на образец и убедиться в том, что индентор контактирует с образцом по всей поверхности.

После этого необходимо поставить на нули все показатели перемещений путем вращения опорной втулки *20* и шкалы индикатора часового типа, а также установить ограничитель высоты *21* на нужную отметку.

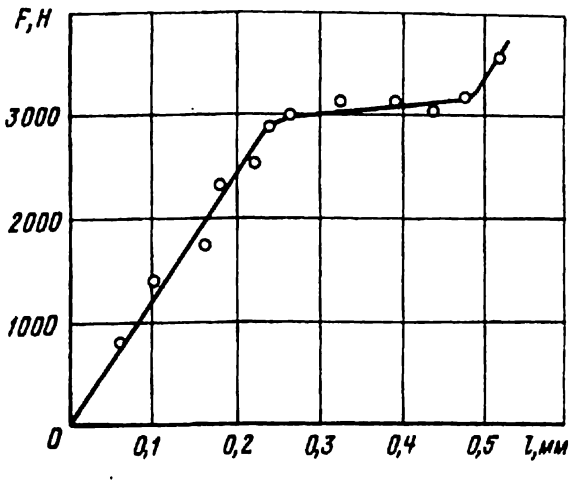


Рис. 7.2. Нагрузочная характеристика доломита (F — сила; l — деформация)

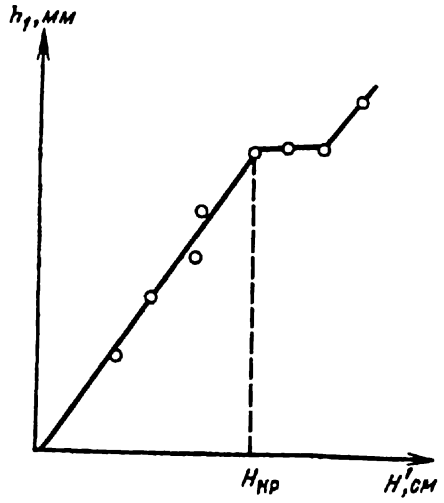


Рис. 7.3. Зависимость величины перемещения h_1 подвижного груза от высоты сбрасывания H'

После проверки и подготовки прибора к работе приступают к определению свойств горной породы. Груз с индентором сбрасывают на горную породу с постоянно увеличивающейся высоты с интервалом 2—3 см, при этом высота сбрасывания увеличивается до тех пор, пока не произойдет первый выкол породы (при выколе величина перемещения подвижного груза стабилизируется, хотя высота сбрасывания увеличивается). При каждой высоте сбрасывания производится несколько замеров в различных точках поверхности горной породы. Затем определяются средние показания прибора при каждой высоте сбрасывания. При каждом ударе (сбрасывании) регистрируется величина перемещения подвижного груза указателями перемещений *16* и *17*, а также глубина внедрения индентора в породу посредством индикатора *19*.

Для замера глубины разрушения породы индентором (без упругих деформаций) необходимо отвернуть зажимной винт и подвести указатель перемещений *18* до толкателя *4*.

Получив средние значения показателей при различных высотах сбрасывания производят построение нагрузочных характеристик испытываемой породы. Для этого по оси ординат откладывают силу при ударе индентора по породе, а по оси абсцисс величину внедрения индентора в горную породу (рис. 7.2).

Кроме того строится второй график (рис. 7.3), на оси ординат которого откладываются величины перемещения подвижного груза с учетом и без учета отскока, а на оси абсцисс высота сбрасывания (или скорости в момент удара). Последний график необходим для определения момента первого выкола. При первом выколе перемещение подвижного груза становится постоянным, а показания перемещений (указателями *16* и *17*) становятся приблизительно одинаковыми.

Средняя сила при выколе определяется по формуле

$$F = mv^2/l,$$

где m — масса падающего груза, Н·с^2/м; v — скорость в момент удара индентора о породу, м/с; l — глубина внедрения индентора в породу, м.

Динамическая твердость (Н/м^2)

$$F_д = mv_{кр}^2/(lS),$$

где S — площадь штампа, м^2.

Динамическая жесткость (Н·с/м)

$$G_д = F_{кр}/v_{кр},$$

где $v_{кр}$ — скорость индентора при первом выколе, м/с.

Кроме этого можно определить объемную и контактную работы разрушения и другие показатели.

Необходимое число измерений

$$n = t^2 k_{вар}^2/k_{доп}^2,$$

где $k_{вар}$ — коэффициент вариации, %; $k_{доп}$ — допустимая ошибка, %; t — нормированное отклонение.

Величина t принимается в зависимости от заданной степени надежности.

Задаваемая надежность	0,60	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
Нормированное отклонение t	1	1,04	1,15	1,28	1,44	1,65
Задаваемая надежность	0,95	0,955	0,99	0,997	0,999	
Нормированное отклонение t	1,96	2,0	2,58	3,0	4	

Определение нагрузочных характеристик горных пород производится на образцах в виде блоков кубообразной или цилиндрической формы с двумя параллельными гранями.

Непараллельность граней не должна превышать 5—7°, размеры образца не менее 120×120×120 мм для кубообразной формы и для цилиндрической формы диаметром цилиндра не менее 75 мм и высота не менее 150 мм.

Поверхность образца, в которую производится внедрение индентора подвергается незначительной обработке (достаточно обработать алмазным диском).

Перед испытанием на обработанную поверхность образца, по которой будет ударять индентор, карандашом наносится сетка со стороной квадрата 0,5—1 см с тем, чтобы один выкол не контактировал с другим соседним выколом породы. Внедрение индентора производится по углам нанесенных квадратов.

На приборе ПДС-5, разработанном совместно с В.П. Архиповым, график сила—деформация записывается при ударе на экране электронного осциллографа, у которого трубка с послесвечением. Принципиальная схема нагружения отличается от предыдущей тем, что удар по породе наносится через промежуточный элемент, в котором вмонтирован пуансон (рис. 7.4). Блок-схема прибора показана на рис. 7.5.

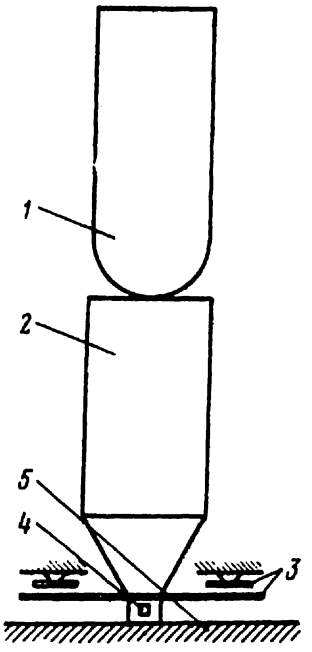


Рис. 7.4. Схема динамического нагружения через промежуточный элемент:

1 — ударник; *2* — промежуточный элемент; *3* — пластины емкостного датчика; *4* — тензодатчик; *5* — горная порода

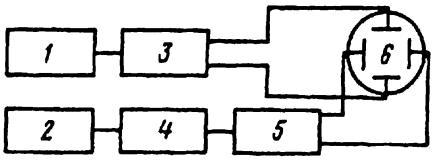


Рис. 7.5. Блок-схема прибора ПДС-5:

1 — тензометрический датчик сопротивления; *2* — емкостный датчик; *3* — усилитель; *4* — преобразователи перемещений емкостного датчика; *5* — усилитель постоянного напряжения; *6* — катодный осциллограф

Запись деформации породы под штампом производится с помощью емкостного датчика *3*, а напряжение во время удара записывается тензодатчиком *4*, наклеенным на конце пуансона.

Емкостный датчик (рис. 7.6) представляет собой конденсатор, который служит элементом колебательного контура. Одна из пластин датчика жестко соединена с пуансоном, а вторая соединена неподвижно с базой копра. Емкость такого конденсатора изменяется путем изменения расстояния между пластинами. Расстояние между пластинами изменяется вследствие внедрения пуансона в породу, что влечет за собой отклонение луча катодного осциллографа. Имея тарировочный график можно определить величину внедрения пуансона в породу.

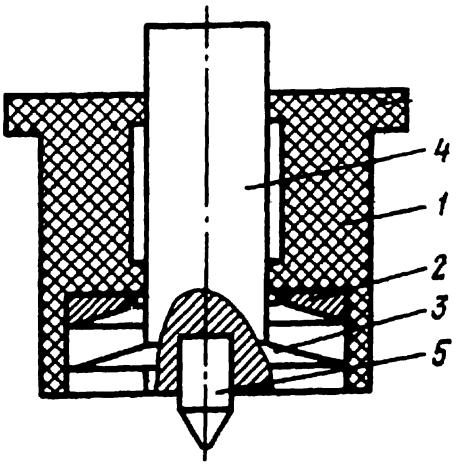


Рис. 7.6. Конструкция емкостного датчика:

1 — неподвижная обойма из текстолита; *2, 3* — пластины емкостного датчика; *4* — промежуточный элемент; *5* — место для наклейки тензодатчика

Такой емкостный датчик работает надежно при глубине внедрения 1—1,5 мм, для больших величин внедрения (до 10 мм) применялись емкостные датчики, основанные на изменении площади взаимодействия пластин.

Этим прибором по описанной методике испытаны сотни разновидностей горных пород, взятых из основных горнодобывающих бассейнов страны.

Для определения динамической твердости ударник *1* неоднократно сбрасывается на промежуточный элемент с постоянно увеличивающейся высоты. В промежуточном элементе встроен пуансон, кото-

рый внедряется в образец горной породы, при этом на экране осциллографа записывается график сила—деформация.

Техническая характеристика прибора ПДС-5

Максимальная допустимая скорость удара, м/с	5
Диаметр ударника и промежуточного элемента, мм	30
Длина ударника и промежуточного элемента, мм	150
Штамп конической формы с углом приострения, град	60
Диаметр штампа, мм	2
Нижний конец ударника закален (38—40 по Роквеллу), сферический с радиусом закругления, мм	60
Верхний конец промежуточного элемента плоский, каленый (до 38—40 по Роквеллу)	

Динамическая твердость определяется из графика путем деления нагрузки, полученной при первом выколе породы, на площадь штампа по формуле

$$P_д = \Sigma P_{i\,д}/(NS),$$

где $P_д$ — динамическая твердость, Па; $P_{i\,д}$ — динамическая твердость для отдельного измерения, Па; N — число измерений (ударов); S — площадь штампа, м^2.

Результаты испытаний горных пород по указанной методике показывают, что показатель динамической твердости значительно выше твердости по штампу. Коэффициент вариации при определении динамической твердости на приборе ПДС-5 не превышал 10—15 %.

Анализ полученных графиков (рис. 7.7) показал, что стабилизация силы для различных пород не одинакова. Чем выше прочность породы, тем большая сила требуется для первого выкола, тем выше критическая скорость соударения.

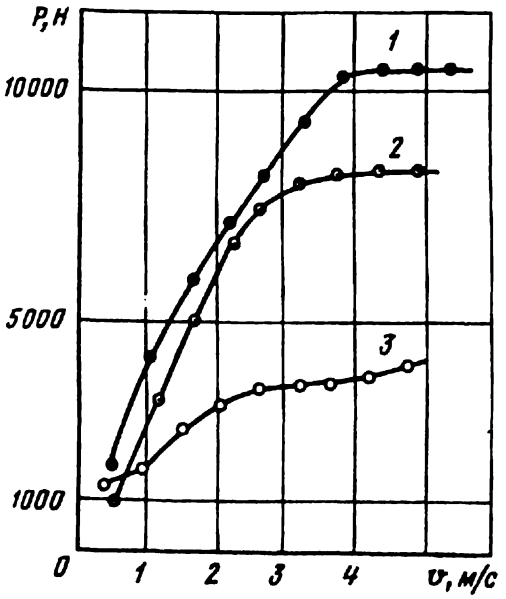


Рис. 7.7. График сила — скорость для различных пород, полученный на приборе ДП-8:

1 — магнетит; *2* — песчаник; *3* — известняк

В целом нагрузочные характеристики всех исследованных пород можно разделить на три типа (рис. 7.8).

Для первого типа кривых характерен больший угол наклона и незначительная деформация при первом выколе. Эти кривые относятся к наиболее хрупким породам, таким как песчаник, магнетит, гранит.

Для второго типа нагрузочных кривых характерен меньший угол наклона начала кривой к оси абсцисс и более значительная деформация породы. К этим породам относятся алевролиты и некоторые марки углей (антрациты).

Для третьего типа нагрузочных

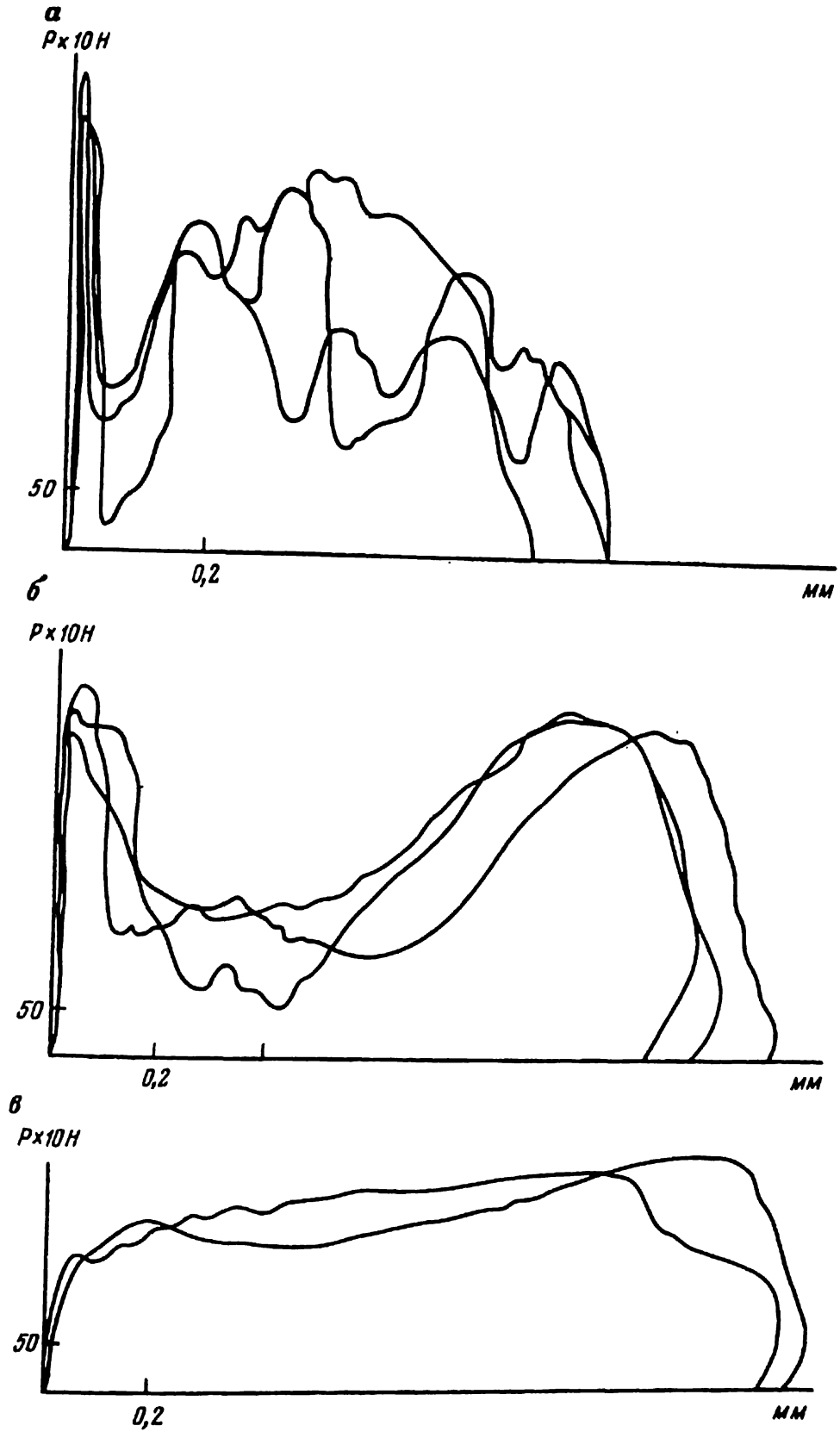


Рис. 7.8. Типы нагрузочных кривых, полученных на приборе ПДС-5:
а — наиболее хрупких пород; *б* — пород средней хрупкости; *в* — пластичных пород

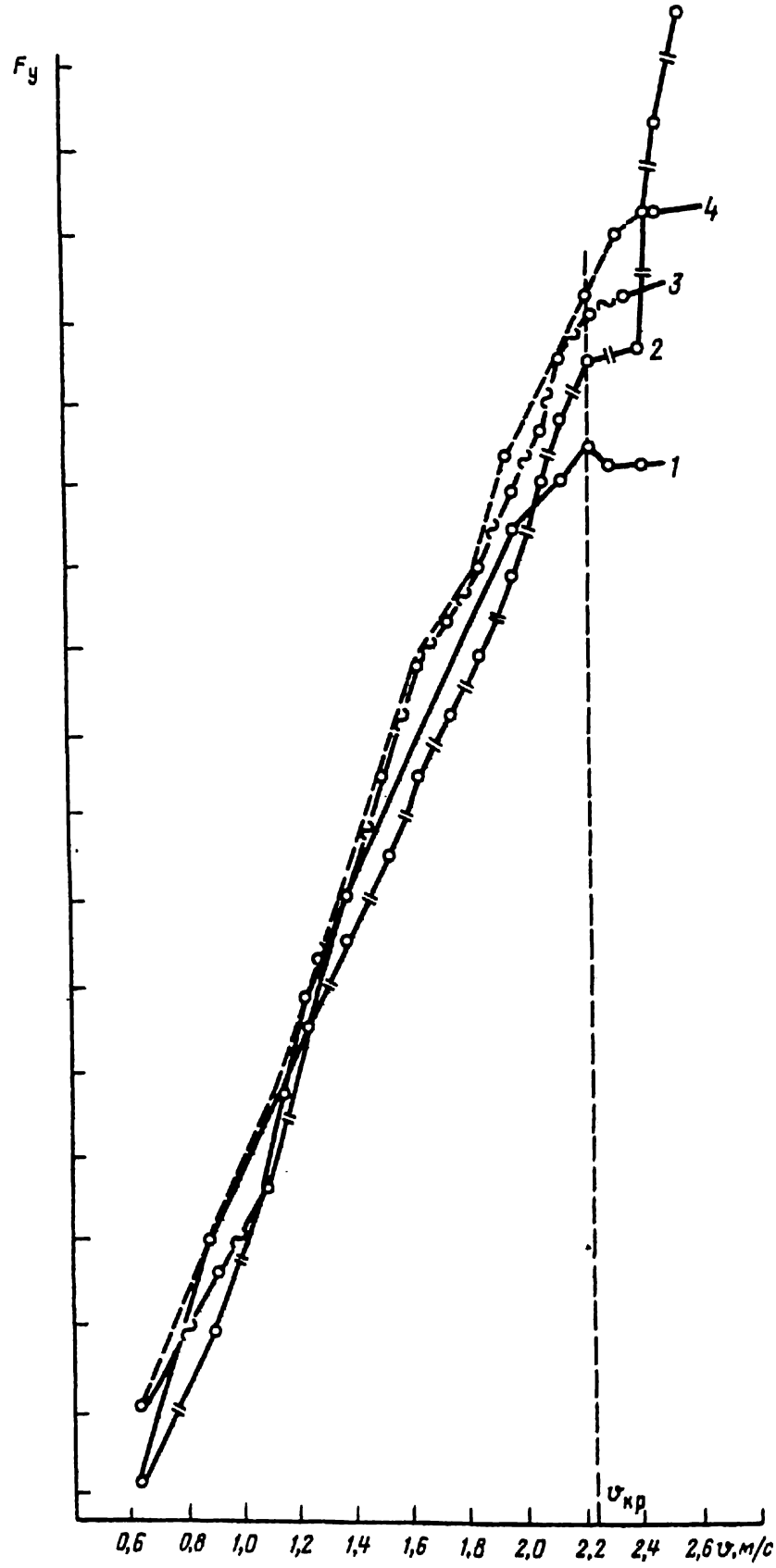


Рис. 7.9. Зависимость условной силы F_y от скорости удара v при различных массах (г) ударника для песчаника:

1 — 1702; *2* — 1262; *3* — 1124; *4* — 972

кривых характерен сравнительно небольшой угол наклона восходящей ветви кривой с плавным переходом ее почти в горизонтальную линию без признаков хрупкого разрушения. Этот тип нагрузочных кривых характерен для таких пород, как аргиллиты, угли марки ГС, мрамор, известняк мраморизованный и др., которые обладают значительной пластичностью.

В ряде случаев кривые могут иметь в конце цикла нагружения загиб в сторону уменьшения деформации, который объясняется восстановлением упругих деформаций породы.

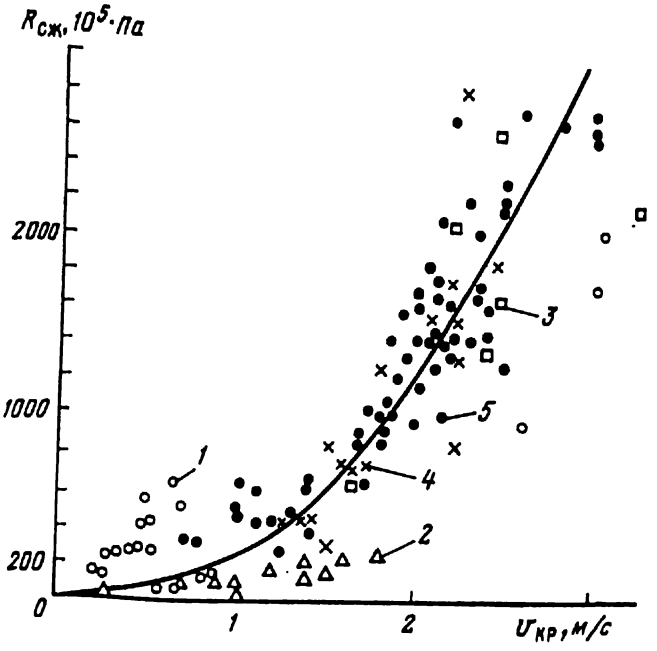


Рис. 7.10. Зависимость между пределом прочности на сжатие $R_{сж}$ и критической скоростью деформирования $v_{кр}$ по данным разных авторов:

1 — А.М. Балута, В.Г. Борисенко; *2* — А.А. Ханукаева; *3* — О.Е. Власова, С.А. Смирнова; *4* — А.А. Скорнякова; *5* — Е.С. Ватолина и В.П. Архипова

Нагрузочные характеристики, записанные при различных диаметрах штампа (от 1 до 5 мм), показывают, что его влияние на скорость соударения индентора с породой проявляется до 2 мм. При дальнейшем увеличении диаметра критическая скорость остается постоянной.

Известно, что с увеличением скорости соударения ударника с породой увеличивается энергия удара (при неизменной массе ударника). Поэтому, чтобы установить влияние массы ударника на критическую скорость при работе ДП-8 были проведены замеры критической скорости условной силы при первом выколе, определяющейся по величине сжатия пружины подвижным грузом. При этом изменяли массу ударника и скорость соударения. Установлено, что масса ударника (в указанных пределах) существенного влияния на критическую скорость не оказывает (рис. 7.9). При больших изменениях массы должно соблюдаться условие, при котором отношение массы к площади штампа остается постоянным.

Исследованиями многих авторов установлено, что с увеличением прочности критическая скорость деформирования растет (рис. 7.10, приложение 5).

Корреляционная связь имеет вид

$$R_{сж} = 340\, v_{кр}; \qquad r = 0{,}83 \pm 0{,}02.$$

Для установления связи скорости перфораторного бурения с динамической твердостью горных пород (табл. 7.1) проведены опытные

Таблица 7.1. Скорости чистого бурения пород при различной динамической твердости

Породы*	Скорость чистого бурения, см/мин	Динамическая твердость 10 Н/мм^2
Жильный сиенит-порфир	7,0	492
Жильный диорит-порфир	5,0	596
Богатая магнетитовая руда	8,3	540
Биотизированный диорит-порфирит	4,0	600
Пироксено-гранатовый скарн	12,3	410
Бедная магнетитовая руда	11,8	480
Убогая магнетитовая руда	9,1	620
Диорит-порфирит	9,4	420
Магнетит сливной	8,1	600
Диорит-порфирит скарнированный	10,9	300
Песчаник кварцевый	11,7	423
Роговик пятнистый	11,3	510
Руда магнетитовая богатая	10,6	250
Бедная магнетитовая руда	10,0	500
Руда скарнированная окисленная	12,5	210
Скополитовый скарн	9,7	510
Руда убогая с лежачего бока	14,4	300
Сиенит-порфир	10,0	575
Пироксено-эпидотовый скарн	14,4	250
Известняк мраморизованный	11,8	280
Руда убогая с висячего бока	7,8	400
Руда окисленная	9,9	210
Бедная магнетитовая руда	4,0	625

*Петрографическое описание см. в приложении 7

работы на Соколовском и Сарбайском железорудных карьерах, которыми установлено, что между скоростью бурения $v_{бур}$ и динамической твердостью $P_д$ существует корреляционная связь (приложение 6) вида

$$v_{бур} = 17{,}6 - 0{,}017 P_д \quad \text{при} \quad r = 0{,}69 \pm 0{,}14; \qquad 200 < P_д < 600.$$

Несмотря на то, что коэффициент корреляции сравнительно не высок, динамическая твердость может быть использована для решения практических задач.

8. АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Существующие понятия "свойства массива горных пород", "свойства пород массива", "свойства пород в массиве", "свойства пород, находящихся в условиях естественного залегания, в натурных условиях" и "свойства пород "ин сити" часто употребляют как равнозначные, что объясняется неопределенностью термина "массив". Поэтому в дальнейшем, чтобы избежать неопределенности, под свойствами мас-

сива горных пород будем иметь в виду свойства крупных по размеру объемов пород, а массив пород будем рассматривать как участок среды, ограниченный от соседних участков естественными плоскостями или испытывающий особые (отличные от соседних) напряжения, пренебрегать которыми для решения конкретной задачи недопустимо.

Из наиболее распространенных методов изучения состояния массива (метод разгрузки, метод с использованием буровых скважин, оптико-поляризационный, электрометрический, метод гидравлических датчиков, ультразвуковой, сейсмический, сейсмоэлектрический), акустические методы позволяют получать сведения не из отдельных точек, а по всему массиву или его части. Распространение данных, полученных в точке, на весь массив в силу анизотропии пород и неоднородности физико-механических свойств приводит к большим погрешностям. Ультразвуковой метод мало применим из-за малых баз прозвучивания и сложности проведения работ, связанной с акустическим контактом датчиков с породой. Поэтому рассмотрим наиболее перспективные методы акустических исследований — сейсмический (для ближней зоны) и сейсмоэлектрический (для дальней зоны).

8.1. СЕЙСМИЧЕСКИЙ МЕТОД

Суть сейсмического метода состоит в том, что через массив горных пород пропускается упругий импульс или серия калиброванных упругих колебаний. По скорости и затуханию упругих волн судят о напряженности массива.

В зависимости от принятой схемы прозвучивания и поставленной задачи исследований для возбуждения сигнала может быть использован механический удар по породе или взрыв заряда ВВ.

Для углей и пород угольных формаций оптимальная частота сигнала составляет порядка 1 кГц [32]. При этом, чем стабильнее (как по частоте, так и амплитуде) возбуждаемый сигнал, тем меньше будет ошибка в измерении времени распространения сигнала (при работе с цифровым прибором).

Формирование импульса происходит на контакте ударяющего элемента и породы [33]. От контактирующей поверхности и свойств пород зависят при прочих равных условиях форма и крутизна фронта, а также частота посылаемого в породу импульса. При непосредственном ударе каким-либо предметом по породе стабильности излучаемого сигнала достигнуть очень трудно, так как на ее поверхности всегда имеются выступы или шероховатости, а при вторичном ударе попасть в одно и то же место практически невозможно. Поэтому непосредственный удар по породе мало пригоден.

Наиболее целесообразным является удар по породе через промежуточный элемент (массу). Промежуточный элемент плотно прижимается к породе и после нескольких ударов контакт между ним и породой становится гладким и плотным, что обеспечивает стабильность сигнала как по частоте, так и по другим параметрам. На процесс

формирования импульса при соударении реальных тел влияет множество факторов [34], в результате чего реальный импульс значительно отличается от теоретического, построенного по Сен-Венану с учетом основных допущений об идеально плоских торцах (обусловливающих мгновенное нарастание напряжения), перпендикулярности смещения торцов при любом соотношении диаметров и отсутствии диссипации.

В реальных условиях крутизна фронта нарастания волны напряжения снижается за счет появления так называемого "концевого эффекта" — времени, необходимого на герцовскую деформацию не абсолютно плоских торцов, что в ряде случаев может увеличить продолжительность импульса в два раза по сравнению с теоретическим периодом $2l/a_0$, где l — длина ударника, a_0 — скорость волны.

На форму импульса влияет фактор перераспределения энергии от более высокочастотных гармоник к низкочастотным, а разность скоростей распространения последних приводит к расплыванию импульса. Этому способствуют диссипативные потери при формировании и распространении импульса в самом материале, внешнее трение в местах контакта и т.д. В конечном итоге при распространении импульса в породе наблюдается уменьшение частоты и крутизны его фронта.

Чтобы определить длительность подаваемого в породу импульса, надо знать, в основном, скорость продольной волны, длину ударника и форму торцов соударяющихся элементов. Крутизна фронта импульса остается неизменной при постоянных параметрах удара и ударной системы в целом (длины и формы торцов элементов и т.д.). В трехэлементной системе (ударник, промежуточный элемент, порода) к породе проходит ударный импульс, сформировавшийся ранее в области удара ударника о промежуточный элемент. На контакте промежуточного элемента с породой, т.е. в области, где площади сечения и упругие свойства материалов меняются, ударный импульс отражаясь и преломляясь получит новые параметры.

Однако в том случае, когда длина ударника больше длины промежуточного элемента продолжительность сформировавшегося импульса можно считать по формуле Сен-Венана ($t = 2l_0/a_0$, где l_0 — длина меньшего стержня), учитывая при этом, что часть энергии волны при переходе ее из промежуточного элемента в породу будет потеряна, крутизна фронта волны изменится, а длительность импульса (частотная характеристика) изменится незначительно.

По расчетам для заданной частоты 1 кГц с учетом податливости торцов длина ударника должна быть в пределах 1,5—2,5 м, что трудно осуществимо в конструкции ударного устройства.

Для выяснения уровня изменения частоты импульса с расстоянием, а также влияния характера удара на частоту и стабильность импульса, выполнены специальные опыты в лабораторных условиях. Были изготовлены два вида ударных устройств: "молоток" со встроенным пьезоэлементом и "пистолет", в котором также встроен пьезоэлемент. Сигналы обоими видами устройств возбуждали ударами непосредственно по массиву и по наковальне, вбитой в массив.

Запись сигналов производили сейсмоприемником в скважине, расположенной на расстоянии 0,25—0,5 м от места удара.

Анализ сейсмограмм ударных импульсов показал, что наиболее стабильный импульс наблюдается при ударе через промежуточный элемент по наковальне, вбитой в массив. Для получения стабильного сигнала по частоте и амплитуде целесообразно удар производить с постоянной энергией.

Упругий импульс, возбужденный в породе, представляет собой модулированный по частоте сигнал. В процессе распространения его по породе высокие частоты затухают быстрее, чем низкие, в результате сигнал меняет свою частоту и амплитуду в сторону снижения. Степень уменьшения частоты и амплитуды зависит от свойств и состояния массива, а также от расстояния, которое прошел импульс (от точки возбуждения, до точки приема).

В процессе распространения импульса в породе формируется доминирующая частота, при которой амплитуда сигнала в несколько раз больше, чем при других частотах. Доминирующая (резонансная) частота для некоторых пластов шахт Донбасса составляет 500 — 1000 Гц [32]. По мере удаления от излучателя наблюдается некоторое понижение доминирующей частоты. Так, на расстоянии 1,8 м от излучателя максимум амплитуды приходится на область 500 Гц, а в точках базы 7,2 ÷ 15,3 м максимум амплитуды устойчиво сохраняется в диапазоне 300—400 Гц.

Таким образом, максимум амплитуды с увеличением расстояния сдвигается в сторону более низких частот, а численное значение частоты, соответствующее максимальной амплитуде сигнала, зависит от свойств пород и колеблется в пределах 500 ÷ 1000 Гц. Эту особенность необходимо учитывать при конструировании акустического прибора. В связи с затуханием сигнала как по амплитуде, так и по частоте при использовании цифровых регистрирующих устройств возникает ошибка в измерении времени (рис. 8.1). Представим, что уровень порогового срабатывания счетного устройства прибора равен ΔU.

Тогда при прохождении сигнала в виде периодического колебания через базу прозвучивания (от точки возбуждения до точки приема) частота и амплитуда уменьшатся. Погрешность в измерении времени прохождения сигнала между датчиками увеличивается за счет разного времени срабатывания пороговых устройств.

При сигнале в точке возбуждения погрешность измерения времени составит Δt_1,

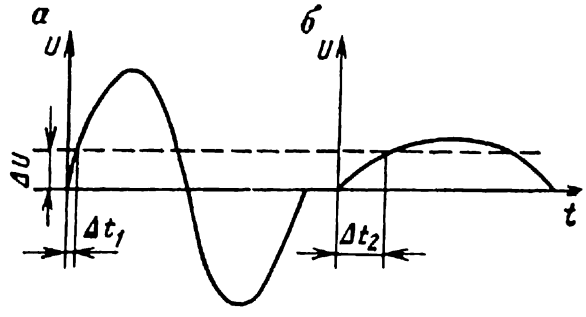


Рис. 8.1. Диаграмма, показывающая причины возникновения погрешностей при замере времени распространения импульса цифровым устройством:

а — форма сигнала в точке возбуждения; *б* — то же, в точке приема

а в точке приема Δt_2. Поскольку $\Delta t_2 > \Delta t_1$, погрешность в измерении времени прохождения сигнала $\Delta t = \Delta t_2 - \Delta t_1$. На маленьких базах Δt может быть соизмеримой с временем прохождения сигнала по базе в целом, что недопустимо. Для исключения этой погрешности необходимо уравнять углы наклона сигнала, идущих от запускающего и стопорящего сейсмоприемников.

Акустический прибор для определения напряженного состояния горных пород должен быть простым по конструкции, надежным в работе, в производственных условиях быстро регистрировать акустические характеристики пород, искробезопасным, способным прозвучивать базы от десятков сантиметров до десятков метров без существенных погрешностей. Таким прибором могло быть устройство, построенное на принципе счета стандартных импульсов, вырабатываемых генератором. В настоящее время такие устройства серийно не изготовляются.

Известны конструкции цифровых измерительных устройств, которые позволяют определять скорость распространения упругих волн посредством измерения отрезка времени с начала возбуждения (или с любой другой точки на профиле прозвучивания) до момента прихода первого вступления волны на датчик остановки счета. Однако они имеют следующие недостатки:

невозможность определить затухания волн;

невозможность использования в шахтах, опасных по газу и пыли;

большие погрешности в измерении времени распространения волн.

Для устранения этих недостатков ИГД им. А.А. Скочинского в аналогичное устройство были введены канал для замера затухания амплитуды, формирователь и усилитель с неравномерной частотной характеристикой. Устройство выполнено в искробезопасном исполнении.

Отличительной особенностью созданного прибора является возможность усиления сигнала меньшей частоты в большее число раз, чем сигнала высокой частоты.

Исключение ошибки измерения достигается тем, что зная амплитуды принятых датчиками сигналов определяется затухание сигнала, пропорционально которому устанавливается уровень усиления сигнала от датчика, останавливающего счет, и тем самым выравниваются амплитуды сигналов, поступающих от датчиков.

В последней конструкции прибора ошибка измерений устраняется автоматически с помощью специального блока, который определяет ошибку и автоматически вычитает ее из полученного результата.

Ударное устройство для возбуждения импульса в массиве (рис. 8.2) выполнено в виде "ружья" и состоит из ударника *1*, промежуточного элемента *2*, пружины *3*, которые размещены в корпусе *4*. С помощью рукояти *5* производится взвод пружины и при нажатии на спусковой крючок *6* ударник под действием пружины будет перемещаться и ударит по промежуточному элементу, прижатому к массиву. Ударный импульс, сформировавшийся на контакте ударника и промежуточного элемента передается в породу.

Техническая характеристика ударного устройства

Диаметр ударника промежуточного элемента, мм	30
Радиус закругления торца ударника, мм	60
Частота возбуждаемых импульсов, кГц	до 1
Масса, кг	6

При акустических исследованиях необходимо знать с достаточной точностью базу прозвучивания в глубине массива. В виду того, что

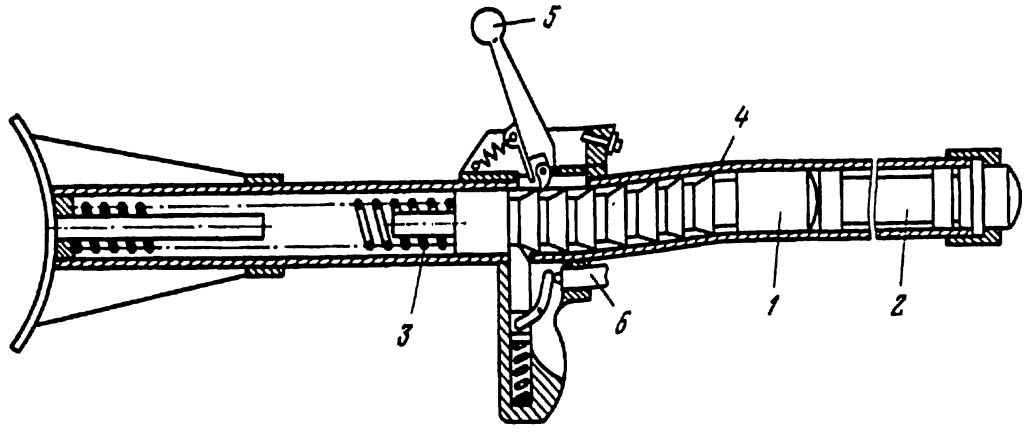


Рис. 8.2. Ударное устройство

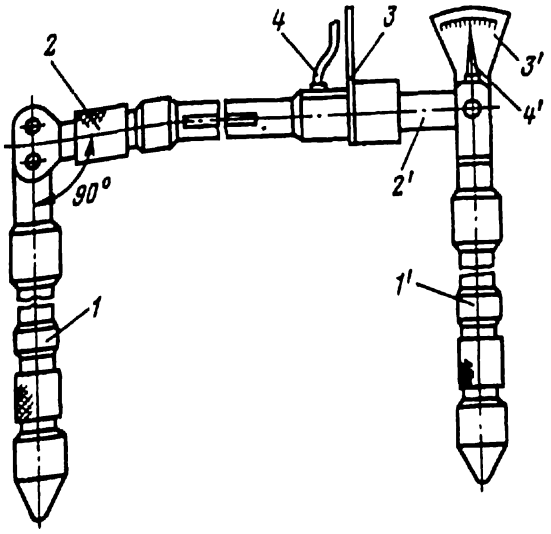
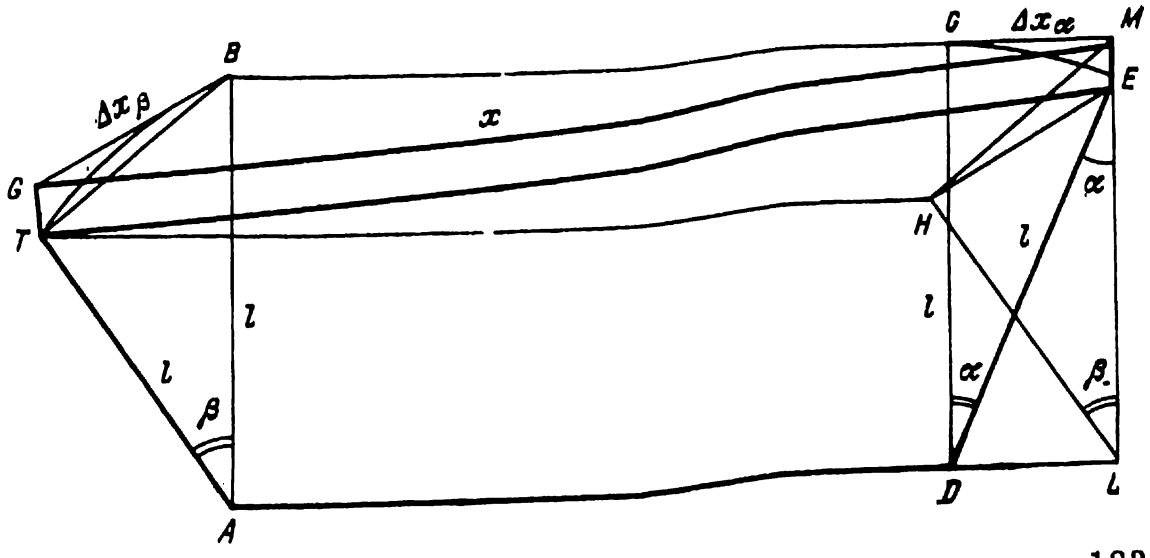


Рис. 8.3. Устройство для измерения базы прозвучивания

Рис. 8.4. Схема к определению расстояния между датчиками



точно пробурить взаимопараллельные шпуры невозможно, эту базу приходится определять в каждом конкретном случае. Для этого сконструировано скважинное измерительное устройство (рис. 8.3), позволяющее по измерению одного базисного расстояния и двух углов вычислять базу прозвучивания на любом удалении от контура выработки.

Устройство состоит из двух направляющих *1*, *1'*, вставляемых в шпуры, двух трубок *2*, *2'*, поворачивающихся по оси относительно друг друга, и двух лимбов *3*, *3'* с указателями *4*, *4'* для отсчета углов. Направляющая составляет с трубкой угол 90°.

Трубка *2* имеет шкалу с делениями для отсчета расстояния и лимб *3* для отсчета угла поворота относительно трубки *2*. Направляющая неподвижно соединена с трубкой *2*, последняя неподвижно соединена с указателем *4*. Лимб *3* неподвижно крепится на трубке *2'*.

В процессе измерений направляющие вставляются в шпуры и по шкале трубки *2* берется отсчет расстояния между устьями шпуров, а по шкалам лимбов *3*, *3'* отсчет углов расхождения во взаимноперпендикулярных плоскостях.

База прозвучивания с помощью измерителя находится по определенной схеме (рис. 8.4), где $AD = m$ — выдвижное плечо измерителя, $AT = DE = l$ — измерительные штанги (принятые равными по длине). Штанга AT способна поворачиваться вокруг оси, совпадающей с AD, штанга DE вращается вокруг оси, перпендикулярной AD. Углы поворота штанг AT и DE обозначены соответственно через α и β. Расстояние между датчиками

$$TE = \sqrt{m^2 + 2l\,[m \sin \alpha + l\,(1 - \cos \beta)]}.$$

Для оперативного нахождения TE построены номограммы (рис. 8.5, 8.6), по которым определяется не величина TE, а ее проекция, что приводит к погрешности при наибольшей разности абсолютных значений углов α и β, не превращающей 1,5—2,0 % от истинного расстояния между датчиками.

Для построения номограмм сначала были вычислены величины проекций приращения СМ при различных углах α — от 0 до 20°. В случае положительного угла α приращение, обозначенное через Δx_α, берется со знаком "плюс", при отрицательных углах α — со знаком "минус". Значения Δx_α при различных α и l можно найти по номограмме на рис. 8.5.

Затем были вычислены значения проекции TE, обозначенной через X.

По номограмме на рис. 8.5 для заданного угла α по величине l находится Δx_α, которая берется со знаком, соответствующим знаку угла α. Эта величина суммируется с величиной m выдвижной штанги измерителя. Затем по этой же номограмме находится величина Δx_β. Зная величины Δx_β и $m + \Delta x_\alpha$, по номограмме на рис. 8.6 находится значение X.

Для надежной регистрации прямой продольной волны определя-

Рис. 8.5. Номограмма для определения Δx_α и Δx_β

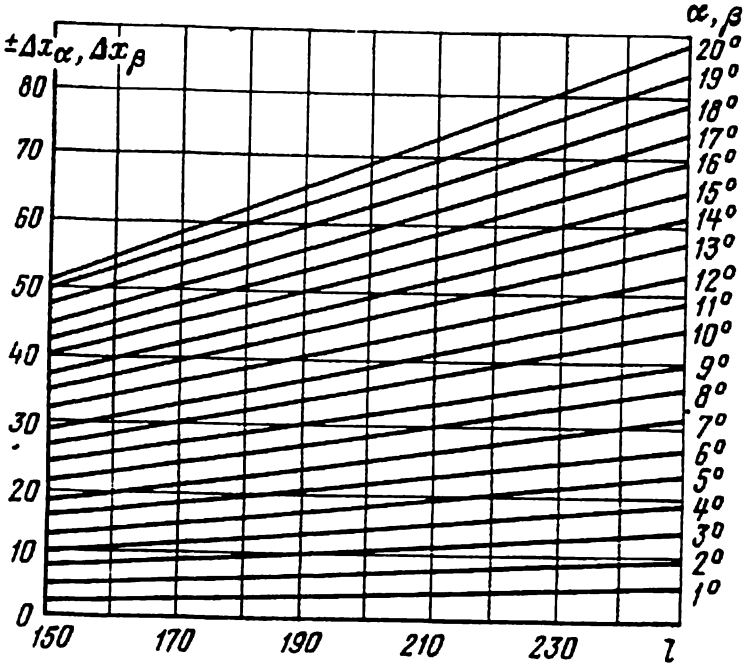
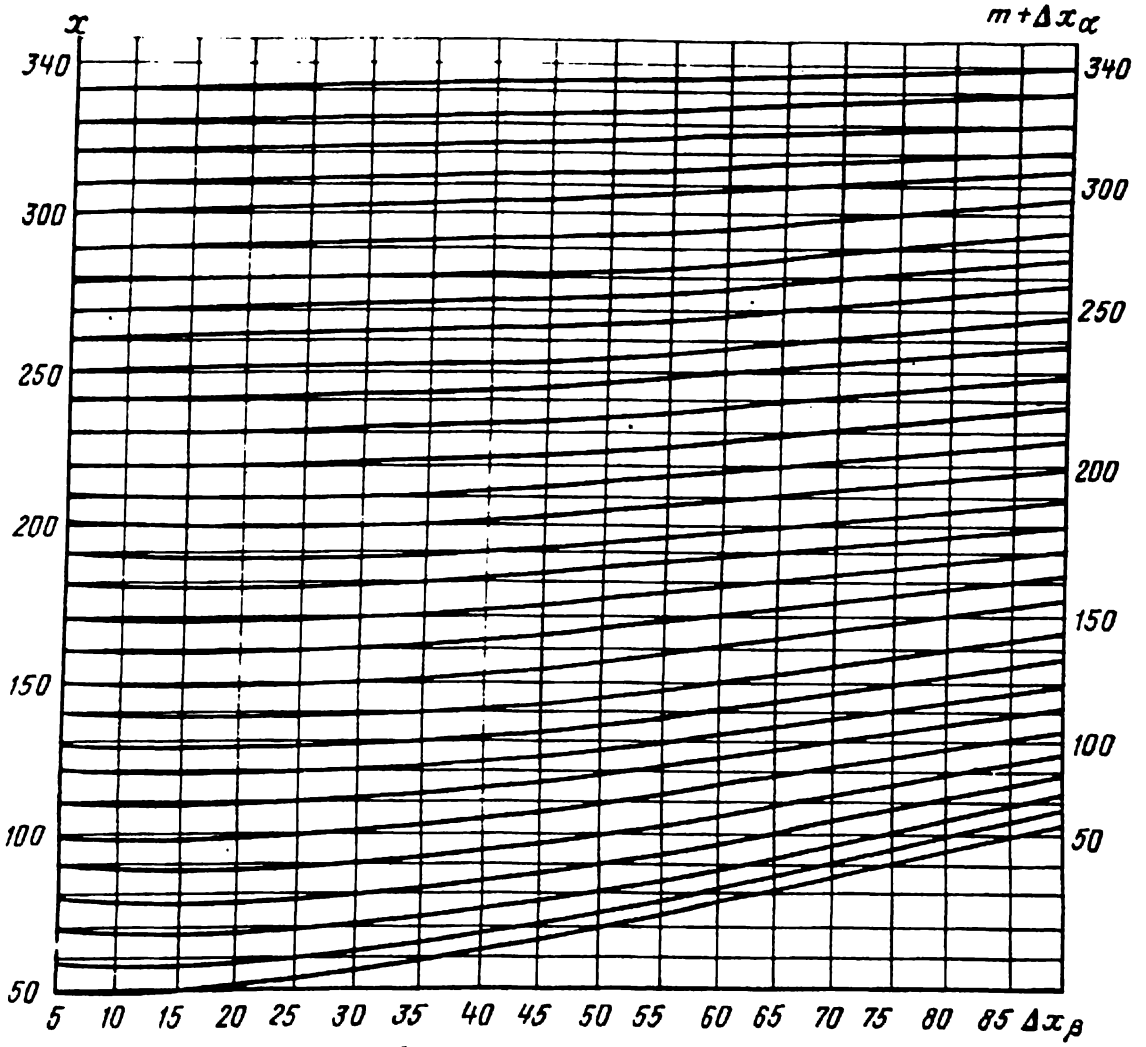


Рис. 8.6. Номограмма для определения базы прозвучивания



ется база прозвучивания l исходя из:

T_1 — времени распространения импульса от A до D по пласту;

C_1 — скорости продольной волны в пласте угля;

C_2 — скорости продольной волны в кровле или почве (наиболее скоростном слое);

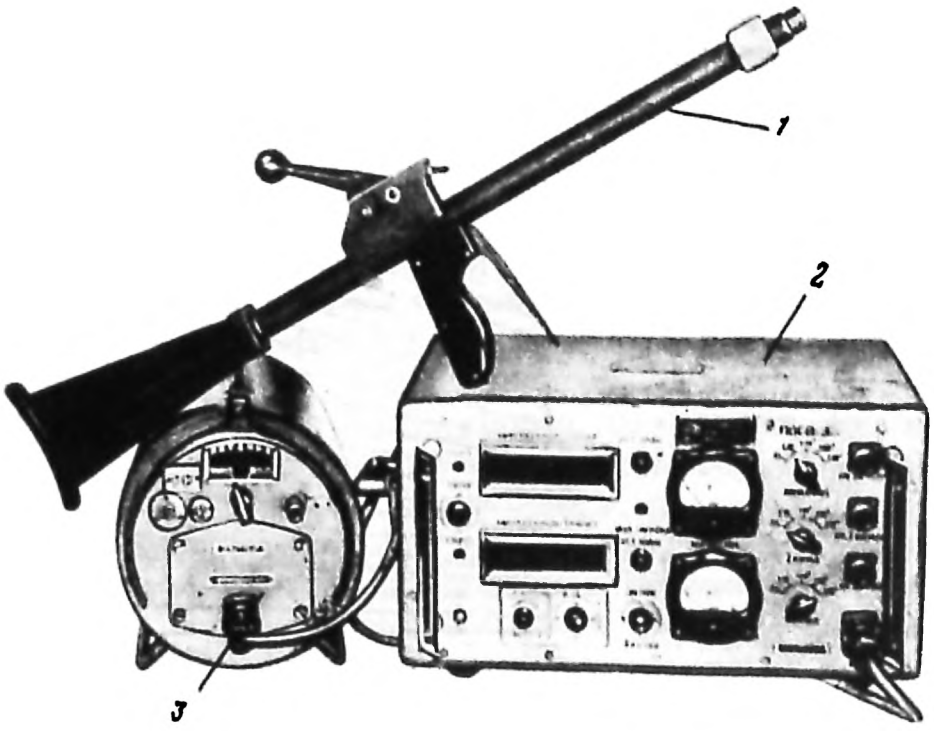


Рис. 8.7. Общий вид аппаратуры АИВ (ПОСВ-3):

1 — ударное устройство; *2* — измерительная станция; *3* — блок питания

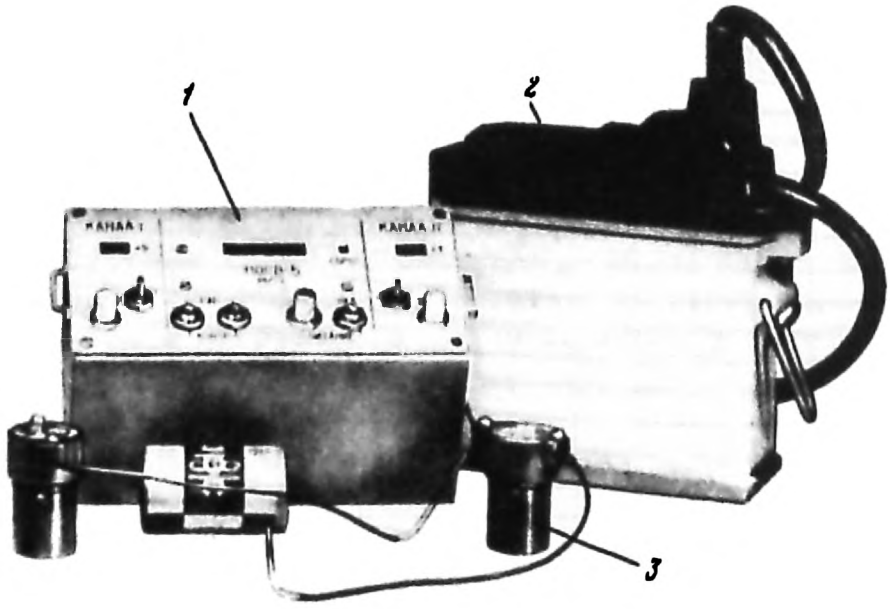


Рис. 8.8. Общий вид аппаратуры ПОСВ-5:

1 — измерительная станция; *2* — аккумулятор; *3* — сейсмоприемники

h — расстояния между шпуром и кровлей или почвой.

$$l < 2h \sqrt{\frac{C_2 + C_1}{C_2 - C_1}}.$$

Акустический прибор с электронным счетчиком времени для определения скорости и затухания упругих волн основан на принципе

счета импульсов при прохождении сигнала от запускающего сейсмоприемника к сейсмоприемнику, останавливающему счет импульсов.

В комплект аппаратуры входит ударное устройство, сейсмоприемники, мерительное устройство, электронный счетчик измерения времени прохождения и затухания волн.

Техническая характеристика аппаратуры (электронного счетчика времени АИВ)

	ПОСВ-3 (рис. 8.7)	ПОСВ-5 (рис. 8.8)
Число каналов регистрации	2	1
Точность отсчета, мкс	±2	±1
Интервал измерения времени, мкс	50 000	99 000
Частота пропускания, Гц	50—1500	50—1500
Отсчет результатов измерения	на цифровом табло	
Автономное питание, В	7,5	3,7
Исполнение	искро-взрывобезопасное	нормальное
Масса (без блока питания), кг	10	1,5

При разработке шахтной акустической аппаратуры одним из главных вопросов является создание скважинных (шпуровых) сейсмоприемников, которые должны обеспечивать надежный акустический контакт, иметь хорошую характеристику направленности и достаточную чувствительность.

Чувствительность пьезоэлемента, на основе которого выполнен сейсмоприемник, зависит от материала, из которого он сделан, контактных условий с изучаемой средой, условий деформирования и собственной емкости пьезоэлемента.

В качестве пьезоэлемента наиболее широко используется сегнетовая соль и цирконат-титанит свинца, обладающие наиболее высоким пьезомодулем.

Напряжение, снимаемое с обкладки пьезоэлемента пропорционально действующей на него силе (перемещению инерционного элемента ударника).

Известно, что чувствительность датчика может быть увеличена за счет снижения собственной емкости путем соединения отдельных элементов в пакеты.

Демпфирование уменьшает чувствительность сейсмоприемника, но оно необходимо, чтобы уменьшить величину собственных колебаний системы и увеличить рабочий диапазон частот. Большое влияние на чувствительность сейсмоприемника оказывают условия контакта датчика с породой. Для улучшения контакта используют различные смазки и прокладки в виде резины, но все это создает неудобства в работе и не всегда обеспечивает надежный контакт.

Лучший контакт получается при использовании специальных гидравлических или пневматических прижимных устройств. Усилие прижатия датчика к стенке скважин оказывает существенное влияние на амплитуду принимаемого сигнала.

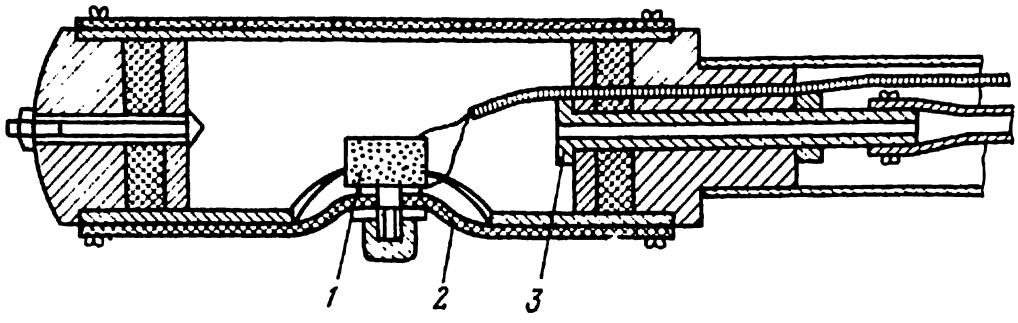


Рис. 8.9. Схема сейсмоприемника с пьезоэлементом поршневого типа:

1 — пьезоэлемент; *2* — резиновый баллон; *3* — штуцер с отверстием для подвода воздуха от насоса

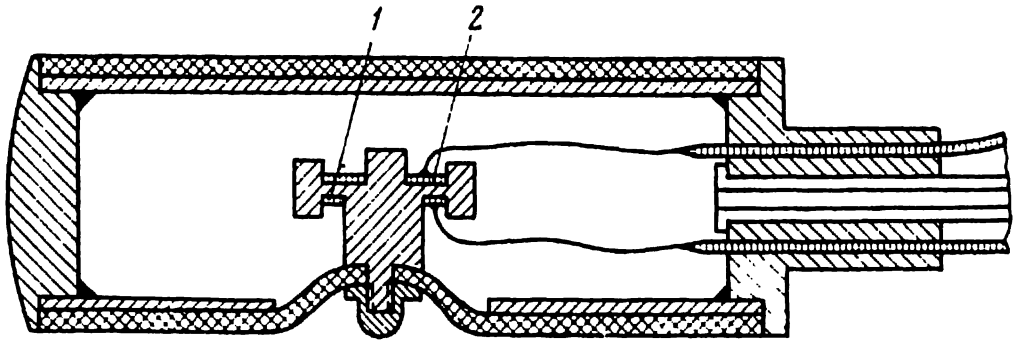


Рис. 8.10. Схема сейсмоприемника с биморфным элементом

Собственная частота колебаний влияет на режим работы сейсмоприемника и поэтому выбирается так, чтобы ее значение не входило в рабочий диапазон частот.

В ИГД им. А.А. Скочинского разработан сейсмоприемник с пневматическим прижатием к стенке скважины, который действует по принципу акселерометра, собственная частота которого выше частоты принимаемого сигнала (рис. 8.9).

Исключительно важным вопросом является направленность работы сейсмоприемника, т.е. способность регистрировать сигналы в выбранном направлении. Это необходимо для того, чтобы можно было лучше выделить из приходящего сигнала тот или иной тип волны.

Существующие типы сейсмоприемников, как правило, обладают слабой чувствительностью, так как в них используются пластины пьезоэлементов прямого среза, работающие в режиме сжатия или растяжения и позволяющие выделить первую приходящую (продольную) волну.

Известно несколько типов сейсмоприемников направленного действия. В сдвиговых приемниках поперечная волна вызывает поляризацию специальной вырезанной пьезопластины за счет сдвиговых усилий; в биморфных (две склеенные пластины пьезоэлементов), один из концов жестко закреплен, а к другому прикладываются внешние нагрузки от проходящего сигнала. Оба типа сейсмоприем-

ников используются только в лабораторных условиях, так как требуют обеспечения хороших и надежных контактных условий.

В сейсморазведке известны сейсмоприемники направленного действия, основанные на индукционно-инерционном эффекте. Они обладают большой инерцией и применимы в основном тогда, когда производится запись нескольких сейсмограмм на пленку.

В настоящее время в технике находят широкое применение инерционные пьезоэлектрические приемники, принцип действия которых основан на инерционном действии массы, изгибающей пластину с наклеенным на нее пьезоэлементом, в котором при этом возбуждается электрический заряд. Такие датчики нашли применение в машиностроении при изучении вибраций.

В ИГД им. А.А. Скочинского изотовлен биморфно инерционный сейсмоприемник (рис. 8.10), имеющий достаточно высокую чувствительность и обеспечивающий надежный пневматический контакт датчика со стенкой скважины. В его основу положен принцип изгиба мембраны *1* под действием инерционных масс, на которую наклеен биморфный элемент *2*.

Действие такого сейсмоприемника (рис. 8.11) состоит в том, что под влиянием приходящих колебаний центральный стержень *1* перемещается, инерционные массы *3* изгибают при этом пластину *2* с пьезоэлементом, на котором возникает электрическое напряжение.

Биморфно инерционный датчик, выполненный в виде консольной балки, оказался недостаточно прочным.

Для прозвучивания массива могут быть использованы три основные схемы.

Схема № 1 (рис. 8.12). Сейсмоприемник размещается в скважине на определенном расстоянии от устья скважины, а возбудитель сигнала находится на поверхности забоя. Расстояние сейсмоприемника от устья скважины увеличивается примерно через каждые 0,5 м и корректируется в зависимости от местных условий и состояния массива. Расстояние между точкой возбуждения сигнала и устьем скважины (вдоль линии забоя) выбирается соответственно мощности пласта M и составляет $(0{,}5 \div 1{,}5)M$. Для обеспечения стабильности импульса возбуждения сигнала производится удар через штангу в дно шпура глубиной 0,5 м. Возможен вариант, при котором сейсмоприемник устанавливается в скважине постоянно на некотором расстоянии от устья шпура, а точка возбуждения меняется. Расстояние от точки возбуждения до устья шпура изменяется от 0,5 м до максимального, при этом шаг изменения расстояния составляет 0,5 м. Запускающий датчик располагается в штанге, через которую возбуждается импульс.

Схема № 2 (рис. 8.13). Прозвучивание производится через две скважины, пробуренные в пласте угля. В одной из скважин размещается стопорящий сейсмоприемник, а во второй размещается источник возбуждения сигнала и запускающий датчик. В нашем случае это специальная штанга, в которой встроен пьезокерамический элемент. При прозвучивании массива одна из скважин пробуривается сразу

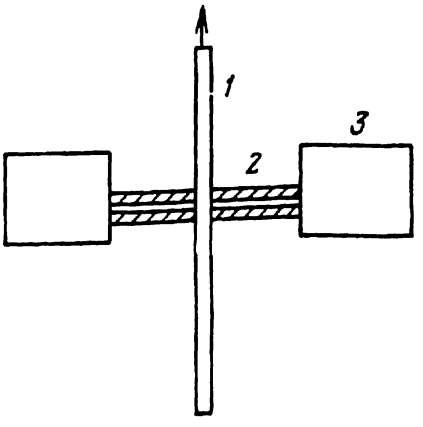
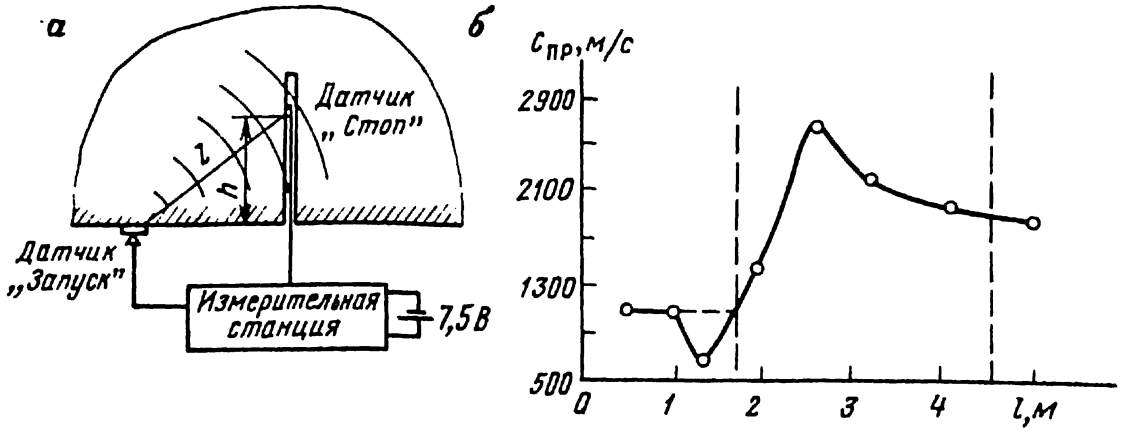


Рис. 8.11. Схема биморфно-инерционного датчика

Рис. 8.12. Схема (*а*) и результаты прозвучивания массива (*б*) через одну скважину:

$C_{пр}$ — скорость продольной волны; l — расстояние между точками возбуждения и приема



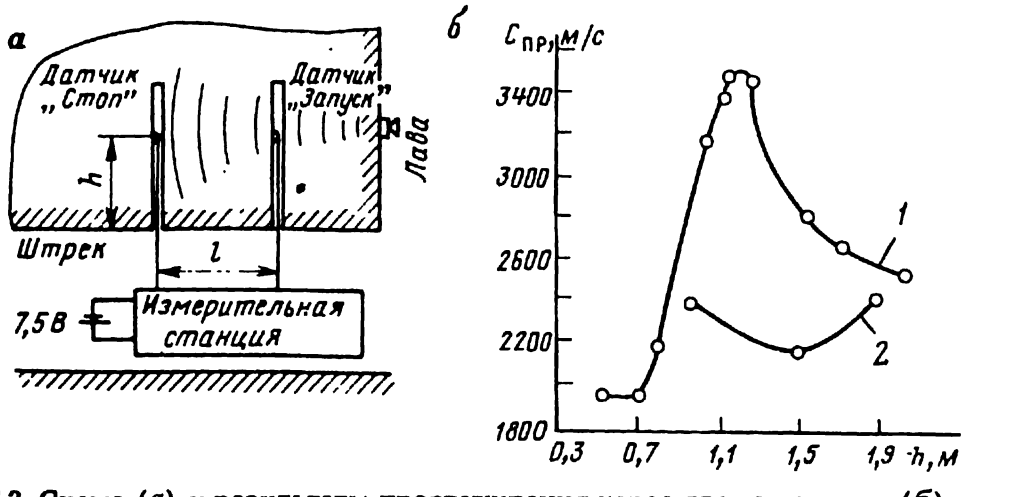


Рис. 8.13. Схема (*а*) и результаты прозвучивания через две скважины (*б*):

$C_{пр}$ — скорость продольной волны *1* — по вертикали; *2* — по горизонтали (по простиранию); l — расстояние между скважинами; h — глубина шпуров

на всю глубину, а вторая сначала на 0,5 м, а затем углубляется ступенями через каждые 0,5 м по мере перемещения стопорящего сейсмоприемника в первой скважине. Прозвучивание массива между скважинами производится ступенями через каждые 0,5 м.

Возможен вариант, в котором источник возбуждения находится не в скважине, а на открытой поверхности, расположенной в прилегающей горной выработке (в печи или просеке). При этом варианте прозвучивания запускающий датчик расположен в ближней от точки возбуждения скважине.

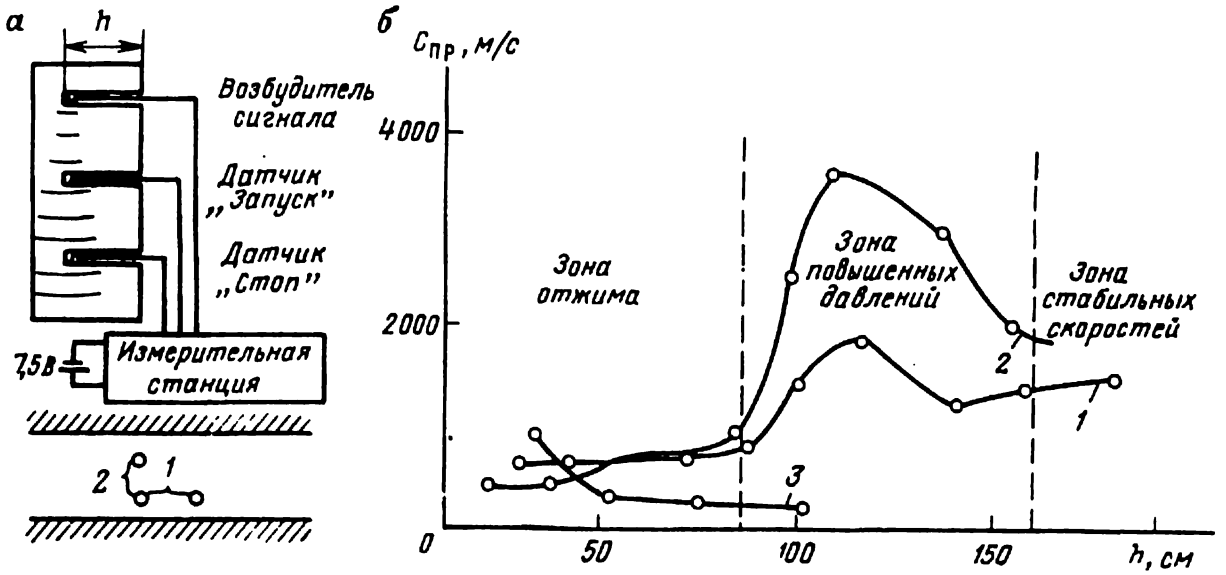


Рис. 8.14. Схема (*а*) и результаты прозвучивания (*б*) через три скважины:

$C_{пр}$ — скорость продольной волны *1* — по горизонтали (по падению); *2* — по вертикали; *3* — в глубину массива (по простиранию); *h* — глубина шпуров

Схема № 3 — прозвучивание с использованием трех скважин (рис. 8.14). Все три скважины расположены на одной линии. В одной из крайних скважин устанавливается возбудитель сигнала, во второй запускающий датчик, а в третьей датчик, предназначенный для остановки счета прибора. Расстояние между скважиной, в которой расположен источник возбуждаемого сигнала и скважиной с источником "Запуск" для угля должно составлять порядка 3 м. Расстояние между двумя скважинами (между запускающим и стопорящим датчиками) определяется в зависимости от поставленной задачи и местных условий.

По бесскважинной схеме сейсмоприемники устанавливаются вдоль профиля на поверхности массива. Крепление сейсмоприемников к массиву производится с помощью алебастра или с помощью штырей. Возбуждение сигнала производится ударом по наковальне, вбитой вблизи запускающего сейсмоприемника. Останавливающий сейсмоприемник передвигается вдоль профиля прозвучивания с шагом 1 м. Возможен вариант установки сейсмоприемников в подбурках глубиной до 0,5 м.

По данным сейсмопрофилирования строятся годографы первых вступлений сейсмических волн. Скорость сейсмических волн определяется способом разностного годографа, построенного по системе встречных годографов.

Изготовленное в ИГД им. А.А. Скочинского оборудование применяется для скважин диаметром 42 мм и глубиной до 7,5 м. Для скважин бóльшей глубины необходимо иметь соответствующую длину досылочных шлангов.

Методика исследований. В начале выбирается схема прозвучивания в зависимости от поставленной задачи и горно-геологических условий. Затем приступают к бурению скважин. Глубина, диаметр и расстояни между скважинами устанавливаются в соответствии с

данными, указанными выше. Далее измеряют расстояние между устьями скважин и определяют направленность скважин относительно друг к другу. После этого размещают датчики и путем нагнетания воздуха в подающие шланги прижимают их к стенкам скважины. Давление, создаваемое в шланге, составляет 0,15 МПа. Затем подключают аппаратуру и производят пробные замеры. Если при этом обнаруживается резкая разница между отдельными показаниями прибора, то производят подкачку воздуха в шланги и многократными ударами в одно и то же место улучшают контакт между передающей штангой и забоем. После стабилизации показаний прибора снимают рабочий отсчет. Для каждой базы делают не менее девяти замеров (12 замеров позволяют получить данные с достоверностью 99,7 %).

Анализ многочисленных экспериментальных данных по установлению зависимостей скоростей продольных волн от давления, действующего в направлении распространения этих волн показал, что эта зависимость — $C_{пр} = f(P)$ в общем виде выразится кривой, на которой имеется точка перегиба.

Разработан принцип построения тарировочной кривой $C_{пр} = f(P)$, позволяющий без использования специальных давильных устройств, зная скорость распространения волн при различных напряженных состояниях массива, определять примерно напряжение в любой его точке (в долях γH)*.

При построении тарировочной кривой необходимо знать скорость продольной волны в ненагруженном массиве $C_{пр.н}$, в точке перегиба $C_{пр.т.п}$ и в глубине массива (где действует только γH). Величины $C_{пр.н}$ и $C_{пр.г}$ находят в массиве путем непосредственных замеров. Скорость продольных волн в точке перегиба $C_{пр.т.п}$ определяют по уравнению

$$C_{пр.т.п} = 0{,}93\,C_{пр.н} + 0{,}863.$$

Тарировочную кривую строят следующим образом. По оси ординат откладывают скорость продольных волн (рис. 8.15): первоначально в ненапряженном массиве $C_{пр.н}$, а затем на этой же оси откладывают скорость продольной волны, которая соответствует точке перегиба. Из полученной точки, соответствующей $C_{пр.т.п}$ проводят пунктирную линию, параллельную оси абсцисс.

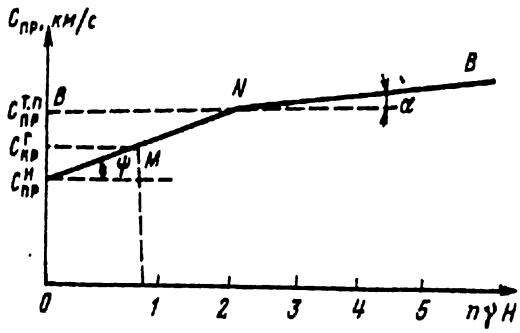


Рис. 8.15. Тарировочная кривая для определения напряженности массива по скорости продольных волн

Из точки, соответствующей $C_{пр.н}$, расположенной на оси ординат под углом к оси абсцисс $\psi = 180 - (\varphi - \alpha)$ проводят прямую линию до пересечения с горизон-

*Справедливо для районов, не приуроченных к зонам с повышенными тектоническими напряжениями.

Таблица 8.1. Углы φ и α для некоторых осадочных пород

Породы	α	φ
Песчаники	1°30′ — 3°	125° — 130°
Известняки	3°20′ — 4°10′	130° — 135°
Аргиллиты	5° — 7°	135° — 140°
Угли (антрациты)	8° — 10°	140° — 145°

тальной пунктирной линией, проведенной из точки, соответствующей $C_{\text{пр. т. п}}$. Из полученной точки пересечения этих прямых под углом α (табл. 8.1) к оси абсцисс проводят вторую прямую линию. Таким образом получается ломаная тарировочная линия.

После этого на оси ординат откладывают точку $C_{\text{пр. г}}$ и проводят горизонтальную пунктирную линию до пересечения с тарировочной линией. Из полученной точки пересечения опускают перпендикуляр на ось абсцисс.

Точка пересечения перпендикуляра с осью абсцисс будет соответствовать значению γH. Полученный масштаб в долях γH наносится на всю ось абсцисс.

Методика и аппаратура для оценки напряженности массива были проверены в натурных условиях. Результаты испытаний подтвердили возможность надежного определения аппаратурой АИВ скоростей распространения продольных волн по предложенным схемам прозвучивания. Сравнение полученных результатов по оценке напряженности массива сейсмоакустическим методом и методом разгрузки показывает достаточно хорошую их сходимость.

8.2. СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД

Этот метод предназначен для оценки напряженности массива в дальней зоне (более 10 м от линии забоя) и используется применительно к прогнозированию нарушений угольных пластов.

По Э.И. Пархоменко сейсмоэлектрические явления связаны, в основном, с пьезоэффектом горных пород, эффектами первого и второго рода, причем на породах угольной формации регистрируются в натурных условиях электризации, связанные с сейсмоэлектрическим эффектом второго рода (эффект E). Возникновение эффекта E объясняется электрокинетическими явлениями во влагосодержащих породах на границе жидкость — горная порода, особенности которого достаточно хорошо исследованы Э.И. Пархоменко и И.М. Нейштадтом. Сейсмоэлектрические вступления опережают сейсмический сигнал на 3—20 мс, в зависимости от свойств горных пород исследуемого участка.

При прохождении упругой волны через участок массива, в нем возникает эффект E, на фронте упругой волны возникает сейсмоэлектрический потенциал, закон изменения которого совпадает с исходным сейсмическим импульсом. Возникшее электромагнитное

поле, распространяясь со скоростью, в $10^4 \div 10^5$ раз, превышающей скорость звука и должно практически мгновенно регистрироваться измерительной системой при базе измерений, не превышающей 300 — 400 м (имеются в виду реально существующие регистрирующие системы для записи и воспроизведения сейсмических процессов с разрешающей способностью не выше 0,25 мс). Однако, измерительная аппаратура имеет определенный нижний порог чувствительности a, сигнал $U_{min} < a$, ослабленный средой, не будет выделяться на фоне собственных шумов и случайных помех. Поэтому на некотором расстоянии r (таком, что $r(z) \leqslant a$, где $r(z)$ — текущая амплитуда сигнала эффекта E) мы не будем фиксировать полезного сигнала. Здесь можно говорить о существовании "зоны прослеживания", внутри которой в каждой точке полезный сигнал регистрируется, а вне ее отсутствует.

Пусть в начальный момент упругий импульс находится в точке O, в которой произошла поляризация горной породы (эффект E). В этот же момент сейсмоэлектрический импульс регистрируется на всем участке базы прослеживания. Распространяясь далее импульс упругой волны достигнет точки "O", расстояние которой до точки наблюдений равно базе прослеживания l. В этот момент эффект E будет зарегистрирован в точке P, расположенной дальше по профилю, а через время $\Delta t = l/c$ (l — расстояние прослеживания, c — скорость упругой волны) в точку P придет сейсмическая волна. Размер зоны прослеживания зависит при прочих равных условиях от проводимости горных пород, которая в свою очередь связана с напряженным состоянием массива. Поэтому параметр Δt несет в себе информацию о напряжениях, действующих в массиве.

Таким образом, по отставанию сейсмического сигнала от сейсмоэлектрического можно судить о напряженности массива.

Поскольку напряжения приурочены, как правило, к нарушениям угольного пласта, то по ним, используя метод прямого прозвучивания с разных точек можно определить место расположения этого нарушения. Это положение было проверено.

Так, на шахте "Дружба" производственного объединения Донбассантрацит вблизи известного тектонического нарушения, где провели сейсмоэлектрическое профилирование вдоль подготовительной выработки. В результате получен ряд значений опережения Δt сейсмоэлектрического сигнала по отношению к сейсмическому (табл. 8.2). Данные табл. 8.2 получены усреднением пяти измерений с коэффициентом вариации, не превышающем 3 %.

На расстоянии 15—20 м от нарушения Δt минимально, а следовательно напряжения максимальны, на расстояниях свыше 30 м влияние нарушения выражено слабо. Повышенные значения Δt вблизи нарушения (до 5 м) связаны, вероятно, с зоной дробления у плоскости сместителя.

Акустические исследования напряженного состояния массива. На шахте им. Артема производственного объединения Ростовуголь в лаве № 310 (мощность пласта 0,8—0,9 м, марка угля — антрацит) экспериментальные работы проводили прибором ПОСВ-3 по схемам

Таблица 8.2. Опережения Δt вблизи тектонического нарушения

Расстояние до нарушения, м	35	30	25	20	15	10	5
Величина Δt, мс	10	9,75	8,5	6,75	5,75	8,5	11,25

№ 1, 2, 3 — через одну, две и три скважины. Цель проведения экспериментов — испытание датчиков с пневматическим прижимом при различных способах возбуждения акустического сигнала и схемы прозвучивания. При прозвучивании через две скважины глубина размещения приемного датчика и глубина источника возбуждения сигнала были одинаковые.

В качестве сейсмоприемников были приняты два типа: поршневой с частотой 200 кГц и биморфно инерционный.

По схеме № 2 в варианте *А* шпуры располагали в вертикальной плоскости на расстоянии 50 см. Источник возбуждения сигнала — удар по штанге, в которой размещен запускающий пьезодатчик. Приемник — поршневой датчик с пневматическим прижимом к стенке шпура. Расстояние датчиков от забоя составляло 0,5 ÷ 3,5 м, коэффициент вариации скоростей распространения продольных волн на одном пикете составлял 5—16 % и зависел, в основном, от стабильности возбуждения сигнала.

По схеме № 1 профиль прозвучивания располагали по падению пласта (вдоль лавы). Возбуждение сигнала производилось ударом кувалды по штырю, вбитому в массив забоя. Сейсмоприемник поршневого типа. База прозвучивания 0,6—2,1 м. Результаты прозвучивания показали увеличенный коэффициент вариации при определении скоростей распространения продольных волн, который составлял 17,5—20 %.

По схеме № 2 в варианте *Б* прозвучивание производили через два шпура, расположенные вдоль линии забоя лавы. Сейсмоприемник поршневой. База прозвучивания 0,5 м. Глубина заложения датчиков составляла 0,5—1,3 м. Коэффициент вариации 4,9 ÷ 15,7 %.

По схеме № 2 в варианте *В* шпуры располагали вдоль линии забоя лавы. Сигналы возбуждали ударом по штанге, в которой был встроен пьезоэлемент. Приемный сейсмоприемник биморфно-инерционного типа. База прозвучивания 1 м. Глубина заложения сейсмоприемника 1 м. Коэффициент вариации составил 12,4 %.

Результаты экспериментальных работ показывают, что схема прозвучивания через одну скважину дает несколько больший коэффициент вариации. Это обусловлено тем, что возбуждение сигнала производилось ударом по забою, который был в какой-то степени нарушен и уголь был частично отжат. Тем не менее эта схема имеет преимущества, заключающиеся в том, что уменьшается объем буровых работ и упрощается процесс прозвучивания. Несколько повышенный коэффициент вариации при использовании схемы № 2 также обусловлен нестабильностью ударного импульса, который возбуждался ударом молотка по штанге.

На шахте "Южная" производственного объединения Ростовуголь экспериментальные работы проводили в лаве № 570 на горизонте 700 м (мощность пласта 1.1 м, уголь — антрацит). Испытания производились с использованием всех трех схем.

По схеме № 1 прозвучивание производили через одну скважину в двух вариантах (с неподвижной точкой возбуждения и перемещающимся приемным датчиком и с неподвижным датчиком, но перемещающейся точкой удара). Сигнал возбуждали с помощью молотка со встроенным в него пьезоэлементом для запуска прибора и при помощи ударного устройства, в промежуточный элемент которого также встроен пьезоэлемент. База прозвучивания 1,02 ÷ 5 м. При стабильном импульсе (возбуждении сигнала с помощью ударного устройства), коэффициент вариации полученных данных по скоростям распространения волн не превышал 7,7 %, тогда как при возбуждении колебаний ударом молотка он достигал 49 %.

Следует отметить, что при использовании в качестве приемника биморфно-инерционного датчика результаты замеров скоростей распространения волн получаются несколько ниже, чем при использовании датчика поршневого типа, так как биморфно-инерционный датчик обладает некоторой инерционностью, которая может быть учтена тарировкой. Тем не менее показания биморфно-инерционного датчика достаточно стабильные, коэффициент вариации на базе 156 см колебался в пределах 3,7 ÷ 7,7 %.

Поршневой сейсмоприемник работает стабильно, заложенный в конструкцию принцип пневматического распора в шпуре вполне оправдывает себя при давлении $1{,}5 \cdot 10^5$ Па.

На графике зависимости скорости продольных волн от базы (см. рис. 8.12) при прозвучивании по схеме № 1 через одну скважину можно выделить три зоны давлений. На базе прозвучивания 1,2 м наблюдается резкое снижение скорости продольных волн, что объясняется наличием локальной трещины на пути прозвучивания.

Схема № 1 может быть использована при определении расслоений и различных трещин, расположенных вкрест направлению прозвучивания, она менее трудоемка, чем схемы № 2 и 3. Однако, точно измерить величину зон по этой схеме трудно, так как сигнал от источника возбуждения по пути к сейсмоприемнику может пересекать сразу все три зоны, скорость волны получается усредненной и потому менее информативной.

При прозвучивании по схеме № 2 (см. рис. 8.13) скорость продольных волн по простиранию пласта (ось *III*) меняется незначительно (кривая *2*), тогда как в вертикальной плоскости скорость продольной волны с глубиной шпура изменяется интенсивно. Наблюдаются три зоны давления.

На графике зависимости скорости продольных волн от глубины шпура при прозвучивании по схеме № 3 (см. рис. 8.14) также выделятся три зоны: зона отжима (пониженных скоростей продольных волн), зона опорного давления (повышенных скоростей продольных волн) и зона установившегося давления (зона стабильных скоростей

продольных волн). Последняя зона выявлена не полностью, а показано только ее начало.

Прозвучивание массива производилось по трем осям: ось *I* — вертикальная, *II* — горизонтальная (по падению пласта), *III* — горизонтальная (по простиранию пласта). Различие скоростей волн по разным направлениям объясняется анизотропией пласта, а также различной степенью его напряженного состояния по осям. Скорость продольных волн по оси *III* (кривая *3*) не менялась, что можно объяснить наличием растягивающих напряжений в этом направлении. Аналогичные результаты были получены при испытании песчаника на установке высокого давления.

Аппаратура и схемы прозвучивания вполне обеспечивают получение надежных данных как по скорости прохождения волны, так и по степени напряженности массива по различным осям.

Экспериментальные данные, обработанные методами математической статистики показывают, что распределение отклонений отдельных измерений скоростей распространения продольных волн от средней величины имеет ясно выраженный максимум в центральной части и может быть в первом приближении отождествлено с нормальным распределением.

С целью подтверждения правомерности определения напряженного состояния угля в забое сейсмическим методом на шахте "Южная" был выбран опытный участок в разрезной печи лавы № 509. Пласт мощностью 1,4 м в середине имел прослоек глинистого сланца. На экспериментальном участке были построены четыре замерные станции, из которых станция № 1 использовалась для тарировки скорости продольных волн от давления, станция № 2 для тарировки и прозвучивания, а станции № 3 и 4 для прозвучивания.

В лаве были пробурены горизонтальные и вертикальные шпуры, из которых одни служили для возбуждения сигнала, вторые для запуска прибора и третьи для приема сигнала. Прозвучивание производили по схеме № 3: сначала не разгруженного массива, а затем выше шпуров выбирали нишу, которая освобождала нижележащий массив от давления, после чего массив прозвучивали вторично в этих же шпурах. Далее в нишу устанавливали гидродомкраты и производилось нагружение освобожденной части массива путем нагнетания масла в гидродомкраты. Массив нагружали ступенями и каждый раз прозвучивали. Когда массив начинал трещать, производили разгрузку такими же ступенями с замером акустических параметров.

В результате прозвучивания были получены акустические характеристики пород в естественном состоянии, после снятия нагрузки и тарировочные данные по изменению скорости продольных волн от давления. На графике, полученном по данным станции № 2 (рис. 8.16), видны три зоны по глубине прозвучивания. Скорости продольных волн по вертикали (*1*) оказались значительно выше, чем по горизонтали (*2*). Следовательно давление в вертикальной плоскости больше, чем по оси *2* (боковой распор). Результаты прозвучивания массива на станции № 4 (рис. 8.17) аналогичны проведенным выше.

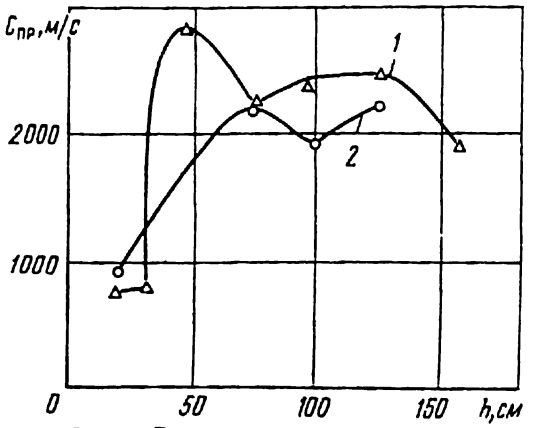


Рис. 8.16. Результаты прозвучивания массива на станции № 2:

1 — по вертикали; *2* — по горизонтали

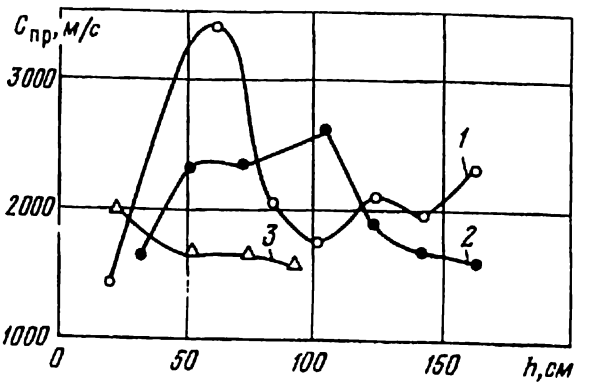


Рис. 8.17. Результаты прозвучивания массива на станции № 4:

1 — по вертикали; *2* — по горизонтали (по простиранию); *3* — по горизонтали в глубь массива

Сейсмический метод оказался вполне пригодным для определения напряженного состояния угольного пласта вблизи горных выработок, однако следует иметь в виду, что метод тарировки в забое с использованием гидроподушек громоздкий и вряд ли его можно рекомендовать к массовому применению на шахтах.

Эксперименты показали стабильность работы аппаратуры и приборов, а также надежность схем прозвучивания. Коэффициент вариации не превышал 13,5 % и в среднем составлял 4—5 %.

8.3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОЦЕНКИ НАРУШЕННОСТИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

В последние 10—15 лет ведутся интенсивные исследования с целью создания методов и средств сейсморазведки мелкоамплитудных нарушений из подземных выработок и скважин, созданы сейсмостанции (табл. 8.3).

Таблица 8.3. Сейсмостанции автономного питания, используемые для поисков

Параметры	Отечест			
	8ШАИ-4 (УФ ВНИМИ)	2ШАИ-3 (УФ ВНИМИ)	СБ-12 (ВНИМИ)	ШСА-2 (ВНИИГИС)
Число каналов	8	2	21	10
Регистрация	ЭЛТ	ЭЛТ	Стрелочная	Шлейфовый осциллограф
Частотный диапазон, Гц	60—2000	20—2000	50—5000	60—800
Динамический диапазон, Дб	40	40	32,4	40
Тип регулирования	АРУ, ПРУ		Линейный	
Исполнение (уровень защиты)	РПИ	РПИ	РОИ	РОИ
Масса, кг	102	41	11,6	65

Станции ШСА-2 и типа 8ШАИ-4 выпускаются неспециализированными заводами, имеют сравнительно плохие метрологические характеристики, несовершенные и мало производительные. Станция "Тектоника-2", аналоговая по своим характеристикам, отстает от лучших зарубежных цифровых образцов по динамическому диапазону, стабильности показаний и возможности автоматизации обработки шахтных геофизических данных.

Зарубежные станции имеют низкий частотный диапазон, как правило не соответствуют требованиям исполнения по искровзрывозащите.

В качестве сейсмоприемников используются в основном серийные геофоны (табл. 8.4).

ИГД им. А.А. Скочинского проведен ряд исследований с аппаратурой ПАМЗ-8 (рис. 8.18), разработанной ТО ЦНИГРИ, и сейсмоприемниками СВ-30.

Для определения положения тектонического нарушения внутри выемочного столба при столбовой системе разработки или впереди лавы при сплошной системе использованы методы внутрипластовых проходящих, отраженных и преломленных волн.

Проведение шахтной сейсморазведки возможно при условии наличия методики наблюдения, интерпретации полученных данных и аппаратуры, реализующей данную методику.

На основании теоретических и экспериментальных исследований получены предпосылки к применению высокочастотного сейсмического метода обнаружения нарушения угольного пласта, которые состоят в следующем.

Метод проходящих волн (МПВ) позволяет оконтурить зону статической аномалии по кинетическим и динамическим параметрам внутрипластовых волн. Можно определить тип нарушения. Достигнутая максимальная дальность — 2—2,5 км при мощности пласта 2 м.

Метод отраженных волн (МОВ) применяется для прослеживания

нарушений угольных пластов

венные			Зарубежные		
ОСУ-3 (КБ завода Казгеофизприбор)	12ШАИ-5 "Тектоника-2" (ИГД им. А.А. Скочинского УФ ВНИМИ п/о "Виброприбор")	ПАМЗ-8 (Тульский ЦНИГРИ)	ФРГ	ЧССР	ФРГ
1	12	6—12	24	12	24
ЭЛТ	Магнитная лента		Шлейфовый осциллограф		Магнитная лента
20—1000	70—2500	40—2500	100—500	50—700	20—500
80	40	30	—	40	132
Ступенчатый РН	АРУ, ПРУ РВ-1В, РОИ	— РН	АРУ, ПРУ РОИ, РН	АРУ РОИ, РН	МАРУ, ПРУ РВ-1с
28	150	13,4	70	—	700

Таблица 8.4. Техническая характеристика геофонов

Параметры	Отечественные		Зарубежные	
	ГСД-30	Конструкции УФ ВНИМИ (на базе СВ-30)	ДФ-7 (Польша)	СМ-7 (ФРГ)
Собственная частота, Гц	30	30	10	50
Коэффициент преобразования	90	150	300	193
Коэффициент нелинейных искажений, %	—	—	0,2	0,2
Габариты, мм:				
минимальный диаметр	55	40	40	45
длина	230	200	250	200
Тип прижимного устройства	Механический с переменным усилием	Механический винтовой с переменным усилием	Механический с постоянным усилием	Пневматический с переменным прижатием

тектонического нарушения с амплитудой 20 % от мощности пласта на расстоянии порядка 200 м.

Минимальная мощность пласта на исследуемом участке составляет 0,6 м как для МОВ, так и для МПВ.

Угол падения пласта не оказывает влияния на процесс распространения интерференционных волн, если он остается постоянным на исследуемом участке.

Применение группирования сейсмоприемников позволяет использовать шахтную высокочастотную сейсморазведку в условиях высокого уровня технологических шумов и получать диаграмму направленности группы по смещениям, что позволяет устранить основной недостаток метода веерного просвечивания.

Параметры источника возбуждения сигнала оказывают существенное влияние на качество сейсмического материала, и позволяют улучшить обработку и интерпретацию сейсмограмм.

На выбор схемы наблюдений в шахтной сейсморазведке оказывает влияние ряд обстоятельств, основными из которых являются: аппаратурный фактор, связанный с наличием в аппаратуре автоматической и программной регулировки усиления (АРУ и ПРУ), что обусловливает возможность использования МОВ в шахтной сейсморазведке; наличие выработок, оконтуривающих исследуемый участок; достаточная изученность волновой картины, присущей данному участку наблюдений.

Для обнаружения и оконтуривания сейсмической аномалии по кинематическим и динамическим параметрам используется метод проходящих волн (рис. 8.19), при котором пункты возбуждения (*1*) и профили наблюдения (*1—2*) меняются местами. Расстояние между

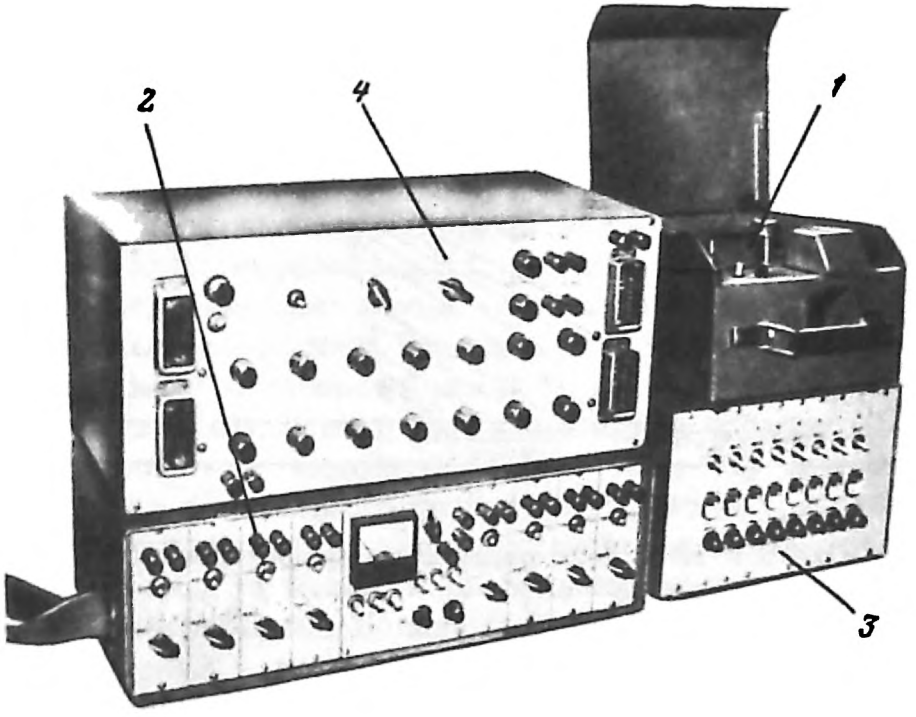


Рис. 8.18. Общий вид аппаратуры ПАМЗ-8:

1 — магнитограф; *2* — усилитель записи; *3* — усилитель воспроизведения; *4* — фильтры

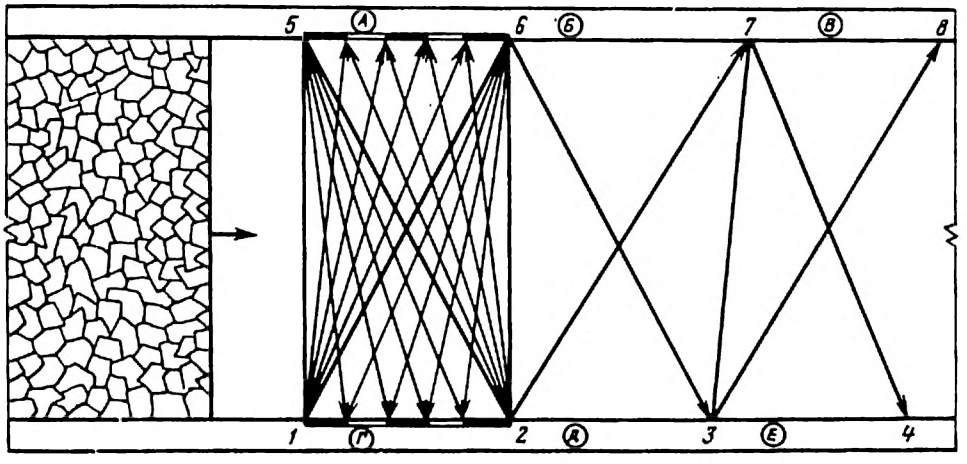


Рис. 8.19. Схема к методу проходящих волн (МПВ)

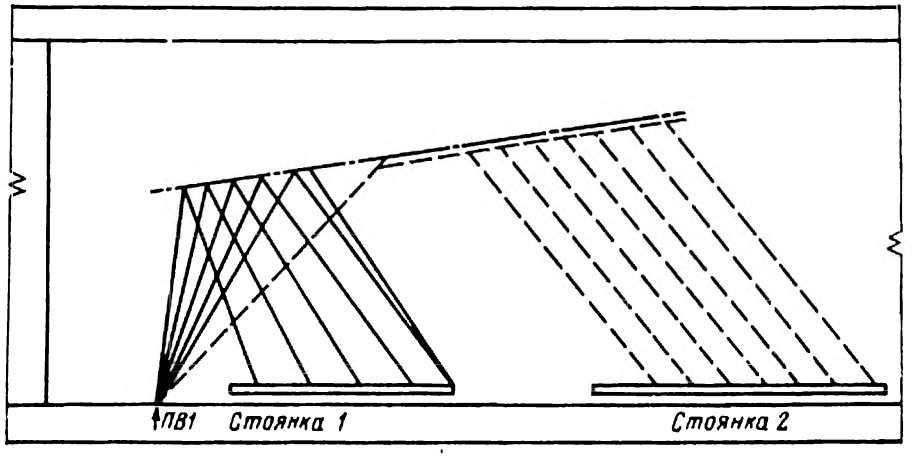


Рис. 8.20. Метод преломленных и отраженных волн

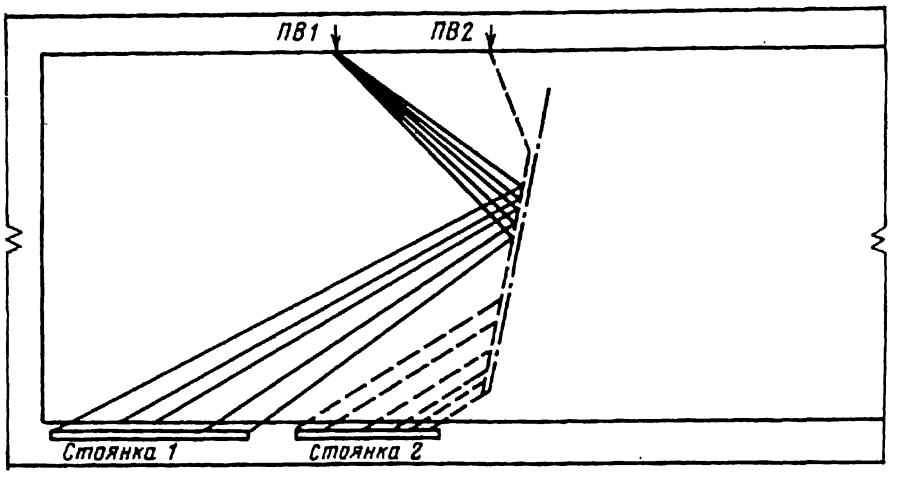


Рис. 8.21. Схема к методу непродольного профилирования с использованием метода преломленных волн

источником возбуждения и профилем наблюдения при этом методе ограничен размерами исследуемого участка и интенсивностью источника возбуждения.

Методы преломленных (МПВ) и отраженных (МОВ) волн (рис. 8.20) позволяют проследить преломляющие и отражающие границы оконтуренной зоны нарушения. При расположении нарушения под углом 60—120° к выработке может быть использована методика непродольного профилирования с использованием преломленных волн (рис. 8.21). Непрерывная корреляция преломленных волн осложняется тем, что глубина до преломляющей границы вдоль линии профиля существенно меняется, в результате чего изменяется положение и протяженность участков прослеживания на разных участках профиля. Отсутствие резкой преломляющей границы в принятой модели нарушения приводит к недостаточно уверенному корреляционному прослеживанию фаз преломленных волн, поэтому в МПВ широко используются системы нагоняющих годографов, которые позволяют осуществлять взаимную проверку годографов на перекрываемых участках. Таким образом полная корреляционная система прослеживания преломленных волн должна дополняться нагоняющими годографами.

Системы наблюдений при непродольном профилировании по методу преломленных волн аналогичны системам непродольного профилирования по методу проходящих волн, причем следует стремиться к регистрации преломленных волн на более ранних временах по сравнению с проходящими.

Расстояние между сейсмоприемниками на профиле выбирается исходя из соотношения

$$\Delta x = a_к T/2,$$

где $a_к$ — кажущаяся скорость, м/с; T — видимый период записи соответствующей полезной волны, с.

Практически для объектов, на которых производились измерения величины Δx для непродольных наблюдений изменялось от 10 до 30 м, а для продольных наблюдений до 5 м.

Существенное влияние на качество получаемых сейсмограмм оказывают условия установки сейсмоприемников. Краевая часть угольного пласта, примыкающая к горной выработке, характеризуется наличием двух явно выраженных зон в скоростном отношении, т.е. имеется зона ослабленных пород, где скорость волны понижена и зона повышенных скоростей. Размеры этих зон зависят от многих причин, в том числе от физико-механических свойств пород, глубины залегания пласта, жесткости крепи и т.д. Ширина этих зон может быть определена различными методами, в том числе акустическим методом преломленно рефрагированных волн, позволяющим определять расстояние до максимума зоны опорного давления. Наиболее распространенная глубина, за которой располагаются сейсмоприемники в горной выработке равна или больше 0,4—0,5 мощности пласта.

Для исключения влияния условий установки сейсмоприемника на характер сейсмограммы собственная частота системы сейсмоприемник—порода должна лежать за пределами частотного диапазона регистрации. По данным практики это достигается установкой сейсмоприемника на выровненную площадку угольного пласта с помощью быстротвердеющего цемента. Сейсмоприемник может располагаться на пике, вбитой в дно шпура. В этом случае в диапазоне 150 — 500 Гц получается равномерная частотная характеристика.

Для уменьшения влияния этой зоны на характер сейсмограмм применяется группирование сейсмоприемников.

Несмотря на то, что группирование связано с применением большего числа сейсмоприемников в шахтной сейсморазведке и существенно усложняет организацию работ по установке сейсмоприемников на профиле, без его использования практически невозможно получение качественных сейсмограмм при высоком уровне помех, вызванном работой механизмов.

Группирование сейсмоприемников позволяет в значительной мере устранить недостаток метода веерного просвечивания, связанный с изменением соотношения между разными составляющими волнового интерференционного процесса при переходе от одной точки наблюдения к другой.

Механические источники возбуждения волн как правило обеспечивают получение качественных сейсмических записей в методике внутрипластового просвечивания МПВ до расстояний не более 100 м и не более 70 м в МОВ при низком уровне микросейсм, т.е. в отсутствие технологических шумов.

Поэтому при высоком уровне технологических шумов в шахтной сейсморазведке преимущественно используются взрывные источники возбуждения волн, при этом масса заряда как правило не превышает 100 г, так как больший заряд приводит к более низкочастотной записи, что может привести к появлению ложной аномалии при обработке сейсмограмм.

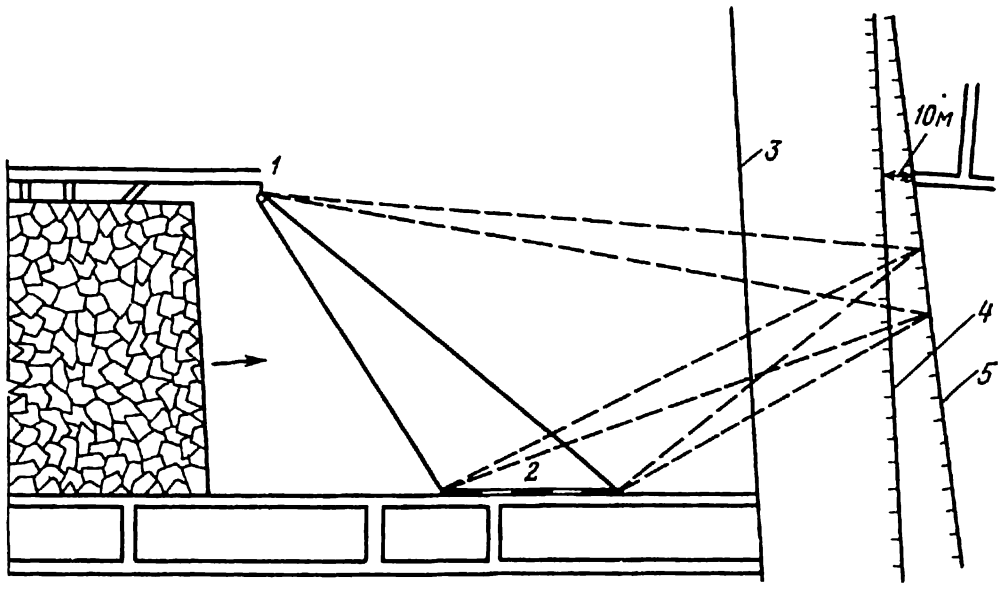


Рис. 8.22. Схема участка измерений на шахте им. Вахрушева п/о Донбассантрацит:

1 — место возбуждения сигнала; *2* — место приема сигнала (стоянка сейсмоприемников); *3* — положение нарушения по геологическому прогнозу; *4* — положение нарушения по сейсмическому прогнозу; *5* — истинное положение нарушения

Сейсмоакустические эксперименты*, выполненные на ряде шахт Донецкого бассейна, в частности на шахте им. Вахрушева (рис. 8.22), показали, что точность определения местоположения нарушений вполне удовлетворительная. Отклонение положения сброса по данным сейсморазведки от фактического составило не более 10 м при расстоянии прозвучивания около 200 м впереди лавы (точность 5 %).

9. ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ПО РАССЕЯНИЮ ГАММА-КВАНТОВ И УПРУГОМУ ПОСЛЕДЕЙСТВИЮ ПОРОД

Гамма-кванты представляют собой электромагнитные колебания большой частоты, возникающие при распаде радиоактивных изотопов. При прохождении через вещества они взаимодействуют с электронами и нуклонами атомов вещества, с электрическим полем ядер, в результате чего рассеиваются и поглощаются. Изменение интенсивности гамма-излучения после прохождения через поглощающий слой вещества подчиняется экспоненциальному закону

$$I_x = I_0 e^{-\mu x}, \qquad (9.1)$$

где I_0 — интенсивность гамма-излучения на границе поглощающего слоя; μ — массовый коэффициент ослабления; x — толщина поглощающего слоя.

---

* Экспериментальные работы проводили А.Д. Рубан и А.Б. Черняков.

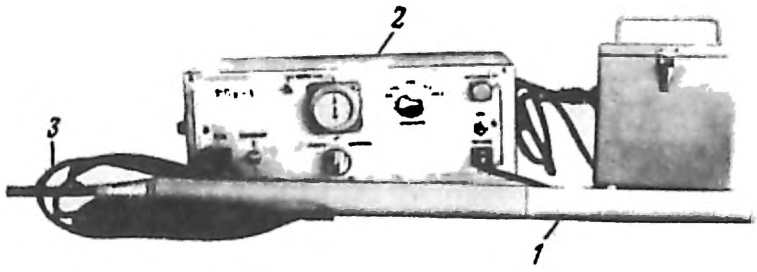


Рис. 9.1. Гамма-метрический прибор:

1 — зонд; *2* — регистрирующее устройство; *3* — кабель

Массовый коэффициент ослабления зависит от энергии излучения и плотности среды. Чем больше плотность среды, тем больше значение коэффициента ослабления. На этой основе созданы многие методы и приборы определения плотности среды, его пористости и водонасыщенности.

Изменение вещественного состава угольных пластов незначительно влияет на ослабление гамма-излучения, так как все элементы, встречающиеся в угольных пластах, по степени ослабления относятся к одной группе C, Si. А вот процессы, вызываемые горным давлением и связанные с раскрытием и закрытием трещин, должны оказывать более существенное влияние на изменение гамма-излучения. Для оценки абсолютных значений напряжений необходимо установить зависимость изменения плотности угольных пластов от действующих напряжений в массиве, а также осуществить тарировку аппаратуры в натурных условиях для конкретных условий проведения исследований.

Гамма-метрический прибор, рекомендуемый для определения и контроля напряженности угольных пластов (рис. 9.1), создан на основе прибора РПГ-36, разработанного научно-исследовательскими институтами ВНИИРТ и НИИ оснований Госстроя СССР. Он состоит из радиометрического зонда и регистратора.

Радиометрический зонд конструктивно выполнен в виде цилиндрической гильзы диаметром 36 мм, внутри которой размещены: свинцовый экран, детектор-сцинтиллятор (*NaI*), фотоэлектронный умножитель, схема согласования. Источник гамма-квантов расположен в съемной головке, которая крепится к цилиндрической гильзе. Соединение гамма-метрического прибора с регистрирующим устройством осуществляется с помощью коаксиального кабеля.

На панели регистратора размещены: электрический счетчик МЭС-54; вольтметр (0—15 В); переключатель диапазонов, тумблер рода работ (счет, контрольный генератор), кнопки сброса триггеров, разъемы для подключения зонда. Питание регистратора осуществляется от сухих элементов типа "Сатурн" (8 штук) напряжением 12 В. Потребляемый ток 100 мА.

Отличительной особенностью прибора является высокочувствительный детектор со сцинтилляционным счетчиком (*NaI*), позволяющим использовать источник гамма-квантов с малой активностью

до 0,1 мг·экв. радия и работать с прибором без специальной защиты.

Методические исследования, выполненные в лабораторных и шахтных условиях (шахты "Южная" и им. Артема, Восточный Донбасс) показали, что гамма-метрический метод с применением созданного прибора может быть рекомендован для использования в угольных шахтах. Для шахт, опасных по газу и пыли, прибор должен быть изготовлен в искровзрывобезопасном исполнении.

Главная сложность для получения численных значений напряженного состояния заключается в том, что пока еще не накоплено достаточно большого объема экспериментальных данных и на каждом шахтопласте необходима тарировка прибора. Это объясняется тем, что плотность углей различных пластов не одинакова, а соотношение напряженного состояния и плотности углей изменяется с изменением уровня действующих напряжений и состояния углей (допредельное и предельное). Одинаковое изменение напряженного состояния на различном расстоянии от забоя не вызовет одинакового изменения интенсивности рассеянного гамма-излучения.

Можно рекомендовать следующий порядок тарировки прибора.

1. С откаточного штрека впереди лавы за пределами влияния очистных работ по угольному пласту бурится три параллельных шпура на расстоянии 0,7—1,0 м друг от друга. Длина шпуров должна позволять достигнуть зоны напряжений, близких к γH.

2. В средний шпур вставляется гидравлический датчик и по известной методике производится наблюдение за изменением напряженного состояния по мере приближения лавы.

3. Два других шпура во избежание их разрушения горным давлением закрепляются обсадными трубами.

4. Во время снятия показаний по гидравлическим датчикам производится измерение интенсивности рассеянного гамма-излучения в обоих шпурах, — без коллимации и с коллимацией источника вверх N_0, вниз N_{180}, влево N_{270}, вправо N_{90}, а также в направлениях N_{45} и N_{225} (индекс указывает направление в градусах). Данные по двум шпурам усредняются. Наблюдения продолжаются до подхода лавы к шпурам.

5. Строятся эпюры горного давления по гидравлическому датчику и эпюры интенсивности рассеянного гамма-излучения в зависимости от расстояния до лавы и по ним определяются переходные коэффициенты от интенсивности гамма-излучения к напряженному состоянию.

Тарировку следует проводить в той же пачке угольного пласта, в которой будут выполняться измерения в лавах. Следует выбирать наиболее однородные угольные пачки. Расстояние от шпура до пород кровли, почвы или породного прослойка не должно быть менее 150 мм. Для получения более надежных тарировочных данных, тарировку прибора следует выполнить в 3—5 точках угольного пласта.

Для измерения напряженного состояния угольных пластов в лаве бурят шпуры диаметром 44 мм. Длина шпуров, их число в лаве и расстояние между ними определяются задачей исследований. Измерения можно выполнять как в обсаженных трубами шпурах, так и в не

обсаженных. Следует стремиться, чтобы зазоры между стенками шпуров и зондом были минимальными и в то же время не препятствовали продвижению зонда в шпуре. Толщина стенок обсадных труб должна быть одинаковой по всей их длине.

Гильза зонда прибора с помощью стержня-удлинителя вставляется в шпур до его забоя, а затем с шагом в 10—20 см измеряется скорость счета рассеянного гамма-излучения в течение одной минуты. Высокая стабильность показаний прибора позволяет выполнить в каждой точке по 1—2 замера скорости счета. При необходимости измерения выполняются как с коллиматором, так и без коллиматора. При работе с коллиматором измерения следует выполнять при шести положениях зонда, ориентирующим излучение вверх, вправо, вниз, влево и в направлениях N_{45}, N_{225}.

Гидравлический датчик, используемый для тарировки прибора, позволяет определять среднюю величину напряжений, действующих в плоскости, перпендикулярной к оси датчика (шпура). Для разделения их на составляющие предлагается следующая методика.

Определяется переходной коэффициент от скорости счета рассеянного гамма-излучения к напряжениям:

$$C = \sigma_д / N_C , \tag{9.2}$$

где $\sigma_д$ — напряжения в массиве, измеренные гидравлическим датчиком; $N_C = (N_0 + N_{90} + N_{180} + N_{270})/4$ — средняя скорость счета рассеянного гамма-излучения.

Строится график зависимости коэффициента C от расстояния до забоя лавы.

Определяется отношение напряжений

$$\sigma_0 / \sigma_{90} = (N_0 + N_{180})/(N_{90} + N_{270}), \tag{9.3}$$

а также

$$\sigma_0 = C(N_0 + N_{180})/2 \quad \text{и} \quad \sigma_{90} = C(N_{90} + N_{270})/2. \tag{9.4}$$

Определяется

$$\sigma_{45} = C(N_{45} + N_{225})/2. \tag{9.5}$$

Для получения эллипсоида напряжений такие измерения необходимо выполнить в трех взаимно перпендикулярных шпурах.

Метод измерения напряжений по деформациям упругого последействия основан на способности горных пород деформироваться некоторое время после снятия с них нагрузки. Деформации упругого последействия иначе называют обратной ползучестью.

Горные породы, будучи телами многофазными и полиминеральными, имеют компоненты, обладающие как упругими, так и вязкими свойствами. Среда, склонная к упругому последействию изображается так называемым телом Кельвина (рис. 9.2), представляющим собой параллельное соединение упругого тела Гука (пружина) и вязкого тела Ньютона (поршень в стакане с вязкой жидкостью). Многие

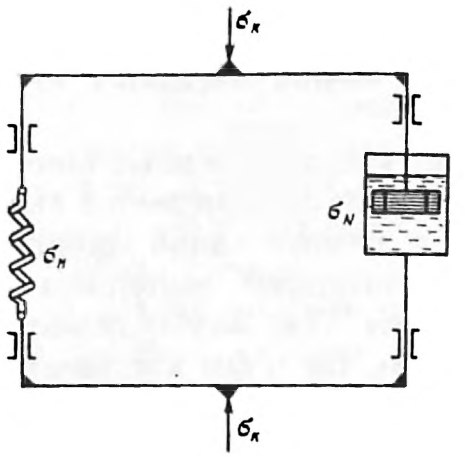
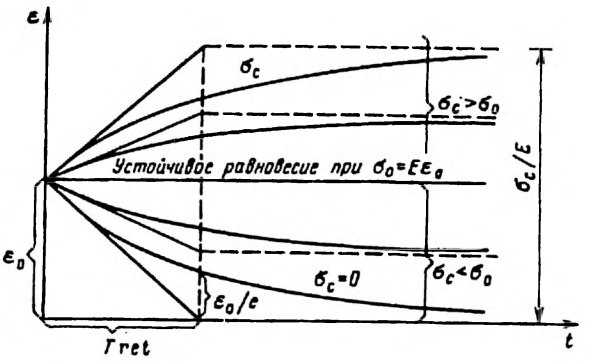


Рис. 9.2. Схема механической модели тела Кельвина

Рис. 9.3. Деформация ϵ во времени t при постоянном напряжении для тела Кельвина (по Рейнеру)



исследователи за основу своих реологических моделей берут тело Бюргерса, представляющего собой последовательное соединение тел Максвелла и Кельвина.

Символически тело Кельвина описывается реологической формулой $K = H/N$.

Если принять тело Кельвина (см. рис. 9.2), то

$$F_K = F_H + F_N \quad \text{или} \quad \sigma_K = \sigma_H + \sigma_N. \tag{9.6}$$

Или, следуя М. Рейнеру [36]

$$\sigma_K = 2G\epsilon + 2\eta\dot{\epsilon}, \tag{9.7}$$

где G — модуль сдвига; ϵ и $\dot{\epsilon}$ — относительная деформация и ее скорость; η — вязкость.

(9.7) представляет собой линейное дифференциальное уравнение относительно ϵ, решением которого является интеграл

$$\epsilon = e^{-\frac{G}{\eta}} \left(\epsilon_0 + \frac{1}{2\eta} \int \sigma_K e^{\frac{G}{\eta} t} \, dt\right), \tag{9.8}$$

где ϵ_0 — начальная деформация (рис. 9.3).

При $\sigma_K = \sigma_C = \text{const}$ уравнение (9.8) записывается в виде

$$\epsilon = \frac{\sigma_C}{2G} + \frac{\sigma_0 - \sigma_C}{2G} \exp^{\left(-\frac{t}{T_{ret}}\right)}, \tag{9.9}$$

где σ_0 — начальное напряжение;

$$T_{ret} = \eta/G.$$

Формула (9.9) дает семейство кривых (см. рис. 9.3). При полном снятии напряжений ($\sigma_C = 0$)

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{2G} \exp^{\left(-\frac{tG}{\eta}\right)}. \tag{9.10}$$

Деформация за какой-то промежуток времени $t_2 - t_1$ после освобождения тела Кельвина от нагрузки

$$\Delta\epsilon_{t_2-t_1} = \frac{\sigma_0}{2G}\exp\left(-\frac{t_2 G}{\eta}\right) - \frac{\sigma_0}{2G}\exp\left(-\frac{t_1 G}{\eta}\right). \tag{9.11}$$

Представления для одноосных напряжений и деформаций можно распространить на изотропные компоненты объемного напряженного состояния.

В этом случае среднее напряжение $p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ можно выразить как

$$p = K\epsilon_v + \zeta\dot{\epsilon}_v, \tag{9.12}$$

где K — объемный модуль деформации; $\epsilon_v = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$, $\dot{\epsilon}_v$ — относительная объемная деформация и ее скорость; ζ — объемная вязкость последействия.

По аналогии с предыдущими уравнениями

$$\Delta\epsilon_{v\,t_2-t_1} = \frac{p}{2K}\exp\left(-\frac{t_2 K}{\zeta}\right) - \frac{p}{2K}\exp\left(-\frac{t_1 K}{\zeta}\right) \tag{9.13}$$

Таким образом, для того чтобы определить величину напряжений в массиве, а также модуль сдвига и вязкость последействия горных пород (включая объемный модуль деформации и объемную вязкость), необходимо:

зафиксировать время t_1 после освобождения образца горной породы или части массива от напряжений до начала наблюдений за деформациями обратной ползучести;

построить кривые деформации упругого последействия $\Delta\epsilon_v = f(t)$ за промежуток времени $(t_2 - t_1)$, желательно до прекращения деформаций упругого последействия;

по формуле (9.13), используя экспериментальные данные и кривую объемных деформаций упругого последействия, определить p, K и ζ;

от общей деформации в искомом направлении $\Delta\epsilon_i$ вычесть деформацию объемного расширения $\frac{1}{3}\epsilon_v$ и, получив $\Delta\epsilon_0$ по формуле (9.10), определить девиатор напряжений σ_0;

к найденному значению σ_0 прибавить составляющую шарового тензора напряжений p. Это и будет искомая величина напряжений, действующих на породу в массиве до момента ее разгрузки в направлении измерений.

Теоретические разработки метода измерений напряженного состояния по деформациям упругого последействия позволяют создавать самую разнообразную аппаратуру, в частности создан прибор ПООП — прибор определения обратной ползучести (рис. 9.4).

Для того, чтобы определить направление главных напряжений в массиве по деформациям обратной ползучести по кернам скважин,

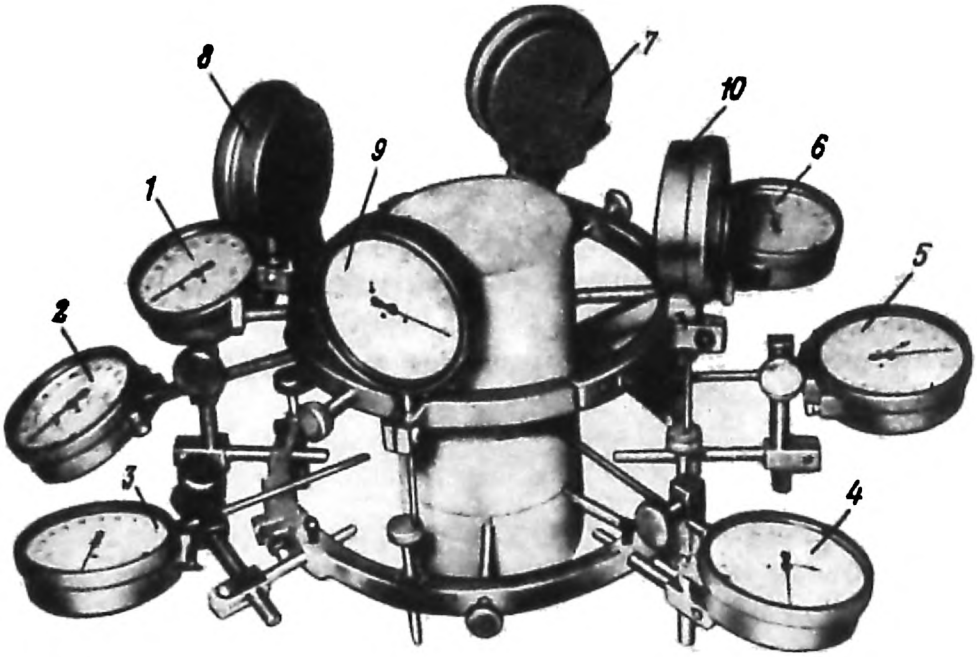


Рис. 9.4. Прибор ПООП для измерения деформаций упругого последействия в кернах горных пород

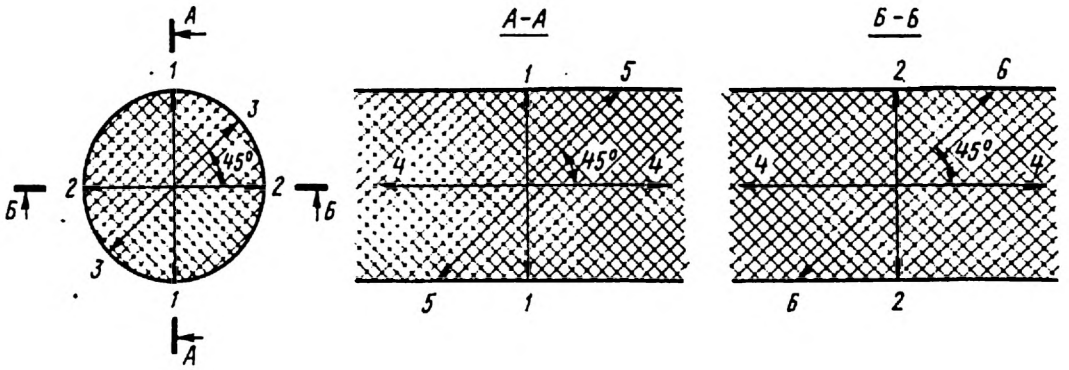


Рис. 9.5. Направления (*1—6*) измерения деформаций керна

необходимо не только знать ориентировку поднятого из скважины образца в пространстве, но также и деформации кернов не менее чем в шести направлениях (рис. 9.5).

Величины деформаций по направлениям будут определяться показаниями индикаторов (см. рис. 9.4):

в направлении 1—1 индикаторами 1 и 4;
" 2—2 " 3 и 6;
" 3—3 " 2 и 5;
" 4—4 " 7, 8 и 9, 10;
" 5—5 " 7 и 9;
" 6—6 " 8 и 10.

Абсолютные значения деформаций керна

по направлению 1—1 $\Delta d_{1-1} = \Pi_2^1 - \Pi_1^1 + \Pi_2^4 - \Pi_1^4$;
" 2—2 $\Delta d_{2-2} = \Pi_2^3 - \Pi_1^3 + \Pi_2^6 - \Pi_1^6$;
" 3—3 $\Delta d_{3-3} = \Pi_2^2 - \Pi_1^2 + \Pi_2^5 - \Pi_1^5$;
" 4—4 $\Delta h_{4-4} = (\Pi_2^7 - \Pi_1^7 + \Pi_2^8 - \Pi_1^8 + \Pi_2^9 - \Pi_1^9 + \Pi_2^{10} - \Pi_1^{10})/4$.

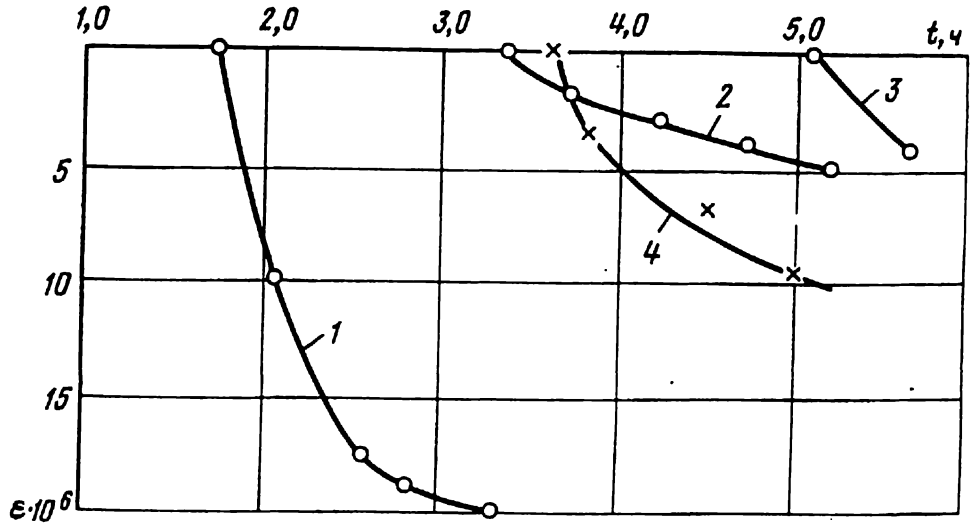


Рис. 9.6. Проявление деформаций упругого последействия в кернах разведочного бурения:

1 — песчаник, глубина 255 м; *2* — песчанистый сланец, глубина 933 м; *3* — песчаник, глубина 955 м; *4* — песчаник, глубина 961,5 м

Делением абсолютных значений деформаций Δd на диаметр керна определяются относительные деформации ϵ_{1-1}, ϵ_{2-2}, ϵ_{3-3}, а делением Δh_{4-4} на базу измерения продольных деформаций определяется ϵ_{4-4}. Затем аналогичным образом рассчитываются ϵ_{7-7}, ϵ_{8-8}, ϵ_{9-9} и ϵ_{10-10}.

Относительная деформация

$$\epsilon_{5-5} = \sqrt{\epsilon_{1-1}^2 + \left(\frac{\epsilon_{7-7} + \epsilon_{9-9}}{2}\right)^2}; \qquad (9.14)$$

$$\epsilon_{6-6} = \sqrt{\epsilon_{2-2}^2 + \left(\frac{\epsilon_{8-8} + \epsilon_{10-10}}{2}\right)^2}. \qquad (9.15)$$

О возможностях предложенного метода первоначально судили по результатам лабораторных испытаний. В связи с этим, первой задачей натурных измерений было установить длительность упругого последействия в отдаленных от массива кернах и образцах. Такие измерения посредством прибора ПООП осуществлены на буровых разведочных скважинах (рис. 9.6).

На шахте "Южная" производственного объединения Ростовуголь опыты по измерению деформаций обратной ползучести проводили в условиях частичной разгрузки призабойной части массива. С этой целью в нижней угольной пачке пласта $i_3^н$ Степановский устанавливались тензометрические репера, позволяющие измерять деформации угольного пласта на базе 30—35 см в направлениях вдоль забоя, по мощности пласта и вглубь массива. Затем ручной пилой вырубали нишу на глубину 0,5 м.

Замеренные при такой разгрузке деформации перпендикулярно к мощности пласта для различного времени суток 19 ч 40 мин, 19 ч 45 мин и 20 ч 10 мин составили соответственно 3,85, 2,96 и 2,94 мм.

Таким образом, в углях после их отделения от массива или при частичной разгрузке массива проявляются значительные деформации упругого последействия. В горных породах, поднятых в виде керна из скважин с глубин около 1000 м, упругое последействие наблюдается по истечении многих часов после разгрузки. Что касается антрацитов, то для них по изучению деформаций упругого последействия целесообразно рекомендовать натурные шахтные опыты.

В методическом плане такие опыты были проведены В.Г. Лурием в лаве 3 пласта 22 шахтоуправления "Юбилейное" (Кузбасс). Методика этих экспериментов заключалась в следующем. В конвейерном штреке, на различном расстоянии от лавы в обнажении угольного пласта на базах по 270—280 мм, ориентированных вертикально, горизонтально и под углом в 45° к вертикали, устанавливались репера, а деформации между ними измерялись микронными индикаторами часового типа. Осуществлялся верхний горизонтальный пропил и измерялись деформации массива. Затем делались боковые вертикальные пропилы и наконец, в некоторых опытах горизонтальные нижние пропилы. При этом часть угольного массива оказывалась полностью разгруженной от горного давления. Некоторые результаты наблюдений приведены в таблице 9.1, из которой видно, что после мгновенной упругой разгрузки массива проявляются значительные деформации упругого последействия, которые можно использовать для оценки напряженного состояния угольного массива и его характеристик вязкости и упругости последействия.

Таблица 9.1. Вертикальные (B), горизонтальные ($Г$) и наклонные (H) деформации (мм) во времени

Место проведения опыта, размер базы измерения деформаций, мм	Время после разгрузки, мин	B	$Г$	H
1. В 20 м от лавы:		3,608	7,800	6,534
		После верхнего горизонтального пропила		
$B = 286$*	0	2,285	7,904	6,030
$Г = 285$	2	2,266	7,904	6,030
$H = 280$	4	2,244	7,904	6,029
	4	2,229	7,904	6,025
	4	2,219	7,904	6,022
	4	2,215	7,904	6,021
	5	2,208	7,904	6,020
	Конечное	2,167	7,904	6,017
		После вертикального пропила справа		
	0	2,107	7,339	4,889
	3	2,107	7,290	4,860
	5	2,107	7,276	4,840
	5	2,107	7,260	4,834
	5	2,107	7,251	4,826
	Конечное	2,099	7,228	4,796

Продолжение табл. 9.1

Место проведения опыта, размер базы измерения деформаций, мм	Время после разгрузки, мин	*В*	*Г*	*Н*
		После вертикального пропила слева		
	0	2,021	6,769	4,830
	5	2,021	6,760	4,830
	10	2,021	6,749	4,830
	Конечное	2,021	6,707	4,830
		После нижнего горизонтального пропила		
	0	2,029	6,639	4,841
2. В 36 м от лавы:		3,000	3,280	3,480
		После верхнего горизонтального пропила		
$B = 280$	0	1,700	3,360	3,330
$Г = 280$	5	1,680	3,360	3,329
$H = 280$	5	1,665	3,360	3,320
	5	1,665	3,360	3,320
	10	1,650	3,360	3,320
		После вертикального пропила справа		
	0	1,375	3,110	2,870
	5	1,375	3,105	2,855
	5	1,375	2,990	2,850
	5	1,375	2,990	2,850
		После вертикального пропила слева		
	0	1,240	1,965	2,555
	5	1,235	1,965	2,555
	5	1,235	1,955	2,595
	5	1,235	1,950	2,590
	5	1,235	1,950	2,575
		После нижнего горизонтального пропила		
	0	1,255	1,720	2,420
	5	1,255	1,720	2,420
3. В 6 м от лавы:		5,320	3,889	5,812
$B = 270$		После верхнего горизонтального пропила		
$Г = 285$				
$H = 285$	0	3,617	3,873	5,301
	5	3,616	3,862	5,269
	5	3,607	3,861	5,262
	10	3,603	3,858	5,254
		После вертикального пропила справа		
	0	2,589	2,873	4,213
	5	2,618	2,799	4,188
	6	2,616	2,815	4,183
	5	2,610	2,810	4,175
		После вертикального пропила слева		
	0	2,385	2,485	4,301

Продолжение табл. 9.1

Место проведения опыта, размер базы измерения деформаций, мм	Время после разгрузки, мин	*В*	*Г*	*Н*
	5	2,385	2,479	4,301
	5	2,385	2,473	4,301
		После нижнего горизонтального пропила		
	0	2,436	2,205	4,268
	5	2,435	2,170	4,245

10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ, УПРУГИХ И ДРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНЫХ ПОРОД В МАССИВЕ

Для определения прочности горных пород в массиве разработан ряд методов, в том числе основанные на учете макродефектов, геофизические, акустическо-механический, по внедрению штампа, разрушением блоков, расчетные.

Метод, основанный на учете макродефектов сводится к изучению корреляционной связи между акустическими и прочностными характеристиками горных пород. Для идеально твердого тела, учитывая его дискретное строение, можно обосновать связь между пределом прочности на сжатие и скоростью прохождения продольных волн исходя из физики разрушения пород и распространения в них упругих волн.

Связь между пределом прочности на сжатие однородного материала, не содержащего дефектов структуры, и скоростью распространения продольных волн [37] описывается уравнением типа

$$R = (1/4b)\rho^2 c_{\text{пр}}^4, \qquad (10.1)$$

где R — предел прочности на одноосное сжатие; ρ — плотность материала; b — параметр, выражающий нелинейность силы взаимодействия с расстоянием; $c_{\text{пр}}$ — скорость продольных волн.

Поры и трещины в каждом элементарном объеме уменьшают силы взаимодействия между монолитными отдельностями, что в конечном счете предопределяет степень связей на единицу площади и, следовательно, снижает прочность горных пород. Нарушение сплошности создает благоприятные условия для развития сложного напряженного состояния в теле концентрации напряжений на границах дефектов, появления остаточных напряжений.

В практическом плане все дефекты в горных породах можно условно разделить на две группы — микродефекты, протяженность или размеры которых меньше обычных размеров образцов, испытываемых в лабораторных условиях (пористость, микротрещиноватость, неоднородность распределения минералов по объему и др.) и вторая

группа — макродефекты, к которым относятся пустоты, инородные включения, слоистость, значительно развитые кливаж, трещиноватость и т.д. Они имеют размеры больше размеров образцов или отдельностей. Расположение дефектов в горной породе может быть различным, в одном случае макро- и микродефекты расположены хаотически, в другом случае дефекты характеризуются своей направленностью (например, слоистость системы параллельных кливажных трещин).

Прочностные свойства массива можно определить, если известна прочность образца и найден закон ее изменения в зависимости от макродефектов, т.е. выявлено влияние масштабного фактора.

В случае хаотического расположения дефектов, согласно статистической теории прочности, зависимость влияния размеров исследуемых тел на прочность выразится формулой:

$$R_{сж} = R^0_{сж}\left[a + b\left(V_0/V\right)^{1/\alpha}\right], \qquad (10.2)$$

где $R_{сж}$ и $R^0_{сж}$ — средние прочности образцов разных размеров; a, b и α — константы, зависящие от свойств материала и вида испытаний ($a + b = 1$; $\alpha < 1$); V_0, V — объем породы в образце и массиве.

Минимальная прочность при $V \to \infty$ принимается за прочность в массиве. Тогда

$$R_{сж.\,min} = a\,R^0_{сж}.$$

Основным отличием пород с ориентированной трещиноватостью от пород, содержащих только хаотические дефекты, является зависимость всех коэффициентов в формуле (10.2) от величины углов α между прикладываемыми силами и поверхностями ослаблений. При наличии в породах одной системы ориентированных дефектов максимальная прочность при сжатии будет при $\alpha = 90°$ и близкая к ней при $\alpha = 0°$. Минимальная прочность будет при некотором значении угла $\alpha_{кр}$, величина которого зависит от прочностных показателей отдельностей породы и от коэффициента сцепления по трещинам. Обычно этот угол близок к 15°.

Скорость продольной волны и ее затухание также зависят от дефектности горной породы. Чем больше объем V испытываемой породы, тем меньше ее прочность $c_{пр}$. С увеличением объема наблюдается затухание волн.

Следовательно, если знать закономерности влияния дефектности строения горной породы на прочностные и акустические параметры, то можно определить статическую прочность горных пород в массиве акустическим методом.

Для проверки высказанных положений было изучено влияние количества трещин и угла их наклона на прочность при сжатии и скорость продольной волны для пяти типов горных пород (габбро, мрамор, песчаник, известняк, алебастр). Установлено, что прочность и скорость волны в зависимости от количества трещин изменяются аналогично, а в зависимости от угла их наклона неодинаково. Если число систем трещин превышает 3—5, то можно говорить о квазиод-

нородном массиве, в котором направление трещин на указанные свойства не влияет. В этом случае расчеты можно вести только с учетом количества трещин.

Математическая обработка полученных результатов, проведенная В.П. Бородиным, позволила установить взаимосвязь между прочностью на сжатие, скоростью продольной волны и количеством трещин n:

$$R_{сж} = R^0_{сж}\left(\frac{1,4}{2,0+n} + 0,3\right);$$

$$c_{пр} = c^0_{пр}\left(\frac{1,8}{3,0+n} + 0,4\right);$$

$$R^м_{сж} = R^0_{сж}\left[\frac{2,52}{2,2\, c^м_{пр}/c^0_{пр}} - 1,1\right], \qquad (10.3)$$

где $R^0_{сж}$, $c^0_{пр}$ — прочность на сжатие и скорость продольной волны в опорном (базовом) образце (без трещин); $R^м_{сж}$, $c^м_{пр}$ — соответственно в исследуемом объеме (в массиве).

Для сульфидных руд Талнахского месторождения [38] опытным путем определены $R_{сж}$ и $c^0_{пр}$ на образцах (150 определений) и в массиве (16 определений). Размеры ребер, испытываемых в шахтных условиях призм, находились в пределах 31—86 см. Результаты испытаний и расчетные оказались близкими (табл. 10.1). Несколько повышенные значения расчетных величин прочности можно объяснить тем, что в (10.3) из всех микродефектов учитывается только трещиноватость.

Предлагаемая методика справедлива для квазиоднородного массива, в котором число систем трещин превышает 3—5, и заключается в следующем. Для представительной группы образцов одной литологической разновидности, отобранных из района будущих натурных исследований, определяются в лабораторных условиях прочность и

Таблица 10.1. Фактические $R_ф$ и расчетные $R_р$ прочности сульфидных руд Талнахского месторождения

Относительная скорость волны $c^м_{пр}/c^0_{пр}$	Прочность на сжатие, отн. ед.		$\frac{R_р - R_ф}{R_ф} 100$
	$R_р = \frac{R^м_р}{R^0}$	$R_ф = \frac{R^м_ф}{R^0}$	
0,95	0,92	0,85	8,2
0,90	0,84	0,78	7,7
0,85	0,77	0,71	8,4
0,80	0,70	0,65	7,7
0,75	0,64	0,60	6,7
0,70	0,58	0,55	5,5
0,65	0,53	0,50	6,0
0,60	0,48	0,48	0,0

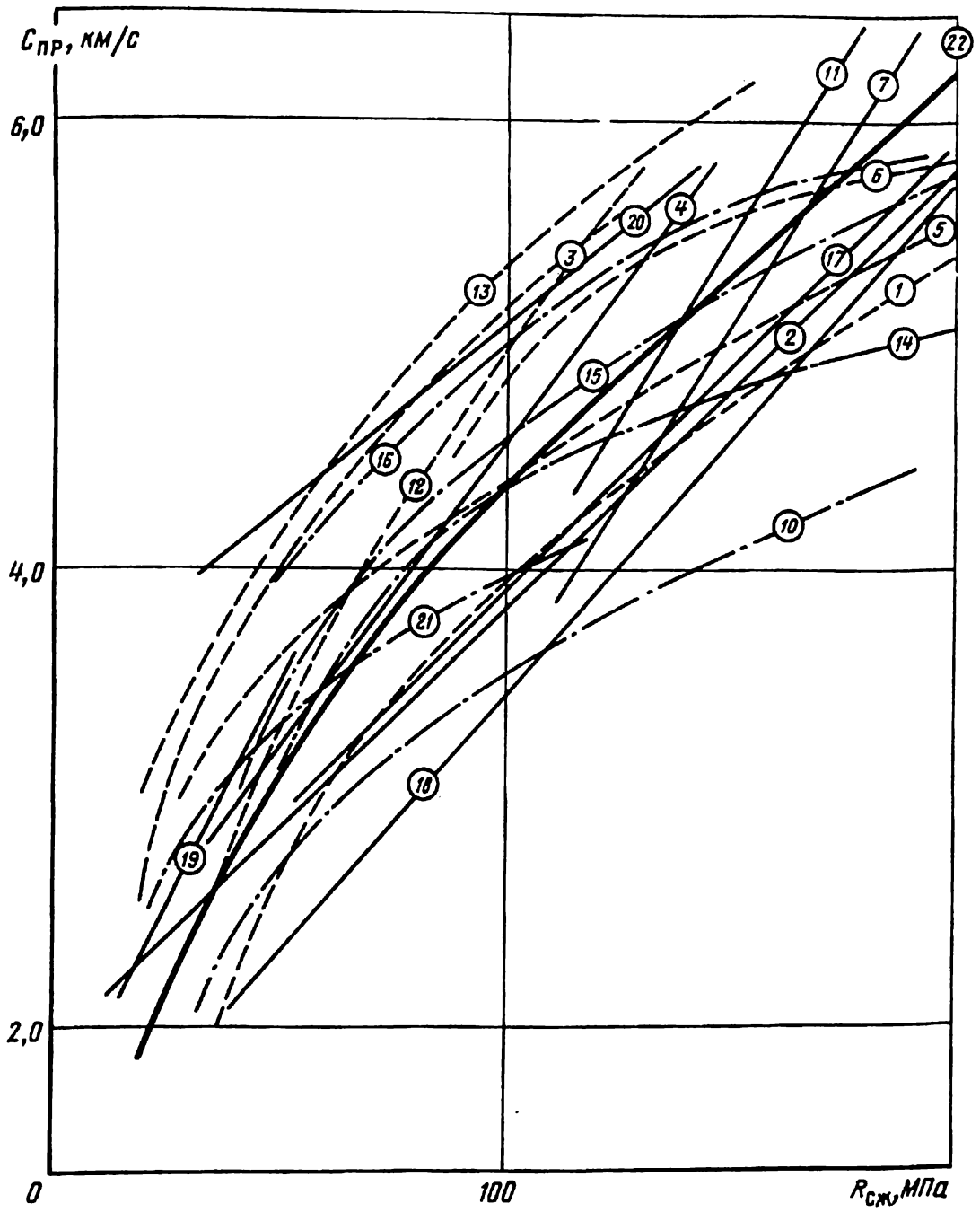


Рис. 10.1. Зависимость скорости продольных волн $C_{пр}$ от прочности пород на сжатие $R_{сж}$:

1, 2 — песчаники, Донбасс; *3, 4* — алевролиты и аргиллиты, Донбасс (Б.П. Овчаренко, А.И. Комаров); *5* — осадочные породы (Б.А. Вибенга); *6* — известняки, порфириты, магнетитовые руды и скарны; *7* — скарны гранатовые; *8* — порфириты (В.В. Андриевич и др.); *9* — магматические, метаморфические, осадочные породы (Е.С. Ватолин); *10* — песчаники и алевролиты, Кузбасс (Е.А. Сагиев); *11* — тешинит, Грузия (Л.А. Майсурадзе); *12* — диабаз (Г.В. Кузнецов и др.); *13* — известняк, Франция (Эрмит); *14* — песчаники, Талнах; *15* — базальт, Талнах (Л.В. Шаумян); *16* — песчаники, Караганда (В.П. Бородин); *17* — карбонатные породы (В.С. Ямщиков); *18* — магматические, метаморфические и осадочные породы (Е.С. Ватолин, В.П. Бородин); *19* — глинисто-песчанистые породы, Зап. Донбасс (С.Н. Рева); *20* — осадочные породы, Казахстан (К.П. Катин и др.); *21* — мартитовые руды, Кривбасс (В.В. Гречухин и др.); *22* — усредненная кривая

скорость продольной волны по обычным методикам. Затем в массиве, для которого необходимо найти прочность, проводятся акустические наблюдения по методике прозвучивания и определяется скорость продольной волны. Прочность в массиве вычисляется по установленной закономерности.

Количественная связь между скоростью продольных волн и пределом прочности на сжатие по многочисленным данным зависит от типа пород и методов получения их характеристик.

В целом о взаимосвязи скорости продольных волн и предела прочности на сжатие можно судить по рис. 10.1.

Метод механических испытаний различных объемов породы может быть осуществлен при оконтуривании участка массива щелями, чтобы получился целик определенных размеров. Целик может иметь связь с массивом или по основанию или по задней грани, в зависимости от поставленной цели. Размеры целика принимаются в зависимости от размеров и возможности нагружающих устройств. В верхней щели монтируется нагружающее устройство (обычно гидравлические домкраты), посредством которого производится нагружение этого целика вплоть до его разрушения.

Для определения предела прочности на сжатие используется схема, когда оконтуренный целик связан с массивом только по основанию и отсутствуют сдвигающие усилия.

При испытании целиков пород на срез испытуемый участок должен быть связан с массивом по задней стенке [8].

Акустикомеханический метод может быть использован для определения прочности как образцов пород, так и массива.

При любом виде нагружения, даже в медленном, в нагружаемом теле возникает волна напряжений со скоростью звука, распространяющейся от контакта соприкасающихся тел. После соприкосновения тел и прохождения волн напряжений, дальнейшее нагружение может происходить по разному. В случае, когда время приложения нагрузки велико по сравнению с временем прохождения волны, напряжения в телах успевают распространиться по всему телу и распределиться более или менее равномерно. При быстрых нагрузках, когда время приложения нагрузки меньше или соизмеримо с временем прохождения волны по телу, напряжения в теле распределены неравномерно. При этом большую роль, кроме времени действия нагрузки, играет интенсивность ее нарастания, но так как при любом виде нагружения происходит смещение частиц, имеют место и силы инерции. При малой скорости смещения частиц (интенсивность нагружения невелика) ускорение частиц невелико, поэтому величина инерционных сил незначительна. При больших скоростях нагружений частицы имеют значительные скорости и ускорения, поэтому возникают значительные инерционные силы. Чем больше общая масса возбужденных частиц, и чем выше их ускорение, тем больше величина действующих инерционных сил.

Следует заметить, что при любом виде нагружения кроме инерционных сил приходится преодолевать силы, связанные с упругостью, вязкостью, трением между частицами и другими свойствами тел.

Доля участия каждой из этих сил в общем балансе различная и зависит от физико-механических свойств нагружаемых тел, их размеров и режима нагружения. Так, при малой скорости нагружения волновые явления и силы инерции не являются определяющими, а при большой основную роль играют волновые процессы и связанные с ними силы инерции.

Учитывая то, что свойства тел это не что иное, как проявление реакции тел на внешние воздействия, можно предположить о возможности общего метода для любых динамических способов нагружения, который позволит количественно отличать различные виды нагружения. Таким методом, как показали исследования, является акустико-механический, который может быть использован не только для определения состояния, но и для определения упругих и прочностных свойств пород.

Теоретически вопрос определения прочностных свойств горных пород при динамическом нагружении с использованием акустики исследован мало и аналитических зависимостей между этими свойствами практически не найдено.

Чтобы показать возможность существования этих связей, рассмотрим нагружение абсолютно упругого тела цилиндрической формы равномерно распределенной нагрузкой по одному из торцов. Если тело другим торцом оперто на неподвижную жесткую опору

$$\sigma = \rho c_{\text{пр}} v', \tag{10.4}$$

где σ — напряжение в стержне; $c_{\text{пр}}$ — скорость продольной волны; v' — скорость частиц.

С.П. Тимошенко [29], анализируя эту формулу доказывает, что "если скорость частиц v' при нагружении превысит некоторый определенный предел, зависящий от механических свойств материала стержня, то в нем появляются остаточные деформации, даже если масса ударяющегося тела и будет очень мала".

Такое нагружение хрупких тел (например, горных пород) при превышении для данной породы скорости нагружения сверх допустимой приведет к их разрушению.

Заменяя ρ в формулу (10.4) его значением из формулы для определения модуля упругости для стержня получим

$$v = \frac{\sigma c_{\text{пр}}}{E}, \tag{10.5}$$

Из формулы (10.5) следует, что скорость частиц при динамическом нагружении зависит от приложенных напряжений, скорости продольных волн и модуля упругости материала. Однако напряжения, возникающие при ударе в свою очередь зависят от других свойств материала (инерционных, вязкости), а также от времени и скорости нагружения, поэтому в общем виде $\sigma = f(E, t, \mu, \rho, c)$. Найти эту зависимость можно лишь в случае, если известны параметры нагружения и свойства среды.

Поскольку реальные тела обладают и вязкостью и упругостью, а также учитывая, что в процессе динамического нагружения боль-

шую роль играют силы инерции, то для установления взаимосвязи между акустическими параметрами массива, скоростью деформирования и напряжением принята упруго-вязко-инерционная модель. В целях упрощения решения задачи примем, что все три вида сопротивлений (упругий, вязкий, инерционный) действуют одновременно, параллельно и независимо друг от друга.

После решения системы уравнений деформирования тела с применением формул волновой механики [3] получена зависимость

$$R_{сж} = \frac{(\rho c_{пр} + \mu)v'}{k}, \qquad (10.6)$$

где μ — динамический коэффициент вязкости, Па·с/м^2·10^7; ρ — плотность породы, Па·с^2/м^2·10^7; $c_{пр}$ — скорость продольной волны, м/с; v — скорость деформирования, м/с; k — коэффициент динамичности для статических нагрузок $k = 1$.

Если в формуле (10.6) значение v является критическим для данного типа породы, то напряжения также будут критическими (предельными), т.е. разрушающими.

Динамический коэффициент вязкости

$$\mu = \frac{\rho c_{пр}^2 a_0}{2 \cdot 10^4},$$

где $a_0 = \frac{1}{l_2 - l_1} \ln \frac{A_2}{A_1}$ — декремент затухания l_1 и l_2 — базы прозвучивания; A_1 и A_2 — амплитуды сигнала.

Все составляющие формулы (10.6) определяются на образцах или в массиве опытным путем. $c_{пр}$ — скорость продольной волны, определяется сейсмоакустическим методом, для осуществления которого разработана аппаратура в искробезопасном исполнении.

Чтобы определить декремент затухания продольной волны можно использовать ультразвуковую аппаратуру УКБ-1м (для образцов), а для испытаний в шахтах, опасных по газу и пыли, искробезопасную аппаратуру АИВ, разработанную ИГД им. А.А. Скочинского. При определении затухания продольных волн в образцах необходимо, чтобы $a \mid \lambda \geqslant 1$, где a — радиус (наименьший размер) образца, λ — длина продольной волны.

Длина образца должна быть больше длины волны. Амплитуда сигнала замеряется при неизменных усилении и контактных условиях на двух образцах, изготовленных из одной и той же разновидности породы. Длины прозвучиваемых образцов (значения l_1 и l_2) должны отличаться друг от друга не менее чем в 3—4 раза.

Амплитуда сигнала на всех базах должна измеряться при постоянном уровне усиления в сантиметрах для приборов, регистрирующих сигнал на ленте или трубке осциллографа, а в приборе АИВ по показаниям милливольтметров.

Методика определения критической скорости включает принцип динамического внедрения пуансона.

О результатах определения предела прочности на сжатие акустико-механическим методом можно судить по рис. 10.2.

К расчетным относится метод, предложенный М.М. Протодьяконовым и С.Е. Чирковым. В его основу положен масштабный фактор, принцип уменьшения вариаций свойств в образцах больших размеров и огибающая предельных кругов напряжений Мора [8].

Порядок определения прочности следующий:

1. В лабораторных условиях методом раскалывания и сжатия определяется предел прочности на сжатие двух групп образцов из одного блока, размеры которых по возможности существенно различны.

2. Определяются среднеарифметические значения прочности, среднеквадратичные ошибки и вариации значений прочности.

3. По средним расчетным данным строятся огибающие кругов Мора и определяются их параметры a и τ_{max}. Из двух значений a и τ_{max} определяется среднеарифметическое, которое и используется для расчетов кривой масштабного фактора и прочности блока в массиве.

Метод динамического внедрения штампа* основан на использовании формулы (10.6) при замене ρ, $c_{пр}$ и μ данными по жесткости и вязкости, определяемыми по нагрузочной кривой, связывающей силу и скорость деформирования породы при ударе индентора о породу с различной скоростью.

В этом случае

$$R_{сж} = k_1 (G + \eta) v_{кр}, \qquad (10.7)$$

где G — условный показатель жесткости, Па·с; η — условный показатель вязкости, Па·с; $v_{кр}$ — критическая скорость деформирования (соударения штампа и породы), м/с. k_1 — 0,0165 — коэффициент, учитывающий напряженное состояние под штампом и масштабный фактор; $R_{сж}$ — предел прочности на одноосное сжатие.

Показатели жесткости и пластичности определяются из графика $P = f(v)$, полученного путем динамического внедрения штампа в массиве при разных скоростях соударения.

Составляющие формулы (10.7) определяют с помощью пружинного прибора ДП-7 (рис. 10.3).

Техническая характеристика прибора ДП-7

Масса ударяющего груза, кг	0,67
Максимальная скорость деформирования, м/с	5,0
Индентор — плоский из твердого сплава ВК-10 конической формы с углом приострения, град	60°
Диаметр штампа, мм	2,0
Точность отсчета глубины внедрения штампа, мм	0,01
Точность отсчета величины перемещения подвижного груза с учетом и без учета отскока, мм	1,0
Масса прибора в целом, кг	5,0
Габариты, мм	550×390×230

*Разработан Е.С. Ватолиным и В.П. Архиповым.

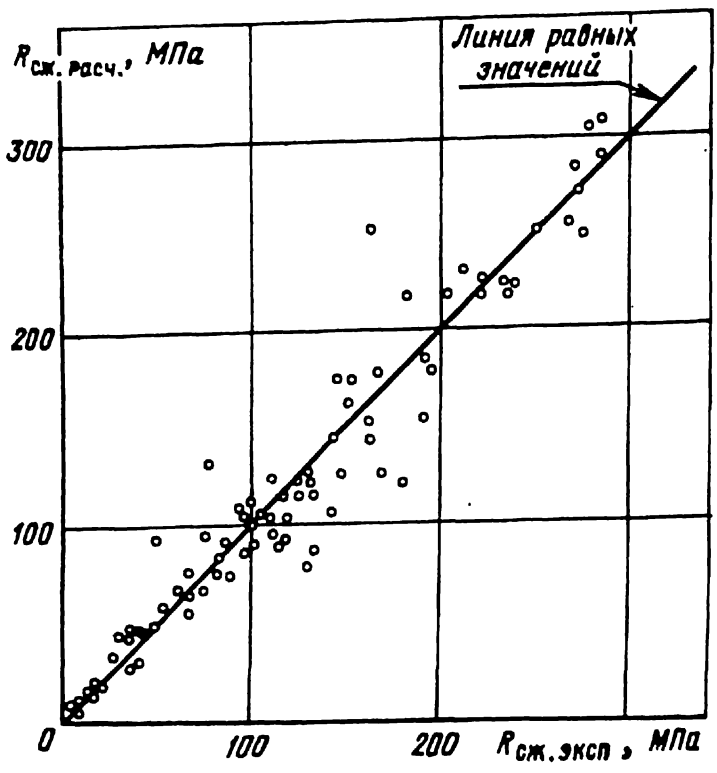
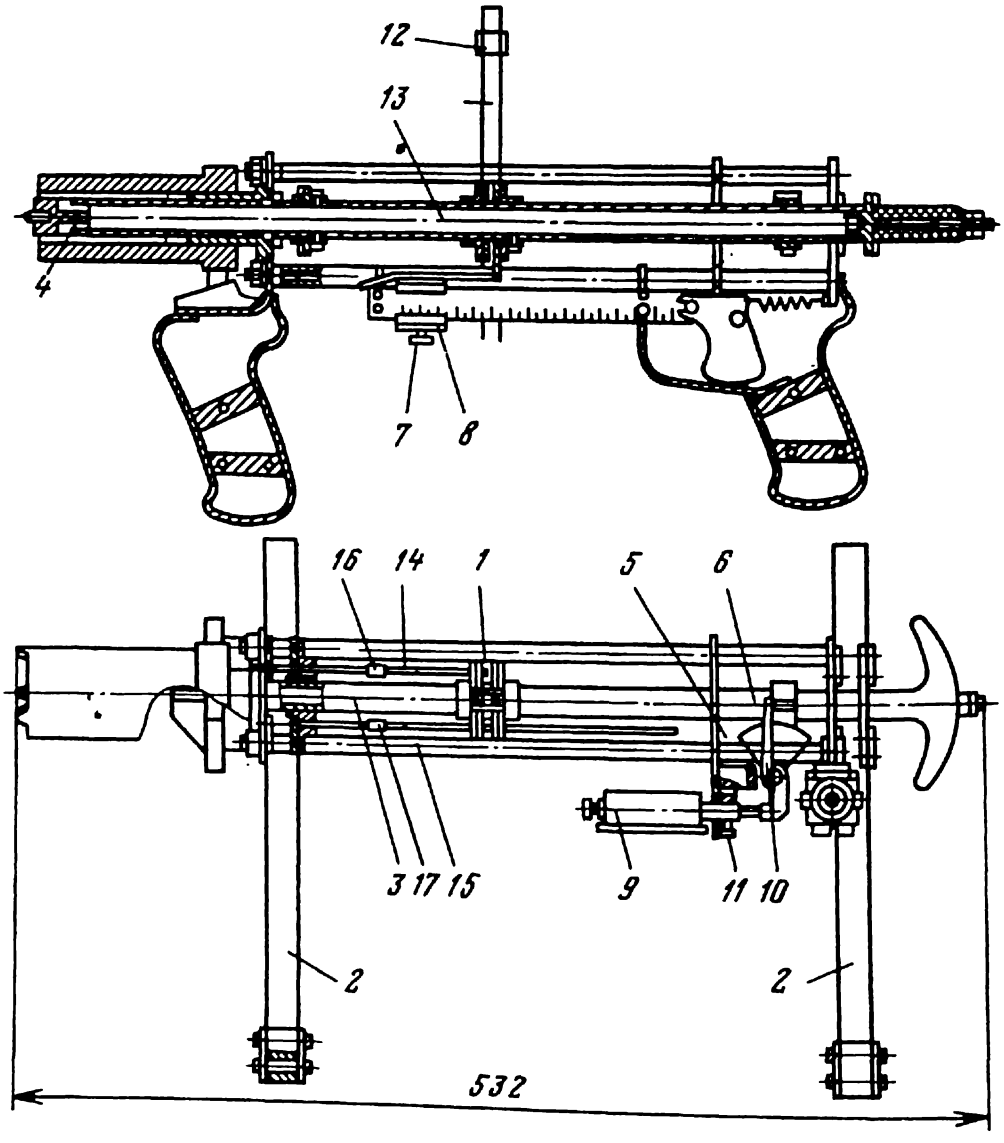


Рис. 10.2. График для сравнения результатов определения предела прочности на сжатие по ГОСТ 21153.2—75 — $R_{сж.эксп}$ и акустико-механическим способом — $R_{сж.расч}$

Рис. 10.3. Прибор ДП-7



Прибор ДП-7 по принципу работы аналогичен прибору ДП-8 и состоит из рамы *1*, на которой с помощью больших плоских пружин *2* крепится ударник *3* с индентором *4* и измерителем глубины внедрения *5*.

Ударник с индентором передвигается внутри рамы без трения и центрируется большими плоскими пружинами. Взвод пружин для производства удара по горной породе осуществляется рукояткой *6*, а фиксация пружин в натянутом состоянии осуществляется винтом *7*, расположенным на движке *8*, который может перемещаться и фиксироваться на поворотной линейке с интервалом 5 мм.

Отсчет величины внедрения индентора в горную породу осуществляется индикатором часового типа *9*, соединенным через флажок *10* с толкателем *11*. В связи с тем, что флажок является неравноплечным (отношение плеч 2/1), показания, снимаемые с индентора часового типа, следует удваивать.

В средней части ударника находятся малые плоские пружины *12*, причем одни их концы прикреплены к ударнику, а другие имеют дополнительный груз *13* и находятся в свободном состоянии. Через отверстия малых плоских пружин проходят два стержня *14* и *15*, один из которых закреплен за подвижную большую пружину, а другой — за неподвижную большую пружину. Оба стержня имеют указатели перемещений *16* и *17*.

Принцип действия прибора следующий.

Вручную производятся натяжение пружины *2* на определенную величину, затем прибор прижимается к поверхности забоя. Все указатели перемещений устанавливаются в нулевое положение, после чего производится освобождение пружины со взвода путем нажатия на спусковой крючок. Груз с индентором под действием пружины перемещается в сторону забоя и как только индентор коснется плоскости забоя ударник *3* затормозится, а находящийся в нем подвижно́й груз *13* будет перемещаться по инерции в сторону забоя вместе с указателями перемещений *16* и *17*, сжимая малую пружину *14*, отсчет перемещения груза *13* ведется по делениям, нанесенным на стержнях *14* и *15*. При этом указатель перемещений *16* зафиксирует перемещение груза h_1 без учета отскока индентора, а указатель перемещений *17* — с учетом отскока h_2.

Внедрение индентора в породу фиксируется индикатором часового типа *2* через систему толкателя *3* и флажка *10*.

Таким образом на приборе фиксируется три показателя: величины перемещений подвижного груза с учетом и без учета отскока и глубина внедрения штампа.

В момент разрушения горной породы под индентором отскок груза *13* практически отсутствует и показания перемещений подвижного груза с учетом отскока и без учета отскока становятся близкими, а в некоторых случаях даже равными.

Для определения энергии удара индентора о забой производится тарирование пружины при различных углах наклона прибора к горизонту.

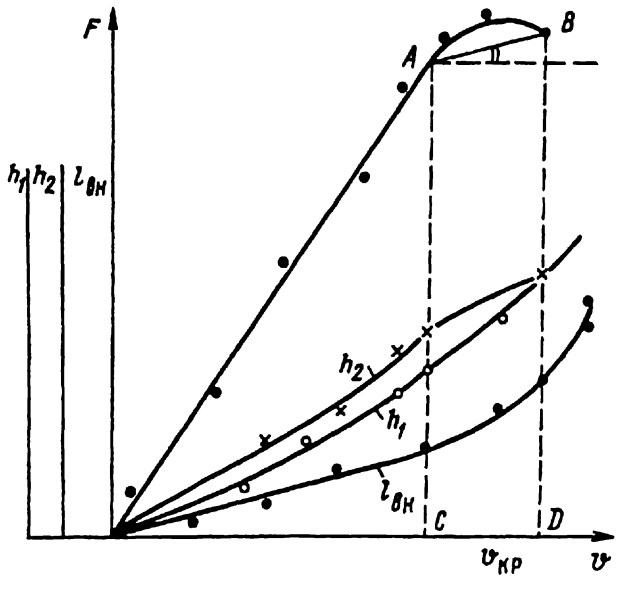


Рис. 10.4. Типичный график, показывающий изменение силы удара F, глубины внедрения $l_{вн}$ и величины перемещения подвижного груза с учетом отскока h_1 и без учета отскока h_2 от скорости соударения индентора с породой v

Теперь, зная глубину внедрения индентора в породу и энергию удара, можно определить силу удара. По полученным значениям силы, скорости удара и глубины внедрения строят график, связывающий силу, отнесенную к площади штампа, и скорость (рис. 10.4), а также и нагрузочную характеристику породы, связывающую силу и деформацию.

Для получения различных значений силы и внедрения, натяжение пружины изменяется с интервалом 5 мм от 5 мм до максимальной (в момент выкола породы под индентором). Удары наносятся каждый раз в новую точку до тех пор, пока не произойдет первый выкол, при котором отскок индентора минимальный и показания перемещения груза по регистраторам *16* и *17* равнозначны. При каждом натяжении пружины производится несколько ударов в зависимости от требуемой точности определения и разброса получаемых данных.

По графику (см. рис. 10.4) находят все три значения для расчета предела прочности горной породы на одноосное сжатие.

Для определения G учитывают упругую часть кривой сила — скорость (отрезок ОА) и определяют ее угол наклона к оси абсцисс. Для нахождения η принимают часть кривой, где сказывается влияние пластических остаточных деформаций (участок кривой AB). Эта часть характерна тем, что деформации растут не пропорционально напряжениям, а точка B соответствует $h_1 = h_2$. Точка A — характеризует начало пластических деформаций, а точка B выкол горной породы под штампом, при этом $v = v_{кр}$. Соединив точки A и B получают прямую, угол наклона которой определяет значение η.

Сейсмический метод определения скорости распространения упругих волн основан на многоканальной записи сейсмограмм. Для этого в исследуемом массиве пробуривают серию скважин, расположенных на определенном расстоянии между собой; в одной из скважин размещается источник возбуждения сигнала (заряд ВВ или ударное механическое устройство), а в остальные приемники колебаний. Возбуждаемые упругие колебания фиксируются сейсмоприемниками, размещенными в скважинах. Сигнал передается по проводам на сейсмостанцию, где он записывается на бумагу или магнитную ленту. Затем производится расшифровка сейсмограмм и строятся годографы, по которым определяется скорость волн.

Достоинством этого метода является возможность выделения из сейсмограмм различных типов волн, определения скорости их распространения и затухания.

Этот метод применяется при геофизических исследованиях больших массивов пород.

В качестве регистрирующей аппаратуры кроме сейсмостанций для сравнительно небольших баз прозвучивания применяются различные счетчики времени, которые фиксируют время первого вступления продольной волны на электронном цифровом табло, или с помощью стрелочных приборов.

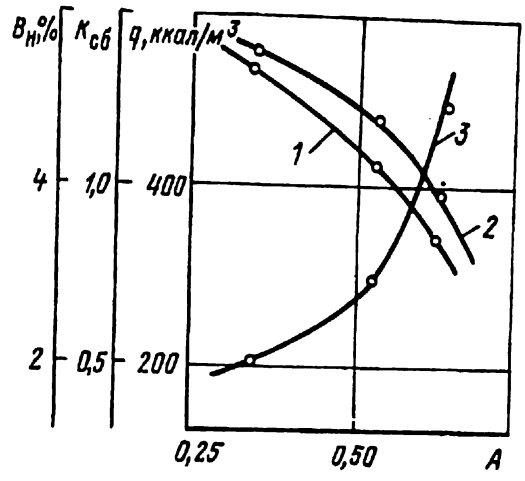


Рис. 10.5. Зависимость параметров буровзрывных работ от акустического показателя трещиноватости:

1 — удельная энергия ВВ q; *2* — коэффициент сближения $K_{сб}$ скважин; *3* — выход негабарита $B_н$

Ультразвуковой метод применяется в основном для прозвучивания образцов горных пород, что объясняется большим затуханием ультразвуковых колебаний (1—2 м).

Недостатками ультразвукового метода является необходимость иметь хороший акустический контакт между датчиками и массивом, а также малая база прозвучивания.

Акустическая жесткость, динамические модуль упругости и коэффициент Пуассона могут определяться в массиве по скорости распространения упругих волн по известным классическим формулам [8].

Из множества методов определения трещиноватости массива горных пород заслуживает внимания акустический, который еще не нашел достаточного отражения в публикациях.

Акустический показатель трещиноватости

$$A = \left(\frac{c^{м}_{пр}}{c^{0}_{пр}}\right)^2,$$

где $c^{м}_{пр}$ — скорость продольной волны в массиве; $c^{0}_{пр}$ — скорость продольной волны в образце.

Скорость продольной волны определяется в лабораторных условиях на образце пород в виде цилиндра или куба в соответствии с ГОСТом.

Скорость продольной волны в массиве определяется с учетом анизотропии пород в массиве и в образце, т.е. направление прозвучивания в массиве и в образце должно совпадать.

Акустический показатель трещиноватости определяется достаточно просто и был использован для определения параметров буровзрывных работ (расход ВВ, коэффициента сближения скважин и выхода негабарита) в зависимости от свойств пород.

По результатам экспериментальных работ, проведенных совместно с И. Чогошвили, построен график (рис. 10.5), на котором по оси

ординат отложены удельная энергия ВВ q, коэффициент сближения скважин $k_{сбл}$, выход негабарита $B_н$, а по оси абсцисс акустический показатель трещиноватости A. Из графика видно, что между параметрами БВР и акустическим показателем трещиноватости существует взаимосвязь.

11. ПУТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ, ПРОЧНОСТИ, УПРУГИХ И ДРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАССИВА

11.1. РАЗРУШЕНИЕ ПОРОД И ОХРАНА ВЫРАБОТОК

В основе своей горное производство сводится к разрушению горных пород или сохранению их прочности (устойчивости или несущей способности) в целях охраны горных выработок, в которых периодически или непрерывно находятся люди.

При разработке и расчете процессов разрушения преимущественно прибегают к оценке разрушаемой среды интегральными — технологическими показателями, близко отражающими как свойства, так и состояние углей и пород в массиве в любом данном месте (сопротивляемость резанию, буримость, взрываемость, дробимость и т.п.).

В строгом аналитическом расчете процессов разрушения пород в массиве пришлось бы учесть не только их прочность и пластичность в условиях сложного напряженного и деформированного состояний, но и ряд таких существенных факторов, как газо- и влагонасыщенность, частость и скорость нагружения (от реологической до взрывной), температура разрушаемой среды, энергоемкость процесса в функции степени разрушения, абразивность, изменчивость этих показателей по простиранию и падению залежи и ряд других, трудно учитываемых факторов.

При резании, бурении, взрывании, дроблении и других процессах разрушения происходит значительное изменение естественного напряженного состояния пород в результате воздействия на них инструментами машин или взрывчатыми веществами, высоконапорными струями воды, электромагнитными полями. Учесть все факторы, характеризующие свойства и состояние среды до и после воздействия, в подавляющем большинстве случаев не представляется возможным, и поэтому следует считать оправданными стандартизацию или нормализацию интегральных показателей среды, вводимых в расчеты процессов разрушения.

Иное положение имеет место при охране горных выработок. В подавляющем большинстве случаев наблюдается количественное изменение свойств и состояния пород массива в зоне ведения горных работ или ближней зоне обнажения долгостоящих основных и вспомогательных выработок. Качественное изменение этих особенностей среды наблюдается редко и, кроме того, принципиальным требовани-

ем охраны горных выработок от разрушения является недопущение возникновения предельного состояния пород и углей в массиве. Это достигается выбором способов охраны очистных и подготовительных выработок, характеристик крепей, созданием искусственных целиков, закладкой выработанного пространства, анкерованием или укреплением пород всевозможными связующими и некоторыми иными способами разгрузки массива от напряженного или деформированного состояния или упрочнением пород и углей в целях их лучшей сопротивляемости давлению вышележащих пород, газовому давлению и имеющему место в некоторых случаях дополнительному напряжению под влиянием тектонических нарушений.

В таких случаях оказываются целесообразными экспериментально-аналитические способы расчета параметров охраны горных выработок с использованием лабораторных методов, моделирующих натурные условия поведения пород в тех или иных условиях, а также натурные измерения.

Любые способы расчета охраны горных выработок всегда связаны с необходимостью знать свойства горных пород при тех или иных видах и режимах нагружения. Такие расчеты обычно сводятся к расчету предельного состояния и установлению необходимого запаса, гарантирующего безопасность ведения горных работ в тех или иных условиях.

Под предельным состоянием для крепких и хрупких горных пород обычно понимается предел прочности, для пластичных — предел текучести, а для подверженных длительным нагрузкам — длительная прочность отрыва или сдвига.

В расчетах технологии горного производства важно знать при каком виде предельного состояния произойдет разрушение, так как горные породы всегда анизотропны, а характер их разрушения может быть как следствием отрыва, так и сдвига.

По Г.В. Ужику свойства материала при любом виде напряженного состояния характеризуются безразмерным отношением временного сопротивления сдвигу R_τ к сопротивлению отрыву R_σ, а состояние материала характеризуется также безразмерным отношением максимального напряжения сдвига τ_{max} к максимальному напряжению отрыва σ_1 [40].

Если при данном виде напряженного состояния безразмерная характеристика свойств больше характеристики состояния материала, $R_\tau/R_\sigma > \tau_{max}/\sigma_1$, отрыв неизбежен.

Когда $R_\tau/R_\sigma < \tau_{max}/\sigma_1$, произойдет сдвиг.

Итак, при охране горных выработок предельное состояние массива является тем крайним состоянием, после которого наступает разрушение пород или углей под влиянием веса вышележащих пород, газового давления и тектонических напряжений, но без приложения извне дополнительных увеличивающих напряжение нагрузок. Разрушение при этом может протекать по разному: в виде образования отдельных трещин, магистральных трещин отжима, высыпания угля из зоны разрушения, "стреляния" с поверхности забоя, горного удара

или внезапного выброса значительного количества угля или породы и газа.

Все эти явления происходят в считанные секунды с реализацией накопленной в массиве потенциальной энергии и носят явно динамический характер.

11.2. ВЫЯВЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Для расчета параметров охраны горных выработок должна быть разработана принципиальная схема расчета напряженного или деформированного состояния массива вблизи обнажения. Сравнение полученных результатов с предельными (по прочности или устойчивости) позволит решить вопрос о приемлемости принятых способов охраны или необходимости проведения дополнительных мероприятий. Легче всего это проследить на примере охраны горной выработки (очистной или подготовительной), пройденной по угольному пласту.

Независимо от того, присутствует газ или отсутствует, только предельное состояние может быть ответственным за начало разрушения, однако в присутствии газа начало процесса наступает при меньшем напряженном состоянии массива, вызванном горным давлением и тектоническими напряжениями [41, 42].

Развитие внезапного выброса угля и газа отличается от горного удара тем, что в первом случае работа десорбированного газа и особенно газа, накопленного в коллекторах, приуроченных к геологическим нарушениям, значительно интенсифицирует развитие динамического явления и эвакуацию разрушенного угля из зоны выброса. Прекращение выброса можно объяснить увеличением прочности угля в зоне непосредственно примыкающей к очагу выброса, снижением горного давления или давления газа, изменением контактных условий выбросоопасной пачки угля, или совместным действием перечисленных факторов, которые в конечном итоге приводят к деформациям или напряжениям меньше критических.

Горные удары возникают только под влиянием горного давления и тектонических напряжений. Развитие процесса, как и в случае внезапных выбросов, возможно только при преодолении предельного состояния массива, но в отсутствии газа.

С позиции теории упругости переход к предельным состояниям (отрыву или разрушению от сдвига) обычно выражается посредством наибольших напряжений σ_1 и τ_{max}.

Весьма вероятно, однако, что для хрупких материалов, у которых сопротивление отрыву существенно меньше сопротивления сдвигу, в большем соответствии с результатами опытов должны оказаться условия, выражающие переход к предельному состоянию посредством наибольших деформаций, а не напряжений*. Эта особенность

---

* Возможна разработка аналитической схемы для проверки вероятности возникновения динамического явления под влиянием преодоления максимальными касательными напряжениями прочности массива на сдвиг.

хрупкого разрушения углей и положена в основу построения скелетной схемы описания динамических явлений в шахте.

В целях упрощения приняты следующие допущения:

месторождение пологого падения;

уголь разрушается при отрыве хрупко, без проявления пластических деформаций;

процесс развития динамического явления протекает настолько быстро, что реологические проявления исключаются;

в глубине массива поперечные деформации "запрещены";

у обнаженной поверхности, в очаге динамического явления, поперечная деформация "запрещена" в направлении, параллельном этой поверхности;

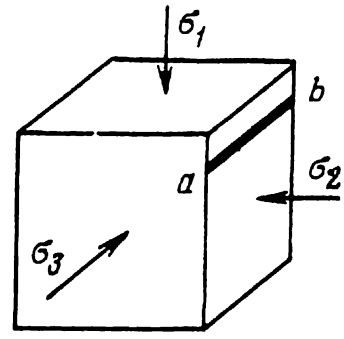


Рис. 11.1. Главные нормальные напряжения σ_1, σ_2, σ_3 на гранях элемента горного массива и направление *ab* суммарной деформации элемента в сторону обнажения

При всестороннем сжатии

$$\sigma_1 \geqslant \sigma_2 \geqslant \sigma_3; \qquad E_1 \geqslant E_2 = E_3; \qquad \mu_{12} = \mu_{13}; \qquad \mu_{23} = \mu_{32},$$

где индексы 1, 2, 3 выражают оси главных напряжений, соответственно по нормали к пласту, параллельно обнажению и в сторону обнажения. При действии по оси *3* деформации растяжения

$$E_3^0 < E_3; \qquad \mu_{13}^0 > \mu_{13}; \qquad \mu_{23}^0 > \mu_{23}.$$

Как принято в общей теории упругости, деформации сжатия записываются со знаком минус.

Давление газа во всех направлениях одинаково и должно учитываться с учетом коэффициента пористости и нарушенности пласта. При наличии магистральных трещин, возникших под влиянием тектонических разрушений или отжима, значение коэффициента пористости и нарушенности в направлении обнажения принимается близким к единице.

Как деформирован уголь в глубине массива сказать трудно. Некоторые ученые полагают, что поперечные деформации в пласте "запрещены" и поэтому поперечное напряжение в пласте должно рассчитываться по теории упругости. Другие с такой точкой зрения не согласны и считают, что в нетронутом разработкой массиве действует гидростатическое давление, т.е. $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$.

Полагая, что истинное значение напряжений может оказаться промежуточным, не соответствующим этим крайним точкам зрения, рассмотрим оба возможных варианта для газовых и негазовых шахт.

Пласт угля или породы негазовый. Если, например, в глубине массива горное давление σ_1 (см. рис. 11.1) и поперечные напряжения $\sigma_2 = \sigma_3$, то в направлении линии *ab* должна возникнуть суммарная

деформация элемента

$$\epsilon_{ав} = \frac{\sigma_1}{E_1}\mu_{13} + \frac{\sigma_2}{E_2}\mu_{23} - \frac{\sigma_3}{E_3} = 0.$$

С учетом принятых допущений

$$\epsilon_{ав} = \frac{\sigma_1}{E_1}\mu_{13} - \frac{\sigma_2}{E_2}(1-\mu_{23}) = 0. \qquad (11.1)$$

Таким образом, в отсутствии тектонических напряжений в глубине массива

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{E_2\mu_{13}}{E_1(1-\mu_{23})}. \qquad (11.2)$$

Уравнение (11.2) при отсутствии тектонических напряжений выражает напряжение бокового распора (при пологом залегании), выраженное в долях от горного давления ($\gamma H = \sigma_1$).

В отсутствии анизотропии продольной и поперечной упругости, когда $E_1 = E_2$ (что в слоистых и трещиноватых углях маловероятно)

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\mu_{13}}{1-\mu_{23}}.$$

Еще менее вероятно, что $\mu_{13} = \mu_{23}$. Но если было бы так, то

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \beta = \frac{\mu}{1-\mu},$$

т.е. коэффициенту бокового распора по А.Н. Диннику.

В зоне возникновения горного удара, у обнаженной поверхности, $\sigma_3 = 0$, а деформация в направлении обнажения

$$\epsilon_{ав} = \frac{\sigma_1}{E_1}\mu_{13}^0 + \frac{\sigma_2}{E_2}\mu_{23}^0 \neq 0.$$

Памятуя, что в направлении оси 2 деформации "запрещены", в рассматриваемом случае $\frac{\sigma_1}{E_1}\mu_{12} = \frac{\sigma_2}{E_2}$. Тогда

$$\epsilon_{ав} = \frac{\sigma_1}{E_1}(\mu_{13}^0 + \mu_{12}\mu_{23}^0). \qquad (11.3)$$

Однако деформация $\epsilon_{ав}$ может быть и меньше критической, тогда разрушение в результате отрыва не возникает. Обнажение пласта угля будет устойчивым. Горный удар, согласно принятой упрощенной схеме, может начаться только при условии возникновения деформации растяжения в сторону обнажения, превышающей критическую

$$\epsilon_{кр} \leqslant \frac{\sigma_1}{E_1}(\mu_{13}^0 + \mu_{12}\mu_{23}^0). \qquad (11.4)$$

Это и есть условие возникновения горного удара.

Пласт угля насыщен газом. В глубине массива в присутствии газа уравнение (11.1) примет вид

$$\epsilon_{ав} = \frac{\sigma_1 - pm}{E_1}\mu_{13} - \frac{\sigma_2 - pm}{E_2} \times$$

$$\times (1 - \mu_{23}) = 0, \qquad (11.5)$$

а напряжение бокового распора

$$\sigma_2 = (\sigma_1 - pm)\frac{E_2\mu_{13}}{E_1(1-\mu_{23})} + pm, \qquad (11.6)$$

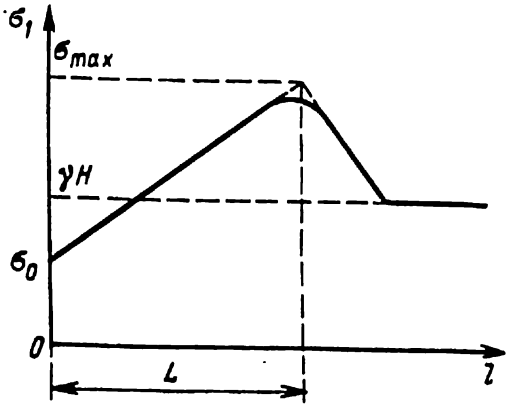


Рис. 11.2. Принципиальная схема распределения напряжений по оси σ_3 (см. рис. 11.1)

где p — давление свободного газа; m — относительная пористость угля, под которой понимается безразмерная величина, равная проекции суммы площадей пор и трещин на плоскость, в которой действует напряжение, отнесенная к единице площади в этой плоскости.

В условиях отжима, интенсивного трещинообразования, объединения кливажных и вновь образованных трещин в магистральные относительная пористость стремится к единице.

При рассмотрении опасности возникновения предельного состояния вблизи зоны свежеобнаженного забоя, где действуют деформации растяжения в сторону оси *3* (рис. 11.2), можно с минимальным запасом в сторону увеличения принять $m = 1$ и в дальнейшем не учитывать.

Памятуя, что в свежеобновленной зоне деформации в сторону обнажения не запрещены, получим

$$\epsilon_{ав} = \frac{\sigma_1 - p}{E_1}\mu_{13}^0 + \frac{\sigma_2 - p}{E_2}\mu_{23}^0 + \frac{p}{E_3^0} \neq 0.$$

Имея в виду, что в направлении оси *2* деформации "запрещены", в рассматриваемом случае $\frac{\sigma_1}{E_1}\mu_{12} = \frac{\sigma_2}{E_2}$. После преобразований с учетом принятых допущений, получим

$$\epsilon_{ав} = \frac{\sigma_1}{E_1}(\mu_{13}^0 + \mu_{12}\mu_{23}^0) + p\left(\frac{1}{E_3^0} - \frac{\mu_{13}^0}{E_1} - \frac{\mu_{23}^0}{E_2}\right). \qquad (11.7)$$

Таким образом, условие возникновения внезапного динамического проявления — выброса угля и газа в зоне свежеобновленного забоя (где миграция газа еще не развилась), запишется в виде уравнения

$$\frac{R_3^0}{E_3^0} = \epsilon_{кр} \leqslant \epsilon_{ав} = \frac{\sigma_1}{E_1}(\mu_{13}^0 + \mu_{12}\cdot\mu_{23}^0) + p\left(\frac{1}{E_3^0} - \frac{\mu_{13}^0}{E_1} - \frac{\mu_{23}^0}{E_2}\right). \qquad (11.8)$$

Если допустить, что в зоне выброса угля и газа упругие свойства

пласта E и μ не изменяются, то прекращение выброса, как указывалось выше, возможно при условии повышения прочности угля, снижения напряжений в пласте в связи со снижением горного давления, давления газа, контактных условий выбросоопасной пачки или при соответствующем совместном изменении горных условий до такой степени, при которых $\epsilon_{кр}$ становится бо́льшим $\epsilon_{ав}$.

Уравнение (11.8) можно рассматривать как обобщенное уравнение, описывающее возможность возникновения динамического явления в результате свежего обновления забоя в шахте. В отсутствии газа второй член уравнения обращается в нуль и мы приходим к уравнению (11.4) — условию возникновения горного удара.

Таким образом первый член уравнения (11.8) характеризует роль истинных деформаций, вызванных в пласте горным давлением* (с учетом концентрации вблизи горной выработки), а второй член уравнения характеризует роль газового давления в возникновении критических деформаций, но без учета сил трения в контакте уголь — порода или между отдельными пачками угля.

Уравнение (11.8) нуждается в экспериментальной проверке. Основная задача экспериментаторов заключается в том, чтобы определить на разных расстояниях от обнажения: прочность R и критическую деформацию $\epsilon_{кр}$, напряжения σ, упругие характеристики E и μ по осям *1*, *2* и *3* при сжатии и растяжении, а также газовое давление p. При этом напряжения и газовое давление надо определять как в глубине массива, так и в близких к обнажению зонах пласта. Современная измерительная аппаратура позволяет произвести нужные определения.

Рассмотрим теперь те же явления когда в глубине нетронутого разработкой массива действует гидростатическое давление ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$). Имея в виду, что уголь обладает анизотропией свойств, сохраним ранее принятые условия кроме неравенства напряженных состояний угля в глубине массива.

Анализ деформированного состояния угля в условиях равнокомпонентного напряженного состояния сжатия не представляет интереса, так как возникновение критических условий в таком случае практически невероятно.

В зоне свежеобновленного обнажения, когда миграция газа еще не развилась, условия возникновения динамического явления запишутся в виде

$$\epsilon_{кр} \leqslant \epsilon_{ав} = \sigma_1 \left(\frac{\mu_{13}^0}{E_1} + \frac{\mu_{23}^0}{E_2}\right) + p\left(\frac{1}{E_3^0} - \frac{\mu_{13}^0}{E_1} - \frac{\mu_{23}^0}{E_2}\right). \qquad (11.9)$$

Анализ уравнений (11.8) и (11.9) показывает, что роль газового фактора осталась неизменной, так как вторые члены уравнений одинаковы. В уравнении (11.9) первый член, характеризующий влияние напряженного состояния на развитие динамического явления, боль-

*При наличии тектонических напряжений их влияние должно быть учтено отдельным членом уравнения.

ше, чем такой же член уравнения (11.8), а это значит, что в этих условиях возникновение динамического явления более вероятно.

Надо полагать, что в зоне концентрации напряжений, вызванных ведением горных работ как и вблизи обнажений, существенное изменение σ_1, не может вызвать равного ему изменения σ_2 и σ_3 и поэтому расчет по (11.9) для этих зон должен приводить к маловероятной повышенной опасности динамического явления.

Эксперименты покажут, какое из полученных уравнений ближе к истине, но независимо от этого можно сделать следующие выводы:

в зоне старого обнажения при $p = 0$ возможен горный удар, если согласно уравнению (11.4) $\epsilon_{кр} \leqslant \epsilon_{ав}$;

при быстром обнажении забоя, когда $p \neq 0$, возможен внезапный выброс угля и газа в соответствии с уравнением (11.8), где значения σ_1 и p соответствуют зоне свежего обнажения;

применение в таких условиях струговой выемки в очистных забоях и комбайновой проходки роторными машинами может существенно снизить вероятность выброса, так как при малой ширине заходки и достаточном времени для миграции газа напряжения σ_1 и p, входящие в (11.8), существенно ниже таковых при комбайновой выемке в длинных забоях, а возможно и при применении стреловидных проходческих комбайнов;

если $\epsilon_{кр}$ в зоне ведения горных работ больше рассчитанного по уравнению (11.8), возникновение динамического явления невозможно.

Влияние сил трения (сцепления). В случае быстрого и полного обнажения пласта или отдельной пачки, роль сил трения, препятствующих деформациям прослойка у самого обнажения, близка к нулю и потому не учитывалась.

Иное положение складывается, например, при бурении скважин в сторону выбросоопасной пачки пласта. Хотя обнажение и является свежим, однако, смещению угля пачки в сторону обнажения (в скважину) препятствует значительное трение последней о соседние пачки угля, почву или кровлю пласта.

Упростим решение вопроса, приняв следующие допущения. Пусть в зоне старого обнажения, где $p = 0$, действует нормальное к пласту давление σ_0, а в зоне максимума опорного давления на расстоянии L от обнажения σ_{max} (см. рис. 11.2).

В первом приближении на участке $l \leqslant L$ принимаем прямолинейный закон нарастания σ_1. Тогда на расстоянии l от обнажения

$$\sigma_l = \sigma_0 + \frac{\sigma_{max} - \sigma_0}{L} l. \qquad (11.10)$$

Примем, что давление газа нарастает прямолинейно от нуля в зоне старого обнажения до p_{max} на расстоянии L*, тогда

$$p_l = p_{max} \frac{l}{L}. \qquad (11.11)$$

*Совпадение зоны максимума опорного давления с максимумом газового давления не обязательно.

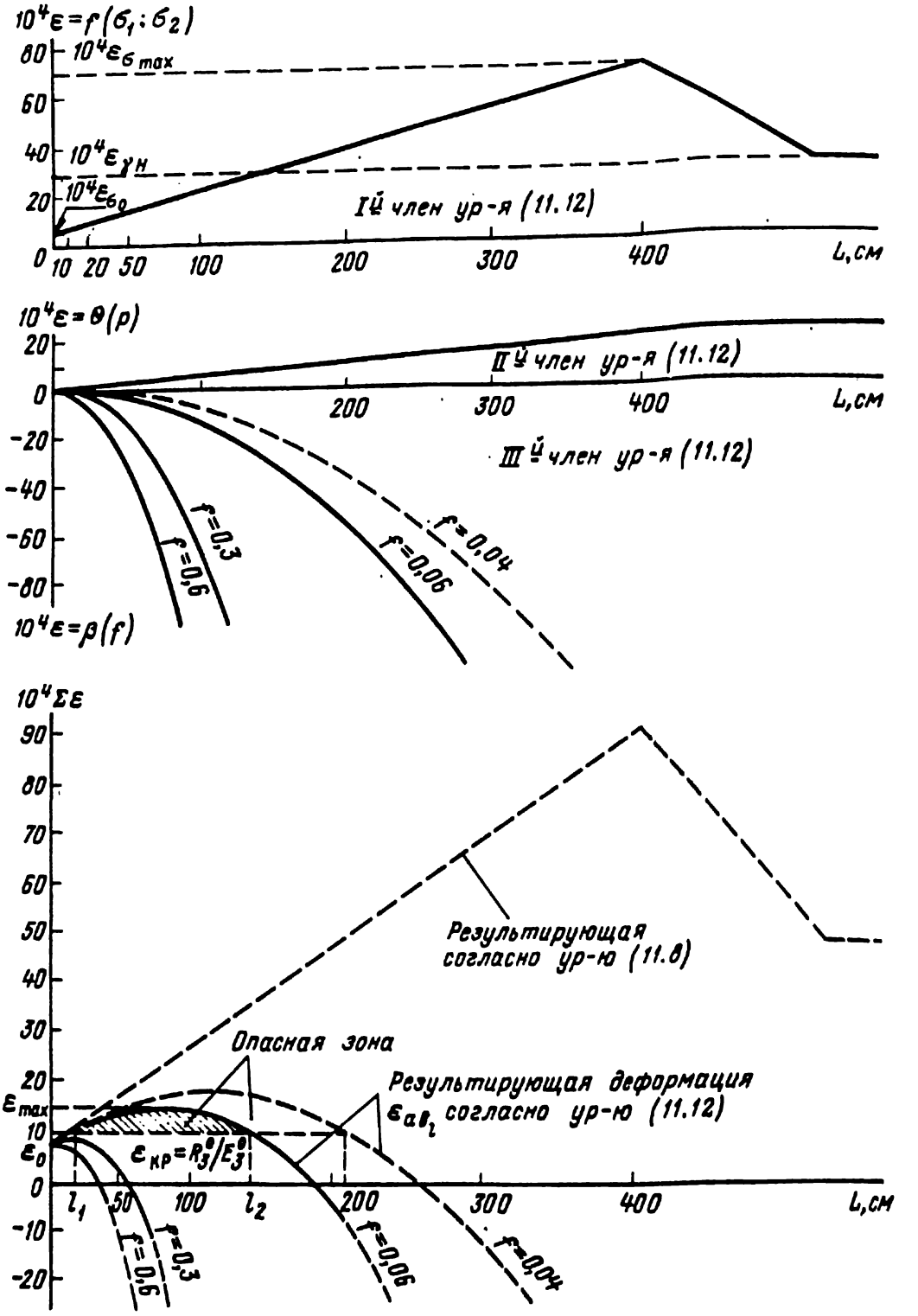


Рис. 11.3. Схема графического расчета предельных деформаций пласта в сторону обнажения

Удельные силы сцепления (трения), препятствующие смещению прослойка в сторону обнажения, под влиянием $\bar{\sigma}_l$ и p_l можно уподобить σ_3 и потому

$$\epsilon_{3l} = \frac{2\,\bar{\sigma}_l \cdot f \cdot l}{h\,E_3^0},$$

где $\bar{\sigma}_l$ — среднее нормальное давление на участке $0-l$; f — коэффициент сцепления (трения); h — мощность прослойка.

Таким образом, для участка $l < L$ уравнение (11.8) запишется в виде

$$\epsilon_{кр} = \frac{R_3^0}{E_3^0} \leqslant \frac{\sigma_l}{E_1}(\mu_{13}^0 + \mu_{12}\mu_{23}^0) + p_l\left(\frac{1}{E_3^0} - \frac{\mu_{13}^0}{E_1} - \frac{\mu_{23}^0}{E_2}\right) - \frac{2\bar{\sigma}_l f l}{h E_3^0}, \tag{11.12}$$

где R_3^0 — прочность растяжения выбросоопасной пачки угля по оси *3*; E_3^0 — модуль продольной деформации того же угля по оси *3* при растяжении (рассматривать следует только зону деформаций растяжения по оси 3).

Согласно принятому допущению

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_l + \sigma_0}{2}.$$

Три верхних графика (рис. 11.3) выражают влияние первого, второго и третьего членов уравнения (11.12) на значение результирующей относительной деформации пласта (например при бурении) в направлении обнажения (нижняя кривая). Имея в виду, что в глубине массива поперечная деформация "запрещена", отрицательное значение относительной деформации $\epsilon_{ав}$ не анализируется.

Из результирующего графика следует, что:

если $\epsilon_{кр} < \epsilon_0$, неизбежен горный удар до начала бурения;

если $\epsilon_{кр}$ больше ϵ_0 и больше ϵ_{max}, то работа выемочной, проходческой или буровой машины на участке $0-l_1$ к выбросу не приведет;

бурение на участке $l_1 - l_2$ при коэффициенте сцепления (трения) 0,06—0,04 неизбежно приведет к выбросу;

бурение на участке $l > l_2$ к выбросу не приведет;

если $\epsilon_{кр} > \epsilon_{max}$, выброс невозможен. Это в частности наблюдается при работе по крепким углям и при значительном сцеплении между пачками пласта.

Как показал анализ, бурение на выбросоопасный прослоек может привести к значительному обнажению пласта в каверне выброса и тогда дальнейшее развитие процесса может идти в более благоприятных для выброса условиях, лучше описываемых уравнением (11.8). Однако, начало такого процесса все же следует рассматривать с позицией уравнения (11.12).

По-видимому было бы полезно создать дистанционно управляемый буровой станок, работающий с противодавлением, равным или большим p. В этом случае, при постепенной дегазации скважины, пробуренной на выбросоопасный прослоек, опасность начала динамического явления может снизиться в сторону пределов, определяемых по уравнению (11.4).

Предлагаемые принципы аналитических решений основаны на ряде упрощающих допущений, многие из которых приемлемы только для разработки принципиальной схемы решения.

Использование современных средств измерений напряженного или деформированного состояния массивов и вычислительной техники

может значительно повысить достоверность результатов оценки условий возникновения динамических явлений, в том числе горных ударов или внезапных выбросов.

Опасность разрушения угля вблизи обнажений усиливается при отслоении мощной кровельной пачки коренных пород, производстве взрывных работ в сравнительной близости и даже работой ударным инструментом.

Для перечисленных возбудителей характерно волновое распространение дополнительных напряжений в пласте или разгрузка напряжений.

Волновое изменение напряженного, а значит и деформированного состояния пласта, должно отразиться на его устойчивости, хотя средние значения напряжений вблизи обнажения не изменятся. Мгновенные значения напряжений изменяются до $\sigma_{ср.l} \pm \sigma_д$, где $\sigma_{ср.l}$ — среднее значение напряжения растяжения в сторону обнажения на расстоянии l, а $\sigma_д$ — динамическое изменение этого напряжения во фронте волны.

Еще сильнее проявятся изменения напряженного состояния пласта, например, при коренной посадке кровли в очистном забое или при отслоении мощной пачки основной кровли. В таком случае напряженное состояние пласта, во фронте волны, станет равным $\sigma^н_{ср.l} \pm \sigma'_д$, и только потом, когда волновые колебания успокоятся, установится новое среднее напряжение $\sigma^н_{ср.l}$. Согласно волновой механике динамическое изменение напряженного состояния пласта $\sigma'_д$ должно быть равным $\sigma_{ср.l} - \sigma^н_{ср.l}$, а колебание напряженного состояния будет в границах от $\sigma_{ср.l}$ до $2\sigma^н_{ср.l} - \sigma_{ср.l}$, с затуханием до $\sigma^н_{ср.l}$.

Влияние указанных изменений напряженного и деформированного состояний пласта можно проследить по тому же уравнению (11.12), но при новых видах напряженного состояния.

Действительно, при коренной посадке кровли в очистном забое среднее значение напряженного и деформированного состояния пласта вблизи обнажения снижается, а во фронте волны напряжений (деформаций) оно снижается вдвое и только после успокоения колебаний массива оно становится равным новому среднему. При этом первый и третий члены уравнения (11.12), зависящие от напряженного состояния пласта, уменьшаются, а это значит, что уменьшаются силы сцепления (трения) опасной пачки угля о боковые породы или соседние пачки угля. Второй член уравнения, зависящий от газового давления p, останется неизменным. В этих новых условиях не исключено, что газовое давление окажется достаточным для преодоления прочности угля при растяжении и сил сцепления (трения) опасной пачки о соседние пачки угля или породы и возникнут условия для развития динамического явления там, где до коренной посадки кровли их не было.

Напомним, что прочность угля при растяжении во много раз меньше напряжений растяжения, вызываемых газовым давлением. Если бы не было сил трения между пачками угля, вызванных давлением вышележащих пород, то все угли газовых шахт давали бы выбросы.

В случае расслоения мощной пачки коренных пород кровли происходит значительное увеличение напряжений угля вблизи обнажения, что приводит к увеличению первого и третьего членов уравнения (11.12) при неизменном значении второго члена уравнения. Во фронте волны приращение напряжений вдвое выше среднего приращения и потому значительный рост напряжений и, значит, относительных деформаций (если не возникло заклинивание пласта плавно опустившейся кровлей), может вызвать в призабойной части опасной пачки угля столь высокие деформации растяжения, что выброс угля станет неизбежным.

Таким образом, под влиянием волновых изменений напряженного и деформированного состояния пласта как при коренной посадке кровли, так и при отслоении мощной пачки коренных пород возможно существенное увеличение деформаций растяжения по оси *3* опасной пачки угля и инициирование выброса.

Дальнейшее развитие выброса или горного удара будет зависеть от потенциальной энергии разрушаемого угля (породы), а также энергии высвобождающегося сорбированного газа. Однако, эти вопросы выходят за рамки настоящей монографии.

Независимо от условий нагружения массива угля (статического или волнового) сохраняется условие возникновения динамического явления

$$\epsilon_{кр} = \frac{R_3^0}{E_3^0} \leqslant \epsilon_{ав}.$$

Изученность влияния вида напряженного состояния на свойства горных пород позволяет моделировать их поведение в натурных условиях.

Методы расчета с использованием экспериментально установленных показателей прочности пласта, его упругих характеристик, выяснение картин распределения напряжений или деформаций в зоне ведения горных работ позволяют оперативно моделировать натурные условия по результатам лабораторных испытаний углей и горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кузнецов В.Д.* Физика твердого тела.Т. I. Томск, "Красное Знамя", 1937.

2. *Койфман М.И.* К вопросу о сущности понятия твердость. — Доклады АН СССР, 1941, т. XXV, № 9, с. 824—827.

3. *Исследования* прочности и деформируемости горных пород / А.И. Берон, Е.С. Ватолин, М.И. Койфман и др. М., Наука, 1973.

4. *Койфман М.И.* Главный масштабный эффект в горных породах и углях. — В кн.: Проблемы механизации горных работ. М., изд-во АН СССР, 1963, с. 39—56.

5. *Койфман М.И.* Скоростной комплексный метод определения механических свойств горных пород. — В кн.: Механические свойства горных пород. М., изд-во АН СССР, 1963, с. 73—84.

6. *Койфман М.И.* Инверсия водно-физических изменений прочности пород и углей в динамических условиях разрушения. — В кн.: Теория и практика разрушений углей и горных пород. М., изд. ИГД им. А.А. Скочинского, 1978,с. 23—24.

7. *Койфман М.И., Сенатская Г.С., Соломина И.А.* Способ определения хрупкости материалов. Авторское свидетельство СССР № 306393 от 11.06.71 — Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, 1971, № 19, с. 155.

8. *Свойства* горных пород и методы их определения / Е.И. Ильницкая, Р.И. Тедер, Е.С. Ватолин и др. М., Недра, 1969.

9. *Методика* определения прочности горных пород на образцах полуправильной формы / А.И. Берон, М.И. Койфман, С.Е. Чирков и др. М., изд. ИГД им. А.А. Скочинского, 1976.

10. *Угли* бурые, каменные и антрацит. Методы определения прочности на растяжение и одноосное сжатие. ГОСТ 22450—77. М., Изд-во стандартов, 1977.

11. *Филоненко-Бородич М.М.* Механические теории прочности. М., МГУ, 1961.

12. *Писаренко Г.С., Лебедев А.А.* Сопротивления материалов деформированию и разрушению при сложном напряженном состоянии. Киев, Наукова думка, 1969.

13. *Ставрогин А.Н.* Прочность и деформирование горных пород. Автореф. дисс. на соиск. учен. степени д-ра техн. наук. М., СФТГП ИФЗ АН СССР, 1968.

14. *Чирков С.Е.* Влияние масштабного фактора на прочность углей. М., Наука, 1969.

15. *Докукин А.В., Чирков С.Е., Норель Б.К.* Моделирование предельно напряженного состояния угольного пласта. М., Наука, 1981.

16. *Чечулин Б.Б.* Масштабный фактор и статистическая природа прочности металлов. М., Металлургиздат, 1963.

17. *Болотин В.В.* Статистические методы в строительной механике. М., Стройиздат, 1965.

18. *Фисенко Г.Л.* Методы количественной оценки структурных ослаблений массива горных пород в связи с анализом их устойчивости. — В кн.: Современные проблемы механики горных пород. Л., Наука, 1972.

19. *Чирков С.Е.* Исследование влияния трещиноватости на прочность горных пород. — В кн.: Технология и механизация разработки угольных месторождений. Научные сообщения. М., изд. ИГД им. А.А. Скочинского, 1971, вып. 81, с. 60—65.

20. *Мохначев М.П., Присташ В.В., Соломина И.А.* Методика определения и прогнозирования прочности и деформируемости горных пород при различных скоростях приложения нагрузок. М., изд. ИГД им. А.А. Скочинского, 1982.

21. *Мохначев М.П., Присташ В.В.* Динамическая прочность горных пород. М., Наука, 1982.

22. *Каталог* механических свойств горных пород при широкой вариации видов напряженного состояния и скорости деформирования. / А.Н. Ставрогин, Е.Ю. Семенова, В.Ф. Авксентьева и др. Л., изд. ВНИМИ, 1976.

23. *Михалюк А.В.* Горные породы при неравномерных динамических нагрузках. Киев, Наукова думка, 1980.

24. *Справочник* физических констант. М., Мир, 1969.

25. *Мохначев М.П.* Усталость горных пород. М., Наука, 1979.

26. *Мохначев М.П., Громова Н.В.* Исследование разогрева крепких горных пород в процессе их пульсирующего нагружения. — В кн.: Горнотехнологические свойства пород и прикладные вопросы геотехнической механики. М., изд. ИГД им. А.А. Скочинского, 1974, вып. 125, с. 59—63.

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

28. *Бучнев В.К., Александров Е.В.* Разработка научных основ для создания бурильных и отбойных машин ударного, ударно-поворотного и ударно-вращательного действия с электроприводом. М., изд-во АН СССР, 1959.

29. *Тимошенко С.П.* Теория упругости. М., ОНТИ, 1937.

30. *Власов О.Е., Смирнов С.А.* Основы дробления горных пород взрывом. М., изд-во АН СССР, 1962.

31. *Ватолин Е.С., Григорьев В.Л., Архипов В.П.* Влияние скорости приложения нагрузки на прочность горных пород при динамическом внедрении пуансона. — Технология добычи угля подземным способом. М., 1972, № 3, с. 10—11.

32. *Анцыферов М.С., Константинова А.Г., Переверзев Л.Б.* Сейсмоакустические исследования в угольных шахтах. М., изд-во АН СССР, 1960.

33. *Александров Е.В., Соколинский В.Б.* Исследование процесса ударного взаимодействия породы и инструмента. М., изд. ИГД им. А.А. Скочинского, 1965.

34. *Александров Е.В., Флавицкий Ю.В., Хомяков К.С.* Определение импульсов напряжения при продольном соударении упругих стержней произвольной геометрической формы. М., изд. ИГД им. А.А. Скочинского, 1965.

35. *Мюллер Л.* Инженерная геология. Механика скальных массивов. М., Мир, 1971.

36. *Рейнер М.,* Реология. М., Наука, 1965.

37. *Крылов Н.А., Калашников В.А., Полищук А.М.* Радиотехнические методы контроля качества железобетона. Л.-М., Стройиздат, 1966.

38. *Великосельский О.А.* Физико-механические свойства медно-никелевых руд Талнахского рудного узла. — В кн.: Медно-никелевые руды Талнахского узла. Л., изд. НИИГА, 1972.

39. *Волков С.Д.* Статистическая теория прочности. М., — Свердловск, Машгиз, 1960.

40. *Ужик Г.В.* Сопротивление отрыву и прочность металлов. М., Академиздат СССР, 1950.

41. *Берон А.И.* Об условиях возникновения горных ударов и внезапных выбросов угля и газа. — В кн.: Теория и практика разрушения углей и горных пород. М., изд. ИГД им. А.А. Скочинского, 1978, с. 23.

42. *Докукин А.В.* Основные проблемы горной науки. М., Недра, 1979.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ИЗМЕНЕНИЕ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА НАГРУЗОК ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНЫХ ПОРОД

Размеры образцов			Разрушающая нагрузка, даН	Предел прочности при одноосном сжатии, даН/см^2	Величина относительного эксцентриситета
диаметр, см	высота, см	сечение см^2			
1	2	3	4	5	6
1. Известняк Подмосковного месторождения					
3,01	2,94	7,05	1500	212	0,036
3,01	2,98	7,05	1380	196	0,044
3,02	3,02	7,1	2000	282	0,039
2,99	3,14	7,0	1530	218	0,40
3,00	2,80	7,0	1775	254	0,032
2,95	2,87	7,0	1700	243	0,012
2,95	2,84	7,0	1640	234	0,104
3,04	2,95	7,0	2210	314	0,025
3,00	2,96	7,0	1600	228	0,113
2,94	2,85	7,0	1410	200	0,036
3,00	3,00	7,0	1710	245	0,078
2,95	3,08	6,9	1775	173	0,123
2,97	2,97	6,9	1510	230	0,069
3,00	2,88	7,0	1970	282	0,018
2,95	2,85	6,8	1120	165	0,127
2,83	2,95	6,3	1350	214	0,061
2,82	2,74	6,25	1200	192	0,108
2,98	2,98	7,0	1580	225	0,085
3,00	2,85	7,0	1410	200	0,053
3,05	3,05	7,3	2430	324	0,043
Радиус сферы опорной пяты пресса 200 мм					
3,04	3,07	7,2	2000	278	0,011
2,95	2,95	6,85	2430	354	0,014
3,05	2,83	7,3	1950	268	0,113
2,95	3,06	6,85	1510	220	0,112
4,14	4,5	13,4	5000	373	0,055
4,14	4,12	13,4	3500	262	0,022
4,14	4,15	13,4	2850	212	0,068
4,14	4,14	13,4	4480	334	0,003
5,70	5,95	25,5	5800	228	0,03
5,70	5,98	25,5	6000	235	0,143
5,70	6,03	25,5	3800	150	0,125
5,70	5,96	25,5	6000	235	0,200
Радиус сферы опорной пяты пресса 100 мм					
2,95	2,95	6,85	1400	205	0,029
3,02	2,84	7,2	2030	282	0,021
2,92	2,88	6,7	1200	179	0,083
2,96	2,95	6,9	1970	286	0,029
4,14	4,10	13,4	3710	277	0,04
4,18	4,16	13,4	4000	298	0,04
4,14	4,06	13,4	5000	373	0,036

Продолжение приложения 1

1	2	3	4	5	6
4,14	4,04	13,4	4240	316	0,026
5,70	5,95	25,5	4000	—	0,053
5,70	5,85	25,5	4000	—	0,054
5,70	5,90	25,5	4000	—	0,057
		Радиус сферы опорной пяты пресса 50 мм			
2,95	2,90	6,85	1270	185	0,075
2,95	2,94	6,85	1280	187	0,064
2,95	2,96	6,85	1370	200	0,07
4,14	4,14	13,4	3250	242	0,012
4,14	4,21	13,4	2980	222	0,02
4,15	4,22	13,4	1940	145	0,076
4,14	4,20	13,4	2350	175	0,0045
5,70	5,88	25,5	4640	182	0,118
5,70	5,95	25,5	4220	165	0,085
5,70	5,90	25,5	10000	392	0,01
		Радиус сферы опорной пяты пресса 25 мм			
2,80	2,76	6,15	1990	324	0,041
2,96	2,96	6,9	1680	245	0,026
2,85	2,85	6,35	1210	190	0,0144
2,94	2,97	7,0	1570	224	0,045
4,14	4,05	13,4	6000	450	0,01
4,14	4,15	13,4	4760	355	0,114
4,14	4,16	13,4	4300	320	0,22
4,17	4,20	13,4	5010	373	0,026
5,70	5,98	25,5	4000	—	0,066
5,70	5,90	25,5	4000	—	0,061
5,70	5,80	25,5	4000	—	0,095
		Радиус сферы опорной пяты пресса 10 мм			
2,97	2,94	7,0	1780	290	0,058
2,82	2,80	6,2	1230	199	0,076
2,82	2,80	6,2	1550	250	0,107
3,00	2,70	7,05	1320	187	0,114
4,14	4,12	13,4	4250	314	0,106
4,14	4,06	13,4	3000	222	0,039
4,14	4,14	13,4	3420	255	0,074
4,14	4,18	13,4	4000	298	0,104
5,70	5,90	25,5	9000	358	0,024
5,70	5,85	25,5	7000	274	0,064
5,70	6,00	25,5	4900	192	0,087
5,70	6,25	25,5	7000	275	0,076
		Антрациты Донбасса			
		Радиус сферы опорной пяты пресса 200 мм			
4,38	5,01	15,1	3000	199	0,052
4,38	4,50	15,1	6700	440	0,032
4,38	4,40	15,1	3000	199	0,061
4,38	4,45	15,1	5240	247	0,01

Продолжение приложения 1

1	2	3	4	5	6
Образцы угля полуправильной формы					
	1,58	1,82	578	320	0,10
	1,7	2,4	895	370	0,093
	1,7	2,25	870	385	0,087
	1,32	2,03	750	370	0,046
	4,0	10,9	2500	230	0,017
	4,0	11,9	2920	245	0,10
	4,0	18,3	2870	156	0,047
	4,0	16,0	4300	270	0,080
	8,0	64	7950	124	0,023
	8,0	64	7600	119	0,044
	8,0	57,6	7250	126	0,074

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ПРЕДЕЛЫ ПРОЧНОСТИ УГЛЕЙ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ РАСКАЛЫВАНИЯ ОБРАЗЦОВ РАЗЛИЧНОГО РАЗМЕРА

Размеры образцов, см		Площадь раскола, $см^2$	Разрушающее усилие, даН	Предел прочности на растяжение, $даН/см^2$	Направление плоскости раскола
высота	длина				
1	2	3	4	5	6
1. Тувинские угли					
Пласт "Улуг" № 2, верхняя пачка					
1,3	10,0	13,0	86	6,6	Перпендикулярно к слоистости
1,3	9,5	12,3	56	4,7	То же
1,3	2,0	2,6	12	4,6	"
1,3	2,1	2,72	18	6,6	"
1,3	1,5	1,95	5	2,5	"
1,3	2,2	2,86	19	6,6	"
1,3	9,5	12,3	84	6,8	"
1,3	8,0	10,4	87	8,3	"
1,3	9,0	11,7	62	5,3	"
1,3	2,2	2,86	9	3,1	"
1,3	2,2	2,86	6	2,1	"
1,3	1,3	1,69	2,0	1,2	"
1,3	1,3	1,69	8	4,7	"
1,3	1,3	1,69	8	4,7	"
1,3	1,4	1,82	17	9,3	"
1,3	1,4	1,82	8	4,7	"
1,3	1,4	1,82	18	9,9	"
1,3	1,4	1,82	11	6,0	"
1,3	1,4	1,82	5	2,7	"
1,3	1,3	1,69	16	9,4	"
5,9	9,5	56	194	3,5	"
5,9	8,5	50	210	4,2	"
5,9	14,0	82	260	3,2	"
5,9	10,0	59	256	4,3	"
5,9	7,0	41	166	4,0	"
6,6	11,0	73	387	5,3	"
6,6	10,4	69	387	5,6	"
6,6	11,0	73	423	5,8	"

Продолжение приложения 2

1	2	3	4	5	6
6,6	5,0	33	157	4,8	То же
6,6	5,5	36	200	5,5	"
6,6	5,2	34	157	4,6	"
6,6	6,0	39,6	148	3,7	"
12,5	22,0	275	730	2,7	"
12,0	22,0	264	460	1,7	"
12,0	9,5	114	180	1,6	"
12,5	10,0	125	256	2,0	"
11,5	10,0	115	243	2,1	"
		Пласт "Улуг" № 2, нижняя пачка			
1,6	13,5	21,6	142	6,6	"
1,6	10,0	16,0	92	5,6	"
1,6	6,9	11,0	52	4,7	"
1,6	7,3	11,7	73	6,2	"
1,6	3,1	4,95	8	1,62	"
1,6	3,1	4,95	19	3,8	"
1,6	3,1	4,95	7	1,4	"
1,6	3,1	4,95	13	2,6	"
1,6	1,6	2,55	24	9,4	"
1,6	1,5	2,4	20	8,3	"
1,6	1,6	2,55	10	3,9	"
1,6	9,5	15,2	111	7,3	"
1,6	5,8	9,28	21	2,2	"
1,6	6,0	9,6	29	3,0	"
1,6	3,0	4,8	32	6,7	"
1,6	3,1	4,95	24	4,8	"
1,6	3,0	4,8	18	3,7	"
1,6	1,5	2,4	10	4,1	"
1,6	1,5	2,4	18	7,5	"
1,6	6,1	9,75	32	3,3	"
1,6	3,3	5,28	42	8,0	"
1,6	3,3	5,28	45	8,5	"
1,6	1,6	2,55	4	1,5	"
1,6	1,6	2,55	5	2,0	"
1,6	2,9	4,75	18	3,7	"
1,6	1,6	2,55	20	7,8	"
1,6	4,3	6,9	27	3,9	"
1,6	1,8	2,88	20	7,0	"
1,6	1,8	2,88	20	7,0	"
1,6	4,37	7,0	43	6,2	"
1,6	3,25	5,2	48	9,2	"
1,6	1,91	3,05	10	3,2	"
1,6	3,2	5,1	28	5,5	"
1,6	2,0	3,2	20	6,2	"
3,9	14	54,5	216	4,0	"
3,9	14	54,5	198	3,6	"
3,9	13,1	51	136	2,7	"
3,9	13,5	52,7	162	3,1	"
3,9	3,8	15,2	47	3,1	"
3,9	3,5	13,6	65	4,8	"
3,9	3,6	14,0	75	5,3	"
3,9	3,8	15,2	54	3,5	"

Продолжение приложения 2

1	2	3	4	5	6
3,9	4,0	15,6	56	3,6	То же
3,9	4,3	16,75	83	5,0	"
3,9	4,0	15,6	81	5,2	"
3,9	3,8	15,2	64	4,2	"
3,9	3,8	15,2	88	5,8	"
3,9	3,9	15,2	79	5,2	"
3,9	3,6	14,0	49	3,5	"
3,9	4,1	16,0	78	4,9	"
3,9	2,34	9,1	61	6,7	"
3,9	2,28	8,9	68	7,6	"
4,0	13,3	53,2	358	6,7	"
4,0	12,0	48	309	6,3	"
4,0	11,2	45,3	294	6,5	"
4,0	10,5	42,0	215	5,1	"
4,0	4,0	16,0	42	2,6	"
4,0	4,0	16	52	3,2	"
4,0	4,0	16	55	3,4	"
4,0	3,9	15,6	68	4,3	"
4,0	3,6	14,4	44	3,0	"
4,0	3,5	14,0	45	3,2	"
4,0	3,7	14,8	56	3,8	"
4,0	11,05	44,2	124	2,8	"
4,0	6,5	25,9	44	1,7	"
4,0	10,7	42,8	103	2,4	"
4,0	7,95	31,6	180	5,7	"
4,0	9,25	37,0	100	2,7	"
7,5	11,15	83,5	242	2,9	"
7,5	13,1	98,0	352	3,6	"
7,5	11,05	83,0	340	4,1	"
7,5	13,15	98,5	177	1,8	"
7,5	12,1	91,0	173	1,9	"
7,5	12,7	95,0	247	2,6	"
7,5	12,3	92	92	1,0	"
7,5	12,0	90	266	3,0	"
7,5	10,5	79	188	2,4	"
7,5	7,2	54	86	1,6	"
7,5	7,1	53,5	72	1,3	"
7,5	5,6	42,0	40	0,9	"
7,5	7,5	56,0	68	1,2	"
6,8	12,0	81,6	218	1,8	"
6,8	7,0	47,5	47	1,0	"
7,3	11,5	84	132	1,6	"
		2. Угли Кузнецкого бассейна			
		Пласт Красногорский			
2,7	9,3	25	660	26,4	Перпендикулярно к слоистости и основной трещиноватости (кливажу)
2,7	8,5	23	600	26	
2,7	7,4	20	490	24,5	
2,7	7,8	21	440	21	
2,7	5,9	16	220	13,7	То же
2,7	5,2	14	230	16,4	"
2,7	2,6	7	118	16,8	"

Продолжение приложения 2

1	2	3	4	5	6
2,7	3,3	9	220	24,5	То же
2,7	5,9	16	420	26,3	"
7,3	8,5	62	900	14,5	"
7,3	6,3	46	870	19	"
7,3	6,3	46	470	10,2	"
7,3	5,35	39	460	11,8	"
7,3	4,4	32	330	10,3	"
9,8	15,3	150	1050	7,0	"
9,8	10,2	100	670	6,7	"
9,8	9,4	92	1120	12,2	"
9,8	9,5	93	720	7,7	"
9,8	9,6	94	960	10,2	"
9,8	4,3	42	390	9,3	"
9,8	7,45	73	500	6,9	"
4,8	11,5	55	336	6,1	Параллельно к основной трещиноватости
4,8	10,4	50	276	5,5	
4,8	9,2	44	216	4,9	
4,8	11,3	54	212	3,9	То же
4,8	9,0	43	142	3,3	"
4,8	6,05	29	134	4,6	"
4,8	6,25	30	218	7,2	"
8,3	13,2	110	210	1,9	"
8,3	12,7	105	264	2,5	"
8,3	13,0	108	430	4,0	"
8,3	9,9	82	246	3,0	"
8,3	9,6	80	320	4,0	"
8,3	8,0	66	270	4,1	"
8,3	7,2	60	150	2,5	"
8,3	7,2	60	330	5,5	"
8,3	7,6	63	386	6,1	"
15,1	14,4	218	372	1,7	"
15,1	14,4	217	500	2,3	"
15,1	13,0	196	236	1,2	"
15,1	12,6	190	362	1,9	"
15,1	9,9	150	346	2,3	"
15,1	9,7	146	460	3,2	"
18,4	15,8	292	498	1,7	"
19,8	14,8	293	382	1,3	"
			Пласт XI, пачка IV		
3,4	7,8	24	276	15	Перпендикулярно к слоистости и под 45° к основной трещиноватости
3,4	8,0	27,2	375	14	
3,4	8,0	27,2	242	8,9	
3,4	8,4	28,6	402	14	
3,4	3,5	11,9	170	14,3	То же
3,4	3,4	11,6	178	15,4	"
3,4	3,5	11,9	177	14,8	"
3,4	3,1	10,5	240	22,8	"
3,4	3,3	11,2	234	20,8	"
3,4	3,2	10,8	154	14,2	"
3,4	3,2	10,8	164	15	"
3,4	2,2	7,5	108	14,4	

Продолжение приложения 2

1	2	3	4	5	6
3,4	2,6	8,85	110	12,4	То же
3,4	8,0	27,2	270	9,9	"
3,3	6,8	22,4	180	8,0	Перпендикулярно к кливажу
3,3	6,0	19,8	330	16,7	
3,3	5,5	18,2	235	12,9	То же
3,3	2,9	9,6	144	15,0	"
3,3	2,5	8,3	122	14,7	"
3,3	3,1	10,2	177	17,3	"
3,3	3,2	10,6	85	8,0	Параллельно к кливажу
3,3	2,5	8,25	130	15,8	
3,3	2,7	8,94	63	7,0	То же
3,3	2,3	7,6	110	14,5	"
3,4	12,0	40,8	398	9,8	Перпендикулярно к кливажу
3,4	7,5	25,6	175	6,8	
3,4	7,5	25,6	97	3,8	То же
3,4	6,0	20,5	154	7,6	"
3,4	2,7	9,25	88	9,5	"
3,4	3,5	11,9	118	9,9	Параллельно к кливажу
3,4	2,7	9,25	114	12,3	
3,4	2,2	7,5	95	12,7	То же
3,4	2,7	9,25	92	10	"
3,4	2,3	7,85	84	10,7	"
3,4	2,7	9,25	77	8,3	"
3,4	2,7	9,25	64	6,9	"
3,4	2,8	9,54	83	8,7	"
3,4	1,8	6,1	53	8,7	"
3,5	11	38,6	242	6,3	"
3,5	8	28	230	8,2	"
3,5	6,5	22,7	264	11,6	"
3,4	3,5	11,9	123	10,3	Перпендикулярно к кливажу
3,4	2,5	8,5	82	9,6	
3,4	5,8	19,8	137	6,9	Параллельно к кливажу
3,4	3,2	10,9	74	6,8	Перпендикулярно к кливажу
3,4	7,5	22,2	251	11,3	Параллельно к кливажу
3,4	3,5	11,9	102	8,6	Перпендикулярно к кливажу
3,4	2,8	9,55	100	10,5	
3,4	1,5	5,1	39	7,8	То же
3,4	3,3	11,2	80	7,1	Параллельно к кливажу
1,8	0,67	1,2	20	16,9	Перпендикулярно к кливажу
1,8	2,9	5,2	82	15,8	
1,8	2,0	4,0	54	13,6	То же
1,8	0,55	1,0	11	11	"
1,8	1,11	2,0	20	10	"
1,8	5,05	9,1	83	9,1	Перпендикулярна к слоистости и основной трещиноватости (кливажу).
1,8	7,1	12,8	128	10	
1,8	4,7	8,4	56	6,7	
1,8	1,33	2,4	13	5,5	
1,8	0,61	1,1	6	5,5	То же
1,8	1,67	3,0	13	4,3	"

Продолжение приложения 2

1	2	3	4	5	6
3,4	2,7	9,2	47	5,1	То же
3,4	3,3	11,2	54	4,8	"
3,4	10,0	34	220	6,5	"
3,4	10,6	36	316	8,8	"
3,4	13,0	44	405	9,2	"
1,8	0,55	1,0	19	19	Перпендикулярна к слоистости и параллельна к основной трещиноватости
1,8	0,67	1,2	22	18,2	
1,8	2,2	4,0	64	16,0	
1,8	2,0	3,6	55	15,3	
1,8	2,2	4,0	56	14,0	
1,8	1,55	2,8	34	12,1	То же
1,8	2,0	3,6	43	12,0	"
1,8	0,89	1,6	16	10,0	"
1,8	2,8	5,0	45	9,0	"
1,8	4,45	8,0	72	9,0	"
1,8	3,1	5,6	45	8,0	"
1,8	4,2	7,6	60	7,9	"
1,8	5,1	9,2	75	8,2	"
1,8	5,55	10,0	82	8,2	"
1,8	5,3	9,6	67	7,0	"
1,8	0,89	1,6	10	6,3	"
1,8	3,78	6,8	38	6,0	"
1,8	3,34	6,0	34	5,6	"
1,8	3,55	6,4	32	5,0	"
1,8	1,11	2,0	8	4,0	"
1,8	3,9	7,0	23	3,3	"
3,4	4,45	8,0	29	3,6	"
3,4	2,83	9,6	47	4,9	"
3,4	3,2	10,8	51	4,7	"
3,4	4,1	14,0	79	5,6	"
3,4	52	17,6	134	7,6	"
3,4	7,35	25	165	6,6	"
3,4	8,5	29	200	6,9	"
3,4	7,65	26	159	6,1	"
3,4	6,2	21	109	5,2	"
3,4	6,8	23,2	77	3,3	"
3,4	7,4	25,2	81	3,2	"
3,4	10,3	35	206	5,9	"
3,4	11,8	40	224	5,6	"
3,4	10,9	37	130	3,5	"
3,4	11,5	39	350	9,0	"
3,4	12	41	189	4,6	Перпендикулярна к слоистости и основной трещиноватости
3,4	7,35	25	238	9,5	
3,4	11,5	39	312	8,0	
3,4	12,9	44	318	7,2	

Пласт XXVII Красногорского разреза

15	15	150	225	0,66	Параллельно к основному кливажу
6,2	6,7	41,7	125	3,0	
6,2	6,5	40,8	145	3,5	То же
6,3	6,3	39,8	77	1,95	"
6,3	3,0	18,9	85	4,5	"
1,75	7,5	13,2	73	5,5	"

Продолжение приложения 2

1	2	3	4	5	6
1,75	6,0	10,5	47	4,5	То же
1,8	7,0	12,6	37	2,94	”
1,8	7,0	12,6	37	3,94	”
1,8	4,45	8,0	50	6,3	”
6,2	9,2	56,8	307	5,4	Перпендикулярно к слоистости и основной трещиноватости
6,2	2,8	17,4	105	6,0	
6,2	6,4	39,7	115	2,9	
6,2	6,4	39,7	135	3,4	
1,75	3,2	5,6	58	10,3	То же
1,75	3,7	6,5	86	13,2	”
1,75	5,8	10,0	73	7,3	”
1,75	7,3	12,8	90	7,0	”
1,75	1,8	3,15	39	12,3	”
1,75	2,7	4,7	61	13,0	”
6,2	6,2	38,5	147	3,8	”
6,2	7,0	43,4	292	6,7	”
6,2	5,5	34,0	143	4,2	”
6,2	6,5	40,4	222	5,5	”
6,2	6,2	38,5	140	3,6	”
6,3	5,0	31,6	17	0,54	Параллельна к слоистости
6,3	2,6	16,3	73	4,5	
6,2	6,4	39,7	52	1,3	То же
1,75	2,0	3,5	20	5,7	”
1,75	1,7	3,0	20	6,7	”
1,8	1,8	3,2	14	4,4	”
1,8	7,4	15,3	59	4,4	”
1,8	2,6	4,6	24	5,2	”
1,8	2,5	4,5	22	4,9	”
1,8	2,1	3,8	20	5,3	”
1,8	2,8	5,0	30	6,0	”
1,8	3,2	5,7	42	7,4	”
			Пласт XII, нижняя пачка		
1,48	3,86	5,73	123	22	Перпендикулярна к слоистости и основной трещиноватости
1,48	3,80	5,63	158	28	
1,48	2,40	3,55	80	23	
1,48	2,5	3,70	66	18	
1,48	2,7	4,0	116	29	То же
1,48	1,2	1,78	33	19	”
1,48	1,4	2,07	57	27	”
1,48	1,3	1,93	45	23	”
1,48	1,3	1,93	50	26	”
1,40	7,1	9,92	203	20	”
1,38	4,10	5,67	155	27	”
1,38	2,80	3,86	83	21	”
1,40	2,70	3,78	79	21	”
1,30	1,20	1,56	45	29	”
1,40	3,00	4,20	123	29	”
4,20	6,40	27,0	121	5	”
4,20	7,50	31,5	415	13	”
4,20	8,10	34,0	390	11	”
4,20	4,30	17,7	210	12	”
4,15	8,50	35,1	364	10	”

Продолжение приложения 2

1	2	3	4	5	6
9,30	14,7	137	1020	7	То же
9,30	13,8	128	675	5	»
10,0	17,0	170	740	4	»
1,35	5,9	7,97	152	19	»
1,25	2,8	4,52	41	12	»
1,25	2,8	3,52	43	12	»
1,35	3,0	4,05	92	23	»
1,3	3,0	3,90	92	24	»
1,3	2,8	3,64	98	27	»
1,3	1,5	1,95	41	21	»
1,48	2,8	4,15	45	11	Перпендикулярна к слоистости и параллельна к основной трещиноватости
1,48	3,0	4,44	65	15	
1,48	2,9	4,30	84	20	
1,48	1,2	1,78	16	9	
1,48	1,60	2,37	12	5	
1,45	8,7	12,6	155	12	То же
1,40	5,90	8,25	109	13	»
1,40	2,70	3,78	33	8,7	»
1,40	1,20	1,68	4	2,5	»
1,30	3,20	4,15	45	10	»
1,30	2,70	3,52	38	11	»
1,30	1,20	1,56	27	17	»
4,20	4,10	17,2	250	15	»
4,20	4,20	17,7	358	20	»
4,20	4,30	18,1	160	9	»
4,20	8,50	35,7	307	9	»
4,15	4,40	18,3	325	18	»
4,15	4,10	17,0	191	11	»
9,30	10,4	97	740	8	»
9,3	9,8	91	750	8	»
10,0	10,0	100	400	4	»
1,3	7,3	9,48	107	11	»
1,3	5,6	7,28	110	15	»
1,3	1,4	1,82	37	20	»
1,3	1,3	1,69	15	9	»
1,3	1,4	1,82	26	14	»
1,4	3,60	5,05	85	17	»
1,4	2,90	4,07	92	22	»
1,4	1,7	2,38	35	15	»
1,4	1,5	2,1	31	15	»
			Пласт XII, верхняя пачка		
1,12	10,7	12,0	147	12,3	Перпендикулярна к слоистости и трещиноватости
1,12	10,7	12,0	110	9,2	
1,4	15,0	21	170	8,1	
1,6	11,7	19	323	17,0	То же
1,5	11,7	17,2	262	15,2	»
1,5	11,4	17,2	220	12,8	»
1,4	8,5	11,9	149	13	»
1,4	4,0	5,6	70	12	»
1,4	2,6	3,64	49	14	»
1,4	2,7	3,78	41	11	»
1,4	1,6	2,24	26	12	»

Продолжение приложения 2

1	2	3	4	5	6
1,4	1,6	2,24	26	12	То же
1,4	1,6	2,24	29	13	”
4,3	9,3	40,0	355	9	”
4,2	7,7	32,3	266	8	”
4,3	7,7	33,1	346	10	”
4,3	6,5	27,9	302	11	”
9,8	10	98	540	6	”
10	22	220	716	3	”
10	9,3	93	510	6	”
1,4	3,2	4,48	37	8	”
1,4	3,1	4,35	37	11	”
1,5	2,5	3,74	45	12	”
1,5	1,5	2,25	31	14	”
4,3	20	86	860	10	”
4,3	20	86	570	7	”
1,4	13,5	18,8	161	9	Перпендикулярна к слоистости и параллельна к основной трещиноватости
1,4	5,6	7,85	112	14	
1,4	2,8	3,92	39	10	
2,0	10	20	195	9,7	
1,4	1,4	1,96	44	22	
1,4	1,4	1,96	28	14	То же
1,4	2,8	3,92	41	10	”
1,4	1,4	1,96	20	10	”
1,4	1,4	1,96	20	10	”
1,4	5,6	7,85	103	13	”
4,3	19,0	81,7	458	6	”
4,2	4,3	18,05	122	7	”
4,2	4,4	18,5	185	10	”
4,3	3,9	16,8	243	14	”
1,4	4,3	6,03	62	10	”
1,4	2,8	3,92	32	8	”
4,3	4,3	18,9	112	6	”
4,45	4,3	19,1	90	5	”
4,45	4,3	19,1	100	5	”
4,0	4,25	16,9	154	9	”
4,0	4,3	17,2	130	8	”
4,0	4,3	17,2	123	7	”
		Пласт XXX Красногорского разреза			
1,5	4,3	6,45	386	60	Перпендикулярна к слоистости
1,6	3,2	5,12	250	48	
1,6	1,9	3,04	140	46	То же
1,6	1,7	2,72	124	46	”
1,6	2,4	3,84	135	35	”
1,6	1,6	2,54	88	34	”
1,5	4,2	6,30	206	33	”
1,5	3,3	4,95	206	42	”
1,5	3,0	4,5	125	27	”
1,5	1,3	1,95	45	23	”
1,5	1,5	2,25	65	28	”
1,5	1,6	2,40	68	28	”
4,35	6,80	29,6	735	25	”
4,35	10	43,5	1000	23	”

Продолжение приложения 2

1	2	3	4	5	6
4,35	7,4	32,1	608	19	То же
4,3	3,7	15,9	315	20	"
4,3	5,0	21,5	408	19	"
4,3	8,0	34,4	300	9	"
4,3	7,0	30,5	540	18	"
4,3	9,0	38,7	496	13	"
4,3	4,0	17,2	251	15	"
4,3	4,0	17,2	200	12	"
10,1	8,3	84	120	14	"
		3. Угли Донбасса			
		Пласт $l_8^в$ гидрорудника "Пионер"			
1,65	7,0	11,5	426	37,5	"
1,65	5,3	8,75	215	24,6	"
1,65	2,0	3,3	61	18,45	"
1,65	1,0	1,65	55	33,2	"
1,65	1,5	2,49	61	24,6	"
1,65	1,5	2,49	73	29,5	"
1,65	1,5	2,49	67	27,0	"
1,65	1,4	2,30	65	26,9	"
1,65	1,3	2,15	65	30,2	"
1,65	1,3	2,15	49	22,8	"
1,65	5,1	8,41	157	18,7	"
1,65	5,6	9,25	333	36,1	"
4,2	4,5	18,9	410	21,6	"
6,3	7,1	44,7	365	8,1	"
5,6	5,7	31,9	310	9,75	"
7,5	5,3	39,8	177	4,45	"
8,0	18,0	144	860	5,96	"
8,0	7,0	56	672	12,0	"
8,0	6,8	54,4	892	16,5	"
6,5	7,0	45,5	298	6,5	"
8,0	6,7	53,6	758	14,2	"
1,4	4,7	6,6	257	39	"
1,4	4,6	6,45	254	39	"
1,4	3,4	4,77	234	49	"
1,4	5,0	7,0	220	31	"
1,4	0,7	0,98	50	51	"
1,4	0,8	1,12	40	35	"
1,4	0,8	1,12	57	51	"
1,4	1,0	1,4	67	48	"
1,4	1,0	1,4	52	37	"
1,4	1,0	1,4	53	38	"
1,4	1,0	1,4	46	33	"
1,5	4,4	6,6	172	26	"
1,5	4,4	6,6	228	35	"
1,5	4,4	6,6	348	53	"
1,5	3,8	5,7	263	46	"
1,5	3,8	5,7	292	51	"
4,2	1,5	6,3	111	18	"
1,5	4,3	6,45	220	34	"
1,5	1,0	1,5	50	33	

Продолжение приложения 2

1	2	3	4	5	6
1,5	1,0	1,5	42	28	То же
1,7	1,5	2,53	105	42	"
1,7	7,2	12,2	500	41	"
1,7	1,5	2,53	61	24	"
1,7	1,5	2,53	45	18	"
1,7	1,5	2,53	63	25	"
1,7	1,2	2,04	36	18	"
1,7	1,2	2,04	48	23	"
1,7	1,2	2,04	48	23	"
3,9	6,4	25	362	14,5	"
3,9	6,4	25	300	12,0	"
3,9	6,0	23,4	334	14	"
3,9	6,0	23,4	344	15	"
3,9	3,7	14,4	350	24	"
4,2	9,5	40,0	550	14	"
4,2	9,0	38,8	400	10	"
4,2	4,5	18,9	376	20	"
4,2	9,5	40,0	470	12	"
4,2	9,0	38,8	418	11	"
4,2	4,0	16,8	242	14	"
4,2	4,0	16,8	280	17	"
4,2	4,8	20,02	374	19	"
4,2	6,5	25,4	488	19	"
4,2	6,5	25,4	520	20	"
4,2	6,0	25,2	450	18	"
4,2	5,5	23,1	330	14	"
3,8	8,0	30,4	720	24	"
3,8	4,2	15,95	300	19	"
3,8	3,7	14,0	305	22	"
8,0	17,0	136	1070	8	"
8,0	8,5	68	920	13,5	"
8,0	21,0	168	890	5,3	"
8,0	6,3	51,5	490	9,5	"
8,0	6,0	48,0	500	10,4	"
2,2	7,0	15,4	600	39,0	"
3,4	5,2	17,7	160	9,1	"
3,4	5,2	17,7	270	15,2	"
3,4	5,3	18,1	140	7,7	"
3,4	4,0	13,6	100	7,4	"
3,4	2,8	9,6	160	16,7	"
3,4	3,7	12,6	230	18,3	"
3,0	5,0	15,0	286	19	"
3,0	4,7	14,3	282	19,7	"
3,0	2,5	7,5	170	22,7	"
2,0	3,2	9,6	185	17,2	"
2,5	3,0	7,5	150	20,0	"
4,1	4,5	18,5	328	17,8	"
4,1	3,4	14,0	238	17,0	"
4,1	4,0	16,4	245	15	"
4. Угли Львовско-Волынского бассейна					
Пласт Волынский-I					
1,6	6,6	10,6	416	39	"

Продолжение приложения 2

1	2	3	4	5	6
1,6	3,0	4,8	170	36	То же
1,6	4,6	7,4	342	48	"
1,6	3,9	6,2	182	29	"
1,6	1,5	2,4	80	33	"
1,6	1,0	1,6	38	24	"
1,6	1,3	2,1	85	40	"
1,6	1,3	2,1	19	9	"
1,6	2,2	3,5	117	33	"
1,8	7,5	13,5	650	48	"
1,8	4,0	7,2	515	71	"
1,8	4,0	7,2	380	53	"
1,8	1,8	3,2	220	69	"
1,8	1,8	3,2	218	68	"
1,8	4,0	7,2	470	65	"
1,8	1,9	3,4	234	69	"
1,8	3,8	6,8	450	66	"
1,8	3,9	7,0	370	53	"
1,8	1,6	2,9	125	43	"
1,8	3,4	6,1	400	66	"
1,8	1,7	3,1	218	70	"
2,1	5,7	12,0	465	39	"
2,1	3,3	11,2	270	24	"
2,1	4,0	8,4	223	27	"
2,1	2,2	4,6	186	40	"
2,1	2,2	4,6	187	41	"
2,1	1,5	3,1	76	25	"
2,1	2,0	4,2	180	43	"
3,1	5,7	17,7	322	18,2	"
3,1	4,7	14,6	147	10,0	"
3,1	5,0	15,5	100	6,5	"
3,1	4,1	12,7	207	16,3	"
2,8	4,7	13,2	208	15,7	"
4,2	4,2	17,6	450	25,6	"
2,8	4,7	13,2	408	31,0	"
2,8	2,9	8,1	350	43,0	"
4,0	6,5	26	340	13,1	"
4,0	4,0	16,0	120	7,5	"
4,1	8,5	35,0	394	11,2	"
4,1	8,5	35,0	406	11,6	"
4,1	4,0	16,4	186	11,3	"
4,1	4,0	16,4	390	23,7	"
7,2	11,0	79	625	7,9	"
7,2	7,5	54	120	2,2	"
7,2	5,0	36	388	10,8	"
7,2	4,2	30	150	5,0	"
7,2	10,5	76	457	6,0	"
7,2	5,55	40	280	7,0	"
7,2	9,5	68	340	5,0	"
7,2	6,1	44	176	4,0	"
7,2	8,9	64	257	4,0	"
7,2	6,95	50	450	9,0	"
7,2	8,5	61	490	8,0	"
7,2	8,05	58	320	5,5	

Продолжение приложения 2

1	2	3	4	5	6
9,0	9,45	85	425	5,0	То же
9,0	11,6	104	314	3,0	"
9,0	9,9	89	268	3,0	"
9,0	10,8	97	730	7,5	"
9,0	10,0	90	630	7,0	"
9,0	8,0	72	230	3,2	"
8,5	13,0	112	370	3,3	"
8,5	12,5	106	645	6,0	"
10,0	20,0	200	960	4,8	"
10,0	10,0	100	500	5,0	"

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ПРЕДЕЛЫ ПРОЧНОСТИ УГЛЕЙ ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ ОБРАЗЦОВ РАЗЛИЧНОГО РАЗМЕРА

Размеры образцов, см			Сечение образцов, $см^2$	Разрушающее усилие, даН	Предел прочности, $даН/см^2$
длина	ширина	высота			
1	2	3	4	5	6
			1. Тувинские угли		
			Пласт "Улуг" № 2, нижняя пачка		
1,5	1,7	1,6	2,56	218	84
1,6	1,7	1,6	2,72	240	88
1,45	1,55	1,6	2,25	183	81
1,4	1,6	1,6	2,24	191	85
1,6	1,6	1,6	2,56	238	93
1,5	1,5	1,6	2,25	160	71
1,6	1,6	1,6	2,56	212	83
1,5	1,6	1,6	2,4	200	83
1,5	1,6	1,6	2,4	235	98
1,6	1,5	1,6	2,4	180	75
1,6	1,5	1,6	2,4	202	84
1,5	1,6	1,6	2,4	196	82
1,5	1,6	1,6	2,4	237	99
1,6	1,6	1,6	2,56	259	108
3,3	3,9	3,9	12,9	960	74
3,6	3,9	3,9	14,0	970	69
4,0	3,7	3,9	14,8	1170	79
3,7	3,5	3,9	13,0	900	69
3,7	4,0	3,9	14,8	1190	80
3,8	3,7	3,9	14,05	1170	83
3,7	4,0	3,9	14,8	1040	70
3,7	3,9	3,9	14,42	1150	80
3,8	4,0	3,9	15,2	1200	79
3,7	3,8	4,0	14,05	1050	75
3,6	3,8	4,0	13,65	1110	81
3,7	3,9	4,0	14,45	870	60
3,7	3,7	4,0	13,3	950	71
3,9	4,0	4,0	15,6	1280	82

Продолжение приложения 3

1	2	3	4	5	6
3,6	3,7	4,0	13,3	980	73
3,9	4,0	4,0	15,6	1400	90
3,6	3,9	4,0	14,05	1150	82
3,5	3,7	4,0	15,2	1100	72
6,8	7,6	7,5	51,8	2600	50
6,2	7,5	7,5	46,5	1500	32
7,3	7,8	7,5	57	2830	50
6,8	6,8	6,8	46,2	1800	39
6,0	7,5	7,3	45,0	1320	30
6,6	6,7	6,6	44,3	1300	30
		Пласт "Улуг" № 2, верхняя пачка			
5,2	5,1	6,6	26,6	2380	102*
5,2	5,2	6,6	27,0	1900	80*
5,2	6,0	6,6	31,2	2400	83*
5,6	5,3	6,6	29,6	2210	83*
4,8	4,6	6,6	22,0	1960	106*
4,6	5,4	6,6	24,8	2360	110*
5,2	5,2	6,6	27,0	2050	87*
11,6	8,9	12,5	103	6420	69*
10,0	9,0	12,0	90	3400	44*
10,0	9,0	12,0	90	2600	33*
9,0	8,5	12,0	76,5	2740	42*
9,0	10,0	12,0	90	4200	50*
11,0	9,0	12,0	99	6250	69*
1,3	1,4	1,4	1,82	132	72
1,4	1,3	1,4	1,82	142	79
1,3	1,4	1,4	1,82	149	82
1,3	1,2	1,3	1,56	1,66	106
1,3	1,3	1,2	1,69	246	145
1,3	1,5	1,1	1,95	273	140
1,2	1,3	1,4	1,56	60	78
1,1	1,3	1,4	1,43	134	93
1,3	1,4	1,4	1,82	160	88
1,3	1,4	1,3	1,82	219	120
1,3	1,4	1,3	1,82	271	149
1,2	1,0	1,3	1,2	100	83
0,9	1,1	1,3	0,99	129	130
1,4	1,2	1,3	1,68	186	110
1,2	1,2	1,2	1,44	193	134
		2. Угли Кузнецкого бассейна			
		Пласт XI, пачка IV			
2,0	2,7	3,4	5,4	802	149
1,8	3,7	3,4	1315	6,65	198
2,1	3,3	3,4	6,93	1310	189
2,1	3,0	3,4	6,3	1190	189
2,9	3,0	3,4	8,7	2010	230
2,9	3,6	3,4	10,4	2080	200
3,0	3,0	3,37	9,0	2355	262
3,1	3,5	3,4	10,85	1800	166
3,4	3,1	3,2	10,4	2230	214

Продолжение приложения 3

1	2	3	4	5	6
3,4	3,1	3,5	10,4	1880	181
3,3	3,2	3,5	10,4	2090	202
0,9	0,9	0,9	0,8	300	375
0,9	0,9	0,9	0,8	290	360
0,9	0,9	0,9	0,8	154	192
0,9	0,9	0,9	0,8	158	198
0,9	0,9	0,9	0,8	178	223
0,9	0,9	0,9	0,8	181	226
0,9	0,9	0,9	0,8	186	232
0,9	0,9	0,9	0,8	205	256
0,9	0,9	0,9	0,8	222	277
0,9	0,9	0,9	0,8	226	282
0,9	0,9	0,9	0,8	229	286
0,9	0,9	0,9	0,8	236	295
0,63	0,63	0,6	0,4	140	350
0,63	0,63	0,6	0,4	118	295
0,63	0,63	0,6	0,4	67	168
0,63	0,63	0,6	0,4	89	222
0,63	0,63	0,6	0,4	92	228
0,63	0,63	0,6	0,4	93	233
0,63	0,63	0,6	0,4	100	250
0,63	0,63	0,6	0,4	101	252
0,63	0,63	0,6	0,4	104	258
0,63	0,63	0,6	0,4	105	261
0,63	0,63	0,6	0,4	106	264
6,2	6,2	6,2	38,5	5850	152
6,2	6,2	6,2	38,5	7100	184
6,2	6,2	6,2	38,5	5100	132
		Пласт XI, пачка V			
2,7	2,7	2,76	7,3	930	127
2,6	2,5	2,8	6,5	650	100
2,7	2,7	2,76	7,3	570	78
2,8	2,8	2,78	7,85	1050	134
2,8	2,7	2,76	7,6	830	116
2,8	2,7	2,76	7,6	690	91
2,8	2,9	2,75	8,15	830	102
2,2	2,7	2,75	5,95	750	126
2,7	3,3	2,7	8,51	1390	156
2,4	3,1	2,7	7,44	640	86
6,2	6,2	6,2	38,5	3200	83
6,2	6,2	6,2	38,5	3460	90
6,2	6,2	6,2	38,5	3350	87
		Пласт XXVII Красногорского разреза			
1,5	1,6	1,7	2,4	270	113
1,6	1,6	1,7	2,56	500	195
1,3	1,4	1,7	1,82	330	181
1,5	1,7	1,7	2,55	330	129
1,6	1,5	1,7	2,4	600	250
1,5	2,1	1,7	3,16	370	117
1,6	1,7	1,7	2,72	360	132
6,2	6,2	6,3	38,4	5120	134

Продолжение приложения 3

1	2	3	4	5	6
5,8	5,8	6,3	33,8	3080	96
6,3	6,3	6,3	19,4	720	119
1,5	1,6	1,7	2,4	400	167
1,6	1,7	1,7	2,7	470	174
1,5	1,6	1,7	2,4	510	212
1,8	1,8	1,7	3,24	680	210
1,5	1,6	1,7	2,4	430	179
1,4	1,5	1,7	2,1	520	248
1,3	1,6	1,7	2,06	450	218
5,7	5,7	6,3	32,5	3900	120
5,7	5,7	6,3	32,5	2580	79
5,0	5,9	6,3	35,4	2720	77
5,5	5,5	6,3	30,04	2660	87
5,5	5,5	6,3	30,04	4840	159
5,5	5,0	6,3	37,6	3760	136
1,3	1,3	1,7	1,69	190	113
1,7	1,4	1,7	2,38	290	124
1,6	1,6	1,7	2,56	430	168
1,4	1,7	1,7	2,38	380	160
1,6	1,7	1,7	2,73	410	151
1,7	1,7	1,7	2,8	660	236
1,7	1,7	1,7	2,85	470	168
1,6	1,65	1,7	2,66	500	188
1,7	1,7	1,7	2,80	560	200
1,5	1,4	1,7	2,1	370	176
5,2	5,2	6,2	27,0	3640	135
6,2	6,2	6,2	37,4	4040	110
6,2	6,2	6,2	37,4	5050	144
6,2	6,2	6,2	37,4	4440	127
1,75	1,8	1,75	3,14	480	153
1,5	1,7	1,75	2,56	350	137
1,7	1,9	1,75	3,24	530	163
1,7	1,6	1,75	2,73	370	135
1,7	1,7	1,75	2,89	380	132
6,3	6,3	6,3	39,9	4880	122
6,3	6,3	6,3	39,9	4445	112
6,2	6,2	6,2	38,5	3040	79
6,2	6,0	6,2	38,5	3200	83
6,2	6,2	6,2	38,5	3440	89
5,8	5,8	6,2	34,7	3440	102

Пласт XII, нижняя пачка

4,15	4,80	4,20	19,9	3450	173
3,8	3,8	4,15	14,65	3150	215
3,3	3,4	4,2	11,2	1850	165
4,1	4,1	4,15	16,8	4400	262
4,8	4,5	4,20	21,6	4940	229
4,1	4,0	4,20	16,4	3550	216
4,1	4,4	4,15	18,0	4490	250
4,25	4,30	4,15	18,25	4000	220
3,7	3,9	4,20	14,8	3160	214
3,9	3,9	4,10	15,2	3560	236
3,9	4,15	4,15	16,3	3900	240

Продолжение приложения 3

1	2	3	4	5	6
4,4	4,2	4,1	18,5	4020	217
4,35	4,42	4,18	19,2	4580	238
4,3	4,12	4,32	17,8	3900	220
4,2	5,0	4,35	21,0	5200	243
4,1	3,95	4,24	16;2	4350	268
4,45	4,32	4,4	19,2	3600	187
4,2	4,5	4,3	19,7	4900	248
4,0	4,2	4,35	16,8	3280	195
4,1	4,15	4,4	17,0	3620	213
4,4	4,6	4,35	20,2	3800	188
3,7	4,3	4,1	15,9	3200	201
4,0	4,7	4,2	18,8	4550	242
3,9	4,4	4,35	17,2	4500	261
1,3	1,5	1,35	1,95	565	280
1,4	1,5	1,4	2,12	500	238
1,4	1,5	1,35	2,12	600	285
1,4	1,4	1,35	1,95	440	226
1,25	1,5	1,3	1,88	535	285
1,35	1,5	1,35	2,07	565	278
1,45	1,5	1,4	2,18	560	257
1,35	1,35	1,3	1,82	585	320
1,25	1,45	1,45	1,82	530	291
1,4	1,35	1,35	1,89	455	240
6,8	7,0	7,0	48	10 450	218
6,7	7,4	7,0	50	10 300	206
6,6	6,8	7,0	45	9100	202
7,0	7,0	7,0	49	9500	194
6,4	6,9	7,0	46	8950	194
6,6	6,5	7,0	44	8300	189
7,0	6,9	7,0	48	8950	186
6,9	6,7	7,0	46	8350	181
7,1	7,0	7,0	50	8900	178
6,5	6,6	7,0	43	7500	174
6,6	7,1	7,0	47	8000	170
6,4	6,9	7,0	44	7150	162
7,0	7,0	7,0	49	7100	145
10,5	9,7	9,7	102	15 100	148
9,6	10,0	9,7	96	15 300	160
10,2	9,2	9,7	92	16 100	175
9,0	10,4	9,7	94	14 100	150
1,3	1,5	1,35	1,95	565	280
1,4	1,5	1,4	2,12	500	238
1,4	1,5	1,35	2,12	600	285
1,4	1,4	1,35	1,95	440	226
1,25	1,5	1,3	1,88	535	285
1,35	1,5	1,35	2,07	565	278
1,45	1,5	1,4	2,18	560	257
1,35	1,35	1,3	1,82	585	320
1,25	1,45	1,45	1,82	530	291
1,4	1,35	1,35	1,89	455	240
10,4	9,6	9,3	100	18 500	185
10,2	9,7	9,3	99,0	13 500	137
9,5	11,0	10,0	105	17 500	167

Продолжение приложения 3

1	2	3	4	5	6
8,8	10,0	10,0	88	13 600	155
7,7	11,0	9,8	85	11 200	132
		Пласт XII, верхняя пачка			
1,3	1,5	1,36	1,95	515	260
1,5	1,55	1,3	2,33	750	320
1,45	1,45	1,47	2,1	465	220
1,25	1,55	1,47	1,94	450	230
1,4	1,5	1,35	2,1	430	200
1,55	1,45	1,38	2,25	530	230
1,45	1,6	1,5	2,32	555	240
1,50	1,60	1,50	2,4	415	174
1,4	1,55	1,5	2,17	385	178
1,3	1,3	1,45	1,69	460	270
1,2	1,5	1,45	1,80	410	230
1,4	1,3	1,45	1,82	405	220
1,4	1,45	1,45	2,04	500	245
1,5	1,58	1,52	2,37	570	240
1,5	1,47	1,52	2,21	470	213
1,5	1,55	1,52	2,33	380	163
1,35	1,52	1,52	2,05	440	214
1,6	1,57	1,52	2,50	670	268
1,6	1,62	1,52	2,6	525	202
1,65	1,7	1,52	2,8	700	250
1,4	1,4	1,4	1,96	232	118
1,4	1,35	1,4	1,89	336	178
1,2	1,25	1,4	1,5	260	173
1,3	1,6	1,4	2,08	500	240
1,5	1,6	1,4	2,4	410	171
1,4	1,4	1,4	1,96	392	200
1,2	1,4	1,4	1,68	342	203
1,2	1,5	1,4	1,8	390	216
1,2	1,25	1,4	1,5	240	160
1,2	1,4	1,4	1,68	321	191
3,4	4,2	4,3	14,3	3150	220
3,7	4,4	4,3	16,3	3280	200
4,1	4,2	4,2	17,2	3900	223
4,3	4,4	4,3	18,8	4340	233
3,5	3,5	4,3	12,5	3540	203
3,5	4,0	4,2	14,0	2660	190
10,1	9,6	10,0	97	9300	96
10,2	9,3	10,0	95	8800	93
10,1	10,1	10,0	102	7800	76
9,0	10,4	10,0	94	14 500	154
9,0	10,5	10,0	95	13 000	137
1,5	1,5	1,5	2,25	660	293
1,4	1,6	1,5	2,25	704	314
1,5	1,5	1,4	2,25	470	208
1,3	1,4	1,4	1,82	390	214
1,2	1,2	1,4	1,44	270	187
4,4	4,3	4,6	18,9	1660	89
4,3	4,4	4,45	18,9	1640	87
4,3	4,3	4,6	18,5	1880	102

Продолжение приложения 3

1	2	3	4	5	6
4,3	4,2	4,5	18,0	1890	105
4,2	3,9	3,9	16,4	1840	112
4,2	3,8	3,95	15,9	2150	135
4,2	4,5	4,0	18,9	3090	168
		Пласт XXX Красногорского разреза			
1,4	1,5	1,5	2,1	700	333
1,5	1,5	1,5	2,25	800	355
1,6	1,6	1,6	2,56	1020	400
1,5	1,5	1,55	2,25	825	367
1,3	1,3	1,6	1,69	700	415
1,4	1,55	1,5	2,17	845	390
1,4	1,35	1,5	1,89	635	336
1,6	1,7	1,5	2,72	975	356
3,7	4,6	4,4	17,0	4250	250
4,1	4,4	4,3	18,0	4600	255
4,7	4,5	4,3	21,1	4040	192
4,15	4,15	4,3	17,3	5420	314
4,1	4,1	4,3	17,3	5420	270
4,2	5,9	4,3	23,8	6330	265
4,4	5,5	4,5	24,2	4720	195
4,2	4,7	4,4	19,75	4410	223
4,3	5,0	4,3	22,0	4140	188
4,6	6,0	4,5	27,6	5600	203
9,4	10,7	9,1	101	16 200	160
8,9	9,3	9,1	83	11 800	142
9,2	9,6	9,1	89	15 150	170
9,6	10,1	9,1	97	14 800	152
8,4	8,5	9,1	71	11 200	158
8,8	9,4	10,1	82,7	16 250	196
10,1	10,1	10,0	102	18 150	178
8,0	6,5	10,0	52	6100	117
8,0	9,5	7,0	76	14 400	186
7,3	7,3	7,0	53,3	9500	179
		3. Угли Донбасса			
		Пласт $l_8^в$ гидрорудника "Пионер"			
1,3	1,6	1,6	2,08	850	409
1,3	1,8	1,6	2,34	1280	547
1,4	1,7	1,6	2,37	820	346
1,3	1,5	1,6	1,95	555	284
1,2	1,2	1,6	1,44	450	312
1,5	1,2	1,6	1,8	670	372
1,2	1,4	1,6	1,68	680	405
1,2	1,2	1,6	1,44	410	284
1,2	1,3	1,6	1,56	550	352
1,3	1,5	1,6	1,95	730	374
4,6	4,0	4,2	18,4	4350	236,4
4,3	4,0	4,2	17,2	5100	296
5,1	5,0	4,1	25,5	5700	224
4,0	4,5	4,2	18,0	4750	264
5,6	7,0	6,4	39,2	5100	153

Продолжение приложения 3

1	2	3	4	5	6
5,1	6,8	6,2	34,6	4660	135
5,5	5,2	5,7	28,6	3600	126
4,8	5,7	5,6	37,4	7100	189
5,7	6,8	7,6	38,7	3940	102
6,3	7,2	7,6	45,5	7900	173
6,7	6,2	8,0	41,5	7950	191
7,0	8,0	8,0	56	11 950	214
1,3	1,4	1,58	1,82	578	320
1,5	1,6	1,7	2,4	895	370
1,5	1,5	1,7	2,25	870	385
1,35	1,5	1,32	2,03	750	370
3,1	3,5	4,0	10,9	2500	230
3,5	3,4	4,0	2920	11,9	245
3,7	4,4	4,0	18,3	2870	156
4,06	3,96	4,0	16,0	4300	270
4,2	3,6	4,0	15,1	2600	172
3,3	4,1	4,0	13,5	3900	289
4,0	4,0	4,0	16,0	5100	318
2,6	3,7	4,0	1500	9,63	156
3,0	3,7	4,0	11,1	1400	126
1,5	1,6	1,65	2,41	850	350
1,5	1,7	1,65	2,56	1130	442
1,4	1,4	1,4	1,96	620	316
1,4	1,6	1,3	2,24	990	441
1,2	1,3	1,4	1,56	600	384
1,3	1,4	1,55	1,82	580	318
2,8	4,0	3,3	11,2	3100	276
4,9	4,7	4,4	23,0	5800	252
4,25	4,27	4,1	18,15	5120	282
3,4	3,3	3,3	11,2	2920	261
3,5	4,6	4,0	16,1	5300	329
3,8	3,6	3,7	13,7	2830	206
4,2	5,0	4,1	21,0	3250	154
3,7	4,1	4,2	15,2	2900	190
2,6	3,3	3,0	8,6	2300	268
2,6	3,5	3,4	9,1	2300	253
2,5	3,3	3,0	8,25	2420	293
2,8	2,5	4,0	7,0	1850	264
2,5	2,3	2,9	5,75	2200	382
2,5	2,2	2,9	5,5	1000	182
2,8	2,8	3,3	7,85	2230	284
3,8	5,0	4,2	19,0	3520	185
4,3	4,3	4,2	18,5	2840	154
7,6	8,5	8,0	64,7	8050	124
6,2	7,5	8,0	46,5	5740	123
8,0	8,0	8,0	64,0	7950	124
8,0	8,0	8,0	64,0	7000	119
6,0	7,8	8,0	46,8	5150	110
8,0	7,2	7,0	57,6	7250	126
3,9	5,7	8,0	22,2	3550	160
6,6	6,3	7,0	41,5	4370	105
10,0	10,0	10,0	100	11 500	115

Продолжение приложения 3

1	2	3	4	5	6
		4. Угли Львовско-Волынского бассейна			
		Пласт Волынский-1			
1,6	1,7	1,8	2,73	1340	500
1,9	2,0	1,8	3,8	1630	430
1,7	2,1	1,8	3,57	1300	364
1,8	1,7	1,8	3,06	980	320
1,9	2,2	1,8	4,20	1830	435
1,9	1,9	1,8	3,62	1320	365
1,9	1,7	1,8	3,24	1150	355
1,9	1,8	1,8	3,42	870	254
1,7	2,0	1,8	3,42	1070	314
1,6	1,9	1,8	3,06	850	278
1,7	1,7	1,8	2,9	1070	370
1,7	2,0	2,1	3,4	910	268
1,5	1,7	2,1	2,55	860	338
2,3	2,2	2,1	5,07	1120	220
1,8	2,1	2,1	3,78	1120	296
2,0	2,0	2,1	3,6	870	242
3,6	3,6	3,1	13,0	2400	185
3,5	3,7	3,1	13,0	2465	190
3,4	3,4	3,1	12,0	2460	205
1,6	1,6	1,6	2,56	710	277
1,5	1,4	1,6	2,1	650	310
1,4	1,7	1,6	2,4	635	265
1,4	1,6	1,6	2,24	960	430
1,4	1,6	1,6	2,24	770	344
1,3	1,5	1,6	1,95	565	290
1,3	1,3	1,6	1,7	420	247
1,1	1,3	1,6	1,44	350	243
2,2	3,0	2,8	6,6	1800	273
2,8	3,0	2,8	8,4	2830	337
2,6	2,6	2,8	6,8	1100	162
3,5	3,5	2,8	12,2	4170	342
3,6	4,3	4,1	15,5	2330	150
3,5	3,7	4,1	13,0	1670	128
3,8	3,8	4,1	14,1	1840	130
3,2	3,6	4,1	11,5	1450	126
5,6	6,2	7,1	35,0	4280	122
6,3	6,3	7,1	39,7	6450	164
7,9	7,9	7,1	62,4	6350	102
8,0	10,0	10,0	80	8600	108
11,5	12,5	20,0	145	22 100	133*
11,4	11,2	8,0	128	16 400	120*
8,8	8,0	8,0	64	6600	103
9,0	10,0	8,4	90	11 750	131
9,0	9,5	8,4	85	11 000	130
11,5	11,5	8,4	132	14 500	103

* Предел прочности дан с учетом соотношения размеров образца.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. ПЕТРОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ИСПЫТАННЫХ УГЛЕЙ*

1. Тувинские угли

По внешним признакам угли окислены, со значительным количеством налетов окислов железа.

Окисленность угля затушевывает его истинную структуру. Уголь гумусовый, довольно плотный, полуматовый, редко штриховатый с линзами шелковистого угля толщиной до 1 мм. Основная прирожденная трещиноватость выражена слабо, расстояние между трещинами 7—10 мм. Отмечается наличие тектонической трещиноватости с расстоянием между трещинами 1—2 мм, которая частично затушевывает прирожденную трещиноватость.

На плоскостях наслоения встречаются одиночные довольно крупные обрывки шелковистого угля с хорошо сохранившейся игольчатой структурой.

Из минеральных включений в незначительном количестве встречаются налеты окислов железа и карбонатных пленок.

Микроскопически уголь представляет собой коллинит группы витринита с одиночными линзами фюзинита.

2. Угли Кузнецкого бассейна

Пласт Красногорский

Уголь каменный, гумусовый, буро-черного цвета, полуматовый, штриховатый с одиночными крупными прослоями блестящего угля толщиной до 16 мм, располагающихся в угольном пласте вблизи породного прослоя. В основной массе образца преобладает штриховатость толщиной около 1 мм, представленная блестящим углем. Уголь довольно крепкий с ярко выраженной основной прирожденной трещиноватостью. Расстояние между трещинами 2—12 мм. Плоскости отдельностей прирожденной трещиноватости гладкие, параллельные друг другу.

Минеральные включения представлены редкими тонкими налетами карбонатов на плоскостях основной трещиноватости.

В угле слоистого строения встречаются отдельные полосы блестящего крепкого угля толщиной 5—8 мм. В полуматовом редко штриховатом угле отмечается наличие ярко выраженной основной прирожденной трещиноватости с расстоянием между трещинами 4—15 мм. В матовом глинистом угле прирожденная трещиноватость не обнаружена.

Минеральные включения представлены глинистым материалом, приуроченным к прослойкам матового угля. Встречаются (редко) тонкие налеты карбонатов на плоскостях прирожденной трещиноватости полуматового угля.

Микроскопически в целом, уголь гумусовый, стеблевой кларен с довольно крупными прослойками ксилофюзена и вкраплений зерен кварца и плагиоклаза.

Основная масса (39,5 %) представлена полуразложившимися остатками паренхимы растений с различной степенью гелификации.

Стеблевые элементы (52,2 %) представлены остатками растений в виде: довольно крупных витренизированных полос (31,9 %), довольно крупных прослойков и линз ксилофюзеновых стеблей с хорошо сохранившимися мелкими клетками (18,3 %) и ксиловитрена (2,0 %).

Кутинизированные элементы (5,7 %) представлены микроспорами (4,5 %) и кутикулой (1,2 %).

Минеральные включения (2,6 %) представлены одиночными зернами кварца и плагиоклаза.

---

*Выполнено Б.Н. Аболенским.

Пласт XI, пачка IV

Уголь каменный, гумусовый, буро-черного цвета с сероватым оттенком, по блеску переходящий от полуматового к матовому, грубо линзовидноштриховатый за счет значительного содержания шелковистого угля (фюзена). Встречаются отдельные линзы и полосы блестящего угля (витрена) толщиной не более 2 мм. Благодаря значительному содержанию фюзена, блеск угля по сравнению с предыдущими образцами более матовый. Размеры линз фюзена достигают толщины 3 мм. На плоскостях наслоения линзы фюзена представлены крупными стеблевыми остатками.

Уголь довольно крепкий с неправильным угловатым изломом. Прирожденная трещиноватость проявляется не ярко, расстояние между трещинами 2—8 мм. Торцевая трещиноватость выражена слабо. Имеются зеркала скольжения, являющиеся результатом подвижек угольного пласта в плоскости, близкой к наслоению (4—8°).

Наблюдаются отдельные (до 4 мм) прослойки матового угля, неравномерно и редко расположенные в основной массе угля. Минеральных включений в угле не обнаружено.

Микроскопически уголь характеризуется как кларенодюрен с витренизированными стеблевыми остатками. Основная масса (23,6 %) клареновая.

Стеблевые элементы (57,5 %) представлены витреном (31,2 %), ксиловитреном (22,7 %) и ксилофюзеном (3,6 %).

Кутинизированные элементы (16,6 %) представлены макроспорами (3,6 %), микроспорами (8,6 %) и кутикулой (4,4 %).

Минеральные включения (2,3 %) представлены небольшими линзочками глинистого материала.

Пласт XI, пачка V

Уголь каменный, гумусовый, буро-черного цвета с сероватым оттенком. По внешним признакам представлен тремя петрографическими разновидностями тусклополуматового угля, отличающегося структурными признаками:

уголь полосчатый мощностью 40 мм, с полосами блестящего угля (витрена), имеющего толщину не более 3 мм, и штрихами шелковистого угля — фюзена, имеющего толщину не более 1 мм. Для него характерна слабо выраженная прирожденная трещиноватость с расстоянием 2—8 мм между основными трещинами;

уголь штриховатый мощностью 70 мм со штрихами шелковистого угля (фюзена) толщиной не менее 0,5 мм. Для него характерно довольно значительное развитие прирожденной трещиноватости с расстоянием 4—12 мм между основными трещинами;

тонко-штриховато-полосчатый уголь мощностью 30 мм содержит полосы витрена толщиной до 0,5 мм; штриховатость за счет (штрихов) фюзена составляет не более 1 мм. Для него характерна незначительная степень выраженности. Прирожденная трещиноватость с расстояниями между трещинами от 2 до 4 мм выражена слабо. Как и в углях пачки IV наблюдаются зеркала скольжения, возникшие в результате подвижек угольного пласта в плоскости, близкой к плоскости наслоения. Зеркала скольжения отличаются более сильным блеском и слабо выраженными бороздками скольжения.

Для полосчатого угля характерно наличие в основной массе незначительных прослойков матового угля толщиной до 3 мм. Минеральных включений не обнаружено.

Микроскопически уголь характеризуется как кларенодюрен с витренизированными стеблевыми остатками. Основная масса (39,3 %) клареновая.

Стеблевые элементы (46,8 %) представлены витреном (35,0 %), ксиленом (2,6 %), ксилофюзеном (6,1 %) и фюзеном (3,1 %).

Кутинизированные элементы (10,5 %) представлены микроспорами (8,4 %) и кутикулой (2,1 %).

Минеральные включения (3,4 %) представлены вкраплениями в основную массу одиночных зерен пирита.

Пласт XII, нижняя пачка

Уголь каменный, гумусовый, довольно плотный, массивный, полуматовый, неравномерно-штриховатый за счет линз и штрихов блестящего (до 1 мм толщиной) и шелковистого (до 2 мм толщиной) углей. Цвет буро-черный с сероватым оттенком, поверхность излома шероховатая, минеральных включений не обнаружено.

По мощности образцов можно выделить отдельные участки, отличающиеся между собой петрографическими текстурными особенностями:

полуматовый среднезернистый уголь с одиночными углями шелковистого угля (мощность 30 мм);

полуматовый тонкополосчатый уголь за счет штрихов и отдельных линз толщиной до 1 мм (мощность 8 мм);

полуматовый штриховатый уголь за счет штрихов и отдельных линз блестящего и шелковистого угля толщиной до 1 мм (мощность 30 мм);

полуматовый линзовидно-штриховатый уголь за счет линз и штрихов шелковистого угля толщиной до 2 мм, встречаются одиночные линзы блестящего угля (мощностью 35 мм).

Уголь неравномерно-штриховатого строения довольно плотный, массивный, с неправильным угловатым изломом и шероховатыми плоскостями излома.

Минеральных включений в образцах не обнаружено.

По мощности образцов можно выделить участки, отличающиеся по петрографическим текстурным признакам:

полуматовые штриховато-полосчатые за счет полос блестящего угля толщиной до 2 мм (мощность 12 мм);

полуматовые штриховатые за счет тонких штрихов шелковистого угля (мощность 37 мм);

полуматовые шелковистые и линзовидно-полосчатые с толщиной линз и полос до 3 мм (мощность 22 мм);

полуматовые неравномерно штриховато-полосчатые с полосами блестящего угля и линзами шелковистого угля толщиной до 3 мм (мощность 32 мм).

Прирожденная трещиноватость выражена довольно слабо;

расстояние между трещинами составляет 2—16 мм.

Уголь гумусовый, каменный, довольно плотный, полуматовый, шелковистый, линзовидно-штриховатый с линзами шелковистого и блестящего угля толщиной до 2 мм. Поверхность излома шероховатая. Прирожденная трещиноватость затушевана наличием шелковистого угля. Расстояние между отдельными трещинами 2—8 мм. Минеральных примесей не обнаружено.

Пласт XXVII Красногорского разреза

Уголь каменный, гумусовый, буро-черного цвета, тускло-полуматовый, часто штриховатополосчатый. Преобладают полосы блестящего угля (витрена) толщиной до 2 мм, довольно густо и равномерно расположенных в основной массе; в меньшем количестве встречаются штрихи и линзы шелковистого угля (фюзена) толщиной до 2 мм и длиной 10—15 мм. Уголь довольно крепкий с неправильным угловатым изломом и неясно выраженной прирожденной трещиноватостью. Минеральных включений не обнаружено.

В грубо-штриховатых углях толщина штрихов и мелких линз витрена и фюзена достигает 1 мм. Преобладают фюзеновые линзы. Уголь довольно крепкий, с неправильным угловатым изломом. Расстояние между неярко выраженными прирожденными основными трещинами 3—13 мм.

Уголь полуматовый, штриховато-линзовидной структуры за счет шелковистого угля (фюзена) содержит одиночные полосы блестящего угля (витрена) толщиной до 3 мм, неравномерно располагающихся в основной массе. Фюзено-

вые линзы толщиной до 3 мм представлены в большинстве случаев в виде небольших прерывающихся скоплений, вытянутых в небольшие прослойки. Уголь довольно крепкий, с неправильным угловатым изломом и с неясно выраженной прирожденной трещиноватостью. Минеральные включения не обнаружены.

Уголь полуматовый линзовидно-штриховато-полосчатой структуры состоит из полос толщиной до 6 мм, представленных блестящим углем (витреном), довольно равномерно рассеянных в основной массе (преобладают размеры 3 — 4 мм). Штрихи и линзы шелковистого угля (фюзена) толщиной до 2 мм имеет меньшее распространение. Уголь довольно крепкий, с неправильным угловатым изломом и неясно выраженной прирожденной трещиноватостью при среднем расстоянии между трещинами около 24 мм. Минеральных включений не обнаружено.

Пласт XXX Красногорского разреза

Уголь каменный, гумусовый, массивный, полуматовый, тонко-неясно-штриховатый с одиночными, довольно крупными полосами блестящего угля (толщиной до 6 мм). Штрихи толщиной менее 1 мм неравномерно рассеяны в основной массе.

Уголь довольно крепкий с неправильным угловатым изломом. Прирожденная трещиноватость ярко выражена. В полосах блестящего угля расстояние между трещинами 2—10 мм. Минеральных включений не обнаружено.

3. Угли Донбасса

Пласт $l_8^в$ гидрорудника "Пионер"

Уголь гумусовый, полублестящий, грубо-штриховатый с одиночными линзами и полосами блестящего угля (витрена) толщиной до 5 мм, весьма монолитный, с ярко выраженной основной прирожденной трещиноватостью. Расстояние между трещинами 5—18 мм.

На плоскостях наслоения наблюдаются одиночные обрывки шелковистого угля и тонкие пленки пирита (мало).

4. Угли Львовско-Волынского бассейна

Пласт Волынский-1

Уголь гумусовый, полуматовый, неравномерно штриховато-полосчатый с отдельными довольно крупными линзовидными прослоями шелковистого угля (фюзена). Толщина полос блестящего угля (витрена) достигает 6 мм. Полосы располагаются как одиночно, так и скоплениями. На плоскостях наслоения отмечаются довольно крупные обломки шелковистого угля (фюзена) толщиной до 3—5 мм. Он способствует расслоению угля.

В угле ярко выражена основная прирожденная трещиноватость с расстоянием между трещинами 10—50 мм.

Имеются слабые признаки минерализации угля за счет тонких редких налетов пирита на плоскостях отдельностей основной прирожденной трещиноватости.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5. ПРЕДЕЛЫ ПРОЧНОСТИ РУД И ПОРОД ПРИ СЖАТИИ $R_{сж}$ И КРИТИЧЕСКИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ $V_{кр}$

Порода	Плотность, г/см^3	Скорость продольной волны, м/с	$V_{кр}$, м/с	$R_{сж}$ даН/см^2
1	2	3	4	5
Известняк мраморизованный	2,72	5300	1,4	670
Диорит-порфирит	2,74	6250	2,5	1300
Песчаник аркозовый (Донбасс)	2,6	4000	1,8	870
Скарн пироксено-эпидотовый	2,78	3400	1,7	940
Скарн скаполитовый	2,84	5600	2,4	1900
Богатая магнетитовая руда	4,05	3400	1,7	870
Бедная магнетитовая руда	2,83	5450	2,2	1490
Орудненный скарн	2,90	5300	2,0	1450
Руда железная окисленная	4,45	3380	0,7	380
Песчаник кварцевый	2,6	2300	1,85	1020
Руда магнетитовая с лежачего бока, убогая	3,3	4500	2,1	1500
Туфы альбитофира	2,66	5450	1,9	1610
Известняк мраморизированный	2,72	4700	2,1	1340
Известняк глинистый	2,7	4950	2,15	1440
Туф порфирита	2,68	4700	2,4	1950
Туффит, скарнированный эпидотом и актинолитом	2,65	4700	2,35	1700
Альбитофир, скарнированный актинолитом	2,74	5450	2,03	1850
Гранатовый скарн с вкраплением магнетита	3,62	6250	2,2	2690
Мартит пористый	3,70	3140	0,5	450
Убогая руда	3,28	6750	3,2	2820
Магнетит мелкозернистый	4,19	6400	2,5	2370
Роговик, скарнированный пироксеном	2,71	5750	2,5	2220
Жильный сиенит-порфир	2,56	4800	2,37	1900
Эпидото-актинолитовая порода	2,85	4450	2,1	1800
Диорит-порфирит	3,23	6700	2,8	2700
Богатая магнетитовая руда	3,87	6050	2,0	2740
Песчаник полуматовый	2,65	4100	1,9	1250
Фосфорит	2,7	4000	2,0	1180
Гранит-порфирит	2,6	4950	2,25	2020
Песчаник аркозовый	2,6	5500	2,5	2200
То же	2,6	5300	2,2	1625
То же	2,65	4800	2,05	1430
То же	2,7	5100	2,1	1500
Алевролит	2,68	5100	2,0	1235
Аргиллит	2,55	1480	2,0	354
Алевролит	2,2	4140	1,3	424
Аргиллит	2,52	3200	1,4	365
Аргиллит Кузбасса	2,68	3570	1,1	407
Алевролит Кузбасса	2,48	4150	1,05	655
Аргиллит Кузбасса	2,54	3540	1,35	497
То же	2,54	2500	1,3	447

Продолжение приложения 5

1	2	3	4	5
Пироксено-гранатовый скарн	2,63	6450	2,0	1630
Мрамор с Урала	2,57	4400	1,55	715
Песчаник Донбасса выбросоопасный слоистый перпендикулярно сжатию	2,6	1310	0,75	350
То же, параллельно сжатию	2,6	3650	1,7	675
Роговик	2,68	6000	3,0	2610
Порфирит диабазовый	2,7	5390	2,2	1780
Туфопесчаник	2,8	3200	1,4	607
Массивный барит	3,2	3350	1,3	255
Уголь Донбасса	1,3	1725	0,8	170
Антрацит слабый рыхлый, трещиноватость перпендикулярна сжатию	1,3	1720	0,63	65
То же, параллельна сжатию	1,3	2160	0,53	56
Антрацит средней крепости, трещиноватость перпендикулярна сжатию	1,3	2280	0,7	131
То же, параллельна сжатию	1,3	2770	0,55	85
Антрацит плотный, крепкий, трещиноватость перпендикулярна сжатию	1,3	2700	0,85	183
То же, параллельна сжатию	1,3	3240	0,75	148
Кремень	2,9	6500	3,2	2860
То же	2,87	6450	3,0	2760
Доломит	2,7	2450	1,4	580
Габбро ливиновое	2,84	5000	1,85	1100
Пирротиновая жила	4,58	2340	1,8	1000
Ангидрит	2,9	5600	1,8	950
Габбро-диабаз оливиновый	2,73	5860	1,5	850

ПРИЛОЖЕНИЕ 6. ПРОЧНОСТЬ И ДИНАМИЧЕСКАЯ ТВЕРДОСТЬ НЕКОТОРЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Порода	Прочность, даН/см^2		Динамическая твердость, даН/мм^2
	на разрыв	на сжатие	
1	2	3	4
Песчаник Донбасса	182	1310	517
То же	124 (II); 205	1600	558
То же	72	570	249
”	217 (I)	1750 (I)	718
”	250	1625	567
”	190	1430	740
”	227	1130	—
”	107 (II); 208 (I)	1240	433
”	124 (I); 84 (II)	1440 (I); 900 (II)	492
”	113	1290	430

Продолжение приложения 6

1	2	3	4
То же	233	1900	735
"	178	1940	1539
"	140	1500	425
"	126(I); 75(III); 140(III)	1120(I); 990(II)	415
Алевролит Донбасса	92(II); 153	1050(II)	433
То же	187	1775	408
"	264(I); 159(II)	2200(I); 1230(II)	403
"	26(II); 150(III)	645(II)	185
"	146	955	398
"	130	1030	543
"	72(II); 154(III)	1060(II)	365
"	134	1320	615
"	120	1250	198
Алевролит Кузбасса	130	1250	290
Алевролит Кизеловского бассейна	190	1530	765
То же	98	1020	195
"	110	1300	432
Аргиллит Донбасса	110(II); 160(II)	890(II)	460
То же	59(II); 109(II)	870(II)	383
"	52	610	280
"	196	1540	344
"	82	—	167
Глинистый сланец Донбасса	90	1050	375
Туф	45	652	290
Туфопесчаник мелкозернистый	68	607	172
Альбитофир	73	1170	174
Диоритовый порфирит	—	1300	488
Бедная магнетитовая руда	—	2140	433

Примечание: В скобках условно показано направление разрушающих усилий по отношению к слоистости или трещиноватости: I — перпендикулярное; II — параллельное; III — под углом.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7. ПЕТРОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ИСПЫТАННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД*

Известняк мраморизованный — мелкозернистая порода серого цвета с рассеянной вкрапленностью пирита.

Под микроскопом наблюдаются зерна, имеющие вытянутую либо изометрическую форму. Вытянутая форма и субпараллельная ориентировка зерен создают сланцеватость породы, обнаруживающуюся лишь при микроскопическом изучении.

Намечается также неясно выраженная слоистость за счет чередования более крупных и более мелких полос, а также полос с примесью рудного материала.

* Выполнено Г.С. Сенатской.

Преобладающий размер зерен 0,05—0,15 мм. На фоне этой мелкозернистой массы выделяются более крупные (0,3—2 мм) порфиробласты кальцита неправильной формы с извилистыми границами.

Структура породы порфиробластовая с гранобластовой основной массой. Текстура — микросланцевая.

Гранит-порфир (сиенит-порфир) — микрозернистая фельзитовидная порода с розовыми вкраплениями полевого шпата размером 1—5 мм. Количество вкрапленников в породе составляет 25—30 %.

Минеральный состав: калиевый полевой шпат — (35—40 %), альбит-олигоклаз (30—35 %), кварц (12—15 %), магнетит (3—5 %). Акцессорные: циркон, апатит, сидерит — единичные зерна. Вторичные: кальцит 7—10 %, серицит.

Основная масса состоит из мелких аллотриоморфных зернышек калиевого полевого шпата, реже кварца размером 0,01—0,08 мм, а также призматических зернышек плагиоклаза, несколько более крупных размеров (0,1 мм).

Вкрапленники представлены альбит-олигоклазом и калиевым полевым шпатом. Альбит-олигоклаз обычно наблюдается в виде полисинтетических сдвойникованных призматических выделений, размером 1—3 мм. Калиевый полевой шпат образует широкие таблицы или изометричной формы выделения, интенсивно серицитизированные. Нередко вкрапленники образуют скопления величиной по 5—7 мм. Плагиоклаз также серицитизирован и замещен кальцитом. Кальцит в породах встречается в значительных количествах, развиваясь как по вкрапленникам, так и по основной массе. Нередко он ассоциирует с розетковидными выделениями серицита и скоплениями магнетита (гематитизированного).

Структура породы — порфировая с микрогранулитовой основной массой.

Кристаллопластический туф альбитофира — плотная буровато-коричневая порода с крупными (3—6 мм) порфировидными выделениями альбита.

Основная масса (60—65 %) представлена микролитами альбита размером 0,05—0,1 мм, которые участками образуют флюидальную текстуру. Микролитовая масса обтекает обломки альбита. Помимо микролитов альбита в основной массе присутствует в небольшом количестве кальцит и гематит, придающий породе буроватую окраску. Обломки альбита имеют призматическую, чаще таблитчатую либо изометрическую форму. Большинство зерен альбита имеет полисинтетически двойниковое строение. Альбит замещен кальцитом и серицитом. Кальцит помимо скоплений в основной массе и замещения альбита образует короткие прожилки. Иногда вместе с кальцитом в этих прожилках встречается гематит в виде мелких землистых скоплений.

Структура — кристаллопластическая псаммитовая с микролитовой основной массой. Обломочная структура в породе проявлена неясно, порода весьма сходна с альбитофиром.

Пироксеново-эпидотовый скарн — мелкозернистая порода темно-зеленого цвета, трещиноватая с выделениями фисташково-зеленого эпидота и кальцита по трещинам. Минеральный состав: плагиоклаз (15—20 %), пироксен (10—15 %), эпидот (25—30 %), клиноцоизит и цоизит (10—15 %), кальцит (15—20 %). Акцессорные: везувиан, апатит.

Основная масса породы сложена минералами группы эпидота: эпидотом, клиноцоизитом, цоизитом. Эти минералы образуют мелкозернистый агрегат и замещают первичные минералы плагиоклаз и пироксен. Вместе с ними в мелкозернистой массе встречается кальцит и серицит. Размер отдельных зернышек не превышает 0,03 мм, однако встречаются и более крупные (0,3—0,7 мм) выделения эпидота и цоизита. Они имеют обычно неправильную форму. В эпидот-цоизитовой массе встречаются реликтовые зерна плагиоклаза почти нацело замещенные кальцитом, цоизитом и эпидотом. Сохранились лишь призматическая и таблитчатая форма зерен размером 0,3—1 мм. Пироксены (диопсид) также в значительной степени замещены минералами группы эпидота, но встречаются и неизменные, хорошо образованные зерна, размером 0,5—0,7 мм. Зерна пироксена (0,2 мм) обычно образуют скопления размером 0,5—1,5 мм.

Порода трещиноватая, трещины заполнены кристаллически зернистым эпидотом и кальцитом.

Скарнскаполитовый — среднезернистая порода грязно-зеленовато-серого цвета с вкрапленностью магнетита и пирита.

Минеральный состав: скаполит (60—65); альбит (5—7 %); кальцит (10 — 12 %); хлорит (7—10 %); магнетит (10 %); сфен (2—3 %).

Скаполит, слагающий основную массу породы, представлен таблитчатыми, чаще призматическими зернами с ясной спайностью и прямым угасанием во всех разрезах. По спайности развивается кальцит и хлорит. Карбонатные зернышки образуют мельчайшие включения в скаполите; в виде включений в зернах скаполита содержится также сфен. Размеры зерен 0,5—3 мм. В промежутках между призматическими зернами скаполита располагаются мелкие неправильной формы зернышки альбита, образующие бластические агрегаты; розетковидные и листованные скопления хлорита и кальцита. Альбит и кальцит образуют обособленные поля размером до 2—3 мм.

Структура зернистая.

Оруденелый скарн (диорит-порфирит скарнированный) — среднезернистая порфировая порода грязно-зеленовато-серого цвета с вкрапленностью магнетита.

Минеральный состав: плагиоклаз (70—75 %); амфибол (15—20 %); рудные (5—7 %).

Вторичные: кальцит, эпидот, актинолит, хлорит, соссюрит, альбит. Акцессорные: сфен, апатит.

Вкрапленники составляют 50—55 % и представлены плагиоклазом, редко амфиболом. Плагиоклаз андезитового состава имеет призматическую форму, обладает неясно выраженным двойниковым строением (в результате интенсивного вторичного изменения) и зональностью. Размер вкрапленников 1—4 мм. По плагиоклазу развивается альбит, скаполит, эпидот, кальцит, амфибол (актинолит). Местами он целиком соссюритизирован. Вкрапленники роговой обманки встречаются реже. Они выделяются в виде призматических зерен, размером 0,5—1,5 мм, нередко актинолитизированных, чаще нацело замещенных хлоритом.

Основная масса состоит из микролитов андезина размером 0,5—0,1 мм и мелких выделений амфибола, а также рудных минералов (магнетита). Почти нацело основная масса замещена эпидотом и кальцитом, которые образуют небольшие (0,1 мм) кучные скопления микрозернистых агрегатов, в которых отдельные микролиты плагиоклаза с трудом различимы.

Структура породы порфировая с микролитовой основной массой.

Руда магнетитовая, убогая с лежачего блока — крупнозернистая порода серовато-зеленого цвета, слабо скарнированная, с гнездами магнетита и прожилками кальцита.

Минеральный состав: полевые шпаты (65—70 %); роговая обманка (7 — 10 %); кварц (5 %); магнетит (10—12 %).

Вторичные: кальцит (5—7 %); хлорит (5 %); альбит; эпидот.

Полевые шпаты представлены относительно крупными (2—5 мм) зернами плагиоклаза, диоморфными и призматическими. По составу они относятся к кислому андезину. Полисинтетически двойниковая структура выражена слабо, иногда проявлена зональная структура кристаллов. Зерна трещиноватые, в значительной степени альбитизированы, либо скаполитизированы.

В небольшом количестве встречаются таблитчатые либо неправильные зерна калиевых полевых шпатов, интенсивно измененных. В промежутках между крупными кристаллами полевых шпатов расположены скопления призматических и веретеновидных зерен роговой обманки размером 0,1—0,3 мм. С роговой обманкой ассоциируют магнетит, хлорит, развивающийся в виде розеток, эпидот, мелкие зернышки которого образуют обособленные поля иногда с кальцитом. Магнетит представлен крупночешуйчатыми выделениями или кристаллическими скоплениями размером 3—7 мм. Размер отдельных зернышек 1—3 мм.

Магнетитовая руда — почти сплошная, массивная, среднезернистой структуры. Магнетит содержится в виде идиоморфных хорошо образованных зерен октаэдрической формы размером 0,3—0,8 мм. Зерна магнетита образуют сплош-

ные агрегаты. Промежутки между ними заполнены хлоритом и кальцитом. В магнетитовой руде встречаются реликты незамещенной породы, которая интенсивно хлоритизирована и серицитизирована. Встречаются также гнезда эпидота с кальцитом и актинолитом.

Известняк глинистый — мелкозернистая порода, волнисто-слоистая темно-серого цвета.

Около 85 % породы составляет кальцит, около 15 % — глинистый материал. В небольшом количестве (1—2 %) в породе присутствует кварц и полевой шпат.

Основная масса кальцита имеет криптокристаллическое строение и состоит из мельчайших зернышек размером менее 0,001 мм. В криптокристаллической массе расположены обломки раковин, выполненные волокнистым кальцитом, и другие органические остатки, а также скопления кристаллических кальцитовых зерен, размером 0,2—0,5 мм.

В породе имеются тонкие прожилки, заполненные глинистым пигментным веществом. Они имеют субпараллельную ориентировку и придают породе характер извилистой слоистости.

Туффит — мелкообломочная порода буровато-зеленой окраски, плотная. Количество обломков составляет около 75 %. Они представлены главным образом плагиоклазом, реже калиевым полевым шпатом и кварцем, а также фельзитами и порфиритами. Обломки имеют угловатую форму, редко полуокатанную, плагиоклазы иногда встречаются в виде таблиц. Обычно они серицитизированы, а обломки фельзитов и порфиритов интенсивно карбонатизированы. Размер обломков колеблется в пределах 0,05—3 мм, преобладающие размеры 0,15 — 0,25 мм.

Связующая масса состоит из илистого материала, смешанного с пепловым материалом, карбонатами и гидрооксилами железа, а также хлоритом и серицитом.

Цемент распределен неравномерно и образует небольшие сгущения между обломками.

Структура — посамитовая пиропластическая.

Диорит-порфирит скарнированный — неравномерно-зернистая порода буровато-зеленовато-серого цвета с вкрапленностью пирита и магнетита.

Минеральный состав: плагиоклаз (50—55 %); ортоклаз (5 %); роговая обманка (7—10 %); пироксен (15—20 %); биотит (5 %); кварцит (3—5 %); рудные минералы (3—5 %).

Основная масса породы состоит из плагиоклаза, по составу отвечающему андезиту. Зерна плагиоклаза различаются по форме, размеру и по своему составу. Большинство зерен идиоморфной призматической формы, но имеются неправильные выделения. Плагиоклазы интенсивно изменены (серицитизированы, пелитизированы), частично обрастают ортоклазом. В ряде случаев отмечается зональность плагиоклазов. Размеры зерен 0,1—2 мм. В промежутках между плагиоклазами располагаются иногда мелкие зернышки кварца.

Роговая обманка представлена призматическими ситовидными резнами размером 0,4—0,7 мм. Иногда по ней развивается биотит. Пироксен в диоритовом порфирите как ромбический, так и моноклинный. Последний является вторичным минералом. Ромбический пироксен имеет призматическую форму зерен, либо встречается в форме зернистых вкраплений размером 0,2—0,5 мм, где отдельные зерна не превышают 0,05 мм.

Структура порфировая с аллотриаморфной структурой основной массы.

Альбитофир, скарнированный эпидотом и актинолитом — мелкозернистая порода пестроокрашенная от зеленовато-серого до фисташкового и розового. В виде гнезд и прожилков в породе встречается игольчатый и пластинчатый гематит.

Минеральный состав: альбит (35—40 %); кальцит (25—27 %); эпидот и клиноцоизит (23—25 %); актинолит (10—12 %); гематит (5 %). Порода отличается большой неоднородностью.

Отдельные минералы слагают обособленные поля, между которыми устанавливаются четкие границы. От первоначальной альбитофировой породы остались

лишь реликтовые участки. Альбит замещен эпидотом и клиноцоизитом, кальцитом и актинолитом. Эпидот-кальцит-альбитовые участки, имеющие светлозеленоватую окраску, сложены неправильной расплывчатой формы зернами альбита размером 0,1—0,3 мм минералами группы эпидота (эпидотом, клиноцоизитом, редко цоизитом), имеющими идиоморфные очертания зерен размером 0,3—1 мм и более (преобладают размеры 0,5 мм) и ксеноморфными зернами кальцита, выполняющими промежутки между зернами эпидота. Размер зерен 0,5—2,5 мм. Участки породы, имеющие темную зеленоватосерую окраску, сложены альбитом, кальцитом и актинолитом. Зерна эпидота присутствуют в таких участках относительно редко. Альбит в виде зерен размером 0,1—0,5 мм призматической формы интенсивно изменен, координирован и замещен кальцитом. Последний в виде ксеноморфных зерен размером до 1 мм выполняет промежутки между зернами альбита.

Актинолит в виде игольчатых агрегатов, образующих скопления, распределен неравномерно. Мелкоигольчатые (0,1 мм) агрегаты его корродируют кальцит, реже альбит. Актинолит вместе с кальцитом образует гнезда, прожилки, заполняет пустоты в породе. При этом игольчатые зерна актинолита в таких участках имеют размеры до 2—3 мм. Повсеместно в породе распространен гематит в виде пластинчатых и игольчатых зерен и их скоплений. Гематит образует прожилки шириной 1—5 мм и более.

Структура породы гранобластовая с участками реликтовой. Текстура неоднородная, пятнистая.

Пироксено-гранатовый скарн — неравномерно-зернистая неоднородная порода с неравномерным рапределением окраски от серовато-зеленой до грязнобурой, с гнездами кварца, кальцита и пирита и вкрапленностью гематита.

Минеральный состав: гранат (30 %); пироксен (25 %); эпидот (15 %); кальцит (13—15 %); кварц (5 %); гематит (5 %); пирит (5—7 %).

Основную массу породы составляет мелкозернистый землистого вида гранат совместно с пироксеном. Зерна этих минералов размером 0,03—0,04 мм имеют неправильные нечеткие очертания. В ассоциации с ними находится эпидот и мелкозернистый кальцит. Эпидот встречается в виде бесформенных выделений, иногда вместе с гематитом.

Наряду с мелкозернистой структурой встречаются участки, где зерна кальцита и эпидота достигают 0,7 мм. Эпидот приобретает сноповидную форму зерен и волнистое угасание.

Гранат в таких участках имеет правильную пентагондодекаэдрическую форму.

К крупнозернистым участкам приурочены кварц-карбонатные гнезда с пиритом. Размер гнезд 1—5 см, иногда больше.

Структура роговиковая, неравномернозернистая. Текстура неоднородная.

Роговик, скарнированный пироксеном — скрытокристаллическая плотная порода с раковистым изломом, пятнистой окраской (серая с розовыми пятнами), с прожилками и гнездами пироксена и пирита.

Основная масса на 60 % представлена кварцево-альбитовым агрегатом, состоящим из неправильных бластических зернышек размером 0,02—0,04 мм.

Встречаются реликтовые вкрапленники среднего плагиоклаза таблитчатой и призматической формы размером 0,3—0,5 мм. Вкрапленники плагиоклаза серицитизированы и карбонатизированы. Они составляют около 5 % породы.

Основная масса замещается пироксеном и эпидотом. Зерна этих минералов размером 0,06—0,1 мм имеют неправильные очертания, распределены неравномерно, образуют скопления и составляют более 25 % породы.

Вместе с пироксеном и эпидотом встречается кальцит в виде неправильных зерен размером 0,1—0,2 мм и их скоплений. В виде скоплений кубических зерен размером 0,05—0,07 мм встречается пирит (3—5 %).

Структура породы роговиковая с реликтами порфировой. Текстура пятнистая.

Песчаники Донбасса — светлосерые (во влажном состоянии зеленоватосерые), среднезернистые, полимиктового состава с глинистосерицитовым цементом.

Текстура слоистая (средне слоистая). На плоскостях слоистости сконцентрированы чешуйки слюды и органические примеси. Слоистость горизонтальная и штриховатая. Наряду со слоистостью отмечается трещиноватость, извилистая со следами гидроокислов по трещинам.

Встречаются песчаники зеленовато-серого цвета, мелкозернистые с кремнисто-глинистым цементом; текстура штриховато-слоистая (резко-слоистая). По плоскостям слоистости скопления серицита и органического материала. Эти песчаники мелкозернистые, имеют более прочный цемент и однородную текстуру (более резкую слоистость).

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие (А.И. Берон) 3
1. Прочность и твердость горных пород (М.И. Койфман) 4
2. Хрупко-пластические свойства горных пород и породообразующих минералов (И.И. Койфман) 12
3. Вид напряженного состояния и прочность горных пород (С.Е. Чирков) 25
3.1. Результаты испытаний прочности горных пород 28
3.2. Предельные поверхности прочности 36
3.3. Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических значений прочности горных пород 40
3.4. Обобщенное условие прочности горных пород, учитывающее вид напряженного состояния 46
4. Структурное несоответствие образца и массива. Разница их механических свойств. Масштабный фактор (С.Е. Чирков) 51
4.1. Неоднородность горных пород и углей 51
4.2. Трещиноватость массива и образцов различного размера 52
4.3. Причины нарушения подобия при испытаниях 55
4.4. Характер проявления масштабного эффекта 57
4.5. Теоретические и экспериментальные результаты изучения масштабного эффекта 63
4.6. Прочность и деформируемость трещиноватых горных пород при одноосном сжатии 77
4.7. Влияние трещиноватости на прочность горных пород в условиях объемного неравнокомпонентного напряженного состояния 84
4.8. Закономерности деформирования трещиноватых горных пород в условиях трехосного неравномерного сжатия 95
4.9. Предельные поверхности прочности трещиноватых горных пород 105
5. Влияние скорости нагружения на свойства горных пород (М.П. Мохначев) 108
5.1. Скорость воздействия нагрузок и видов напряженного состояния 108
5.2. Влияние скорости нагружения на прочностные и деформационные характеристики горных пород в условиях одноосного напряженного состояния 111
5.3. Влияние скоростей нагружения на прочностные и деформационные характеристики горных пород в условиях объемного напряженного состояния 115
5.4. Методика и аппаратура для испытаний горных пород при разных скоростях нагружения и видах напряженного состояния 126
5.5. Некоторые закономерности изменения прочности и деформируемости горных пород при разных скоростях нагружения и видах напряженного состояния 132
6. Свойства горных пород в условиях пульсирующего нагружения (М.П. Мохначев) 137
6.1. Некоторые сведения о поведении горных пород при циклическом нагружении 138
6.2. Методы исследований 142
6.3. Влияние пульсирующего нагружения и напряженного состояния на механические свойства горных пород 154
7. Определение твердости, прочности и деформированных свойств горных пород при динамическом внедрении штампа (Е.С. Ватолин) 166
7.1. Особенности поведения горных пород при динамическом нагружении 166
7.2. Некоторые методы определения свойств горных пород с использованием динамического нагружения через пуансон 168
8. Акустические методы и средства оценки состояния массива горных пород (Е.С. Ватолин) 178

8.1. Сейсмический метод 179
8.2. Сейсмоэлектрический метод 193
8.3. Методы и приборы для оценки нарушенности угольных пластов . . 198
9. Оценка напряженного состояния массива по рассеянию гамма-квантов и упругому последействию пород (С.Е. Чирков) 204
10. Определение прочности, упругих и других характеристик горных пород в массиве (Е.С. Ватолин) 214
11. Пути практического использования показателей напряженного состояния, прочности, упругих и других характеристик массива (А.И. Берон) 226
11.1. Разрушение пород и охрана выработок 226
11.2. Выявление условий возникновения динамических явлений 228
Список литературы 238
Приложение 1. Изменение эксцентриситета нагрузок при определении прочностных характеристик горных пород 240
Приложение 2. Пределы прочности углей при растяжении, полученные методом раскалывания образцов различного размера 242
Приложение 3. Пределы прочности углей при одноосном сжатии образцов различного размера 254
Приложение 4. Петрографическое описание испытанных углей 263
Приложение 5. Пределы прочности руд и пород при сжатии $R_{сж}$ и критические скорости деформирования $V_{кр}$ 267
Приложение 6. Прочность и динамическая твердость некоторых горных пород 268
Приложение 7. Петрографическое описание испытанных горных пород 269

Аба Исаакович Берон
Евгений Степанович Ватолин, Михаил Ильич Койфман,
Михаил Петрович Мохначев, Сергей Ефимович Чирков,

СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАЗНЫХ ВИДАХ И РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ

Редактор издательства Е.И. Тележников
Переплет художника В.А. Сергеева
Художественный редактор О.Н. Зайцева
Технический редактор О.А. Колотвина
Корректор А.А. Передерникова
Оператор Н.Я. Новикова

ИБ № 4500

Подписано в печать 26.07.83. Т-16238. Формат 60×90 1/16. Бумага офсетная № 1. Набор выполнен на наборно-пишущей машине типа ИБМ "Композер". Печать офсетная. Усл. печ. л. 17,5. Усл. кр.-отт. 17,5. Уч.-изд. л. 20,0. Тираж 1270 экз. Заказ 813. /8630—10. Цена 3 р. 40 к.

Ордена "Знак Почета" издательство "Недра",
103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19

Тульская типография Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,
г. Тула, проспект Ленина, 109.