

Литвинский Г. Г.

Донбасский государственный технический университет

**E-mail: ligag@ya.ru*

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ПОРТАТИВНОГО ПРИБОРА ДЛЯ ЭКСПРЕСС-ИСПЫТАНИЙ ГОРНЫХ ПОРОД

Оперативное и достоверное определение физико-механических свойств грунтов и горных пород в полевых условиях достигается с помощью различных портативных приборов. В статье дан анализ конструкций портативных приборов, показаны их достоинства и недостатки, сформулированы основные требования к ним. Проведены обоснование и расчет конструктивных и технических параметров нового портативного прибора для экспресс-испытаний горных пород ППЭИ, где впервые образцы нагружаются с помощью сжатого воздуха под давлением 30 МПа из мини-баллона емкостью 0,5 л. Затем с помощью пневмомультипликатора давление повышается в 2–10 раз, что позволяет производить испытания скальных пород не только на раскол, но и на сжатие. Прибор ППЭИ превосходит по своим показателям существующие отечественные и зарубежные аналоги, его массово-габаритные параметры минимальны (размеры 110×110×200 мм, масса 3,5 кг), он прост в изготовлении и не требует затрат физических усилий оператора. В нем нуждаются геологи, горняки, бурильщики, строители дорог, гражданских и промышленных зданий и сооружений.

Ключевые слова: горные породы, физико-механические свойства, экспресс испытания, портативные приборы, функциональные требования, конструкция, расчет, сжатый газ, пневмомультипликатор.

1 Актуальность проблемы и её связь с научными и практическими задачами

Получение достоверных данных о свойствах горных пород и массивов для обоснованного принятия решений при строительстве и добыче минеральных ресурсов лежит в основе проектирования, планирования и ведения горных работ в разнообразных условиях.

В последнее время большое число конструкторских разработок приборов по определению физико-механических показателей горных пород и массивов было смещено в область изучения и применения сложных геомеханических систем, использующих новые достижения техник измерения, передачи и контроля информации на основе современных компьютерных технологий и специализированных пакетов прикладных программ.

Среди таких подходов можно выделить геофизические методы и измерительные средства, которые включены в норма-

тивные документы [ГОСТ Р 54363-2011, СП 11-105-97, ГОСТ Р 59554-2021 и др.] и наиболее разработаны. Нашли широкое распространение микросейсмический (сейсмоакустический) и геоакустический методы [1–3], а также электрометрический, гравиметрический и метод регистрации электромагнитного излучения (ЭМИ) [4–7 и др.]. Сюда же относятся микросейсмический, геоакустический, ультразвуковой методы [8–14 и др.].

Прогноз геомеханического поведения сложных иерархических неоднородных структур, какими обычно являются массивы горных пород, достигается применением комплексного сочетания различных методов, что требует продолжительного времени на организацию, подготовку, измерительные процедуры, обработку и интерпретацию результатов наблюдений.

Как правило, это связано со значительными затратами материальных и трудовых ресурсов, не говоря уже о постоянном дефиците времени на принятие срочных

инженерных решений в условиях угрозы возникновения аварийных ситуаций (горные удары, выбросы газа, прорывы воды, обрушения и пр.). Кроме того, прогнозирование напряженно-деформированного состояния поведения массива пород под меняющимися во времени нагрузками при ведении горных работ невозможно без определения механических показателей каждого из его элементов.

Задача оперативного определения физико-механических показателей горных пород без необходимости привлечения специализированных организаций и длительного ожидания результатов исследований давно привлекала внимание широкого круга производственников и проектировщиков. Уже в 70-х годах прошлого столетия ведущая в СССР организация ВНИМИ вполне четко сформулировала рекомендации по определению механических свойств горных пород [15]. В них, а также в последующих дополнениях и стандартах [ГОСТ 24941-81, 12071-2000 и др.] достаточно полно отражены требования к методам испытаний, а также способы и средства их реализации в специализированных лабораториях [16]. Эти лаборатории по разработке методов испытаний горных пород были созданы и успешно работали в наиболее крупных исследовательских институтах горного профиля: ВНИМИ (г. Ленинград), ИГД им. А. А. Скочинского (г. Москва), ДонУГИ (г. Донецк), ИГТМ (г. Днепропетровск) и др.

Поскольку сложные системы контроля не обладают гибкостью и оперативностью, а их цена и стоимость эксплуатации достаточно велики, разработана целая гамма технических средств — от простейших устройств портативных приборов-пробников до комплексных наборов лабораторных приборов, — позволяющих решать задачи достаточно быстрого определения свойств горных пород на месте отбора проб. Особое место занимают портативные приборы по определению механических свойств горных пород. Они могут стать неотъемлемым атрибутом для целого ряда специалистов

(геологов, строителей, горных инженеров, изыскателей), быть основой для проведения лабораторных испытаний в вузах и иных учебных заведениях.

Поэтому разработка оперативных методов испытаний горных пород в полевых условиях и при отсутствии лабораторий является достаточно актуальной задачей в комплексной проблеме получения исходных данных для прогноза состояния и поведения горных массивов.

Идея исследований — создание портативного прибора простой конструкции минимальной массы с широким диапазоном нагрузок и методов испытаний.

Цель исследования — обоснование требований, определение параметров и разработка портативного прибора для экспресс-испытаний горных пород в лабораторных и полевых условиях.

Объект исследования — варианты конструкций портативных приборов, а **предмет** — обоснование конструктивных параметров элементов прибора с учетом их взаимодействия.

Задачи исследования:

- выполнить анализ конструкций существующих портативных приборов;
- сформулировать перечень требований, которым должен отвечать портативный прибор;
- обосновать технические критерии для оценки уровня конструктивного исполнения прибора;
- предложить и разработать новый способ и конструкцию создания нагружающих усилий на испытуемый образец;
- выполнить расчет конструкции всего прибора в целом и отдельных его сборочных единиц с учетом их взаимодействия.

2 Сравнение известных конструкций портативных приборов

Особое место в комплексе лабораторного оборудования занимают портативные (переносные) приборы для определения прочностных свойств горных пород. Именно они позволяют осуществить массовые

определения прочностных показателей горных пород непосредственно на месте производства работ, в том числе в полевых условиях, с минимальными трудозатратами и задержкой во времени, обеспечивая тем самым банк исходных данных для принятия оперативных инженерных решений.

К настоящему времени известны многочисленные устройства и приборы, предложенные для испытаний горных пород, в том числе и портативные, некоторые из них пригодны для использования в полевых и производственных условиях. Каждый обладает разными возможностями по набору определяемых показателей свойств пород, достоинствами и недостатками. Рассмотрим наиболее представительные конструкции таких приборов.

2.1 Портативный прибор-пробник БУ-39 для раскалывания образцов

В первую очередь к таким приборам можно отнести разработанный во ВНИМИ в 70-х годах прошлого столетия пробник БУ-39 (рис. 1). Он основан на известном расчетном методе комплексного определения пределов прочности при одноосном сжатии и растяжении (ГОСТ 21153.8-88, 21153.3-85), который детально описан ВНИМИ [2, 3, 17].

Пробник БУ-39 выполнен в виде механического нагрузочного устройства с ручным приводом. На корпусе 1 закреплена направляющая рама 2 в виде двух штанг, между которыми расположен червячный редуктор 3. В проеме между штангами соосно расположены сферические инденторы 4 диаметром 15 мм, которые передают нагрузку на образец породы (не показан).

На основании 1 смонтированы в вертикальном положении тяги рамы 2 и выше — все остальные элементы пробника. С помощью механического динамометра 6 фиксируют разрушающую образец нагрузку, которую создают встречным смещением инденторов 4 за счет вращения рукояти 5, присоединенной к редуктору 3. В приборе могут быть предусмотрены индикаторы для замера смещений при взаимном

перемещении сферических инденторов 4. Масса прибора в зависимости от его модификаций составляет от 10 до 12 кг, максимальное усилие при испытаниях пород не превышает 10 кН (до 1 тс).

В инструкции по применению пробника [3] указано, что он предназначен для определения механических (прочностных и деформационных) показателей скальных пород в лабораторных и полевых условиях. Важно отметить, что испытания можно проводить на образцах произвольной, включая и неправильную, формы согласно ГОСТ 24941-81.

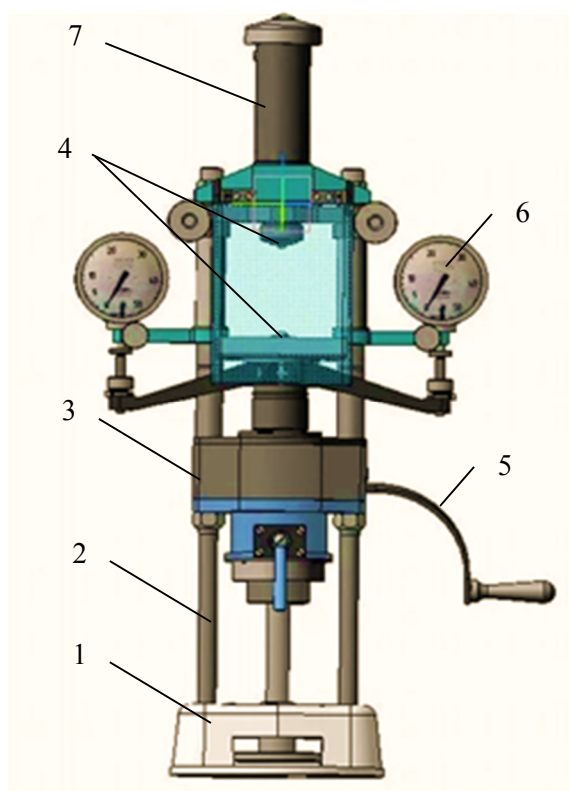


Рисунок 1 — Прибор пробник БУ-39 конструкции ВНИМИ для испытаний пород расколом сферическими инденторами

Основной показатель прочности на растяжение получают косвенным методом путем раскола кусков породы встречно направленными сферическими инденторами. Получаемые результаты испытаний можно отнести в соответствии с уровнем надежности к упрощенным с высокой степенью доступности.

Их надежность составляет 75–85 %, что можно признать достаточным для приближенных инженерных решений большинства горнотехнических задач.

К числу достоинств прибора пробника БУ-39 следует отнести его приоритетность, хорошо разработанные методические обоснования, наличие завода-изготовителя и широкое распространение в отечественной горной промышленности.

В то же время следует отметить и присущие пробнику БУ-39 недостатки:

- большая масса, что не позволяет назвать его портативным, не вполне удачная конструкция, ее сложность и трудоемкость изготовления;
- незначительный уровень нагрузки на образец, заметно сужающий возможности испытаний пород лишь расколом;
- ручной привод, требующий высоких усилий для проведения испытаний;
- хрупкое бурное разрушение скальных пород при их раскалывании, обусловленное существенной накопленной упругой энергией в конструкции прибора (тяги 2, редуктор 3 с ручкой 5, динамометры 6).

2.2 Портативный прибор КГМИ для экспресс-испытаний пород

Дальнейшим продолжением основной идеи пробника БУ-39 в стремлении обеспечить доступность и быстроту определения свойств пород в полевых и лабораторных условиях можно считать портативный прибор для экспресс испытаний ППЭИ, разработанный в КГМИ г. Коммунарска (ныне ДонГТУ г. Алчевска) в 1974 году [18, 19].

Портативный прибор предназначен для ускоренного определения прочностных и деформационных характеристик горных пород различными методами в полевых условиях на месте отбора проб, на горнодобывающих предприятиях, в учебных и специализированных лабораториях. Он позволяет комплексно определять основные механические характеристики горных пород (см. таблицу): прочность на растяжение σ_p и сжатие $\sigma_{сж}$, характеристики прочностной анизотропии

$\sigma_{сж}^i$, σ_p^i под произвольным углом к напластованию и полярную диаграмму прочности пород; прочностные параметры поверхностей ослабления и контактов пород.

Прибор ППЭИ (рис. 2), который обслуживает один оператор, состоит из корпуса 1 цилиндрической формы с прямоугольными окнами 2 и кольцевым упором 3 (рис. 3). Корпус имеет две резьбы: наружную метрическую — для крепления крышки 4 — и внутреннюю трапецеидальную — для перемещения и фиксации нижней плиты 5.

Нагружающее устройство состоит из винтового гидронасоса и гидроцилиндра 6, расположенного в корпусе 1 и включающего нагружающий поршень 7 и коаксиальный вспомогательный поршень 8, к которому прикреплена верхняя плита 9. Ручной привод гидронасоса с полостью цилиндра 10, размещенного на крышке 4, состоит из поршня 11, винта 12, гайки 13 и рукоятки 14. Манометр 15 соединен с полостью гидроцилиндра 6 каналом 16.

На плиты 5 и 9 устанавливают соответствующие необходимому виду испытаний инденторы 26. Образец 25 между ними зажимается вращением нижней плиты 5 по резьбе корпуса. Образец 25 нагружают, вращая рукоятку 14 привода гидронасоса. При этом винт 12 через поршень 11 создает давление в гидроцилиндрах 6 и 10, а нагружающий поршень 7 (или вспомогательный 8) и плита 9 создают нагрузку на образец 25. Уровень нагрузки фиксируют манометром 15 (рис. 3).

У прибора следующие характеристики: максимальная нагрузка на образец 100 кН, усилие на рукоятке 100 Н, масса 3,8 кг, габариты 180×100 мм.

Опытную партию приборов (10 шт.) изготовили в 1977 г. на опытно-экспериментальном заводе ВНИМИ. После этого прибор нашел применение в ряде вузов и производственных организаций.

К достоинствам прибора можно отнести малую массу (3,8 кг), сравнительно высокую нагрузку на образец (до 100 кН), форма

которого может быть произвольной, он снабжен разнообразными инденторами, является частью портативной экспресс-лаборатории.

Прибор имеет и ряд недостатков, которые затрудняют его использование:

- неудобство создания нагрузки ручным приводом и считывания показателей на манометре, что требует двух операторов;
- из-за накопленной в приборе потенциальной энергии хрупкие породы разрушаются внезапно (бурно), что ведет к выталкиванию малого поршня 8 и ремонту;
- попадание внутрь гидроцилиндра воздуха и необходимость его удаления;
- сложность возвращения поршней 7 и 8 в исходное положение и ненадежность поршня 11.

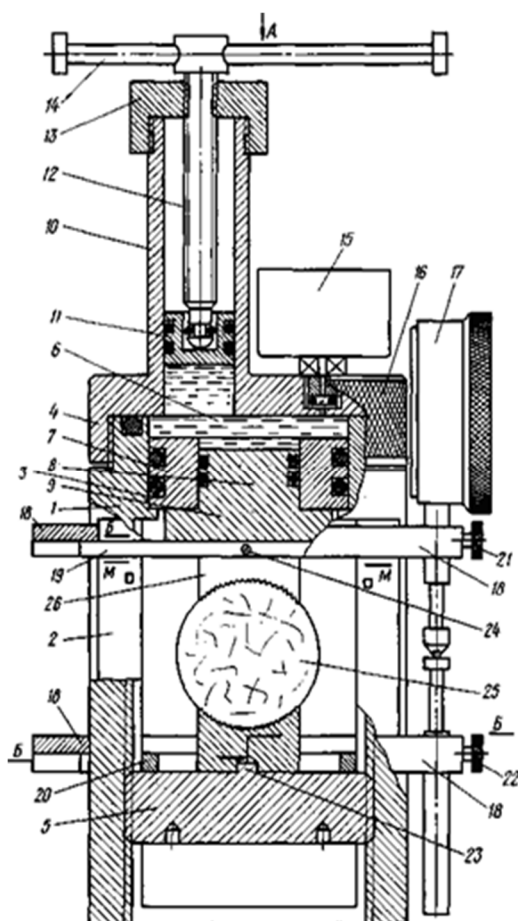


Рисунок 2 — Портативный прибор ППЭИ конструкции КГМИ для экспресс-испытаний горных пород

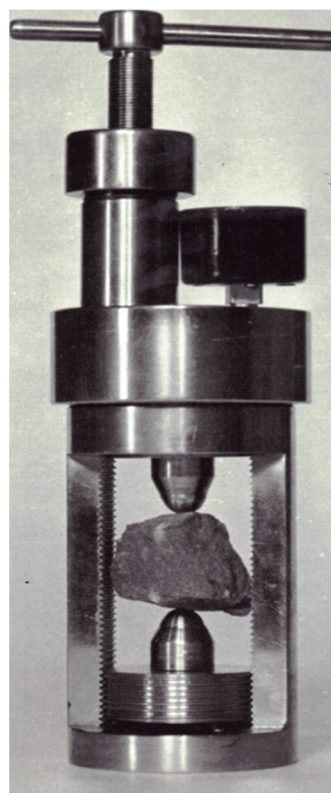


Рисунок 3 — Общий вид прибора ППЭИ

2.3 Прибор ПУЭИП ударных испытаний на раскол образцов пород

Упоминания достойн и упрощенный прибор ПУЭИП, разработанный в КГМИ в конце 80-х гг. [20]. Он предназначен для проведения испытаний пород в полевых (в подземных) и лабораторных условиях экспресс-методом. В приборе использован метод определения разрушающего усилия по пластической деформации мерной проволоки, на которой под динамическим воздействием индентора остается его отпечаток (рис. 4).

Прибор содержит силовую раму из двух стоек 3, которые удерживают две плиты: верхнюю 1 и нижнюю 2, образец помещают между двумя пуансонами 7 со сферическими инденторами 8 и подвергают удару через боек 4, 5 с пружиной 6. Усилие раскола определяют по отпечатку на мерной проволоке 12 в силоизмерительном устройстве 13, 14, 15. Таким образом, в приборе реализован самый простой способ испытаний — раскол образцов сферическими инденторами.

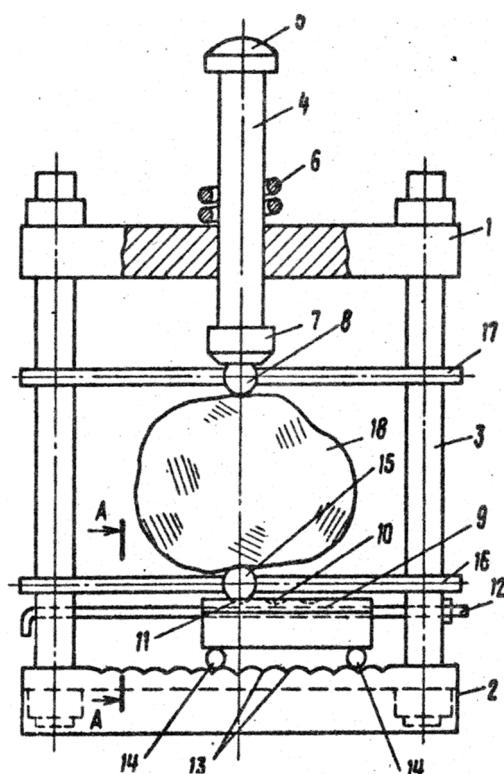


Рисунок 4 — Прибор ПУЭИП для ударных испытаний пород на раскол

Прибор имеет следующие характеристики: усилие удара — 40...90 кН; масса в сборе — 2,4 кг; габариты: 240×220×50 мм, точность показаний 15...30 %. Из этого следует, что он по массово-габаритным показателям превосходит все предыдущие приборы и к тому же отличается дополнительными достоинствами: простота изготовления, низкая стоимость, высокая производительность, произвольная форма образцов, доступность и массовость испытаний.

К недостаткам прибора можно отнести сложность процедуры измерения действующей при расколе нагрузки по отпечатку на мерной проволоке, необходимость частой тарировки мерного отпечатка при смене проволоки или индентора, невысокую точность испытаний. Тем не менее следует отметить оригинальность решения вопроса фиксации силы удара по отпечатку на мерной проволоке и возможность ее многократного использования путем разматывания ее из мотка.

2.4 Приборы-тестеры для испытаний на раскол образцов пород

Имеется много фирм, предлагающих аналогичные приборы. Например, портативный прибор-тестер для испытания горных пород в полевых условиях (рис. 5) позволяет определять показатель прочности породы (RSI согласно стандарту ASTM D5731). Он имеет размеры 350×350×710 мм и массу 42 кг, при этом развивает нагрузку на образец до 100 МПа.

Компания Techpedia (Италия) также предлагает тест-прибор из несущей рамы с грузоподъемностью 60 кН и с гидравлическим загрузочным механизмом, приводимым в действие ручным насосом (рис. 6).

В последнее время появилось много приборов для косвенного определения прочности, в которых реализованы неразрушающие методы контроля: ультразвуковые, по упругому отскоку и пр. Они имеют малую массу и достаточно удобны, но требуют пересчета показателей с помощью тарировочных графиков или таблиц для каждого испытуемого материала, а показатели обладают большой изменчивостью, требуют многократных повторений испытаний, причем их точность не превышает 20...30 %. Правильнее такие приборы называть тестерами или пробниками.



Рисунок 5 — Тестер точечной нагрузки фирмы NEXTGEN (<https://www.nextgentest.com/rock-mechanics-testing-equipment/index-apparatus/>)

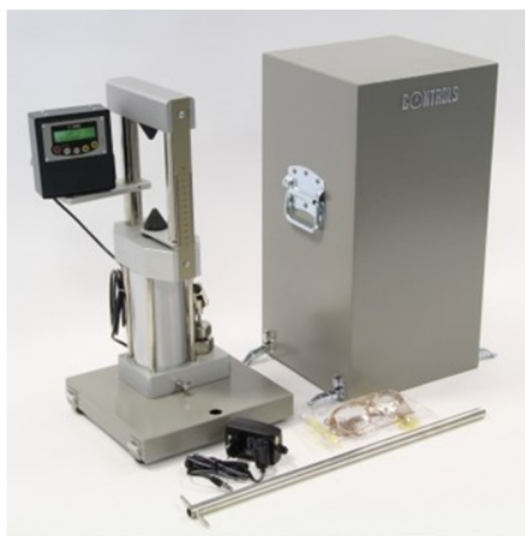


Рисунок 6 — Прибор для раскола образцов
фирмы GeoTechpedia
(<https://geotechpedia.com/Equipment/Show/243/Rock-strength-index-apparatus>)

Из таких приборов-тестеров можно выделить отдельную разновидность, использующую принцип склерометрии, (например, молоток Шмидта), когда измеряют упругий отскок бойка от поверхности материала.

Один из вариантов таких приборов показан на рисунке 7.

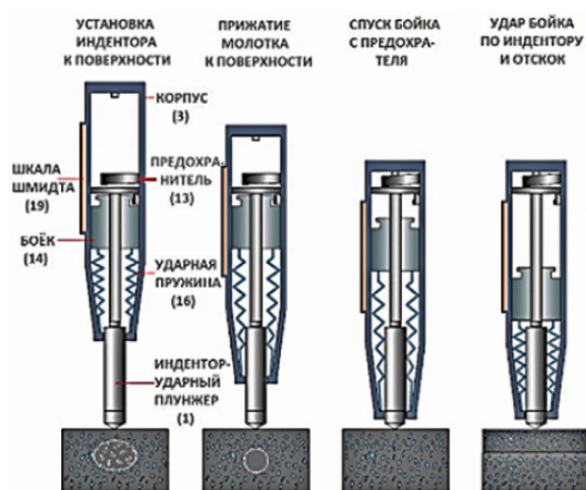


Рисунок 7 — Молоток Шмидта
с использованием принципа склерометрии
(https://www.gsi.ru/catalog/testing/rock_schmidt?ysclid=md35j29njv513229008)

Таким образом, как можно судить из приведенных примеров существующих конструкций приборов различных фирм, несмотря на их большое разнообразие, они не в полной мере являются переносными, но самое главное — из-за создаваемой низкой нагрузки они не могут использоваться для получения истинных показателей прочности, особенно на сжатие.

Проведенный анализ существующих конструкций портативных приборов для определения прочностных свойств горных пород позволил установить следующие их особенности:

1) как правило, нагрузка на испытуемый образец создается физическими усилиями оператора;

2) в конструкции большинства приборов предусмотрены гидросистема для нагружения образца или зубчатые редукторы;

3) все конструкции приборов рассчитаны на проведение испытаний пород на раскол (косвенное растяжение) и неприменимы для определения их прочности на сжатие из-за низких силовых показателей нагружающих устройств (до 10...20 кН);

4) не все приборы имеют малые размеры и массу; их конструкция сложна для изготовления, а получаемые в результате испытаний показатели прочности имеют опосредованный характер;

5) испытания требуют продолжительное время на подготовительно-заключительные операции.

Отсюда можно сделать вывод, что разработка новой конструкции портативного прибора для комплексных испытаний горных пород в полевых условиях остается актуальной.

3 Формулирование требований к портативным приборам

Обобщая проведенный анализ портативных приборов для испытаний горных пород, можно отметить такие общие их характерные показатели:

– позволяют определять прочность на одноосное растяжение только расколом породы сферическими и реже — клиновыми инденторами;

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

– рассчитаны на невысокие рабочие нагрузки (в пределах 10...50, реже — 100 кН), не пригодны для определения прочности пород на сжатие, причем ни один из известных приборов не может испытывать скальные породы высокой (более 100 МПа) прочности;

– нагрузку на испытуемый образец породы вплоть до его разрушения необходимо создавать за счет мускульных усилий оператора, зачастую требуется помощь второго оператора для отсчета показаний и выполнения вспомогательных операций (удерживания прибора и пр.);

– при нагружении образца его силовой каркас накапливает упругую энергию, которая приводит к резкому (взрывному) разрушению хрупкой породы и динамической разгрузке деталей прибора, что часто вызывает нарушение работы регистрирующих устройств, выбиванию поршней из гидроцилиндров с разливом рабочей жидкости и т. д.;

– низкая производительность испытаний и большие затраты времени на их проведение, что часто не всегда возможно в полевых, а тем более в производственных условиях.

Учитывая накопленный отечественный и мировой опыт по разработке и применению различных портативных приборов в сфере открытой и подземной геотехнологии, а также запросы инженеров-проектировщиков и практиков, можно сформулировать ряд конструктивных требований к техническим характеристикам создаваемых конструкций приборов с учетом возросших возможностей современного приборостроения:

1) производить при ограниченном объеме и числе образцов максимальное число разнообразных испытаний;

2) малая масса (до 4 кг) при предельной нагрузке на образец до 250 кН и минимальные габаритные размеры;

3) удобство нагружения образца в процессе испытаний одним оператором без приложения мускульных усилий;

4) исключение динамического характера разгрузок из-за накопленной в конструкции прибора потенциальной энергии при хрупком разрушении образца;

5) проведение испытаний на образцах стандартных размеров согласно действующим нормативам;

6) массовость экспресс-испытаний в полевых условиях на месте отбора проб без предварительной длительной подготовки образцов;

7) иметь набор устройств и инденторов для определения различных прочностных показателей пород, в первую очередь на прямое растяжение и сжатие;

8) возможность определения прочности слоистых пород по контактам и под разными углами к напластованию.

Эти пункты отнюдь не исчерпывают все многообразие требований, которым должны отвечать подобного типа приборы. В зависимости от специфики предполагаемого использования прибора они могут дополняться и изменяться. Тем не менее, они позволяют сосредоточиться на определенных конструктивных решениях при разработке отдельных узлов и всего прибора в целом.

Остановимся на требовании минимальных габаритных размеров прибора. Учтем, что у основной массы получаемых кернов диаметр находится в диапазоне 35...60 мм, а высота образцов, согласно принятым нормам, должна составлять не менее 1,2...2,0 диаметра.

Отсюда можно заключить, что размер окна для установки образцов должен быть не менее 60×100 мм. С учетом удобства расположения образца и его обслуживания размер следует увеличить до 80×140 мм.

При выборе максимального усилия, которое должен создать прибор, следует ориентироваться на прочность образца при сжатии $\sigma_{сж}$ и диаметр керна (рис. 8).

Выделенная на рисунке 8 площадь показывает допустимый размах изменения диаметров керна для заданной прочности породы. Например, чтобы испытывать керны диаметром 60 мм усилие прибора должно быть не менее 150 кН уже для породы прочностью 50 МПа. Можно считать, что для портативного прибора вполне достаточен уровень создаваемой нагрузки на образец, достигающий до 250 кН.

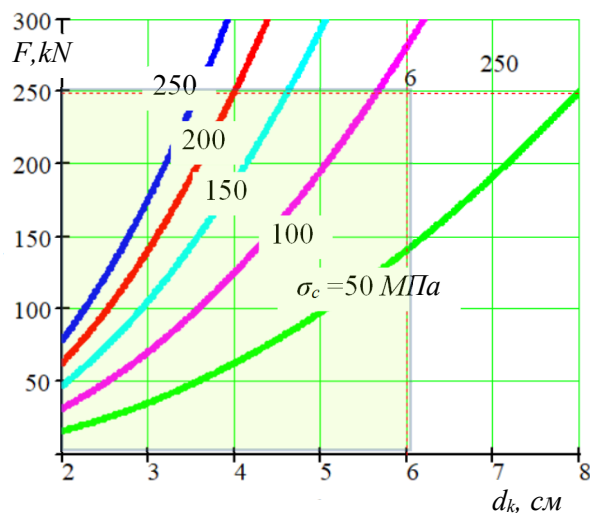


Рисунок 8 — Зависимость разрушающей нагрузки F от прочности породы σ_c на сжатие и диаметра керна d_k

Если портативный прибор не сможет обеспечить нагрузку на образец более 100...150 кН, он не пригоден для проведения испытаний на сжатие. При этом следует произвести расчеты на прочность всех составных частей прибора для обеспечения этой предельной нагрузки. Тогда очень прочные образцы породы ($\sigma_c = 200$ МПа) можно испытывать в виде кернов диаметром до 40 мм, а при $\sigma_c = 100$ МПа — до 60 мм.

На основании этих технических требований и ограничений следует выполнить разработку новой конструкции портативного прибора.

4 Новая конструкция прибора ППЭИ

В соответствии с основными требованиями, которым должен отвечать прибор, рассмотрим особенности его конструктивного исполнения (рис. 9).

Прибор выполнен в виде портативного пресса, основная цель которого — при минимальных размерах и массе создать максимальное усилие, воздействующее на испытываемый образец.

Базовым элементом прибора (рис. 9) служит трубчатый корпус 1, на верхний конец которого ввинчен нагружающий цилиндр 2 с

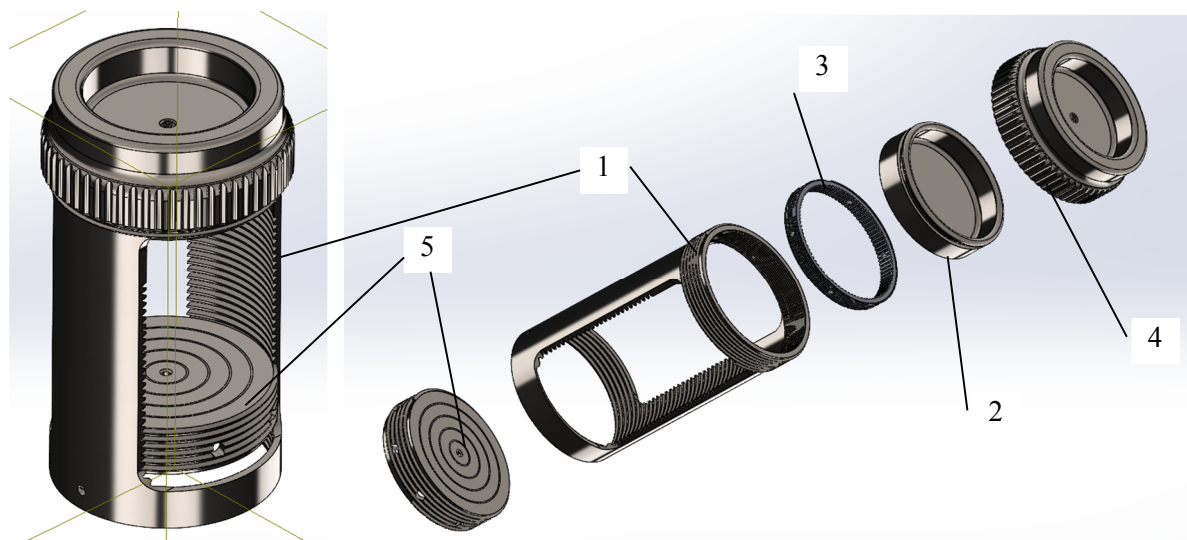
поршнем 3. В корпусе 1 предусмотрены два прямоугольных проема 4 для удобного размещения образца с инденторами (не показаны).

Корпус 1 снабжен внутренней резьбой, а с нижнего его конца 1 ввинчена плита 5 с возможностью перемещения вдоль корпуса 1 на резьбе. Кроме того, внутри корпуса 1 под поршнем 3 предусмотрена стопорная гайка 3 для ограничения свободного хода поршня 3 вниз и устранения его выбивания при разрушении образца. В плите 5 и стопорной гайке 3 для их вращения в резьбе корпуса 1 предусмотрены радиальные отверстия 7, куда можно вставить рукоятку из прутка диаметром 5 мм.

Для обеспечения создания в приборе разрушающей нагрузки вместо общепринятого решения прибегнуть к гидроцилиндру нами в приборе используется сжатый под большим давлением воздух из минибаллона. Общий вид такого минибаллона (аналог — минибаллон для дайвинга) с тонким РВД (рукавом высокого давления) представлен на рисунке 10. Его технические показатели (объем 0,5 л, давление газа 30 МПа) хорошо удовлетворяют требованиям для использования в портативном приборе. Изменение давления отслеживают по манометру точных измерений, который последовательно подключен к гибкому РВД через соответствующие фитинги. Одновременно производят запись давления на регистрирующий прибор.

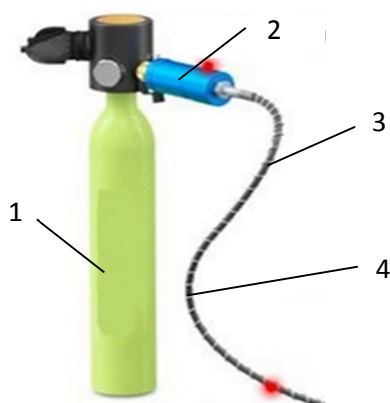
Все рукава высокого давления РВД между разными элементами прибора должны иметь низкую пропускную способность, поскольку продолжительность испытаний образцов должна быть в пределах 1,0...1,5 мин.

Тем самым обусловлен минимальный диаметр РВД, который составляет не более 1 мм, а площадь проходного отверстия равна 0,785 мм². Такие размеры позволяют выполнить все РВД гибкими и легко монтируемыми, несмотря на высокое передаваемое давление. При внутреннем диаметре трубопровода 1 мм и давлении воздуха 20 МПа, его температуре 20° и расходе 1,5е–05 м³/мин скорость потока воздуха составляет 0,32 м/с, что вполне достаточно для целей проведения испытаний.



1 — корпус; 2 — поршень; 3 — стопорное кольцо; 4 — цилиндр; 5 — плита

Рисунок 9 — Сборка прибора ППЭИ-4 в собранном (а) и разнесенном (б) виде



1 — минибаллон объемом $V_b = 0,5$ л;
2 — масло-влажнотделитель; 3 — рукав высокого давления; 4 — газ к цилиндру прибора ППЭИ

Рисунок 10 — Общий вид мини-баллона как источника давления для прибора ППЭИ

В целом конструкция приборного комплекса представляет собой устройство в виде двух самостоятельных сборочных единиц (без учета регистрирующих и записывающих приборов, управляющей и распределительной арматуры):

– портативный пресс на давление до 250 кН, в котором размещают подготовленный к испытанию образец породы вместе с набором необходимых инденторов;

– источник высоконапорного давления сжатого газа (воздух, азот и пр.) в виде мини-баллона емкостью 0,5 л и с давлением до 30 МПа.

Разработанная новая конструкция портативного прибора для экспресс-испытаний горных пород имеет такие основные новые отличительные признаки:

1) система энергообеспечения, основанная на использовании давления сжатого газа из мини-баллона;

2) передача давления сжатого газа на образец через систему пневмоцилиндров, новый способ создания нагрузок на образец за счет использования в качестве рабочей среды газа под высоким давлением (30 МПа), который находится в мини-баллоне для сжатого газа 0,5 л;

3) стопорное кольцо между нагружающим поршнем и образцом, позволяющее устранить выброс нагружающего поршня из цилиндра при разрушении образца и ограничить его предельное перемещение;

4) возможность использования многочисленных вспомогательных инденторов и устройств, значительно расширяющих диапазон способов и средств испытаний пород.

5 Мультипликатор для испытаний пород на одноосное сжатие

Для испытания пород с целью определения прочности на одноосное сжатие часто даже давления остаточного газа 3...5 МПа в мини-баллоне недостаточно. Чтобы провести многократные испытания прочных скальных пород, необходимо в 2–10 раз увеличить давление газа в нагружающем цилиндре вплоть до исходного 30 МПа, несмотря на снижение давления в мини-баллоне до величины 3...5 МПа. Для этого разработано новое устройство — пневмомультипликатор (пневмоусилитель), назначение которого в многократном (в 10 раз) увеличении давления от мини-баллона с давлением до 3...5 МПа к нагружающему поршню прибора (30 МПа), который непосредственно воздействует на образец породы. С этой целью разработан пневмомультипликатор (усилитель давления), решающий эту задачу.

Устройство пневмомультипликатора (ПМ) должно отвечать следующим требованиям:

- десятикратно (до 30...35 МПа) повышать остаточное давление от мини-баллона (3...5 МПа);

- давать как минимум перемещение плунжера в 10 раз больше (10 мм), чем перемещение нагружающего поршня (1 мм).

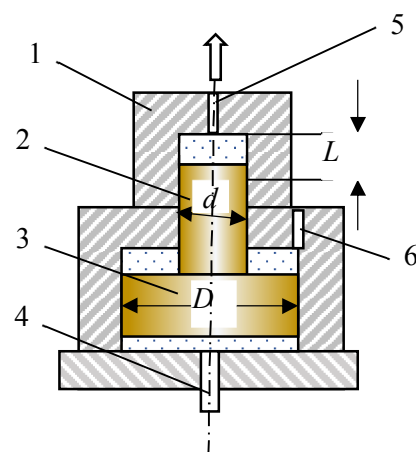
Пневмомультипликатор (рис. 11) состоит из корпуса 1, штока 2 диаметром $d=20$ мм, поршня 3 диаметром $D=100$ мм и крышки 4. В корпусе предусмотрены ввод 4 сжатого воздуха от мини-баллона под давлением до 30 МПа, вывод 5 газа под высоким давлением до 30...35 МПа из-под штока 2 в прибор и вывод 6 газа из-под поршня наружу.

Рабочий ход поршня ПМ равен ходу плунжера, которые, в свою очередь, превышают рабочий ход поршня нагружающего цилиндра в 10 раз. Всего в конструкции ПМ имеется 3 камеры: под поршнем К1, над поршнем К2 и над плунжером К3, каждая из которых контролируется манометром точных измерений и датчиками давления с

непрерывной или периодической записью в файл на регистрирующем приборе. Как правило, для этого достаточно использовать ОЗУ смартфона, подключенного к датчикам через соответствующие АЦП и ЦАП. Особенности их подключения и записи результатов испытаний выходят за рамки настоящей статьи. Схема коммутации камер ПМ зависит от принятой методики испытаний.

Конструкция ПМ и ее оптимизация с целью минимизации массово-габаритных характеристик выполнялась с помощью системы автоматизированного проектирования (САПР) для трехмерного моделирования и создания инженерных чертежей SolidWorks. Были изучены различные конфигурации ПМ и выполнены с помощью SolidWorks Simulation для каждой из них соответствующие численные расчеты распределения напряжений и деформаций в элементах сборки методом МКЭ с оценками прочностных параметров.

ПМ без вспомогательной арматуры представлен на рисунке 12 в разнесенном на сборочные единицы и рассеченном по оси симметрии виде.



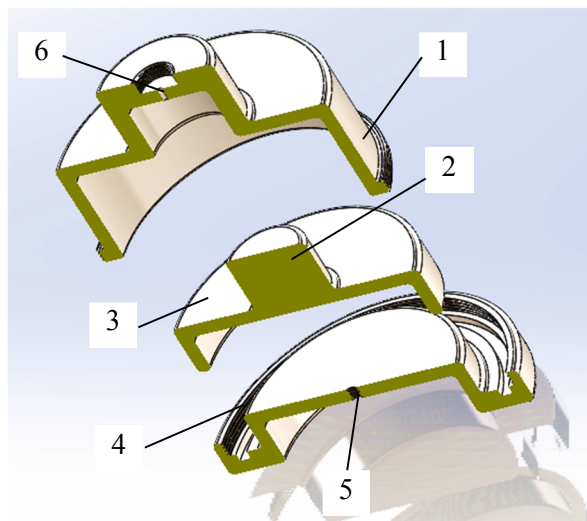
1 — корпус; 2 — шток; 3 — поршень;
4 — ввод газа 30 МПа; 5 — вывод сжатого газа
в прибор 300 МПа; 6 — вывод газа
из-под поршня ПМ

Рисунок 11 — Схема конструкции пневмомультипликатора к прибору ППЭИ

Фигурная форма крышки 4 вызвана необходимостью обеспечить минимальный объем мертвого пространства под поршнем, близкий к нулю при одновременном выполнении условия ширины пустотелого поршня не менее 0,4 его диаметра.

Разработанная конструкция ПМ имеет минимально возможные массо-габаритные параметры: общая масса МП (без учета присоединенных датчиков, РВД и соединительной арматуры) не превышает 2,2 кг, максимальный диаметр 110 мм и высота 90 мм. Это позволяет считать в целом прибор портативным и удобным для использования не только в лабораторных, но и в полевых условиях.

Отметим, что применение ПМ имеет ограничения, связанные с прочностью элементов прибора, которые в начальной конфигурации рассчитаны на давление до 30...35 МПа. Поэтому использование ПМ уместно в случаях снижения исходного давления в мини-баллоне ниже требуемого по условиям испытания, определяемое прочностью и диаметром образца испытуемой породы.



1 — корпус; 2 — шток;
3 — поршень; 4 — крышка;
5, 6 — ввод и вывод сжатого газа

Рисунок 12 — Конструкция пневмомультипликатора (ПМ) к прибору ППЭИ с разрезом по оси симметрии

Следовательно, применение ПМ будет вполне оправданно, если требуется проведение испытаний пород в условиях уменьшения давления сжатого воздуха в мини-баллоне, особенно при невозможности его пополнения.

Таким образом, ПМ окажется востребованным не только для испытания высокопрочных пород, но и в обычных условиях.

6 Расчет необходимых параметров сжатого газа для проведения испытаний пород

Основное преимущество применения предложенного нового способа создания нагрузки в приборе за счет использования сжатого воздуха из мини-баллона — исключение необходимости в мускульных усилиях оператора для разрушения породного образца.

Вычислим условия применения сжатого газа при его расходе из мини-баллона, для чего необходимо получить расчетные обоснования энергетических и расходных параметров сжатого газа, используемого в приборе.

Определим количество испытаний, которые можно воспроизвести без использования ПМ одним мини-баллоном с объемом газа $V_b = 0,5$ л, находящегося под давлением $p_b = 30$ МПа. Всего в баллоне приведенного к атмосферному давлению газа будет $G_b = V_b \cdot p_b = 150$ л.

В начальном положении под поршнем 2 в цилиндре 1 (рис. 9) объем камеры ничтожно мал (нулевой), поскольку внутренний контур поршня полностью совпадает с примыкающими внутренними обводами цилиндра.

Диаметр нагружающей камеры прибора под поршнем равен $D_p = 92$ мм, а предельное перемещение поршня 3 под нагрузкой ограничено стопорным кольцом и для обычных испытаний равно $h_{пл} = 1$ мм. Такого перемещения поршня вполне достаточно, поскольку аксиальное перемещение образца в момент разрушения составляет

$$\Delta l_p = \frac{\sigma_c}{E_o} l_o = \frac{200}{5 \cdot 10^4} \cdot 80 = 0,32 \text{ мм}, \quad (1)$$

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

где Δl_o — искомое аксиальное перемещение образца в момент разрушения;

σ_c — максимально возможная прочность образца на одноосное сжатие, $\sigma_c = 200$ МПа;

E_o — продольный модуль упругости (модуль Юнга) образца породы, $E_o = 50$ ГПа $= 5 \cdot 10^4$ МПа;

l_o — максимально допустимая длина породного образца в приборе, $l_o = 80$ мм.

Таким образом, аксиальное перемещение образца при испытаниях намного меньше задаваемого кольцевым стопором прибора $\Delta l_o = 0,32$ мм $\ll h_{II} = 1$ мм, и здесь при испытаниях скрыт резерв снижения расхода газа из баллона.

При испытании породы газ из мини-баллона под давлением p_i в зависимости от заданного перемещения поршня h_{II} заполняет объем под поршнем ΔV , который равен

$$\Delta V = \frac{\pi}{4} \cdot D_{II}^2 \cdot h_{II}, \quad (2)$$

где D_{II} — внутренний диаметр нагружающей камеры.

Оценим, насколько снижается давление газа в мини-баллоне при проведении разового испытания, воспользовавшись уравнением Клапейрона — Менделеева. При каждом испытании часть газа из баллона уйдет в прибор для разрушения образца и в мини-баллоне оставшееся после i -го испытания давление p_i понизится на Δp_i и станет равным

$$p_{i+1} = p_i - \Delta p_i. \quad (3)$$

Найдем снижение давления газа Δp_i при i -ом испытании:

$$\Delta p_i = \frac{\Delta V}{V_b} p_i. \quad (4)$$

Из (4) следует, что по мере проведения испытаний давление газа из мини-баллона при каждом i -ом испытании будет снижаться пропорционально уровню давления p_i , т. е. по мере роста количества испытаний i .

Подставляя в (3), получим очевидное рекуррентное соотношение:

$$p_{i+1} = p_i \left(1 - \frac{\Delta V}{V_b} \right), \quad (5)$$

где p_i — давление газа в мини-баллоне после i -го испытания.

Полученная рекурсия (5) для определения давления в мини-баллоне p_{i+1} через предыдущее его значение p_i позволяет найти основное рекуррентное соотношение, вводя в уравнение (5) обозначение $\Delta V / V_b = c_v$ и выполняя последовательно очевидные подстановки и преобразования

$$p_1 = p_b - p_b c_v = p_b (1 - c_v)^1,$$

$$p_2 = p_1 - p_1 c_v = p_1 (1 - c_v) = p_b (1 - c_v)^2,$$

...

$$p_{n-1} = p_{n-2} - p_{n-2} c_v = p_{n-2} (1 - c_v) = p_b (1 - c_v)^{n-1},$$

$$p_n = p_{n-1} - p_{n-1} c_v = p_{n-1} (1 - c_v) = p_b (1 - c_v)^n,$$

получаем окончательное выражение в виде степенной функции для определения давления в мини-баллоне после n числа испытаний:

$$p_n = p_b (1 - c_v)^n. \quad (6)$$

В развернутом виде формула приобретает вид

$$p_n = p_b \left(1 - \frac{\pi}{4} \cdot \frac{D_{II}^2 \cdot h_{II}}{V_b} \right)^n, \quad (7)$$

где V_b — объем мини-баллона, $V_b = 0,5$ л; D_{II} — диаметр камеры под поршнем 3, $D_{II} = 92$ мм;

p_b — предельно допустимое давление сжатого газа в мини-баллоне, $p_b = 30$ МПа;

Очевидно, что испытания будут возможны до тех пор, пока давление p_n будет превышать давление сопротивления p_o образца породы, т. е. соблюдается неравенство:

$$p_n \geq p_o = \sigma_o \cdot \left(\frac{D_o}{D_p} \right)^2, \quad (8)$$

где D_o , σ_o — диаметр (m^2) и прочность (МПа) подвергаемого испытанию образца.

Это неравенство и выражение (7) позволяют найти предельно возможное число испытаний n для породных образцов разной прочности и диаметра. После несложных алгебраических преобразований приведем окончательный вариант формулы для определения возможного числа испытаний образцов n в развернутом виде:

$$n \leq \frac{\ln \left[\frac{p_b \left(\frac{D_{\Pi}}{D_o} \right)^2}{\sigma_o} \right]}{\ln \left(1 - \frac{\pi}{4} \cdot \frac{D_{\Pi}^2 \cdot h_{\Pi}}{V_b} \right)}. \quad (9)$$

Здесь надо отметить, что использование пневмомультипликатора позволяет существенно (до 10 раз) повысить давление p_b и тем самым заметно расширить диапазон возможных испытаний пород.

Рассмотрим некоторые особенности определения предельного числа испытаний n , для чего следует воспользоваться рисунком 13, построенным на основе формулы 9.

Наиболее употребительные диапазоны изменения диаметров и прочности испытуемых образцов для осадочных пород массивов в Донбассе выделяют условный прямоугольник с границами $D_o = 2 \dots 6$ см и прочности $\sigma_o = 10 \dots 150$ МПа, тогда как их пересечение в центре графиков рисунка 13 очерчивает осредненные значения прочности ($\sigma_o = 30 \dots 100$ МПа) и размеров образцов ($D_o = 3,5 \dots 5$ см).

В среднем общее число возможных испытаний образцов на одном заряде мини-баллона газом давлением $p_b = 30$ МПа с применением ПМ находится в пределах $n_{ср} = 250 \dots 350$. Такое количество испытаний вполне достаточно для 6-ти месяцев работы любой специализированной лаборатории по определению физико-механических свойств горных пород.

Подобного же рода график будет полезен для определения числа оставшихся испытаний n при любом снижении давления газа p_b в мини-баллоне в процессе использования прибора ППЭИ или при повышении давления с помощью ПМ.

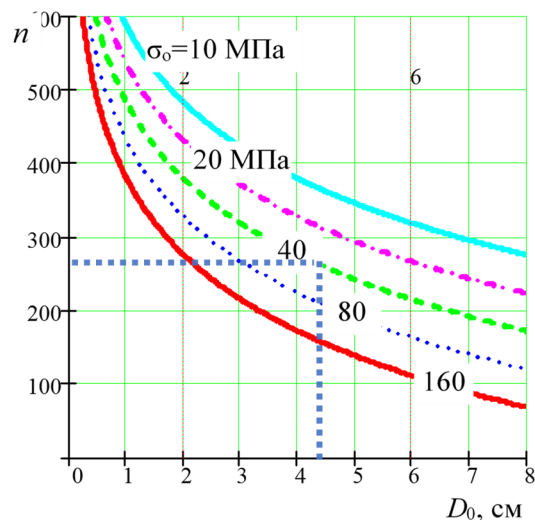


Рисунок 13 — Зависимость числа возможных испытаний n от диаметра D_o и прочности σ_o образца

В любой момент до и в процессе испытаний всегда можно определить остаточное число возможных испытаний по формуле (9), подставив в нее значение остаточного давления воздуха в минибаллоне p_b и прогнозируемые прочность σ_o и диаметр D_o породного образца. Так, если давление в мини-баллоне снизилось с 30 до 5 МПа (а значит, после пневмомультипликатора — до 50 МПа), прибор все еще останется в работоспособном состоянии. Согласно (9) этого давления достаточно, чтобы для образцов диаметром 4 см произвести по крайней мере 38 испытаний на сжатие при его прочности 160 МПа или 140 при прочности в пределах 40 МПа.

Следовательно, можно с уверенностью полагать, что запас давления, необходимый для испытаний пород, полностью обеспечивается энергией сжатого газа из мини-баллона емкостью 0,5 л.

7 Методика проведения испытаний скальных пород

Испытание проводят в следующей последовательности. Поршень 3 смещают в цилиндре 4 вверх до упора, чтобы обнулить объем внутренней полости в цилиндре 2. Затем устанавливают стопорную гайку 6 с

некоторым зазором под поршнем, обычно на величину ожидаемого смещения образца при его разрушении (ориентировочно до 0,2...1 мм).

После этого внутрь цилиндра 1 под поршень 3 вверх и на плиту 5 вниз устанавливают с помощью монтажных выступов инденторы, соответствующие форме образца и выбранному методу испытаний на прочность (раскалывание или сжатие и в зависимости от формы образца). Собранный пакет из инденторов и образца прижимают вращением плиты 5 вверх к поршню 3.

Сила поджатия составляет примерно 1,5...2 кН, чего легко достигнуть с помощью переставной рукояти длиной 200 мм, которую продевают в радиальные отверстия плиты 5 при ее вращении рукой с усилием не более 50...100 Н.

На этом этапе заканчивают установку образца в прибор и переходят непосредственно к его испытанию.

Для этого в цилиндр 2 через игольчатый дроссельный клапан по гибкому рукаву высокого давления (РВД) с внутренним диаметром 1 мм (не показан) подают сжатый газ из мини-баллона (аналог — мини-баллон для дайвинга) в нагружающий цилиндр прибора ППЭИ при испытаниях на раскол или на вход ПМ при испытаниях образцов на сжатие.

Образец нагружают до разрушения, подавая воздух из мини-баллона с помощью игольчатого клапана при постоянной скорости нарастания нагрузки согласно ГОСТ 10180-2012:

- при сжатии $0,6 \pm 0,2$ МПа/с;
- при растяжении или раскалывании $0,05 \pm 0,01$ МПа/с.

Обратим внимание на то, что требуемая скорость испытаний на растяжение примерно на порядок меньше скорости при сжатии, поэтому время нагружения образца при каждом испытании будет примерно одинаковым, независимо от вида испытаний, и примерно равным 1,5...2 мин.

Все предыдущие расчеты велись из условия неконтролируемого поступления воздуха из мини-баллона в нагружающий

цилиндр прибора после наступления разрушения образца. Однако, если прибегнуть к более эффективной методике испытаний, которая состоит в том, чтобы в момент разрушения образца сразу перекрывать краном поступление воздуха под поршень цилиндра, можно достигнуть значительной экономии расхода сжатого воздуха.

Перекрытие краном поступления воздуха в момент разрушения образца вполне осуществимо, поскольку после предусмотренного методикой достаточно плавного и сравнительно продолжительного времени повышения давления и нагружения образца в приборе в пределах 1,5...2 мин происходит резкое (часто взрывоподобное) его разрушение и почти немедленное скачкообразное падение показаний манометра, т. е. момент перекрытия краном подачи сжатого воздуха оператору можно четко зафиксировать по манометру.

Чтобы доказать возможность существенного увеличения числа возможных испытаний, проведем следующие численные оценки. Примем во внимание, что модуль продольной деформации у большинства скальных осадочных пород не менее $E \geq 20$ ГПа (см., например, [23]). Модуль упругости базальта — 79–93 ГПа. Следовательно, при испытании высокопрочного образца базальта диаметром $D_0 = 40$ мм, длиной $l = 80$ мм и прочностью 250 МПа его сжатие вдоль оси составит

$$\Delta l_{\max} = \frac{\sigma_0}{E} \cdot l \approx \frac{250}{8 \cdot 10^4} \cdot 80 \approx 0,25 \text{ мм. (10)}$$

Предполагаемое возможное перемещение нагружающего цилиндра прибора при проведении сжатия равно $\Delta l_{\max} = 2$ мм, мы на основании результатов согласно (10) видим, что $\Delta l_0 = 0,25 \text{ мм} \ll \Delta l_{\max} = 2 \text{ мм}$. Примерно такие же соотношения мы можем получить и для других (осадочных, метаморфических, малосвязных и пр.) типов пород и искусственных каменных материалов.

Если перекрыть поступление сжатого газа в нагружающий цилиндр прибора сразу после разрушения образца, можно сократить

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

его расход на 50...80 % по сравнению с обычной методикой испытаний, когда не делают отсечку поступления газа. Тем самым можно увеличить число возможных испытаний минимум в 2 раза и этот резерв позволяет заметно продлить время использования прибора вне стационарной лаборатории, обходясь без дополнительного источника пополнения мини-баллона сжатым газом.

Таким образом, разработаны общие положения методики проведения испытаний скальных пород на приборе, позволяющие многократно определять их прочность не только на раскол, но и на прямое сжатие с помощью сжатого воздуха и мини-баллона.

Следует отметить, что элементы методики испытаний могут претерпеть существенные изменения в зависимости от искоемых показателей прочности, применяемых методов испытаний и требуемых наборов инденторов, что будет более подробно рассмотрено в последующих публикациях.

Выводы

Проведенные исследования и конструкторские разработки позволяют в итоге сделать следующие выводы:

1. На основании проведенного анализа существующих конструкций портативных приборов установлены присущие им достоинства и недостатки.

2. Сформулированы основные технические требования к портативному прибору, позволяющие перейти непосредственно к этапу его разработки и проектирования.

3. Разработана новая конструкция портативного прибора для экспресс-испытаний горных пород, основными новыми отличительными элементами и признаками которого являются:

– система энергообеспечения, основанная на использовании в качестве рабочей

среды газа под высоким давлением (32 бар), который находится в мини-баллоне для сжатого газа 0,5...1,0 л массой;

– передача давления сжатого газа на образец через систему пневмоцилиндров;

– пневмомультипликатор, позволяющий повысить давление сжатого газа до 10 раз и проводить испытания пород на прямое сжатие;

– стопорное кольцо между нагружающим поршнем и образцом, устраняющее выброс нагружающего поршня из цилиндра при разрушении образца;

– возможность использования многочисленных вспомогательных инденторов и устройств, значительно расширяющих диапазон способов и средств испытаний пород.

4. Произведен расчет необходимых параметров сжатого газа для проведения испытаний пород и его ожидаемого расхода в процессе испытаний.

5. Намечены основные положения методики проведения испытаний пород на разработанном приборе.

В результате обоснована новая конструкция портативного прибора для экспресс-испытаний горных пород ППЭИ с минимально возможными массово-габаритными показателями:

– масса прибора 3,5 кг, размеры — 108×108×200 мм;

– масса пневмомультипликатора 2,2 кг, размеры — 108×108×60 мм.

Разработанный прибор может стать основным по определению физико-механических показателей горных пород и искусственных каменных материалов и найти широкое применение в геологии, нефтяной, горной, строительной и других отраслях промышленности, а также в лабораториях вузов при подготовке специалистов горного и строительного профиля.

Список источников

1. Лобанков В. М. Основы метрологии геофизических измерений. Уфа : Изд-во УГНТУ, 2020. 198 с.
2. Bubnov E. Ya. Experimental studies of vibration fields of a freight train in the far zone // Journal of Physics: Conference Series. Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021, ITMM 2021 — Mathematical modeling and computational methods in problems of electromagnetism,

electronics and physics of welding. Vol. 2131. 2021. Article 052051. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/5/052051 EDN EGZGSK

3. Вознесенский А. С. Системы контроля геомеханических процессов. М. : Изд-во Московского государственного горного университета, 2002. 152 с. EDN SDSUZZ

4. Расчетная и аппаратная база геомониторинга состояния массива методом регистрации естественного электромагнитного излучения / С. М. Простов и [др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 11. С. 183–193. DOI: 10.18799/24131830/2022/11/3840 EDN FKWVBW

5. Ezersky M., Eppelbaum L. V., Legchenko A. *Applied Geophysics for Karst and Sinkhole Investigation: The Dead Sea and Other Regions*. Bristol : IOP Publishing Ltd, 2023. 639 p. DOI: 10.1088/978-0-7503-3635-2

6. Prediction of plasma path and analysis of axial fracturing properties in rock fragmentation by high-voltage pulsed discharge (RHPD) / Yong Zhao, Yi Liu, Jin Cheng [et al.] // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2024. Vol. 57. No. 32. Article 325502. DOI: 10.1088/1361-6463/ad44a1

7. Veryaskin A. V. *Gravity, Magnetic, and Electromagnetic Gradiometry. Strategic technologies in the 21st century*. 2nd ed. Bristol : IOP Publishing Ltd, 2021. 190 p. DOI: 10.1088/978-0-7503-3803-5

8. Соколов К. О. Модель годографа электромагнитных волн, дифрагированных на локальном объекте при георадиолокационном изучении слоев горных пород криолитозоны. *Горные науки и технологии*. 2024. Т. 9 № 3. С. 199–205. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-05-118 EDN KIYAZU

9. Hurley R., Zhai Ch. *Ultrasound and acoustic wave propagation measurements in rocks and granular media made concurrently with In Situ synchrotron x-ray imaging* // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2023. Vol. 153. Iss. 3 (supplement). DOI: 10.1121/10.0018659

10. Khimulia V. V. *Experimental Methods for Studying the Mechanical Properties of Rocks* // *Springer Geology. Processes in GeoMedia — Volume VI*. 2023. P. 295–304. DOI: 10.1007/978-3-031-16575-7_29

11. Will M., Rakers E. *Induced seisomoacoustic events in burst-prone areas of West German coal mines* // *Gerlands Beitrage zur Geophysik*. 1990. Vol. 99. No. 1. P. 54–78.

12. Kiliç A., Teymen A. *Determination of mechanical properties of rocks using simple methods* // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2008. Vol. 67. No. 2. P. 237–244. DOI: 10.1007/s10064-008-0128-3

13. Field investigations on rock fragmentation under deep water through fractal theory Measurement / H. Wang, S. Liu, X. Qu [et al.] // *Journal of the International Measurement Confederation*. 2022. 15 p. DOI: 10.2139/ssrn.4010404 EDN CGIEFI

14. Adeyemi Emman Aladejare, Kayode Augustine Idowu, Toochukwu Ozoji. *Reliability of Monte Carlo simulation approach for estimating uniaxial compressive strength of intact rock* // *Earth Science Informatics*. 2024. Vol. 17. P. 2043–2053. DOI: 10.1007/s12145-024-01262-1

15. Рекомендации по комплексу методов определения механических свойств горных пород (для инженерных расчетов горного давления). Л. : ВНИМИ, 1980. 105 с.

16. Требования к определению механических свойств горных пород при геологическом изучении полей шахт Министерства угольной промышленности СССР (при разведке, строительстве, реконструкции и эксплуатации). Л. : ВНИМИ, 1977. 95 с.

17. Инструкция по эксплуатации прибора-пробника БУ-39 / Министерство угольной промышленности СССР, Всесоюзный научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела ВНИМИ. Л., 1974. 25 с.

18. Литвинский Г. Г., Курман С. А. Портативный прибор для экспресс-испытаний горных пород // *Шахтное строительство*, 1982. № 11. С. 12–14.

19. Прибор для механических испытаний горных пород : а. с. 641098 СССР. № 2044978/22-03 ; заявл. 10.07.74 ; опубли. 05.01.79, Бюл. № 1. 3 с.

20. Прибор для испытания горных пород расколом : а. с. 1446303 СССР. № 4669571/31-03 ; заявл. 30.03.89 ; опубли. 15.12.90, Бюл. № 46. 3 с.

21. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород // под ред. Н. В. Мельникова, М. М. Протодяконова, В. В. Ржевского. М. : Недра, 1975. 279 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ГЭМС ДонГТУ Корнеевым С. В.,
д.т.н., и. о. директора РАНИМИ Дрибаном В. А.

Статья поступила в редакцию 08.09.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Литвинский Гарри Григорьевич, д-р техн. наук, профессор каф. геотехнологий и промышленной безопасности
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия, e-mail: ligag@ya.ru

Litvinsky G. G. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, e-mail: ligag@ya.ru)
DEVELOPMENT OF A PORTABLE INSTRUMENT DESIGN FOR RAPID TESTING OF ROCKS

The prompt and accurate determination of the physical and mechanical properties of soils and rocks in field conditions is achieved using various portable instruments. The article analyzes the designs of portable instruments, highlighting their advantages and disadvantages, outlines the main requirements for them. Justification and calculation of the structural and technical parameters of a new portable instrument for rapid testing of rocks PIRT has been conducted, where samples are loaded for the first time with compressed air at a pressure of 30 MPa from a 0,5 l. mini-cylinder. Then, using a pneumatic multiplier, the pressure is increased in 2–10 times, which allows to test hard rocks not only for splitting but also for compression. The PIRT instrument surpasses the existing domestic and foreign analogues in its indicators, its mass-dimensional parameters are minimal (dimensions 110×110×200 mm, weight 3,5 kg), it is easy to manufacture and does not require the operator's physical efforts. Geologists, miners, drillers, road builders, and civil and industrial construction workers need it.

Key words: rocks, physical and mechanical properties, rapid testing, portable instruments, functional requirements, design, calculation, compressed gas, pneumatic multiplier.

References

1. Lobankov V. M. Basics of metrology of geophysical measurements [Osnovy metrologii geofizicheskikh izmerenij]. Ufa : USPTU Publishing house. 2020. 198 p.
2. Bubnov E. Ya. Experimental studies of vibration fields of a freight train in the far zone. *Journal of Physics: Conference Series. Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021, IITMM 2021 — Mathematical modeling and computational methods in problems of electromagnetism, electronics and physics of welding*. Vol. 2131. 2021. Article 052051. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/5/052051 EDN EGZGSK
3. Voznesenskiy A. S. Systems for the control of geomechanical processes [Sistemy kontrolya geomekhanicheskikh processov]. M. : Publishing House of Moscow State University. 2002. 152 p. EDN SDSUZZ
4. Prostov S. M. [et al.]. Calculating and hardware-based database for geo-monitoring the mass state through the registration of natural electromagnetic radiation [Raschetnaya i apparaturnaya baza geomonitoringa sostoyaniya massiva metodom registracii estestvennogo elektromagnitnogo izlucheniya]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022. Vol. 333. No. 11. Pp. 183–193. DOI: 10.18799/24131830/2022/11/3840 EDN FKWVBW
5. Ezersky M., Eppelbaum L. V., Legchenko A. *Applied Geophysics for Karst and Sinkhole Investigation: The Dead Sea and Other Regions*. Bristol : IOP Publishing Ltd. 2023. 639 p. DOI: 10.1088/978-0-7503-3635-2
6. Yong Zhao, Yi Liu, Jin Cheng [et al.]. Prediction of plasma path and analysis of axial fracturing properties in rock fragmentation by high-voltage pulsed discharge (RHPD). *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2024. Vol. 57. No. 32. Article 325502. DOI: 10.1088/1361-6463/ad44a1
7. Veryaskin A. V. *Gravity, Magnetic, and Electromagnetic Gradiometry. Strategic technologies in the 21st century*. 2nd ed. Bristol : IOP Publishing Ltd, 2021. 190 p. DOI: 10.1088/978-0-7503-3803-5

8. Sokolov K. O. Model of the hodograph of electromagnetic waves diffracted on a local object during georadar studying of rock layers in the cryolithozone. [Model' godografa elektromagnitnykh voln, difragirovannykh na lokal'nom ob'ekte pri georadiolokacionnom izuchenii sloev gornyh porod kriolitozony]. Mining sciences and technologies. 2024. Vol. 9. No. 3. Pp. 199–205. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-05-118 EDN KIYAZU
9. Hurley R., Zhai Ch. Ultrasound and acoustic wave propagation measurements in rocks and granular media made concurrently with In Situ synchrotron x-ray imaging. The Journal of the Acoustical Society of America. 2023. Vol. 153. Iss. 3 (supplement). DOI: 10.1121/10.0018659
10. Khimulia V. V. Experimental Methods for Studying the Mechanical Properties of Rocks. Springer Geology. Processes in GeoMedia — Volume VI. 2023. Pp. 295–304. DOI: 10.1007/978-3-031-16575-7_29
11. Will M., Rakers E. Induced seismoacoustic events in burst-prone areas of West German coal mines. Gerlands Beitrage zur Geophysik. 1990. Vol. 99. No. 1. P. 54–78.
12. Kiliç A., Teymen A. Determination of mechanical properties of rocks using simple methods. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2008. Vol. 67. No. 2. Pp. 237–244. DOI: 10.1007/s10064-008-0128-3
13. Wang H., Liu S., Qu X. [et al.]. Field investigations on rock fragmentation under deep water through fractal theory Measurement. Journal of the International Measurement Confederation. 2022. 15 p. DOI: 10.2139/ssrn.4010404 EDN CGIEFI
14. Adeyemi Emman Aladejare, Kayode Augustine Idowu, Toochukwu Ozoji. Reliability of Monte Carlo simulation approach for estimating uniaxial compressive strength of intact rock. Earth Science Informatics. 2024. Vol. 17. Pp. 2043–2053. DOI: 10.1007/s12145-024-01262-1
15. Recommendations for a set of methods to determine mechanical properties of rocks (for engineering calculations of mountain pressure) [Rekomendacii po kompleksu metodov opredeleniya mekhanicheskikh svoystv gornyh porod (dlya inzhenernykh raschetov gornogo davleniya)]. L. : VNIMI. 1980. 105 p.
16. Requirements for determining the mechanical properties of rocks in geological studying of coal fields of the Ministry of Coal Industry of the USSR (during exploration, construction, reconstruction, and operation) [Trebovaniya k opredeleniyu mekhanicheskikh svoystv gornyh porod pri geologicheskoy izuchenii polej shaht Ministerstva ugol'noj promyshlennosti SSSR (pri razvedke, stroitel'stve, rekonstrukcii i ekspluatatsii)]. L. : VNIMI. 1977. 95 p.
17. Operating manual of the BU-39 tester [Operating manual of the BU-39 tester]. Ministry of Coal Industry of the USSR. The All-Union Research Institute of Mine Geomechanics and Surveying VNIMI. Leningrad. 1974. 25p.
18. Litvinsky G. G., Kurman S. A. Portable instrument for rapid testing of rocks [Portativnyy pribor dlya ekspress-ispytaniy gornyh porod]. Shahtnoe stroitel'stvo. 1982. No. 11. Pp. 12–14.
19. Instrument for mechanical rock tests: a. s. 641098 USSR. No. 2044978/22-03 ; submitted 10.07.74 ; published 03.01.79. Bulletin No. 1. 3 p.
20. Instrument for testing rocks by splitting: a. s. 1446303 USSR. No. 4669571/31-03 ; submitted 30.03.89 ; published 15.12.90, Bulletin No. 46. 3 p.
21. Manual (cadastre) of physical properties of rocks [Spravochnik (kadastr) fizicheskikh svoystv gornyh porod]. Eds. Mel'nikova N. V., Protod'yakonova M. M., Rzhetskogo V. V. M. : Nedra. 1975. 279 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Litvinsky Garry Grigorievich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Geotechnology and Industrial Safety
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Russia, e-mail: ligag@ya.ru