



300 ЛЕТ
КУЗБАСС



А. В. ДЕРЮШЕВ П. М. БУДНИКОВ

ФИЗИКА ГОРНЫХ ПОРОД ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ



Кемерово
2021

ФИЗИКА
ГОРНЫХ ПОРОД



ISBN 978-5-00137-265-3



9 785001 372653

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачёва»
Горный институт

А. В. Дерюшев П. М. Будников

ФИЗИКА ГОРНЫХ ПОРОД

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Кемерово
2021

УДК 622.02(078.5)
Д368

Рецензенты

Кочетков Валерий Николаевич – директор Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН, кандидат технических наук

Цель лабораторного практикума: помочь обучающимся глубже изучить теоретический материал дисциплины "Физика горных пород" и приобрести практические навыки исследования и определения основных параметров физических свойств горных пород и породных массивов.

Настоящий лабораторный практикум составлен на основании учебных планов подготовки горных инженеров специальностей 21.05.04 Горное дело и 21.05.05 Физические процессы горного или нефтегазового производства.

Представленные в учебном пособии 12 лабораторных работ позволяют обучающимся выбирать из них необходимые работы с темами, предусмотренными конкретными рабочими программами дисциплины для соответствующих специализаций.

Учебное пособие состоит из шести разделов и содержит описания лабораторных работ, в каждом из которых приведены: цель выполнения работы, краткие теоретические основы изучаемой темы, применяемые приборы, оборудование, инструменты, образцы горных пород, методические указания к порядку проведения экспериментов, аналитической обработки их результатов и составления отчёта, а также контрольные вопросы для самоподготовки и контроля текущей успеваемости обучающихся.

В настоящем практикуме приведено библиографическое описание 40 использованных и рекомендуемых обучающимся для самостоятельного изучения информационных ресурсов.

В пяти приложениях практикума приведены:

- основные правила организации безопасной работы в лабораториях (прил. А);
- порядок составления и защиты отчётов о лабораторных работах (прил. Б);
- единицы физических величин и другая справочная информация, которая может быть полезна для выполнения лабораторных работ и составления отчётов (прил. В);
- методика статистической обработки и сравнительного анализа результатов выполненных экспериментов (прил. Г);
- основные физико-технические свойства некоторых горных пород (прил. Д).

Для выполнения лабораторных работ в практикуме преду-

смотрено использование специально подготовленных в соответствии с ГОСТ 21153.0–75 [24] образцов горных пород. Для этого из массива горных пород в соответствии с ГОСТ Р 50544–93 [39] отобраны пробы горной породы – представительные объёмы рыхлой или разрушенной породы, предназначенные для исследований, в виде штуфов и кернов, из которых были изготовлены образцы горной породы определённой формы.

Лабораторные работы, включенные в настоящий **практикум**, носят исследовательский характер и построены таким образом, чтобы при их выполнении обучающиеся достигли высокой творческой активности и прошли через основные этапы научного исследования: постановка цели и задач, изучение методики, планирование и проведение эксперимента, обработка и анализ полученных результатов и краткие выводы по ним.

В процессе выполнения лабораторных работ обучающийся должен получить дополнительный стимул для развития таких черт интеллектуальной личности, как:

- способность к самостоятельному аналитическому мышлению;
- способность работать в небольшом исследовательском коллективе;
- стремление к расширению своей эрудиции и углублению профессиональных знаний.

В учебном **пособии** использован опыт работ по исследованию физических свойств горных пород и процессов горного производства, выполненных на кафедре строительства подземных сооружений и шахт Кузбасского государственного технического университета имени Т. Ф. Горбачёва, Московского горного института, Института горного дела им. А. А. Скочинского, Института угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН, Томского государственного университета и Днепропетровского горного института.

1 ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ПАРАМЕТРЫ СТРОЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

1.1 Теоретические основы

1.1.1 Минералы

Минерал – однородное по составу и строению химическое соединение или самостоятельно существующий химический элемент в твёрдом агрегатном состоянии, возникшие в земной коре в результате физико-химических процессов (ГОСТ Р 50544–93) [39]. Некоторые исследователи под **минералом** понимают природное тело, приблизительно однородное по химическому составу и физическим свойствам, возникшее в земной коре в результате физико-химических процессов [14, п. 1.1].

Минеральное образование – химическое соединение или смесь химических соединений в любом агрегатном состоянии, возникшие в земной коре в результате физико-химических процессов (ГОСТ Р 50544–93) [39].

Минеральный агрегат – характерный по составу, форме, размеру и строению сросток минералов, обусловленный их генезисом (ГОСТ Р 50544–93) [39].

Процессы и условия образования минералов очень сложны и чрезвычайно разнообразны. Их делят на три группы: *эндогенные*, *экзогенные* и *метаморфические*.

Природное минеральное образование земной коры неорганического и органического происхождения, которое может быть эффективно использовано либо непосредственно в сфере материального производства, либо для извлечения химических элементов и их соединений, называют **полезным ископаемым** [4, с. 185; 39].

В настоящее время практически все горные породы могут быть использованы как полезные ископаемые (п. и.).

Месторождение полезных ископаемых – скопление минерального вещества на поверхности или в недрах Земли, по количеству, качеству и условиям залегания пригодное для промышленного использования [3, с. 306].

По **физическому состоянию** минералы и, соответственно, п. и. делят на:

- **твёрдые** (угли ископаемые, горючие сланцы, торф, рудные и нерудные);
- **жидкие** (нефть, минеральные воды);
- **газообразные** (газы природные горючие и инертные).

Минералы различают, соответственно, по их химическому составу, внутреннему строению и физическим свойствам.

Основным фактором, определяющим свойства минералов, является их **химический состав**, в зависимости от которого выделяют шесть основных групп: *самородные элементы*, *сульфиды* (соли сероводородной кислоты), *оксиды*, *силикаты*, *соли кислородных кислот*, *галогидные* соединения. Всего известно около 3 000 различных минералов [14, п. 1.1].

По внутреннему строению твёрдые минералы бывают *кристаллическими* и *аморфными*. Подавляющее большинство минералов имеет кристаллическое строение, которое характеризуют тем, что образующие их частицы (атомы, ионы, радикалы) расположены закономерно, наподобие узлов пространственных решёток.

Известно семь типов (сингоний) кристаллических решёток [4, с. 543], характеризующихся отношениями величин кристаллических осей (наименьших расстояний между узлами решётки в трёх направлениях) и углов между ними: *триклинная*, *моноклинная*, *ромбическая*, *тетрагональная*, *тригональная*, *гексагональная* и *кубическая*.

1.1.2 Горные породы

Горная порода – устойчивая по составу и строению природная ассоциация одного или нескольких минералов или минеральных агрегатов [39].

В образовании горных пород основную роль играют около 30 так называемых породообразующих минералов. Это самые распространенные, наиболее устойчивые минералы из групп силикатов, окислов и алюмосиликатов.

Геологические процессы, приводящие к образованию горных пород, называют процессами породообразования, или петрогенеза. Соответственно, по признаку происхождения (генезису) все горные

породы подразделяют на *магматические* (базальт, габбро, диабаз, гранит, диорит, порфир и др.), *метаморфические* (гнейсы, кристаллические сланцы, мрамор и др.) и *осадочные* (алевролиты, аргиллиты, глины, известняки, пески, песчаники и др.).

Горные породы бывают *мономинеральными* и *полиминеральными*. Большинство из них относят к полиминеральным и характеризуют ***минеральным составом горной породы*** – количественным содержанием минералов, входящих в состав данной горной породы [39].

Характеристики свойств пород в различных объёмах могут отличаться друг от друга, например из-за блочной трещиноватости, слоистости.

Поэтому при определении свойств горных пород используют специальные понятия [14, п. 1.2], среди которых:

- ***массив горных пород*** – часть земной коры, состоящая из совокупности горных пород, сформировавшихся в определённой геологической обстановке, и характеризующаяся присущими ей физическими, химическими и геологическими параметрами [39] (рис. 1.1, поз. 1);

- ***породный массив*** – часть земной коры, подверженная влиянию горных работ [39] (см. рис. 1.1, поз. 1);

- ***горная порода в массиве*** – находящаяся в массиве в естественном состоянии горная порода (см. рис. 1.1, поз. 2);

- ***разрушенная горная порода*** – первоначально твёрдая или связная горная порода, утратившая связи между минеральными частицами и минеральными агрегатами в результате внешнего воздействия [39] (см. рис. 1.1, поз. 5);

- ***горная масса*** – одна или совокупность нескольких разрушенных горных пород, получаемых в результате разработки месторождения [39] (см. рис. 1.1, поз. 5);

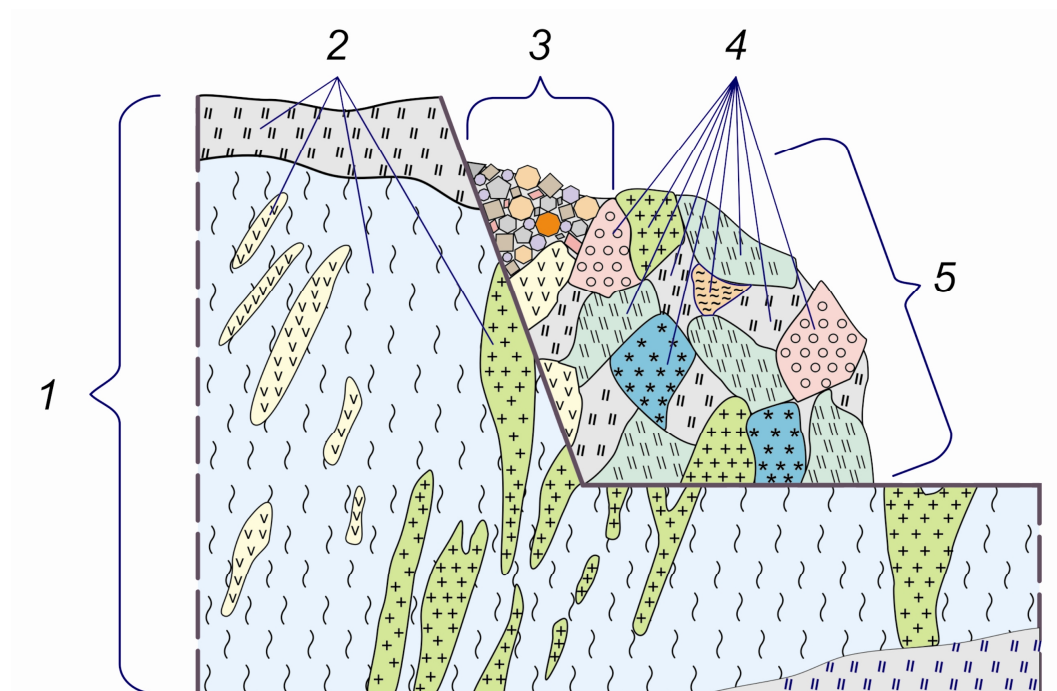
- ***куски (штуфы) горных пород*** – отдельные изолированные части скальных и связных пород, а также малые объёмы рыхлых пород (рис. 1.1, поз. 4);

- ***штуф*** – кусок горной породы, отделенный от массива и предназначенный для исследований [39];

- ***образец горной породы*** – кусок горной породы определённой формы, изготовленный для испытаний из штуфа или керна [39];

- ***кern горной породы*** – цилиндрический столбик горной по-

роды, выбуриваемый из массива горных пород или штуфа [39].



- 1 – массив горных пород, породный массив;
- 2 – горные породы в массиве;
- 3 – минералы (кристаллы, зёрна) в горной породе;
- 4 – куски (штуфы) горной породы;
- 5 – разрушенная горная порода (горная масса)

Рис. 1.1 – Строение массива горных пород (вертикальный разрез)

1.1.3 Строение горных пород

Строение горной породы – форма, размеры, взаимное пространственное расположение и связь в горной породе минеральных зёрен и минеральных агрегатов [39].

Минеральный состав горных пород (относительное содержание в породе разных минералов) и **строение пород** определяют тип и название горных пород.

Параметр строения горной породы – характеристика, численно оценивающая строение горной породы [39].

В *строении пород* различают *структуру* и *текстуру*.

1.1.3.1 Структура горной породы

Структура горной породы – характеристика строения, определяющая размеры, форму и взаимную связь составляющих минерального агрегата [39].

а) По **степени кристалличности** выделяют следующие типы структур: *полнокристаллические, неполнокристаллические и стекловатые* [19].

1) **Полнокристаллические** структуры характерны для пород, полностью сложенных кристаллическими зёрнами и не содержащих вулканического стекла.

Среди них различают *равномерно- и неравномернозернистые*.

Если отдельные кристаллы видны только под микроскопом, то в этом случае структуру называют *микрокристаллической*.

Полнокристаллические структуры являются типичными для интрузивных пород, которые кристаллизовались на различных глубинах в земной коре, обычно на протяжении длительного времени.

2) **Неполнокристаллические** структуры отличаются присутствием в породе как кристаллических зёрен, так и вулканического стекла. Такое сочетание составных компонентов указывает на две фазы кристаллизации:

- *раннюю фазу* представляют зёрна минералов, которые кристаллизовались в условиях медленного охлаждения на разных глубинах в земной коре;

- *поздняя фаза* обычно сложена вулканическим стеклом, образовавшимся в результате быстрого охлаждения расплава, насыщенного кристаллами.

3) **Стекловатые** структуры также характерны для эффузивных пород, практически полностью сложенных аморфным вулканическим стеклом, не действующим на поляризованный свет. Они возникают в процессе излияния лавовых расплавов, имеющих температуру выше начала кристаллизации минеральных индивидов.

б) По **размерам составных частей** различают структуры:

- по *абсолютным размерам* составных частей – минеральных зёрен, слагающих породу;

- по *относительным размерам* минеральных зёрен.

1) По **абсолютным размерам** составных частей Д. С. Штейнберг в 1957 г. выделил следующие *типы структур* [19] с размером минеральных зёрен:

- **грубозернистая** – более 10 мм;
- **крупнозернистая** – от 5 до 10 мм;
- **среднезернистая** – от 2 до 5 мм;
- **мелкозернистая** – от 1 до 2 мм;
- **тонкозернистая** – менее 1 мм.
- **афанитовая (скрытокристаллическая)** – менее 0,1 мм.

Так как приведенные типы структур не является общепризнанным, то при описании пород кроме названия структуры по величине зёрен следует указывать их *средний размер* в миллиметрах.

Размер минеральных зёрен оценивают по их **среднему диаметру** $d_{\text{ср}}$, который определяют с помощью измерительных инструментов: линейка, штангенциркуль, микроскоп.

2) По **относительным размерам** составных частей среди метаморфических структур выделяют:

- **равномерно-зернистые структуры**, характеризующиеся тем, что зёрна, слагающие породу, имеют близкие размеры, укладываемые в один класс размерности, например, тонкозернистый;

- **неравномерно-зернистые структуры**, характеризующиеся присутствием зёрен, резко отличающихся друг от друга по размерам и представляющих разные классы размерности.

В качестве примеров здесь могут служить:

- **порфировая структура** – в общую кристаллическую или стекловатую массу вкраплены крупные зёрна;

- **обломочная структура** – порода сцементирована из обломков.

Коэффициент неоднородности горной породы – параметр строения, характеризующий разброс формы и размеров минеральных зёрен или агрегатов горной породы относительно среднего их значения [39].

Форму минеральных зёрен и пор, характеризуют **коэффициентом формы зёрен** $K_{\text{фз}}$ [39], который определяют отношением их максимальных размеров l_3 к взаимно перпендикулярным минимальным – d_3 по формуле [14, п. 1.1]

$$K_{фз} = l_3 / d_3, \quad (1.1)$$

где l_3 – максимальный размер минерального зерна, мм;

d_3 – взаимно перпендикулярный минимальный размер зерна, мм.

Зёрна в породе могут быть соединены между собой либо непосредственно гранями, либо с помощью *цементирующего вещества*, т. е. тонкообломочного материала.

По химическому составу цемент может быть кремнистым, известковым (карбонатным), глинистым, железистым, гипсовым, мергелистым, кальцитовым, фосфатным и др.

Наибольшей прочностью обладают породы с кремнистым и железистым цементом, наименьшей – с гипсовым и глинистым [2, п. 3.3].

По соотношению *цементирующего материала* и *обломков* выделяют следующие **типы цементов**:

- *базальный* – обломки заключены в цементирующем материале и не соприкасаются друг с другом;

- *поровый* – зёрна соприкасаются друг с другом, а цемент заполняет промежутки между зёрнами;

- *контактный* – цемент присутствует только на контакте зёрен, а промежутки между зёрнами не заполнены;

- *плёночный* – цемент покрывает тонким слоем все обломки, связывая их между собой, часть пор между зёрнами остается незаполненной.

Из описанных типов цементов наибольшую прочность связи обеспечивает базальный цемент, наименьшую – контактный.

1.1.3.2 Текстура горной породы

Текстура горной породы – характеристика строения горной породы, определяющая взаимное расположение и ориентировку минеральных агрегатов горной породы [39].

Характер текстур связан преимущественно с геологическими условиями формирования пород и в меньшей степени с их составом. В геологии существуют десятки видов текстур.

Академик АН СССР **В. В. Ржевский**¹ и профессор **Г. Я. Новик**² – основоположники научного направления в горной науке – физики горных наук, выделяют [14, п. 2.7] следующие основные *типы строения (текстуры)*, определённые в ГОСТ Р 50544–93 [39]:

1) **статистический тип строения горной породы** – строение, характеризующееся отсутствием преимущественной ориентации, равномерным распределением зёрен и минеральных агрегатов в горной породе;

2) **матричный тип строения горной породы** – строение, характеризующееся наличием крупных включений минеральных зёрен или агрегатов в основной однородной минеральной среде;

3) **прожилковый тип строения горной породы** – строение, характеризующееся наличием в породе минералов, агрегатов или пор в виде пучков, волокон, каналов с преимущественной ориентацией;

4) **слоистый тип строения горной породы** – строение, характеризующееся чередованием прослоек различных минералов, минеральных агрегатов или плоскостей ослабления.

Слоем называют геологическое тело, которое имеет более или менее однородный состав и ограничено приблизительно параллельными поверхностями. Чередование слоёв называют **слоистостью горных пород**.

Коэффициент слоистости горной породы Π_c , (м^{-1}) – параметр её строения, характеризующий слоистость горной породы и равный количеству слоёв (или плоскостей ослабления) n_c (шт.), приходящихся на единицу линейного размера образца породы l_c (м), определённого перпендикулярно слоистости [39].

Коэффициент слоистости породы определяют по формуле

$$\Pi_c = n_c / l_c. \quad (1.2)$$

¹ **Ржевский Владимир Васильевич** (1919–1992) академик АН СССР (1981), доктор технических наук (1955), профессор, с 1962 г. – ректор Московского горного института, Лауреат Государственной премии СССР и премии Совета Министров СССР.

² **Новик Готфрид Янович** (род. в 1935 г.) доктор технических наук, профессор Московского горного института.

Лабораторная работа № 1

1.2 СТРОЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Цель работы: определение основных элементов и количественная оценка параметров строения осадочных, магматических и метаморфических горных пород на образцах.

1.2.1 Оборудование, приборы, инструменты

а) Камнерезный станок (рис. 1.2)



Рис. 1.2 – Камнерезный станок САСП-1
с алмазным режущим диском

б) Измерительные инструменты

Штангенциркуль, микроскоп, линейка, транспортир, лупа.

Штангенциркуль (от нем. *Stangenzeirkel*) – универсальный измерительный прибор, предназначенный для высокоточных измерений наружных и внутренних линейных размеров, а также глубин отверстий ¹.

Простой по конструкции, удобству в обращении и скорости в работе штангенциркуль типа ШЦ-I ² – с двусторонним расположением губок для измерения наружных и внутренних размеров и с линейкой для измерения глубин представлен на рис. 1.3.

Штангенциркуль имеет штангу 2 с основной измерительной шкалой 9 и нониус 8 со вспомогательной шкалой для отсчёта долей делений. Точность шкалы с нониусом рассчитывают как отношение цены деления основной шкалы к количеству штрихов нониуса – десятые или сотые (у разных видов) доли миллиметра.

Порядок отсчёта показаний штангенциркуля по шкалам штанги и нониуса (рис. 1.4):

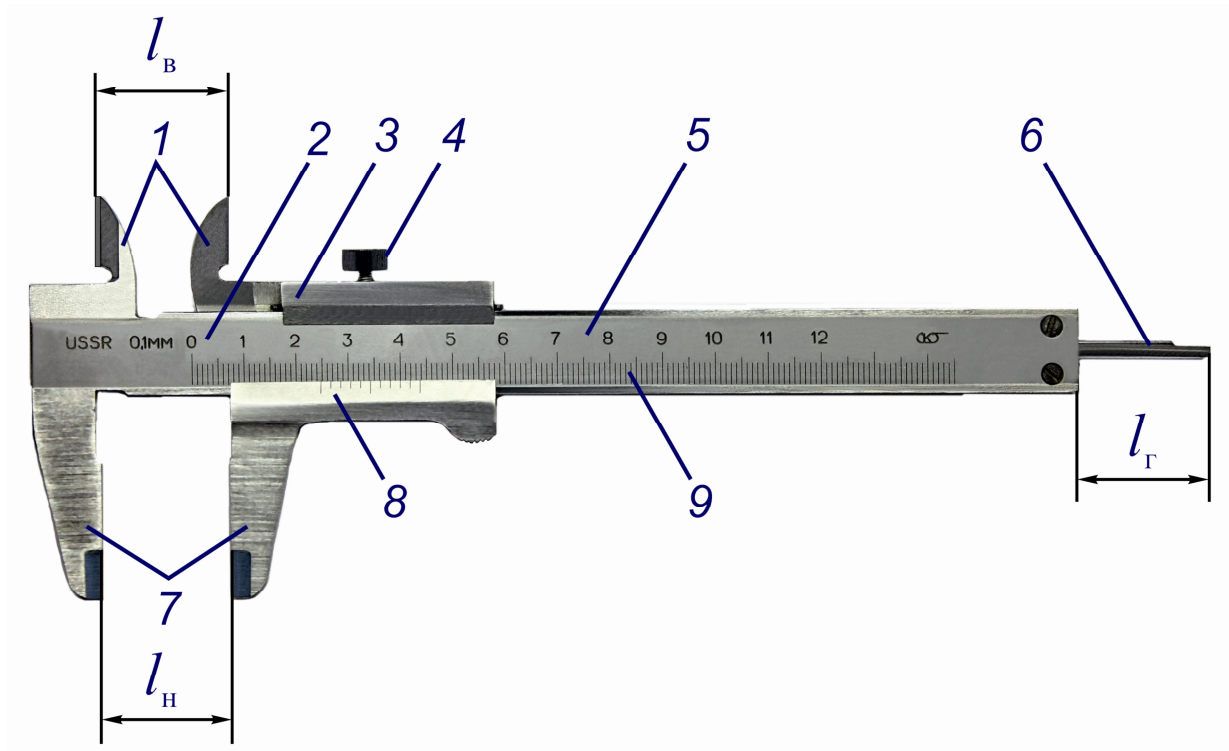
1) – считают **число целых миллиметров**, для этого находят на шкале штанги штрих, ближайший слева к нулевому штриху нониуса, и запоминают его числовое значение;

2) – считают **доли миллиметра**, для этого на шкале нониуса находят штрих, ближайший к нулевому делению и совпадающий со штрихом шкалы штанги, и прибавляют его порядковый номер и цену деления нониуса (цена деления нониуса рассчитывается по формуле: цена деления основной шкалы разделить на количество штрихов нониуса), у наиболее распространенных штангенциркулей ШЦ-I цена деления нониуса – 0,1 мм.

3) – подсчитывают **полную величину показания** штангенциркуля, для этого складывают отсчёт по основной шкале (число целых миллиметров) и отсчёт по шкале нониуса (долей миллиметра).

¹ Штангенциркуль // Википедия – свободная энциклопедия [Электрон. мультимедийн. ресурс].

² ГОСТ 166–89 (СТ СЭВ 704–77 – СТ СЭВ 707–77; СТ СЭВ 1309–78, ИСО 3599–76). Штангенциркули. Технические условия / утв. и введ. в действие Постановлением Гос. комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 30.10.1989 № 3253 : взамен ГОСТ 166–80 : дата введения 1991.01.01 : издание (август 2003 г.) с Изм. № 1, 2.



1 – губки с кромочными измерительными поверхностями для измерения внутренних размеров;

2 – штанга; 3 – подвижная рамка; 4 – винт для зажима рамки;

5 – рабочая поверхность штанги; 6 – глубиномер;

7 – губки с плоскими измерительными поверхностями для измерения наружных размеров;

8 – нониус; 9 – шкала штанги;

l_H – величина наружного размера;

l_B – величина внутреннего размера;

l_T – величина измерения глубины;

$l_H = l_B = l_T$

Рис. 1.3 – Внешний вид и устройство штангенциркуля типа ШЦ-I двустороннего с глубиномером

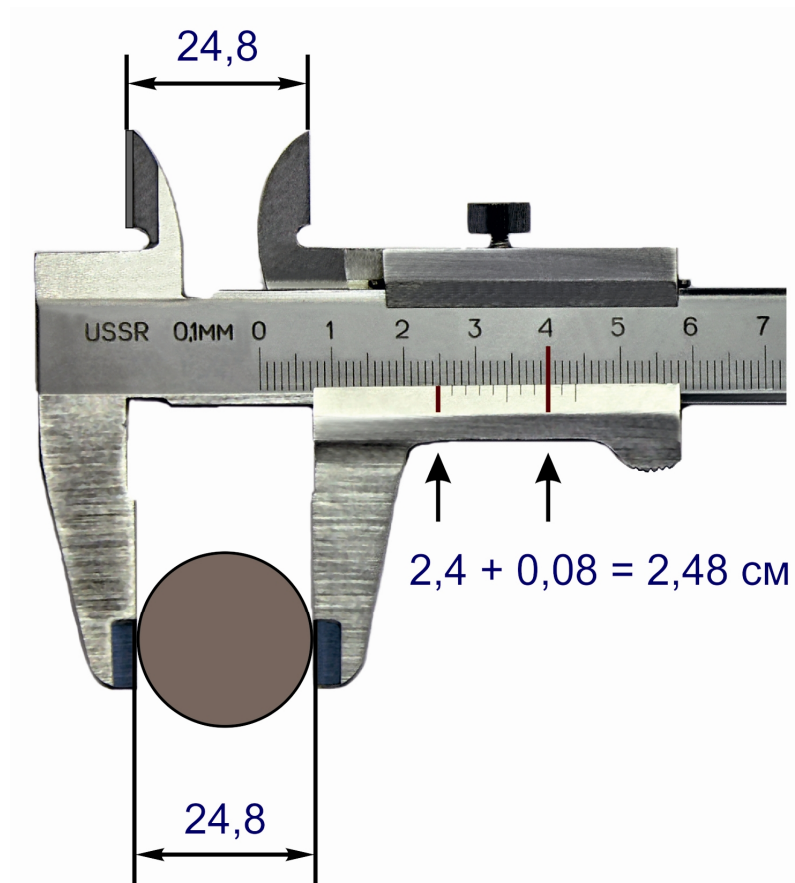


Рис. 1.4 – Схема порядка отсчёта показаний штангенциркуля по шкалам штанги и нониуса

Мультимедийную схему порядка отсчёта показаний штангенциркуля можно посмотреть, если активировать приведённую ссылку, которую необходимо активировать при наличии доступа в Интернет:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Using_the_caliper_new.gif?uselang=ru

В условиях активной работы со штангенциркулем рекомендуется протирать его влажной салфеткой, смоченной в водно-щелочном мыльном растворе, затем вытирать насухо, а по окончании работ – укладывать в чехол.

Желательно не допускать при эксплуатации грубых ударов или падения измерительного прибора во избежание изгибов штанги, а также царапин на измерительных поверхностях или их трения об измеряемую деталь.

Микроскоп МПБ-2

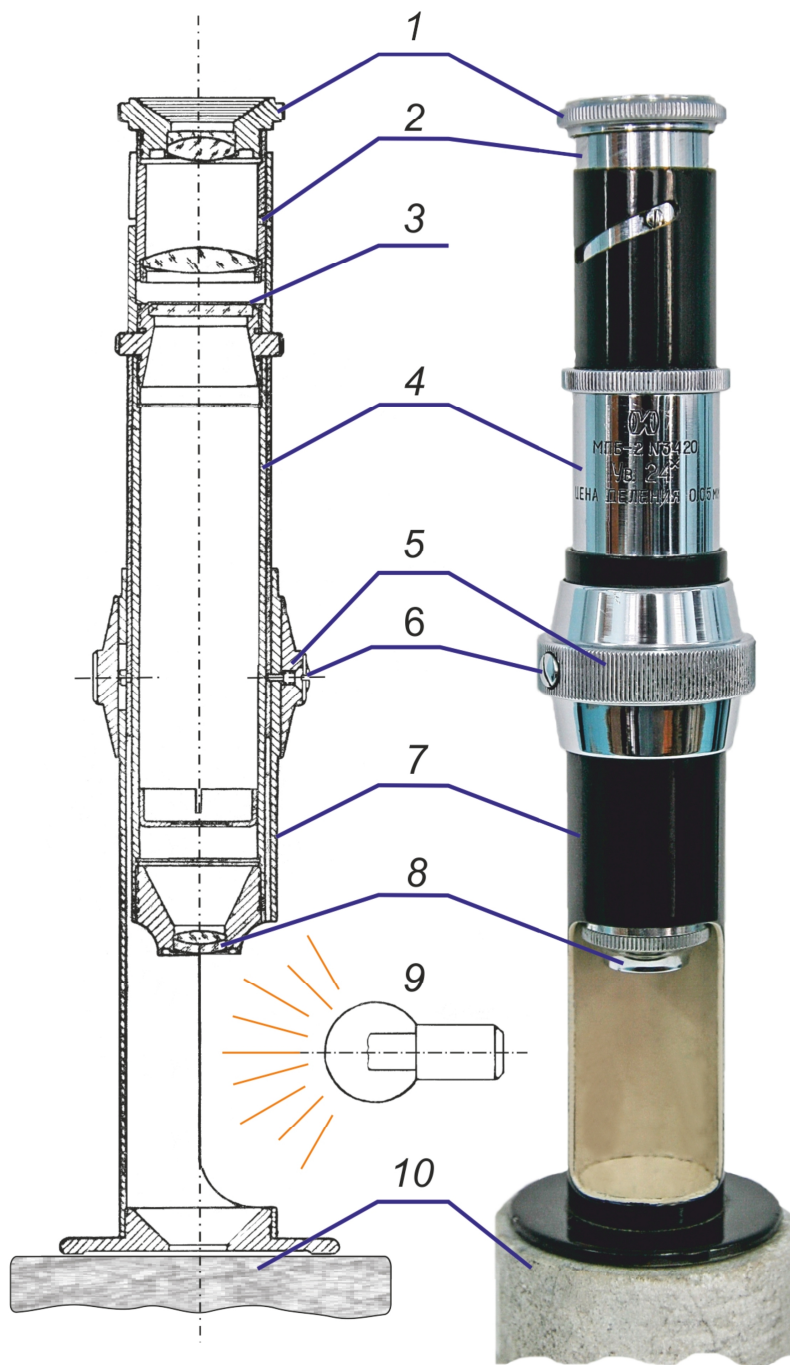
Микроскоп отсчётный типа МПБ-2 с 24-кратным увеличением предназначен для определения размеров минеральных зёрен, составляющих исследуемую породу [16]. Основные технические характеристики микроскопа МПБ-2 представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Технические характеристики микроскопа МПБ-2

Технические характеристики	Значения
Максимальный размер измеряемого объекта, мм	6,50
Цена малого деления, мм	0,05
Оцифровка шкалы через, мм	1,00
Линейное поле зрения, мм, не менее	9,00
Увеличение микроскопа, крат	24 [×]
Увеличение объектива, крат	2 [×]
Увеличение окуляра, крат	12 [×]
Пределы фокусировки окуляра, диоптрии	±4
Мертвый ход установочного кольца, мм, не более	1,20
Допустимая погрешность показания:	
- на длине до 2 мм (на любом интервале шкалы), мм	±0,01
- на всей длине шкалы, мм	±0,02

Общий вид и продольный разрез микроскопа приведены на рис. 1.5. Микроскоп состоит из колонки – поз. 7, установочного кольца – 5 и тубуса – 4, в котором закреплены объектив – 8 и окуляр – 2 с сеткой шкалы измерения – 3 (рис. 1.6). Вся шкала даёт возможность измерения объектов диаметром до 6,5 мм.

Для измерения минеральных зёрен необходимо взять микроскоп за колонку 7 (см. рис. 1.5) и установить основанием на исследуемый образец 10 так, чтобы отверстие в основании было бы расположено концентрично с измеряемым объектом, а окно в колонке микроскопа находилось против внешнего источника света – 9.



- 1 – окулярное кольцо; 2 – окуляр;
 3 – сетка шкалы измерения; 4 – тубус;
 5 – установочное кольцо; 6 – винт; 7 – колонка; 8 – объектив;
 9 – источник света; 10 – образец горной породы

Рис. 1.5 – Схема микроскопа типа МПБ-2

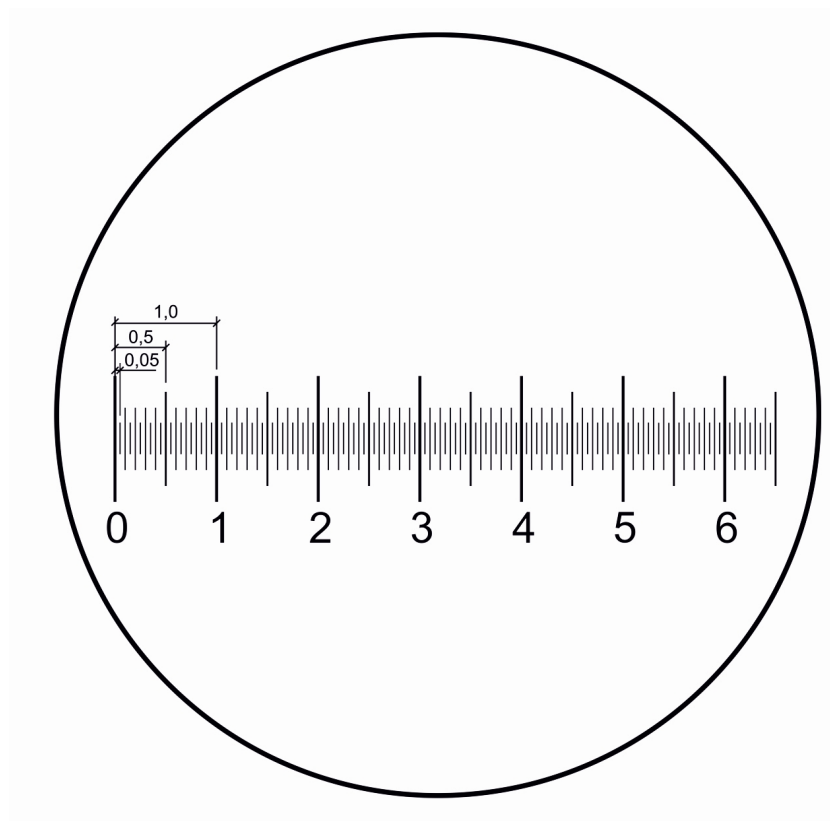
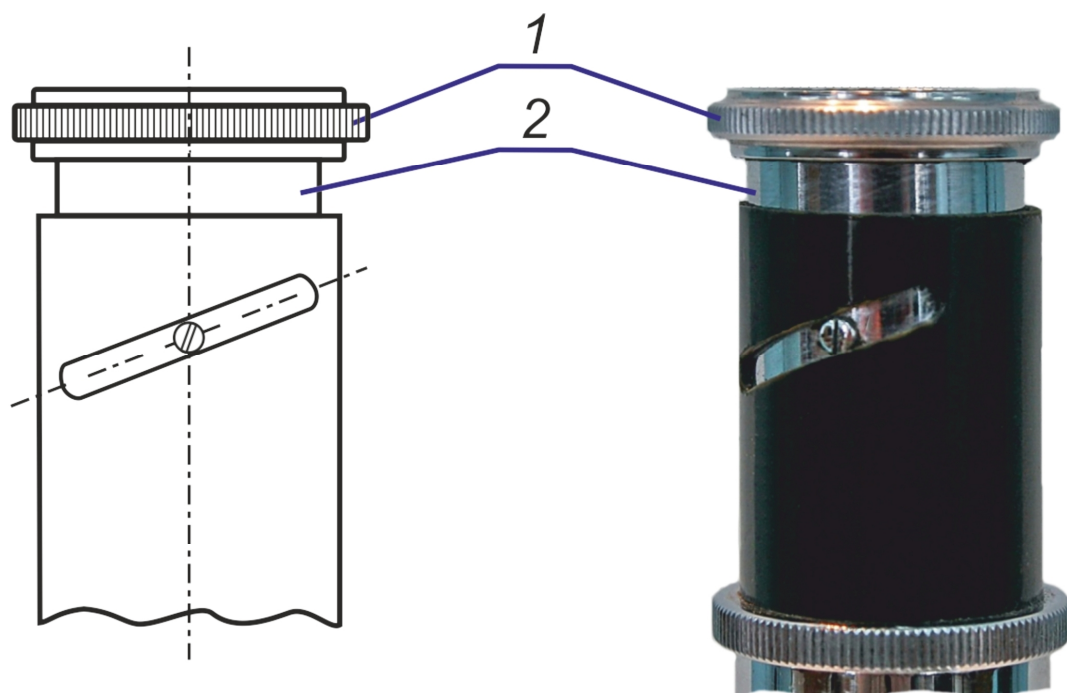


Рис. 1.6 – Сетка шкалы измерения микроскопа типа МПБ-2
с ценой деления 0,05 мм

Для получения резкого изображения шкалы сетки следует настроить окуляр **2** (см. рис. 1.5, 1.7) по диоптриям глаза, вращая его за окулярное кольцо **1** (см. рис. 1.7) до тех пор, пока изображение шкалы не станет совершенно отчётливым.

Если после этого изображение измеряемого объекта не будет резко видимым в поле зрения окуляра, то следует привести резкость изображения путём перемещения тубуса **4** (см. рис. 1.5) микроскопа вверх-вниз по высоте для грубого наведения и вращением установочного кольца с накаткой **5** – для получения резкого изображения объекта.

При вращении кольца **5** винт **6**, входящий в винтовой паз, имеющийся в трубе тубуса **4**, заставит тубус перемещаться по высоте.



1 – окулярное кольцо; 2 – окуляр

Рис. 1.7 – Схема окуляра микроскопа типа МПБ-2

При работе следует соблюдать основные правила:

- 1) Оберегать микроскоп от ударов и резких сотрясений.
- 2) Пыль с наружных оптических деталей можно осторожно удалить чистой фланелевой салфеткой или кисточкой.
- 3) По окончании работы удалить с микроскопа фланелевой салфеткой пыль, грязь, положить в укладочный ящик и закрыть крышкой.
- 4) Развинчивание оправ линз и разборку микроскопа производить только в специальной мастерской.

1.2.2 Подготовка образцов горной породы для испытаний

Исследования проводят на *образцах горных пород* магматического, метаморфического и осадочного происхождения с различными видами *строения* – формой, размерами, взаимным пространственным расположением и связью в горной породе минеральных зёрен и агрегатов.

Для испытаний на камнерезном станке с алмазным кругом (см. рис. 1.3) из *штуфов* или *кернов* были изготовлены *образцы* неправильной и правильной формы с хорошо обработанными поверхностями в виде цилиндра высотой 120–150 мм и диаметром 50–70 мм, и прямоугольного параллелепипеда (у которого шесть граней, и каждая из них является прямоугольником) с длиной рёбер 50–150 мм.

Каждому звену обучающихся руководитель работы выдаёт для исследования по 5–6 образцов разных пород.

1.2.3 Порядок выполнения работы

1) До начала выполнения лабораторной работы (заранее, накануне занятия) каждый обучающийся должен внимательно изучить теоретические основы соответствующей темы, изложенные в п. 1.1 настоящего практикума, а также принципы работы соответствующих инструментов, приборов, оборудования (п. 1.2.1).

2) Пронумеровать в произвольном порядке все образцы горных пород, выданные руководителем работы.

3) Внимательно осмотреть образцы, определить нижеперечисленные характеристики, измерить и рассчитать параметры строения каждого образца горных пород.

4) Указать наименование, описать *внешний вид* образца: форма, размеры, цвет, борозды скольжения, трещины, отпечатки растительности и другие видимые неоднородности и особенности строения.

5) Оценить по *минеральному составу* образца:

- *мономинеральная* или *полиминеральная* горная порода в образце;
- можно ли эти минералы отнести к *полезным ископаемым*.

6) Определить по образцу, к какой группе по *происхождению* можно отнести слагающие его минералы (*эндогенные, экзогенные,*

метаморфические) и горные породы (магматические, метаморфические, осадочные).

7) Определить тип *структуры* горной породы по п. 1.1.3.1:

- по *степени кристалличности*;

- по измеренным значениям *абсолютных размеров* (от–до) составных частей (зёрен) и по их среднему диаметру $d_{\text{ср}}$;

- по *относительным размерам* зёрен с вычислением *коэффициент формы зёрен* $K_{\text{фз}}$ по формуле (1.1).

8) Определить тип *текстуры* горной породы по п. 1.1.3.2.

9) Оценить *параметры строения* горной породы в образце:

- *угол наклона слоёв* (при их наличии) относительно условно принятой оси образца $\alpha_{\text{с}}$ (градус);

- *коэффициент слоистости породы* (при её наличии) $P_{\text{с}}$, (м^{-1}) по формуле (1.2).

10) Сделать зарисовки (или фотографии) общего вида каждого образца породы. На общем виде схемы (фотографии) образца показать основные его размеры, элементы текстуры, слоистость, трещиноватость, дефекты и другие особенности строения породы.

1.2.4 Обработка результатов эксперимента, составление отчёта

Результаты исследования образцов горных пород, полученные при определения основных параметров их строения, обучающийся помещает в отчёт о лабораторной работе в виде текстового описания, численных значений всех измеренных показателей и выполненных на их основе расчётов, с иллюстрированием самостоятельно выполненными схемами и фотографиями.

В конце отчёта обучающийся делает краткие выводы о полученных при выполнении работы результатах, новых знаниях и навыках.

Порядок и формат составления отчёта о лабораторной работе изложен в п. Б.1.

1.2.5 Контрольные вопросы

- 1) Что понимают под минералом?
- 2) На какие группы делят минералы по их генезису?
- 3) На какие группы делят минералы по физическому состоянию?
- 4) На какие типы (сингонии) и по какому признаку разделяют кристаллические решётки минералов?
- 5) Что называют горной породой, в чём заключается основное различие между минералом и горной породой?
- 6) Назовите основные типы горных пород по их происхождению.
- 7) Почему физические свойства магматических горных пород в большинстве случаев существенно отличаются от физических свойств осадочных горных пород?
- 8) Что понимают под структурой горной породы?
- 9) Какие выделяют основные параметры структуры породы?
- 10) На какие типы структур делят горные породы по степени кристалличности?
- 11) К какому типу горных пород по происхождению (магматических или осадочных) относят полнокристаллические, неполнокристаллические и стекловатые структуры пород?
- 12) Классификация **Д. С. Штейнберга** типов структур горных пород по абсолютным размерам составных частей.
- 13) Какие типы цементов, соединяющих зёрна горных пород, существуют, каковы их основные свойства?
- 14) Что понимают под текстурой горной породы?
- 15) Основные типы текстур, выделяемые по взаиморасположению составных частей горных пород.
- 16) Краткая характеристика основных типов слоистости горных пород и массивов.
- 17) Какими количественными параметрами характеризуют строение горных пород?
- 18) Какими основными показателями оценивают структурную и текстурную неоднородность горных пород?

2 ПЛОТНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

2.1 Теоретические основы

Плотностные свойства горной породы – свойства, характеризующие взаимосвязь между массой и объёмами горных пород или минералов [39].

В настоящем разделе представлены лабораторные работы:

- № 2 "Определение объёмной массы пород измерением линейных размеров образца";
- № 3 "Определение объёмной массы пород объёмомером";
- № 4 "Определение объёмной массы пород денситометром";
- № 5 "Насыпная масса и коэффициент разрыхления горных пород"

для определения соответствующих плотностных параметров горных пород:

- 1 – объёмная масса ρ ;
- 2 – объёмный вес γ ;
- 3 – насыпная масса ρ_n ;
- 3 – насыпной вес γ_n ;
- 4 – коэффициент разрыхления k_p .

2.1.1 Плотность горной породы

Плотность горной породы ρ_0 – масса единицы суммарного объёма твёрдой фазы (минерального скелета) в горной породе [39]

$$\rho_0 = \frac{m_{\text{тф}}}{V_{\text{тф}}}, \quad (2.1)$$

где $m_{\text{тф}}$ – масса суммарного объёма твёрдой фазы (минерального скелета) в горной породе, кг;

$V_{\text{тф}}$ – суммарный объём твёрдой фазы (минерального скелета) в горной породе, м^3 .

Плотность горных пород определяют плотностью слагающих породы минералов ρ_{0i} . Она может быть рассчитана по формуле [14]

$$\rho_0 = \sum_{i=1}^n \rho_{0i} \cdot V_i, \quad (2.2)$$

где n – число минералов, слагающих породу;

ρ_{0i} – плотность i -го минерала, слагающего породу, $\text{кг}/\text{м}^3$;

V_i – доля объёма, занимаемого каждым i -м минералом, доля единицы.

2.1.2 Объёмная масса породы

Объёмная масса горной породы ρ – масса единицы объёма сухой горной породы в ненарушенном (естественном) состоянии [39], которую можно определить по формуле

$$\rho = \frac{m_{\text{п}}}{V_{\text{п}}}, \quad (2.3)$$

где $m_{\text{п}}$ – масса образца горной породы в ненарушенном (естественном) состоянии, кг ;

$V_{\text{п}}$ – объём образца горной породы в ненарушенном (естественном) состоянии, м^3 .

Объёмная масса ρ большинства горных пород изменяется от 1300 до 3800 $\text{кг}/\text{м}^3$. Большой объёмной массой обладают *изверженные* (магматические) и *метаморфические* породы, в особенности руды, содержащие железо ($\rho = 7880 \text{ кг}/\text{м}^3$), кобальт ($\rho = 8700 \text{ кг}/\text{м}^3$), молибден ($\rho = 10100 \text{ кг}/\text{м}^3$) и другие.

Меньшую объёмную массу имеют *осадочные* породы, такие как гидрохимические осадки – гипс, каменная соль и др. Наиболее низкая объёмная масса у торфа, бурого и каменного углей. Плот-

ность и объёмная масса углей существенно возрастают по мере увеличения степени их метаморфизма и зольности.

Плотность и объёмная масса некоторых горных пород приведены в таблице Д.3 и в таблице Д.4, из которой видно, что плотность пород ρ_0 всегда больше их объёмной массы ρ .

2.1.3 Коэффициент плотности породы

Коэффициент плотности горной породы $k_{пл}$ – степень заполнения объёма горной породы минеральным веществом, равная отношению объёмной массы ρ породы к её плотности ρ_0 [39]

$$k_{пл} = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad (2.4)$$

где $k_{пл}$ – коэффициент плотности горной породы, доля единицы;
 ρ_0 – плотность породы, кг/м³;
 ρ – объёмная масса породы, кг/м³.

2.1.4 Удельный вес породы

Удельный вес горной породы γ_0 – вес единицы суммарного объёма твёрдой фазы в горной породе [1, п. 2], может быть определён как отношение веса образца к его объёму, за вычетом объёма пор, трещин и других пустот

$$\gamma_0 = \frac{P_{тф}}{V_{тф}}, \quad (2.5)$$

где γ_0 – удельный вес горной породы, Н/м³;
 $P_{тф}$ – вес суммарного объёма твёрдой фазы в горной породе, Н;
 $V_{тф}$ – суммарный объём твёрдой фазы (минерального скелета) в горной породе, м³.

Связь между удельным весом и плотностью горной породы может быть выражена формулой

$$\gamma_0 = \rho_0 \cdot g, \quad (2.6)$$

где ρ_0 – плотность породы, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с² (для технических расчётов принимают равным 9,81 м/с²).

По удельному весу γ_0 горные породы разделяют [17, гл. 13, п. 4] на:

- *лёгкие* – до 25000 Н/м³;
- *средние* – от 25000 до 40000 Н/м³;
- *тяжёлые* – 40000 Н/м³.

В таблице Д.6 приведены значения *удельного веса* некоторых видов осадочных горных пород.

2.1.5 Объёмный вес породы

Объёмный вес горной породы γ – вес единицы объёма сухой горной породы в ненарушенном состоянии, определяют как отношение веса образца к его полному объёму [1, п. 2]

$$\gamma = \frac{P_{\Pi}}{V_{\Pi}}, \quad (2.7)$$

где γ – объёмный вес горной породы, Н/м³;

P_{Π} – вес породы в ненарушенном (естественном) состоянии, Н;

V_{Π} – объём породы в ненарушенном состоянии, м³.

Связь между объёмным весом (Н/м³) и объёмной массой горной породы может быть выражена формулой

$$\gamma = \rho \cdot g, \quad (2.8)$$

где ρ – объёмная масса породы, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с² (для технических расчётов принимают равным 9,81 м/с²).

Удельный и объёмный веса породы – параметры силовые. Их следует применять только в тех случаях, когда рассматривают силы, вызванные действием гравитационного поля, например горное давление [14, п. 3.2].

2.1.6 Пористость породы

Отличие объёмной массы горной породы ρ от её плотности ρ_0 , в первую очередь, обусловлено наличием в породе *пор*.

Объём породы в естественном состоянии $V_{\text{п}}$ равен сумме объёма твёрдой фазы (минерального скелета) $V_{\text{тф}}$ и объёма пор $V_{\text{пор}}$, его определяют из следующего выражения

$$V_{\text{п}} = V_{\text{тф}} + V_{\text{пор}}, \quad (2.9)$$

где $V_{\text{п}}$ – объём породы в ненарушенном (естеств.) состоянии, м³;

$V_{\text{тф}}$ – суммарный объём твёрдой фазы (минерального скелета) в породе, м³;

$V_{\text{пор}}$ – объём пор в породе, м³.

Под *поровым объёмом* породы $V_{\text{пор}}$ понимают совокупный объём всех пор (пустот и трещин), заключённых в породе между минеральными частицами или их агрегатами, заполненных или не заполненных жидкой или газообразной фазой.

Общая пористость горной породы P – параметр строения, равный объёму всех пор и пустот, содержащихся в единице объёма горной породы [39].

Некоторые исследователи определяют *общую пористость породы* как отношение объёма пор и пустот в образце к его полному объёму [1, п. 2] и определяют её выражением

$$P = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{п}}}, \quad (2.10)$$

где $V_{\text{пор}}$ – объём пор в породе, м³;

$V_{\text{п}}$ – объём породы в ненарушенном состоянии, м³.

Общую пористость P можно также рассчитать по формуле [20, п. 2.2]

$$P = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0}, \quad (2.11)$$

где P – общая пористость породы, доля единицы или проценты (если умножить на 100 %);

ρ_0 – плотность породы, кг/м³;

ρ – объёмная масса породы, кг/м³.

Поры и трещины различают по их *происхождению*, по *размеру*, по *форме* и *распределению* в горной породе.

а) По *происхождению* поры делят на:

- *первичные*, сформированные при образовании пород, и
- *вторичные*, появившиеся в результате процессов метаморфизма, выщелачивания, перекристаллизации и т. п.

б) По *размеру* поры подразделяют [14, п. 1.1] на:

- *субкапиллярные* – диаметр пустот менее 0,2 мкм;
- *капиллярные* – диаметр пустот 0,2–100 мкм;
- *сверхкапиллярные* – диаметр пустот более 100 мкм.

в) По *форме* поры могут быть самого различного типа – межзёрненные, пузырьчатые, каналовидные, щелевидные, ветвистые и т. д. Форма и размер отдельных пор и их взаимная связь определяют форму порового пространства породы. Последняя, в свою очередь, влияет на различные физические процессы, например перемещение в породах жидкостей и газов.

г) По *распределению* в породе общий объём пор разделяют на две группы [17, гл. 13]:

- *закрытые* – когда поры не соединяются между собой, что характерно для магматических пород с пузырьчатыми, ячеистыми порами;

- *открытые* – когда поры могут соединяться с внешней средой и между собой, образуя сплошные извилистые каналы, характерны для несцементированных песчано-алевролитно-глинистых пород, карбонатных пород меловидного, трещинного и карстового типов.

Открытая пористость горной породы – параметр строения, равный объёму пор в единице объёма горной породы, соединяющихся между собой в непрерывные каналы, выходящие на свободную поверхность [39].

Эффективная пористость горной породы $P_{эф}$ – параметр строения, равный объёму открытых пор в единице объёма горной породы, через которые способны проникать жидкости и газы [39].

Эффективную пористость иногда называют *открытой*. Установлено [14, п. 1.1], что эффективная пористость всегда меньше общей пористости ($P_{эф} < P$).

Общая пористость горных пород изменяется в широких пределах – есть породы практически монолитные и породы, пористость которых достигает от десятых долей процента до 90 % [17, гл. 13].

Средняя пористость горных пород составляет 1,5–30 % [14, п. 1.1].

Значения общей пористости некоторых видов осадочных и магматических пород приведены в таблице Д.5.

2.1.7 Коэффициент пористости породы

Коэффициент пористости горной породы $k_{\text{п}}$ – параметр строения, равный отношению объема всех пор в породе к объёму твёрдой фазы [39], может быть определён из выражения

$$k_{\text{п}} = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{тф}}}, \quad (2.12)$$

где $V_{\text{пор}}$ – объём пор в породе, м^3 ;

$V_{\text{тф}}$ – суммарный объём твёрдой фазы (минерального скелета) в горной породе, м^3 .

Коэффициент пористости также связан с общей пористостью соотношением

$$k_{\text{п}} = \frac{P}{1 - P}. \quad (2.13)$$

Связь между объёмной массой ρ и плотностью ρ_0 породы может быть выражена через её общую пористость P [14, п. 3.2]:

$$\rho = \rho_0(1 - P) \quad (2.14)$$

или через коэффициент пористости $k_{\text{п}}$:

$$\rho_0 = \rho(1 + k_{\text{п}}). \quad (2.15)$$

Лабораторная работа № 2

2.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЁМНОЙ МАССЫ ПОРОД ИЗМЕРЕНИЕМ ОБРАЗЦОВ

Цель работы: определение объёмной массы горных пород методом измерения линейных размеров образцов.

Определение объёмной массы *методом непосредственных измерений линейных размеров* образцов пород применяют для пород магматического, метаморфического и осадочного происхождения, допускающих изготовление из них образцов правильной геометрической формы [11, с. 14–15; 35].

2.2.1 Приборы, инструменты

- 1) Весы лабораторные.
- 2) Линейка с делениями.
- 3) Штангенциркуль.
- 4) Рабочий журнал для записи результатов экспериментов.
- 5) Письменные принадлежности.

2.2.2 Подготовка образцов горных пород для испытаний

1) На камнерезном станке с алмазным кругом (см. рис. 1.3) из монолитных *штуфов* или *кернов* (ГОСТ Р 50544–93) [39] изготавливают образцы горных пород правильной геометрической формы в виде прямоугольного параллелепипеда или цилиндра с хорошо обработанными гладкими поверхностями массой 0,2–1,5 кг. При этом образцы должны быть высушены до постоянного веса.

2) Обучающимся каждого звена руководитель работы выдаёт для исследования по 6–8 образцов разных пород с разной правильной формой, помещённых в специальный металлический лоток.

2.2.3 Порядок выполнения эксперимента

1) *Пронумеровать* образцы каждой породы, определить лабораторный номер каждого образца (при его наличии).

2) Определить *наименование* породы и *форму* каждого образца. Записать их значения в соответствующие строки таблицы 2.1, номера которых должны быть одинаковы для одних и тех же пород, исследуемых во всех методах определения плотностных свойств в лабораторных работах № 3 и № 4.

3) Внимательно осмотреть каждый образец породы; по внешнему виду определить и описать в рабочем журнале, а затем и в отчёте о лабораторной работе особенности его строения (см. раздел 1):

- цвет, структура, текстура;
- *минеральный состав* образца – *мономинеральная* или *полиминеральная* порода в образце;
- к какой группе по *происхождению* можно отнести горные породы (*магматические, метаморфические, осадочные*).

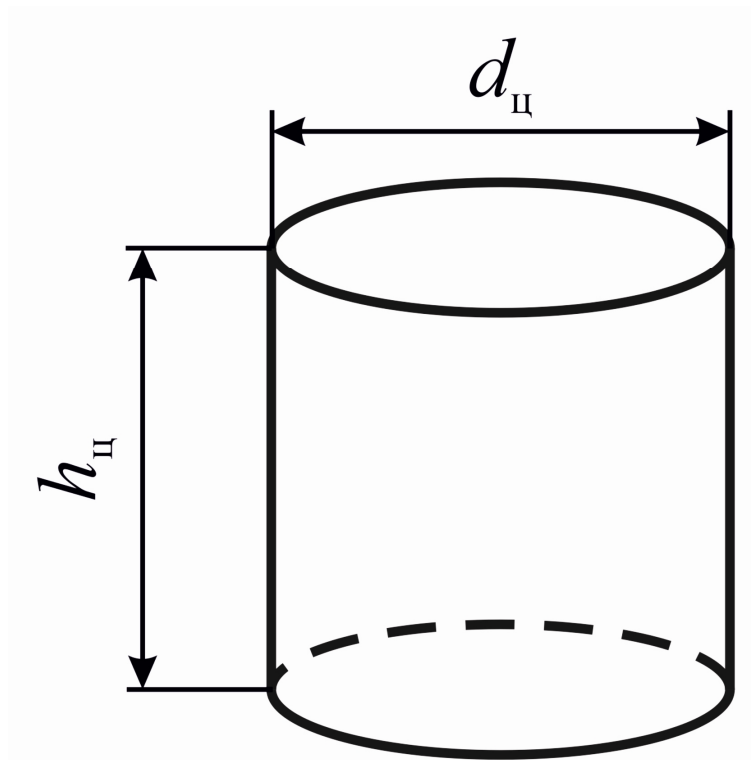
4) Сделать зарисовки (или фотографии) общего вида каждого образца. В отчёте о лабораторной работе на схемах (фотографиях) образцов показать их основные размеры или средний диаметр.

5) Определить на лабораторных весах массу $m_{\text{п}}$ каждого образца горной породы правильной формы при температуре $+20^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2^{\circ}$). Точность взвешивания образцов – 0,01 г.

6) Определить размеры каждого образца правильной *цилиндрической формы* (рис. 2.1). Измерение образцов следует производить с точностью до 1 мм.

Для определения диаметра $d_{\text{ц}}$ образца *цилиндрической формы* (см. рис. 2.1) на каждой параллельной плоскости цилиндра измеряют по два взаимно перпендикулярных диаметра. Значение диаметра образца вычисляют как среднее арифметическое четырех измерений с точностью 0,1 мм.

Высоту $h_{\text{ц}}$ образца цилиндрической формы (см. рис. 2.1) вычисляют как среднее арифметическое измерений четырех образующих цилиндра, расположенных на двух взаимно перпендикулярных плоскостях, пересекающих цилиндр по его продольной оси.



$d_{\text{ц}}$ – диаметр цилиндра;

$h_{\text{ц}}$ – высота цилиндра

Рис. 2.1 – Образец горной породы в форме цилиндра

7) Рассчитать объём $V_{\text{п}}$ каждого образца породы *цилиндрической формы* по формуле

$$V_{\text{п}} = V_{\text{ц}} = \frac{\pi d_{\text{ц}}^2}{4} h_{\text{ц}}, \quad (2.16)$$

где $V_{\text{п}}$ – объём образца породы цилиндрической формы, см^3 ;

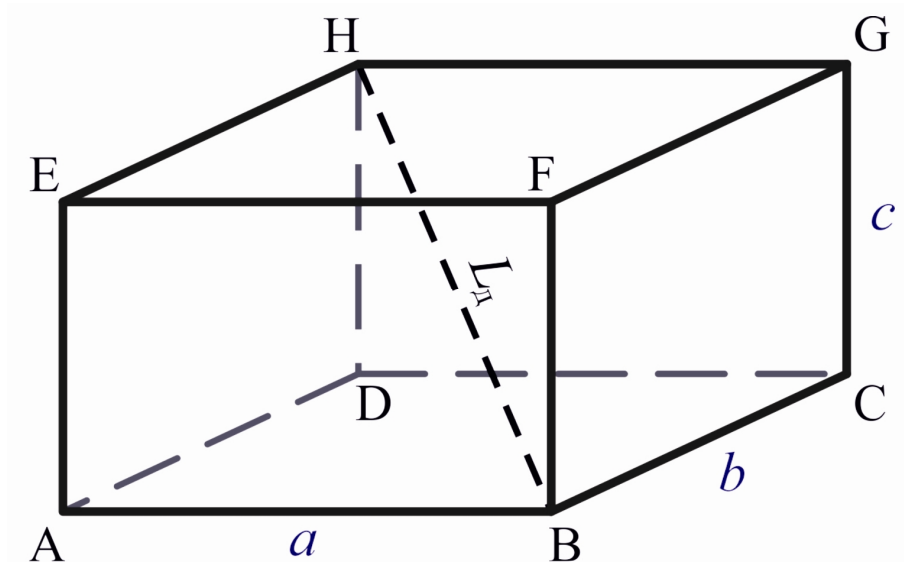
$V_{\text{ц}}$ – объём твёрдого тела цилиндрической формы, см^3 ;

π – число "пи" (в обычных расчётах можно применять значение $\pi = 3,14$);

$d_{\text{ц}}$ – диаметр образца цилиндрической формы, см;

$h_{\text{ц}}$ – высота образца цилиндрической формы, см.

8) Определить линейные размеры каждого образца горной породы с формой **прямоугольного параллелепипеда** (рис. 2.2), представляющего собой объёмную фигуру, у которой шесть граней ($ABCD$, $ABFE$, $ADHE$, $BCGF$, $CDHG$, $EFGH$), и каждая из них является прямоугольником.



a, b, c – размеры соответствующих рёбер параллелепипеда;
 L_d – длина диагонали параллелепипеда;
 A, B, C, D, E, F, G, H – вершины параллелепипеда

Рис. 2.2 – Образец горной породы с формой прямоугольного параллелепипеда

Длины трёх рёбер a, b, c прямоугольного параллелепипеда, имеющих общий конец, называют его измерениями.

Прямоугольный параллелепипед с равными измерениями трёх рёбер a, b, c называют *кубом*. Все шесть граней куба – равные квадраты.

Квадрат длины диагонали прямоугольного параллелепипеда L_d равен сумме квадратов трёх его измерений.

Каждый линейный размер соответствующих рёбер параллелепипеда a, b, c (см) определяют путём измерения расстояния между двумя параллельными рёбрами, лежащими в плоскости одной гра-

ни, и вычисляют как среднее арифметическое измерений с точностью до 0,01 см.

Например: $a = (AB+EF)/2$; $c = (CG+BF)/2$ и т. д.

Измерение образцов следует производить с точностью до 1 мм.

9) Рассчитать объём V_{Π} (см³) каждого образца породы в виде *прямоугольного параллелепипеда* по формуле

$$V_{\Pi} = a \times b \times c. \quad (2.17)$$

10) Вычислить по формуле (2.3) п. 2.1.2 значение объёмной массы породы ρ для каждого образца в виде *цилиндра* и *прямоугольного параллелепипеда*.

11) Все результаты измерений и расчётов записать в соответствующие ячейки таблицы 2.1, которую в отчёте можно разместить на странице с альбомной ориентацией для удобства размещения значений всех её колонок.

Таблица 2.1 – Результаты определения объёмной массы пород методом *непосредственных измерений линейных размеров* образцов

№ опыта	Лаб. номер образца	Порода	Форма образца	Размеры образца, см			Объём образца V_{Π} , см ³	Масса образца m_{Π} , г	Объёмная масса ρ ,	
				длина a или диаметр d_{Π}	ширина b	высота c или h_{Π}			г/см ³	СИ, кг/м ³
1										
2										
3										
4										
5										
...										

12) Результаты расчётов объёмной массы ρ занести в сводную таблицу 2.6 с единицами измерения в системе СИ. При этом номера одинаковых пород должны совпадать во всех методах определения их объёмной массы.

2.2.4 Обработка результатов эксперимента, составление отчёта

Результаты испытания образцов горных пород, полученные при определении их объёмной массы, обучающийся помещает в отчёт о лабораторной работе в виде текстового описания, численных значений всех измеренных показателей и выполненных на их основе расчётов, с иллюстрированием самостоятельно выполненными схемами и фотографиями.

В конце отчёта обучающийся делает краткие выводы о полученных при выполнении работы результатах, новых знаниях и навыках.

Порядок и формат составления отчёта о лабораторной работе изложен в п. Б.1.

2.2.5 Контрольные вопросы

- 1) Что называют плотностью горной породы?
- 2) Как плотность горных пород зависит от их слоистости?
- 3) Основные факторы, влияющие на плотность горных пород.
- 4) Влияние на плотность горных пород плотности слагающих эти породы минералов.
- 5) Что характеризует коэффициент плотности горной породы $k_{пл}$, как его можно рассчитать?
- 6) Что называют удельным весом горной породы γ_0 ?
- 7) Как выглядит аналитическая зависимость между удельным весом и плотностью горных пород?
- 8) На какие группы разделяют горные породы по их удельному весу?
- 9) Для решения каких научных и производственных задач применяют показатели плотности и удельного веса горных пород?
- 10) Как отличают плотность и объёмную массу горных пород?
- 11) Как можно определить объём образца горной породы цилиндрической формы?
- 12) Как можно определить объём образца горной породы с формой прямоугольного параллелепипеда?

Лабораторная работа № 3

2.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЁМНОЙ МАССЫ ПОРОД ОБЪЁМОМЕРОМ

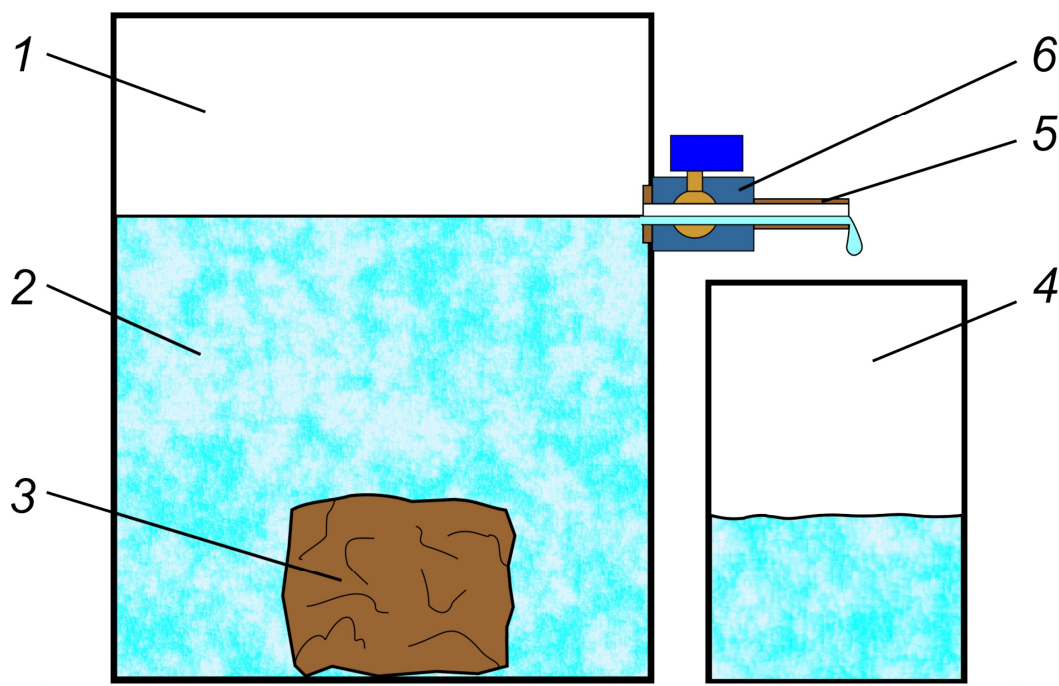
Цель работы: определение объёмной массы горных пород методом использования объёмомера.

Метод измерения объёмомером применяют для образцов неправильной формы [11, с. 19–20; 35].

2.3.1 Приборы, инструменты и материалы

- 1) Объёмомер.
- 2) Весы лабораторные.
- 3) Стекланные мерные сосуды (стаканы).
- 4) Термометр лабораторный ртутный или жидкостный с ценой деления шкалы 0,1 °С.
- 5) Линейка с делениями.
- 6) Штангенциркуль.
- 7) Вода дистиллированная.
- 8) Сосуды для хранения чистой воды.
- 9) Сливные сосуды для слива лишней воды.
- 10) Сосуд специальный для использованной воды после погружения в неё породы.
- 11) Тонкая проволока, резиновые кольца для погружения образцов в объёмомер.
- 12) Журнал для записи результатов экспериментов.
- 13) Бумажные салфетки или полотенца.
- 14) Письменные принадлежности.

Объёмомер (рис. 2.3) представляет собой сосуд 1 со средним внутренним диаметром около 150 мм и общей высотой около 240 мм, в котором на высоте 150 мм в сливном отверстии закреплён водяной кран 6 с латунной сливной трубкой 5 с внутренним диаметром 6–8 мм.



- 1 – сосуд объёмомера;
2 – вода;
3 – образец породы;
4 – мерный стакан или сливной сосуд;
5 – сливная трубка;
6 – кран запора воды

Рис. 2.3 – Объёмомер

2.3.2 Подготовка образцов горных пород для испытаний

1) Из монолитных *штуфов* или *кернов* (ГОСТ Р 50544–93 [39]) изготавливают образцы горных пород неправильной формы массой 0,05–0,15 кг. При этом образцы должны быть высушены до постоянного веса.

2) Обучающимся каждого звена руководитель работы выдаёт для исследования по 6–8 образцов разных пород неправильной формы, помещённых в специальный металлический лоток.

2.3.3 Порядок выполнения эксперимента

1) Определить *наименование* породы и лабораторный номер образца (при его наличии).

2) *Пронумеровать* каждый образец породы в порядке, соответствующем номерам, присвоенным одинаковым породам при выполнении предыдущих испытаний для определения плотностных свойств.

3) Внимательно осмотреть каждый образец породы, по внешнему виду определить и описать в рабочем журнале, а затем и в отчёте о лабораторной работе особенности его строения (см. раздел 1):

- цвет, структура, текстура;
- *минеральный состав* образца – *мономинеральная* или *полиминеральная* порода в образце;
- к какой группе по *происхождению* можно отнести горные породы (*магматические, метаморфические, осадочные*).

4) Определить внешние линейные размеры и вычислить средний диаметр образца неправильной формы.

5) Сделать зарисовки (или фотографии) общего вида каждого образца. В отчёте на схеме (фотографии) образца показать основные его размеры или средний диаметр.

6) Определить на лабораторных весах с точностью до 0,01 г массу образца горной породы неправильной формы $m_{\text{п}}$.

7) Определить на лабораторных весах с точностью до 0,01 г массу пустого чистого и сухого *мерного стакана* $m_{\text{с}}$.

8) Предварительно убедившись, что запорный водяной кран 6 (см. рис. 2.3) закрыт, в сосуд объёмомера 1 налить воду комнатной температуры до уровня, полностью перекрывающего отверстие сливной трубки 5.

9) Термометром лабораторным измерить в сосуде объёмомера температуру воды с точностью до $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

10) Подставить под сливную трубку 5 пустой *сливной сосуд* 4 для слива в него лишней воды.

11) Открыть запорный кран 6, пока не потечёт вода из сливной трубки 5 в подставленный под неё *сливной сосуд* для лишней воды.

12) Когда вода, вытекая из сосуда объёмомера, установится на уровне нижнего среза отверстия сливной трубки и падение последних капель воды из трубки прекратится, под трубку вместо *сливного сосуда* ставят предварительно взвешенный *мерный стакан* 4.

13) Образец породы закрепляют с помощью резинового кольца на тонкой проволоке для погружения в объёмомер.

14) Образец породы 3 на тонкой проволоке осторожно погружают на дно сосуда объёмомера так, чтобы вода, вытесненная образцом, успевала вытекать по сливной трубке в мерный стакан 4.

15) После прекращения падения последних капель из трубки в мерный стакан 4 следует закрыть запорный кран 6.

16) Мерный стакан с водой вновь взвешивают с точностью до 0,01 г для определения массы стакана с водой $m_{\text{св}}$, вытесненной из объёмомера образцом породы.

17) После окончания взвешивания воду из мерного стакана выливают в специальный сосуд, стакан тщательно вытирают насухо бумажной салфеткой для дальнейших экспериментов.

18) Извлечённый из объёмомера образец вытирают насухо бумажной салфеткой и укладывают в лоток на своё место.

19) Вычислить с точностью до 0,01 г массу воды $m_{\text{в}}$, вытесненной образцом из объёмомера, по формуле

$$m_{\text{в}} = m_{\text{св}} - m_{\text{с}}, \quad (2.18)$$

где $m_{\text{в}}$ – масса воды, вытесненной образцом из объёмомера, г;

$m_{\text{св}}$ – масса мерного стакана с водой, вытесненной из объёмомера, г;

$m_{\text{с}}$ – масса пустого чистого и сухого мерного стакана, г.

20) Определить плотность используемой воды при комнатной температуре по таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Плотность воды при различных температурах [34, прил. 11].

Температура воды, °С	Плотность воды $\rho_{\text{в}}$, г/см ³
12–18	0,999
19–23	0,998
24–27	0,997

21) Определить объём образца породы в естественном состоянии $V_{\text{п}}$, равный объёму воды $V_{\text{в}}$, вытесненной образцом из объёмомера, из выражения

$$V_{\text{п}} = V_{\text{в}} = m_{\text{в}} / \rho_{\text{в}}, \quad (2.19)$$

где $V_{\text{п}}$ – объём образца породы в естественном состоянии, см³;

$V_{\text{в}}$ – объём воды, вытесненной образцом из объёмомера, см³;

$m_{\text{в}}$ – масса воды, вытесненной образцом из объёмомера, г;

$\rho_{\text{в}}$ – плотность используемой воды при комнатной температуре, определенной по таблице 2.2; г/см³.

22) Используя полученные в результате проведённых экспериментов данные, вычислить для каждого образца объёмную массу породы ρ по формуле (2.3) п. 2.1.2.

23) Все результаты измерений и расчётов записать в соответствующие ячейки таблицы 2.3, которую в отчёте можно разместить на странице с альбомной ориентацией для удобства размещения значений всех её колонок.

24) Для каждого из полученных образцов породы выполнить эксперимент в соответствии с пунктами 3–23 указанного выше порядка выполнения эксперимента.

Таблица 2.3 – Результаты определения объёмной массы пород объёмометром

№ опыта	Лаб. номер образца	Порода	Средний диаметр образца, см	Масса образца m_p , г	Объём образца V_p , см ³	Объёмная масса ρ	
						СГСМ г/см ³	СИ кг/м ³
1							
2							
3							
4							
5							
...							

25) Результаты расчётов объёмной массы ρ занести в сводную таблицу 2.6 с единицами измерения в системе СИ в строки с номерами, соответствующими номерам опытов, присвоенным одинаковым наименованиям пород при выполнении испытаний для определения их плотностных свойств.

2.3.4 Обработка результатов эксперимента, составление отчёта

Результаты испытания образцов горных пород, полученные при определении их объёмной массы, обучающийся помещает в отчёт о лабораторной работе в виде текстового описания, численных значений всех измеренных показателей и выполненных на их основе расчётов, с иллюстрированием самостоятельно выполненными схемами и фотографиями.

В конце отчёта обучающийся делает краткие выводы о полученных при выполнении работы результатах, новых знаниях и навыках.

Порядок и формат составления отчёта о лабораторной работе изложен в п. Б.1.

2.3.5 Контрольные вопросы

- 1) Что называют объёмной массой горной породы?
- 2) Почему значения объёмной массы испытанных пород отличаются друг от друга?
- 3) Как определяют объёмную массу горных пород с применением объёмомера?
- 4) Что больше, плотность или объёмная масса горных пород, и почему?
- 5) Какие факторы оказывают наибольшее влияние на объёмную массу горных пород?
- 6) Как изменяется объёмная масса пород земной коры с глубиной залегания?
- 7) Что называют удельным весом горной породы и как его определить?
- 8) Почему пористость магматических пород меньше пористости осадочных пород?
- 9) Как определить объёмную массу горной породы по образцам правильной формы с использованием объёмомера?
- 10) Как изменяется плотность воды при увеличении её температуры?
- 11) Как определяют объём образца породы с использованием объёмомера?
- 12) Для чего используют проволоку и резиновые кольца при проведении экспериментов по определению объёмной массы горных пород с применением объёмомера?
- 13) Для чего определяют массу воды, вытесненной образцом из объёмомера, в настоящей лабораторной работе?

Лабораторная работа № 4

2.4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЁМНОЙ МАССЫ ПОРОД ДЕНСИТОМЕТРОМ

Цель работы: определение объёмной массы горных пород на денситометре.

Объёмную массу породы можно определять методом гидростатического взвешивания с помощью специального прибора – **денситометра горных пород (ДГП)** [5]. В качестве жидкости применяют дистиллированную воду.

2.4.1 Приборы, инструменты и материалы

- 1) Весы лабораторные.
- 2) Денситометр горной породы ДГП.
- 3) Набор разновесов с пинцетом.
- 4) Линейка с делениями.
- 5) Штангенциркуль.
- 6) Вода дистиллированная.
- 7) Сосуды для хранения воды.
- 8) Журнал для записи результатов экспериментов.
- 9) Бумажные салфетки или полотенца.
- 10) Письменные принадлежности.

Денситометр горных пород (рис. 2.4) представляет собой рычажные весы, состоящие из коромысла 7 с прикреплённой к левому плечу коромысла с помощью подвеса 5 чашкой для разновесов 3 – в качестве уравновешивающего груза.

К правому плечу коромысла при помощи подвеса 13 подвешивают образец породы 15 или чашку для образца.

Коромысло вращается на стальной оси в шариковых подшипниках, закреплённых в головке прибора 8, которая помещена на стойке 2, укрепленной на основании прибора 1.

На коромысле укреплен стрелка **9**, которая по соответствующей шкале показывает значение объёмной массы породы.

На основании прибора **1** закреплён подъёмный механизм с сосудом для воды **16**, который можно поднимать или опускать путём вращения ручки **18**.

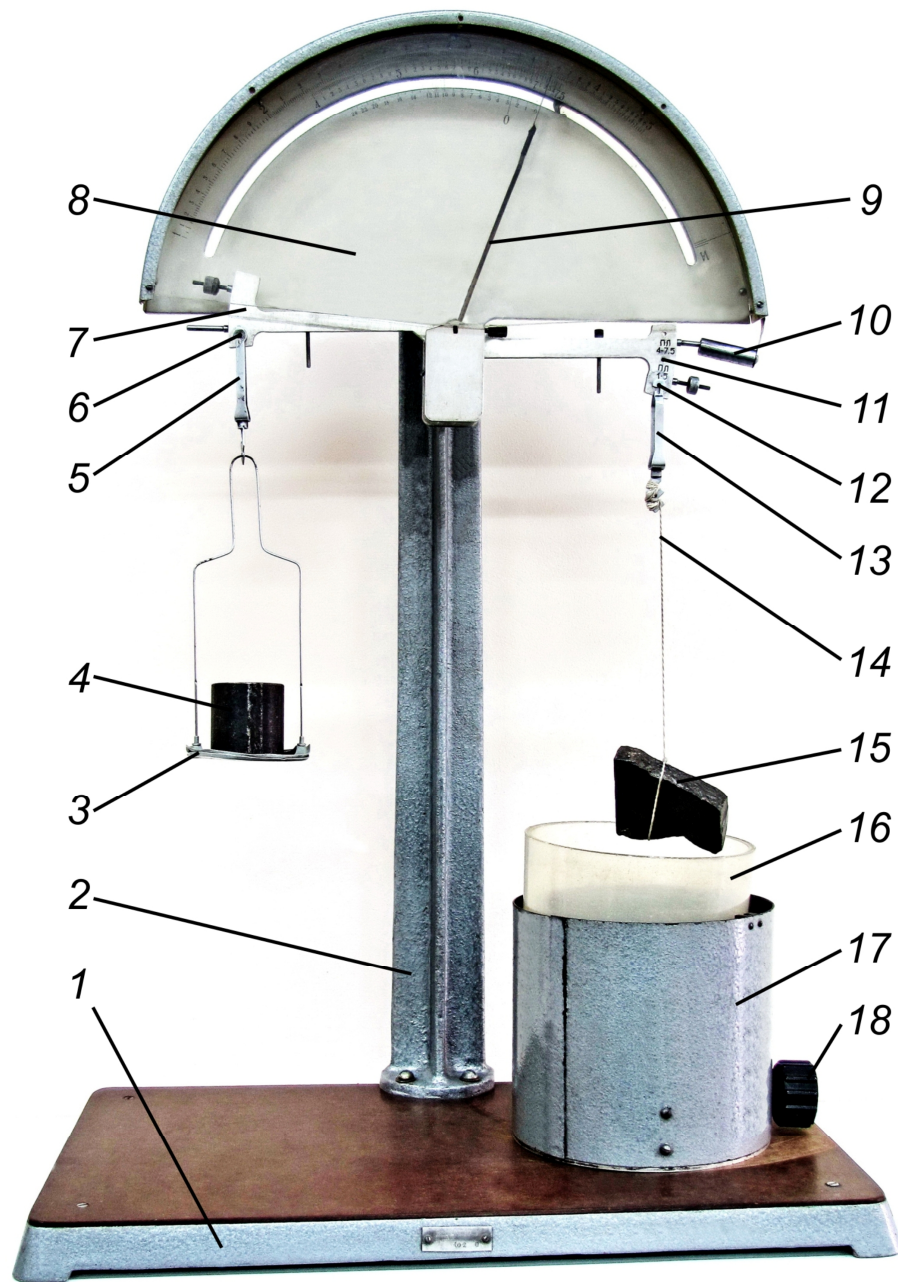


Рис. 2.4 – Денситометр горных пород (ДГП), общий вид

Условные обозначения позиций на рисунках 2.4–2.5:

- 1 – основание прибора;
- 2 – стойка;
- 3 – чашка для разновесов;
- 4 – гирька разновесов;
- 5 – подвес левого плеча коромысла;
- 6 – штифт левого плеча коромысла для крепления подвеса 5;
- 7 – коромысло;
- 8 – головка прибора;
- 9 – стрелка коромысла;
- 10 – арретир (фиксатор) коромысла;
- 11 – штифт правого плеча коромысла с отметкой "ПЛ 4-7,5" для крепления подвеса 13;
- 12 – штифт правого плеча коромысла с отметкой "ПЛ 1-5" для крепления подвеса 13;
- 13 – подвес правого плеча коромысла;
- 14 – нить с петлёй для крепления образца породы;
- 15 – образец породы;
- 16 – сосуд для воды;
- 17 – подъёмный механизм;
- 18 – ручка подъёмного механизма;
- 19 – индекс "И" на шкале измерений;
- 20 – шкала I с пределами измерения объёмной массы $1,0 \div 5,0 \text{ г/см}^3$;
- 21 – шкала II с пределами измерения объёмной массы $4,0 \div 7,5 \text{ г/см}^3$.

На головке 8 денситометра (см. рис. 2.5) нанесены три шкалы:

- две верхние шкалы I и II – для определения плотности в суммарных пределах измерения $1 \div 7,5 \text{ г/см}^3$ (табл. 2.4),
- нижняя – для определения влажности. Способ снятия отсчётов – прямой визуальный.

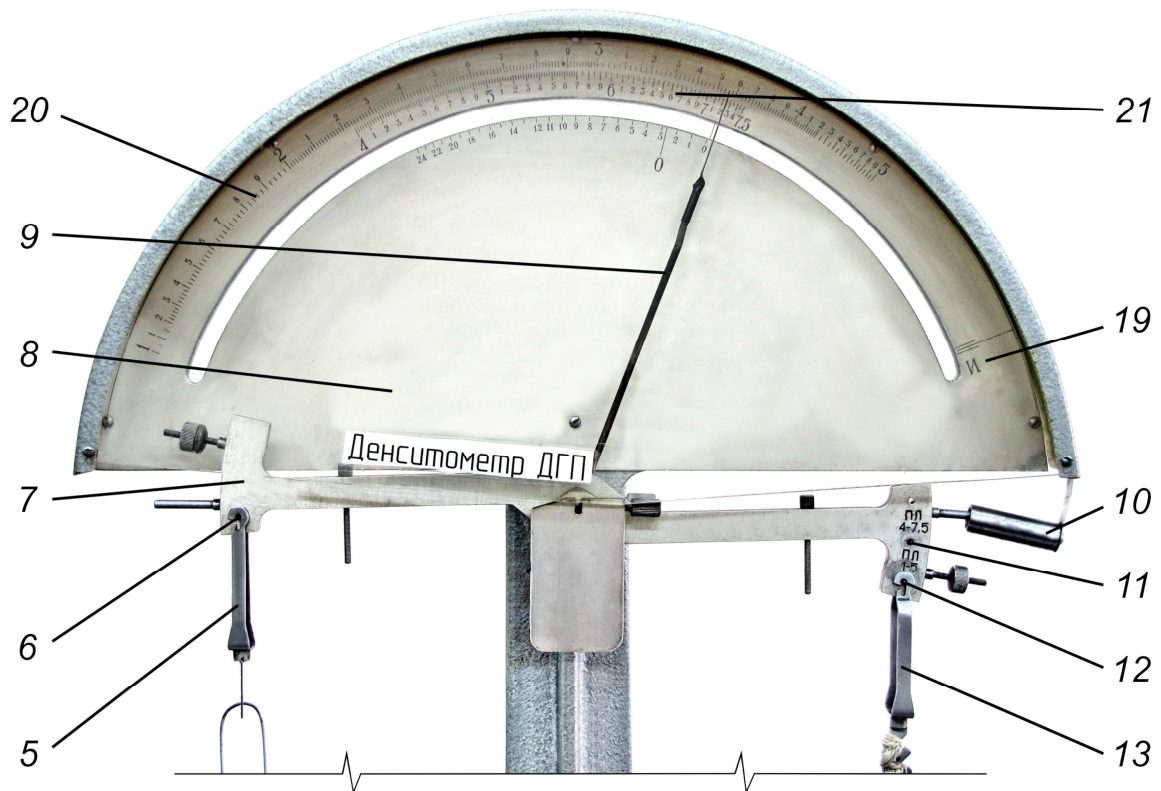


Рис. 2.5 – Головка денситометра горных пород (ДГП)

Таблица 2.4 – Пределы и погрешности измерения объёмной массы пород по верхним шкалам I и II денситометра ДГП

Шкала	Пределы измерения по шкале, г/см ³	Допустимая погрешность измерения, г/см ³	
		в диапазоне шкалы	погрешность
I сверху	1,0÷5,0	1,0÷4,0	0,01
		4,0÷5,0	0,05
II сверху	4,0÷7,5	4,0÷5,7	0,01
		5,7÷7,5	0,05

2.4.2 Подготовка образцов горных пород для испытаний

1) Из монолитных *штуфов* или *кернов* (ГОСТ Р 50544–93) [39]. изготавливают образцы горных пород неправильной формы массой 0,05–0,30 кг. При этом образцы должны быть высушены до постоянного веса.

2) Обучающимся каждого звена руководитель работы выдаёт для исследования по 6–8 образцов разных пород неправильной формы, помещённых в специальный металлический лоток.

2.4.3 Порядок выполнения эксперимента

1) Определить *наименование* породы и лабораторный номер образца (при его наличии).

2) *Пронумеровать* каждый образец породы в порядке, соответствующем номерам, присвоенным одинаковым породам при выполнении предыдущих испытаний для определения плотностных свойств.

3) Внимательно осмотреть каждый образец породы, по внешнему виду определить и описать в рабочем журнале, а затем и в отчёте о лабораторной работе особенности его строения (см. раздел 1):

- цвет, структура, текстура;
- *минеральный состав* образца – *мономинеральная* или *полиминеральная* порода в образце;
- к какой группе по *происхождению* можно отнести горные породы (*магматические, метаморфические, осадочные*).

4) Определить внешние линейные размеры и вычислить средний диаметр образца неправильной формы.

5) Сделать зарисовки (или фотографии) общего вида каждого образца. В отчёте на схеме (фотографии) образца показать основные его размеры или средний диаметр.

6) Определить на лабораторных весах с точностью до 0,1 г массу образца горной породы неправильной формы $m_{\text{п}}$.

7) В нерабочем состоянии коромысло 7 денситометра (см. рис. 2.4, 2.5) должно быть закреплено с помощью арретира (фиксатора) 10 !!!

8) Подъёмный механизм **17** следует отвести вправо, в сосуд **16** налить дистиллированной воды на уровень 1,5–2,0 см ниже кромки сосуда.

9) На правый штифт **12** с отметкой диапазона измерения "ПЛ 1-5" навесить подвес **13** с нитью, завязанной снизу затягиваемой петлёй.

10) В петлю нити **14** на подвесе **13** закрепить образец породы **15**.

11) Коромысло **7** осторожно освободить от фиксатора **10**, придерживая за середину нити образец, чтобы он не упал вниз, медленно опустить образец до свободно висячего его положения, чтобы при этом стрелка коромысла свободно переместилась максимально вправо по шкале.

12) При необходимости отрегулировать длину нити, предварительно закрепив коромысло **7** с помощью фиксатора **10** !!!

13) Гирьками **4**, помещаемыми на чашку **3** левого подвеса **5**, привести стрелку коромысла **9** на индекс "И" **19** шкалы измерения. Установку на индекс "И" следует выполнять тщательно (точно напротив длинного штриха между двумя короткими), т. к. от этого зависит точность определения объёмной массы.

Образцы рыхлых пород, обладающих большой проницаемостью и склонностью к размоканию, после установки стрелки на индекс "И" и перед погружением в воду необходимо парафинировать. В объёмную массу запарафинированного образца следует вводить поправку по номограмме из Инструкции по эксплуатации денситометра [5].

16) После установки стрелки на индекс "И" необходимо подъёмный механизм **17** с сосудом с водой **16** подвести под висящий образец **15**, который, при необходимости, можно осторожно приподнять за нить **14** вверх.

17) Осторожно "опускать" образец **15** в воду, поднимая на встречу ему сосуд с водой **16**, вращая ручку **18** подъёмного механизма. Образец должен полностью погрузиться под воду, не касаясь дна и стенок сосуда. Возможно образец будет "всплывать", но его необходимо полностью погрузить в воду, поднимая сосуд выше.

18) Перед тем как сделать отсчёт по шкале, следует постучать пальцем по основанию прибора *1* для уменьшения влияния застоя после установки на индекс "И".

19) В положении, когда образец в воде, дать коромыслу со стрелкой "успокоиться" и произвести по стрелке отсчёт значения по шкале измерений объёмной массы с точностью до $0,01 \text{ г/см}^3$.

Шкала, по которой следует производить измерения, соответствует расположению штифта, на который навешен подвес *13*. Если подвес навешен:

- на нижний штифт *12* с пометкой "ПЛ 1-5", отсчёт показаний объёмной массы производят по шкале I – *20* с пределами измерений $1-5 \text{ г/см}^3$;

- на верхний штифт *11* с пометкой "ПЛ 4-7,5" – по шкале II – *21* с пределами измерений $4-7,5 \text{ г/см}^3$.

20) Поднять за середину нити *14* образец из воды и обязательно закрепить коромысло *7* с помощью фиксатора *10*!!!

21) Опустить ручкой *18* сосуд с водой *16* вниз, отвести подъёмный механизм *17* вправо, извлечь образец из петли нити *14*, снять гирьки *4* с чашки *3*.

22) Извлечённый из сосуда денситометра образец вытирают насухо бумажной салфеткой и укладывают в лоток на своё место.

23) Повторить эксперимент с каждым из оставшихся образцов в соответствии с пунктами *5-22*.

24) Результаты измерений и расчётов записать в таблицу *2.5*.

Таблица *2.5* – Определение объёмной массы пород денситометром

№ опы-та	Лаб. номер образ-ца	Наименование породы	Средний диаметр образца, см	Масса образца $m_{\text{п}}$, г	Объёмная масса ρ		Примечания
					СГСМ г/см^3	СИ кг/м^3	
1							
2							
3							
4							
...							

25) Результаты определения объёмной массы ρ с единицами измерения в системе СИ занести в сводную таблицу 2.6 в строки с номерами, соответствующими номерам опытов, присвоенным одинаковым наименованиям пород при выполнении предыдущих испытаний для определения их плотностных свойств.

26) Сравнить полученные в результате проведённого эксперимента значения объёмной массы горных пород ρ со значениями в таблицах Д.3, Д.4.

Таблица 2.6 – Сводные результаты определения плотностных свойств горных пород

Наименование породы	Объёмная масса породы ρ , кг/м ³				Объёмный вес γ , Н/м ³	Примечания
	метод измерения размеров	метод объёмомера	метод денситометра	средняя $\rho_{\text{ср}}$ по трём методам		
1						
2						
3						
4						
5						
...						

2.4.4 Обработка результатов эксперимента, составление отчёта

а) по результатам проведённых исследований плотностных свойств горных пород необходимо произвести вычисление *объёмного веса* γ каждой испытанной горной породы по формуле (2.8) на основе среднего арифметического значения объёмной массы одной и той же породы $\rho_{\text{ср}}$, определённого тремя методами (см. табл. 2.6).

Результаты вычислений *объёмного веса* γ занести в сводную таблицу 2.6 в строки с номерами, соответствующими номерам опытов, присвоенным одинаковым наименованиям пород при выполнении предыдущих их испытаний для определения плотностных свойств.

б) По результатам выполненных исследований из таблицы 2.6 необходимо построить *диаграмму* (условное графическое изображение числовых величин или их соотношений, выполненное с помощью линий, плоскостей, геометрических фигур, рисунков [40, п. 3.1.3.27]) распределения значений объёмной массы горных пород ρ по их наименованиям. Наименования пород на оси абсцисс разместить по возрастанию значений их объёмной массы. Пример диаграммы представлен на рисунке 2.6.

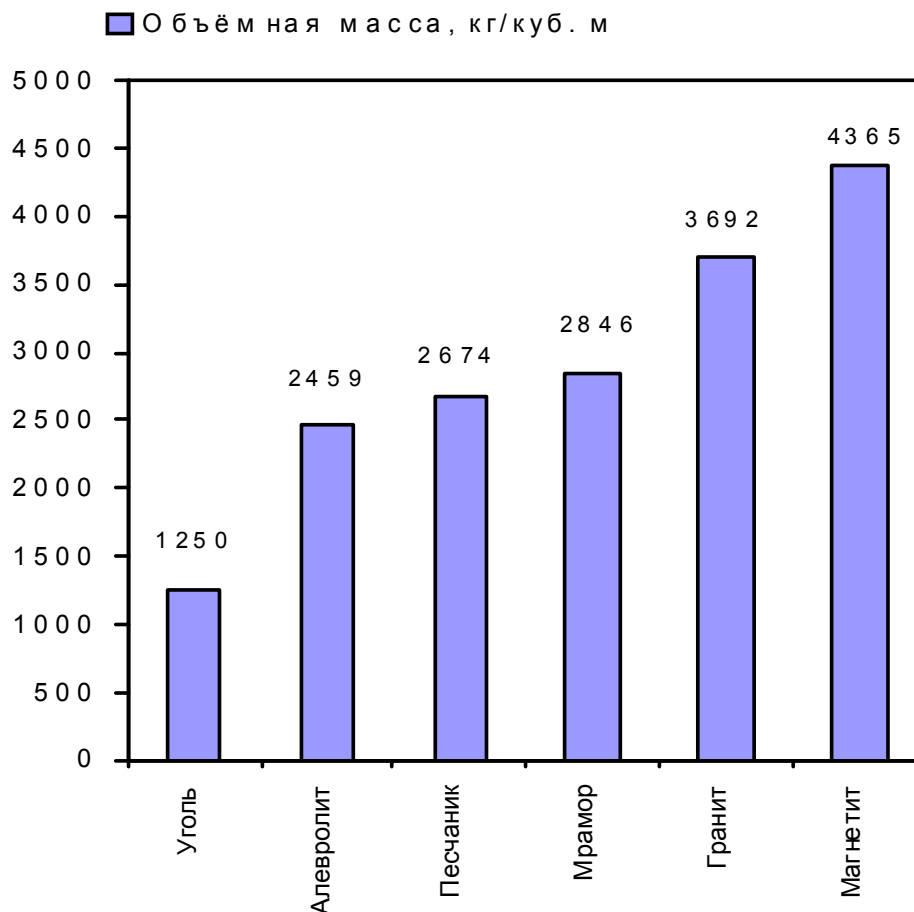


Рис. 2.6 – Распределение средних значений объёмной массы для разных горных пород

в) Результаты испытания образцов горных пород, полученные при определении их объёмной массы, обучающийся помещает в отчёт о лабораторной работе в виде текстового описания, численных значений всех измеренных показателей и выполненных на их основе расчётов, с иллюстрированием самостоятельно выполненными схемами, графиками и фотографиями.

з) В конце отчёта обучающийся делает краткие выводы о полученных при выполнении работы результатах, новых знаниях и навыках.

Порядок и формат составления отчёта о лабораторной работе изложен в п. Б.1.

2.4.5 Контрольные вопросы

1) Объяснить устройство и принцип работы денситометра горных пород.

2) Как определяют объёмную массу горных пород с применением денситометра?

3) Что больше, плотность или объёмная масса горных пород, и почему?

4) Как изменяется объёмная масса осадочных пород с глубиной их залегания?

5) Что называют объёмным весом горной породы и как его определить?

6) Как определить объёмную массу горной породы по образцам правильной формы с использованием денситометра?

7) Способ определения объёмного веса горных пород.

8) Как используют в горной промышленности значения объёмной массы горных пород?

9) Примеры использования значений объёмного веса пород в горнодобывающей промышленности.

10) Объяснить, как и почему объёмная масса горных пород зависит от их минерального состава?

11) У каких пород значения объёмной массы имеют минимальные значения: метаморфических, осадочных, магматических, и почему?

12) Чем отличаются понятия объёмной массы от объёмного веса?

Лабораторная работа № 5**2.5 НАСЫПНАЯ МАССА И КОЭФФИЦИЕНТ
РАЗРЫХЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД**

Цель работы: определение насыпной массы, насыпного веса и коэффициента разрыхления разрушенной горной породы.

2.5.1 Теоретические основы

Рыхлая горная порода – горная порода, залегающая в земной коре в виде скопления отдельных зёрен и обломков минеральных агрегатов [39].

Разрушенная горная порода – первоначально твёрдая или связанная горная порода, утратившая связи между минеральными частицами и минеральными агрегатами в результате внешнего воздействия [39].

а) *Насыпная масса горной породы ρ_n* – масса единицы объёма сухой *рыхлой* или *разрушенной* горной породы [39].

Насыпная масса может быть определена как отношение массы породы в разрыхленном (насыпанном) состоянии к объёму, который занимает эта порода в разрыхленном (насыпанном) состоянии, по формуле

$$\rho_n = \frac{m_n}{V_n}, \quad (2.20)$$

где m_n – масса породы в разрыхленном (насыпном) состоянии, кг;
 V_n – объём, занимаемый породой в разрыхленном (насыпном) состоянии, м³.

б) *Насыпным весом горной породы* $\gamma_{\text{н}}$ называют вес единицы объёма сухой *рыхлой* или *разрушенной* породы, включая объём пор и промежутков между её отдельными кусками.

Насыпной вес можно определить из выражения

$$\gamma_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{V_{\text{н}}}, \quad (2.21)$$

где $P_{\text{н}}$ – вес породы в разрыхленном (насыпном) состоянии, Н;
 $V_{\text{н}}$ – объём, занимаемый породой в разрыхленном (насыпном) состоянии, м³.

Величина *насыпного веса породы* зависит от *объёмной массы* или *объёмного веса* породы, размера частиц, влажности, плотности укладки частиц или их уплотнения.

Связь между *насыпной массой* $\rho_{\text{н}}$ и *насыпным весом* $\gamma_{\text{н}}$ горной породы может быть выражена формулой

$$\gamma_{\text{н}} = \rho_{\text{н}} \cdot g, \quad (2.22)$$

где $\gamma_{\text{н}}$ – насыпной вес горной породы, Н/м³;

$\rho_{\text{н}}$ – насыпная масса породы, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с² (для технических расчётов принимают равным 9,81 м/с²).

Насыпной вес породы – параметр *силовой*. Его следует применять только в тех случаях, когда рассматривают силы, вызванные действием гравитационного поля, например, давление *рыхлой* или *разрушенной* горной породы на транспортные средства [14, п. 3.2].

в) *Коэффициент разрыхления породы*

Разрыхляемость горной породы – свойство породы или угля увеличивать объём при разрушении, которое характеризуют *коэффициентом разрыхления* [1, п. 2].

Коэффициент разрыхления горной породы k_p – параметр, показывающий, во сколько раз изменяется объём горной породы при её разрушении [39], его можно определить из выражения

$$k_p = \frac{V_n}{V_{\Pi}}, \quad (2.23)$$

где k_p – коэффициент разрыхления горной породы;

V_{Π} – объём образца горной породы в ненарушенном (естественном) состоянии, м³;

V_n – насыпной объём всех кусков *разрушенного* образца породы, м³.

Кроме того, *коэффициент разрыхления* породы k_p можно определить как отношение значений *объёмной массы* ρ к *насыпной массе* ρ_n породы

$$k_p = \frac{\rho}{\rho_n}, \quad (2.24)$$

где ρ – объёмная масса породы, кг/м³;

ρ_n – насыпная масса породы, кг/м³.

Примеры значений коэффициента разрыхления k_p некоторых пород приведены в таблице Д.7.

2.4.2 Оборудование, приборы, инструменты

- 1) Весы лабораторные.
- 2) Мерные сосуды для разрушенной породы.
- 3) Линейка с делениями.
- 4) Штангенциркуль.
- 5) Совок для пересыпания разрушенной породы.
- 6) Поднос для сбора просыпанной разрушенной породы.
- 7) Журнал для записи результатов экспериментов.
- 8) Письменные принадлежности.

2.4.3 Подготовка образцов горных пород для испытаний

1) Из монолитных *штупов* или *кернов* (ГОСТ Р 50544–93 [39]), высушенных до постоянного веса, изготавливают образцы в виде *кусков разрушенной* породы неправильной формы разных размеров, которые просеивают на ситах с получением нескольких размерных фракций.

2) Обучающимся каждого звена руководитель работы выдаёт для исследования образцы разрушенных пород в виде кусков трёх размерных фракций массой 3,0–4,0 кг каждая, помещённых в специальные контейнеры.

2.4.4 Порядок выполнения эксперимента

1) Определить *наименование* породы каждого образца.

2) Внимательно осмотреть каждый образец породы; по внешнему виду определить и описать в рабочем журнале, а затем и в отчёте о лабораторной работе особенности его строения (см. раздел 1):

- цвет, структура, текстура;
- *минеральный состав* образца – *мономинеральная* или *полиминеральная* порода в образце;

- к какой группе по *происхождению* можно отнести горные породы (*магматические, метаморфические, осадочные*).

3) Сделать зарисовки (или фотографии) общего вида образцов каждой фракции размеров.

4) *Пронумеровать* каждую фракцию образцов разрушенной породы в порядке возрастания размера среднего диаметра их кусков.

5) Измерить штангенциркулем внешние линейные размеры и вычислить минимальные и максимальные (от–до) *средние диаметры* кусков разрушенной породы d_p каждой фракции.

6) Определить путём прямого измерения штангенциркулем диаметр d_c и глубину (высоту) h_c внутренней полости мерного сосуда.

7) Определить на лабораторных весах с точностью до 0,1 г массу пустого и чистого мерного сосуда m_c .

8) Из контейнера с породой одной из фракций совком насыпать в мерный сосуд разрушенную породу немного выше верхнего края сосуда (с излишком).

9) Выровнять поверхность насыпанной породы с уровнем верхнего края сосуда, для чего переместить излишек породы на поднос медленно перемещая длинное ребро линейки по верхнему краю стенок сосуда, стоящего на подносе.

10) Определить на лабораторных весах с точностью до 0,1 г массу сосуда $m_{сп}$ с засыпанной в него ровно до краёв *разрушенной* породой.

11) Высыпать разрушенную породу из мерного сосуда в исходный контейнер с соответствующей фракцией.

12) Повторить эксперимент с каждой из оставшихся фракций образцов породы в соответствии с пунктами 8–11.

13) Результаты измерений записать в таблицу 2.7.

Таблица 2.7 – Результаты определения насыпной массы, насыпного веса и коэффициента разрыхления горных пород

Номер фракции породы	Размер кусков породы d_p , мм		Объём сосуда V_c , см ³	Насыпная масса ρ_n		Насыпной вес γ_n , Н/м ³	Коэффициент разрыхления k_p
	от–до	средн.		СГСМ г/см ³	СИ кг/м ³		
Наименование породы							
1							
...							

2.4.5 Обработка результатов эксперимента, составление отчёта

1) Определить объём мерного сосуда.

Объём внутренней полости мерного сосуда V_c представляет собой цилиндр, следовательно, его размер можно определить по формуле для расчёта объёма тела цилиндрической формы

$$V_c = \frac{\pi d_c^2}{4} h_c, \quad (2.25)$$

где V_c – объём внутренней полости мерного сосуда цилиндрической формы, см³;

d_c – внутренний диаметр мерного сосуда цилиндрической формы, см;

h_c – высота (глубина) внутренней полости мерного сосуда цилиндрической формы, см;

π – число "пи" (в расчётах можно применять значение $\pi = 3,14$).

Объём внутренней полости мерного сосуда V_c , куда насыпана разрушенная порода в соответствии с пп. 8–10 порядка выполнения эксперимента, равен объёму, который занимает эта разрушенная порода V_n . Следовательно, справедливо равенство

$$V_c = V_n, \quad (2.26)$$

где V_c – объём внутренней полости мерного сосуда, см³;

V_n – объём разрушенной породы, насыпанной в мерный сосуд цилиндрической формы, см³.

2) Значение *насыпной массы породы* для каждой фракции разрушенной породы в соответствии с формулой (2.20) можно вычислить из выражения

$$\rho_n = \frac{m_{\text{сп}} - m_c}{V_c}, \quad (2.27)$$

где ρ_n – насыпная масса породы, г/см³;

$m_{\text{сп}}$ – масса мерного сосуда с насыпанной в него *разрушенной* породой, г;

m_c – собственная масса пустого мерного сосуда, г;

V_c – внутренний объём мерного сосуда, см³.

3) Рассчитать значение *насыпного веса горной породы* γ_n (Н/м³) для каждой фракции по формуле (2.22).

4) Определить *коэффициент разрыхления горной породы* k_p по формуле (2.24). Для этого значение объёмной массы породы ρ (кг/м³) необходимо взять как среднее значение для соответствующей породы из результатов, полученных при выполнении лабораторной работы № 4 – в таблице 2.6.

5) Результаты вычислений занести в таблицу 2.7.

6) Сравнить полученные в результате проведённого эксперимента значения коэффициента разрыхления горных пород k_p со значениями в таблице Д.7.

7) Установить, как зависят значения коэффициента разрыхления k_p от среднего размера кусков разрушенной породы (фракции). Для этого построить *график* зависимости значений *коэффициента разрыхления* k_p от средних размеров кусков разрушенной породы d_p каждой фракции из таблицы 2.7.

8) Результаты исследования образцов разрушенных горных пород, полученные при определении параметров их насыпной массы и коэффициента разрыхления, каждый обучающийся помещает в персональный отчёт о лабораторной работе в виде текстового описания, численных значений всех измеренных показателей и выполненных на их основе расчётов, с иллюстрированием самостоятельно выполненными схемами и фотографиями.

В конце отчёта обучающийся делает краткие выводы о полученных при выполнении работы результатах, новых знаниях и навыках.

Порядок и формат составления отчёта о лабораторной работе изложен в п. Б.1.

2.4.6 Контрольные вопросы

- 1) Как можно рассчитать насыпную массу разрушенных пород?
- 2) Как можно определить насыпной вес горной породы в лаборатории?
- 3) Какие факторы влияют на величину насыпного веса горных пород?
- 4) В чём отличие насыпной массы от насыпного веса разрушенных горных пород?
- 5) Какие факторы влияют на величину насыпной массы горных пород?
- 6) Что характеризует коэффициент разрыхления горных пород?
- 7) Какие значения может принимать коэффициент разрыхления пород?
- 8) Указать основные области использования коэффициента разрыхления разрушенных пород в горном деле.
- 9) Как влияет средний диаметр кусков разрушенной породы на значение её насыпного веса?
- 10) Как влияет средний диаметр кусков разрушенной породы на значение её коэффициента разрыхления?
- 11) Примеры использования насыпного веса разрушенных пород в горном деле.
- 12) Пояснить отличия понятий объёмной массы от насыпной массы горных пород?

3 МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

3.1 Теоретические основы

3.1.1 Общие положения

Прочность горных пород имеет решающее значение во всех процессах горного производства. Информация о прочностных свойствах и параметрах пород необходима для расчёта эффективности разрушения пород различными способами, крепления, охраны и поддержания горных выработок, выбора и обоснования технологии подготовительных и очистных работ, а также для решения всего комплекса вопросов наземного и подземного строительства. От прочностных свойств пород в значительной мере зависят геомеханические процессы в массиве пород при строительстве подземных сооружений и разработке полезных ископаемых.

Прочностные свойства горной породы – это механические свойства, характеризующие процессы разрушения горных пород (ГОСТ Р 50544–93 [39]).

Прочность – это способность горной породы сопротивляться действию сил, стремящихся вызвать её разрушение. Порода перестаёт быть прочной, если в ней нарушаются внутренние связи и происходит её *разрушение*.

Разрушение – это разрыв связей между атомами и ионами в кристаллической решётке. Величины сил, необходимых для разрыва, зависят от типа межатомных связей и строения кристаллической решётки минералов [14, п. 3.7].

Прочность горных пород зависит от многих внутренних и внешних факторов. Наиболее существенное влияние на неё оказывают минеральный состав, структура, текстура, влажность, температура, продолжительность действия нагрузки и характер её приложения. Имеющиеся в горных породах микро- и макродефекты снижают её прочность в сотни и тысячи раз. Поэтому различают *теоретическую* и *реальную* прочность горных пород (как и любого твёрдого тела).

Теоретическая прочность – прочность связи между элементарными частицами, слагающими идеальную кристаллическую ре-

шётку минералов породы. Следовательно, теоретическая прочность горных пород обусловлена силой сцепления элементарных частиц кристаллов в породах, которые имеют бездефектное, т. е. идеальное строение.

Реальная прочность – прочность горных пород, которой они обладают в действительности, в реальных условиях с учётом всех имеющихся в них микро- и макродефектов.

Прочность породы оценивают величиной критических *напряжений* (Па), при которых происходит её разрушение. Эти напряжения различны для разных пород и для разных видов приложенных нагрузок и носят названия *пределов прочности* [14, п. 3.7].

В практике горного дела используют различные виды *пределов прочности пород*:

- *при одноосном растяжении* σ_p – предельное одноосное растягивающее напряжение, при котором происходит разрушение породы (ГОСТ Р 50544–93 [39], ГОСТ 21153.3–85 [27]);

- *при одноосном сжатии* $\sigma_{сж}$ – предельное одноосное сжимающее напряжение, при котором происходит разрушение горной породы (ГОСТ Р 50544–93 [39], ГОСТ 21153.2–84 [26]);

- *при сдвиге* $\tau_{сдв}$ – предельное касательное напряжение, при котором происходит разрушение породы (ГОСТ Р 50544–93 [39]);

- *при изгибе* $\sigma_{изг}$ (ГОСТ 21153.6–75 [29]);

- *при срезе со сжатием* (ГОСТ 21153.5–88 [28]);

- *при объёмном сжатии* (ГОСТ 21153.8–88 [30]) и другие.

Значения некоторых из названных прочностных параметров горных пород представлены в таблице Д.3.

Как известно из физики твёрдого тела, между ионами в кристаллической решетке любого вещества существуют силы взаимного притяжения и силы взаимного отталкивания. Именно благодаря этому при воздействии на породу внешних сил, стремящихся сдвинуть с нейтрального положения ионы в решетке вещества в одну или другую сторону, в породе возникают внутренние силы, противодействующие внешним [14, п. 3.3].

Поверхностную плотность внутренних сил называют **напряжением** σ (Па); оно, как и сила, – величина векторная и может быть определено по формуле

$$\sigma = dF / dS, \quad (3.1)$$

где dF (Н) – сила, действующая на элемент площадки dS (м²).

Механические напряжения σ выражают:

- в системе СИ в паскалях (Па) [38]:

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ м}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2};$$

при необходимости используют десятичные кратные единицы СИ (табл. В.11, В.12) – килопаскаль (кПа), мегапаскаль (МПа), гигапаскаль (ГПа);

- во внесистемных единицах:

$$1 \text{ кгс/см}^2 = 98066,5 \text{ Па (точно);}$$

$$1 \text{ кгс/мм}^2 = 9,80665 \cdot 10^6 \text{ Па (точно);}$$

$$1 \text{ кгс} = 9,80665 \text{ Н (точно);}$$

$$1 \text{ Н} = 1 \text{ м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2};$$

$$1 \text{ Н} = 0,102 \text{ кгс.}$$

В зависимости от направления действия на породу внешних сил они вызывают в ней:

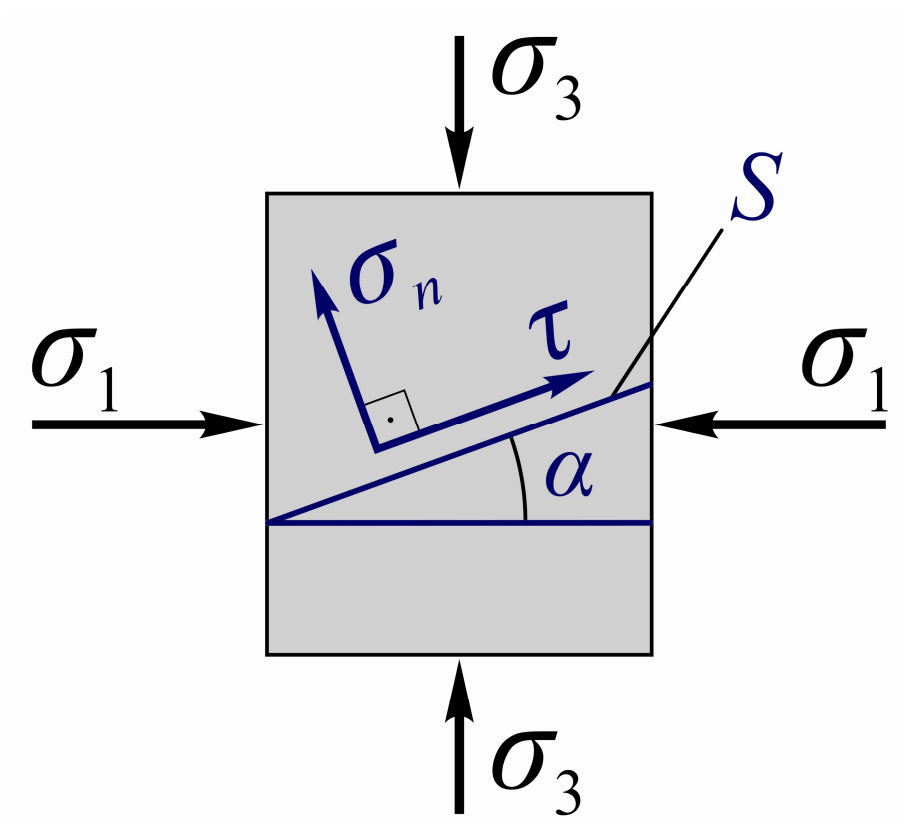
- ***одноосное** напряжённое состояние*, при действии сил в направлении одной оси;

- ***плоское** напряжённое состояние*, при действии сил в двух взаимно перпендикулярных направлениях;

- ***объёмное** напряжённое состояние*, при действии сил по трём взаимно перпендикулярным направлениям.

Частный случай, когда все силы при объёмном напряжённом состоянии равны, называют ***гидростатическим*** напряжённым состоянием.

Известно, что в любой плоскости твёрдого тела S (рис. 3.1), в нашем случае – породы, при нагружении возникают *касательные* и *нормальные* напряжения, которые взаимосвязаны.



σ_1 – нормальные напряжения, действующие вдоль оси 1;
 σ_3 – нормальные напряжения, действующие вдоль оси 3;
 σ_n – напряжения, нормальные к плоскости сдвига S ;
 τ – касательные напряжения вдоль плоскости S ;
 α – угол наклона плоскости сдвига S относительно направления действия максимальных нормальных напряжений σ_1

Рис. 3.1 – Нормальные и касательные напряжения в породе при плоском напряжённом состоянии

Напряжения, возникающие в породе и направленные перпендикулярно (по нормали) к рассматриваемой плоскости сдвига S (рис. 3.1), называют **нормальными** (σ_n);
 напряжения, возникающие вдоль плоскости сдвига S (рис. 3.1), – **касательными** (τ).

3.1.2 Теория прочности Мора

Применительно к горным породам наибольшее распространение получила **теория прочности Мора**, основанная на зависимости между касательными τ и нормальными σ_n напряжениями в каждой точке тела, находящегося в сложнапряжённом состоянии.

Считают, что *теория Мора* наиболее полно согласована с экспериментальными данными о прочности образцов горных пород.

По *теории Мора* разрушение породы наступает тогда, когда:

- либо касательные напряжения τ превысят определенное предельное критическое значение $\tau_{кр}$, величина которого тем больше, чем больше нормальные напряжения, действующие на образец;
- либо при $\tau = 0$, когда нормальные растягивающие напряжения превысят предел прочности породы при растяжении σ_p .

Связь между σ_n и τ представляют графически с помощью так называемых **кругов напряжений**, которые строят следующим образом (рис. 3.2):

- 1) по оси абсцисс откладывают *максимальное* σ_1 и *минимальное* σ_3 значения нормальных напряжений, действующих на образец;
- 2) на разности отрезков $(\sigma_1 - \sigma_3)$, как на диаметре, строят круг (или полукруг) с радиусом r_k , равным

$$r_k = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}. \quad (3.2)$$

Если образец находится в *плоском* напряженном состоянии (*большее* напряжение – σ_1 и *меньшее* – σ_3), то в плоскости под углом α (см. рис. 3.2) будут действовать напряжения [14, п. 3.7]:

- нормальные

$$\sigma_n = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha, \quad (3.3)$$

- касательные

$$\tau = 0,5(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha. \quad (3.4)$$

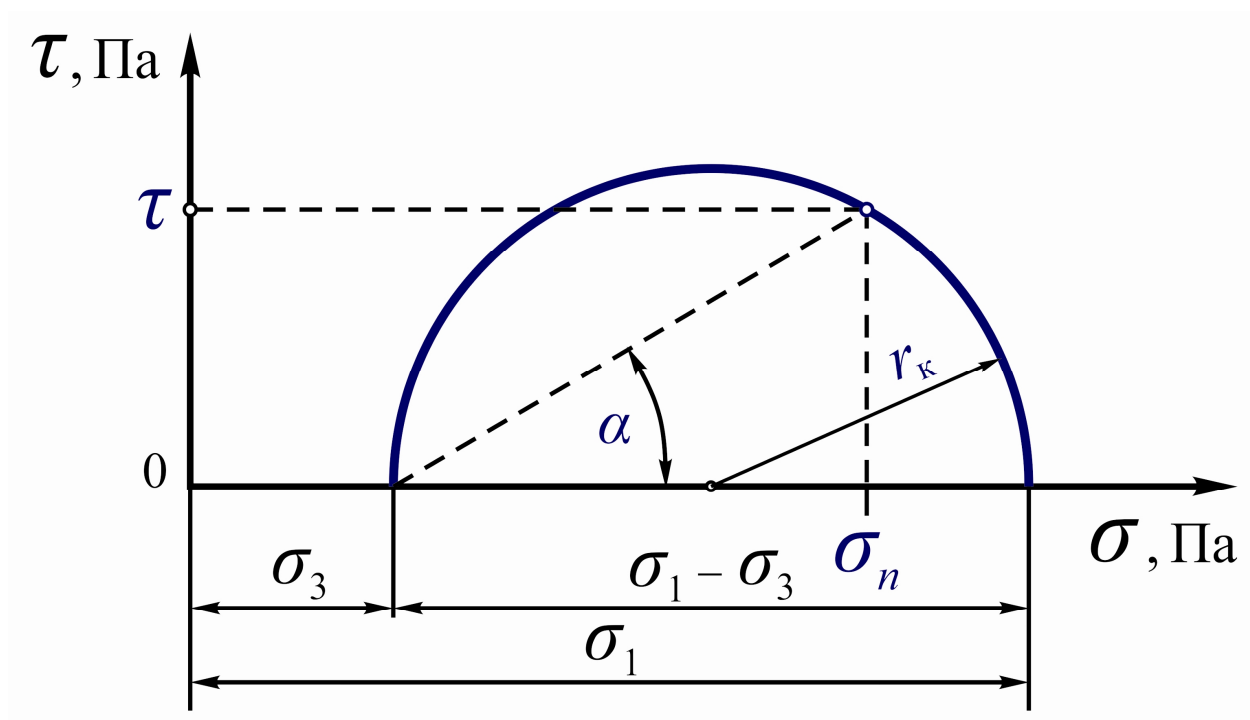


Рис. 3.2 – Взаимосвязь между нормальными σ_n и касательными τ напряжениями в породе (плоское напряжённое состояние)
[14, п. 3.7]

Значения касательного τ и нормального σ_n напряжений в любой точке образца могут быть найдены, если задан угол *плоскости* α , в которой определяют напряжения.

Если из левой точки пересечения окружности с абсциссой провести прямую линию под этим углом α до её пересечения с *кругом напряжений*, то ордината точки пересечения круга напряжений с этой прямой будет численно равна значению отыскиваемых касательных напряжений τ , абсцисса – значению нормальных напряжений σ_n (см. рис. 3.2).

Каждому частному значению напряжённого состояния породы соответствует свой круг напряжений.

Если горная порода подвержена только *одноосному сжатию* ($\sigma_3 = 0$) вплоть до момента её разрушения, то для такого случая также можно построить круг (или полуокруг) напряжений, отложив на оси абсцисс значение σ_1 , равное $\sigma_{сж}$ – пределу прочности породы при сжатии (рис. 3.3).

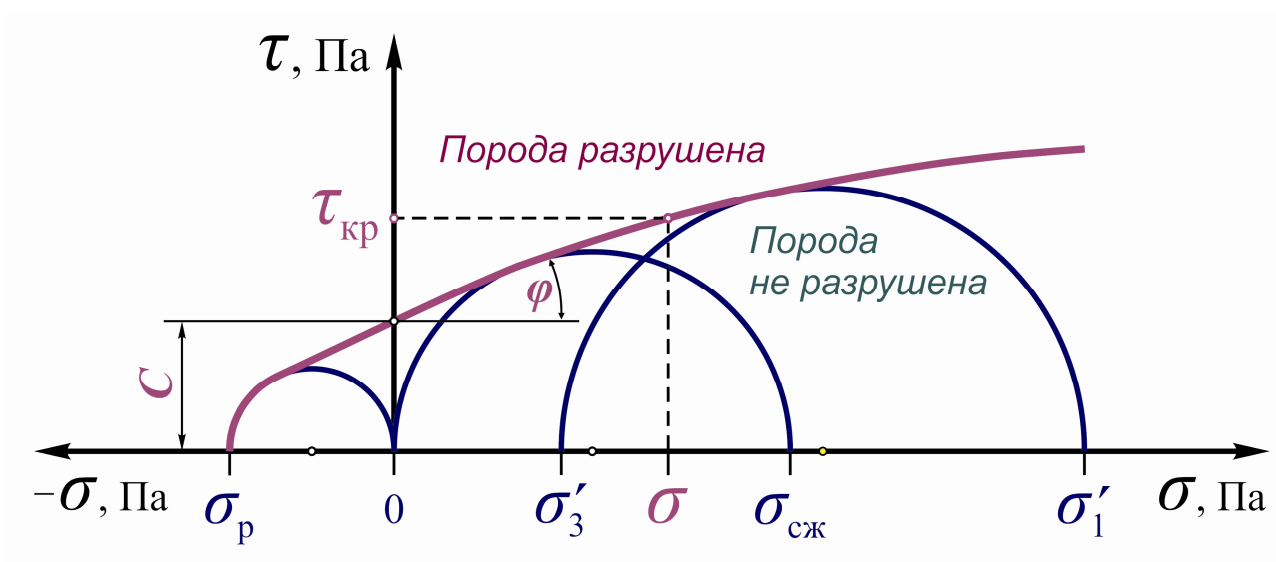


Рис. 3.3 – Паспорт прочности горной породы

Поскольку этот круг (полуокруг) для заданного напряжённого состояния является максимальным, его называют **кругом предельных напряжений**.

На таком графике (см. рис. 3.3) можно аналогичным образом построить *круги предельных напряжений* для σ_p и $\sigma_{сж}$, а также для пределов прочности $\sigma'_{сж}$, определённых в сложнапряжённом состоянии (при $\sigma_3 > 0$). В результате получают семейство кругов напряжений.

Проведя огибающую этих кругов (полуокругов) напряжений, получают *кривую* в виде **параболы**, характеризующую предельное напряжённое состояние породы в момент её разрушения (см. рис. 3.3). Такой график с *кругами предельных напряжений* и огибающей их *параболой* называют **паспортом прочности** горной породы. Он может быть построен для каждого типа породы по результатам определения её прочностных параметров.

Очевидно, что любое напряжённое состояние породы, характеризующееся точкой на *графике* (см. рис. 3.3), лежащей снаружи (выше) *параболы*, является разрушающим для данной породы, и наоборот, лежащей внутри (ниже) *параболы* – неразрушающими.

3.1.3 Аналитическое определение параметров паспорта прочности пород

Параметры *паспорта прочности* горных пород можно определить по упрощённым формулам [14, п. 3.7]:

а) *касательные напряжения* τ в виде *параболы*

$$\tau = \sqrt{(\sigma_p + \sigma_{сж}) \left[2\sigma_p - 2\sqrt{\sigma_p(\sigma_p + \sigma_{сж})} + \sigma_{сж} \right]}, \quad (3.5)$$

где σ_p – предел прочности породы при одноосном растяжении, Па;
 $\sigma_{сж}$ – предел прочности породы при одноосном сжатии, Па;
 или (на некотором участке вблизи оси ординат) приблизительно в виде *прямой линии*

$$\tau = C + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (3.6)$$

где C – *сцепление породы* – предельное касательное напряжение, равное *пределу прочности породы при сдвиге* $\tau_{сдв}$, при котором происходит разрушение породы, в условиях отсутствия нормальных напряжений, когда $\sigma_n = 0$, Па (см. рис. 3.2 и 3.3);

σ – нормальные напряжения, Па;

$\operatorname{tg} \varphi$ – *коэффициент внутреннего трения* – коэффициент пропорциональности между приращениями нормальных σ_n и касательных τ разрушающих напряжений, Па;

φ – *угол внутреннего трения*, градусы;

в) сцепление породы C (Па)

$$C = \frac{\sqrt{\sigma_{сж} \sigma_p}}{2}; \quad (3.7)$$

б) коэффициент внутреннего трения $tg \varphi$

$$tg(\varphi) = \frac{\sigma_{сж} - \sigma_p}{2\sqrt{\sigma_{сж} \sigma_p}}; \quad (3.8)$$

г) угол внутреннего трения породы φ (градус)

$$\varphi = arctg[tg(\varphi)]. \quad (3.9)$$

3.1.4 Графическое определение параметров *паспорта прочности пород*

Зная пределы прочности при растяжении σ_p и при сжатии $\sigma_{сж}$, можно построить упрощённый вариант *паспорта прочности породы* в виде *графика* (рис. 3.4).

Для этого необходимо:

1) Построить оси нормальных σ и касательных τ напряжений со шкалой (Па) одинакового масштаба.

2) На оси абсцисс – нормальных напряжений отложить значения пределов прочности породы (Па) при растяжении σ_p и сжатии $\sigma_{сж}$ с учётом направления их действия (–/+).

3) На отрезке оси абсцисс ($\sigma_p - 0$), как на диаметре с центром в точке O_1 , построить полуокруг с радиусом r_p (Па), равным

$$r_p = \frac{\sigma_p}{2}. \quad (3.10)$$

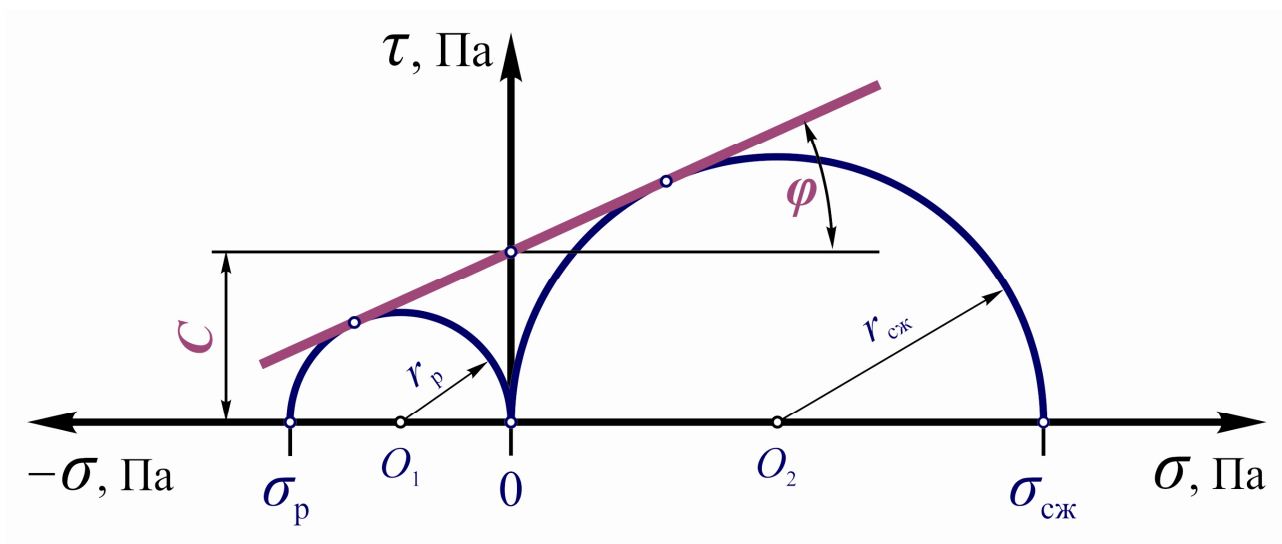


Рис. 3.4 – Паспорт прочности испытанной горной породы

4) На отрезке оси абсцисс ($0 - \sigma_{сж}$), как на диаметре с центром в точке O_2 , построить полукруг с радиусом $r_{сж}$ (Па), равным

$$r_{сж} = \frac{\sigma_{сж}}{2} \quad (3.11)$$

5) По образующим полукругов провести общую касательную прямую линию, представляющую в упрощённом виде *кривую параболы* паспорта прочности породы (см. рис. 3.3).

6) В точке пересечения касательной прямой с осью ординат (касательных напряжений τ) построить параллельную с осью абсцисс прямую линию.

7) Отметить между касательной прямой и линией, пересекающей ось ординат, угол внутреннего трения φ .

8) Отметить на оси ординат точку пересечения с касательной прямой, которая представляет собой значение сцепления породы C .

Лабораторная работа № 6

3.2 ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАСТЯЖЕНИИ И СЖАТИИ

Цель работы: определение пределов прочности горных пород при одноосном растяжении – путём многократного раскалывания образцов в виде пластин или брусков, и сжатия – путём разрушения образцов кубообразной формы.

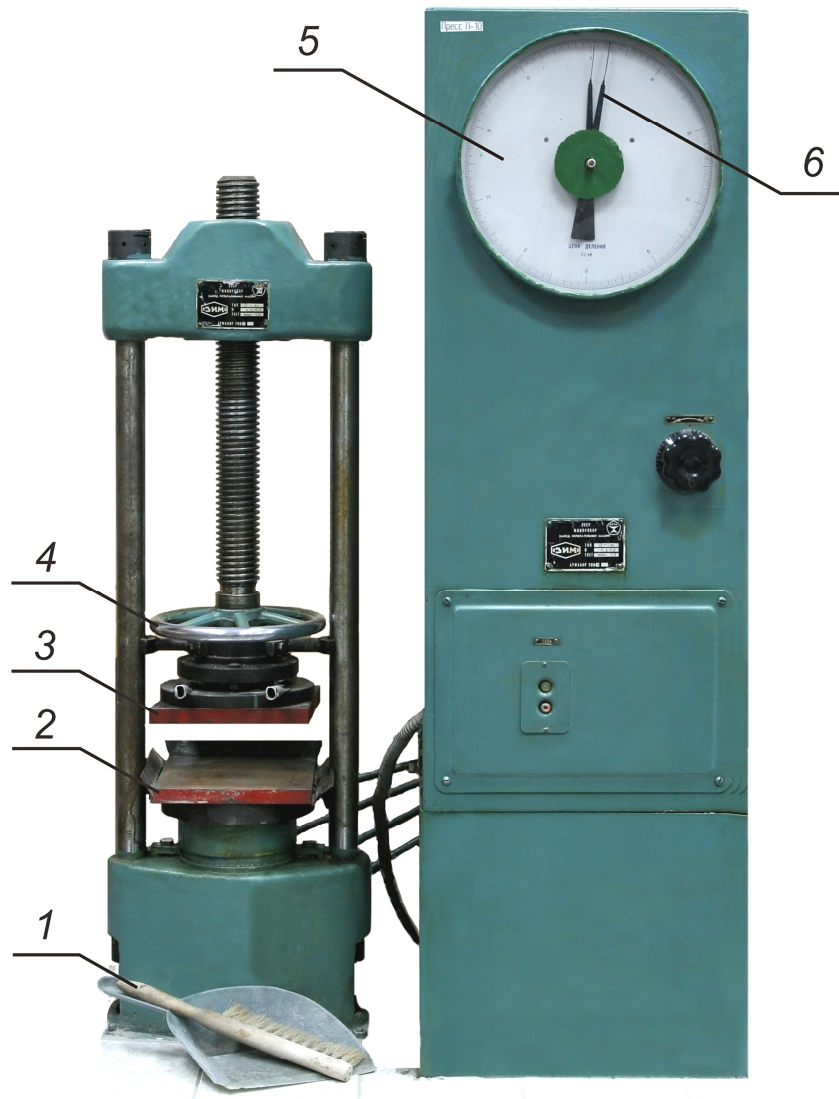
3.2.1 Метод определения пределов прочности горных пород при одноосном растяжении и сжатии

Метод, рекомендуемый ГОСТ 21153.3–85 [27, разд. 4], предназначен для массовых испытаний горных пород с целью комплексного определения пределов прочности при одноосном растяжении и сжатии в заданном относительно строения (слоистости) породы направлении.

Сущность метода заключается в определении пределов прочности при растяжении и сжатии на одной пробе путём измерения разрушающей силы при многократном раскалывании образцов пластинчатой и брусчатой формы и измерения разрушающей силы сжатия полученных при раскалывании образцов кубообразной формы.

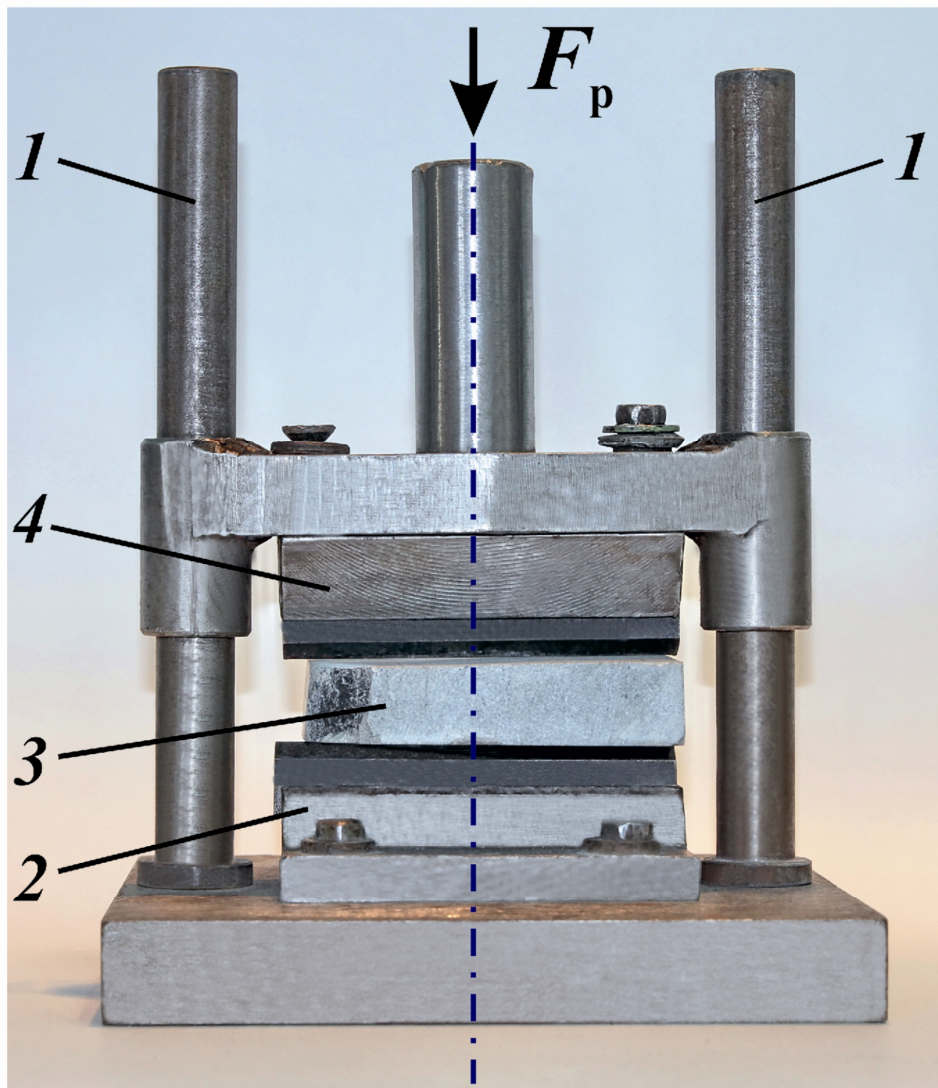
3.2.2 Оборудование, приборы, инструменты

- 1) Пресс гидравлический П-10 (рис. 3.5).
- 2) Раскалыватель с направляющими двух клиньев, с углом заточки лезвий клиньев 90° и радиусом их закругления 5 ± 1 мм (рис. 3.6).
- 3) Линейка с делениями.
- 4) Штангенциркуль.
- 5) Инвентарь для уборки рабочего места.
- 6) Журнал для записи результатов экспериментов.
- 7) Письменные принадлежности.



- 1 – инвентарь для уборки рабочего места;
- 2 – нижняя плита пресса;
- 3 – верхняя плита пресса;
- 4 – маховик регулятора высоты верхней плиты;
- 5 – стрелочный индикатор давления пресса;
- 6 – ведомая стрелка силоизмерителя пресса

Рис. 3.5 – Пресс гидравлический П-10



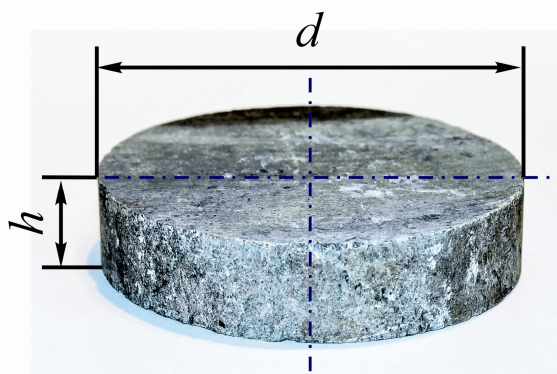
- 1 – направляющие стойки;
2 – нижний клин раскалывателя;
3 – образец породы;
4 – верхний клин раскалывателя;
 F_p – раскалывающая сила

Рис. 3.6 – Внешний вид раскалывателя с образцом горной породы в форме пластины (диска) для определения предела прочности при растяжении

3.2.3 Подготовка образцов горных пород для испытаний

Образцы горных пород изготавливают из монолитных *штуфов* или *кернов* (ГОСТ Р 50544–93 [39]) на камнерезном станке (см. рис. 1.3), отрезая в заданном относительно строения (слоистости) породы направлении от кернов – диски (рис. 3.7) или от штуфов – пластины (рис. 3.8) толщиной $h = 20$ мм, размером не менее 100×100 мм.

Обучающиеся каждого звена получают для испытаний раскалыванием по 3–6 образцов одинаковой породы в виде пластин или дисков.



d – диаметр образца в форме диска;

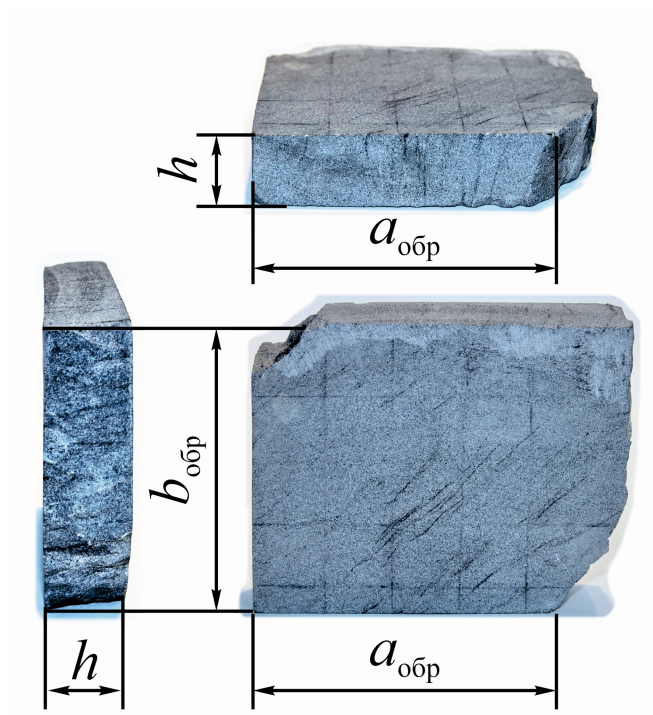
h – толщина (высота) образца – диска

Рис. 3.7 – Внешний вид образца горной породы в форме диска для определения предела прочности при растяжении

а) Для определения предела прочности породы при *растяжении* образцы испытывают путём их *раскалывания*, при этом их размеры должны соответствовать значениям, указанным в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Размеры образцов для определения пределов прочности породы при одноосном растяжении и сжатии

Параметр образца	Размеры, мм	
	предпочтительные	допускаемые
Поперечные размеры пластины произвольного очертания в плане (диаметр диска d), не менее	60×60	40×40
Толщина h	20 ± 1	от 20 до 30 включительно



$a_{\text{обр}}$ – длина образца – пластины;

$b_{\text{обр}}$ – ширина образца – пластины;

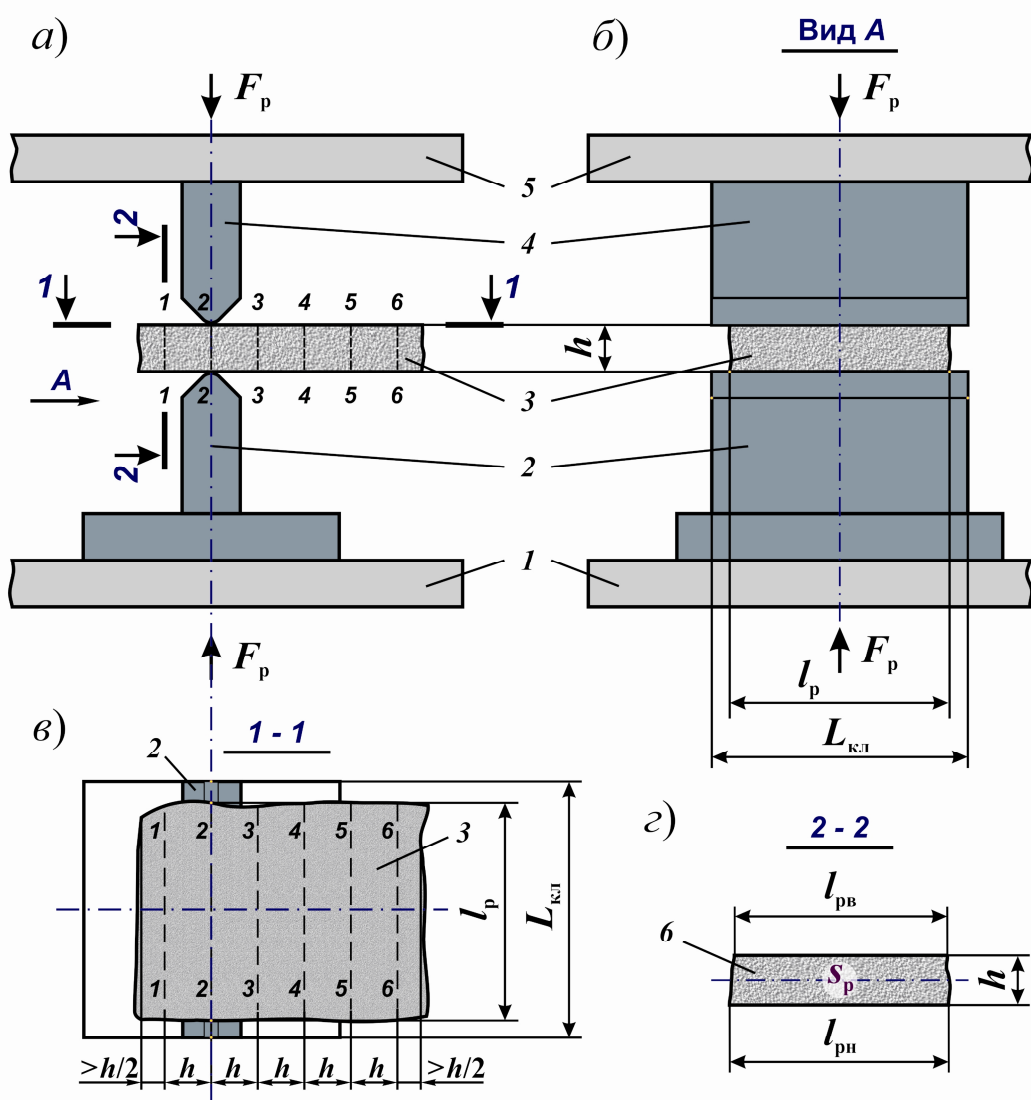
h – толщина (высота) образца – пластины

Рис. 3.8 – Внешний вид образца горной породы в форме пластины для определения предела прочности при растяжении

Торцовые поверхности образца должны быть плоскими и параллельными друг другу. Отклонение неровностей на плоскостях – не более 0,1 мм и от параллельности плоскостей – не более 0,5 мм по диаметру или минимальному размеру образца.

Ширина раскалываемого участка пластины (линии раскола) l_p не должна быть больше длины лезвия клиньев $L_{\text{кл}}$ (рис. 3.9 б, в).

б) Для определения предела прочности породы при *сжатии* используют *кубообразные* образцы (рис. 3.12), полученные в процессе раскалывания породных брусков (или дисков), с высотой ребра, равной толщине пластины (диска) h , и линейными размерами параллельных плоскостей $a \times b$ – не менее чем 20×20 мм, с допускаемыми отклонениями не более ± 2 мм.



1 – нижняя плита пресса; 2 – нижний клин раскалывателя;
 3 – образец породы; 4 – верхний клин раскалывателя;
 5 – верхняя плита пресса; 6 – вид поверхности раскола образца;
 1-1, 2-2, 3-3, ..., 6-6 – номера линий раскалывания;
 F_p – раскалывающая сила; h – толщина (высота) образца породы;
 $l_{рв}$ – длина линии раскола на верхней плоскости образца;
 $l_{рн}$ – длина линии раскола на нижней плоскости образца;
 l_p – ширина образца, равная предполагаемой линии раскола;
 $L_{кл}$ – длина лезвий раскалывателя;
 S_p – площадь поверхности раскола

Рис. 3.9 – Схема раскалывания образцов породы в виде пластин (дисков) для определения предела прочности при растяжении

3.2.4 Проведение испытаний

3.2.4.1 Общие положения

1) Внимательно осмотреть каждый образец породы, по внешнему виду определить *наименование* породы, к какой группе по *происхождению* можно отнести образцы породы (*магматические, метаморфические, осадочные*).

2) Определить и описать в рабочем журнале, а затем и в отчёте о лабораторной работе особенности строения породы (см. раздел 1):

- минеральный состав образца – *мономинеральная* или *полиминеральная* порода;

- форма, цвет, структура, текстура.

3) Сделать зарисовки (или фотографии) общего вида каждого образца до его разрушения. В отчёте на схеме (фотографии) образца показать основные его размеры: длина, ширина (или средний диаметр) толщина (высота) h .

4) Измерить штангенциркулем с точностью до 0,5 мм и определить среднее значение толщины (высоты) h породной пластины (диска, бруска).

3.2.4.2 Испытание раскалыванием

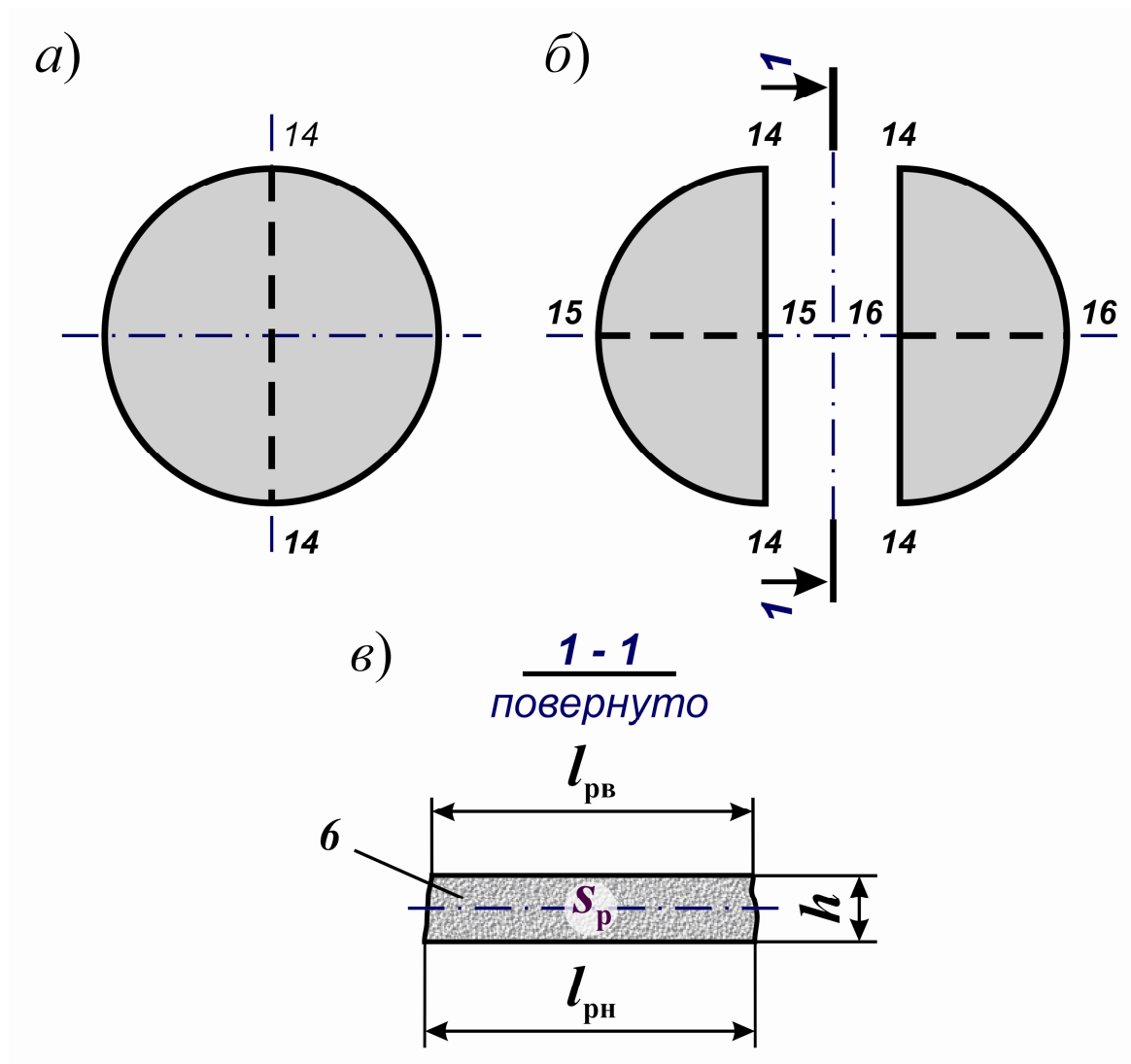
а) Раскалывание породных пластин и дисков

5) На одной из параллельных плоскостей образца (пластины) карандашом с линейкой нанести сетку параллельных *линий раскола* на расстоянии друг от друга, равном толщине пластины (диска) h (см. рис. 3.9, в), а торец диска диаметром 40–60 мм разделить на четыре равные части двумя взаимно перпендикулярными диаметрами (рис. 3.10, а, б).

При этом необходимо следить, чтобы предполагаемая *линия раскола* была длиной не менее 20 мм и отстояла от края пластины не менее чем на 0,5 её толщины (см. рис. 3.9, в).

6) Перед каждым раскалыванием *пронумеровать* *линию* предстоящего *раскола* образца (одно раскалывание – одно испытание),

например: 1–1, 2–2, 3–3, ... , n – n (см. рис. 3.9, а, в). Если образцов одинаковой породы несколько, то номера линий расколов следующих образцов должны войти в единую общую нумерацию.



δ – вид поверхности раскола образца;

14–14, 15–15, 16–16 – номера линий раскалывания;

h – толщина (высота) образца породы (диска);

$l_{рв}$ – длина линии раскола на верхней плоскости образца;

$l_{рн}$ – длина линии раскола на нижней плоскости образца;

S_p – площадь поверхности раскола

Рис. 3.10 – Схемы разметки и раскалывания породных дисков для определения предела прочности при растяжении

7) Поместить раскалыватель с клиньями на центр нижней плиты пресса (см. рис. 3.5, поз. 2), подняв с помощью маховика (поз. 4) на необходимую высоту верхнюю плиту пресса (поз. 3).

8) Образец в виде пластины или диска поместить между клиньями (рис. 3.6, 3.9), совмещая вертикальную плоскость лезвий клиньев с линией предстоящего раскола, нанесённой на образец и соответствующей номеру очередного i -го испытания (раскалывания).

При этом необходимо обеспечить горизонтальное положение параллельных плоскостей каждого образца перед его раскалыванием.

С помощью маховика (см. рис. 3.5, поз. 4) выбрать зазор между раскалывателем и верхней плитой пресса (поз. 3).

9) Приводя пресс в действие, нагружать образец равномерно со скоростью 1–5 МПа/с до раскалывания образца по заранее намеченным линиям раскола.

После каждого раскалывания породной пластины образуются породные *бруски*, которые необходимо использовать в дальнейших испытаниях.

10) Породные *диски* диаметром 40–60 мм в соответствии с п. 5 (см. рис. 3.10, а, б) необходимо раскалывать аналогичным образом на четыре части с получением примерно одинаковых по размерам *секторов диска*, которые будут испытаны при дальнейшем определении предела прочности при сжатии.

11) После каждого i -го раскалывания образца записать разрушающую силу F_p (кН), зафиксированную силоизмерителем пресса.

12) Так как при раскалывании форма краёв плоскости раскола получается не ровной, то *длину плоскости раскола* образца l_p следует определять как величину, равную полусумме длин верхней l_{pv} и нижней l_{pn} линий раскола (см. рис. 3.9, г; 3.10, в) на плоских поверхностях торцов образца после его раскалывания, которые измерить штангенциркулем с погрешностью не более $\pm 0,5$ мм.

Следовательно, среднюю длину плоскости каждого i -го раскола образца l_{pi} можно определить по формуле

$$l_{pi} = \frac{l_{pvi} + l_{pni}}{2}, \quad (3.12)$$

где l_{pi} – средняя длина плоскости раскола образца, мм;

l_{pvi} – длина верхней линии i -го раскола, мм;

l_{pni} – длина нижней линии i -го раскола, мм;

i – номер раскола, соответствующий линии раскалывания образца:

1–1, 2–2, 3–3, 4–4, 5–5, 6–6, ..., n – n ;

n – общее количество расколов, выполненных при испытании образца горной породы.

13) После раскалывания каждого образца с помощью инвентаря для уборки рабочего места удалить куски разрушенного образца и очистить поверхности раскалывателя и нижней плиты пресса.

14) Записать в таблицу 3.2 в строки, соответствующие номеру каждого i -го из n испытаний, с соблюдением необходимых единиц измерения значения определённых в ходе выполнения лабораторной работы параметров:

- *толщины* (высоты) h образца (см);

- *длины плоскости раскола* образца l_p (см), определённой по формуле (3.12);

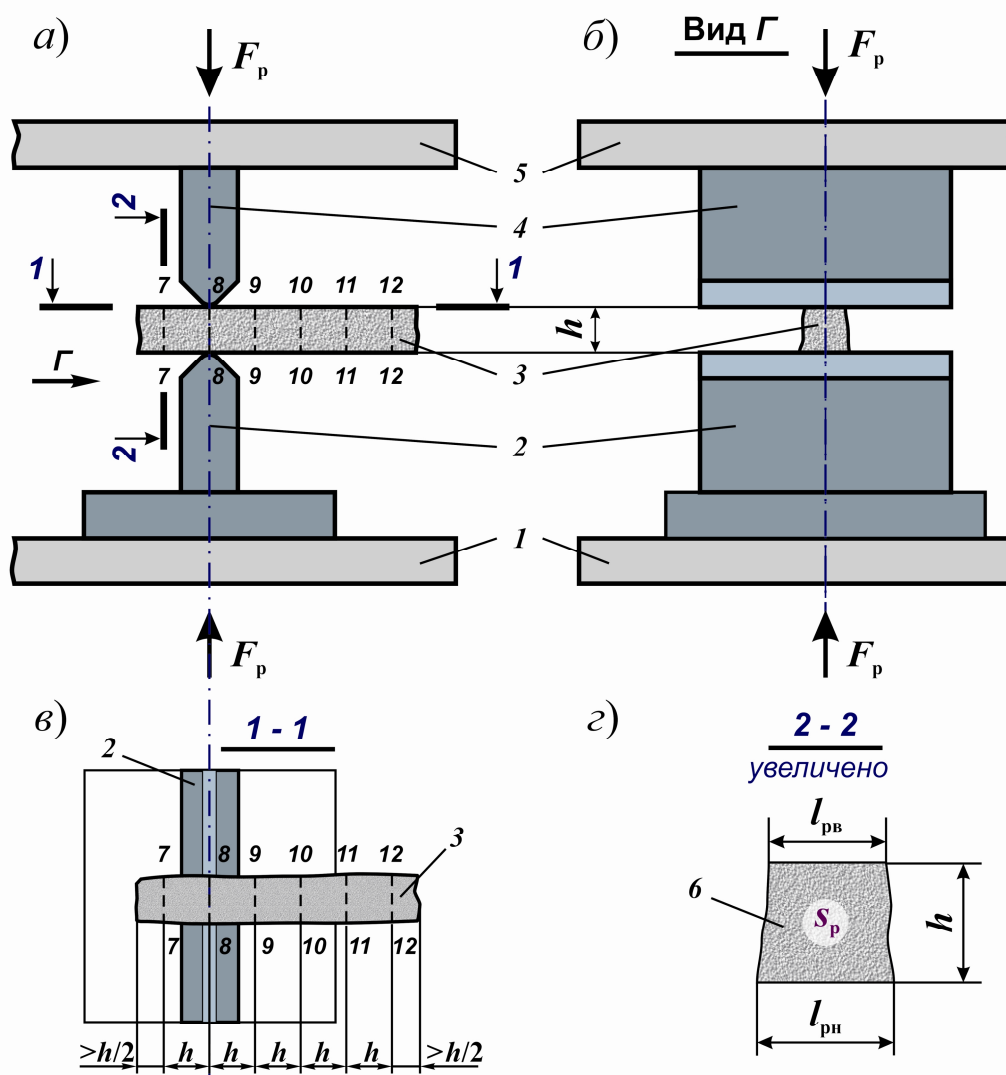
- *раскалывающей силы* F_p (кН).

15) Для каждого из $n = 10$ –15 испытаний образцов породы выполнить действия, указанные выше в пунктах 4–14.

б) Раскалывание породных брусков

16) На одной из параллельных плоскостей образца – породного бруска, полученного при выполнении предыдущего этапа работы, карандашом с линейкой нанести сетку параллельных *линий раскола* на расстоянии друг от друга, равном толщине пластины (диска) h (рис. 3.11, в). При этом необходимо следить, чтобы предполагаемая

линия раскола была длиной не менее 20 мм и отстояла от края бруска не менее чем на 0,5 её толщины ($h/2$).



1 – нижняя плита пресса; 2 – нижний клин раскалывателя;
 3 – образец породы; 4 – верхний клин раскалывателя;
 5 – верхняя плита пресса; 6 – вид поверхности раскола образца;
 7–7, 8–8, 9–9, ..., 12–12 – номера линий раскалывания;
 F_p – раскалывающая сила; h – толщина (высота) образца породы;
 $l_{рв}$ – длина линии раскола на верхней плоскости образца;
 $l_{рн}$ – длина линии раскола на нижней плоскости образца;
 S_p – площадь поверхности раскола

Рис. 3.11 – Схема раскалывания образцов породы в виде брусков для определения предела прочности при растяжении

17) Перед каждым раскалыванием *пронумеровать линию* предстоящего *раскола* образца (одно раскалывание – одно испытание), например: 7–7, 8–8, 9–9, ... , *n–n* (см. рис. 3.11, *а, в*). При этом номера линий расколов последующих образцов-брусков должны стать продолжением единой общей нумерации, начатой при раскалывании породных *пластин* или *дисков* в предыдущем этапе лабораторной работы.

18) Образец в виде породного *бруска* поместить между клиньями (рис. 3.11), совмещая вертикальную плоскость лезвий клиньев с линией предстоящего раскола, нанесенной на образец и соответствующей номеру очередного *i*-го испытания (раскалывания). При этом необходимо обеспечить горизонтальное положение параллельных плоскостей каждого образца перед его раскалыванием.

С помощью маховика (см. рис. 3.5, *поз. 4*) осторожно выбрать зазор между раскалывателем и верхней плитой пресса (*поз. 3*), не допуская разрушения образца вручную.

19) Приводя пресс в действие, нагружать образец равномерно со скоростью 1–5 МПа/с до раскалывания образца по заранее намеченным линиям раскола.

После каждого раскалывания породной пластины образуются породные *кубики* полуправильной формы (две грани параллельные, шлифованные, а четыре грани неровные – образованные при раскалывании). Эти кубики с размерами граней не менее 20 мм необходимо использовать в дальнейших испытаниях при определении предела прочности при сжатии.

20) Выполнить работы по пунктам 11–14.

21) Для каждого из образцов породы в форме *бруска* выполнить действия, указанные выше в пунктах 16–20.

3.2.4.3 Испытание сжатием

22) Испытание *сжатием* проводить после окончания испытания раскалыванием с получением образцов кубообразной формы – кубиков (рис. 3.12) или в форме *секторов диска* (см. рис. 3.12, в) в количестве $n = 15–25$ штук.

23) Перед каждым испытанием сжатием пронумеровать образцы порядковыми номерами i от 1 до n по принципу: один образец – одно испытание (сжатие до разрушения).

24) У каждого образца кубообразной формы (см. рис. 3.12) измерить штангенциркулем (в миллиметрах) в нескольких местах линейные размеры высоты h (толщины бывшей пластины, бруска или диска) и параллельных плоских торцов образца, после чего определить путём вычисления такие значения, как:

a – длина *поверхности сжатия* (поперечного сечения i -го образца), равная полусумме длин верхнего и нижнего плоских торцов образца до его разрушения (см. рис. 3.12); может быть определена по формуле

$$a_i = \frac{1}{4}(a_{Н\min i} + a_{Н\max i} + a_{В\min i} + a_{В\max i}), \quad (3.13)$$

где $a_{Н\min i}$ – минимальная длина нижней плоскости образца, мм;

$a_{Н\max i}$ – максимальная длина нижней плоскости образца, мм;

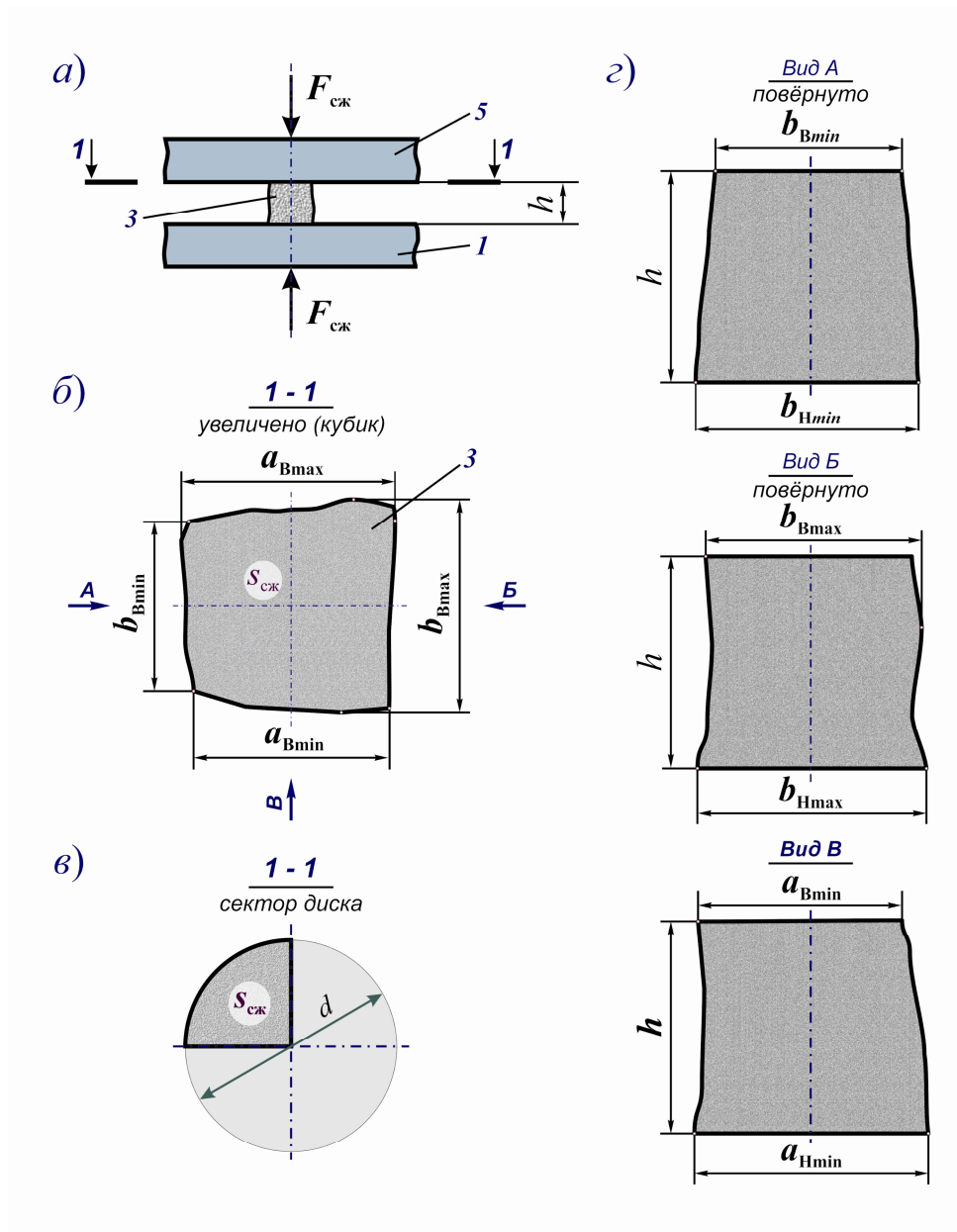
$a_{В\min i}$ – минимальная длина верхней плоскости образца, мм;

$a_{В\max i}$ – максимальная длина верхней плоскости образца, мм;

i – номер образца: 1, 2, 3, ..., n ;

n – общее количество испытанных образцов горных пород сжатием;

b – ширина *поверхности сжатия* (плоскости поперечного сечения образца), равная полусумме ширины верхнего и нижнего плоских торцов образца до его разрушения (рис. 3.12); может быть определена по формуле



1 – нижняя плита пресса; 3 – образец породы;
 5 – верхняя плита пресса;
 a – длина нижней и верхней плоскости образца, соответственно;
 b – ширина нижней и верхней плоскости образца, соответственно;
 d – диаметр неразрушенного породного диска;
 $F_{сж}$ – сжимающая сила; h – толщина (высота) образца породы;
 $S_{сж}$ – площадь поверхности сжатия

Рис. 3.12 – Схема испытания горных пород при определении предела прочности при сжатии

$$b_i = \frac{1}{4}(b_{H \min i} + b_{H \max i} + b_{B \min i} + b_{B \max i}), \quad (3.14)$$

где $b_{H \min i}$ – минимальная ширина нижней плоскости образца, мм;

$b_{H \max i}$ – максимальная ширина нижней плоскости образца, мм;

$b_{B \min i}$ – минимальная ширина верхней плоскости образца, мм;

$b_{B \max i}$ – максимальная ширина верхней плоскости образца, мм;

i – номер образца: 1, 2, 3, ..., n .

25) Для определения предела прочности при одноосном сжатии учитывают только результаты испытаний образцов с размерами ровных параллельных поверхностей $a \times b$ не менее чем 20×20 мм.

26) Каждый образец в форме кубика (или сектора диска) положить одной из параллельных поверхностей на центр нижней плиты пресса (см. рис. 3.5, поз. 2), с помощью маховика (поз. 4) выбрать зазор между образцом и верхней плитой пресса (поз. 3), в соответствии со схемой нагружения (см. рис. 3.12, а).

27) Включить электродвигатель пресса, нагружать образец породы равномерно со скоростью 1–5 МПа/с до полного разрушения образца, после чего сразу выключить двигатель пресса.

28) После разрушения образца записать разрушающую силу $F_{сж}$ (кН), зафиксированную силоизмерителем пресса.

29) После разрушения каждого образца с помощью инвентаря для уборки рабочего места удалить куски разрушенного образца и очистить поверхности верхней и нижней плит пресса.

30) Для каждого из n образцов породы, предназначенных для испытаний сжатием на прессе, выполнить действия, указанные выше в пунктах 24–29.

31) Значения определённых в результате измерений и вычислений средних размеров образца (см): высоты (толщины) h , длины a и ширины b ; разрушающей силы $F_{сж}$ (кН) записать в таблицу 3.3 в строки, соответствующие номеру каждого i -го из n испытаний.

Таблица 3.2 – Результаты испытания образцов при одноосном *растяжении*

Номер испы- тания	Средние размеры образца, см		Площадь поверхности раскола S_{pi} , см ²	Разру- шающая сила F_{pi} , кН	Предел прочно- сти при растяже- нии σ_{pi} , МПа	Параметры статистики		Приме- чания
	длина плоско- сти раскола l_p	толщина пластины (диска) h				$(\sigma_{pi} - \bar{\sigma}_p)$	$(\sigma_{pi} - \bar{\sigma}_p)^2$	
1								
2								
3								
...								
n								
	Среднее арифметическое значение $\bar{\sigma}_p$					-	Σ	

Таблица 3.3 – Результаты испытания образцов при одноосном *сжатии*

Номер испы- тания	Средние размеры поверхности сжатия образца, см				Площадь по- верхности сжа- тия $S_{сжи}$, см ²	Разру- шающая сила $F_{сжи}$, кН	Предел проч- ности при сжа- тии $\sigma_{сжи}$, МПа	Параметры статистики		Приме- чания
	радиус диска r	длина куба a	ширина куба b	высота h				$(\sigma_{сжи} - \bar{\sigma}_{сж})$	$(\sigma_{сжи} - \bar{\sigma}_{сж})^2$	
1										
2										
3										
...										
n										
		Среднее арифметическое значение $\bar{\sigma}_{сж}$						-	Σ	

3.2.5 Аналитическая обработка результатов испытаний

3.2.5.1 Определение предела прочности породы при одноосном *растяжении*

Предел прочности породы при одноосном *растяжении* σ_p для каждого испытанного образца вычислить по формуле [27, разд. 4]

$$\sigma_p = \frac{F_p}{S_p} \cdot 10, \quad (3.15)$$

где σ_p – предел прочности при одноосном *растяжении*, МПа;

F_p – разрушающая растягивающая (раскалывающая) сила, кН;

S_p – площадь поверхности раскола образца, см².

10 – переводной коэффициент.

$$S_p = l_p h, \quad (3.16)$$

где S_p – площадь поверхности раскола образца, см².

l_p – длина поверхности раскола образца, равная средней длине линии раскола образца, см; может быть определена по формуле (3.12);

h – высота поверхности раскола образца, равная средней толщине пластины (диска), см.

Результаты вычисления предела прочности породы при одноосном *растяжении* σ_{pi} для каждого испытанного i -го образца записать в соответствующую i -ю строку таблицы 3.2.

При статистической обработке результатов определения предела прочности породы при одноосном *растяжении* в качестве числа проведённых единичных опытов n принимают общее число выполненных расколов.

3.2.5.2 Определение предела прочности породы при одноосном сжатии

Предел прочности породы при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$ для каждого испытанного образца вычислить по формуле [27, разд. 4]

$$\sigma_{сж} = \frac{F_{сж}}{S_{сж}} \cdot 10, \quad (3.17)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности при одноосном сжатии, МПа;

$F_{сж}$ – разрушающая сжимающая сила, кН;

$S_{сж}$ – средняя площадь поперечного сечения образца, равная полусумме площадей верхнего и нижнего плоских торцов образца до его разрушения, см²;

10 – переводной коэффициент.

Средняя площадь поперечного сечения образца $S_{сж}$ для кубообразных образцов может быть определена по формуле

$$S_{сж} = a \cdot b, \quad (3.18)$$

где a – длина плоскости поперечного сечения образца, равная полусумме длин верхнего и нижнего плоских торцов образца до его разрушения, см; может быть определена по формуле (3.13);

b – ширина плоскости поперечного сечения образца, равная полусумме ширины верхнего и нижнего плоских торцов образца до его разрушения, см; может быть определена по формуле (3.14).

Средняя площадь поперечного сечения образца $S_{сж}$ для образцов с формой *сектора диска* (см. рис. 3.12, в) может быть приблизительно определена по формуле

$$S_{\text{сж}} = \frac{1}{4} \left(\frac{\pi d^2}{4} \right), \quad (3.19)$$

где d – средний диаметр плоских торцов образца в форме диска до его разрушения, см;

π – число "пи", для простых расчётов можно принимать $\pi = 3,14$.

Результаты вычисления предела прочности породы при одноосном сжатии $\sigma_{\text{сж}i}$ для каждого испытанного i -го образца записать в соответствующую i -ю строку таблицы 3.3.

При статистической обработке результатов определения предела прочности породы при сжатии в качестве числа проведенных опытов n принимают общее число раздавленных породных кубиков (секторов диска).

3.2.5.3 Статистическая обработка результатов испытаний

1) В соответствии с **разделом Г.2** произвести расчёты нижеприведённых показателей статистики для значений пределов прочности при растяжении σ_p и отдельно – при сжатии $S_{\text{сж}}$:

- среднее арифметическое;
- средняя квадратическая погрешность;
- стандартный доверительный интервал;
- величина абсолютной погрешности;
- коэффициент вариации.

Записать значения доверительного интервала в виде выражения (Г.7) с указанием надёжности.

2) Оценить надёжность α и погрешность ε полученных результатов в соответствии с **таблицами Г.1** и **Г.2**.

Количество образцов n (растяжения или сжатия) должно обеспечивать надёжность результатов $\alpha > 80 \%$ при относительной погрешности $\varepsilon \leq 30 \%$.

3.2.5.4 Построение и анализ паспорта прочности породы

а) По полученным в результате проведённых экспериментов и расчётов средних значений пределов прочности породы при растяжении $\bar{\sigma}_p$ и сжатии $\bar{\sigma}_{сж}$ построить *паспорт прочности* горной породы в масштабе, соответствующем шкалам измерения на осях графика в виде прямой линии, касательной к *кругам предельных напряжений* растягивающих и сжимающих (см. п. 3.1.4).

б) *Графическим методом*, используя построенный *паспорт прочности* горной породы, определить значения:

- сцепления C ,

- угла внутреннего трения φ ,

а также рассчитать значение *коэффициента внутреннего трения* $tg \varphi$.

Отразить полученные результаты в отчёте и отметить их значения на построенном графике *паспорта прочности* породы.

в) *Аналитическим методом* рассчитать значения показателей паспорта прочности испытанной горной породы:

1) сцепление породы C по формуле (3.7);

2) коэффициент внутреннего трения $tg \varphi$ по формуле (3.8);

3) угол внутреннего трения породы φ из выражения (3.9).

г) Сравнить значения показателей паспорта прочности испытанной горной породы, определённых графическим и аналитическим методами, объяснить почему возникли те или иные различия значений в разных методах определения, если они были обнаружены.

3.2.6 Составление отчёта о лабораторной работе

1) Внимательно осмотреть образцы испытываемой породы, по внешнему виду определить и описать в рабочем журнале, а затем и в отчёте о лабораторной работе особенности его строения (см. раздел 1):

- цвет, структура, текстура;
- *минеральный состав* образца – *мономинеральная* или *полиминеральная* порода в образце;
- к какой группе по *происхождению* можно отнести горные породы (*магматические, метаморфические, осадочные*);
- наличие слоистости и минеральной неоднородности испытанной породы.

2) Результаты испытания образцов породы и определения их прочностных параметров каждый обучающийся помещает в персональный отчёт о лабораторной работе в виде текстового описания, численных значений всех измеренных показателей и выполненных на их основе расчётов, таблиц, графиков, с иллюстрированием самостоятельно выполненными схемами и фотографиями.

3) Все расчёты механических свойств пород, испытанных в настоящей лабораторной работе, и показателей статистики для значений пределов прочности при растяжении σ_p и при сжатии $S_{сж}$, а также значения, найденные в справочных таблицах, должны быть подробно приведены в отчёте о лабораторной работе.

4) В конце отчёта поместить краткие выводы о полученных при выполнении работы результатах, новых знаниях и навыках.

5) Порядок и формат составления отчёта о лабораторной работе изложен в п. Б.1.

3.2.7 Контрольные вопросы

- 1) Что понимают под прочностью горной породы?
- 2) На каком оборудовании можно определить прочность пород?
- 3) Как определить предел прочности пород при растяжении?
- 4) Как определить предел прочности пород при одноосном сжатии?

- 5) Какие параметры горных пород определяют методом раскалывания клиньями на прессе?
- 6) Как определить площадь раскола образца в форме пластины?
- 7) Как определить площадь раскола образца в форме диска?
- 8) Как определить площадь раскола образца в форме бруска?
- 9) Общий вид формулы для расчёта предела прочности породы при растяжении.
- 10) Общий вид формулы для расчёта предела прочности породы при одноосном сжатии.
- 11) Как определить площадь сжатия образца в форме кубика?
- 12) Как определить площадь сжатия образца в форме сектора диска?
- 13) Чем отличаются нормальные и касательные напряжения в горных породах?
- 14) Теория прочности пород Мора. Основная идея.
- 15) Что представляет собой паспорт прочности породы по Мору?
- 16) Как строят паспорт прочности породы по Мору?
- 17) Как определить угол внутреннего трения породы?
- 18) Что называют сцеплением породы и как его определить?
- 19) Что называют коэффициентом внутреннего трения породы, и как его определить?
- 20) Как и для чего можно построить круги предельных напряжений в паспорте прочности породы по Мору?
- 21) Какие требования предъявляют к форме и размерам образцов, испытываемых методом многократного раскалывания и сжатия для определения их прочностных характеристик?
- 22) Объяснить, почему прочность породы в образце отличается от прочности породы в массиве.
- 23) Что характеризует коэффициент вариации значений прочностных свойств горных пород, полученных при испытаниях?
- 24) От чего зависит надёжность результатов испытания прочностных свойств горных пород?

Лабораторная работа № 7

3.3 ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИЗГИБЕ

Цель работы: определение предела прочности горных пород при изгибе и оценка влияния структурно-текстурных элементов их строения на прочность при изгибе.

3.3.1 Теоретические основы работы

Породы кровли горизонтальных и наклонных подготовительных (пластовых и полевых штреков, квершлагов и др.) и очистных выработок, а также камер различного назначения в большей мере испытывают напряжения изгиба, т. е. работают на изгиб. Для решения вопросов устойчивости кровель этих выработок, а также ряда других горнотехнических и технологических задач необходимо знать предел прочности горных пород при изгибе.

Прочность является одним из основных физических свойств горных пород, она характеризует их способность сопротивляться внешним усилиям вплоть до полного разрушения.

Прочность горной породы (как твёрдого тела) определяют величиной *критических механических напряжений*, т. е. напряжений, при которых происходит разрушение породы. Эти напряжения называют *пределами прочности породы* (см. п. 3.1.1).

Значения *предела прочности горной породы при изгибе* $\sigma_{\text{изг}}$ находятся в интервале между значениями пределов их прочности при сжатии $\sigma_{\text{сж}}$ и растяжении $\sigma_{\text{р}}$

$$\sigma_{\text{сж}} > \sigma_{\text{изг}} > \sigma_{\text{р}} . \quad (3.20)$$

Соотношения между $\sigma_{сж}$ и $\sigma_{изг}$, $\sigma_{изг}$ и σ_p пород в зависимости от их вещественного состава и строения, особенно трещиноватости и слоистости, изменяются в довольно большом диапазоне.

Предел прочности горной породы при изгибе $\sigma_{изг}$ (кгс/см²) можно определить по методике, изложенной в ГОСТ 21153.6–75 [29], и вычислить по эмпирической формуле

$$\sigma_{изг} = 0,75 \frac{P_{max}}{h}, \quad (3.21)$$

где $\sigma_{изг}$ – предел прочности горной породы при изгибе, кгс/см²;

P_{max} – максимальная разрушающая сила, кгс;

h – высота (толщина) образца, см.

Для практических приблизительных расчётов с погрешностью не более 10 % с учётом того, что $h = 1$ см, предел прочности породы при изгибе $\sigma_{изг}$ можно вычислить по упрощённой эмпирической формуле [29]

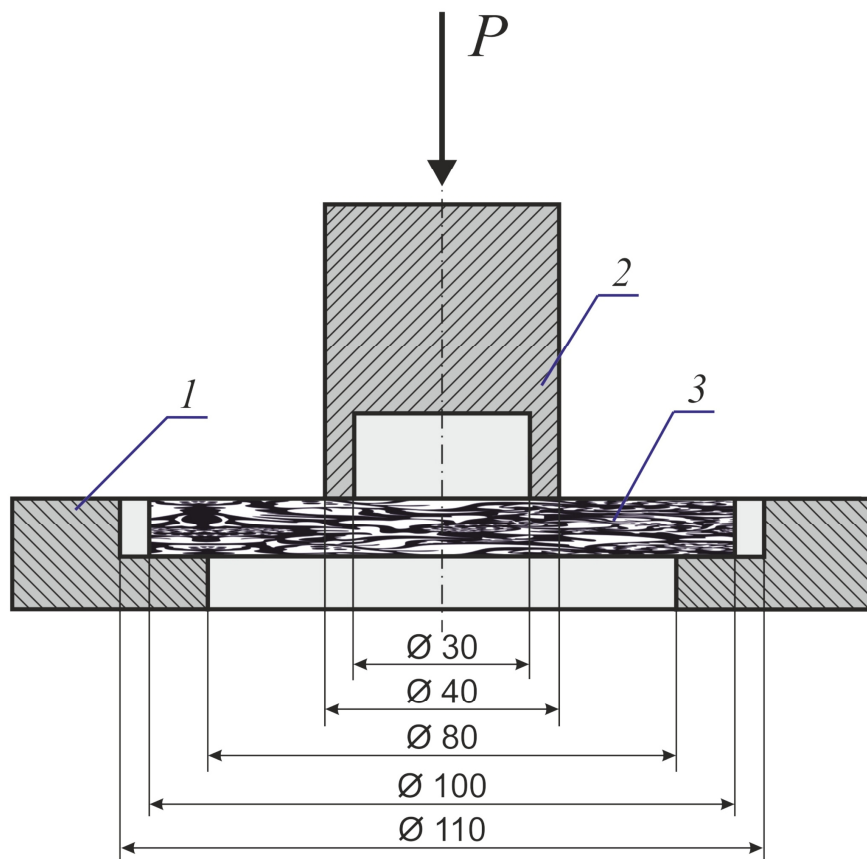
$$\sigma_{изг} = 0,75 P_{max}, \quad (3.22)$$

где $\sigma_{изг}$ – предел прочности породы при изгибе, кгс/см²;

P_{max} – максимальная разрушающая сила, кгс.

3.3.2 Оборудование, приборы, инструменты

- 1) Пресс гидравлический П-10 (см. рис. 3.5).
- 2) Устройство испытательное (рис. 3.13), состоящее из стального опорного кольца *1* (рис. 3.14) и кольцевого штампа *2* (рис. 3.15).
- 3) Линейка с делениями, транспортир.
- 4) Штангенциркуль.
- 5) Инвентарь для уборки рабочего места.
- 6) Рабочий журнал для записи результатов экспериментов.
- 7) Письменные принадлежности.



- 1* – стальное опорное кольцо;
2 – кольцевой штамп (пуансон);
3 – образец породы

Рис. 3.13 – Испытательное устройство



Рис. 3.14 – Стальное опорное кольцо испытательного устройства



Рис. 3.15 – Кольцевой штамп (пуансон) испытательного устройства

3.3.3 Подготовка образцов горных пород к испытанию

Заготовки для образцов получают выбуриванием из горного массива породного *керна* (ГОСТ Р 50544–93 [39]) диаметром $d = 90\text{--}100$ мм (согласно ГОСТ 21153.6–75. Породы горные. Метод определения предела прочности при изгибе [29]).

Из полученных заготовок на камнерезном станке (см. рис. 1.3) нарезают образцы в виде дисков толщиной $h = 10 \pm 1$ мм. При этом плоские поверхности образцов должны быть параллельны. Отклонения от параллельности, контролируемые индикатором в двух взаимно перпендикулярных направлениях, не должны превышать 0,1 мм по диаметру образца.

3.3.4 Порядок проведения испытаний

1) Измерить геометрические параметры элементов стального испытательного устройства: опорного кольца *1* и кольцевого штампа (пуансона) *2* в соответствии со схемой на рис. 3.13.

2) Пронумеровать образцы перед каждым испытанием разрушением (одно разрушение – одно испытание).

3) По внешнему виду определить и описать в рабочем журнале, а затем и в отчёте о лабораторной работе особенности испытываемой породы (см. раздел 1):

- цвет, структура, текстура;
- *минеральный состав* образца – *мономинеральная* или *полиминеральная* порода в образце;
- к какой группе по *происхождению* можно отнести горные породы (*магматические, метаморфические, осадочные*);
- отметить наличие слоистости и минеральной неоднородности испытанной породы.

4) Зарисовать или сфотографировать вид каждого образца до его разрушения.

5) Замерить диаметр d и высоту (толщину) диска h каждого образца горной породы и записать их значения в таблицу 3.4.

6) Образец горной породы *3* (см. рис. 3.13) положить на опорное кольцо *1*, а сверху на него установить пуансон *2*.

7) Отцентрировать испытательное устройство с образцом по вертикальной оси и поместить его между плитами пресса так, чтобы вертикальная ось устройства была совмещена с вертикальной осью пресса. Отклонение между осями при установке не должно быть более 1–2 мм.

8) Привести пресс в действие со скоростью нагружения образца в пределах 0,1–3,0 МПа в секунду в зависимости от прочности породы. Для слабых пород рекомендовано 0,1–0,5 МПа/с, для пород средней прочности – 1,0–2,0 МПа/с, для прочных – 2,4–2,8 МПа/с.

9) Увеличение скорости нагружения образца выше указанных приводит обычно к существенному искажению полученного значения предела прочности (к его увеличению).

Выбранную скорость нагружения на прессе сохранять до разрушения образца. Этот момент можно определить по резкому падению давления пресса, отображаемому на его стрелочном индикаторе 5 (см. рис. 3.5). После чего сразу же прекратить перемещение плиты пресса, выключив электродвигатель его гидропривода.

Вращением маховика регулятора высоты 4 поднять верхнюю плиту 3 пресса для свободного перемещения между плитами пресса и удаления испытательного устройства с разрушенным образцом.

Включение, регулировку подачи, давления и выключение пресса может выполнять только руководитель работы!

10) После разрушения образца определить значение максимальной разрушающей его силы $P_{\max}$, зафиксированную силоизмерителем пресса, и записать его в таблицу 3.4.

11) С помощью инвентаря для уборки рабочего места удалить с поверхностей плит пресса и испытательного устройства остатки породной мелочи.

12) Зарисовать или сфотографировать вид каждого образца после его разрушения, выяснить и описать характер и особенности геометрической формы его разрушения.

13) Для каждого из образцов породы выполнить испытания в соответствии с пунктами 3–12 указанного выше порядка их выполнения.

3.3.5 Аналитическая обработка результатов испытаний

1) Вычислить значения предела прочности при изгибе $\sigma_{изг}$, соответствующие номеру каждого i -го из n испытанных образцов, по формуле (3.21).

2) Результаты вычислений занести в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты определения предела прочности породы при изгибе

Номер испытания образца	Наименование породы	Диаметр образца d , см	Высота образца h , см	Разрушающая сила P_{max} , кгс (Н)	Предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$	
					кгс/см ²	Па
1						
2						
i						
n						

3.3.6 Составление отчёта о лабораторной работе

1) Описать наименование и строение испытанных пород.

2) Нарисовать схему испытательного устройства с измеренными фактическими геометрическими параметрами его элементов: стальных опорного кольца 1 и кольцевого штампа (пуансона) 2 в соответствии со схемой на рис. 3.13.

3) Результаты испытания образцов горных пород и определения их прочностных параметров следует поместить в отчёт о лабораторной работе в виде текстового описания, численных значений всех измеренных показателей и выполненных на их основе расчётов, таблиц, с иллюстрированием самостоятельно выполненными схемами и фотографиями.

4) В конце отчёта поместить краткие выводы о полученных при выполнении работы результатах, новых знаниях и навыках.

Порядок и формат составления отчёта о лабораторной работе изложен в п. Б.1.

3.3.7 Контрольные вопросы

- 1) Что понимают под пределом прочности горной породы?
- 2) Что понимают под прочностью горной породы при изгибе?
- 3) Объяснить, почему прочность горных пород при сжатии, растяжении и изгибе существенно различна.
- 4) Назвать единицы измерения прочности горной породы в системах СИ и СГСМ.
- 5) От каких факторов зависит в основном прочность горных пород?
- 6) Почему трещины и слои существенно снижают прочность горной породы?
- 7) Объяснить порядок выполнения лабораторной работы.
- 8) Какие оборудование, устройства и инструменты использованы для выполнения лабораторной работы?
- 9) Почему значения предела прочности при изгибе испытанных образцов одной и той же горной породы различны?
- 10) Объяснить влияние структурно-текстурных элементов строения на вид и характер разрушения испытанных образцов породы.
- 11) Для решения каких горнотехнических задач при разработке месторождений полезных ископаемых наиболее часто используют показатели прочности горных пород при изгибе?
- 12) Какие ещё бывают схемы испытания для определения предела прочности горной породы при изгибе, кроме применённой в настоящей лабораторной работе?

4 ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

4.1 Теоретические основы

4.1.1 Общие положения

Поглощение породами тепла всегда сопровождается увеличением энергии колеблющихся молекул, атомов и изменением температуры породы. При этом наблюдают [14, п. 6.1] прямо пропорциональную зависимость между количеством тепла dQ , переходящим во внутреннюю энергию горной породы, и приростом температуры dT :

$$dQ = C \cdot dT, \quad (4.1)$$

где dQ – количество тепла, переходящего во внутреннюю энергию породы при его нагревании, Дж;

C – коэффициент пропорциональности, называемый *теплоёмкостью породы*, Дж/К;

dT – прирост температуры при нагревании породы, К.

Следовательно, *теплоёмкостью горной породы* называют количество тепла dQ , необходимого для нагревания этой породы на один градус, то есть

$$C = \frac{dQ}{dT}, \quad (4.2)$$

Один из методов определения удельной теплоёмкости и коэффициента температуропроводности твёрдых горных пород представлен в ГОСТ 25493–82 [32].

Метод определения коэффициента теплопроводности твёрдых горных пород представлен в ГОСТ 25499–82 [33].

4.1.2 Удельная теплоёмкость горных пород

Количество тепла, необходимого для нагревания единицы массы горной породы на один градус, называют *удельной теплоёмкостью породы* c и определяют из выражения

$$c = C / m, \quad (4.3)$$

где c – удельная теплоёмкость породы, Дж/(кг·К);

C – теплоёмкость породы, Дж/К;

m – масса образца нагретой породы, кг;

$$c = \frac{dQ}{m \cdot dT}. \quad (4.4)$$

Удельная теплоёмкость горных пород изменяется от 0,17 до 4,65 кДж/(кг·К) и зависит, главным образом, от их минерального состава, температуры и влажности (табл. Д.8).

Средневзвешенное значение удельной теплоёмкости $c_{\text{ср}}$ плотной породы зависит только от её минерального состава и может быть рассчитано по формуле арифметического средневзвешенного [14, п. 6.2]

$$c_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n c_i m_i, \quad (4.5)$$

где $c_{\text{ср}}$ – средневзвешенное значение удельной теплоёмкости породы, Дж/(кг·К);

n – количество минералов, составляющих породу;

m_i – относительное массовое содержание i -го минерала с удельной теплоёмкостью c_i .

Рудные минералы, как правило, имеют низкую теплоёмкость, поэтому в рудосодержащих породах теплоёмкость ниже, чем в безрудных породах [14, п. 6.2].

Теплоёмкость не зависит от того, в каком состоянии находится порода – в аморфном или в кристаллическом. Например, значения удельной теплоёмкости кристаллического и плавленого кварца одинаковы и составляют 0,85 кДж/(кг·К) [14, п. 6.2].

Теплоёмкость не зависит также и от всех прочих параметров строения породы – зернистости, слоистости и т. д.

4.1.3 Объёмная теплоёмкость горных пород

Кроме удельной теплоёмкости c минералов и горных пород, иногда используют понятие объёмной теплоёмкости.

Под *объёмной теплоёмкостью горных пород* понимают количество тепла, необходимого для нагревания единицы объёма породы на один градус. Объёмная c_ρ и удельная c теплоёмкости связаны соотношением

$$c_\rho = c \cdot \rho, \quad (4.6)$$

где c_ρ – объёмная теплоёмкость породы, Дж/(м³·К);

c – удельная теплоёмкость породы, Дж/(кг·К);

ρ – объёмная масса породы, кг/м³.

Объёмную теплоёмкость пористой породы определяют также как арифметическое средневзвешенное относительных масс минералов, воздуха (газов) и жидкостей, составляющих породу, с учётом их объёмной теплоёмкости $c_{\rho i}$, аналогично формуле (4.5).

Объёмная теплоёмкость:

- воздуха $c_\rho = 1,29$ кДж/(м³·К),

- минералов $c_\rho = 1,5\text{--}3,0$ МДж/(м³·К) [14, п. 6.2].

Лабораторная работа № 8**4.2 ТЕПЛОЁМКОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД**

Цель работы: определение удельной теплоёмкости горных пород калориметрическим способом.

4.2.1 Калориметрический способ определения удельной теплоёмкости горных пород

Удельную теплоёмкость горных пород определяют обычно калориметрическим способом и рассчитывают с помощью уравнения теплового баланса.

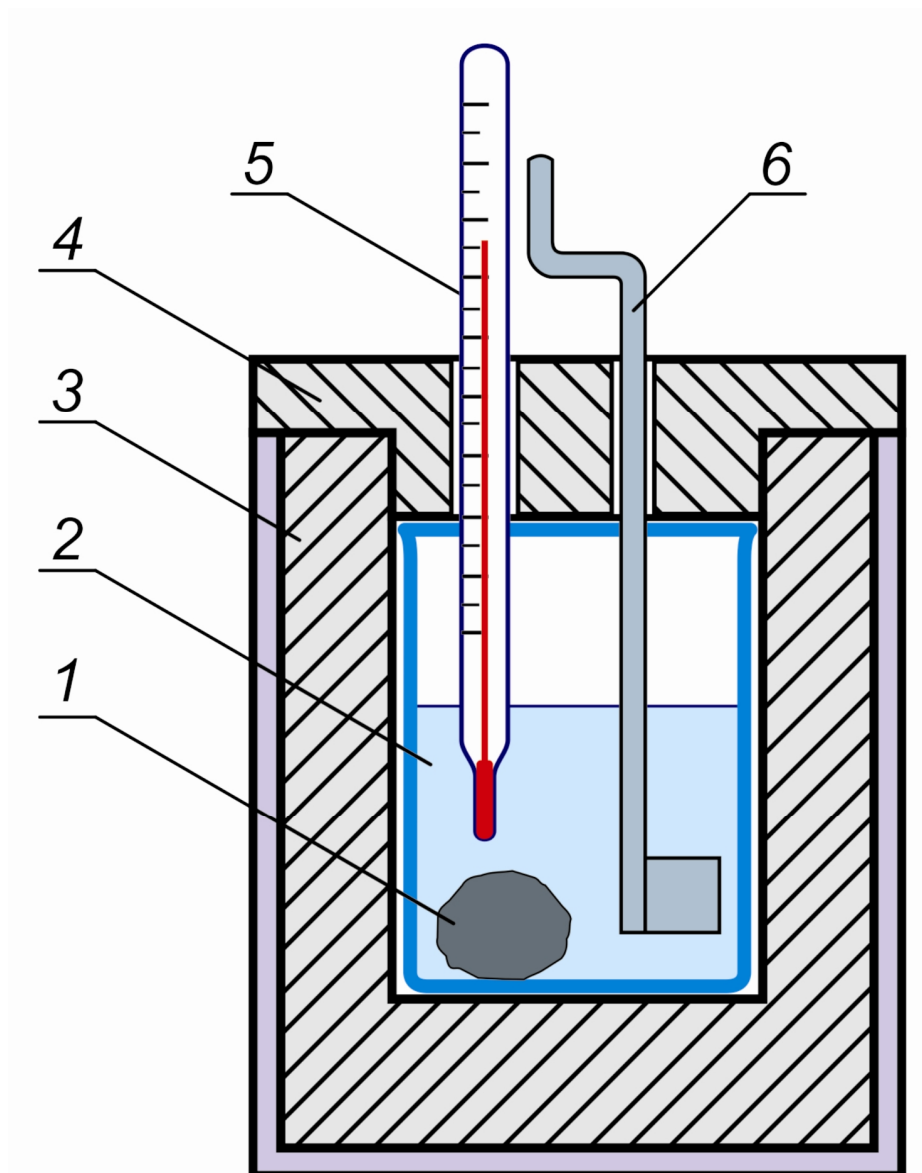
Способ заключается в следующем. Образец горной породы массой $m_{\text{п}}$ нагревают до температуры $t_{\text{п}}$ и помещают в калориметрический стеклянный сосуд (рис. 4.1, поз. 2) массой $m_{\text{с}}$, в котором находится вода массой $m_{\text{в}}$ с начальной температурой t_0 .

Образец породы будет отдавать тепло, а вода и стеклянный сосуд калориметра будут, соответственно, получать его.

Следует учесть, что в тех случаях, когда температура нагревания образцов пород более $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, часть тепла будет испаряться ("улетучиваться") из калориметра вместе с парами воды (обычно в момент погружения образца в воду при их теплообмене).

Количество тепла для нагревания термометра (см. рис. 4.1, поз. 5) и мешалки – 6, будем считать ничтожно малым и не учитывать его в расчётах.

В результате теплообмена, когда в калориметре установится температура t_2 (примерно через 5–10 минут), одинаковая для образца породы, воды и стеклянного сосуда.



- 1* – образец породы;
- 2* – калориметрический стеклянный сосуд с водой;
- 3* – теплоизолирующая коробка;
- 4* – теплоизолирующая крышка;
- 5* – термометр;
- 6* – мешалка

Рис. 4.1 – Схема калориметра

Уравнение теплового баланса примет вид

$$Q_{\text{п}} = Q_{\text{в}} + Q_{\text{с}} + Q_{\text{ив}}, \quad (4.7)$$

где $Q_{\text{п}}$ – количество тепла, накопленного образцом породы при его нагревании, Дж;

$Q_{\text{в}}$ – количество тепла, затраченного на нагревание воды в стеклянном сосуде калориметра, Дж;

$Q_{\text{с}}$ – количество тепла, затраченного на нагревание стеклянного сосуда в калориметре, Дж;

$Q_{\text{ив}}$ – количество тепла, затраченного на испарение воды, Дж

или

$$m_{\text{п}} \cdot c_{\text{п}} (t_{\text{п}} - t_2) = m_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} (t_2 - t_0) + \\ + m_{\text{с}} \cdot c_{\text{с}} (t_2 - t_0) + m_{\text{ив}} q_{\text{ив}}, \quad (4.8)$$

где $m_{\text{п}}$ – масса образца породы, кг;

$c_{\text{п}}$ – удельная теплоёмкость породы, Дж/(кг·К);

$t_{\text{п}}$ – температура, до которой нагрет образец породы, градус;

t_2 – температура, установившаяся в сосуде калориметра в результате теплопередачи (примерно через 5–6 минут), одинаковая для образца породы, воды и стеклянного сосуда, градус;

t_0 – начальная температура сосуда с водой в калориметре до помещения в него нагретого образца породы, градус;

$m_{\text{в}}$ – масса воды в сосуде калориметра до помещения в неё нагретого образца породы, кг;

$c_{\text{в}}$ – удельная теплоёмкость воды, Дж/(кг·К);

$m_{\text{с}}$ – масса сухого стеклянного сосуда в калориметре, кг;

$c_{\text{с}}$ – удельная теплоёмкость стекла, Дж/(кг·К);

$m_{\text{ив}}$ – масса испарившейся воды из сосуда калориметра при помещении в неё нагретого образца породы, кг;

$q_{\text{ив}}$ – удельная теплота парообразования воды ($q_{\text{ив}} = 2260$ кДж/кг).

Из уравнения теплового баланса, представленного в формуле (4.8), следует, что *удельная теплоёмкость* горной породы C_{Π} равна

$$C_{\Pi} = \frac{m_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}}(t_2 - t_0) + m_{\text{с}} \cdot c_{\text{с}}(t_2 - t_0) + m_{\text{ив}} q_{\text{ив}}}{m_{\Pi}(t_{\Pi} - t_2)}. \quad (4.9)$$

4.2.2 Приборы, инструменты

- 1) Инструмент для изготовления образцов породы.
- 2) Весы лабораторные.
- 3) Электрическая печь (для нагревания образцов породы).
- 4) Термометр для измерения температуры нагрева образцов пород (в интервале от 20 до 250 °С).
- 5) Щипцы для размещения в электропечи образцов, извлечения их из печи после нагревания и погружения в калориметрические сосуды.
- 6) Калориметры (см. рис. 4.1).
- 7) Термометры для измерения температуры воды в калориметрах с ценой деления 0,1 °С.
- 8) Линейка с делениями.
- 9) Штангенциркуль.
- 10) Инвентарь для уборки рабочего места.
- 11) Рабочий журнал для записи результатов экспериментов.
- 12) Письменные принадлежности.

На рисунке 4.1 показана схема калориметра для определения *удельной теплоёмкости горных пород*. Калориметр состоит из коробки 3, с теплоизолирующим материалом, калориметрического стеклянного сосуда 2, в который наливают воду, и крышки 4, в которой сделаны два отверстия: для мешалки 6 воды и для установки термометра 5 в калориметрический сосуд.

4.2.3 Подготовка образцов горной породы для испытаний

Отобранные пробы трёх разных видов горной породы раскалывают молотком на твёрдом основании до получения образцов для испытания в виде кусков неправильной формы с размером среднего диаметра 30–40 мм, из них отбирают образцы массой 40–60 г.

Обучающиеся каждой бригады определяют удельную *теплоёмкость горных пород* для образцов трёх разных видов породы.

4.2.4 Порядок выполнения работы

1) Пронумеровать исследуемые образцы трёх разных горных пород в произвольном порядке.

2) Определить и описать в рабочем журнале, а затем и в отчёте о лабораторной работе особенности строения породы (по лабораторной работе № 1):

- происхождение образцов породы (*магматические, метаморфические, осадочные*);

- минеральный состав образца – *мономинеральная* или *полиминеральная* порода;

- форма, цвет, структура, текстура.

3) С применением лабораторных весов определить массу каждого из образцов породы $m_{\text{п}}$ с точностью до 0,01 г.

4) Определить массу чистого и сухого калориметрического стеклянного сосуда $m_{\text{с}}$ с точностью до 0,01 г.

5) Налить в каждый из 3-х калориметрических сосудов 0,3–0,5 л воды и определить массу сосуда с водой $m_{\text{св}}$

6) Установить сосуды с водой в теплоизолирующие коробки калориметров, измерить в каждом из них начальную температуру воды t_0 и закрыть крышки.

7) Поместить с помощью специальных щипцов все три образца породы в камеру электрической печи в один ряд в направлении от задней стенки камеры к дверце в порядке уменьшения их номеров например: № 3, № 2, № 1.

8) Включить электрическую печь в электросеть, установив примерное значение температуры на регуляторе нагрева печи по указанию и под контролем руководителя работ.

9) При достижении в печи температуры в интервале 130–180 °С, выдержать образцы для равномерного прогрева их по всему объёму при постоянной температуре в течение 5–10 минут.

10) По термометру, встроенному в печь, определить и записать в рабочий журнал значение температуры нагрева образцов $t_{\text{п}}$.

11) Открыть дверцу печи и специальными щипцами вынуть образец № 1 из печи. Закрыть дверцу печи и продолжить нагревание образцов № 2 и № 3 в печи при постоянной температуре нагрева образцов $t_{\text{п}}$.

12) Быстро, но аккуратно погрузить образец № 1 в сосуд калориметра № 1 (не бросать, чтобы не разбить стекло и не разбрызгать воду) (см. рис. 4.1, поз. 2). При этом следить за тем, чтобы на щипцах не осталось и капли воды из сосуда.

13) Закрыть теплоизолирующую коробку калориметра 3 крышкой 4; мешалкой 6 тщательно, но осторожно (не разбить стеклянные сосуд и градусник) перемешивать воду в течение 5–6 минут до тех пор, пока температура воды в сосуде калориметра не стабилизируется. После этого замерить термометром 5 температуру t_2 воды в калориметре и записать её значение в рабочий журнал.

14) Осторожно открыть крышку калориметра со вставленными в неё мешалкой и термометром (при этом следить, чтобы все капли воды с мешалки и термометра стекли в сосуд). Извлечь из калориметра сосуд с водой и погруженным в него образцом породы, определить на весах их суммарную массу $m_{\text{н}}$ с точностью до 0,01 г.

15) Достать по очереди оставшиеся в печи образцы № 2 и № 3, погрузить их в воду калориметрических сосудов с соответствующими номерами и выполнить для каждого из них все операции, описанные в пп. 9–14. С целью экономии времени, по возможности, некоторые операции можно выполнять параллельно по указанию и под контролем руководителя работ.

16) После извлечения всех образцов из электрической печи следует сразу выключить её по указанию и под контролем руководителя.

17) Занести результаты измерений в таблицу 4.1.

18) После окончания всех испытаний, извлечь образцы из сосудов (осторожно, стекло!), вылить воду в предназначенную для этого ёмкость, протереть специальными салфетками до суха сосуды, коробки калориметров внутри и снаружи, а также образцы пород и разместить их на исходные места.

19) Навести чистоту и порядок на рабочих местах.

Таблица 4.1 – Результаты измерений и расчётов показателей удельной теплоёмкости пород

Порода		Масса, кг						Температура, °С			Удельная теплоёмкость породы c_p , Дж/(кг·К)
номер образца	наименование	образца m_p	сосуда m_c	сосуда с водой $m_{св}$	воды в сосуде m_v	сосуда с водой и образцом m_n	испарившейся воды $m_{ив}$	начальная воды t_0	образца породы t_p	в сосуде воды и породы t_2	
1											
2											
3											

4.2.5. Аналитическая обработка результатов испытаний

1) Массу воды m_v в калориметрическом сосуде до помещения в неё нагретого образца породы вычислить по формуле

$$m_v = m_{св} - m_c, \quad (4.10)$$

где $m_{св}$ – масса калориметрического сосуда с водой, кг;

m_c – масса сухого и чистого калориметрического сосуда, кг.

2) Количество испарившейся воды $m_{ив}$ найти из выражения

$$m_{\text{ив}} = m_{\text{св}} + m_{\text{п}} - m_{\text{н}}, \quad (4.11)$$

где $m_{\text{ив}}$ – масса испарившейся воды из сосуда, кг;

$m_{\text{св}}$ – масса калориметрического сосуда с водой, кг;

$m_{\text{п}}$ – масса образца породы, кг;

$m_{\text{н}}$ – суммарная масса сосуда с водой и погружённого в него образца породы, кг.

3) Принять значения:

- удельной теплоёмкости воды $c_{\text{в}} = 4,19$ кДж/(кг·К);

- удельной теплоёмкости стекла калориметрических сосудов $c_{\text{с}} = 0,8$ кДж/(кг·К);

- удельной теплоты парообразования воды $q_{\text{ив}} = 2260$ кДж/кг.

4) Рассчитать значения *удельной теплоёмкости* горных пород $c_{\text{п}}$ по формуле (4.9).

5) Занести результаты вычислений в таблицу 4.1.

6) По результатам выполненных экспериментов построить гистограмму значений *удельной теплоёмкости* горных пород $c_{\text{п}}$ в зависимости от их наименования.

4.2.6 Составление отчёта о лабораторной работе

1) Описать наименование и строение испытанных пород по лабораторной работе № 1, указать форму и размеры образцов.

2) Результаты испытания образцов породы и определения их *удельной теплоёмкости* следует поместить в отчёт о лабораторной работе в виде текстового описания, численных значений всех измеренных показателей и выполненных на их основе расчётов, таблиц, графиков, с иллюстрированием самостоятельно выполненными схемами и фотографиями.

3) Все расчёты должны быть подробно приведены в отчёте о лабораторной работе.

4) В конце отчёта поместить краткие выводы о полученных при выполнении работы результатах, новых знаниях и навыках.

4.2.7 Контрольные вопросы

- 1) Что понимают под теплоёмкостью горной породы?
- 2) Дать определение удельной теплоёмкости породы.
- 3) Назвать примерные пределы изменения удельной теплоёмкости горных пород.
- 4) Какие факторы влияют на удельную теплоёмкость пород?
- 5) Как влияет минеральный состав пород на их удельную теплоёмкость?
- 6) В чём заключается калориметрический способ определения удельной теплоёмкости горных пород?
- 7) Написать уравнение теплового баланса (для определения удельной теплоёмкости горных пород).
- 8) Как влияют строение и влажность пород на их удельную и объёмную теплоёмкость?
- 9) Рассказать порядок выполнения лабораторной работы.
- 10) Почему с увеличением содержания рудных минералов в породах уменьшается их теплоёмкость?
- 11) В чём отличие понятий "удельная теплоёмкость" от "объёмная теплоёмкость" горных пород?
- 12) Как используют тепловые свойства пород при добыче полезных ископаемых?
- 13) Привести примеры использования тепловых свойств пород на горных предприятиях, расположенных в районах вечной мерзлоты.
- 14) Объяснить, почему с увеличением температуры возрастает удельная теплоёмкость пород.
- 15) Как зависит теплоёмкость твёрдых горных пород от параметров их строения – зернистости, слоистости и т. д.?

5 МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

5.1 Теоретические основы

Магнитные свойства горных пород зависят от их минерального состава (содержания ферромагнитных минералов), формы, размеров и взаимного расположения зёрен, температуры, напряжённости и частоты магнитного поля и других факторов.

Магнитные свойства пород оказывают большое влияние на распространение в них электромагнитных волн, поэтому их широко используют при разведке железорудных месторождений, обогащении магнитных руд, разрушении ферромагнитных горных пород, оценке напряжённого состояния массивов и целиков на железорудных горнодобывающих предприятиях. Их применяют также для контроля вещественного состава и влажности магнитных руд.

Согласно закону Кулона сила F_M взаимодействия между двумя магнитными массами m_{M1} и m_{M2} на расстоянии r друг от друга равна [14, п. 7.7]

$$F_M = \pm \frac{m_{M1} \cdot m_{M2}}{(\mu_a \cdot r^2)}, \quad (5.1)$$

где F_M – сила взаимодействия между двумя магнитными массами m_{M1} и m_{M2} ;

μ_a – абсолютная магнитная проницаемость среды (вещества, породы), Гн/м;

r – расстояние между двумя магнитными массами, м.

Между магнитной индукцией B и напряжённостью магнитного поля H в веществе существует прямо пропорциональная зависимость [14, п. 7.7]

$$B = \mu_a H, \quad (5.2)$$

где B – магнитная индукция (величина векторная) характеризует интенсивность магнитного поля в веществе, Тл;

μ_a – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м;

H – напряжённость магнитного поля (величина векторная) характеризует интенсивность магнитного поля в вакууме, А/м.

Относительной магнитной проницаемостью μ называют отношение

$$\mu = \frac{B}{B_0}, \quad (5.3)$$

где B – магнитная индукция поля в веществе, Тл;

B_0 – магнитная индукция поля в вакууме, Тл.

Следовательно, *относительная магнитная проницаемость μ* показывает, во сколько раз *магнитная индукция* поля в веществе B больше, чем *магнитная индукция* этого же поля в вакууме B_0 .

Относительная магнитная проницаемость μ вещества также может быть выражена отношением

$$\mu = \mu_a / \mu_0, \quad (5.4)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость;

μ_a – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м;

μ_0 – магнитная постоянная, для вакуума равна $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Относительная магнитная проницаемость μ показывает, во сколько раз магнитная проницаемость в веществе μ_a больше, чем

магнитная проницаемость этого же поля в вакууме μ_0 (для вакуума относительная магнитная проницаемость $\mu = 1$).

При внесении минералов и горных пород во внешнее магнитное поле они намагничиваются и приобретают магнитный момент M , который, в свою очередь, обусловлен наличием в породе элементарных магнитных моментов m_i .

Мерой намагничивания породы (вещества) служит **намагниченность** J , значения которой вычисляют как предел отношения суммы магнитных моментов m_i в некотором минимальном объёме породы ΔV к этому объёму [14, п. 7.7]

$$J = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\Delta V}. \quad (5.5)$$

Намагниченность породы J – величина векторная, и может быть определена, как приращение *магнитной индукции* поля в веществе B , рассчитанной по формуле (5.2), по сравнению с вакуумом B_0

$$J = \mu_a \cdot H - \mu_0 \cdot H. \quad (5.6)$$

После преобразования формулы (5.6) становится очевидным, что *намагниченность породы* J прямо пропорциональна напряжённости H магнитного поля

$$J = H \cdot \mu_0 \cdot (\mu - 1). \quad (5.7)$$

Выражение $(\mu - 1)$ в формуле (5.7) представляет собой коэффициент, который называют **объёмной магнитной восприимчивостью** χ :

$$\chi = (\mu - 1). \quad (5.8)$$

Отношение *объёмной магнитной восприимчивости* χ к объёмной массе породы ρ называют *удельной магнитной восприимчивостью* χ_y :

$$\chi_y = \frac{\chi}{\rho}. \quad (5.9)$$

Основными параметрами (характеристиками) магнитных свойств горных пород (минералов) являются их *магнитная проницаемость* μ и *магнитная восприимчивость* χ , которые в соответствии с формулой (5.8) связаны соотношением

$$\mu = (1 + \chi). \quad (5.10)$$

Все горные породы и минералы обладают в той или иной степени магнитными свойствами, т. е. они являются **магнетиками**.

По магнитным свойствам минералы и горные породы делят на *диамагнитные* (диамагнетики), *парамагнитные* (парамагнетики) и *ферромагнитные* (ферромагнетики).

Пределы изменения *объёмной магнитной восприимчивости* χ и *относительной магнитной проницаемости* μ некоторых минералов представлены в таблице 5.1.

Диамагнитными называют горные породы, у которых при отсутствии внешнего магнитного поля магнитный момент атомов и молекул равен нулю; у них *объёмная магнитная восприимчивость* $\chi = 0$.

Относительная магнитная проницаемость диамагнетиков меньше единицы, т. е. $\mu \leq 1$ (см. табл. 5.1).

Таблица 5.1 – Пределы изменения объёмной магнитной восприимчивости χ и относительной магнитной проницаемости μ некоторых минералов [14, п. 7.7]

Тип магнетика	Объёмная магнитная восприимчивость $\chi \cdot 10^6$	Относительная магнитная проницаемость μ	Примеры минералов
Диамагнетик	$-200 \div 0$	$0,999836 \div 1,0$	апатит, вода, галит, кальцит, кварц, плагиоклаз, уголь
Парамагнетик	$0 \div 1 \cdot 10^4$	$1,0 \div 1,0064$	воздух, доломит, пироксен, хромит
Ферромагнетик	$10^4 \div 4 \cdot 10^6$	$1,0064 \div 5$	лимонит, магнетит, пирротин, яcobит

Парамагнитными называют горные породы (вещества), атомы которых обладают магнитным моментом при отсутствии внешнего магнитного поля; у них *объёмная магнитная восприимчивость* $\chi \geq 0$, *относительная магнитная проницаемость* $\mu \geq 1$; (см. табл. 5.1).

Ферромагнитными называют горные породы, у которых целые объёмы (домены) обладают магнитным моментом при отсутствии внешнего поля, у них *объёмная магнитная восприимчивость* $\chi > 0$, *относительная магнитная проницаемость* $\mu \gg 1,0$ (см. табл. 5.1).

Магнитные свойства некоторых минералов и горных пород приведены в табл. Д.9.

При измерении объёмной магнитной восприимчивости её истинные значения можно получить только на образцах *кольцевой формы*. Однако изготовление их из горных пород связано с техническими трудностями, поэтому на практике исследуют образцы *цилиндрической* или *призматической* формы.

У таких образцов проявляется *анизотропия* магнитных свойств, определяемая их формой. Анизотропию объясняют действием *размагничивающего поля*, наведённого в образце.

С учётом влияния *размагничивающего поля* **интенсивность намагничивания** J образца породы определяют по формуле

$$J = \frac{\chi}{1 + \chi \cdot n} H = \chi_k \cdot H, \quad (5.11)$$

где χ – *объёмная магнитная восприимчивость* породы;

n – коэффициент размагничивания;

χ_k – *кажущаяся магнитная восприимчивость*, характеризующая магнитные свойства образца породы заданной формы;

H – напряжённость магнитного поля.

Из формулы (5.11) следует, что величина *объёмной магнитной восприимчивости* образца χ равна

$$\chi = \frac{\chi_k}{1 - \chi_k \cdot n}. \quad (5.12)$$

Цилиндрические и призматические образцы намагничиваются в однородном магнитном поле неравномерно. При этом неравномерность намагничивания тем значительнее, чем больше соотношение линейных размеров образца.

Так, у цилиндрических образцов с *равными* значениями *диаметра* и *высоты*, коэффициент размагничивания в центре цилиндра $n = 0,3$, а по краям – $n = 0,8$.

Лабораторная работа № 9

5.2 МАГНИТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГОРНЫХ ПОРОД

Цель работы: определение магнитной восприимчивости и магнитной проницаемости горных пород.

5.2.1 Приборы, инструменты

- 1) Измерительный инструмент: штангенциркуль, линейка.
- 2) Инвентарь для уборки рабочего места.
- 3) Рабочий журнал для записи результатов экспериментов.
- 4) Письменные принадлежности.
- 5) Измеритель магнитной восприимчивости ИМВ-2.

Измеритель магнитной восприимчивости ИМВ-2

Предназначен для измерения *кажущейся магнитной восприимчивости* χ_k образцов горных пород в лабораторных условиях и пород в обнажениях в полевых условиях.

Технические характеристики прибора ИМВ-2 приведены в таблице 5.2.

Общий вид прибора ИМВ-2 представлен на (рис. 5.1). Весь прибор размещён в алюминиевом корпусе размером 215×110×155 мм, который снабжён ремнём для переноски.

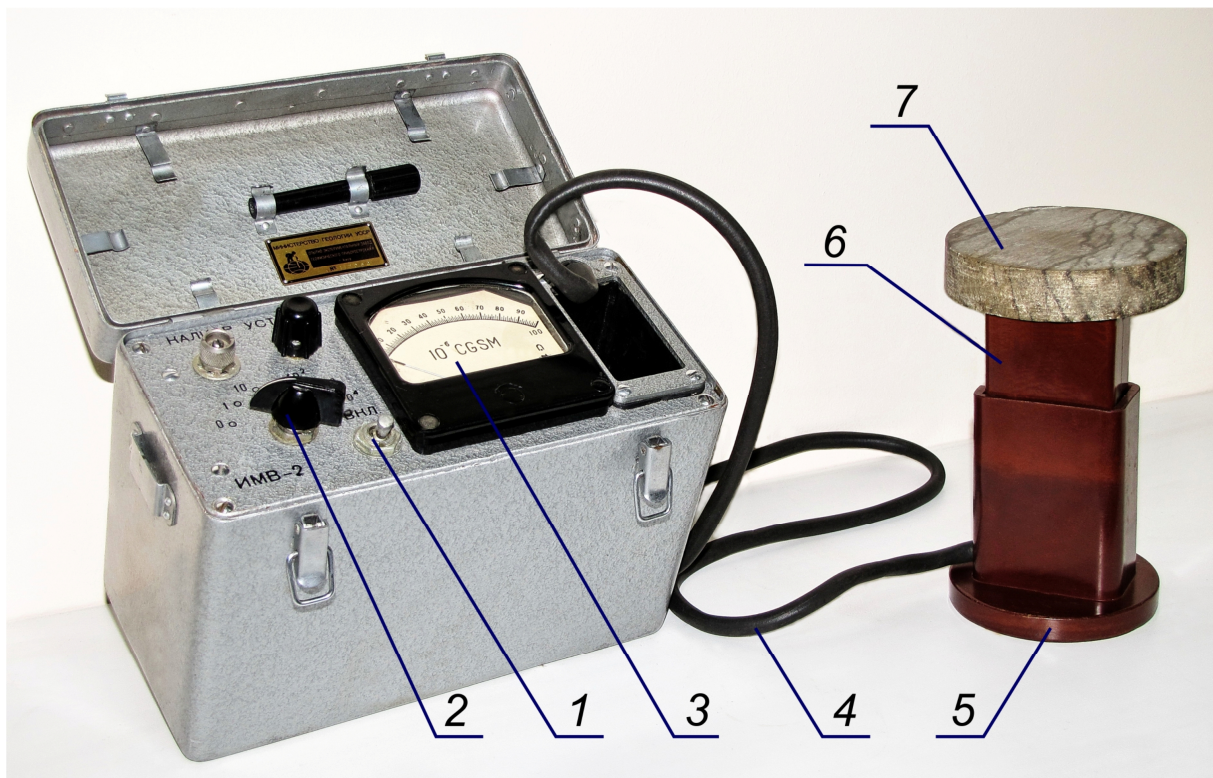
На лицевой панели размещены элементы управления и измерительный прибор, с правой стороны оборудован карман (гнездо), куда вкладывают датчик при хранении.

Датчик (мост и приёмная катушка), смонтированный в пластмассовом разъёмном корпусе (см. рис. 5.1, поз. 6), соединён с панелью экранированным кабелем 4.

Таблица 5.2 – Технические характеристики прибора ИМВ-2¹

№ поз.	Показатели	Значения
1	Пределы измерения кажущейся магнитной восприимчивости χ_k , единицы CGSM	$2 \cdot 10^{-6} \div 1,0$
2	Количество диапазонов измерения, ед. CGSM (поправочный коэффициент предела шкалы измерения k):	5
	I – $0 \div 100 \times 10^{-6}$ ($k = 1$)	
	II – $0 \div 1.000 \times 10^{-6}$ ($k = 10$)	
	III – $0 \div 10.000 \times 10^{-6}$ ($k = 10^2$)	
	IV – $0 \div 0,1$ ($k = 10^3$)	
	V – $0 \div 1,0$ ($k = 10^4$)	
3	Цена деления шкалы на диапазоне I, ед. CGSM	$1 \cdot 10^{-6}$
4	Шкала прибора линейная	–
5	Средняя погрешность измерений на всех диапазонах, не более	$\pm 5 \%$
6	Размеры измеряемого образца или площадки обнажения, мм	$40 \times 60 / \times 40$
7	Шероховатость поверхности породы, мм	± 2
8	Время, затраченное на одно измерение, не более	2 мин
9	Питание прибора: сухие элементы питания типа D	3 шт.
10	Потребляемый ток, мА	15
11	Диапазон рабочих температур, $^{\circ}\text{C}$	$-10 \div +35$
12	Габариты прибора, мм	$215 \times 110 \times 155$
13	Масса прибора, кг	2,5

¹ Измеритель магнитной восприимчивости ИМВ-2-1-0-00. Выпускной аттестат, техническое описание и инструкция по эксплуатации / Киевский опытно-экспериментальный завод геофизического приборостроения. – Киев, 1972. – 16 с.



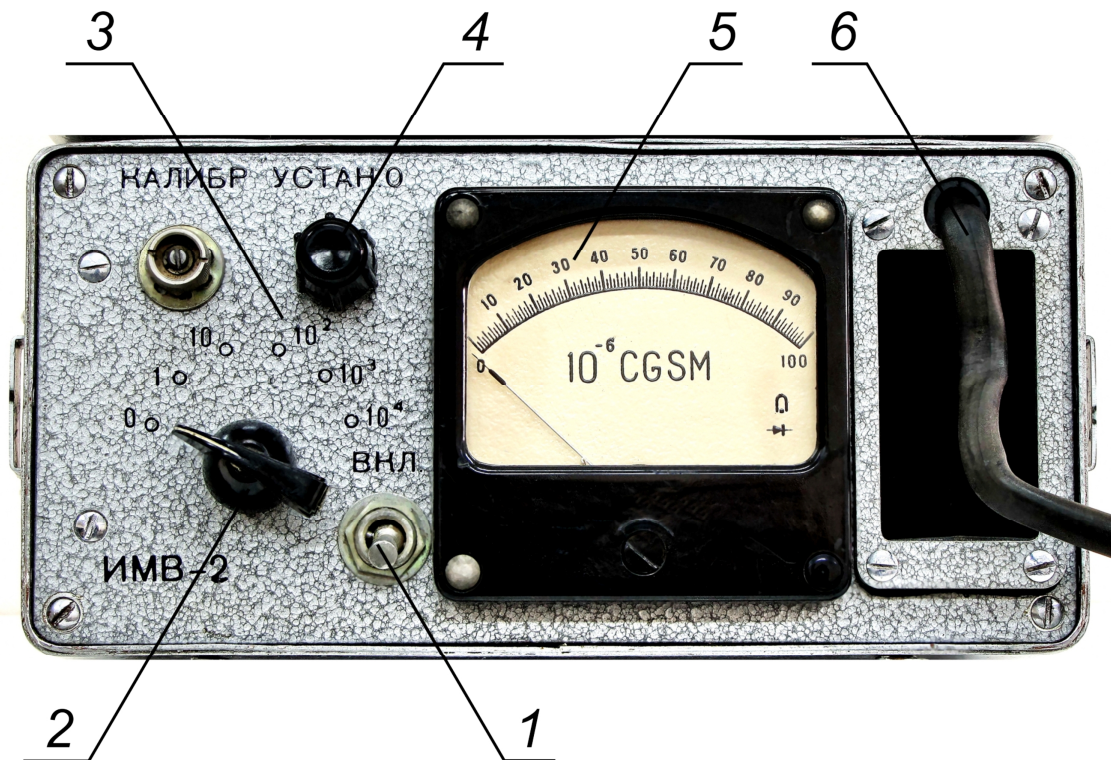
- 1 – тумблер для включения – выключения питания прибора;
- 2 – переключатель диапазонов измерения;
- 3 – миллиамперметр со шкалой измерения;
- 4 – экранированный кабель;
- 5 – пластмассовая подставка для датчика;
- 6 – датчик (мост и приёмная катушка);
- 7 – образец породы

Рис. 5.1 – Общий вид измерителя магнитной восприимчивости ИМВ-2

Лицевая панель прибора ИМВ-2 представлена на рис. 5.2.

Шкала прибора 5 имеет 100 делений и градуирована в значениях показателя *кажущейся магнитной восприимчивости* в единицах системы CGSM – χ_k (CGSM).

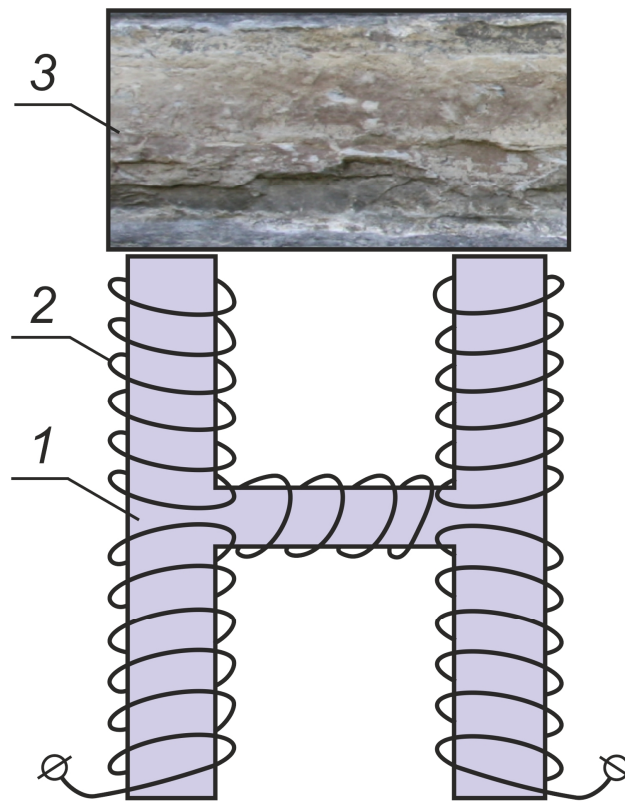
Прибор ИМВ-2 имеет пять диапазонов измерения (табл. 5.2), которые выбирают путём установления переключателя "П" 2 в положение 3, соответствующее значению поправочного коэффициента k , изменяющего пределы шкалы измерения: 1, 10, 10^2 , 10^3 , 10^4 .



- 1 – тумблер "Т" для включения – выключения питания прибора;
 2 – переключатель диапазонов шкалы измерения "П";
 3 – значения поправочного коэффициента k , изменяющего диапазоны измерения (см. табл. 5.2);
 4 – ручка установления нуля "УСТАН. 0";
 5 – шкала миллиамперметра магнитоэлектрического регистрирующего прибора, проградуированная от 0 до 100 единиц CGSM;
 6 – экранированный кабель, соединяющий прибор с датчиком

Рис. 5.2 – Лицевая панель прибора ИМВ-2

Для измерения кажущейся магнитной восприимчивости образцов горных пород в приборе (рис. 5.3) использован дифференциальный магнитный мост, собранный на сердечнике из пластин пермаллоя Н-образной формы 1.



- 1 – Н-образный сердечник электромагнитной катушки;
 2 – витки электрического провода магнитной катушки;
 3 – образец горной породы

Рис. 5.3 – Схема устройства датчика прибора ИМВ-2

Измерение *кажущейся магнитной восприимчивости* прибором ИМВ-2 производят по принципу замыкания кольцевого сердечника электромагнитной катушки (см. рис. 5.3, поз. 1) образцом горной породы 3.

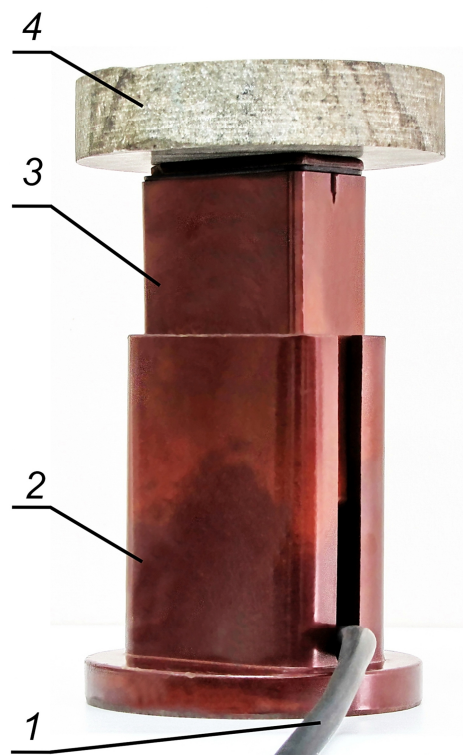
При изменении магнитного сопротивления одного из промежутков между полюсами моста в результате его замыкания образцом породы 3 в приёмной обмотке 2 возникает электрический ток, пропорциональный значению *кажущейся магнитной восприимчивости* измеряемого образца, величину которого регистрирует стрелочный миллиамперметр со шкалой 0–100 (см. рис. 5.2, поз. 5), проградуированной в единицах CGSM (CGSM).

5.2.2 Подготовка образцов горных пород к испытанию

1) На камнерезном станке с алмазным кругом (см. рис. 1.3) из монолитных *штуфов* или *кернов* (ГОСТ Р 50544–93) [39] изготавливают образцы различных горных пород произвольной правильной геометрической формы в виде прямоугольного параллелепипеда или цилиндра с размерами не менее 40×40 (60) $\times$ 60 (40) мм.

2) Поверхности каждого образца, которыми его устанавливают на датчик измерительного прибора (рис. 5.4, поз. 3), следует обрабатывать: шероховатость поверхности не должна превышать ± 2 мм. При этом образцы должны быть высушены до постоянной массы.

3) Обучающиеся каждого звена получают по 4–6 образцов различных пород, помещённых в специальный лоток.



- 1 – экранированный кабель, соединяющий прибор с датчиком;
- 2 – пластмассовая подставка для датчика;
- 3 – датчик прибора (мост и приёмная катушка);
- 4 – образец горной породы

Рис. 5.4 – Размещение образца породы на датчике прибора ИМВ-2

5.2.3 Порядок выполнения работы

- 1) Описать образцы различных горных пород (по работе 1).
- 2) Определить размеры каждого образца породы и зафиксировать их в виде схемы или фотографии для размещения в отчёте.
- 3) При работе с прибором ИМВ-2 *не следует иметь при себе металлические предметы* (телефоны, часы, ключи, монеты и др.), вносящие погрешность в показания прибора при измерении.
- 4) Датчик прибора (см. рис. 5.4, поз. 3) установить на подставке 2 на расстоянии не менее 0,5 м от металлических предметов.
- 5) Включить прибор тумблером "Т" (см. рис. 5.2, поз. 1)
- 6) Переключатель диапазонов "П" 2 установить на "0". Ручкой "УСТАН. 0" 4 подвести стрелку прибора на "0" шкалы 5.
- 7) Перевести переключатель "П" в положение "1", равное значению поправочного коэффициента k диапазонов шкалы измерения (см. табл. 5.2).
- 8) Приложить к датчику образец (см. рис. 5.3, поз. 3) одной из поверхностей, так чтобы он полностью закрывал площадь торца сердечника электромагнитной катушки 1.
- 9) Если стрелка прибора "зашкаливает", следует перевести переключатель диапазонов шкалы измерения "П" (см. рис. 5.2, поз. 2) в соответствующем направлении, добиваясь того, чтобы стрелка прибора была в зоне шкалы измерения.
- 10) Произвести замер *кажущейся магнитной восприимчивости* $\chi_{\text{к(CGSM)}}$ образца породы по шкале прибора (см. рис. 5.2, поз. 5) с ценой деления шкалы – 10^{-6} единиц CGSM. При этом следует учесть значения поправочного коэффициента k соответствующего диапазона шкалы измерения (см. рис. 5.2, поз. 2).
- 11) Приложить поочередно торцевые поверхности образца к датчику прибора (см. рис. 5.4, поз. 3) и измерить $\chi_{\text{к(CGSM)}}$ в трёх положениях, поворачивая его на 120 градусов вокруг вертикальной оси.
- 12) Полученные 6 измерений $\chi_{\text{к(CGSM)}}$ занести в таблицу 5.3.
- 13) Выключить прибор тумблером "Т" (см. рис. 5.2, поз. 1).
- 14) Повторить операции в пп. 5–13 для каждого из образцов.

Таблица 5.3 – Результаты лабораторного определения магнитных параметров горных пород

[illegible]

5.2.4 Обработка и оформление результатов испытаний

1) Описать наименование и строение испытанных пород по лабораторной работе № 1, указать форму и размеры образцов.

2) Вычислить среднеарифметическое значение *кажущейся магнитной восприимчивости* $\chi_{\text{к(CGSM)}}$ для каждого образца породы в единицах системы CGSM.

3) Рассчитать по формуле (5.12) *объёмную магнитную восприимчивость* $\chi_{\text{(CGSM)}}$ образцов по среднеарифметическим значениям $\chi_{\text{к(CGSM)}}$. Коэффициент размагничивания принять равным $n = 0,8$.

4) Следует учесть, что формулы (5.1) – (5.11) в настоящей работе даны в единицах СИ, а прибор ИМВ-2 градуирован в единицах системы CGSM. Поэтому необходимо перевести полученные значения *объёмной магнитной восприимчивости* $\chi_{\text{(CGSM)}}$ из системы CGSM в систему СИ, используя следующее соотношение:

$$1 \chi_{\text{(СИ)}} = 4\pi \cdot \chi_{\text{(CGSM)}}. \quad (5.13)$$

5) Определить по формуле (5.10) *относительную магнитную проницаемость* $\mu_{\text{(СИ)}}$ испытанных образцов пород.

6) Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 5.3.

7) По значениям таблицы 5.1 определить, к какому типу по магнитным свойствам можно отнести испытанные горные породы.

8) Сравнить значения *кажущейся магнитной восприимчивости* образцов $\chi_{\text{к}}$, полученные при разных положениях после их поворота и на разных поверхностях образца, объяснить полученные отличия для каждой породы.

9) Результаты испытания образцов горных пород и определения их магнитных параметров следует поместить в отчёт о выполненной работе в виде текстового описания, значений измеренных показателей и всех расчётов, таблиц, иллюстраций.

10) В конце отчёта поместить краткие выводы о полученных при выполнении работы результатах, новых знаниях и навыках.

5.2.5 Контрольные вопросы

- 1) Назвать основные характеристики магнитных свойств горных пород.
- 2) Дать определение магнитной проницаемости горной породы.
- 3) На какие типы делят горные породы по магнитным свойствам?
- 4) Дать краткую характеристику диамагнитных горных пород.
- 5) Какие горные породы называют парамагнитными и ферромагнитными?
- 6) Что понимают под намагниченностью горных пород?
- 7) Как влияет минеральный состав пород на их магнитные свойства?
- 8) Что понимают под объёмной и удельной магнитной восприимчивостью горных пород? Написать формулы для их определения.
- 9) Как влияет строение (структура и текстура) горных пород на их магнитные свойства?
- 10) Объяснить порядок выполнения лабораторной работы.
- 11) Назвать ориентировочные значения относительной магнитной проницаемости диамагнитных, парамагнитных и ферромагнитных горных пород.
- 12) Начертить и объяснить принципиальную схему измерения кажущейся магнитной восприимчивости горных пород прибором ИМВ-2.
- 13) Какие требования предъявляют к образцам породы, испытываемым прибором ИМВ-2.
- 14) Написать зависимость между относительной магнитной проницаемостью и объёмной магнитной восприимчивостью.
- 15) Написать зависимость между кажущейся и истинной магнитной восприимчивостью горных пород.
- 16) Почему песчаники, алевролиты, каменные угли и другие осадочные горные породы обладают низкими магнитными свойствами?

6 ГОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД

В настоящем разделе приведены теоретические основы и методические рекомендации для лабораторного определения следующих горно-технологических свойств горных пород (см. табл. Д.2):

- коэффициенты крепости;
- твёрдость;
- контактная прочность;
- угол естественного откоса;
- угол трения разрыхленной породы;
- коэффициент трения разрыхленной породы.

6.1 Коэффициенты крепости горных пород

Крепость горной породы – *горно-технологическое свойство*, характеризующее сопротивляемость горной породы разрушению в процессах горного производства (ГОСТ Р 50544–93, п. 151 [39]).

Практически во всех отраслях горнодобывающей промышленности и при строительстве подземных сооружений и шахт для решения различных горнотехнических и технологических задач, а также при нормировании труда горнорабочих широко используют *коэффициент крепости горных пород*.

Коэффициент крепости горной породы – параметр, оценивающий количественно крепость горных пород (ГОСТ Р 50544–93, п. 152 [39]).

Известно несколько методов определения коэффициента крепости горных пород.

6.1.1 Коэффициент крепости пород М. М. Протодяконова

Наибольшее распространение в горнодобывающей промышленности получил горно-технологический параметр – *коэффициент крепости пород*, который разработал профессор **Михаил Михайлович Протодяконов** (старший, 1874–1930) [4, с. 263]. Он предложил, что горная порода с *пределом прочности при одноосном*

сжатии (раздавливании) образцов правильной формы $\sigma_{сж} = 100 \text{ кгс/см}^2$ имеет коэффициент крепости f , равный единице [9, п. 1.2].

В соответствии с этим подсчёт величины коэффициента крепости f по результатам испытания на сжатие производят по формуле

$$f = \frac{\sigma_{сж}}{100}, \quad (6.1)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности при одноосном сжатии (раздавливании) образцов правильной формы исследуемой горной породы, кгс/см^2 ;
 100 – предел прочности горной породы при одноосном сжатии, при котором коэффициент крепости f принят равным единице, кгс/см^2 .

Коэффициент крепости пород – величина безразмерная, характеризует относительную крепость горных пород и показывает, во сколько раз данная порода крепче другой, крепость которой принята за единицу [9, п. 1.2].

На основании этого положения проф. М. М. Протодяконов составил и в 1911 г. опубликовал первую научно обоснованную шкалу относительной крепости горных пород [9, п. 1.2; 14, п. 4.1; 15, п. 2.2], разбив все породы на 10 категорий с коэффициентами от $f = 20$ для первой категории до $f = 0,3$ для 10-й категории (табл. Д.5).

Учитывая, что при переходе в систему СИ:
 $1 \text{ кгс/см}^2 = 98066,5 \text{ Па}$ (табл. В.6),
 следовательно:
 $100 \text{ кгс/см}^2 = 9,80665 \cdot 10^6 \text{ Па} = 9,80665 \text{ МПа} \approx 10 \text{ МПа}$
 (табл. В.11, В.12).

Поэтому в настоящее время для практических расчётов значений коэффициента крепости часто применяют следующее выражение

$$f = \frac{\sigma_{сж}}{10}, \quad (6.2)$$

где f – коэффициент крепости по М. М. Протодяконову;

$\sigma_{сж}$ – предел прочности при одноосном сжатии (раздавливании) образцов правильной формы исследуемой горной породы, МПа;

10 – предел прочности горной породы при одноосном сжатии (округлено), при котором коэффициент крепости f принят равным единице, МПа.

6.1.2 Коэффициент крепости горных пород Л. И. Барона

Однако несколько позднее **М. М. Протодяконова**, вследствие совершенствования технологии изготовления образцов и методов определения их прочностных параметров, материалы, накопленные исследователями за несколько десятилетий, показали, что некоторые разновидности скальных пород обладают пределом прочности при одноосном сжатии, значительно превышающим 200 МПа.

Согласно формуле (6.1) для таких пород следовало бы принимать f равным 25 или 30, однако при технических расчётах вполне удовлетворительные результаты обычно получают в случае принятия коэффициента крепости этих пород равным только 20 – максимального значения, имеющегося в шкале проф. **М. М. Протодяконова**.

Многолетние исследования [11, п. 24] показали, что для подавляющего большинства расчётных формул в области горной технологии, в которые входит величина f , двадцатибалльная шкала вполне достаточна, так как даже самые крепчайшие породы коэффициент крепости $f = 20$ характеризует вполне удовлетворительно.

С другой стороны, было установлено [11, п. 24], что относительно слабые породы, для которых минимальное значение f при технических расчётах целесообразно (согласно многолетнему опыту) принимать равным 3–5, при испытаниях на раздавливание обна-

руживают временное сопротивление всего 10–20 МПа (т. е. $f = 1\text{--}2$) и даже меньше.

Основываясь на результатах испытаний многочисленных образцов кернов диаметром 22–32 мм и сопоставления этих результатов с производственными показателями по тем же породам, в 1958 г. профессор **Лазарь Израилевич Барон** (1913–1983) [7] предложил вычислять величину коэффициента крепости f по данным испытаний на раздавливание кернов указанного диаметра и такой же высоты по формуле [8; 11, п. 24; 17, § 2]

$$f_B = \frac{\sigma_{сж}}{30} + \sqrt{\frac{\sigma_{сж}}{3}}, \quad (6.3)$$

где f_B – коэффициент крепости по *Л. И. Барону*;

$\sigma_{сж}$ – предел прочности при одноосном сжатии исследуемой горной породы, МПа.

Проверка показала, что значения коэффициента крепости по *Л. И. Барону* f_B , вычисляемые по формуле (6.3), хорошо согласуются с данными производства [11, п. 24].

Существуют и другие формулы взаимосвязи коэффициента крепости пород с их прочностными параметрами [14, п. 4.1].

6.1.3 Динамический коэффициент крепости горных пород

Для экспериментального определения коэффициента крепости слабых пород, из которых изготовление образцов правильной формы затруднено или невозможно, проф. **М. М. Протодяконов** (младший) разработал и ещё в 1952 г. рекомендовал для повсеместного использования упрощенный метод, основанный на толчении (дроблении) породы [14, п. 4.1; 17, § 3].

В основу метода положена зависимость работы, затраченной на дробление породы, от величины вновь образованной при этом поверхности кусочков породы, которую оценивают пропорцио-

нальным суммарным объёмом полученных в результате дробления частиц породы размером менее 0,5 мм.

Коэффициент крепости пород, определяемый методом дробления, часто называют *динамическим*.

Этот метод положен в основу ГОСТ 21153.1–75 [25], для определения коэффициента крепости по М. М. Протоdjяконову.

Метод дробления позволяет оперативно производить определение коэффициента крепости горных пород и углей f непосредственно и практически в любых производственных условиях – в шахте, карьере, на обогатительной фабрике и т. д.

Метод удобен для получения предварительных данных о прочности горных пород и угля при решении вопросов нормирования работ, механизации и автоматизации выемки полезного ископаемого и проведении горных выработок, управлении горным давлением и т. д.

Определяемый по этому методу *динамический коэффициент крепости* f_d рассчитывают по эмпирической формуле [25]

$$f_d = \frac{20n}{h}, \quad (6.4)$$

где f_d – предел прочности породы, полученный в результате дробления образцов породы неправильной формы;

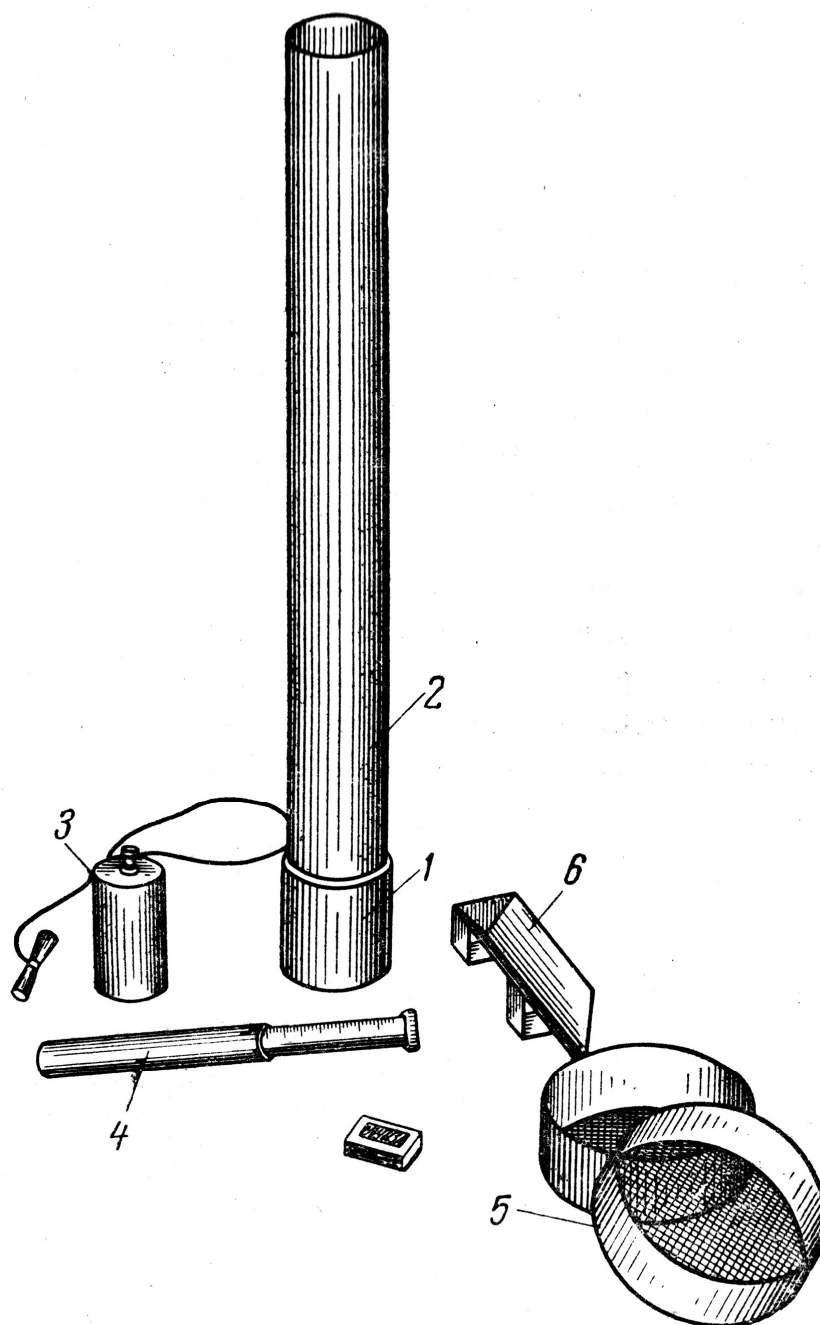
20 – эмпирический коэффициент, учитывающий затраченную на дробление породы работу;

n – количество сбрасываний гири при испытании одного образца (принимают от 5 до 15 в зависимости от крепости породы);

h – высота столбика породной мелочи в объёмомере, полученной от испытания пяти образцов в сумме, мм.

Динамический коэффициент крепости f_d определяют на приборе для определения крепости (ПОК).

Общий вид прибора ПОК представлен на рис. 6.1 [17, § 3], он состоит из трубчатого копра для дробления породы – поз. 2, объёмомера – 4 и сита с сеткой № 05 – 5.



- 1 – стакан;
- 2 – трубчатый копёр для дробления породы;
- 3 – гиря-ударник;
- 4 – объёмомер;
- 5 – сито с сеткой № 05;
- 6 – желобок для насыпания просеянной породной мелочи

Рис. 6.1 – Комплект прибора
для определения крепости горных пород (ПОК)

В результате многочисленных испытаний образцов горных пород с размерами от 20 до 40 мм установлено [17, § 3], что можно не учитывать влияния незначительного изменения их размеров на значение *динамического коэффициента крепости* f_d , определённого по формуле (6.4).

Примером совершенствования и приближения классификации горных пород по шкале проф. М. М. Протодяконова (старшего) к современным нуждам производства и науки является разработанный **М. И. Койфманом** в ИГД им. А. А. Скочинского проект *классификации горных пород* различных минералого-петрографических типов по прочности – *динамическому коэффициенту крепости*, полученному методом толчения (табл. Д.11).

Этот проект разработан на основе обобщения данных, полученных многими научно-исследовательскими институтами и геологоразведочными организациями на протяжении ряда лет, и результатов экспериментальных исследований физико-механических свойств горных пород, выполненных в ИГД им. А. А. Скочинского.

По этому проекту все горные породы разделены на пять больших групп от весьма слабых и хрупких до весьма крепких и вязких.

Величина динамического коэффициента крепости f_d изменяется от 0,1 до 30 и более [17, § 4].

Лабораторная работа № 10**6.2 ДИНАМИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ КРЕПОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД**

Цель работы: определение динамического коэффициента крепости горных пород методом дробления.

6.2.1 Оборудование, приборы, инструменты

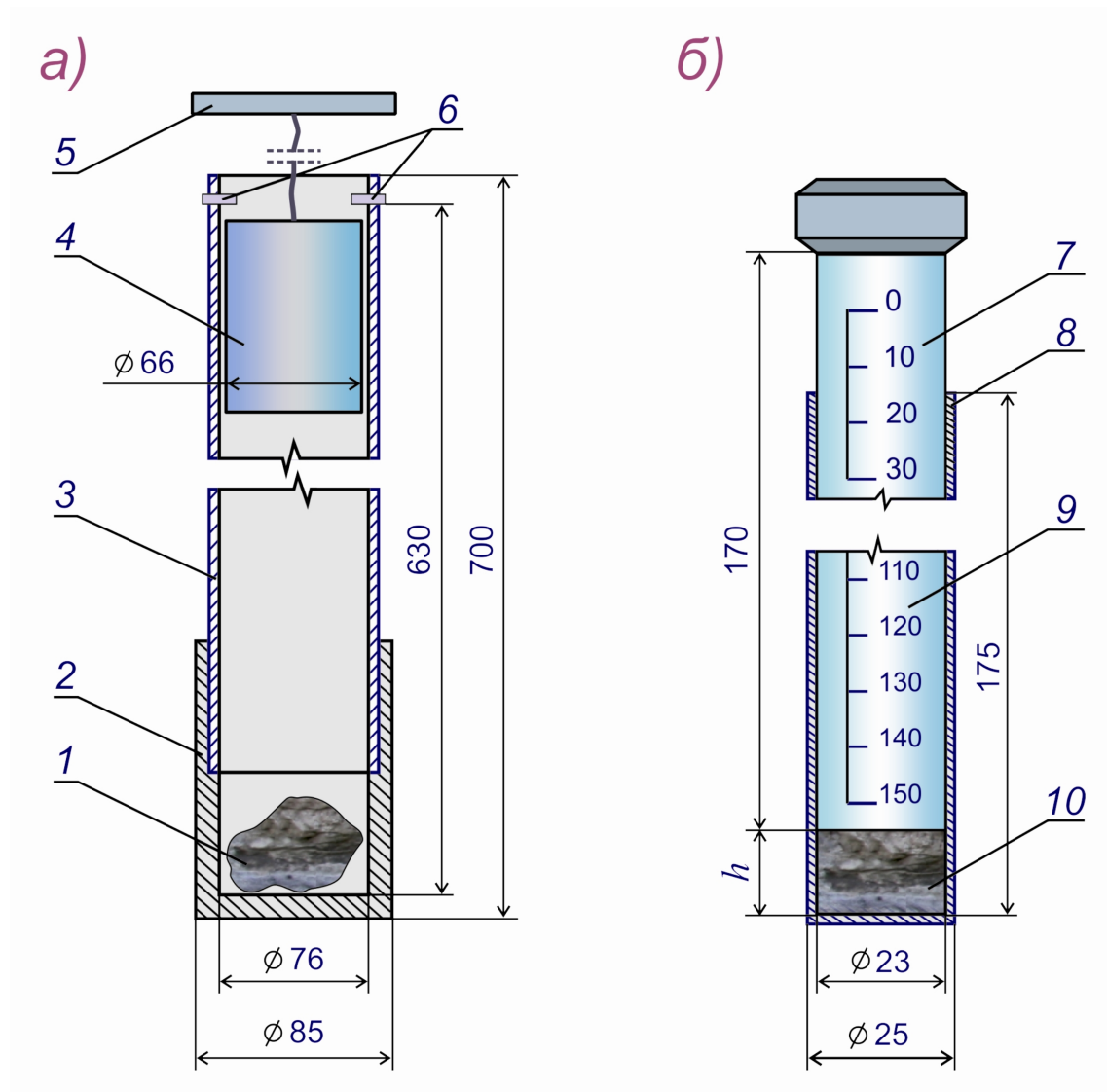
- 1) Инструмент для изготовления образцов породы.
- 2) Весы лабораторные.
- 3) Прибор для определения динамической крепости пород (ПОК) (см. рис. 6.1).
- 4) Воронка или желобок для насыпания просеянной породной мелочи в мерный стакан.
- 5) Линейка с делениями.
- 6) Штангенциркуль.
- 7) Инвентарь для уборки рабочего места.
- 8) Рабочий журнал для записи результатов экспериментов.
- 9) Письменные принадлежности.

В комплект прибора для определения динамической крепости пород (ПОК) входят:

а) *трубчатый копёр* (см. рис. 6.1, 6.2, а) для дробления образца породы **1**, состоящий из стакана **2**, куда помещают образец породы для его дробления, и трубчатого копра **3**, внутри которого помещают ударную гирю **4** массой 2,4 кг с ручкой **5**, привязанной к гире шнуром, для её подъёма до ограничителя высоты **6**;

б) *объёмомер* (см. рис. 6.2, б), состоящий из мерного стакана – поз. **8** с внутренним диаметром 23 мм, куда помещают раздробленную и просеянную через сито породную мелочь **10**, и плунжера **7** со шкалой измерения **9** с диапазоном показаний от 0 до 150 мм вдоль его продольной оси;

в) *сито* с сеткой № 05 (см. рис. 6.1, поз. **5**) по ГОСТ 6613–73 (размер отверстий **0,5** мм) для просеивания раздробленной породы.



- 1 – образец породы; 2 – стакан; 3 – трубчатый копёр;
 4 – гири массой 2,4 кг; 5 – ручка со шнуром для подъёма гири;
 6 – ограничитель высоты подъёма гири;
 7 – плунжер со шкалой измерений; 8 – мерный стакан;
 9 – шкала измерения высоты породного столбика;
 10 – раздробленная породная мелочь;
 h – высота столбика породной мелочи

Рис. 6.2 – Элементы прибора ПОК для определения динамической крепости пород (ПОК): *а* – трубчатый копёр для дробления породы; *б* – объёмомер

6.2.2 Подготовка образцов горной породы для испытаний

Отобранную пробу горной породы одного наименования раскалывают молотком на стальном твёрдом основании до получения кусков неправильной формы размером 20–40 мм.

Обучающиеся каждой бригады для определения динамической крепости пород получают у руководителя работы по 6–9 образцов породы одного наименования массой 0,04–0,06 кг.

6.2.3 Порядок выполнения работы

- 1) Описать исследуемые образцы пород (по работе № 1).
- 2) С применением весов отобрать из полученных образцов 6–8 кусков массой 0,04–0,06 кг, пометить их в любом порядке номерами от 1 до 6 (8).
- 3) В соответствии со схемой на рис. 6.2, а поместить первый из образцов породы 1 в центре стакана 2 прибора ПОК, вставить в него трубчатый копёр 3, предварительно продев через верхнее отверстие копра ручку 5 со шнуром, привязанным к ударной гире 4, и установить прибор на жёсткое основание.
- 4) Поднимая ручкой 5 гирю 4 вверх на высоту около 60 см до упора 6, сбросить её на образец в зависимости от ожидаемой крепости породы от 5 до 15 раз¹ (одинаковое количество на каждый последующий образец).
- 5) Раздробленную в копре породу высыпать из стакана 2 на сито (см. рис. 6.1, поз. 5) с размером отверстий 0,5 мм и просеять до прекращения выделения подрешётного продукта.
- 6) Верность количества сбрасываний гири определить путём замера объёма подрешётного продукта от образца № 1 в объёмометре (см. рис. 6.2, б). При получении столбика породной мелочи высотой 5–20 мм по шкале плунжера, количество сбрасываний сохранить для каждого из оставшихся пяти образцов. В противном случае скорректировать количество сбрасываний в большую или меньшую

¹ При очень мягких породах количество сбрасываний может быть сокращено до 1, а при очень крепких – увеличено до 30.

сторону соответственно и повторить контрольные испытания по пунктам 3–6 до получения удовлетворительного результата.

7) Выполнить операции по пунктам 3–5, с любыми **пятью** образцами из оставшихся с одинаковым количеством сбрасываний гири на каждый (с учётом поправки количества сбрасываний по п. 6).

8) После дробления и просеивания на сите разрушенной породы каждого из пяти образцов подрешётный продукт, полученный после просеивания осколков от этих пяти образцов, *собрать вместе* и сыпать через воронку или желобок (см. рис. 6.1, поз. 6) в стакан объёмомера (см. рис. 6.2, поз. 8).

9) Замерить по шкале плунжера **9** высоту столбика породной мелочи h (мм) и записать её значение в рабочий журнал.

6.2.4 Аналитическая обработка результатов испытаний

1) Рассчитать коэффициент крепости f_d по формуле (6.4).

2) Занести результаты измерений и вычислений в отчёт.

3) Определить, к какому классу можно отнести испытанную породу по значению её динамического коэффициента крепости f_d путём сравнения со значениями коэффициентов крепости:

- в классификации **М. И. Койфмана** в табл. Д.11 (группа пород по динамической прочности, подгруппа по коэффициенту крепости);

- в классификации **М. М. Протодяконова** (старшего) в табл. Д.10 (категория и степень крепости).

6.2.5 Составление отчёта о лабораторной работе

1) Описание и результаты испытания образцов породы при определении их *динамического коэффициента крепости* поместить в отчёт о лабораторной работе в виде текста, численных значений всех измеренных показателей и выполненных на их основе расчётов, с иллюстрированием схемами и фотографиями.

2) В конце отчёта поместить краткие выводы о полученных при выполнении работы результатах, новых знаниях и навыках.

6.2.6 Контрольные вопросы

- 1) Что понимают под крепостью горной породы?
- 2) Каким показателем оценивают крепость пород?
- 3) Объяснить классификацию горных пород по крепости проф. М. М. Протодяконова (старшего).
- 4) Написать формулу для определения коэффициента крепости пород по М. М. Протодяконову (старшему).
- 5) Как определяют динамический коэффициент крепости пород методом толчения?
- 6) Почему коэффициент крепости пород, определяемый методом толчения, называют также динамическим коэффициентом крепости?
- 7) Что общего и чем отличаются коэффициенты крепости горных пород по теории М. М. Протодяконова (старшего) и Л. И. Барона.
- 8) Объяснить устройство прибора ПОК.
- 9) Написать формулу для определения динамического коэффициента крепости пород методом толчения.
- 10) Имеется ли связь между коэффициентом крепости горных пород по методу проф. М. М. Протодяконова (старшего) и динамическим коэффициентом крепости пород по методу толчения?
- 11) Как изготавливают образцы горных пород, испытываемые методом толчения?
- 12) Имеется ли логическая связь между коэффициентом крепости и прочностными свойствами горных пород?
- 13) Перечислить основные факторы, влияющие на крепость горных пород.
- 14) Что общего и чем отличаются коэффициенты крепости горных пород по теории М. М. Протодяконова (старшего) и М. М. Протодяконова (младшего).
- 15) Охарактеризовать влияние минерального состава и строения горных пород на их крепость.
- 16) Объяснить влияние внешних факторов на крепость пород.
- 17) Для решения каких горнотехнических задач используют коэффициент крепости пород?

Лабораторная работа № 11

6.3 КОНТАКТНАЯ ПРОЧНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

Цель работы: определение контактной прочности горных пород методом статического вдавливания в них цилиндрического пуансона с плоским основанием.

6.3.1 Теоретические основы работы

6.3.1.1 Твёрдость горных пород

Твёрдость горной породы H – параметр, характеризующий сопротивляемость поверхностного слоя горной породы разрушению или деформированию (ГОСТ Р 50544–93 [39]).

Твёрдость горных пород определяет сопротивляемость пород внедрению в них острого инструмента, т. е. разрушению при точечном (контактном) нагружении.

Твёрдость минералов принято оценивать по известной шкале **Мооса**. Так как породы состоят из многих минералов и их твёрдость является агрегатной, для её определения используют методы, основанные на вдавливании особых штампов в породу.

В зависимости от того, вдавливают ли инструмент в породу при постепенно увеличивающейся нагрузке или ударяют, различают *статическую $H_{ст}$* и *динамическую $H_{д}$* твёрдость, причем $H_{ст} \neq H_{д}$ [14, п. 4.3].

Для большинства горных пород применяют метод определения *статической твёрдости $p_{ш}$* , разработанный **Л. А. Шрейнером** [14, п. 4.3] и основанный на хрупком выколе лунки в шлифованной поверхности породы под действием приложенной к специальному штампу нагрузки.

Динамическая твёрдость может быть определена методом **Шора**. Его сущность заключается в том, что на поверхность испытуемой породы с определенной высоты сбрасывают боёк со сферическим алмазным наконечником. За показатель твёрдости принимают высоту отскока бойка.

Для хрупких горных пород твёрдость определяют по формуле [11, разд. 18, с. 165]

$$p_{\text{ш}} = \frac{F}{S_{\text{ш}}}, \quad (6.5)$$

где $p_{\text{ш}}$ – твёрдость при испытании на вдавливание штампа, кг/мм²;
 F – нагрузка в момент общего хрупкого разрушения породы, кгс;
 $S_{\text{ш}}$ – площадь плоского основания круглого штампа, мм².

Твёрдость пород $p_{\text{ш}}$ всегда выше предела прочности при одноосном сжатии $\sigma_{\text{сж}}$, так как она соответствует прочности породы при сложном всестороннем (объёмном) сжатии, причём характер объёмного сжатия зависит от упругих и пластических свойств породы.

В общем виде установлено [13, 14, п. 4.3], что

$$p_{\text{ш}} = k \sigma_{\text{сж}}, \quad (6.6)$$

где $p_{\text{ш}}$ – твёрдость при испытании на вдавливание штампа, кг/мм²;
 k – коэффициент пропорциональности между твёрдостью $p_{\text{ш}}$ и пределом прочности при сжатии породы $\sigma_{\text{сж}}$.

Исследованиями [13, 14, п. 4.3] установлено, что с ростом пластичности породы величина коэффициента k уменьшается с 20 до 5, т. е. численные значения твёрдости приближаются к значениям $\sigma_{\text{сж}}$.

Также установлено, что для изверженных пород $k \approx 8,8 \div 10,0$, для глин и глинистых сланцев $k \approx 3 \div 18$, для песчаников $k \approx 2 \div 20$, для карбонатных пород $k \approx 5 \div 12$.

Твёрдость пород указывает на их сопротивляемость разрушению при воздействии, например, коронок бурового инструмента, зубцов проходческих и очистных комбайнов и поэтому существенно влияет на производительность горного оборудования.

6.3.1.2 Контактная прочность горных пород

Контактная прочность горной породы – параметр, характеризующий сопротивляемость поверхностного слоя горной породы разрушению при внедрении индентора в необработанную поверхность (ГОСТ Р 50544–93 [39]).

Понятие *контактной прочности* горных пород аналогично понятию их *твёрдости* и методы их определения сходны.

Отличие заключается в том, что при определении показателя *контактной прочности* породы поверхность образца, в которую вдавливают пуансон, предварительно не обрабатывают, а при определении *твёрдости* породы – её шлифуют.

Наличие шероховатостей поверхности приводит к снижению сопротивления породы разрушению при вдавливании пуансона.

Контактную прочность горных пород p_k определяют путём статического вдавливания цилиндрического *пуансона* (штампа) с плоским основанием (рис. 6.3) и диаметром 2–3 мм в нешлифованную поверхность образца породы.



Рис. 6.3 – Общий вид стального цилиндра с пуансоном для определения контактной прочности пород

Такой метод определения контактной прочности в 1960-х годах разработали и исследовали в Институте горного дела им. А. А. Скочинского проф. Л. И. Барон, Л. Б. Глатман и др. [13, 14, п. 4.3].

Показатель *контактной прочности* p_k (кгс/мм²) представляет собой отношение предельной нагрузки P в момент хрупкого разрушения (образования лунки – выкола) породы к площади основания пуансона S_{Π} и может быть определён по формуле [11, разд. 18, с. 169]

$$p_k = \frac{F}{S_{\Pi}}, \quad (6.7)$$

где p_k – контактная прочность, кгс/мм²;

F – предельная нагрузка на породу через пуансон в момент хрупкого разрушения (выкола лунки), кгс¹;

S_{Π} – площадь плоского основания круглого пуансона, мм².

Площадь плоского основания круглого пуансона можно вычислить по формуле

$$S_{\Pi} = \frac{\pi \cdot d_{\Pi}^2}{4}, \quad (6.8)$$

где S_{Π} – площадь плоского основания круглого пуансона, мм²;

d_{Π} – диаметр плоского основания круглого пуансона, мм;

π – число "пи" (для технических расчётов можно применять значение $\pi = 3,14$).

Контактную прочность можно определить для всех горных пород, кроме высокопластичных и очень пористых, т. к. они не разрушаются хрупко при внедрении пуансона.

Так как контактная прочность горных пород p_k более соответствует прочности пород при всестороннем (объёмном) сжатии, она всегда выше предела их прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$.

¹ В настоящей лабораторной работе сохранены единицы измерения, принятые в классификации контактной прочности горных пород по Л. И. Барону.

В общем виде можно написать, что

$$p_k = K \cdot \sigma_{сж}, \quad (6.9)$$

где K – коэффициент пропорциональности между контактной прочностью p_k и пределом прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$ породы.

Выполненные под руководством проф. **Л. И. Барона** исследования [11, разд. 18, с. 169] показали, что справедливо соотношение

$$p_k \approx 0,62 p_{ш}, \quad (6.10)$$

где p_k – контактная прочность горных пород, кгс/мм²;
 $p_{ш}$ – значение твёрдости горных пород при испытании на вдавливание штампа, кгс/мм².

Л. И. Барон предложил разделить все горные породы по величине контактной прочности на 12 классов (табл. Д.12).

Значения контактной прочности некоторых горных пород (по проф. Л. И. Барону), определённые в лаборатории механических способов разрушения горных пород ИГД им. А. А. Скочинского [11, разд. 18, с. 170], приведены в таблице Д.13.

Исследования [11, разд. 18, с. 169-170] показали, что значения максимальных и минимальных показателей контактной прочности при повторных определениях на одной и той же породе существенно отличаются.

Так, соотношения между максимальными и минимальными значениями контактной прочности некоторых пород составили:

- для песчаников 1,31–1,71
- для песчанистых и глинистых сланцев 1,75–2,10
- для известняков 1,49–2,28

Контактная прочность пород является критерием их разрушаемости резцовым и шарошечным инструментами буровых, про-

ходческих и выемочных машин и механизмов. Процесс разрушения этими инструментами осуществляют при местных контактных воздействиях, когда глубина проникновения инструмента в породу невелика и разрушение породы происходит в её поверхностном слое.

6.3.2 Оборудование, приборы, инструменты

- 1) Пресс гидравлический П-10 (рис. 3.5).
- 2) Пуансон стальной цилиндрический.
- 3) Приспособление для крепления пуансона.
- 4) Линейка с делениями.
- 5) Штангенциркуль.
- 6) Инвентарь для уборки рабочего места.
- 7) Журнал для записи результатов экспериментов.
- 8) Письменные принадлежности.

а) Пуансон, изготовленный из закаленной марки стали, с плоским основанием (см. рис. 6.3) диаметром $d_{\text{п}} = 2$ мм – при испытании плотных и однородно пористых пород или $d_{\text{п}} = 3$ мм – для пород с величиной зерна более 0,25 мм.

Пуансоны из твёрдого сплава со сменным наконечником используют для испытания крепких пород с контактной прочностью более 150–160 кгс/мм² (см. табл. Д.12). Такие размеры площади основания пуансонов примерно соответствуют площади острия зубьев шарошечных долот.

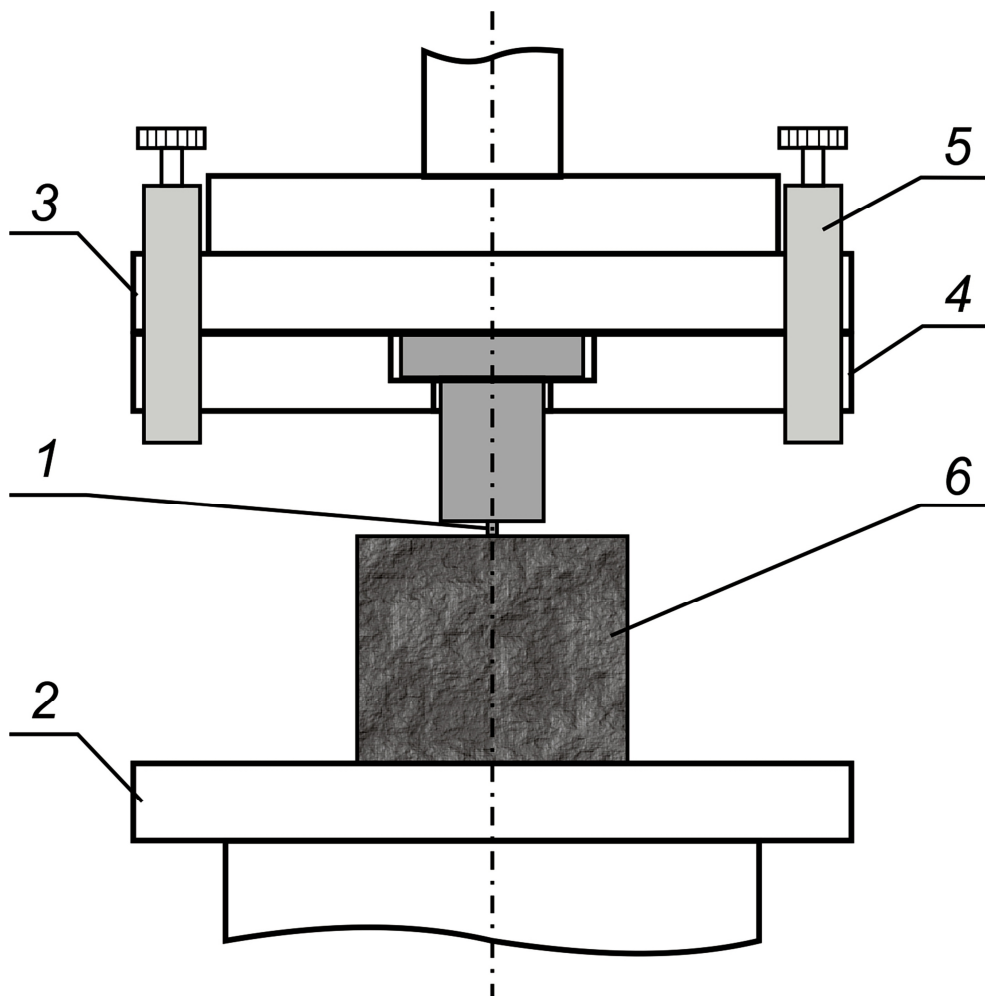
б) Приспособление для крепления пуансона к верхней плите пресса, состоящее из металлической плиты с отверстием для пуансона и четырёх струбцин изображено на рисунке 6.4.

6.3.3 Подготовка образцов горной породы для испытаний

Испытания проводят на образцах цилиндрической, кубической или полуправильной формы, имеющих две приблизительно параллельные поверхности, либо необработанных вовсе, либо подверженных несложной грубой околке или обдирке на абразивном круге.

Расстояние между параллельными поверхностями образцов (высота) должно быть не менее 50 мм, ширина или диаметр – 60–100 мм.

Обучающиеся каждой бригады определяют контактную прочность 2–3 образцов породы одного вида.



- 1 – пуансон;
- 2 – нижняя плита пресса;
- 3 – верхняя плита пресса;
- 4 – металлическая плита с отверстием для пуансона;
- 5 – струбцины;
- 6 – образец породы

Рис. 6.4 – Схема приспособления для крепления пуансона к верхней плите пресса и расположения образца породы

6.3.4 Порядок выполнения работы

1) Измерить диаметр плоского основания круглого пуансона $d_{\text{п}}$ (см. рис. 6.3).

2) Прикрепить, как показано на рисунке 6.4, цилиндрический пуансон 1 к верхней плите пресса 3 с помощью металлической плиты 4 с отверстием для пуансона и четырёх струбцин 5.

3) Описать исследуемые образцы горных пород (по лабораторной работе № 1).

4) Измерить штангенциркулем или линейкой средние значения высоты $h_{\text{к}}$ и среднего диаметра $d_{\text{к}}$ каждого образца и записать их. Зарисовать схему (сфотографировать) внешнего вида образцов с указанием размеров.

5) Наметить карандашом на обеих параллельных поверхностях образца точки, совпадающие с осью направления вдавливания пуансона, перпендикулярной поверхности образца. Причём расстояние между соседними осями вдавливания пуансона и до края образца на каждой поверхности должно быть не менее 10 мм.

6) Поместить между нижней плитой 2 пресса (см. рис. 6.4) и пуансоном образец породы 6 так, чтобы ось пуансона совпала с одной из заранее намеченных точек по п. 5.

7) Вращением маховика регулятора высоты 4 (см. рис. 3.5) опустить верхнюю плиту пресса до момента прикосновения пуансона к поверхности образца породы. При этом пуансон ни в коем случае не должен давить на образец!

8) Включить пресс и произвести вдавливание пуансона в поверхность образца с постоянной скоростью перемещения плиты пресса 6–12 мм/мин.

Нагружение следует производить в один приём до момента разрушения породы под пуансоном, т. е. до образования лунки разрушения. Этот момент можно определить по резкому падению давления пресса, отображаемому на его стрелочном индикаторе 5 (см.

рис. 3.5). После чего сразу же прекратить перемещение плиты прес-са, выключив электродвигатель его гидропривода.

Вращением маховика регулятора высоты 4 поднять верхнюю плиту 3 прес-са для свободного перемещения образца.

Включение, регулировку подачи, давления и выключение прес-са может выполнять только руководитель работы!

9) На стрелочном индикаторе прес-са 5 (см. рис. 3.2) отметить положение остановившейся ведомой стрелки 6 и по шкале измерения определить предельную нагрузку, при которой произошло разрушение породы при её испытании (*одно испытание – одна лунка*).

10) Записать значение величины предельной нагрузки F в таблицу 6.1 в строки, соответствующие номеру каждого i -го из n испытаний.

11) Измерить параметры каждой образованной i -й лунки: средний диаметр $d_{\text{л}}$, максимальную глубину $h_{\text{л}}$.

12) Для каждого i -го из $n = 10\text{--}15$ испытаний образцов породы выполнить действия, указанные выше в пунктах 5–11, для каждой из двух поверхностей образца.

13) После выполнения всех запланированных испытаний образцов породы внимательно осмотреть и зарисовать полученные в них лунки (в виде схем в плане и в разрезе) с указанием формы, размеров и глубины, а также направления разрушающей силы.

14) После окончания эксперимента привести пресс и рабочее место в чистое состояние с использованием инвентаря для уборки 1 (см. рис. 3.5).

Таблица 6.1 – Результаты определения контактной прочности породы

Номер испы- тания (лунки)	Размеры основания пуансона		Разрушающая сила F , кгс	Размеры лунки, мм		Контактная прочность p_k		Параметры статистики		Примечания
	диаметр d_n , мм	площадь S_n , мм ²		диаметр $d_{л}$	глубина $h_{л}$	кгс/мм ²	Па	$(p_{ki} - \bar{p}_k)$	$(p_{ki} - \bar{p}_k)^2$	
1										
2										
3										
4										
5										
...										
i										
...										
n										
Среднее арифметическое значение $\bar{p}_k$								-	Σ	

6.3.5 Аналитическая обработка результатов испытаний

6.3.5.1 Определение и анализ значений контактной прочности породы

1) Вычислить по формуле (6.8) площадь основания круглого пуансона $S_{\text{п}}$.

2) Вычислить величину контактной прочности горной породы p_k для каждого i -го из n испытаний по формуле (6.7).

3) Перевести значения контактной прочности из кгс/мм² в Па, используя соотношение из табл. В.6 (ГОСТ 8.417–2002. Единицы величин [38]):

$$1 \text{ кгс/мм}^2 = 9,81 \times 10^6 \text{ Па} \approx 10 \text{ МПа} \quad (6.11)$$

4) Определить, к какому классу по Л. И. Барону можно отнести испытанную породу, сравнивая средние арифметические значения полученной в результате эксперимента контактной прочности со значениями в табл. Д.12.

5) Выделить максимальное и минимальное значения показателей контактной прочности при повторных испытаниях одной и той же породы, вычислить соотношение между максимальными и минимальными значениями с точностью до сотых долей единицы.

6) Пояснить влияние вещественного состава, структуры и текстуры породы на:

- характер разрушения образцов;
- геометрические размеры полученных лунок;
- возможные причины получения различных значений контактной прочности одной и той же породы и размера соотношения между максимальными и минимальными значениями.

6.3.5.2 Статистическая обработка результатов испытаний

1) В соответствии с разделом Г.2 провести расчёты нижеприведённых показателей статистики для значений контактной прочности:

- минимальное и максимальное значения;
- среднее арифметическое;
- средняя квадратическая погрешность;
- стандартный доверительный интервал;
- величина абсолютной погрешности;
- коэффициент вариации;
- записать значения доверительного интервала в виде выражения (Г.7) с указанием надёжности.

2) Оценить надёжность и погрешность полученных результатов в соответствии с таблицами Г.1 и Г.2.

Количество испытаний (скалываний) n должно обеспечивать надёжность результатов α не ниже 80 % при относительной погрешности ε не более 30 %.

Записать результаты статистических расчётов и значений найденных в справочных таблицах приложения Г показателей.

3) По результатам выполненных испытаний и расчётов сделать краткие выводы и подтвердить их вычисленными статистическими показателями.

6.3.6 Составление отчёта о лабораторной работе

1) Описать наименование и строение испытанной породы по лабораторной работе № 1.

2) Результаты испытания образцов породы и определения их контактной прочности следует поместить в отчёт о лабораторной работе в виде текстового описания, численных значений всех измеренных показателей и выполненных на их основе расчётов, таблиц, с иллюстрированием самостоятельно выполненными схемами и фотографиями.

3) Все расчёты должны быть подробно приведены в отчёте о лабораторной работе.

4) В конце отчёта поместить краткие выводы о полученных при выполнении работы результатах, новых знаниях и навыках.

Порядок и формат составления отчёта о лабораторной работе изложен в п. Б.1.

6.3.7 Контрольные вопросы

- 1) Что называют контактной прочностью горной породы?
- 2) Какие внутренние и внешние факторы влияют на контактную прочность горных пород?
- 3) Какое напряжённое состояние характеризует в основном контактная прочность породы?
- 4) В чём отличие контактной прочности от твёрдости пород?
- 5) Что больше по величине: контактная прочность или твёрдость пород, какая связь между ними?
- 6) В каких технологических операциях в горном деле необходимо учитывать контактную прочность горных пород?
- 7) Как учитывают контактную прочность горных пород при выборе бурового инструмента?
- 8) Какое оборудование использовали в лабораторной работе для определения контактной прочности пород?
- 9) Какие требования предъявляют к пуансонам для определения контактной прочности горных пород?
- 10) Как классифицировал горные породы по величине контактной прочности проф. **Л. И. Барон**?
- 11) Приведите примеры значений контактной прочности горных пород 4–5 видов.

Лабораторная работа № 12**6.4 УГОЛ ЕСТЕСТВЕННОГО ОТКОСА И КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ РАЗРЫХЛЕННОЙ ГОРНОЙ ПОРОДЫ**

Цель работы: определения угла естественного откоса и коэффициента трения разрыхленной горной породы.

6.4.1 Теоретические основы

Рыхлую, разрушенную горную породу и горную массу (ГОСТ Р 50544–93 [39]), кроме прочего, характеризуют углом естественного откоса, углом и коэффициентом трения.

6.4.1.1 Угол естественного откоса разрыхленной породы

Угол естественного откоса φ_0 – это угол между свободной поверхностью рыхлой горной массы и горизонтальной плоскостью¹.

Профессор Л. И. Барон и его соавторы [11, с. 49] **углом естественного откоса** сыпучего тела (породы) называют угол, образованный при пересечении свободной поверхности откоса материала плоскостью, проведённой перпендикулярно к основанию сыпучего тела и направленной по касательной к его нижней кромке (рис. 6.5, б).

С величиной этого угла связано условие предельного равновесия частиц на *свободной поверхности* сыпучего тела.

Угол естественного откоса зависит от хрупкости частиц материала и от его влажности (а также от формы и характера поверхности частиц, плотности, гранулометрического состава материала).

При определении **угла естественного откоса** применяют способы формирования *свободной поверхности* путём насыпания откоса разрыхлённых горных пород падающими или скользящими сверху частицами горной массы.

¹ Физика горных пород. Горное давление. Лабораторный практикум : учеб. пособие / С. Ф. Алексеенко, В. П. Мележик. – Киев : Выща шк., 1990. – 183 с. : ил. – (с. 47–52).

$d_{\text{ц}}$ – внутренний диаметр цилиндра;
 $h_{\text{ц}}$ – внутренняя высота цилиндра;
 $d_{\text{к}}$ – диаметр породного конуса;
 $h_{\text{к}}$ – высота породного конуса

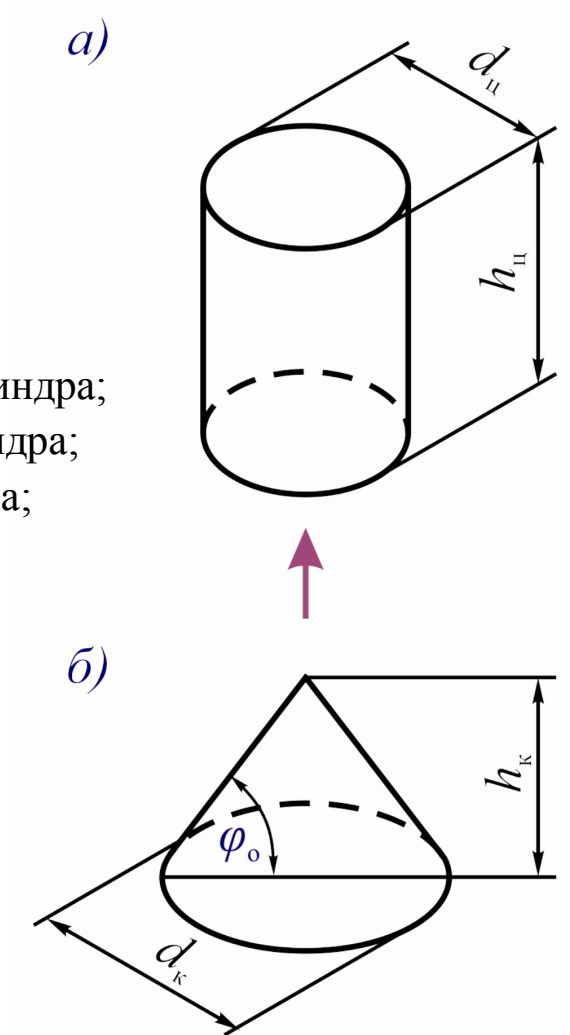


Рис. 6.5 – Определение угла естественного откоса горных пород с помощью полого цилиндра:

a – схема внутреннего объёма цилиндра; *б* – породный конус

Профессор **Л. И. Барон** и его соавторы [11, с. 49] предложили один из самых простых способов определения угла естественного откоса горной массы.

В полый цилиндр без дна (см. рис. 6.5, *a*), установленный на горизонтальной поверхности, насыпают породу, после чего медленно поднимают цилиндр и замеряют высоту и диаметр образовавшегося породного конуса (см. рис. 6.5, *б*).

Примерные размеры полого цилиндра без дна:

- высота цилиндра – 1 дм;
- диаметр цилиндра – 1,13 дм;
- площадь основания ≈ 1 дм²;
- объём – 1 дм³.

Объём горной массы как в цилиндре $V_{\text{ц}}$, так и в породном конусе $V_{\text{к}}$ остается одним и тем же. Следовательно,

$$V_{\text{ц}} = V_{\text{к}}. \quad (6.12)$$

Объём цилиндра равен

$$V_{\text{ц}} = \frac{\pi d_{\text{ц}}^2}{4} h_{\text{ц}}, \quad (6.13)$$

где $d_{\text{ц}}$ – диаметр цилиндра, см;

$h_{\text{ц}}$ – высота цилиндра, см.

Объём конуса равен

$$V_{\text{к}} = \frac{1}{3} \frac{\pi d_{\text{к}}^2}{4} h_{\text{к}}, \quad (6.14)$$

где $d_{\text{к}}$ – диаметр конуса, см;

$h_{\text{к}}$ – высота конуса, см.

Тангенс угла естественного откоса φ_0 в образовавшемся конусе составляет

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{2h_{\text{к}}}{d_{\text{к}}}. \quad (6.15)$$

Угол естественного откоса φ_0 (градус) испытанной пробы горной породы будет равен

$$\varphi_0 = \arctg[tg\varphi_0]. \quad (6.16)$$

6.4.1.2 Угол и коэффициент трения разрыхленной породы

Различают *коэффициент трения движения* и *коэффициент трения покоя* разрыхлённой горной породы [11, с. 48–49].

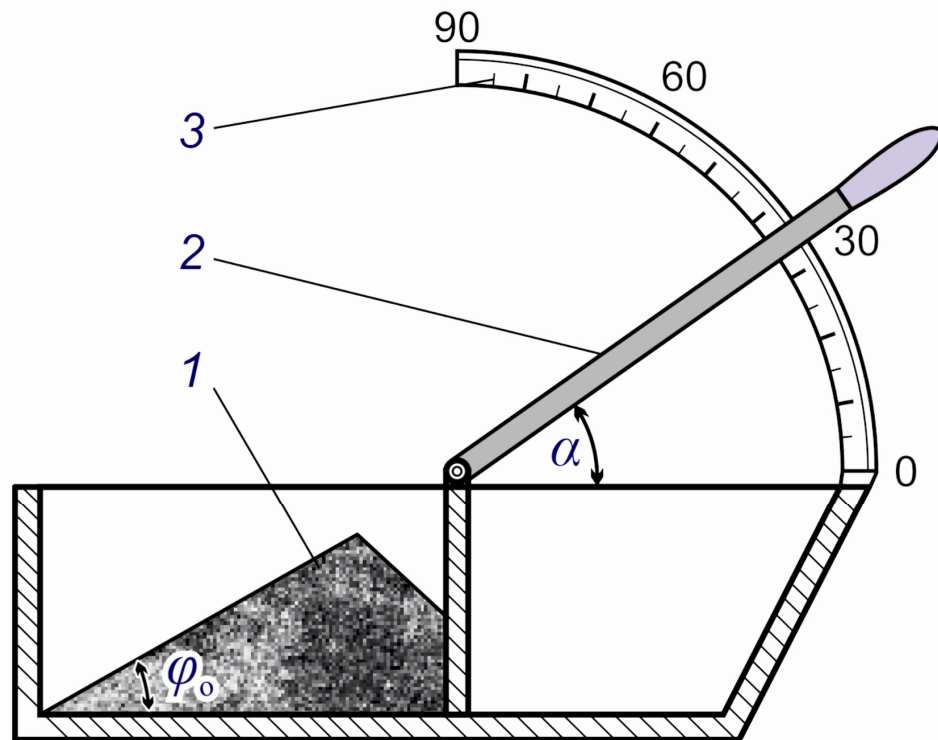
В настоящей лабораторной работе определяют *коэффициент трения покоя* $k_{тр}$, который зависит от *угла трения* $\alpha_{тр}$ горной массы о поверхность скольжения и может быть определён из выражения [11, с. 48–49]

$$k_{тр} = tg\alpha_{тр}, \quad (6.17)$$

где $k_{тр}$ – коэффициент трения разрыхленной горной породы;
 $\alpha_{тр}$ – угол трения разрыхленной горной породы, градус.

Величину *угла трения покоя* определяют с помощью **трибометра** (рис. 6.6) – прибора, имеющего поверхность скольжения 2, изготовленную из материала, во взаимодействии с которым необходимо определить *коэффициент трения* породы, и угол наклона которой α можно изменять от 0° до 90° [11, с. 48–49].

Для определения *угла трения покоя* $\alpha_{тр}$ разрыхлённую горную породу насыпают на поверхность скольжения. Затем поверхность скольжения наклоняют на угол α , равный *углу трения* $\alpha_{тр}$, до момента, когда *начнётся скольжение* породы по этой плоскости.



1 – разрыхлённая порода;

2 – поверхность скольжения породы;

3 – угломерная шкала трибометра;

α – угол наклона поверхности скольжения породы, градус;

φ_0 – угол естественного откоса разрыхлённой породы, градус

Рис. 6.6 – Трибометр для определения угла естественного откоса, угла и коэффициента трения разрыхлённых горных пород

6.4.2 Приборы, инструменты, материалы

- 1) Полый цилиндр без дна (см. рис. 6.5, а).
- 2) Лоток для высыпания породы из цилиндра.
- 3) Листы бумаги (30×30 см) с миллиметровой квадратной разметкой.
- 4) Трибометр с двумя стеклянными стенками (см. рис. 6.6).
- 5) Сменные поверхности скольжения для трибометра.
- 6) Угломер (транспортир).
- 7) Линейка с делениями.

- 8) Штангенциркуль.
- 9) Совок для пересыпания разрыхлённой породы.
- 10) Лоток для сбора просыпанной разрыхлённой породы.
- 11) Рабочий журнал для записи результатов экспериментов.
- 12) Письменные принадлежности.
- 13) Инвентарь для уборки рабочего места.

6.4.3 Подготовка образцов горных пород для испытаний

1) Из монолитных *штуфов* или *кернов* (ГОСТ Р 50544–93) [39], высушенных до постоянного веса, изготавливают *пробы* нескольких видов пород в виде *кусков разрушенной* породы неправильной формы с несколькими размерными фракциями, которые получают путём просеивания на ситах, например: 2, 5, 10 мм.

2) Каждая проба массой 3,0–5,0 кг помещена в специальный контейнер.

6.4.4 Порядок выполнения экспериментов

6.4.4.1 Определение угла естественного откоса разрыхлённых пород с помощью полого цилиндра

1) Определить фактические внутренние размеры полого цилиндра (рис. 6.5, а): диаметр $d_{\text{ц}}$ и высоту цилиндра $h_{\text{ц}}$ (см).

2) Каждому звену обучающихся получить от руководителя работы по *три вида* разрушенных пород, для каждого из которых изготовлены по *две пробы*, состоящие из кусков разной размерной фракции (средние диаметры не равны).

3) Определить *наименование* породы каждой пробы.

4) Внимательно осмотреть каждую пробу породы; по внешнему виду определить и описать в рабочем журнале, а затем и в отчёте о лабораторной работе особенности её строения (см. раздел 1):

- цвет, структура, текстура;
- к какой группе по *происхождению* можно отнести горные породы (*магматические, метаморфические, осадочные*).

- 5) Пронумеровать каждую пробу разрушенной породы в произвольном порядке.
- 6) Измерить диаметры кусков породы $d_{\text{п}}$: мин. – макс., и определить их среднее значение для соответствующей фракции.
- 7) Сделать зарисовки (или фотографии) общего вида образцов каждой породы и лабораторной установки.
- 8) В специальный лоток уложить лист с миллиметровой квадратной разметкой, в центре которого установить полый цилиндр без дна в соответствии со схемой на рис. 6.5, а.
- 9) Насыпать пробу разрушенной породы с номером 1 в цилиндр до его верхнего края.
- 10) Медленно поднять цилиндр вертикально вверх для образования на миллиметровой бумаге в лотке конуса породы.
- 11) Измерить высоту $h_{\text{к}}$, средний диаметр $d_{\text{к}}$ и угол естественного откоса φ_0 у образовавшегося породного конуса (см. рис. 6.5, б).
- 12) Расчитать тангенс угла естественного откоса $\text{tg}\varphi_0$ по формуле (6.15).
- 13) Расчитать угол естественного откоса φ_0 по формуле (6.16).
- 14) Все результаты измерений и расчётов записать в соответствующие ячейки таблицы 6.2.
- 15) Сравнить значения угла естественного откоса φ_0 , полученные путём прямого измерения и рассчитанные по формуле (6.16). Сделать выводы о причинах их различия, если оно обнаружено.
- 16) Для каждой из оставшихся проб породы проделать операции в соответствии с пунктами 3–15 указанного выше порядка выполнения эксперимента.
- 17) В процессе проведения испытаний и после их окончания с помощью специального инвентаря вернуть породные пробы в исходные контейнеры, очистить поверхности рабочих столов, инструментов и оборудования от породной мелочи и пыли.

[illegible]

6.4.4.2 Определение угла скольжения и коэффициента трения горных пород с помощью трибометра

- 1) Каждому звену обучающихся получить от руководителя работы по 3–4 вида разрушенных пород, для каждого из которых изготовлены *пробы*, состоящие из кусков одной размерной фракции (средние диаметры равны).
- 2) Определить *наименование* породы каждой пробы.
- 3) Внимательно осмотреть породу каждой пробы; по внешнему виду определить и описать в рабочем журнале, а затем и в отчёте о лабораторной работе особенности её строения (см. раздел 1):
 - цвет, структура, текстура;
 - к какой группе по *происхождению* можно отнести горные породы (*магматические, метаморфические, осадочные*).
- 4) *Пронумеровать* каждую пробу разрушенной породы в произвольном порядке.
- 5) Измерить диаметры кусков породы $d_{\text{п}}$: мин. – макс., и определить их среднее значение для соответствующей фракции.
- 6) Осмотреть и описать наименование, материал, основные размеры и особенности сменной поверхности скольжения.
- 7) На плоскость трибометра (рис. 6.6, поз. 2), установленную горизонтально ($\alpha = 0$), прикрепить лист сменной поверхности скольжения из того материала, во взаимодействии с которым необходимо определить угол трения породы $\alpha_{\text{тр}}$.
- 8) Сделать зарисовки (или фотографии) общего вида образцов каждой породы и лабораторной установки.
- 9) Пробу исследуемой породы насыпать на лежащую в горизонтальной плоскости сменную поверхность скольжения из соответствующего материала.
- 10) Медленно поднимать плоскость трибометра с поверхностью скольжения вверх путём её наклона на угол α – до момента, когда *начнётся скольжение породы* по этой поверхности вниз.
- 11) Поднятие плоскости трибометра вверх остановить в момент, когда вся разрыхленная порода пересыпится в приёмный лоток с образованием в нём кучи с углом естественного откоса породы φ_0 .
- 12) Измерить с помощью угломера или по шкале трибометра угол наклона плоскости трибометра α в момент её остановки.

13) Определить угол трения породы $\alpha_{\text{тр}}$ о плоскость скольжения из соответствующего материала, учитывая, что он будет равен зафиксированному углу наклона плоскости трибометра: $\alpha_{\text{тр}} = \alpha$.

14) Измерить *угол естественного откоса* φ_0 (см. рис. 6.6) посредством угломера сквозь стеклянные стенки с двух сторон трибометра. Определить его среднее значение.

15) Рассчитать коэффициент трения $k_{\text{тр}}$ о поверхность скольжения из соответствующего материала, используя угол трения $\alpha_{\text{тр}}$, по формуле (6.17).

16) Все результаты измерений и расчётов записать в соответствующие ячейки таблицы 6.3.

17) Для каждой из полученных проб породы выполнить эксперимент в соответствии с пунктами 5–16 указанного выше порядка выполнения эксперимента.

18) В процессе проведения испытаний и после их окончания с помощью специального инвентаря вернуть породные пробы в исходные контейнеры, очистить поверхности рабочих столов, инструментов и оборудования от породной мелочи и пыли.

6.4.5 Обработка результатов эксперимента, составление отчёта

1) Описать наименование и строение испытанных пород по лабораторной работе № 1.

2) Результаты испытаний проб горных пород, полученные при определении их *углов естественного откоса* (см. табл. 6.2), *углов трения* и *коэффициентов трения* (см. табл. 6.3), обучающийся помещает в отчёт о лабораторной работе в виде текстового описания, численных значений всех измеренных показателей и выполненных на их основе расчётов, с иллюстрированием самостоятельно выполненными, графиками схемами и фотографиями.

3) Все промежуточные расчёты должны быть подробно приведены в отчёте о лабораторной работе.

Таблица 6.3 – Результаты измерений угла трения и вычислений коэффициента трения горных пород с помощью трибометра

Номер пробы	Наименование породы	Материал плоскости скольжения	Результаты измерений			Результаты вычислений
			диаметр кусков во фракции $d_{п}$, мм от – до среднее	угол естественного откоса φ_0 , градус	угол трения (скольжения) $\alpha_{тр}$, градус	коэффициент трения $k_{тр}$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
...						

4) Построить соответствующие диаграммы (см. п. Б.1) и оценить по ним:

- как зависят значения *углов естественного откоса* φ_0 разрыхленных горных пород от их наименования (происхождения) и размера среднего диаметра кусков d_{Π} во фракции;

- как зависят значения *угла трения* $\alpha_{\text{тр}}$ и *коэффициента трения* $k_{\text{тр}}$ разрыхлённых горных пород от их наименования (происхождения) и материала сменной поверхности скольжения.

5) В конце отчёта обучающийся делает краткие выводы о полученных при выполнении работы результатах, новых знаниях и навыках.

Порядок и формат составления отчёта о лабораторной работе изложен в п. Б.1.

6.3.6 Контрольные вопросы

1) Что называют углом естественного откоса разрушенных пород?

2) Какие факторы влияют на величину угла естественного откоса разрыхлённых пород?

3) Какие способы определения угла естественного откоса горной массы применяют в лабораторных условиях?

4) Как определяют угол естественного откоса разрыхлённых горных пород с применением полого цилиндра?

5) Как определяют угол естественного откоса разрыхлённых горных пород с применением трибометра?

6) В каких горнотехнических расчётах используют величину угла естественного откоса разрыхлённых горных пород?

7) Каким образом определяют величину угла трения покоя разрыхлённых горных пород с помощью трибометра?

8) До какого угла необходимо поднимать плоскость трибометра с поверхностью скольжения при определении угла трения покоя разрыхлённых горных пород в настоящей лабораторной работе?

- 9) Как зависит угол трения породы о плоскость скольжения из соответствующего материала от зафиксированного угла наклона плоскости трибометра в настоящей лабораторной работе?
- 10) Какие факторы влияют на величину угла трения разрыхлённых пород?
- 11) В каких горнотехнических задачах используют значения угла трения разрыхлённых горных пород?
- 12) Что называют коэффициентом трения покоя разрыхлённой горной породы и как его определить?
- 13) От какого основного параметра зависит коэффициент трения разрыхлённой горной породы?
- 14) Какие основные свойства поверхности скольжения влияют на коэффициент трения покоя разрыхлённой горной породы?
- 15) Для определения каких свойств горных пород и каким образом используют трибометр?
- 16) В каких горнотехнических задачах используют коэффициент трения разрыхлённых горных пород?

* * *

ИНФОРМАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ

1. Выемочные горные машины : учебное пособие / **Н. А. Филимонов**. – Москва : Углетехиздат, 1958. – 428 с.
2. Геомеханика : учебное пособие / **Э. В. Каспарьян, А. А. Козырев, М. А. Иофис, А. Б. Макаров**. – Москва : Высш. шк., 2006. – 503 с. : ил.
3. Горная энциклопедия. В 5 томах. Том 3. Кенган – Орт / главный редактор **Е. А. Козловский**. – Москва : Советская энциклопедия, 1987. – 592 с.
4. Горная энциклопедия. В 5 томах. Том. 4. Ортин – Социосфера / главный редактор **Е. А. Козловский**. – Москва : Советская энциклопедия, 1989. – 623 с.
5. Денситометр горных пород ДГП : инструкция по эксплуатации / Завод геофизического приборостроения. – Уфа, 1968. – 8 с. : ил.
6. Измеритель магнитной восприимчивости ИМВ-2-1-0-00 : выпускной аттестат, техническое описание и инструкция по эксплуатации / Киевский опытно-экспериментальный завод геофизического приборостроения. – Киев, 1972. – 16 с.
7. История горного и взрывного дела : учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Взрывное дело» направления подготовки «Горное дело» / **Б. Н. Кутузов**. – Москва : Изд-во Москов. гос. горн. ун-та, Горная книга, 2008. – 414 с. : ил. – (Взрывное дело ; 5). – Текст (визуальный) : непосредственный. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=99658&sr=1> (дата обращения: 08.06.2021). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст (визуальный) : электронный.
8. Коэффициенты крепости горных пород / **Л. И. Барон**. – Москва : Наука, 1972. – 176 с.
9. Методы ведения взрывных работ. Часть 1. Разрушение горных пород взрывом : учебник для вузов / **Б. Н. Кутузов**. – 2-е изд., стер. – Москва : Горная книга, Изд-во Москов. гос. горн. ун-та, 2009. – 471 с. – (Взрыв. дело). – Текст (визуальный) : непосредств. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=229029&sr=1> (дата

обращения: 08.02.2021). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Текст (визуальный) : электронный. – Информация в п. 1.2.

10. Обзор горно-геологических и геомеханических условий эксплуатации железорудных месторождений Горной Шории и Хакасии, склонных к горным ударам (Техническое описание) / **А. В. Дерюшев, В. И. Бояркин, А. М. Нохрин, П. В. Сдобников, А. П. Политов** ; Восточный научно-исследовательский горнорудный институт (ВостНИГРИ). – Новокузнецк, 1988. – 41 с.

11. Определение свойств горных пород : справочное пособие / **Л. И. Барон, Б. М. Логунцов, Е. З. Позин**. – Москва : Госгортехиздат, 1962. – 332 с.

12. Основы горного дела : учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению «Горное дело» (квалификация – бакалавр техники и технологии) и по специальности «Физические процессы горного или нефтегазового производства» направления подготовки «Горное дело» / **В. И. Городниченко, А. П. Дмитриев**. – Москва : Горная книга, Изд-во Москов. гос. горн. ун-та, 2008. – 464 с. : ил.

13. Основы физики горных пород : учебник для вузов / **В. В. Ржевский, Г. Я. Новик**. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Недра, 1984. – 359 с. : ил.

14. Основы физики горных пород : учебник для студентов горных специальностей вузов / **В. В. Ржевский, Г. Я. Новик**. – 5-е изд. – Москва : Кн. дом «ЛИБРОКОМ», 2010. – 360 с. – (Классика инженер. мысли. Горн. дело).

15. Открытые горные работы : справочник / **К. Н. Трубецкой, М. Г. Потапов, К. Е. Веницкий, Н. Н. Мельников** [и др.]. – Москва : Горное бюро, 1994. – 590 с. : ил.

16. Руководство эксплуатации микроскопа МПБ-2. – Текст. Изображение (визуальные) : электронные // Микроскопы и комплектующие : [сайт] / Торгово-выставочный комплекс «Город Хобби». – URL: http://www.mbs10.ru/instr_mpb-2.html (дата обращения: 08.06.2021).

17. Свойства горных пород и методы их определения / **Е. И. Ильницкая, Р. И. Тедер, Е. С. Ватолин, М. Ф. Кунтыш** ; под редакцией **М. М. Протодьяконова**. – Москва : Недра, 1969. – 392 с.

18. Справочник взрывника / **Б. Н. Кутузов, В. М. Скоробогатов, И. Е. Ерофеев** [и др.] ; под общей редакцией **Б. Н. Кутузова**. – Москва : Недра, 1988. – 511 с.

19. Структуры и текстуры магматических и метаморфических горных пород : учебно-методический комплекс / **А. И. Чернышев** ; Томский государственный университет, Институт дистанционного образования. – Томск, 2007. – 1 DVD-ROM (25 Mb) ; 12 см ; в контейнере 14×13 см. – Систем. требования: ПК Intel Celeron 1,8 GHz, 512 Mb RAM; Windows XP и выше; SVGA, SB, DVD-ROM 8×. – Заглавие с титул. экрана. – Текст (визуальный) : электронный.

20. Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна : справочник / **Г. Г. Штумпф, Ю. А. Рыжков, В. А. Шаламанов, А. И. Петров**. – Москва : Недра, 1994. – 447 с. : ил. – Информация в п. 2.2.

21. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы / **Г. Корн, Т. Корн** ; под общей редакцией **И. Г. Арамановича**. – Изд. 5-е, перевод со второго американского переработанного изд. – Москва : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984. – 832 с.

Нормативные документы

22. ГОСТ Р 2.105–2019. Общие требования к текстовым документам : утверждён и введён в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 апреля 2019 г. № 175-ст : дата введения 2020-02-01 : взамен ГОСТ 2.105–95 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием "Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия" (ФГУП "СТАНДАРТИНФОРМ"). – Москва : Стандартинформ, 2019. – Единая система конструкторской документации (ЕСКД).

23. ГОСТ 2093–82. Топливо твёрдое. Ситовый метод определения гранулометрического состава : дата введения 1983-01-01. – Москва : Изд-во стандартов, 2001. – 18 с.

24. ГОСТ 21153.0–75. Породы горные. Отбор проб и общие требования к методам физических испытаний : дата введения 1976-07-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1982. – 3 с.

25. ГОСТ 21153.1–75. Породы горные. Метод определения коэффициента крепости по Протоdjяконову : дата введения 1976-07-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1975. – 3 с.

26. ГОСТ 21153.2–84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии : дата введения 1986-07-01. – Москва : Изд-во стандартов, 2001. – 7 с.

27. ГОСТ 21153.3–85. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении : дата введения 1987-07-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1986. – 14 с.

28. ГОСТ 21153.5–88. Породы горные. Метод определения предела прочности при срезе со сжатием : дата введения 1989-07-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1988. – 7 с.

29. ГОСТ 21153.6–75 Породы горные. Метод определения предела прочности при изгибе : дата введения 1976-07-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1981. – 3 с.

30. ГОСТ 21153.8–88. Породы горные. Метод определения предела прочности при объёмном сжатии : дата введения 1989-07-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1988. – 15 с.

31. ГОСТ 2160–92. Топливо твёрдое минеральное. Методы определения плотности : дата введения 1993-07-01. – Москва : Изд-во стандартов, 2002. – 6 с.

32. ГОСТ 25493–82. Породы горные. Метод определения удельной теплоёмкости и коэффициента температуропроводности : дата введения 1984-01-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1983. – 6 с.

33. ГОСТ 25499–82. Породы горные. Метод определения коэффициента теплопроводности : дата введения 1984-01-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1983. – 6 с.

34. ГОСТ 5180–84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик : дата введения 1985-07-01 : взамен ГОСТ 5180–75, ГОСТ 5181–78, ГОСТ 5182–78, ГОСТ 5183–77. – Москва : Стандартиформ, 2005. – 17 с.

35. ГОСТ 6427–52. Материалы стеновые и облицовочные. Методы определения объёмного и удельного веса : дата введения 01.06.1953. – Москва : Госстандарт СССР, 1952. – 8 с.

36. ГОСТ 7.12–93. Библиографическая запись. Сокращение слов на русском языке. Общие требования и правила : дата введения 01-07-1995 : взамен ГОСТ 7.12–77. – Москва : Изд-во стандартов, 2002. – 12 с. – Система стандартов по информации, библи. и издат. делу.

37. ГОСТ 7.32–2017. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления : утверждён приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 октября 2017 г. № 1494-ст : дата введения 2018-07-01 : взамен ГОСТ 7.32–2001 / разработан Федеральным государственным бюджетным учреждением науки "Всероссийский институт научной и технической информации Российской академии наук". – Москва : Стандартинформ, 2006. – 18 с. – Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу.

38. ГОСТ 8.417–2002. Единицы величин : дата введения 2003-09-01 : взамен ГОСТ 8.417–81. – Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2003. – 28 с. – Гос. система обеспечения единства измерений.

39. ГОСТ Р 50544–93. Породы горные. Термины и определения : дата введения 1994-07-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1993. – 47 с.

40. ГОСТ Р 7.0.3–2006. Издания. Основные элементы. Термины и определения : дата введения 2007-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2006. – 38 с. – Система стандартов по информации, библи. и издат. делу.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

**Безопасность и порядок выполнения
лабораторных работ****А.1 Техника безопасности при выполнении лабораторных работ**

Педагогический работник (далее – руководитель работ) на первом лабораторном занятии дает общие указания по проведению экспериментов, знакомит с правилами поведения обучающихся в лаборатории, требованиями правил техники безопасности, в том числе противопожарной, предупреждает о бережном отношении к лабораторному оборудованию, инструментам, мебели и другому оснащению учебных аудиторий.

Все обучающиеся перед началом работы в лаборатории проходят инструктаж по технике безопасности и расписываются в Журнале регистрации инструктажа по охране труда на рабочем месте.

Обучающиеся выполняют только работы, предусмотренные рабочей программой дисциплины.

Обучающимся во время выполнения лабораторных работ категорически **запрещено**:

- находиться в лаборатории в верхней одежде и размещать личные вещи на оборудовании лаборатории;
- самовольно переходить с одного рабочего места на другое;
- проводить другие работы, не предусмотренные настоящим лабораторным практикумом;
- работать на неисправном и не отвечающем правилам техники безопасности оборудовании;
- приводить в действие лабораторные установки, приборы, электродвигатели и другое оборудование без разрешения руководителя;
- сдуть с лабораторного оборудования породную пыль и мелкие остатки разрушенных образцов породы, сметать их ладонями;
- прикасаться к токоведущим частям приборов и установок даже при отсутствии показаний электроизмерительных приборов;

- включать напряжение без проверки электрической схемы руководителем, оставлять включенную электроустановку без наблюдения;

- прикасаться во время проведения опытов к образцам горных пород, материалам и оборудованию, температура которых может достигать более 50 градусов Цельсия.

Обучающиеся при нахождении в лаборатории и выполнении лабораторных работ **обязаны**:

- испытания на прессах проводить в присутствии руководителя работ и при наличии закрытого ограждающего устройства, предохраняющего от разлёта кусков породы;

- быть осторожными, чтобы не повредить руки об острые кромки и заусенцы на образцах пород, а также инструментов и оборудования;

- сборку электрических схем осуществлять только при отключенном напряжении;

- при обнаружении неисправности оборудования, немедленно сообщить об этом руководителю работ.

В случае невыполнения приведённых выше требований или нарушения правил техники безопасности, обучающегося отстраняют от работы в лаборатории.

А.2 Порядок выполнения лабораторных работ

В учебных лабораториях обучающиеся изучают процессы и явления, происходящие в горных породах при воздействии на них внешних физических полей, приобретают навыки в постановке опытов, наблюдении и регистрации различных параметров с помощью измерительной и регистрирующей аппаратуры, знакомятся с конструкциями, устройством и принципом действия лабораторных установок.

Особенности учебного расписания лекционных и лабораторных занятий не всегда обеспечивают согласование во времени необходимой последовательности изучения материала на лабораторных занятиях с материалом, излагаемым на лекциях. Поэтому перед каждым лабораторным занятием обучающийся должен:

- ознакомиться с содержанием предстоящей лабораторной работы, методикой её выполнения, с принципом действия основного оборудования и инструментов, применяемых в лаборатории, по настоящему практикуму, соответствующим лекционным и теоретическим материалам из рекомендуемых информационных ресурсов;

- подготовить рабочую тетрадь и необходимые канцелярские принадлежности;

- разместить в рабочей тетради схему лабораторной установки (при необходимости), рабочие таблицы для внесения результатов измерений, записать основные расчётные формулы и т. п.

Для выполнения лабораторных работ академическую учебную группу обучающихся необходимо разделить на *бригады* по 3–4 человека. Обучающиеся каждой бригады выполняют индивидуальное задание по исследованию физических свойств соответствующих индивидуальных образцов горных пород, выданных руководителем работ.

Выполнение лабораторных работ начинают с ознакомления на рабочем месте с правилами эксплуатации и применения оборудования, приборов, аппаратов и инструментов, используемых при проведении эксперимента, а также с особенностями правил безопасности при работе с ними.

Лабораторные работы обучающиеся выполняют самостоятельно, а при проведении сложных экспериментов – с помощью руководителя.

В процессе выполнения лабораторной работы обучающиеся записывают полученные экспериментальные и справочные данные в рабочую тетрадь в виде текста, таблиц, схем, и затем, по возможности, выполняют их аналитическую обработку (расчёты).

После окончания работы, обучающиеся должны привести в порядок своё рабочее место.

После выполнения очередной лабораторной работы каждый обучающийся должен составить отдельный индивидуальный *отчёт о лабораторной работе* по исследованию соответствующих свойств горных пород с соблюдением требований настоящего практикума при его оформлении (*прил. Б*).

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

**Порядок составления и защиты отчёта
о лабораторной работе****Б.1 Составление отчёта о лабораторной работе**

По каждой выполненной работе обучающийся самостоятельно составляет индивидуальный *отчёт о лабораторной работе* на бумажном носителе в виде текстового документа.

Отчёт о лабораторной работе должен содержать:

- *титульный лист*, оформленный в соответствии с образцом, представленным на рис. Б.1;
- номер, название темы (по настоящему **практикуму**) и дату выполнения лабораторной работы;
- цель и краткие теоретические основы работы (необходимые расчётные формулы и т. д.);
- перечень оборудования, приборов и инструментов;
- характеристику исследуемых пород: наименование, внешний вид, структуру, текстуру (с использованием лабораторной работы № 1), а также схемы (фотографии) испытанных образцов горных пород;
- порядок выполнения работы;
- численные значения показателей, полученных при выполнении эксперимента, и результаты их математической обработки со всеми выполненными промежуточными вычислениями;
- иллюстрации (рисунки, схемы, чертежи, фотографии) применяемых лабораторных установок и оборудования, с указанием необходимых размеров, поясняющее или дополняющее основной текст отчёта;
- *таблицы* с результатами измерений и расчётов;
- *графики, диаграммы* установленных зависимостей;
- анализ результатов экспериментов и в конце отчёта – краткие выводы о полученных при выполнении лабораторной работы результатах, новых знаниях и навыках.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
"Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева"
Горный институт
Кафедра строительства подземных сооружений и шахт

ОТЧЁТ
О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 1

Строение горных пород

по дисциплине
"Физика горных пород"

Дата выполнения лабораторной работы: 05.04.2021

Руководитель:
доцент кафедры СПСиШ
канд. техн. наук

А. В. Дерюшев

Исполнитель:
студент группы ГСс-191

С. П. Иванов

Кемерово
2021

Рис. Б.1 – Образец оформления титульного листа
отчёта о лабораторной работе

Составление каждого отчёта о лабораторной работе следует выполнять на листах офисной белой бумаги формата А4 в соответствии с правилами оформления отчёта о научно-исследовательской работе (НИР), изложенными в ГОСТ 7.32–2017 [37]. При этом необходимо соблюдать общие требования к текстовым документам по ГОСТ 2.105–2019 [22].

При выполнении лабораторных работ и составлении отчётов о них следует применять единицы физических величин Международной системы единиц СИ (**приложение В**) в соответствии с ГОСТ 8.417–2002 [38].

Для снижения вероятности ошибок при расчётах десятичные кратные и дольные единицы рекомендовано подставлять только в конечный результат, а в процессе вычислений все величины выражать в единицах СИ, заменяя приставки степенями числа 10 (табл. **В.11**, **В.12**).

Исключения составляют те случаи, когда приборы и оборудование, используемые при выполнении экспериментов, а также показатели физических свойств горных пород имеют исторически сложившиеся внесистемные единицы измерения (см. п. **В.3**).

При составлении отчётов следует использовать иллюстрации, названия и содержание которых предусмотрены ГОСТ Р 7.0.3–2006 [40], например такие как:

- *иллюстрация* – изображение, поясняющее или дополняющее основной текст, помещаемое на страницах и других элементах материальной конструкции издания [40, п. 3.1.3.36];

- *рисунок* – графическое изображение на плоскости, создаваемое с помощью линий, штрихов, пятен, точек [40, п. 3.1.3.33];

- *фотография* – изображение, полученное путём фотографирования объектов и служащее для передачи определённого содержания в основном тексте издания [40, п. 3.1.3.34];

- *подписуночная подпись (подпись к иллюстрации)* – текст под иллюстрацией, представляющий собой её словесную характеристику [40, п. 3.1.3.37];

- *график* – чертёж, наглядно изображающий количественное соотношение и развитие взаимосвязанных процессов или явлений в виде кривой, прямой, ломанной линии, построенной в той или иной системе координат, на осях которой указывают соответствующие

величины и единицы их измерения. Вдоль осей наносят деления и проставляют с наружной стороны числовые значения величин в выбранном масштабе. После этого кружками или точками наносят экспериментально полученные значения величин, через которые проводят плавную кривую графика. В тех случаях, когда закономерность не отражает определенную зависимость исследуемых величин, экспериментальные точки графика соединяют отрезками прямой. При нанесении на график нескольких зависимостей их обозначают различными символами и изображают линиями разного начертания или цвета [40, п. 3.1.3.30];

- *диаграмма* – условное графическое изображение числовых величин или их соотношений, выполненное с помощью линий, плоскостей, геометрических фигур, рисунков [40, п. 3.1.3.27];

- *схема* – условное графическое изображение объекта, в общих чертах передающее суть его характера и структуру [40, п. 3.1.3.28];

- *чертёж* – условное графическое изображение предмета с точным соотношением его размеров, полученное методом проецирования [40, п. 3.1.3.29];

- *формула математическая* – текст, представляющий собой комбинацию специальных математических знаков [40, п. 3.1.3.38];

- *таблица* – форма организации материала в тексте издания, при которой систематически представленные группы взаимосвязанных данных располагают по графам и строкам таким образом, чтобы каждый отдельный показатель входил в состав и графы, и строки [40, п. 3.1.3.39].

Б.2 Порядок защиты отчёта о лабораторной работе

Для проведения *текущего контроля успеваемости* обучающийся предъявляет *педагогическому работнику* к защите составленный им индивидуальный отчёт о лабораторной работе.

При собеседовании с *педагогическим работником* о проделанной работе *обучающийся* должен суметь пояснить: порядок выполнения любой части экспериментов, измерений, расчётов, полученные результаты, содержание построенных таблиц, графиков, относящихся к данной работе, обосновать сделанные выводы.

Педагогический работник анализирует качество оформления отчёта (наличие в отчёте необходимых структурных элементов, его соответствие требованиям, изложенным в п. Б.1 лабораторного практикума), пояснения о ходе выполнения **лабораторной** работы и составления отчёта.

Далее **педагогический работник** задает **обучающемуся** **два контрольных вопроса**, выбранные по своему усмотрению из перечня помещённых в конце описания соответствующей лабораторной работы в настоящем практикуме, которые могут быть, как записаны на листе бумаги, так и нет. В течение времени, установленного **педагогическим работником**, **обучающийся** должен быть готов дать ответы на заданные вопросы и устно и (или) письменно.

Оценочными средствами при защите отчётов о **лабораторных** работах являются: качество оформления отчёта и **два** контрольных вопроса.

Критерии оценивания:

- 85–100 баллов (отлично), если отчёт содержит все требуемые структурные элементы, получены правильные и полные ответы на два контрольных вопроса;
- 65–84 балла (хорошо), если отчёт содержит все требуемые структурные элементы, получены правильный и полный ответ на один контрольный вопрос и неполный ответ на второй вопрос;
- 50–64 баллов (удовлетворительно), если отчёт содержит не все требуемые структурные элементы и получены неполные ответы на два контрольных вопроса;
- менее 49 баллов (неудовлетворительно), если отчёт содержит не все требуемые структурные элементы и получен неполный ответ только на один контрольный вопрос.

Результаты оценивания ответов на контрольные вопросы при защите отчётов о лабораторных работах **педагогический работник** сразу доводит до сведения обучающихся.

Обучающиеся, выполнившие весь запланированный объём лабораторных работ и своевременно защитившие отчёты, получают допуск к **промежуточной аттестации** по дисциплине – сдаче **экзамена**.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

Единицы физических величин

В.1 Международная система единиц физических величин СИ

Высокие темпы развитие мировой науки и техники, достигнутые в середине XX века, растущие международные связи всё настойчивее требовали создания единой системы единиц, удобной для практического применения и охватывающей различные области измерений. При переходе к единой международной системе единиц за основу приняли метрическую систему мер, которую широко использовали в Европе с начала XIX века.

В 1960 г. XI Генеральная конференция по мерам и весам (ГКМВ) утвердила **Международную систему единиц физических величин** (международное сокращенное наименование – SI, в русской транскрипции – СИ), которую уточняли на последующих ГКМВ.

При построении СИ исходили из следующих *основных принципов*:

- система базируется на основных единицах, которые являются независимыми друг от друга;
- производные единицы образуются по простейшим уравнениям связи и для величины каждого вида устанавливается только одна единица СИ;
- система является когерентной;
- допускаются наряду с единицами СИ широко используемые на практике внесистемные единицы;
- в систему входят десятичные кратные и дольные единицы.

Преимущества СИ:

- *универсальность*, т. к. она охватывает все области измерений;
- *унификация* единиц для всех видов измерений – применение одной единицы для данной физической величины, например, для давления, работы, энергии;
- единицы СИ по своему размеру удобны для практического применения;
- переход на нее повышает уровень точности измерений, т. к. основные единицы этой системы могут быть воспроизведены более точно, чем единицы других систем;
- это единая международная система и её единицы распространены.

В СССР Международная система (СИ) была введена в действие ГОСТ 8.417–81. В настоящее время в РФ действует межгосударственный стандарт [ГОСТ 8.417–2002 \[38\]](#), который устанавливает единицы физических величин, применяемых в стране. Основные единицы СИ приведены в табл. В.1.

Таблица В.1 – Основные единицы СИ

Величина		Единица		
наименование	размер- ность	наимено- вание	обозначение	
			между- народное	русское
Длина	L	метр	m	м
Масса	M	килограмм	kg	кг
Время	T	секунда	s	с
Сила электрического тока	I	ампер	A	А
Термодинамическая температура ¹⁾	Θ	кельвин	K	К
Количество вещества	N	моль	mol	моль
Сила света	J	кандела	cd	кд
¹⁾ Кроме термодинамической температуры (обозначение T) допускается применять также температуру Цельсия (обозначение t), определяемую выражением $t = T - T_0$, где $T_0 = 273,15$ К. Термодинамическую температуру выражают в кельвинах, температуру Цельсия – в градусах Цельсия. По размеру градус Цельсия равен кельвину. Градус Цельсия – это специальное обозначение, используемое в данном случае вместо наименования "кельвин". Интервал или разность термодинамических температур выражают в кельвинах. Интервал или разность температур Цельсия допускается выражать как в кельвинах, так и в градусах Цельсия.				

При выполнении практических работ, математических расчётов и составлении отчёта следует обязательно применять единицы **Международной системы единиц физических величин – СИ**, их **производные** (раздел В.2), а также **десятичные кратные и дольные** этих единиц (раздел В.4).

Допустимо применять наравне с единицами СИ некоторые **внесистемные единицы**, не входящие в СИ (раздел В.3), а также некоторые нашедшие широкое применение на практике **десятичные кратные и дольные** перечисленных в таблице В.12 единиц.

В.2 Производные единицы СИ

Производные единицы СИ образуют по правилам образования когерентных производных единиц СИ (ГОСТ 8.417–2002, прил. Б).

Примеры производных единиц СИ, образованных с использованием основных единиц СИ, приведены в таблице В.2.

Таблица В.2 – Примеры производных единиц СИ, наименования и обозначения которых образованы с использованием наименований и обозначений основных единиц СИ

Величина		Единица		
наименование	размер- ность	наименование	обозначение	
			между- народное	русское
Площадь	L^2	квадратный метр	m^2	$м^2$
Объём, вместимость	L^3	кубический метр	m^3	$м^3$
Скорость	LT^{-1}	метр в секунду	m/s	$м/с$
Ускорение	LT^{-2}	метр на секунду в квадрате	m/s^2	$м/с^2$
Волновое число	L^{-1}	метр в минус первой степени	m^{-1}	$м^{-1}$
Плотность	$L^{-3}M$	килограмм на кубический метр	kg/m^3	$кг/м^3$
Удельный объём	L^3M^{-1}	кубический метр на килограмм	m^3/kg	$м^3/кг$
Плотность электри- ческого тока	$L^{-2}I$	ампер на квадрат- ный метр	A/m^2	$А/м^2$
Напряжённость магнитного поля	$L^{-1}I$	ампер на метр	A/m	$А/м$
Молярная концен- трация компонента	$L^{-3}N$	моль на кубический метр	mol/m^3	$моль/м^3$
Яркость	$L^{-2}J$	кандела на квадратный метр	cd/m^2	$кД/м^2$

Производные единицы СИ, имеющие специальные наименования и обозначения, указаны в таблице В.3.

Таблица В.3 – Производные единицы СИ, имеющие специальные наименования и обозначения (выборка из ГОСТ 8.417–2002)

Величина		Единица			
наименование	размерность	наименование	обозначение		выражение через осн. и доп. единицы СИ
			международное	русское	
Плоский угол	l	радиан	rad	рад	$m \cdot m^{-1} = 1$
Частота	T^{-1}	герц	Hz	Гц	s^{-1}
Сила	$LM T^{-2}$	ньютон	N	Н	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
Давление	$L^{-1} M T^{-2}$	паскаль	Pa	Па	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
Энергия, работа, количество теплоты	$L^2 M T^{-2}$	джоуль	J	Дж	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Мощность	$L^2 M T^{-3}$	ватт	W	Вт	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
Электрическое напряжение, электрический потенциал, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила	$L^2 M T^{-3} I^{-1}$	вольт	V	В	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
Электрическая ёмкость	$L^{-2} M^{-1} T^4 I^2$	фарад	F	Ф	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
Электрическое сопротивление	$L^2 M T^{-3} I^{-2}$	ом	Ω	Ом	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
Электрическая проводимость	$L^{-2} M^{-1} T^3 I^2$	сименс	S	См	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
Температура Цельсия	Θ	градус Цельсия	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	K
Освещенность	$L^{-2} J$	люкс	lx	лк	$m^{-2} \cdot cd \cdot sr$

Эти единицы также могут быть использованы для образования других производных единиц СИ (таблица В.4).

Некоторым производным единицам СИ дали специальные наименования и обозначения по именам учёных, например, герц, джоуль, кельвин, ньютон, паскаль (см. таблицу В.3), **обозначения** которых записывают **с прописной (заглавной) буквы**. Такое написание обозначений этих единиц сохраняют в обозначениях других производных единиц СИ (образованных с использованием этих единиц) и в других случаях.

Таблица В.4 – Примеры производных единиц СИ, наименования и обозначения которых образованы с использованием специальных наименований и обозначений, указанных в таблице В.3 (выборка из ГОСТ 8.417–2002)

Величина		Единица			
наименование	размерность	наименование	обозначение		выражение через основные и доп. единицы СИ
			международное	русское	
Момент силы	L^2MT^{-2}	ньютон-метр	N·m	Н·м	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Поверхностное натяжение	MT^{-2}	ньютон на метр	N/m	Н/м	$kg \cdot s^{-2}$
Динамическая вязкость	$L^{-1}MT^{-1}$	паскаль-секунда	Pa·s	Па·с	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
Напряженность электрического поля	$LMT^{-3}I^{-1}$	вольт на метр	V/m	В/м	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
Удельная энергия	L^2T^{-2}	джоуль на килограмм	J/kg	Дж/кг	$m^2 \cdot s^{-2}$
Удельная теплоёмкость, удельная энтропия	$L^2T^{-2}\Theta^{-1}$	джоуль на килограмм-кельвин	J/(kg·K)	Дж/(кг·К)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
Теплопроводность	$LMT^{-3}\Theta^{-1}$	ватт на метр-кельвин	W/(m·K)	Вт/(м·К)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
Угловая скорость	T^{-1}	радиан в секунду	rad/s	рад/с	s^{-1}

Обозначения производных единиц, не имеющих специальных наименований, должны содержать минимальное число обозначений единиц СИ со специальными наименованиями и основных единиц с возможно более низкими показателями степени, например:

Правильно:	Неправильно:	
A/kg; A/кг	C/(kg·s);	Кл/(кг·с)
$\Omega \cdot m$; Ом·м.	V·m/A;	В·м/А
	$m^3 \cdot kg/(s^3 \cdot A^2)$;	$m^3 \cdot кг/(с^3 \cdot А^2)$.

В.3 Внесистемные единицы

Внесистемные единицы, указанные в таблице В.5, допускают к применению без ограничения срока наравне с единицами СИ.

Таблица В.5 – Внесистемные единицы (выборка из ГОСТ 8.417–2002)

Наименование величины	Единица				
	наименование	обозначение		соотношение с единицей СИ	область применения
		международное	русское		
Масса	тонна	t	т	$1 \times 10^3 \text{ kg}$	все области
Время ^{1), 2)}	минута	min	мин	60 s	все области
	час	h	ч	3600 s	
	сутки	d	сут	86400 s	
Плоский угол ¹⁾	градус ^{1), 3)}	...°	...°	$(\pi/180) \text{ rad} = 1,745329... \times 10^{-2} \text{ rad}$	все области
	минута ^{1), 3)}	...'	...'	$(\pi/10800) \text{ rad} = 2,908882... \times 10^{-4} \text{ rad}$	
	секунда ^{1), 3)}	..."	..."	$(\pi/648000) \text{ rad} = 4,848137... \times 10^{-6} \text{ rad}$	
Объём, вместимость	литр ⁴⁾	l	л	$1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$	все области
Площадь	гектар	ha	га	$1 \times 10^4 \text{ m}^2$	сел. и лес. хозяйство
Энергия	киловатт-час	kW·h	кВт·ч	$3,6 \times 10^6 \text{ J}$	для учёта эл. энергии
Полная мощность	вольт-ампер	V·A	В·А		электро-техника
Эл. заряд, количество электричества	ампер-час	A·h	А·ч	$3,6 \times 10^3 \text{ C}$	электро-техника

Наименование величины	Единица				
	наименование	обозначение		соотношение с единицей СИ	область применения
		международное	русское		
Длина ⁵⁾	морская миля	n mile	миля	1852 m (точно)	морская навигация
Скорость ⁵⁾	узел	kn	уз	0,514(4) m/s	морская навигация
Частота вращения ⁵⁾	оборот в секунду	r/s	об/с	1 s ⁻¹	электро- техника
	оборот в минуту	r/min	об/мин	1/60 s ⁻¹ = 0,016(6) s ⁻¹	
Давление ⁵⁾	бар	bar	бар	1×10 ⁵ Pa	физика
¹⁾ Наименования и обозначения единиц времени (минута, час, сутки), плоского угла (градус, минута, секунда), астрономической единицы, диоптрии и атомной единицы массы не допускается применять с приставками. ²⁾ Допускается также применять другие единицы, получившие широкое распространение, например неделя, месяц, год, век, тысячелетие. ³⁾ Обозначение единиц плоского угла пишут над строкой. ⁴⁾ Не рекомендуется применять при точных измерениях. При возможности смещения обозначения <i>l</i> ("эль") с цифрой 1 допускают обозначение L. ⁵⁾ Указанные единицы временно допускается применять до принятия по ним соответствующих международных решений.					

Соотношения некоторых внесистемных единиц с единицами СИ приведены в таблице В.6.

При новых разработках применение этих внесистемных единиц не рекомендуется.

Таблица В.6 – Соотношение некоторых внесистемных единиц с единицами СИ (выборка из ГОСТ 8.417–2002)

Наименование величины	Единица			
	наименование	обозначение		соотношение с единицей
		международное	русское	
Длина	ангстрем икс-единица	Å X	Å икс-ед.	$1 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ $1,00206 \cdot 10^{-13} \text{ м}$ (приблизительно)
Масса	центнер	q	ц	100 kg
Сила, вес	дина	dyn	дин	$1 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$
	килограмм-сила	kgf	кгс	9,80665 Н (точно)
	грамм-сила	gf	гс	$9,80665 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$ (точ)
	тонна-сила	tf	тс	9806,65 Н (точно)
Давление	килограмм-сила на квадратный сантиметр	kgf/cm ²	кгс/см ²	98066,5 Па (точно)
	миллиметр водяного столба	mm H ₂ O	мм вод. ст.	9,80665 Па (точно)
	миллиметр ртутного столба	mm Hg	мм рт. ст.	133,322 Па
Напряжение (механическое)	килограмм-сила на квадратный миллиметр	kgf/mm ²	кгс/мм ²	$9,80665 \cdot 10^6 \text{ Па}$ (точно)
Мощность	лошадиная сила	—	л.с.	735,499 W
Удельное электр. сопротивление	ом-квадратный миллиметр на метр	$\Omega \cdot \text{мм}^2/\text{м}$	Ом·мм ² /м	$1 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{м}$
Магнитный поток	максвелл	Mx	Мкс	$1 \cdot 10^{-8} \text{ Wb}$
Магнитная индукция	гаусс	Gs	Гс	$1 \cdot 10^{-4} \text{ Т}$
Количество теплоты	калория (межд)	cal	кал	4,1868 J (точно)
Длина	микрон	μ	мк	$1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$
Угол поворота	оборот	r	об	$2\pi \text{ rad} = 6,28 \text{ rad}$
Площадь	ар	a	а	100 м ²

Таблица В.7 – Некоторые относительные величины и их единицы
(выборка из ГОСТ 8.417–2002)

Наименование величины	Единица			
	Наименова- ние	обозначение		Значе- ние
		между- народ- ное	рус- ское	
Относительная величина (без- размерное отношение физиче- ской величины к одноименной физической величине, прини- маемой за исходную): - КПД; - относительное удлинение; - относительная плотность; - деформация; - относительные диэлектриче- ская и магнитная проницаемо- сти; - магнитная восприимчивость; - массовая доля компонента; - молярная доля компонента и т. п.	единица	1	1	1
	процент	%	%	$1 \cdot 10^{-2}$
	промилле	‰	‰	$1 \cdot 10^{-3}$
	миллионная доля	ppm	млн ⁻¹	$1 \cdot 10^{-6}$

В.4 Правила написания обозначений единиц

В ГОСТ 8.417–2002 [38] приведены правила написания обозначения единиц, основные из которых следующие.

При написании значений величин применяют обозначения единиц буквами или специальными знаками (...°, ..., ..., ..."), причем устанавливают два вида буквенных обозначений:

- русское – с использованием букв *русского алфавита* (таблица В.8).
- международное – с использованием букв *латинского* (таблица В.9) или *греческого алфавита* (таблица В.10).

Таблица В.8 – Русский алфавит

Буква		Буква	
прописная	строчная	прописная	строчная
А	а	Р	р
Б	б	С	с
В	в	Т	т
Г	г	У	у
Д	д	Ф	ф
Е	е	Х	х
Ж	ж	Ц	ц
З	з	Ч	ч
И	и	Ш	ш
Й	й	Щ	щ
К	к	Ъ	ъ
Л	л	Ы	ы
М	м	Ь	ь
Н	н	Э	э
О	о	Ю	ю
П	п	Я	я

Таблица В.9 – Латинский алфавит

Буква		Буква	
прописная	строчная	прописная	строчная
A	a	N	n
B	b	O	o
C	c	P	p
D	d	R	r
E	e	S	s
F	f	T	t
G	g	U	u
H	h	V	v
I	i	W	w
J	j	X	x
K	k	Y	y
L	l	Z	z
M	m		

Таблица В.10 – Греческий алфавит

Буква			Буква		
прописная	строчная	название	прописная	строчная	название
A	α	альфа	N	ν	ню
B	β	бета	Ξ	ξ	кси
Γ	γ	гамма	Ο	ο	омикрон
Δ	δ	дельта	Π	π	пи
Ε	ε	эпсилон	Ρ	ρ	ро
Z	ζ	дзета	Σ	σ	сигма
Η	η	эта	Τ	τ	тау
Θ	θ	тэта	Υ	υ	ипсилон
I	ι	йота	Φ	φ	фи
K	κ	каппа	Χ	χ	хи
Λ	λ	ламбда	Ψ	ψ	пси
M	μ	мю	Ω	ω	омега

В публикациях (отчётах) допускают применять либо международные, либо русские обозначения единиц. Одновременное применение обозначений обоих видов в одном и том же издании **не допускают**, за исключением публикаций по единицам величин.

Названия единиц пишут с *маленькой буквы*, если они не стоят в начале предложения. Исключение составляет градус Цельсия.

Обозначения единиц, наименования которых образованы по фамилиям учёных, пишут с прописной (заглавной) буквы.

В обозначениях единиц точку как знак сокращения не ставят, печатают их *прямым* шрифтом. Исключения составляют сокращения слов, которые входят в наименование единицы, но сами не являются наименованиями единиц. Например, мм рт. ст.

Обозначения единиц применяют после числовых значений и помещают в строку с ними (без переноса на следующую строку). Между последней цифрой и обозначением следует **оставлять пробел**, *кроме* знака, *поднятого над строкой*.

При указании значений величин с предельными отклонениями следует заключать числовые значения в скобки, и обозначения единиц помещать после скобок или проставлять их и после числового значения величины и после её предельного отклонения.

Буквенные обозначения единиц, входящих в произведение, следует отделять *точками* на средней линии, *как знаками умножения*. Допускается отделять буквенные обозначения пробелами, если это не приводит к недоразумению. Геометрические размеры обозначаются знаком "х".

В буквенных обозначениях отношения единиц в качестве знака деления должна применяться только одна черта: косая или горизонтальная. Допускается применять обозначения единиц в виде произведения обозначений единиц, возведенных в степени. При применении косой черты обозначения единиц в числителе и знаменателе следует помещать в одну строку, произведение обозначений в знаменателе следует заключать в скобки.

Если для одной из единиц, входящих в отношение, установлено обозначение в виде отрицательной степени (например, s^{-1} , m^{-1} , K^{-1} , s^{-1} , m^{-1} , K^{-1}), применять косую или горизонтальную черту не допускается.

При указании производной единицы, состоящей из двух и более единиц, не допускается комбинировать буквенные обозначения и наименования единиц, т. е. для одних – обозначения, для других – наименования.

Допускается применять обозначения единиц в пояснениях обозначений величин к формулам. Помещение обозначений единиц в одной строке с формулами, выражающими зависимости между величинами и их числовыми значениями, представленными в буквенной форме, не допускается.

Допускают применение сочетания специальных знаков:

...°, ...', ...", % и ‰ с буквенными обозначениями единиц, например, ...°/s.

В.5 Образование наименований и обозначений десятичных кратных и дольных единиц СИ

Выбор десятичной кратной или дольной единицы СИ определяют удобством её применения. Из многообразия кратных и дольных единиц, которые могут быть образованы с помощью приставок, выбирают единицу, позволяющую получать числовые значения, приемлемые на практике.

Наименования и обозначения десятичных кратных и дольных единиц СИ образуют с помощью множителей и приставок, указанных в таблице В.11.

Таблица В.11 – Множители и приставки, используемые для образования наименований и обозначений десятичных кратных и дольных единиц СИ

Десятич- ный мно- житель	При- ставка	Обозначение приставки		Десятич- ный мно- житель	При- ставка	Обозначение приставки	
		междуна- родное	русское			между- народное	русское
10^{24}	йотта	Y	И	10^{-1}	деци	d	д
20^{21}	зетта	Z	З	10^{-2}	сант	c	с
10^{18}	экса	E	Э	10^{-3}	милли	m	м
10^{15}	пета	P	П	10^{-6}	микро	μ	мк
10^{12}	тера	T	Т	10^{-9}	нано	n	н
10^9	гига	G	Г	10^{-12}	пико	p	п
10^6	мега	M	М	10^{-15}	фемто	f	ф
10^3	кило	k	к	10^{-18}	атто	a	а
10^2	гекто	h	г	10^{-21}	зепто	z	з
10^1	дека	da	да	10^{-24}	йокто	y	и

Присоединение к наименованию и обозначению единицы двух или более приставок подряд не допускается. Например, вместо наименования единицы *микромикрофарад* следует писать *пикофарад*.

В связи с тем, что наименование основной единицы – килограмм содержит приставку "кило", для образования кратных и дольных единиц массы используют дольную единицу массы – грамм (0,001 kg), и приставки присоединяют к слову "грамм", например, *миллиграмм* (mg, мг) вместо *микрокилограмм* (μ kg, мккг).

Дольную единицу массы – грамм допускается применять, не присоединяя приставку.

Приставку или её обозначение следует писать слитно с наименованием единицы или, соответственно, с обозначением последней.

Если единица образована как произведение или отношение единиц, приставку или её обозначение присоединяют к наименованию или обозначению первой единицы, входящей в произведение или в отношение.

Например,

килопаскаль-секунда на метр
(kPa·s/m; кПа·с/м).

Наименования кратных и дольных единиц исходной единицы, возведенной в степень, образуют, присоединяя приставку к наименованию исходной единицы.

Например, для образования наименования кратной или дольной единицы площади – квадратного метра, представляющей собой вторую степень единицы длины – метра, приставку присоединяют к наименованию этой последней единицы: квадратный километр, квадратный сантиметр и т. д.

Обозначения кратных и дольных единиц исходной единицы, возведенной в степень, образуют добавлением соответствующего показателя степени к обозначению кратной или дольной единицы исходной единицы, причем показатель означает возведение в степень кратной или дольной единицы (вместе с приставкой).

Например:

$$1) 5 \text{ km}^2 = 5(10^3 \text{ m})^2 = 5 \cdot 10^6 \text{ m}^2.$$

$$2) 250 \text{ cm}^3/\text{s} = 250(10^{-2} \text{ m})^3/\text{s} = 250 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}.$$

$$3) 0,002 \text{ cm}^{-1} = 0,002(10^{-2} \text{ m})^{-1} = 0,002 \cdot 100 \text{ m}^{-1} = 0,2 \text{ m}^{-1}.$$

В принципе кратные и дольные единицы выбирают таким образом, чтобы числовые значения величины находились в диапазоне от 0,1 до 1000.

В некоторых случаях целесообразно применять одну и ту же кратную или дольную единицу, даже если числовые значения выходят за пределы диапазона от 0,1 до 1000, например, в таблицах числовых значений для одной величины или при сопоставлении этих значений в одном тексте.

В некоторых областях всегда используют одну и ту же кратную или дольную единицу. Например, в чертежах, применяемых в машиностроении, линейные размеры всегда выражают в миллиметрах.

Для снижения вероятности ошибок при расчётах десятичные кратные и дольные единицы рекомендовано подставлять только в конечный результат, а в процессе вычислений все величины выражать в единицах СИ, заменяя приставки степенями числа 10.

В таблице В.12 указаны также получившие широкое распространение на практике кратные и дольные единицы, применяемые наравне с единицами СИ.

201
ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица В.12 – Рекомендуемые десятичные кратные и дольные единицы СИ, и единицы не входящие в СИ (выборка из ГОСТ 8.417–2002)

Наименование величины	Обозначения единиц			
	в СИ	рекомендуемых кратных и дольных в СИ	не входящих в СИ	кратных и дольных, не входящих в СИ
Часть I. Пространство и время				
Плоский угол	rad; рад (радиан)	mrad; мрад μrad; мкрад	...° (градус) ...' (минута) ..." (секунда)	-
Телесный угол	sr; ср (стерадиан)	-	-	-
Длина	m; м (метр)	km; км cm; см mm; мм μm; мкм nm; нм	-	-
Площадь	m ² ; м ²	km ² ; км ² dm ² ; дм ² cm ² ; см ² mm ² ; мм ²	-	-
Объём, вместимость	m ³ ; м ³	dm ³ ; дм ³ cm ³ ; см ³ mm ³ ; мм ³	l (L); л (литр)	hl (hL); гл dl (dL); дл cl (cL); сл ml (mL); мл
Время	s; с (секунда)	ks; кс ms; мс μs; мкс ns; нс	d; сут (сутки) h; ч (час) min; мин (минута)	-
Скорость	m/s; м/с	-	-	km/h; км/ч
Ускорение	m/s ² ; м/с ²	-	-	-
Часть II. Периодические и связанные с ними явления				
Частота периодического процесса	Hz; Гц (герц)	THz; ТГц GHz; ГГц MHz; МГц kHz; кГц	-	-

202
ПРИЛОЖЕНИЕ В

Наименование величины	Обозначения единиц			
	в СИ	рекомендуемых кратных и дольных в СИ	не входящих в СИ	кратных и дольных, не входящих в СИ
Частота вращения	s^{-1} ; c^{-1}	-	min^{-1} ; мин ⁻¹	-
Часть III. Механика				
Масса	kg; кг (килограмм)	Mg; Мг g; г mg; мг μg; мкг	t; т (тонна)	Mt; Мт kt; кт dt; дт
Линейная плотность	kg/m; кг/м	mg/m; мг/м или g/km; г/км	-	-
Плотность (плотность массы)	kg/m ³ ; кг/м ³	Mg/m ³ ; Мг/м ³ kg/dm ³ ; кг/дм ³ g/cm ³ ; г/см ³	t/m ³ ; т/м ³ или kg/l; кг/л	g/ml; г/мл g/l; г/л
Количество движения	kg·m/s; кг·м/с	-	-	-
Сила, вес	N, Н (нью- тон)	MN; МН kN; кН mN, мН μN; мкН	-	-
Момент силы	N·m; Н·м	MN·m; МН·м kN·m; кН·м mN·m; мН·м μN·m; мкН·м	-	-
Давление	Pa, Па (паскаль)	GPa; ГПа MPa, МПа kPa; кПа mPa; мПа μPa; мкПа	-	-
Нормальное на- пряжение; касательное напряжение	Pa; Па	GPa; ГПа MPa, МПа kPa; кПа	-	-
Динамическая вязкость	Pa·s; Па·с	mPa·s; мПа·с	-	-

203
ПРИЛОЖЕНИЕ В

Наименование величины	Обозначения единиц			
	в СИ	рекомендуемых кратных и дольных в СИ	не входящих в СИ	кратных и дольных, не входящих в СИ
Энергия, работа	J; Дж (джоуль)	TJ; ТДж GJ; ГДж MJ; МДж kJ; кДж mJ; мДж	-	-
Мощность	W; Вт (ватт)	GW; ГВт MW; МВт kW; кВт mW; мВт μW; мкВт	-	-
Часть IV. Теплота				
Термодинамическая температура	K; K (кельвин)	MK; МК kK; кК mK; мК μK; мкК	-	-
Температура Цельсия	°C; °C (градус Цельсия)	-	-	-
Температурный интервал	K; К °C; °C	-	-	-
Теплота, количество теплоты	J; Дж	TJ; ТДж GJ; ГДж MJ; МДж kJ; кДж mJ; мДж	-	-
Теплоёмкость	J/K, Дж/К	kJ/K; кДж/К	-	-
Удельная теплоёмкость	J/(kg·K); Дж/(кг·К)	kJ/(kg·K); кДж/(кг·К)	-	-
Удельное количество теплоты	J/kg; Дж/кг	MJ/kg; МДж/кг kJ/kg; кДж/кг	-	-

204
ПРИЛОЖЕНИЕ В

Наименование величины	Обозначения единиц			
	в СИ	рекомендуемых кратных и дольных в СИ	не входящих в СИ	кратных и дольных, не входящих в СИ
Часть V. Электричество и магнетизм				
Электрический ток (сила электрического тока)	A; А (ампер)	kA; кА mA; мА μA; мкА nA; нА pA; пА	-	-
Напряженность электрического поля	V/m; В/м	MV/m; МВ/м kV/m; кВ/м V/mm; В/мм V/cm; В/см mV/m; мВ/м μV/m; мкВ/м	-	-
Электрическое напряжение, электрический потенциал, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила	V; В (вольт)	MV; МВ kV; кВ mV; мВ μV; мкВ nV; нВ	-	-
Электрическая ёмкость	F; Ф (фарад)	mF; мФ μF; мкФ nF; нФ pF; пФ fF; фФ aF; аФ	-	-
Плотность электрического тока	A/m ² ; А/м ²	MA/m ² ; МА/м ² A/mm ² ; А/мм ² A/cm ² ; А/см ² kA/m ² ; кА/м ²	-	-

205
ПРИЛОЖЕНИЕ В

Наименование величины	Обозначения единиц			
	в СИ	рекомендуемых кратных и дольных в СИ	не входящих в СИ	кратных и дольных, не входящих в СИ
Электрическое сопротивление, активное сопро- тивление, реак- тивное сопро- тивление	Ω ; Ом (ом)	T Ω ; ТОм G Ω ; ГОм M Ω ; МОм k Ω ; кОм m Ω ; мОм $\mu\Omega$; мкОм	-	-
Удельное элек- трическое со- противление	$\Omega \cdot m$; Ом·м	G $\Omega \cdot m$; ГОм·м M $\Omega \cdot m$; МОм·м k $\Omega \cdot m$; кОм·м $\Omega \cdot cm$; Ом·см m $\Omega \cdot m$; мОм·м $\mu\Omega \cdot m$; мкОм·м n $\Omega \cdot m$; нОм·м		
Активная мощность	W; Вт	TW; ТВт GW; ГВт MW; МВт kW; кВт mW; мВт μW ; мкВт nW; нВт	V·A; В·А (вольт- ампер – еди- ница полной мощности)	-
Энергия	J, Дж	TJ; ТДж GJ; ГДж MJ; МДж kJ; кДж	- eV; эВ (электрон- вольт)	kW·h; кВт·ч (киловатт-час) -

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
(обязательное)

Статистическая обработка результатов эксперимента

Г.1 Погрешности измерения

Любое измерение производят с некоторой погрешностью (отклонением), которая искажает результат измерения и позволяет определить лишь приблизительное значение измеряемой величины.

По характеру проявления погрешности делят на три основных вида: промахи, систематические и случайные.

Промахи – большие погрешности (грубые ошибки), искажающие результаты измерения и связанные с нарушением условий испытаний при отдельном наблюдении (измерении), с ошибками при записи значений измеренных величин и не поддаются учёту.

Систематические погрешности – постоянные или изменяющиеся по определенному закону в зависимости от вызывающих их причин. Систематические погрешности возникают в результате конструктивных недостатков измерительных приборов и средств измерения, неправильной их градуировки, установки, неисправности приборов, теоретических погрешностей метода, применения неточных эмпирических формул и др. Такие погрешности можно определить, учесть заранее и исключить из результатов измерения.

Случайные погрешности – неопределённые по величине и знаку, возникающие в результате совокупного действия различных случайных причин. Этот вид погрешностей обнаруживают при многократном измерении одной и той же величины в одинаковых условиях с помощью одних и тех же средств. Числовые результаты, полученные при измерениях, все же несколько отличаются друг от друга. Случайные погрешности нельзя исключить, их влияние на результат измерений следует учитывать методом теории вероятностей и математической статистики.

По способу числового выражения различают *абсолютные погрешности* ΔX , выраженные в единицах измеряемой величины, и *относительные погрешности* ε – в процентах или долях от действительного значения. Погрешности вычисляют по формулам:

$$\Delta X = X - X_{\text{и}} ; \quad (\text{Г.1})$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta X}{X_{\text{и}}} \cdot 100 \% \quad (\text{Г.2})$$

где X – измеренное значение величины;
 $X_{\text{и}}$ – действительное или истинное значение величины.

При выполнении измерения надо стремиться получить значение измеряемой величины возможно более близкое к истинному. Для этого необходимо исключить те погрешности, которые можно, и оценить те из них, исключить которые невозможно.

Предположим, произведено n измерений некоторой величины, истинное значение которой $X_{\text{и}}$. Измерения были произведены в одинаковых условиях и со всей возможной тщательностью, исключаяющей вероятность появления как грубых промахов, так и систематических ошибок. Следовательно, полученные в результате n измерений значения величины $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ содержат только случайные погрешности ΔX , которые определяют по формуле (Г.1).

Рассматривая случайные погрешности как один из видов случайных событий вообще, Гаусс установил нормальный закон распределения (рис. Г.1), который определяет собой вероятность (частоту) P появления в ряду измерений погрешности ΔX той или иной величины.

Кривая показывает, что:

- наиболее вероятны случайные погрешности, близкие к нулю;
- по мере увеличения погрешности вероятность её появления быстро убывает;
- вероятность появления случайных погрешностей, равных по абсолютной величине, но противоположных по знаку, одинакова;
- погрешности измерений могут принимать непрерывный ряд значений.

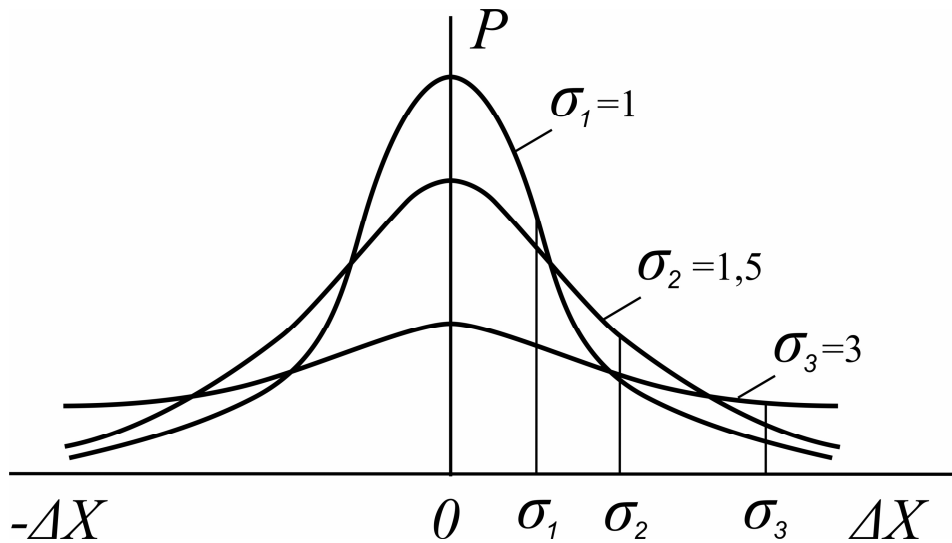


Рис. Г.1 – Кривые нормального распределения

Уравнение кривой для плотности нормального распределения случайных погрешностей имеет вид

$$f(\Delta X, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(X - \bar{X})^2}{2\sigma^2} \right], \quad (\text{Г.3})$$

где σ – средняя квадратическая погрешность (отклонение) ряда измерений.

Рассматривая влияние величины средней квадратической погрешности σ на форму кривой (см. рис. Г.1), необходимо отметить, что чем меньше параметр σ , тем кривая более вытянута вдоль центра распределения ($\sigma_1 = 1$). Так как площадь под кривой остается равной единице, то вытягивание её вверх должно компенсироваться сжатием около центра распределения и более быстрым приближением кривой к оси абсцисс. При увеличении значения средней квадратической погрешности σ кривая становится пологой, растягиваясь вдоль оси абсцисс ($\sigma = 3$).

Г.2 Оценки погрешностей измерений

Истинное значение $X_{\text{и}}$ измеряемой величины (не забывать единицы измерения) почти всегда неизвестно, поэтому определить случайную погрешность каждого отдельного измерения по формуле (Г.1) невозможно. Если число измерений n достаточно велико, то вместо значения $X_{\text{и}}$ берут наиболее достоверное значение – **среднее арифметическое** $\bar{X}$ из полученных значений измеряемой величины, определяемое по формуле

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (\text{Г.4})$$

где $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$ – значения, получаемые в результате измерения; n – число измерений.

Среднюю квадратическую погрешность (отклонение) σ определяют по формуле

$$\begin{aligned} \sigma &= \pm \sqrt{\frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n - 1}} = \\ &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}. \end{aligned} \quad (\text{Г.5})$$

Вероятность α того, что результат измерений $\bar{X}$ отличается от истинного значения $X_{\text{и}}$ на величину, не большую чем на ΔX , можно записать в виде

$$P(\bar{X} - \Delta X < X_{\text{и}} < \bar{X} + \Delta X) = \alpha. \quad (\text{Г.6})$$

Вероятность α называют *надёжностью* или *доверительной вероятностью*, а интервал значений:

от $\bar{X} - \Delta X$ до $\bar{X} + \Delta X$ – *доверительным интервалом*.

Из выражения (Г.6) следует, что результаты измерений не выходят за пределы доверительного интервала с вероятностью, равной α , т. е. чем больше доверительный интервал, тем вероятнее, что результаты измерений не выйдут за его пределы и надёжность будет выше. Следовательно, для характеристики величины случайной погрешности необходимо задавать два значения:

- величину *доверительной вероятности* (коэффициент надёжности);
- величину погрешности, т. е. *доверительный интервал*.

Предполагаем, что искомая истинная величина $X_{\text{и}}$ лежит в некотором интервале $\bar{X} \pm \Delta X$, т. е.

$$X_{\text{и}} = \bar{X} \pm \Delta X, \quad (\text{Г.7})$$

где ΔX – величина абсолютной погрешности, которая появляется при замене истинного значения $X_{\text{и}}$ среднеарифметическим значением $\bar{X}$ (не забывать единицы измерения).

Увеличение *числа измерений* (опытов) увеличивает точность результатов измерений, но не бесконечно. Зависимость достоверности измерений от числа измерений достаточно сложна и может быть учтена коэффициентом Стьюдента $t_{(\alpha, n)}$, который показывает, во сколько раз следует увеличить *стандартный доверительный интервал*, чтобы при определенном числе измерений n получить требуемую доверительную вероятность (надёжность) α .

За *стандартный доверительный интервал* $|\pm S|$ принимают среднеквадратическое отклонение от среднеарифметического значения, которое определяют по формуле

$$S = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (\text{Г.8})$$

Тогда величина абсолютной погрешности будет равна

$$\pm \Delta X = \frac{t_{(\alpha, n)} \sigma}{\sqrt{n}} = t_{(\alpha, n)} S. \quad (\text{Г.9})$$

Коэффициент вариации $K_{\text{в}}$ определяют по формуле

$$K_{\text{в}} = \frac{S}{\bar{X}} \quad 100\%. \quad (\text{Г.10})$$

На практике степень надёжности проводимых измерений зависит от их характера. Для большинства обычных измерений можно выбрать доверительную вероятность α от 0,80 до 0,99.

Коэффициента Стьюдента $t_{(\alpha, n)}$, определяют по табл. Г.1.

Таблица Г.1 – Значения коэффициента Стьюдента $t_{(\alpha, n)}$
[21, п. 19.5, табл. 19.5-5]

Число измерений, n	Надёжность (доверительная вероятность), α						
	0,70	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
2	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	636,619
3	1,336	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,598
4	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,941
5	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
6	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,859
7	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
8	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,405
9	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041
10	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
11	1,093	1,372	1,812	2,280	2,764	3,169	4,587
12	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,487
13	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
14	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
15	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
16	-	1,337	1,746	2,120	2,588	2,921	4,015
17	-	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965
18	-	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
19	-	1,328	1,729	2,098	2,539	2,861	3,883
20	1,066	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850
21	-	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819
22	-	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792
23	-	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,767
24	-	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
25	1,059	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725
...	...	...	...	...	...	...	...
120	~0,900	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	3,373

Д.3 Общий порядок обработки результатов измерений

Результаты измерений (наблюдений, расчётов) подлежат обработке в следующем порядке:

1) Вычислить среднее арифметическое значение $\bar{X}$ по формуле (Г.4).

2) Определить значение средней квадратической погрешности σ по формуле (Г.5).

3) Определить значение стандартного доверительного интервала S , по формуле (Г.8).

4) По выбранному значению доверительной вероятности α и по количеству измерений n в таблице Г.1 найти соответствующее значение коэффициента Стьюдента $t_{(\alpha, n)}$, используя которое вычислить величину абсолютной погрешности ΔX по формуле (Г.9).

5) Вычислить коэффициент вариации K_v по формуле (Г.10).

6) Зная $\bar{X}$ и ΔX , записать конечный результат измерений в виде выражения (Г.7) и обязательно указать доверительную вероятность (надёжность) α полученного результата и коэффициент вариации K_v .

7) Оценить точность полученных физико-технических показателей пород по шкале Л. И. Барона (табл. Г.2).

Профессор Л. И. Барон предложил оценивать стабильность и точность определения горнотехнических показателей и расчётов по значению коэффициента вариации K_v (табл. Г.2).

Таблица Г.2 – Шкала оценки стабильности (точности) горнотехнических показателей и расчётов (по Л. И. Барону) [11, прил. 3]

Классы стабильности (точности)	Коэффициент вариации K_B , %	Характерные примеры
I	< 10	Расчёты и показатели считающиеся в горном деле "вполне точными" : - <i>маркшейдерские съёмки</i> ; - замеры вырабатываемых объёмов и площадей; - расчёты по проведению горных выработок; - определение объёмной массы и веса пород
II	10 – 20	Расчёты и показатели, считаемые в горном деле "практически точными" : - показатели <i>крепости</i> для весьма крепких пород; - технико-экономические расчёты; - средние производственные показатели скорости бурения за длительные периоды наблюдений
III	20 – 30	Большинство формул для расчёта: - параметров <i>буровзрывных работ</i> ; - показателей <i>крепости</i> для большинства горных пород средней и ниже средней крепости; - характеристических показателей горной технологии, широко используемых в проектных расчётах
IV	30 – 40	Приближенные эмпирические формулы для определения технико-экономических показателей горной технологии, требующие большой осторожности в применении к конкретным объектам (к техническому проектированию)
V	> 40	Приближенные эмпирические формулы , выявляющие общие тенденции, но совершенно <i>непригодные для конкретного проектирования</i> (например, формула, выражающая зависимость себестоимости добычи от годовой производительности рудника, и подобные формулы)

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
(справочное)

Физико-технические свойства горных пород

Д.1 Физико-технические параметры горных пород

Таблица Д.1 – Базовые физические параметры горных пород
[14, п. 2.1]¹

Свойства	Основные параметры	Обозначение	Ед. измер.	Определения	Пределы изменения
1 Плотностные	Объёмная масса	ρ	кг/м ³	Масса единицы объёма сухой горной породы с естественной ненарушенной структурой (с порами, трещинами и т. д.)	1500 ÷ 3000
	Пористость	P	%	Относительный объём всех пор, заключённых в единице объёма породы	1,5 ÷ 30
2 Механические	Предел прочности при сжатии	$\sigma_{сж}$	Па	Критическое значение одноосного сжимающего напряжения, при котором происходит разрушение породы	$10^7 \div 3 \cdot 10^8$
	Предел прочности при растяжении	σ_p	Па	Критическое значение одноосного растягивающего напряжения, при котором происходит разрушение породы	$0 \div 2 \cdot 10^7$
	Модуль продольной упругости (модуль Юнга)	E	Па	Коэффициент пропорциональности между действующим нормальным напряжением и соответствующей ему продольной упругой деформацией	$10^9 \div 3 \cdot 10^{11}$
	Коэффициент Пуассона	ν		Коэффициент пропорциональности между упругими и поперечными	0,1 ÷ 0,45

¹ Параметры, выделенные синим фоном, определяют в работах настоящего лабораторного практикума.

216
ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Свойства	Основные параметры	Обозначение	Ед. измер.	Определения	Пределы изменения
				деформациями при одноосной нормальной нагрузке (отношение относительных поперечных деформаций к продольным)	
3 Тепловые	Коэффициент теплопроводности	λ	Вт/(м·К)	Количество тепла, проходящего в единицу времени через единицу сечения в направлении, перпендикулярном к сечению при перепаде температур, равном 1 К, на единицу расстояния	$0,2 \div 12$
	Удельная теплоёмкость	c	Дж/(кг·К)	Количество тепла, необходимое для повышения температуры 1 кг породы на 1 К	$(0,5 \div 1,5) \cdot 10^3$
	Коэффициент линейного теплового расширения	α	К ⁻¹	Относительное удлинение породы при нагреве её на 1 К	$2 \cdot 10^{-6} \div 10^{-4}$
4 Электромагнитные	Удельное электрическое сопротивление	$\rho_{\text{э}}$	Ом·м	Величина, обратная силе тока, проходящего через 1 м ² площади образца при напряженности электрического поля в образце, равной 1 В/м	$10^{-3} \div 10^8$
	Относительная диэлектрическая проницаемость	$\varepsilon_{\text{г}}$		Коэффициент, показывающий, во сколько раз уменьшается напряженность электрического поля при внесении в него породы	$2 \div 30$
	Относительная магнитная проницаемость	μ		Коэффициент, показывающий, во сколько раз магнитная индукция поля изменяется при помещении в него образца породы по сравнению с полем в вакууме	$0,9998 \div 6,5$

Таблица Д.2 – Классификация наиболее часто применяемых физико-технических параметров горных пород [14, п. 2.1]²

Группа свойств	Подгруппа свойств	Физические параметры пород	Обозначение
1 Плотностные		Плотность	ρ_0
		Объёмная масса	ρ
		Коэффициент плотности	$k_{пл}$
		Удельный вес	γ_0
		Объёмный вес	γ
		Пористость общая	P
		Пористость эффективная	$P_{эф}$
		Коэффициент пористости	$k_{п}$
		Насыпная масса	ρ_n
		Насыпной вес	γ_n
		Коэффициент разрыхления	k_p
2 Механические	Упругие	Модуль Юнга	E
		Коэффициент Пуассона	ν
		Модуль сдвига	G
		Модуль всестороннего сжатия	K
		Модуль одностороннего сжатия	M
		Предел упругости	σ_E
	Прочностные	Предел прочности при сжатии	$\sigma_{сж}$
		Предел прочности при растяжении	σ_p
		Предел прочности при сдвиге	$\tau_{сдв}$
		Сцепление	C
		Угол внутреннего трения	φ
	Пластические	Коэффициент пластичности	$k_{пл}$
		Модуль деформации	$E_{деф}$
	Реологические	Параметры ползучести	$\alpha_{п}, \delta$
		Период релаксации	t_0
		Длительная прочность	$\sigma_{дл}$
		Предел длительной прочности	σ_{∞}

² Параметры, выделенные синим фоном, определяют в работах настоящего лабораторного практикума.

218
ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Группа свойств	Подгруппа свойств	Физические параметры пород	Обозначение
3 Тепловые	Проводимость	Коэффициент теплопроводности	λ
		Температуропроводность	$\alpha_{\text{ТП}}$
	Поглощение	Удельная теплоёмкость	c
	Воздействие	Температура плавления	$T_{\text{пл}}$
		Теплота плавления	$Q_{\text{пл}}$
		Коэффициент линейного теплового расширения	$\alpha_{\text{Т}}$
		Коэффициент объёмного теплового расширения	$\gamma_{\text{Т}}$
		Температура фазовых превращений	$T_{\text{ф}}$
4 Электрические	Проводимость	Удельное электрическое сопротивление	$\rho_{\text{э}}$
		Удельная электрическая проводимость	$\sigma_{\text{э}}$
	Поглощение	Относительная диэлектрическая проницаемость	ε_r
		Тангенс угла диэлектрических потерь	$\text{tg } \delta$
	Воздействие	Пробивная напряженность (электрическая прочность)	$E_{\text{э. п}}$
5 Магнитные	Поглощение	Остаточная намагниченность	$I_{\text{ост}}$
		Магнитная проницаемость	μ
		Магнитная восприимчивость	χ
	Воздействие	Температура Кюри	$T_{\text{с}}$
		Коэрцитивная сила	$H_{\text{с}}$
6 Волновые	Акустические	Скорость распространения продольной волны	$v_{\text{р}}$
		Скорость распространения поперечной волны	$v_{\text{с}}$
		Скорость распространения поверхностной волны	$v_{\text{Л}}$
		Коэффициент поглощения	θ
		Удельное волновое сопротивление	z
		Коэффициент отражения	$k_{\text{отр}}$
		Коэффициент преломления	n
		Критический угол полного внутреннего отражения	i
	Электро-магнитные	Скорости распространения волн	v, c
		Коэффициент поглощения	$\theta_{\text{эм}}$

219
ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Группа свойств	Подгруппа свойств	Физические параметры пород	Обозначение
		Коэффициенты отражения	$K_{\text{и}}, K_{\text{н}}$
		Коэффициенты преломления	$n_{\text{г}}, n_{\text{н}}$
		Волновое сопротивление	$Z_{\text{эм}}$
7 Гидрогазо-динамические	Поглощение	Влагоёмкость	$w_{\text{п}}, w_{\text{м}}, w_{\text{к}}$
		Коэффициент водонасыщенности	$k_{\text{вн}}$
		Коэффициент водоотдачи	ξ
	Проводимость	Коэффициент проницаемости	$k_{\text{пр}}$
		Коэффициент фильтрации	$k_{\text{ф}}$
	Воздействие	Растворимость	$k_{\text{раст}}$
		Коэффициент набухания	$k_{\text{н}}$
		Коэффициент водопрочности	$\eta_{\text{р}}$
8 Горно-технологические	свойства, характеризующие взаимодействие между горной породой и инструментом, механизмом или технологическим процессом при производстве горных работ (ГОСТ Р 50544–93 [39])		
	Общие	Коэффициент крепости по М. М. Протодяконову (старшему)	f
		Твёрдость	$H, p_{\text{ш}}$
		Коэффициент абразивности	$k_{\text{абр}}$
	Частные	Динамический коэффициент крепости	$f_{\text{д}}$
		Контактная прочность горных пород	$p_{\text{к}}$
		Угол естественного откоса разрыхленной породы	$\varphi_{\text{о}}$
		Угол трения разрыхленной породы	$\alpha_{\text{тр}}$
		Коэффициент трения покоя разрыхленной породы	$k_{\text{тр}}$
		Буримость (время бурения 1 м шпура, скважины), м/мин	$F_{\text{п}}$
		Взрываемость	$q, q_{\text{э}}$
		Дробимость	D
		Показатель трудности бурения	$\Pi_{\text{б}}$
		Показатель трудности разрушения	$\Pi_{\text{тр}}$
		Удельная энергоёмкость бурения, МДж/м	-
		Удельное усилие резания	$K_{\text{ф}}$
		Экскавируемость	$\Pi_{\text{э}}$
		и другие	

Таблица Д.3 – Физико-технические параметры некоторых горных пород

Порода, руда, уголь	Объёмная масса ρ , кг/м ³	Предел прочности при			Сцепление C , МПа	Угол внутр. трения φ , градус	Коэффициент крепости по М. М. Протодя- конову f	Модуль упругости Юнга E , ГПа	Коэффициент Пуассона ν	Скорость распространения упругой волны в породе v_p , м/с
		одноосном сжатии $\sigma_{сж}$, МПа	растяжении σ_p , МПа	изгибе $\sigma_{изг}$, МПа						
	Анжерский угленосный район [20, табл. 4.2–4.3]									
Алевролит мел- козернистый	2570	48–77	3,7–9,2	-	6,5–16,3	35–40	5–8	14–19	0,20–0,29	3400
Песчаник мел- козернистый	2670	88–89	7,2–7,6	-	17,3–19,4	39	8–9	28–32	0,18–0,19	3800
	Прокопьевский угленосный район [20, табл. 4.32]									
Аргиллит	2540	26–37	3,3–4,6	-	7,4–9,1	37–38	3–4	25–26	0,25	2460
Уголь каменный [20, табл. 3.3]	1320	11–20	0,8–2,3	-	1,8–4,8	34–41	1,1–1,9	2–10	0,13–0,28	1950
	Таштагольское месторождение [10, табл. 1.2]									
Диоритовый порфирит	2700	32–130	4,1–12,5	8,2–13,2	24–72	-	4–13	41–91	0,17–0,29	4580
Кварц- карбонатная порода	2750	67–109	4,4–13,0	8,8–17,1	-	-	7–10	33–38	0,21–0,24	5600
Сиенит	2600	49–135	3,0–9,2	6,1–9,8	-	-	5–13	35–89	0,16–0,34	4950
Туф кисл. сост.	2800	42–131	4,0–11,5	7,8–12,5	-	-	4–13	34–105	0,21–0,42	-

221
ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Порода, руда, уголь	Объёмная масса ρ , кг/м ³	Предел прочности при			Сцепление C , МПа	Угол внутр. трения φ , градус	Коэффициент крепости по М. М. Прогодья- конову f	Модуль упругости Юнга E , ГПа	Коэффициент Пуассона ν	Скорость распространения упругой волны в породе v_p , м/с
		одноосном сжатии $\sigma_{сж}$, МПа	растяжений σ_p , МПа	изгибе $\sigma_{изг}$, МПа						
	Шерегешское месторождение [10, табл. 2.1]									
Альбитофир	2580	110–355	32–43	-	22,0	23	11–35	56–65	0,25–0,27	-
Гранит	2600	122–268	17,0	-	20,0	18	12–27	63	0,19	4350
Известняк мраморизован.	2690	53–147	9,2	-	8,0	35	5–15	36	0,27	4950
Порфирит	2780	75–265	-	-	-	-	8–26	68	0,23	4500
Руда магнетитовая	4200	148–245	16–30,5	-	17,0	30	15–24	57–98	0,16–0,21	-
Сиенит	2600	170–231	28	-	27,0	30	17–23	51	0,26	4950
Скарн	3380	138–458	35–43	-	37,5	25	14–46	67–71	0,19–0,20	6100
	Талнахское месторождение [14, прил. 4]									
Базальт	2730	90	9	-	27	34	9	33	0,23	5400
Габбро-диабаз	2860	148	16	-	44	32	14	70	0,26	6250
Долерит	2930	130	16	-	43	32	13	71	0,25	-
Пирротиновая руда	4580	100	8		31	36	10	45	0,31	-
Роговик	2680	243	31	-	84	31	24	60–84	0,22–0,27	3640

Д.2 Плотностные свойства горных пород

Таблица Д.4 – Плотность и объёмная масса горных пород

Порода	Плотность $\rho_0 \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	Объёмная масса $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³
Каменный уголь	1,30–1,85	1,19–1,72
Антрацит	1,70–2,05	1,50–1,83
Аргиллит	1,90–2,86	1,80–2,63
Алевролит	2,30–2,92	2,01–2,78
Песчаник	2,36–3,12	2,10–2,89
Гранит	2,60–3,00	2,60–2,90
Мрамор	2,70–2,90	2,60–2,80
Габбро	3,00–3,10	2,96–3,07
Магнетитовая руда бедная	3,30–3,35	3,25–3,32
Магнетитовая руда богатая	3,80–3,95	3,78–3,92
<i>Кузнецкий бассейн</i>		
Уголь блестящий и полублестящий	1,35–1,43	1,28–1,35
Уголь матовый и полуматовый	1,48–1,84	1,37–1,67
Алевролиты и аргиллиты углистые	1,98–2,45	1,48–2,27
Пески	2,05–2,70	1,52–2,16
Почвенно-растительные слои	2,25–2,54	1,42–2,15
Супеси	2,39–2,72	1,50–2,50
Аргиллиты	2,42–2,80	2,31–2,75
Суглинки	2,49–2,77	1,46–2,21
Глина	2,56–2,78	1,55–2,32
Алевролиты	2,50–2,93	2,32–2,82

Таблица Д.5 – Общая пористость некоторых осадочных и магматических пород [17, табл. 28]

Порода	Показатель общей пористости, %		Порода	Показатель общей пористости, %	
	от	до		от	до
Песчаники	~ 0	40	Сиениты	0,5	0,6
Алевролиты	< 1	> 40	Граниты	0,1	5,0
Аргиллиты	5	20	Габбро	0,6	1,0
Лёссы	40	55	Базальты	0,6	19
Известняки	~ 0	> 35	Диабазы	0,8	12
Доломиты	< 2	> 35	Диориты	0,25 в среднем	
Мел	40	55	Туфовая лава	–	60

Таблица Д.6 – Удельный вес осадочных горных пород [17, табл. 27]

Наименование горных пород	Удельный вес γ_0 , Н/м ³	
	от	до
Алевролиты	24000	30400
Ангидриты	27200	29900
Аргиллиты	26300	28600
Доломиты	25500	31900
Известняки	24100	29800
Мел	26300	27300
Мергели	23700	29200
Песчаники	24000	32000

Таблица Д.7 – Значения коэффициента разрыхления k_p в классификации горных пород по способу разработки (СНиП IV-5-82)³

Категория крепости пород по ЕНиР-36	Способ разработки	Наименование горных пород	Объёмная масса ρ , кг/м ³	Коэффициент разрыхления k_p	Коэффициент крепости по шкале проф. М. М. Протодьяконова f
Внекатегорная	Взрывной	Кварциты исключительной крепости, джеспилиты, габбро-диабаз, габбро-диорит, порфириты крепкие	2900	2,2	19–20
		Кремень, сливные кварцитовидные песчаники исключительной крепости, кремнёвые известняки крепкие	3000	2,2	15–16
		Базальт оливковый, андезит, роговик, диабаз, диорит высшей крепости; гранит мелкозернистый весьма крепкий	3100–3300	2,2	17–18
I	Взрывной	Среднезернистые граниты, кварцитовидные сливные песчаники, кварциты, диабазы, гнейсы крепкие, порфирит, трахит крепкий, сиенит	2700–3000	2,2	12–14
		Мелкозернистые монолитные окварцованные песчаники, сливные известняки исключительной крепости; мрамор исключительной крепости	2700–2900	2,2	10–11
II	Взрывной	Конгломерат крепкий на известковом цементе, песчаники крепкие на кварцевом цементе, колчеданы, крепкие доломиты и известняки	2700–2900	2,0	8–9
		Змеевик, гранит и сиенит крупнозернистые	2600–2800	2,0	7
III	Взрывной	Крепкие аргиллиты и алевролиты, песчано-глинистые сланцы, сидерит, магнезит змеевик, известняк плотный	2800	2,0	6
		Граниты, гнейсы, сиениты и прочие массивные и изверженные породы	2500	2,0	5

³ СНиП IV-5-82. Приложение. Сборники единых районных единичных расценок на строительные конструкции и работы. Сб. 35. Горнопроходческие работы. Кн. 1 / Госстрой СССР. – Москва : Стройиздат, 1984. – 312 с.

225
ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Категория крепости пород по ЕНиР-36	Способ разработки	Наименование горных пород	Объёмная масса ρ , кг/м ³	Коэффициент разрыхления k_p	Коэффициент крепости по шкале проф. М. М. Прото- дьяконова f
		Известняк мергелистый, песчаник глинистый, сланец слюдистый, доломиты	2200–2300	2,0	4–5
IV	Взрывной	Глинистые и углистые сланцы средней крепости, плотный мергель, слабые песчанистые сланцы, слабые известняки	2000	1,8	3
		Антрацит, крепкий каменный уголь, конгломерат и песчаник слабые, алевролит и аргиллит средней крепости, крепкая каменная соль	1400–1900	1,8	2
V	Взрывной и отбойными молотками	Слабые глинистые сланцы, опока крепкая, очень слабые выветрившиеся известняки и доломиты, каменный уголь средней крепости, крепкий бурый уголь	1400–2000	1,4	1,5–2,0
		Плотные карбонатные глины, мел, плотный мергель средней крепости, гипс	1900–2600	1,8	1,5
VI	Взрывной и отбойными молотками	Каменный уголь мягкий, отвердевший лёсс, мергель мягкий, опока, бурый уголь, карбонатная глина, трепел, мягкая каменная соль, пористый гипс, тяжелая ломовая глина, моренный суглинок; жирная глина и тяжелый суглинок, содержащий до 10 % гальки; мелоподобные слабые породы (мергель, опока и др.), строительный мусор	1200–1950	1,4–1,8	1–1,5
VII	Вручную	Легкая глина, суглинки, супески, лёсс, галечник, гравий, щебень	1600–1800	1,8	0,9
		Песок, песок-плавун, почвенный слой	1500	-	0,6
		Рыхлый известняковый туф и другие слабые породы	1100	-	0,4

Д.3 Тепловые свойства горных пород

Таблица Д.8 – Тепловые параметры минералов и горных пород [14, прил. 2, 8]⁴

Минерал, <i>порода</i>	Удельная теплоёмкость c , кДж/(кг·К)	Коэффициент линейного теплого расширения $\alpha \cdot 10^5$, 1/К	Коэффициент теплопровод- ности λ , Вт/(м·К)
Альбит	0,75	0,8	2,4
Ангидрит	0,50	1,8	4,6
Антрацит	0,96	-	0,4
Апатит	0,70	1,7	1,4
Аргиллит	0,74–0,99	0,3–1,1	0,25–3,01
Базальт	0,63–0,88	0,54	2,9–4,3
Биотит	0,77	-	1,6
Габбро	0,17	-	2,0
Галит	0,86	4,0	5,3
Гематит	0,63	0,8	11,2
Гипс	1,10	2,4	1,1
Глина	0,18–0,75	-	0,4–3,0
Гнейс	0,17	-	1,6–3,4
Гранит	0,54–0,79	0,6–0,9	2,2–4,1
Диабаз	0,17	0,54	3,4
Диопсид	0,65	1,6	4,1
Доломит	0,86	0,9	3,0
Известняк	0,67–1,04	0,5–0,89	1,0–2,3
Кальцит	0,79	1,3	3,9
Каменная соль	1,47–4,65	-1,3	1,67–5,50
Каолинит	0,92	-	0,9
Кварц	0,85	1,3	7,0
Кварцит	0,21	1,1	6,3
Корунд	0,5	0,59	7,0
Лабрадор	0,83	-	-

⁴ По алфавиту перечислены: прямым шрифтом – минералы, курсивом – породы.

227
ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Минерал, <i>порода</i>	Удельная теплоёмкость c , кДж/(кг·К)	Коэффициент линейного теплового расширения $\alpha \cdot 10^5$, 1/К	Коэффициент теплопровод- ности λ , Вт/(м·К)
Магнетит	0,60	1,6	4,7
Магнезит	0,88	-	1,9
Микроклин	0,69	1,2	3,9
<i>Мрамор</i>	0,42	0,3–1,5	1,3
Нефелин	0,79	1,0	2,6
Оливин	0,75	0,8	4,0
Олигоклаз	0,79	0,9	2,2
Ортоклаз	0,62	0,2	4,1
<i>Перидотит</i>	0,67	0,45	3,2
<i>Песчаник</i>	0,81	0,5–1,2	1,3–4,2
Пирит	0,5	3,2	38,8
Роговая обманка	0,67	0,9	3,0
Роговик мартитовый	0,58–1,04	-	4,3–4,8
Серпентин	0,65	4,0	2,9
<i>Сланец глинистый</i>	0,75–0,81	0,9	1,5–2,2
Сфалерит	0,59	0,6	26,4
Тальк	0,70	0,4	3,0
<i>Уголь бурый</i>	1,13	-	0,24
<i>Уголь каменный</i>	1,30	-	0,5–0,9
Флюорит	0,78	1,96	4,0
Халцедон	0,90	1,36	1,8
Хлорит	0,60	0,8	2,78
Хромит	0,62	1,2	4,2
<i>Кузнецкий угольный бассейн</i>			
<i>Алевролит</i>	0,76–1,20	0,3–0,9	-
<i>Аргиллит</i>	0,75–1,10	0,3–1,0	-
<i>Песчаник</i>	0,71–1,30	0,5–1,1	-
<i>Уголь каменный</i>	0,84–1,42	-	-

Д.4 Магнитные свойства горных пород

Таблица Д.9 – Классификация некоторых минералов и горных пород по относительной магнитной проницаемости μ [14, прил. 20]

Диамагнитные $\mu = 0,999836-1,0$	Парамагнитные $\mu = 1,0-1,0064$	Ферромагнитные $\mu = 1,0064-6,5$
Апатит	α -гематит	γ -гематит
Арагонит	Воздух	Валлерит
Вода	Гиперстен	Виллемит
Галенит	Доломит	Кубанит
Галит	Ильменит	Лимонит
Гипс	Магнезит	Магнетит
Графит	Мусковит	Магномагнетит
Известняк	Оливин	Пирротин
Кальцит	Пироксен	Титаномагнетит
Ортоклаз	Пиролозит	Франклинит
Плагиоклаз	Порфирит	Якобсит
Сильвин	Сидерит	-
Сфалерит	Шпинель	-
Уголь	-	-

Д.5 Горно-технологические свойства горных пород

Таблица Д.10 – Шкала *крепости* горных пород по М. М. Протодяконову (старшему) [9, п. 1.2]

Категория	Степень крепости	Порода	Коэф. крепости f
I	В высшей степени крепкие	Наиболее крепкие, плотные и вязкие кварциты и базальты. Исключительные по крепости другие породы	20
II	Очень крепкие	Очень крепкие гранитовые породы. Кварцевый порфир, очень крепкий гранит, кремнистый сланец. Менее крепкие, нежели указанные выше кварциты. Самые крепкие песчаники и известняки	15
III	Крепкие	Гранит (плотный) и гранитовые породы. Очень крепкие песчаники и известняки. Кварцевые рудные жилы. Крепкий конгломерат. Очень крепкие железные руды	10
IIIa	То же	Известняки (крепкие). Некрепкий гранит. Крепкие песчаники. Крепкий мрамор. Доломит. Колчедан	8
IV	Довольно крепкие	Обыкновенный песчаник. Железные руды	6
IVa	То же	Песчанистые сланцы. Сланцевые песчаники	5
V	Средние	Крепкий глинистый сланец. Некрепкий песчаник и известняк, мягкий конгломерат	4
Va	То же	Разнообразные сланцы (некрепкие), плотный мергель	3
VI	Довольно мягкие	Мягкий сланец. Очень мягкий известняк, мел, каменная соль, гипс. Мерзлый грунт, антрацит. Обыкновенный мергель. Разрушенный песчаник, сцементированные галька и хрящ, каменистый грунт	2
VIa	То же	Щебенистый грунт. Разрушенный сланец, слежавшиеся галька и щебень, крепкий каменный уголь. Отвердевшая глина	1,5
VII	Мягкие	Глина (плотная), мягкий каменный уголь, крепкий нанос – глинистый грунт	1,0
VIIa	То же	Легкая песчанистая глина, лёсс, гравий	0,8
VIII	Землистые	Растительная земля, торф, легкий суглинок, сырой песок	0,6
IX	Сыпучие	Песок осыпи, мелкий гравий, насыпная земля, добытый уголь	0,5
X	Плывучие	Плывуны, болотистый грунт, разжиженный лёсс, другие разжиженные грунты	0,3

Таблица Д.11 – Классификация горных пород по динамическому коэффициенту крепости (по М. И. Койфману, выборка из [17, табл. 18])

Группа пород по динамической прочности	Коэффициент динамической крепости f_d		Горные породы (примеры)
	пределы по подгруппам	средние значения	
I. Весьма слабые, весьма хрупкие	$< 0,15$	0,1	Весьма слабые и хрупкие глинистые и пористые алевролиты ($f_d = 0,3-0,4$)
	0,15–0,25	0,2	Весьма хрупкие пористые песчаники ($f_d < 0,3-0,4$; $\sigma_{сж}$ до 300 кгс/см ²)
	0,25–0,40	0,3	Редко встречающиеся слабые и хрупкие крупнопористые известняки-ракушечники ($f_d = 0,3-0,4$; $\sigma_{сж} = 50$ кгс/см ² и меньше). Весьма слабые и хрупкие угли ($f_d = 0,1-0,4$)
II. Слабые и хрупкие	0,40–0,60	0,5	Слабые и хрупкие пористые аргиллиты и глинистые сланцы ($f_d = 1,5$)
	0,60–1,0	0,8	Слабые и хрупкие глинистые, пористые и другие алевролиты ($f_d = 0,4-1,5$; $\sigma_{сж} = 30-120$ кгс/см ²)
	1,0–1,5	1,2	Хрупкие слабо сцементированные песчаники ($f_d = 0,4-1,5$; $\sigma_{сж} = 30-170$ кгс/см ²). Весьма слабые пористые известняки, крупнопористые известняки-ракушечники ($f_d = 0,6-1,5$; $\sigma_{сж} = 30-250$ кгс/см ²). Некоторые крупнозернистые биотитовые и выветрелые граниты ($f_d = 1,4-1,5$; $\sigma_{сж} = 600-700$ кгс/см ²). Мартитовые руды низкой крепости ($f_d = 0,4-1,5$; $\sigma_{сж} = 80-200$ кгс/см ²). Слабые и хрупкие апатитовые руды ($f_d < 1,5$, $\sigma_{сж} = 140-150$ кгс/см ²). Каменные угли ниже средней крепости и слабые ($f_d = 0,4-1,5$). Сравнительно слабые бурые угли ($f_d < 1,5$).
III. Средней крепости и хрупкости	1,5–2,3	1,8	Песчаник средней крепости и хрупкости ($f_d = 1,5-3,0$; $\sigma_{сж} = 300-600$ кгс/см ²). Обсидианы ($f_d = 2-2,5$; $\sigma_{сж} = 200-250$ кгс/см ²). Большинство сравнительно более крепких бурых углей ($f_d = 1,5-2,5$). Каменные угли и антрациты средней крепости и крепкие ($f_d = 1,5-3,0$)

231
ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Группа пород по динамической прочности	Коэффициент динамической крепости f_d		Горные породы (примеры)
	пределы по под-группам	средние значения	
	2,3–3,5	2,8	Аргиллиты и глинистые сланцы средней крепости и хрупкости, аргиллиты углистые ($f_d = 1,5–5,2$; $\sigma_{сж} = 200–500$ кгс/см²). Сильно окремненные глинистые сланцы ($f_d = 2–3$; $\sigma_{сж}$ до 300 кгс/см² и больше). Слабые глинистые песчаники ($f_d = 2,0–2,5$; $\sigma_{сж} = 50–200$ кгс/см²). Весьма крепкие и хрупкие кварцитовидные песчаники ($f_d = 3,0–4,0$). Хрупкие сподуменовые руды ($f_d = 1,9–3,0$; $\sigma_{сж} = 300–600$ кгс/см²). Весьма крепкие угли и антрациты ($f_d = 3,0–4,0$).
	3,5–5,2	4,0	Алевролиты средней крепости и хрупкости ($f_d = 1,5–5,2$; $\sigma_{сж} = 90–1000$ кгс/см²). Известняки средней крепости и хрупкости ($f_d = 1,5–5,2$; $\sigma_{сж} = 200–600$ кгс/см²). Измененные граниты ($f_d = 4–5$; $\sigma_{сж} = 500–700$ кгс/см²). Граниты средней хрупкости ($f_d = 3,0–5,0$; $\sigma_{сж}$ до 1300 кгс/см²). Некоторые полиметаллические и медные руды ($f_d = 4–6$).
IV. Повышенной крепости и вязкие	5,2–8,0	6,0	Крепкие аргиллиты и глинистые сланцы ($f_d = 5,2–14$; $\sigma_{сж} = 400–1600$ кгс/см²). Крепкие плотные мраморизованные известняки ($f_d = 6–7$; $\sigma_{сж} = 1300–1500$ кгс/см²). Крепкие неветрелые кварциты ($f_d = 7–9$; $\sigma_{сж} = 2000–3000$ кгс/см²). Некоторые туфобрекчии ($f_d = 5–8$; $\sigma_{сж} = 700–1000$ кгс/см²).
	8,0–12,0	10,0	Крепкие алевролиты ($f_d = 5,2–10$; $\sigma_{сж} = 500–1300$ кгс/см² и больше). Известняки повышенной плотности и вязкие ($f_d = 5,2–14$; $\sigma_{сж} = 700–2600$ кгс/см²).
	12,0–18,0	15,0	Крепкие углисто-глинистые сланцы и углистые аргиллиты (f_d до 15). Окварцованные глинистые сланцы (f_d до 15). Крепкие аспидные и кровельные сланцы ($f_d = 10–18$; $\sigma_{сж} = 800–2500$ кгс/см²).

Группа пород по динамической прочности	Коэффициент динамической крепости f_d		Горные породы (примеры)
	пределы по подгруппам	средние значения	
			Крепкие филлиты ($f_d = 12-18$; $\sigma_{сж} = 1200-2000$ кгс/см²). Песчаники повышенной крепости и весьма крепкие ($f_d = 5,2-17$; $\sigma_{сж} = 1600-3000$ кгс/см²). Змеевики весьма крепкие (f_d до 16; $\sigma_{сж} = 500-2000$ кгс/см²). Базальты плотные, крепкие и средней крепости ($f_d = 7-15$; $\sigma_{сж} = 800-3000$ кгс/см²). Крепкие и вязкие диабазы ($f_d = 14-18$; $\sigma_{сж} = 700-1300$ кгс/см²). Некоторые граниты, отличающиеся сравнительно повышенной вязкостью ($f_d = 10-14$; $\sigma_{сж} = 900-2500$ кгс/см²). Крепкие джеспилиты и мартитовые роговики ($f_d = 12-18$; $\sigma_{сж}$ до 3000 кгс/см²). Мартито-красковые и красковые роговики крепкие ($f_d = 8-14$). Мартитовые руды повышенной крепости ($f_d = 5,2-18,0$; $\sigma_{сж} = 600-2500$ кгс/см²).
V. Весьма крепкие и вязкие	18,0–27,0	22,0	Весьма вязкие и крепкие аргиллиты и глинистые сланцы ($f_d > 18$). Весьма крепкие филлиты ($f_d > 18$; $\sigma_{сж}$ до 2000 кгс/см²). Весьма крепкие и вязкие диабазы ($f_d = 19-25$; $\sigma_{сж} = 1500-2300$ кгс/см²). Весьма крепкие и вязкие порфириты и диорит-порфириты ($f_d = 18-25$). Крепкие и вязкие скарны ($f_d = 18-25$ и больше). Весьма крепкие и вязкие мартитовые руды ($f_d = 18-22$; $\sigma_{сж} = 3500-4000$ кгс/см²).
	> 27	30,0	Весьма крепкие джеспилиты и мартитовые роговики (f_d до 35–38; $\sigma_{сж} = 4000-5000$ кгс/см²).

Таблица Д.12 – Классификация горных пород по *контактной прочности* (по проф. Л. И. Барону и Л. Б. Глатману) [15, п. 2.2]

Класс породы по контактной прочности	Характеристика	Показатель контактной прочности p_k		Характерные породы, входящие в данный класс
		кгс/мм ²	МПа	
I	Слабые	< 30	< 300	Аргиллиты, алевролиты слабые, сильвиниты
II		30–40	300–400	Аргиллиты, алевролиты, руда маритовая
III	Ниже средней крепости	40–50	400–500	Сланец песчанистый, алевролиты, хлоритовые сланцы
IV		50–65	500–650	Песчаники полимиктовые, известняки, сланцы
V	Средней крепости	65–90	650–900	Песчаники крупнозернистые, известняки, сланцы
VI		90–125	900–1250	Алевролиты известковистые, дунит, мрамор
VII	Крепкие	125–175	1250–1750	Песчаники кварцевые, роговик, порфирит, апатит, руда магнетитовая
VIII		175–245	1750–2450	Сидерит, скарн гранато-магнетитовый
IX	Очень крепкие	245–340	2450–3400	Порфирит диоритовый, сиенит, гранодиорит, габбро
X		340–450	3400–4500	Базальт, пироксенит
XI	Крепчайшие	450–565	4500–5650	Кварц, скарн шеелитовый, гранит
XII		> 565	> 5650	Кварцит, джеспилит

Таблица Д.13 – Значения *контактной прочности* (по Л. И. Барону) некоторых пород, определённые в лаборатории механических способов разрушения горных пород ИГД им. А. А. Скочинского [11, разд. 18, с. 170]

Горные породы	Контактная прочность p_k , кгс/мм ²
Известняк венецкий	29,0
Сланец филлитовый	31,6
Известняк коробчеевский	34,7–44,0
Песчаник ожелезнённый	35,4
Глинистый сланец	39,2–68,3
Песчанистый сланец	40,6–79,6
Микросиенит полосчатый	54,5
Песчаник крупнозернистый	63,5
Серицитовый сланец	65,9
Песчаник мелкозернистый	81,8–166,0
Известняк доломитизированный	85,5
Мрамор белый кристаллический	105,6
Роговик красково-мартитовый	115,0
Диорит	138,0
Березит	176,0
Песчаник медистый	182,0
Мартитовая руда (окварцованная)	196,0
Полевой шпат (ортоклаз)	210,0
Джеспилит мелкозернистый (плотный)	214,0
Гранит	239,0
Пироксенит	249,5
Кварцит шокшинский	290,0

Учебное издание

Дерюшев Александр Владимирович
Будников Павел Михайлович

ФИЗИКА ГОРНЫХ ПОРОД

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Отпечатано с готового оригинал-макета
с сохранением пунктуации и орфографии авторов

Подписано в печать 29.10.2021. Формат 70×100 1/16. Бумага офсетная.
Гарнитура Times New Roman. Печать цифровая. Усл. печ. л. 14,6.
Тираж 300 экз. Заказ 50.

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачёва.
650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Отпечатано в издательском центре Кузбасского государственного технического
университета имени Т. Ф. Горбачёва.
650000, г. Кемерово, ул. Демьяна Бедного, 4а.