

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания

по выполнению лабораторных работ
по дисциплине «Физика горных пород»
для специальности 21.05.03 Технология геологической разведки

Ставрополь
2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1 Цели и задачи физики горных пород.	
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2 Плотность горных пород	
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3 Магнитные свойства горных пород	
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4 Электрические свойства горных пород	
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5 Упругие свойства горных пород	
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6 Теплофизические свойства горных пород	
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7 Ядерно-физические свойства	
Приложение А Требования к оформлению отчета по выполнению лабораторных работ	103
Литература	107

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

Цели и задачи физики горных пород

Цель работы. Ознакомление с понятием плотности и плотностями пластовых жидкостей. Освоение методики определения плотности жидкости пикнометрическим способом.

Формируемые компетенции или их части

ПК-13 Наличием высокой теоретической и математической подготовки, а также подготовки по теоретическим, методическим и алгоритмическим основам создания новейших технологических процессов геологической разведки, позволяющим быстро реализовывать научные достижения, использовать современный аппарат математического моделирования при решении прикладных научных задач.

Теоретическая часть

Плотность σ – физическое свойство тел, количественно оцениваемое величиной отношения их массы к занимаемому ими объему. Единица измерения плотности в СИ – 1 кг/м^3 , допускается применение производной единицы – 1 г/см^3 .

Плотность пород σ_n зависит от плотностей ее твердой σ_t , жидкой $\sigma_{ж}$ и газовой σ_g фаз, а также от соотношения их в единице объема породы V_n .

Знание плотностей пород необходимо для решения следующих геологических задач: установление плотностной дифференциации пород; детальное группирование пород; выяснение характера связей плотности с другими петрофизическими величинами; оценка особенностей формирующегося осадка; направление и степень преобразования пород; выявление региональной и локальной смены пород; выяснение особенностей и истории формирования тектоники площадей, территорий, регионов;

освещение вопросов формирования локальных структур в условиях различных тектонических зон; районирование территорий по характеру изменения плотности с глубиной; выделение в разрезах плотностных контактов (границ) и установление причин их появления, отражающих условия осадконакопления; оценка угленосности отложений и их оруденения.

Плотность газовой, жидкой и твердой фаз пород определяется для оценки их вклада в плотность пород, общего представления о вещественном или минеральном составе и качестве почвенного воздуха, пластовых газов, вод, нефтей, минералов и пород, как одно из основных свойств для диагностики и классификации природных смесей газов, пластовых вод, нефтей, минералов и пород.

В лаборатории обычно определяют плотность абсолютно сухого образца породы σ_c , так как трудно сохранить характерные для естественного залегания пород влажность W , минерализацию и водонефтегазонасыщенность пород. Далее по значениям σ_c , известному коэффициенту объемной влажности W_n породы и плотности σ_v насыщающей ее воды или по найденным плотностям σ_v , σ_n и σ_g воды, нефти и газа и коэффициентам k_v , k_n , k_g и водо-, нефте- и газонасыщения рассчитывают плотность σ_n породы.

Плотности твердой фазы σ_t варьируют в пределах $1,0 - 7,0 \text{ г/см}^3$, сухих пород σ_c – от $0,5$ до $7,0 \text{ г/см}^3$, влажных $\sigma_{вн}$ – от $1,1$ до $7,0 \text{ г/см}^3$.

В зависимости от концентрации солей плотность вод увеличивается от 1 (пресная вода) до $1,26 \text{ г/см}^3$ (предельно крепкий раствор). С увеличением давления (глубины) плотность увеличивается. Рост температуры приводит к ее уменьшению, так как температурный коэффициент расширения, изменяясь от $6,5 \cdot 10^{-5}$ при $4 \cdot 10^\circ \text{C}$ до $58 \cdot 10^{-5}$ при температуре $65 - 70^\circ \text{C}$, также растет.

Если известна плотность жидкости и температура, то можно определить ее минерализацию (рис. 1.1). Плотности жидкостей могут быть

измерены с большей точностью, относительная погрешность в измерении плотностей жидкостей обычно не превосходит 0,005.

Плотность нефтей колеблется в пределах 0,75 – 0,98 ($t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$), чаще всего в пределах 0,82 – 0,92 г/см³. Она зависит, во-первых, от содержания в ней легких низкокипящих – бензиновых и лигриновых – фракций, во-вторых, от содержания асфальто-смолистых компонентов, обладающих плотностью порядка 1 г/см³ и выше, в-третьих, от химической природы углеводородов, составляющих основную массу нефти.

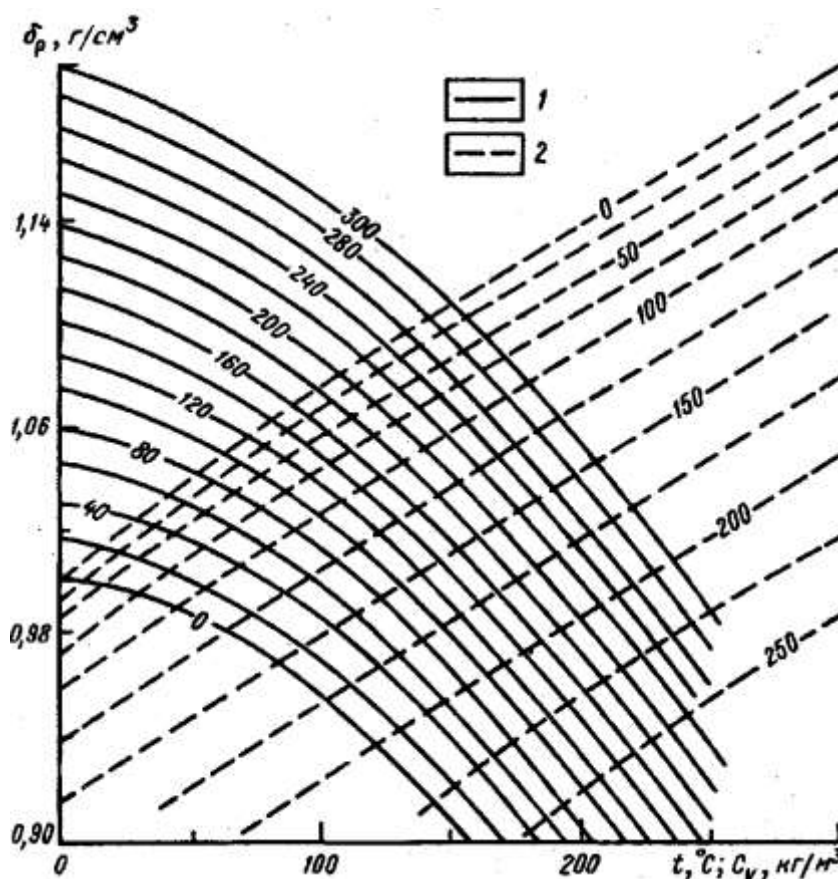


Рисунок 1.1 – Зависимость плотности растворов NaCl от объемной концентрации C_v и температуры t

1 – зависимость от температуры, 2 – зависимость от концентрации

Плотность воздуха при температуре 20 $^{\circ}\text{C}$ и давлении 0,1 МПа равна 0,0012 г/см³.

Плотность углеводородных газов находится в пределах от 0,000715 (метан) до 0,00317 (пентан) г/см³ и в среднем близка к плотности воздуха.

Для определения плотности однородной жидкой фазы или отдельных компонентов (нефть, вода) неоднородной в лабораторных условиях используют поплавковый (ареометрический), весовой (пикнометрический), гидростатический, вибрационный, радиоактивный, ультразвуковой, оптический и кондуктометрический способы. Чаще других применяется пикнометрический способ.

Пикнометрический способ определения плотности сводится к взвешиванию исследуемой жидкости в пикнометре известного объема.

Пикнометр представляет собой сосуд объемом

$$V_n = \frac{m_v}{\sigma_v} = \frac{m_{n.v} - m_n}{\sigma_v}, \quad (1.1)$$

где m_v , $m_{n.v}$ и m_n – соответственно массы воды в объеме пикнометра, пикнометра с водой и сухого пикнометра. Масса изучаемой жидкости в объеме V_n пикнометра будет $m_{ж} = m_{n.ж} - m_n$, где $m_{n.ж}$ – масса пикнометра и жидкости в его объеме.

Оборудование и материалы

1. Лабораторные весы.
2. Пикнометры.
3. Стекланные сосуды объемом 200-500 мл.
4. Пипетки.
5. Дистиллированная вода
6. NaCl

Указания по технике безопасности

При работе в специализированной лаборатории необходимо соблюдать следующие правила:

1. Не входить в лабораторию без разрешения преподавателя (лаборанта).
2. Не включать без разрешения оборудование.

3. При несчастном случае или поломке оборудования позвать преподавателя (лаборанта).
4. Не трогать провода и разъемы.
5. Не допускать порчи оборудования.
6. Не шуметь.

Указания по порядку выполнения работы

1. Приготовление модели пластовой воды.

1.1. В стеклянном сосуде готовим раствор NaCl, используя примерно 5–10 г соли на 100 мл воды.

2. Определение рабочего объема пикнометра V_n при температуре 20° C по воде.

2.1. Пикнометр моют и сушат, взвешивают и определяют массу пикнометра m_n .

2.2. Заполняют пикнометр дистиллированной водой до метки на горлышке.

2.3. Обтирают пикнометр и снова взвешивают для определения его массы $m_{nв}$ с водой.

2.4. Рассчитывают по формуле $V_n = \frac{m_{nв} - m_n}{\rho}$ объем пикнометра.

в

3. Определение плотности жидкости.

3.1. В пикнометр, высушенный до постоянной массы, по стенке наливают исследуемую жидкость (модель пластовой воды) до метки на горлышке.

3.2. Взвешивают пикнометр для определения массы $m_{n.жс}$ пикнометра с жидкостью.

3.3. Рассчитывают плотность жидкости (г/см³) по формуле:

$$\sigma_{жс} = \frac{(m_{п.жс} - m_n) \sigma_{\epsilon}}{(m_{п.г} - m_n)} \quad (1.2)$$

4. Вычисление погрешности измерений.

Рассчитываем наибольшую метрологическую относительную погрешность:

$$\frac{\Delta \delta}{\delta_{жс}} = \frac{\Delta m}{m_{п.жс}} + \left(\frac{m_{п.г} - m_n}{m_{п.г} - m_{жс}} \right) \Delta m_n + \frac{\Delta m}{m_{п.г}} + \frac{\Delta \delta}{\delta_{\epsilon}} \quad (1.3)$$

При взвешивании на лабораторных весах ВЛТЭ-1100 погрешности $\Delta m_n = \Delta m_{п.г} = \Delta m_{п.жс} = 0,01$ г. $\Delta \delta_{\epsilon}$ – погрешность определения плотности дистиллированной воды принимаем равной

Содержание отчета

Отчет формируем в соответствии с приложением А.

Исходные данные и результаты вычислений для определения $\sigma_{жс}$ пикнометрическим способом записываются по форме, приведенной в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Номер образца	Жидкость	Масса, г			σ_{ϵ} , г/см ³		$\sigma_{жс}$, г/см ³	$\frac{\Delta \delta_{жс}}{\delta_{жс}}$, %
		m_n	$m_{п.г}$	$m_{п.жс}$				

Контрольные вопросы

1. Что такое плотность?
2. Какие пластовые жидкости вы знаете?
3. Какие существуют лабораторные способы определения плотностей жидкости?
4. В каких пределах изменяется плотность пластовых жидкостей и газов?
5. Что такое пикнометр?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

Плотность горных пород

Цель работы. Ознакомление с понятием плотности твердой фазы горных пород и пределами её изменения. Освоение методики определения плотности твердой фазы пикнометрическим способом.

Формируемые компетенции или их части

ПК-13 Наличием высокой теоретической и математической подготовки, а также подготовки по теоретическим, методическим и алгоритмическим основам создания новейших технологических процессов геологической разведки, позволяющим быстро реализовывать научные достижения, использовать современный аппарат математического моделирования при решении прикладных научных задач.

Теоретическая часть

Плотность твердой фазы σ_T измеряется для оценки ее вклада в плотность пород, общего представления о вещественном или минеральном составе, выяснения генезиса обломочных пород (размещения источников и направления сноса обломочного материала), корреляции отложений, определения коэффициента пористости по Мельчеру и др.

Плотность твердой фазы или минерального скелета σ_T зависит от плотности слагающих породу минералов σ_{Ti} . Теоретически её можно рассчитать по формуле:

$$\sigma_T = \sum_{i=1}^n \sigma_{Ti} \cdot V_i, \quad (2.1)$$

где n – число минералов, слагающих породы; V_i – доля объема, занимаемого i -м минералом, плотностью σ_{Ti} .

Плотность минералов изменяется от 0,98 г/см³ для льда до 22,5 г/см³ для иридиевого осмия.

Основное влияние на плотность рудных минералов оказывает их средневзвешенная относительная атомная масса, а на плотность породообразующих минералов – упаковка атомов в молекуле.

Минералы подразделяются на *плотные* ($\sigma_T > 4$ г/см³), *средней* ($\sigma_T = 2,5-4,0$ г/см³) и *малой* ($\sigma_T < 2,5$ г/см³) плотности.

Большая часть всех минералов имеет среднюю плотность. Незначительное число минералов (10–15%) – малой плотности.

К плотным минералам относятся: селен, теллур, самородные металлы (золото, серебро, медь и др.), сульфиды, за редким исключением, более половины из окислов и гидроокислов и др.

К минералам малой плотности принадлежат следующие: из самородных неметаллов – графит и сера; некоторые из окислов и гидроокислов (лед, опал); многие минералы класса силикатов (галлуазит, монтмориллонит); некоторые из боратов (бура); водные карбонаты (сода); водные сульфаты (мирабилит), из хлоридов – галит, сильвин.

Плотность твердой фазы σ_T пород и минералов определяют следующими способами: флотационным, пикнометрическим, гидростатического взвешивания, объемным, объемно-весовым и др. Во всех способах, кроме флотационного, масса твердой фазы пород определяется взвешиванием, а объем ее гидростатическим взвешиванием при помощи пикнометров и объемомеров.

При пикнометрическом способе взвешивают при температуре t и получают массы $m_{п}$ абсолютно сухого пикнометра, $m_{п.ж}$ пикнометра, заполненного до метки рабочей (пластовая вода, керосин и др.) жидкостью, $m_{п.т}$ абсолютно сухого пикнометра, заполненного на 1/3 объема абсолютно сухой измельченной твердой фазой породы, и пикнометра с тем же объемом

твердой фазы и рабочей жидкостью $m_{п.т.ж}$, заполняющей до метки оставшийся объем пикнометра.

Зная эти массы, можно рассчитать плотность твердой фазы породы:

$$\sigma_T = \frac{(m_{п.т} - m_{п.})\sigma_{ж}}{(m_{п.ж} - m_{п.} - m_{п.т.ж} + m_{п.т})} \quad (2.2)$$

Оборудование и материалы

1. Лабораторные весы.
2. Пикнометры.
3. Пипетки.
4. Весовой стаканчик с притертой крышкой.
5. Совочек или шпатель для перемешивания пробы и взятия навески.
6. Металлическая ступка с пестиком.
7. Сита с диаметрами отверстий 0,1 и 0,25 мм.
8. Рабочая (пикнометрическая) жидкость (вода, спирт, бензин и т. п.).

Указания по технике безопасности

При работе в специализированной лаборатории необходимо соблюдать следующие правила:

1. Не входить в лабораторию без разрешения преподавателя (лаборанта).
2. Не включать без разрешения оборудование.
3. При несчастном случае или поломке оборудования позвать преподавателя (лаборанта).
4. Не трогать провода и разъемы.
5. Не допускать порчи оборудования.
6. Не шуметь.

Указания по порядку выполнения работы

1. Подготовка твердой фазы.

1.1. Отбирают образцы массой 15–20 г, не содержащие случайных примесей или включений;

1.2. Отобранные образцы измельчают в металлической (или фарфоровой) ступке;

1.3. Пропускают через набор сит диаметром 0,25–0,1 мм;

1.4. Полученные обломки породы диаметром 0,1–0,25 мм отмывают от нефти и остаточных солей спиртом или ксилолом;

1.5. Высушивают образцы (в зависимости от их состава и чувствительности к нагреванию) при комнатной температуре до постоянной массы;

2. Определение плотности твердой фазы.

2.1. Калибруют пикнометры по воде, определяют массу воды в объеме пикнометра.

2.2. Определяют массу $m_{п.т}$ подготовленной твердой фазы, для чего в абсолютно сухой пикнометр объемом 50–100 см³ с массой $m_п$ помещают 4 – 5 г или 10–11 г подготовленной твердой фазы породы и взвешивают.

2.3. Кипячением дегазируют обломки твердой фазы породы. Для этого пикнометр с породой заполняют дистиллированной водой так, чтобы порода и вода заняли 2/3 его объема и на 20–60 мин (в зависимости от состава твердой фазы) помещают пикнометр в кипящую водяную баню.

После прекращения выделения пузырьков воздуха доводят воду в пикнометре до метки на горлышке. Следят, чтобы уровень воды в пикнометре оставался постоянным (нижний край мениска воды должен находиться на уровне метки).

2.4. Определяют массу $m_{п.т.ж}$, для чего пикнометр обтирают и взвешивают.

2.5. Рассчитывают по формуле $\sigma_T = \left(\frac{(m_{п.т.} - m_{п.})\sigma_{ж}}{m_{п.ж} - m_{п.} - m_{п.т.ж} - m_{п.т.}} \right)$ плотность

твердой фазы породы.

3. Вычисление погрешности измерений.

Рассчитываем наибольшую метрологическую относительную погрешность:

$$\frac{\Delta\delta_T}{\delta_T} = \frac{\delta_T}{m_T \delta_{ж}} \left[\left(\frac{\delta_{ж}}{\delta_T} - 1 \right) \left(\Delta m_{п.т.} + \Delta m_{п.} \right) + \Delta m_{п.ж} + \Delta m_{п.т.ж} \right] + \frac{\Delta\delta_{ж}}{\delta_{ж}} \quad (2.3)$$

При взвешивании на лабораторных весах ВЛТЭ-1100 погрешности $\Delta m_n = \Delta m_{п.т.} = \Delta m_{п.ж} = \Delta m_{п.т.ж.} = 0,01$ г. $\Delta\delta_{ж}$ – погрешность определения плотности дистиллированной воды принимаем равной

Содержание отчета

Отчет формируем в соответствии с приложением А.

Исходные данные и результаты для определения σ_T пикнометрическим способом записываются по форме, приведенной в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Порода	№ образца	№ пикнометра	Масса, г				Плотность, г/см ³		$\Delta\delta_{ж} / \delta_{ж}, \%$
			$m_{п.}$	$m_{п.в.}$	$m_{п.т.}$	$m_{п.т.в.}$	$\sigma_{в.}$	$\sigma_{т.}$	

Контрольные вопросы

1. Что такое плотность твердой фазы и чем отличается от плотности сухой породы?
2. В каких пределах изменяется плотность твердой фазы?
3. Какие существуют зависимости в изменении плотности химических элементов?
4. Какие факторы определяют плотность минералов?
5. Какие существуют способы определения плотности твердой фазы?

6. В чем сущность пикнометрического способа определения твердой фазы?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

Магнитные свойства горных пород

Цель работы. Определение плотности абсолютно сухой породы δ_c , не содержащей растворимых солей и нефти, путем деления массы образца m_c в воздухе на его объем V_c .

Формируемые компетенции или их части

ПК-13 Наличием высокой теоретической и математической подготовки, а также подготовки по теоретическим, методическим и алгоритмическим основам создания новейших технологических процессов геологической разведки, позволяющим быстро реализовывать научные достижения, использовать современный аппарат математического моделирования при решении прикладных научных задач.

Теоретическая часть

Определение плотности абсолютно сухой породы гидростатическим взвешиванием – это один из методов определения плотности породы, который относится к весовым. Масса m_c получается путем взвешивания образца в воздухе, а его объем рассчитывается по формуле:

$$V_c = \frac{(m_c - m_c^{жс})}{\delta_{жс}}, \quad (3.1)$$

где $m_c^{жс}$ – масса сухой породы при взвешивании в жидкости;

$\delta_{жс}$ – плотность жидкости (в качестве жидкости могут использоваться дистиллированная вода, керосин, бензол и любая жидкость с известной плотностью).

Плотность абсолютно сухого образца определяется по формуле:

$$\delta_c = m_c \delta_{жс} / (m_c - m_c^{жс}) \quad (3.2)$$

где m_c – масса сухой породы при взвешивании в воздухе.

При определении плотности δ_c пористых и проницаемых образцов, для увеличения точности породы покрывают непроницаемой оболочкой (парафином, коллодием и тому подобное), при покрытии парафином требуется сушильный шкаф (иначе будут не плохие погрешности), в котором покрытая порода будет высушиваться и лишний парафин растечется от породы, а поры останутся покрыты парафином.

Затем определяют объем образца покрытого непроницаемой пленкой по формуле: $V_{c.об} = (m_{c.об} - m_{c.об}^{жс}) / \delta_{жс}$, *об (непроницаемая оболочка), затем

жс

определяется объем материала, покрывающего образец по формуле:

$V_{об} = (m_{c.об} - m_c) / \delta_{жс}$, где $\delta_{об}$ - плотность материала непроницаемой пленки.

Также определяем объем образца $V_c = V_{c.об} - V_{об}$, и его плотность в воздухе по формуле:

$$\delta_c = \frac{m_c}{V_{c.об} - V_{об}} = \frac{m_c}{\left[\frac{m_{c.об} - m_{c.об}^{жс}}{\delta_{жс}} \right] - \left[\frac{m_{c.об} - m_c}{\delta_{об}} \right]}. \quad (3.3)$$

Оборудование и материалы

1. Технические весы, с возможность взвешивать на весу.
2. Металлическая проволока или нить, для подвешивания образцов.
3. Дистиллированная вода
4. Стекланные сосуды

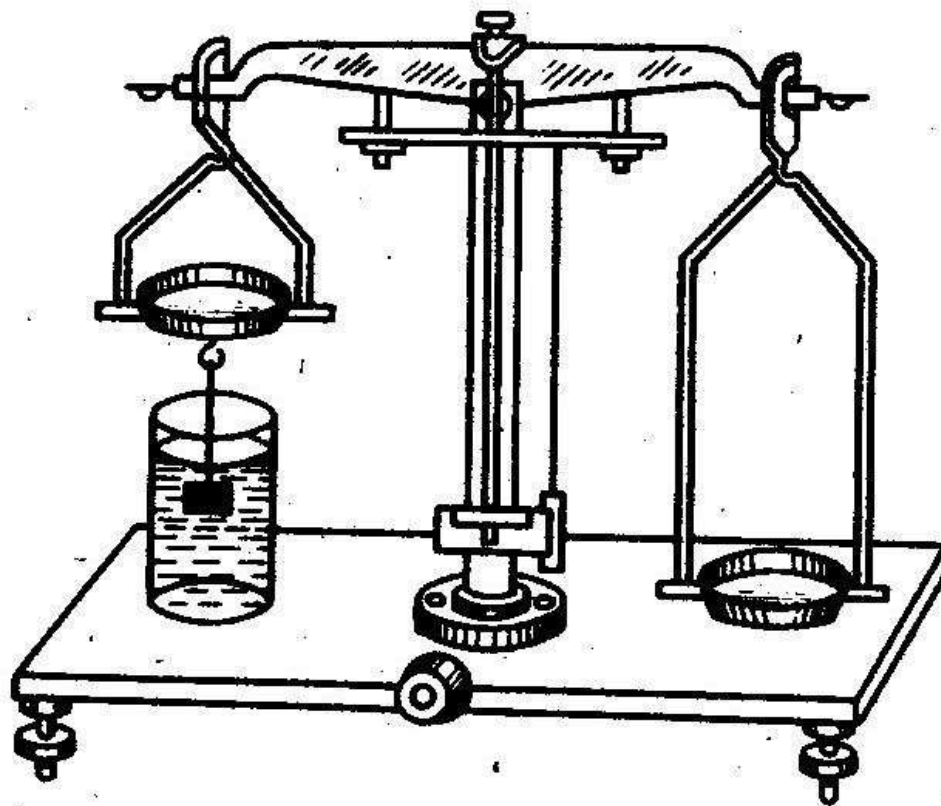


Рисунок 3.1 – Гидростатические весы
для взвешивания образцов в воде

Указания по технике безопасности

При работе в специализированной лаборатории необходимо соблюдать следующие правила:

1. При использовании огнеопасной жидкости запрещается открытый огонь и рекомендуется использовать перчатки.
2. Не входить в лабораторию без разрешения преподавателя (лаборанта).
3. Не включать без разрешения оборудование.
4. При несчастном случае или поломке оборудования позвать преподавателя (лаборанта).
5. Не трогать провода и разъемы.
6. Не допускать порчи оборудования.
7. Не шуметь.

Указания по порядку выполнения работы

1. Проверка работоспособности весов.

1.1. Весы ВЛР200 включаются рычажком сбоку, на шкалах справа и слева должны быть выставлены нули.

нужно посмотреть на подсвечивающуюся шкалу посередине, где должны быть видны цифры. Нужно запомнить на какой цифре стоит светящаяся шкала, чтобы знать абсолютный 0 (если шкала, например, показывает 10, то при снятии значения мы будем отнимать 10 мг).

1.1. Проверить заземление.

1.2. Включить весы за 20-30 минут до начала работы.

1.3. Перед началом работы ручкой установить на отметку "00" диск делительного устройства и ручкой ввести нулевую отметку шкалы в отсчетную отметку экрана.

1.4. При работе на весах могут применяться методы прямого и точного взвешивания.

При прямом взвешивании в изолированном положении весов поместить взвешиваемый груз на левую чашку весов и уравновесить его накладными гирями из набора Г-2-210 и встроенными гирями, навешивая их ручкой на правое плечо коромысла.

Поворотом ручки ввести весы в рабочее положение.

Если после включения весов изображение шкалы не попадает на экран, то, дополнительно накладывая (или снимая) накладные гири и навешивая (или снимая) гиревым механизмом встроенные гири, вывести изображение шкалы на экран.

Снять показания со шкалы.

Наложение и снятие накладных и встроенных гирь производить только в изолированном положении весов.

Введение весов в рабочее положение, во избежание раскачивания подвесок, производить плавным поворотом ручки, при этом дверцы весовой камеры должны быть закрыты.

1.1. Проверить заземление.

1.2. Включить весы за 20-30 минут до начала работы.

1.3. Перед началом работы ручкой установить на отметку "00" диск делительного устройства и ручкой ввести нулевую отметку шкалы в отсчетную отметку экрана.

1.4. При работе на весах могут применяться методы прямого и точного взвешивания.

При прямом взвешивании в изолированном положении весов поместить взвешиваемый груз на левую чашку весов и уравновесить его накладными гирями из набора Г-2-210 и встроенными гирями, навешивая их ручкой на правое плечо коромысла.

Поворотом ручки ввести весы в рабочее положение.

Если после включения весов изображение шкалы не попадает на экран, то, дополнительно накладывая (или снимая) накладные гири и навешивая (или снимая) гиревым механизмом встроенные гири, вывести изображение шкалы на экран.

Снять показания со шкалы.

Наложение и снятие накладных и встроенных гирь производить только в изолированном положении весов.

Введение весов в рабочее положение, во избежание раскачивания подвесок, производить плавным поворотом ручки, при этом дверцы весовой камеры должны быть закрыты.

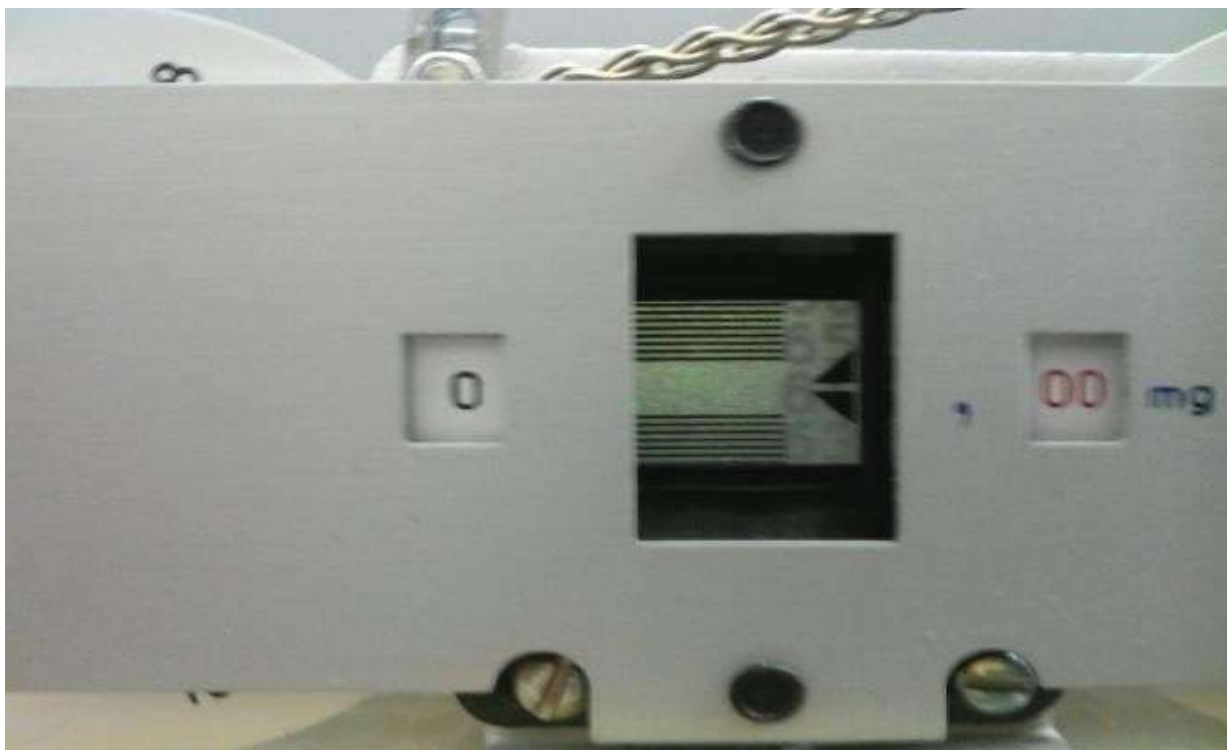


Рисунок 3.2 – Шкала

1.2. На левую часть весов подвешивается порода (или исследуемый объект), а на правой части весов ставятся гирьки известной массы. При подвешивании образца весом более 105 мг цифры на подсвечивающейся шкале пропадут, при уравнивании весов мы должны добиться получения цифр на шкале. Для этого с правой стороны мы подставляем гирьки. Справа от шкалы есть 2 колёсика: 1-ое колёсико отвечает за шкалу, которая находится правее от светящейся шкалы и показывает сотые миллиграммы, светящаяся шкала показывает десятые миллиграммы; 2-ое колёсико отвечает за изменение шкалы, которая находится правее от светящейся шкалы, она показывается знаки после запятой. Измеренный вес будет равен весу гирьки на правой стороне весов + сотым миллиграмма на шкале левее от подсвечивающейся шкалы + десятые миллиграмма на подсвечивающейся шкале + знаки после запятой на шкале правее от подсвечивающейся.

2. Измерительная часть

2.1. Отбирают однородные образцы массой 5–10 г и более без включений и трещин, не свойственных этой породе.

2.2. Подбирается нить или проволока для подвешивания породы, взвешивается в жидкости (m_{np}).

2.3. Образцы взвешивают в воздухе m_c (рис. 3.3).



Рисунок 3.3 - Взвешивание породы в воздухе

2.4. В колбу наливают жидкость (дистиллированная вода, керосин, бензол или др.), желательно, чтобы вес колбы с жидкостью составлял меньше 200 г (весы ВЛР200 измеряют не более 200 грамм). Колба с жидкостью предварительно взвешивается (рис. 3.4), для последующего исключения из результатов. Получаем массу $m_{колб}^{ж}$. Ширина колбы должна быть больше диаметра образца, чтобы он не касался стенок и дна колбы.



Рисунок 3.4 – Взвешивание жидкости

2.5. Взвешивают образцы в колбе с жидкостью так, чтобы они не касались стенок и дна колбы (рис. 3.5). Для этого подвешивают на тонкой проволочке к дужке технических весов, под ним устанавливают стакан и грузиками уравнивают весы, так чтобы была видна шкала. Получаем массу $m_{с.колб.пр}^{жс}$ породы, колбы с жидкостью и проволоки.



Рисунок 3.5 - Взвешивание породы в жидкости.

3. Расчетная часть

3.1. Находим массу породы в жидкости $m_c^{\text{ж}} = m_{\text{с.колб.пр}}^{\text{ж}} - m_{\text{колб}}^{\text{ж}} - m_{\text{пр}}$.

3.2. Зная массы породы в воздухе и в жидкости, а также плотность жидкости находим объем породы по формуле: $V_c = (m_c - m_c^{\text{ж}}) / \delta_{\text{ж}}$.

3.3. Затем находим плотность породы по формуле:

$$\delta_c = \left(\frac{m_c \delta_{\text{ж}}}{m_c - m_c^{\text{ж}}} \right) \quad (3.4)$$

Для более точных измерений берут 2 одинаковые породы и проводят все вышеназванные измерения и вычисления.

4. Вычисление погрешности измерений.

Рассчитываем наибольшую метрологическую относительную погрешность:

$$\frac{\Delta\delta}{\delta_c} = \frac{m^*}{m_c - m^*} \left(\frac{\Delta m^*}{m^*} + \frac{\Delta m}{m_c} \right) + \frac{\Delta\delta}{\delta_{\text{ж}}} = \frac{m^* \delta}{m_c \delta_c} \left(\frac{\Delta m^*}{m^*} + \frac{\Delta m}{m_c} \right) + \frac{\Delta\delta}{\delta_{\text{ж}}}, \quad (3.5)$$

при $\delta_{\text{ж}} = 1 \text{ г/см}^3$ и $\Delta m_{\text{ж}} = \Delta m_c$, формула упрощается:

$$\frac{\Delta\delta_c}{\delta_c} = \Delta m_c (2\delta_c - 1) / m_c. \quad (3.6)$$

Так как в качестве жидкости у нас дистиллированная вода, то для расчетов используем формулу 3.6.

Содержание отчета

Отчет формируем в соответствии с приложением А.

Выполнив все необходимые записи показаний измерительных приборов, надо произвести вычисления, занести в таблицу 3.1 и сделать краткие выводы по работе.

Таблица 3.1

Номер образца			
Название породы			
Масса, г	$m_{\text{пр}}$		
	m_c		
	$m_{\text{колб}}^*$		
	$m_{\text{с.колб.пр}}^*$		
	m_c^*		
Объем, см ³	V_c		
Плотность, г/см ³	$\delta_{\text{ж}}$		
	δ_c		
Погрешность, %	$\Delta\delta_c / \delta_c$		

Контрольные вопросы

1. По какой формуле определяется объем породы?
2. По какой формуле определяется плотность породы?
3. Для чего породы покрывают непроницаемой оболочкой?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

Электрические свойства горных пород

Цель работы. Ознакомление с основными магнитными параметрами горных пород. Освоение методики определения остаточной намагниченности, азимута склонения и угла наклона горных пород магнитометрическим способом.

Формируемые компетенции или их части

ПК-13 Наличием высокой теоретической и математической подготовки, а также подготовки по теоретическим, методическим и алгоритмическим основам создания новейших технологических процессов геологической разведки, позволяющим быстро реализовывать научные достижения, использовать современный аппарат математического моделирования при решении прикладных научных задач.

Теоретическая часть

Магнетизм – свойство пород намагничиваться в магнитном поле, изменять его и иногда сохранять намагниченное состояние после прекращения действия поля.

В результате намагничивания любой объем породы приобретает магнитный момент. Магнетизм проявляется при взаимодействии двух намагниченных образцов пород или образца породы и проводника, по которому течет ток; его определяют концентрация и распределение в породе диа-, пара-, антиферро-, ферро- или гораздо чаще ферромагнитных компонентов, их химический состав, структура кристаллической решетки минералов, в частности, тип связи в ней атомов или ионов. Магнетизм зависит от происхождения и условий жизни пород. Он не постоянен, если

растут со временем действующие на погружающуюся породу давление и температура; при этом изменяется не только ее структура, но и минеральный состав.

Магнитные свойства горных пород описываются несколькими параметрами, среди которых для интерпретации геофизических данных наибольший интерес представляют магнитная восприимчивость χ , магнитная проницаемость μ и вектор намагниченности горных пород $\vec{J}$.

Магнитная восприимчивость χ характеризует способность материалов намагничиваться под воздействием магнитного поля:

$$\chi = \frac{J}{H}, \quad (4.1)$$

где $\vec{J}$ – вектор намагниченности вещества, А/м; $\vec{H}$ – вектор напряженности существующего магнитного поля, внешнего по отношению к веществу, А/м.

Магнитная восприимчивость (величина безразмерная) определяется для единицы объема или массы.

Напряженность суммарного магнитного поля, т. е. сумма напряженностей намагничивающего поля и внутреннего поля, возникающего под действием намагничивающего поля, называется **магнитной индукцией** (или плотностью магнитного потока). Магнитная индукция определяется по формуле:

$$B = H + 4\pi J. \quad (4.2)$$

Мерой намагничивания вещества служит вектор $\vec{J}$. Он равен

векторной сумме всех магнитных моментов M_M молекул, заключенных в единице объема вещества:

$$\vec{J} = \frac{1}{V} \sum 2M_M. \quad (4.3)$$

Связь между индукцией и напряженностью поля в вакууме характеризуется **магнитной постоянной** μ_0 . В СИ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Магнитная проницаемость показывает, во сколько раз увеличилось магнитное поле в результате намагничивания среды.

Абсолютная магнитная проницаемость вещества характеризует связь между индукцией и напряженностью в любой среде и определяется по формулам:

$$\mu_a = \vec{B} / \vec{H}, \quad (4.4)$$

$$\mu_a = \mu \mu_0, \quad (4.5)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость вещества, характеризующая отношение абсолютной проницаемости к магнитной постоянной.

Намагниченность $\vec{J}$ складывается из вектора остаточной намагниченности $\vec{J}_n$ и вектора индуцированной намагниченности $\vec{J}_i$:

$$\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_i. \quad (4.6)$$

Остаточная естественная намагниченность $\vec{J}_n$ приобретается породами в предшествующее время в отличие от **индуцированной намагниченности** $\vec{J}_i$, которая вызвана действием современного нормального геомагнитного поля.

Диамагнитные материалы имеют отрицательную магнитную восприимчивость ($\chi < 0$, $\mu < 1$); они намагничиваются в направлении, противоположном направлению магнитного поля.

Абсолютные значения магнитной восприимчивости диамагнитных веществ невысокие и редко достигают 10^{-4} ед. СИ.

К диамагнетикам относятся инертные газы, ряд металлов (медь, серебро, золото, цинк, висмут, ртуть) и неметаллов (кремний, кварц, алмаз, графит, сера, фосфор), галенит, кварц, кальцит, гипс, ангидрид и другие безжелезистые минералы, нефть и вода.

Парамагнитные материалы обладают положительной магнитной восприимчивостью ($\chi > 0$, $\mu > 1$); они намагничиваются по направлению поля. Магнитная восприимчивость парамагнетиков существенно зависит от температуры, с ростом которой она уменьшается.

К парамагнетикам относятся щелочные и щелочноземельные металлы, соли элементов группы железа и породообразующие минералы (плагиоклазы, калиевые полевые шпаты, мусковит, скаполит, шпинель, топаз, апатит, биотиты, амфиболы, хлориты, пироксены, оливины и др.), газы O_2 , NO, соли редкоземельных элементов.

Ферромагнитные материалы характеризуются положительными и очень высокими значениями магнитной восприимчивости и $\mu \gg 1$.

Ферромагнетики обладают в отсутствие внешнего магнитного поля определенным атомным магнитным порядком. Он проявляется в существовании спонтанной (самопроизвольной) намагниченности. Это свойство характерно для металлических кристаллов, сплавов и соединений переходных элементов.

Ферромагнитные вещества обладают сложной зависимостью намагничивания от намагничивающего поля. Закон намагничивания характеризуется петлей гистерезиса.

Магнитная восприимчивость ферромагнетиков проявляется до определенной температуры (точки Кюри), выше которой они превращаются в парамагнетики. Для большинства ферромагнетиков точка Кюри находится в пределах 700 – 1000°C.

К наиболее распространенным ферромагнитным минералам относятся магнетит, титаномагнетит, гематит, пирротин, гетит и др.

Ферромагнетики делятся на собственно ферромагнетики, антиферромагнетики и ферриты. У собственно ферромагнетиков магнитные моменты всех атомов, входящих домен, ориентируются в одном направлении. Намагниченность их очень сильная. В доменах антиферромагнетиков атомы (ионы) делятся на две примерно равные части. Одна часть атомов имеет направление магнитных моментов, противоположное направлению магнитных моментов других атомов (ионов). В результате происходит полная или частичная компенсация моментов.

Антиферромагнетики намагничиваются слабо, но их намагниченность стабильная во времени. Примером может служить минерал гематит. У ферритов происходит частичная компенсация магнитных моментов доменных атомов (ионов). К ним относятся минералы магнетит и пирротин.

В настоящее время существует множество способов и методик определения магнитных свойств горных пород. Они основаны на взаимодействии магнитного поля вещества (породы) со следующим:

- 1) вращающимися электрическими катушками (индукционные магнитометры);
- 2) рамками с током (флюксметры);
- 3) движущимися электрическими зарядами (магнитометры на эффекте Холла);
- 4) постоянными магнитами (оптико-механические магнитометры);
- 5) спиновыми магнитными моментами при намагничивании магнитных материалов (феррозондовые магнитометры);
- 6) магнитными моментами атомных ядер (ядерные магнитометры);
- 7) спиновыми магнитными моментами электронов (электронно-спиновые магнитометры);
- 8) магнитными моментами атомов (атомные магнитометры);
- 9) сверхпроводящие системы при сверхнизких температурах (криогенные магнитометры).

Все перечисленные типы магнитометров имеют широкий предел чувствительности ($10^{-4} - 10^{-9}$). Высокая чувствительность некоторых типов магнитометров не всегда сопровождается высокой стабильностью их показаний. При выборе аппаратуры необходимо учитывать конкретные условия измерения и решаемые задачи.

При изучении магнитных характеристик горных пород наибольшее распространение получили оптико-механические магнитометры (имеющие астатическую систему с постоянными магнитами) типа МАЛ-201 (рис. 4.1),

ЛАМ-22. Основной измеряемой величиной является вектор намагниченности $\vec{J}$, представляющий сумму векторов остаточной намагниченности $\vec{J}_n$ и индуктивной намагниченности J_i , созданной магнитным полем Земли.

На магнитометре непосредственно измеряются составляющие магнитных моментов индуктивной намагниченности M_i и остаточной намагниченности M_n . Зная магнитные моменты, объемы образцов и намагничивающее поле, можно определить векторы $\vec{J}_n$ и $\vec{J}_i$.

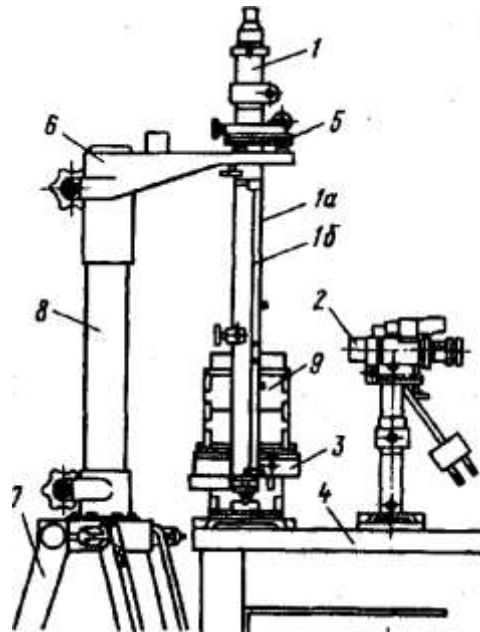


Рисунок 4.1 – Схема астатического магнитометра

1 – цилиндрический корпус магнитометра (а – защитный кожух, б – торсионный подвес); 2 – система двухмагнитная с зеркалом 3 и коти́ровочным магнитом; 4 – подвес системы; 5 – демпфер; 6 – арретир; 7 – опоры; 8 – немагнитный держатель; 9 – крючок с подвеской

На уровне нижнего магнита астатической системы (рис. 4.2, а) определяются проекции $\vec{M}_x$, $\vec{M}_y$, $\vec{M}_z$ магнитного момента остаточной намагниченности. Так как астатическая система установлена в плоскости меридиана, а измеряется составляющая момента, перпендикулярная плоскости меридиана, то индуктивная составляющая, вызванная полем земли, не влияет на измерения (на уровне нижнего магнита). Если какая-то часть горизонтальной составляющей магнитного поля земли создает

некоторую индуктивную составляющую, то после обработки данных измерений эта индуктивная составляющая полностью исключается. Таким образом, определяются только проекции момента остаточной намагниченности.

При расположении исследуемых образцов на равноудаленном расстоянии от верхнего и нижнего магнитов астатической системы (рис. 4.2, б) на магниты действуют поля исследуемых образцов, созданные вертикальными составляющими остаточного магнитного момента и индуктивного. Однако вертикальная составляющая индуктивной намагниченности всегда будет направлена в одну сторону (например, вверх), а вертикальная составляющая момента остаточной намагниченности изменит свое направление вместе с поворотом образца на 180° вокруг горизонтальной оси.

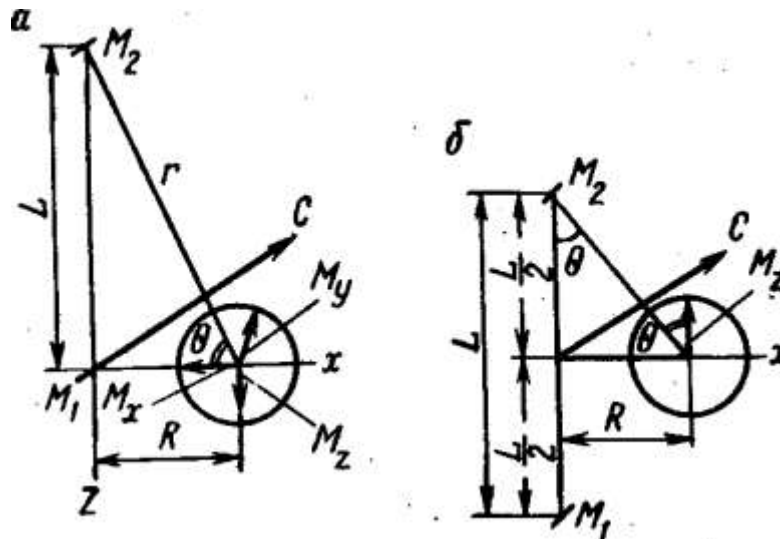


Рисунок 4.2 – Схемы различных способов измерения магнитных свойств образцов пород

Расположение образца: а – на уровне нижнего магнита, б – в равноудаленном положении от магнитов

Оборудование и материалы

1. Магнитометр астатический.
2. Контейнеры для образцов $50 \times 50 \times 50$ мм и $70 \times 70 \times 70$ мм.

3. Образцы правильной геометрической формы размером до $70 \times 70 \times 70$ мм.

4. Инструкция по эксплуатации прибора.

Указания по технике безопасности

При работе в специализированной лаборатории необходимо соблюдать следующие правила:

1. Не входить в лабораторию без разрешения преподавателя (лаборанта).
2. Не включать без разрешения оборудование.
3. При несчастном случае или поломке оборудования позвать преподавателя (лаборанта).
4. Не трогать провода и разъемы.
5. Не допускать порчи оборудования.
6. Не шуметь.

Указания по порядку выполнения работы

Измерения могут выполняться двумя способами: на уровне нижнего магнита астатической системы; в положении, равноудаленном от обоих магнитов.

На уровне нижнего магнита $\rightarrow$ определяются величина и направление остаточной намагниченности J .

В положении, равноудаленном от обоих магнитов, измеряется одновременно величина вертикальных составляющих остаточной и индуктивной намагниченности. Для их разделения измерения выполняются при двух положениях образца, поворачивая его на 180° в вертикальной плоскости.

1. Измерения на уровне нижнего магнита

1.1. Производят настройку и регулировку магнитометра и оптической системы.

1.2. Градуируют магнитометр при помощи градуировочных катушек и определяют цену деления шкалы отсчета ($A \cdot m^2/\text{дел}$)

$$E_m = \frac{A_m \cdot K \cdot I \cdot 10^9}{n}, \quad (4.7)$$

где A_m – постоянная прибора, определяется по паспорту; K – постоянная катушки на единицу тока ($A \cdot m^2/m \cdot A$); I – сила тока при градуировке (мА); n – число делений отсчета по шкале.

1.3. Строят градуировочный график при разных позициях m (1,2,3,...,9)
 $E_m = f(m)$.

1.4. Отбирают ориентированные образцы – в естественном залегании на образцы наносят взаимно перпендикулярные оси направленные на север, восток и вертикально вниз.

1.5. Придают образцам правильную геометрическую форму размером $70 \times 70 \times 70$ мм при намагниченности образцов свыше 20 А/м. При намагниченности до 20 А/м можно использовать грубообработанные образцы, приближающиеся по форме к изометрической.

1.6. Ориентируют образцы по осям держателя и укрепляют их пластилином. Слабомагнитные образцы рекомендуется укреплять парафином. Центр массы образца по возможности должен совпадать с центром держателя. Образцы, которые не помещаются в держатель, можно устанавливать непосредственно на столик так, чтобы расстояние между образцом и системой было в 2–3 раза больше среднего размера образца.

1.7. Устанавливают держатель с образцом в некоторое положение m на столике осью OX в сторону астатической системы. В этом положении производят отсчет n_{x1} .

1.8. Переворачивают держатель с образцом на 180° в горизонтальной плоскости (вокруг вертикальной оси) и в этом же положении m производят

отсчет n_{x2} .

1.9. Для повышения точности держатель с образцом разворачивают на 180° в вертикальной плоскости (вокруг горизонтальной оси, ось OX направлена от магнитной системы) и производят отсчет n_{x3} .

1.10. Разворачивают держатель с образцом вновь на 180° в горизонтальной плоскости и производят отсчет n_{x4} .

1.11. По результатам четырех измерений определяют составляющую момента по оси x

$$M_x = \frac{(n_{x1} - n_{x2}) + (n_{x4} - n_{x3})}{4} \cdot E_m, \quad (4.8)$$

где E_m – цена деления прибора в единицах намагниченности для позиции m .

1.12. Выполняют аналогичные измерения и расчеты составляющих момента по y и z :

$$M_y = \frac{(n_{y1} - n_{y2}) + (n_{y4} - n_{y3})}{4} \cdot E_m, \quad (4.9)$$

$$M_z = \frac{(n_{z1} - n_{z2}) + (n_{z4} - n_{z3})}{4} \cdot E_m, \quad (4.10)$$

1.13. Перед началом измерения и в конце цикла в отсутствие образца берется отсчет положения нуля для контроля за поведением системы. При необходимости вводится поправка в результаты измерения за смещение нуля.

Определяют проекции вектора остаточной намагниченности $\vec{J}_x = \vec{M}_x / V$, $\vec{J}_y = \vec{M}_y / V$, $\vec{J}_z = \vec{M}_z / V$, где V – объем образца

$$1.14. \text{ Рассчитывают модуль вектора } \vec{J} = \sqrt{\vec{J}_x^2 + \vec{J}_y^2 + \vec{J}_z^2}.$$

1.15. Определяют направление вектора:

$$\text{азимут } A_z = \arctg \vec{J}_x / \vec{J}_y;$$

$$\text{склонение } D = \arcsin \vec{J}_x / \sqrt{\vec{J}_x^2 + \vec{J}_y^2};$$

$$\text{наклонение } \varphi = \arctg \vec{J}_z / \sqrt{\vec{J}_x^2 + \vec{J}_y^2}.$$

2. Измерение в равноудаленном положении от магнитов

2.1. Выполняют операции 1–6, указанные в измерении на нижнем уровне магнита.

2.2. Устанавливают подставку на столик образцов или поднимают сам столик на 75 мм.

2.3. Устанавливают держатель с образцом в некоторое положение t , направляя ось Ox вниз для согласования знаков отклонения и производят отчет n_{x1} .

2.4. Поворачивают держатель с образцом на 180° в горизонтальной плоскости (вокруг вертикальной оси) и производят отсчет n_{x2} .

2.5. Разворачивают держатель с образцом на 180° в вертикальной плоскости (вокруг горизонтальной оси) и производят отсчет n_{x3} .

2.6. Еще раз переворачивают держатель с образцом на 180° вокруг вертикальной оси и производят отсчет n_{x4} .

2.7. Повторяют операции 3, 4, 5, 6 по осям Oy , Ox и производят отсчеты n_{y1} , n_{y2} , n_{y3} , n_{y4} , n_{z1} , n_{z2} , n_{z3} , n_{z4} .

2.8. По результатам измерений рассчитывают проекции моментов на оси x , y , z по формулам:

$$M_{ix} = \frac{n_{x1} + n_{x2} + n_{x3} + n_{x4}}{4} \cdot E_m, \quad (4.11)$$

$$M = \frac{\left(\frac{n_{x1} + n_{x2}}{2}\right) - \left(\frac{n_{x3} + n_{x4}}{2}\right)}{4} \cdot E_m, \quad (4.12)$$

По аналогичным формулам рассчитывают проекции моментов M_{iy} , M_{iz} , M_z .

2.9. Определяют проекции вектора остаточной намагниченности $J_x = M_x / V$; $J_y = M_y / V$; $J_z = M_z / V$;

2.10. Находят модуль вектора остаточной намагниченности:

$$\vec{J} = \sqrt{J_x^2 + J_y^2 + J_z^2}. \quad (4.13)$$

2.11. Определяют направление вектора:

азимут $A = \arctg \frac{J_x}{J_y}$;

склонение $D = \arcsin \frac{J_z}{\sqrt{J_x^2 + J_y^2}}$;

наклонение $\varphi = \arctg \frac{J_z}{\sqrt{J_x^2 + J_y^2}}$.

Если известна вертикальная составляющая магнитного поля в данной точке H , возможно определить магнитную восприимчивость χ по составляющим векторов индуктивной намагниченности J_{ix}, J_{iy}, J_{iz} .

2.12. Рассчитывают составляющие вектора индуктивной намагниченности $J_x = M_x / V$; $J_y = M_y / V$; $J_z = M_z / V$.

2.13. Определяют величины проекций магнитной восприимчивости по оси x, y, z : $\chi_x = J_{ix} / H_z$; $\chi_y = J_{iy} / H_z$; $\chi_z = J_{iz} / H_z$ и среднюю величину

магнитной восприимчивости $\chi_{cp} = \frac{M_{ix} + M_{iy} + M_{iz}}{3VH_z}$.

Содержание отчета

Отчет формируем в соответствии с приложением А.

Контрольные вопросы

1. Что такое относительная магнитная проницаемость?
2. Что такое магнитная восприимчивость?
3. В каких единицах в системе СИ измеряются χ и μ ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

Упругие свойства горных пород

Цель работы. Изучение удельного электрического сопротивления пластовой воды для решения различных промыслово-геофизических задач.

Формируемые компетенции или их части

ПК-13 Наличием высокой теоретической и математической подготовки, а также подготовки по теоретическим, методическим и алгоритмическим основам создания новейших технологических процессов геологической разведки, позволяющим быстро реализовывать научные достижения, использовать современный аппарат математического моделирования при решении прикладных научных задач.

Теоретическая часть

Пластовая вода, насыщающая породу, оказывает значительное влияние на величину УЭС $\rho_{в.п.}$. Величина удельного электрического сопротивления воды ρ_v зависит от химического состава растворенных в ней солей, от их концентрации и от температуры.

В связи с тем, что удельные электрические сопротивления растворенной в пластовых водах основной части солей незначительно отличаются друг от друга и что в пластовых водах, как правило, преобладает соль NaCl, в

лаборатории модель пластовой воды готовят на базе NaCl.

Определение удельного электрического сопротивления воды ρ_v возможно по известной концентрации (минерализации) солей с использованием зависимости $\rho_v = f(C)$. Измерения УЭС ρ_v воды возможны как на постоянном, так и на переменном токе. Если измерения проводятся на постоянном токе, то в измерительной ячейке используют электроды повышенной стабильности (из платины или серебра), измеряют активное сопротивление воды R_v и по эталонному графику $R_v = f(\rho_v)$ находят удельное электрическое сопротивление воды ρ_v . При измерениях на переменном или пульсирующем токе требования к стабильности электродов снижаются и используется чаще всего принцип непосредственной оценки ρ_v на переменном токе.

Оборудование и материалы

1. Резистивиметр типа ПР-1.
2. Инструкция по эксплуатации резистивиметра ПР-1.
3. Насыщенный раствор $NaCl$.
4. Дистиллированная вода.

Указания по технике безопасности

При работе в специализированной лаборатории необходимо соблюдать следующие правила:

1. Не входить в лабораторию без разрешения преподавателя (лаборанта).
2. Не включать без разрешения оборудование.
3. При несчастном случае или поломке оборудования позвать преподавателя (лаборанта).
4. Не трогать провода и разъемы.
5. Не допускать порчи оборудования.
6. Не шуметь.

Указания по порядку выполнения работы

1. Определение сопротивления пластовой воды.

Для определения сопротивления используется ванна для пластовой воды, платформа NI ELVIS II или мультиметр (тестер).

1.1. Измеряем объем пластовой воды. Для начала необходимо измерить геометрические размеры ванны – длину, ширину высоту (по уровню жидкости). Важно чтобы ванна располагалась строго горизонтально для достижения необходимой точности. Для упрощения задачи можно воспользоваться мерным стаканом.

2.2. Измеряем сопротивление пластовой воды. Включаем мультиметр в режиме измерения самых низких значений сопротивления, щупы замыкаются накоротко (соединяются между собой). Измеренное сопротивление погрешности необходимо записать для исключения в дальнейшем сопротивления проводов и щупов из показаний. После этого щупы подключаются к электродам. Измерения проводятся ступенчато, т.е. сначала включается измерение наибольшего диапазона, потом измерения на более низких диапазонах. Как только значения перестали определяться, мультиметр стоит перевести на измерение предыдущего (большого) диапазона. Стоит помнить, что чем меньше диапазон измерений, тем выше точность измерений. Исходя из этого, следует переводить мультиметр в наиболее чувствительный режим. Измерения можно проводить несколько раз, чтобы уменьшить погрешность. При этом выбирается среднее значение сопротивления.

Если же проводится исследование зависимости значений удельного электрического сопротивления от минерализации раствора, то необходимо менять минерализацию, добавляя *NaCl*.

2. Обработка результатов измерений

После проведения измерений, результаты следует оформить в виде таблицы, где также будут указаны измеренные и рассчитанные величины.

2.1. Определяем удельное сопротивление пластовой воды:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{L}, \quad (5.1)$$

где R – показания мультиметра, включенного в режим омметра;
 S – площадь сечения алюминиевых пластин;
 L – длина корпуса.

2.2. По полученным значениям построим график, наглядно показывающий зависимость значений УЭС от минерализации. Для построений можно воспользоваться редактором Microsoft Excel.

2.3. При петрофизических исследованиях зачастую используют не значение удельного электрического сопротивления, а значения обратной величины – удельной электрической проводимости (УЭП). Поскольку эти величины обратные, то можно перейти от одной к другой, используя формулу:

$$\rho = \frac{1}{\sigma}, \quad (5.2)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление

σ – удельная электрическая проводимость

По значениям УЭП, как и по значениям УЭС, построить график зависимости от минерализации.

Содержание отчета

Отчет формируем в соответствии с приложением А.

Экспериментальные и рассчитанные значения записываются по форме, приведенной в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Измеренные величины	№ опыта			
	1	2	3	4
$R_{погр}$, Ом				
$R_{изм}$, Ом				
d_1 , м				
d_2 , м				
L , м				
M , кг				
Рассчитанные величины				
R , Ом				
Q , кг/м ³				
ρ , Ом · м				

Значения УЭС и УЭП, в зависимости от минерализации пластовой воды записываются по форме, приведенной в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Величины	Минерализация Q , кг/м ³			
ρ , Ом · м				
σ , См · м				

Контрольные вопросы

1. От чего зависит величина удельного электрического сопротивления воды?
2. Как измеряется сопротивление пластовой воды?
3. Формула определения удельного сопротивления пластовой воды.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6

Теплофизические свойства горных пород

Цель работы. Изучение удельного электрического сопротивления максимально влажных горных пород для решения различных промыслово-геофизических задач.

Формируемые компетенции или их части

ПК-13 Наличием высокой теоретической и математической подготовки, а также подготовки по теоретическим, методическим и алгоритмическим основам создания новейших технологических процессов геологической разведки, позволяющим быстро реализовывать научные достижения, использовать современный аппарат математического моделирования при решении прикладных научных задач.

Теоретическая часть

При определении удельного электрического сопротивления образца породы мостовым способом на его противоположные грани накладываются увлажненные электролитом прокладки и на них латунные или свинцовые электроды. Электроды включают в схему измерительного моста переменного тока (рис. 6.1). Образец породы, прокладки и электроды имеют не только активные сопротивления $R_{обр.}$, R_n , $R_э$, но и емкости $C_{обр.}$, C_n и $C_э$, их комплексное сопротивление

$$Z_1 = Z_э + Z_n + Z_{обр} + Z_n + Z_э = 2Z_э + Z_{обр} + 2Z_n$$

(эквивалентная электрическая схема дана на рис.6.2).

Плечо сравнения моста должно состоять из параллельно или последовательно включенных активного сопротивления R_4 и, емкости C_4 . В дальнейшем для сокращения записи отсчитываемые по декадам моста

сопротивление R_4 и емкость C_4 и, следовательно, комплексное сопротивление Z_4 даются без индексов (R , C , Z). Вспомогательными плечами обычно являются активные сопротивления $R_2 = R_3$.

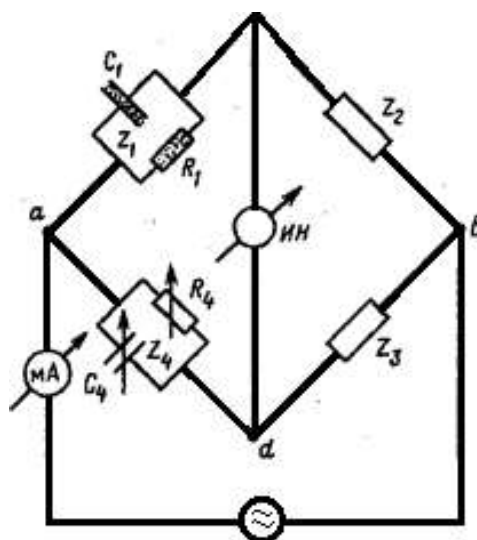


Рисунок 6.1 – Общая схема четырехплечного моста переменного тока для измерения сопротивления образцов горных пород

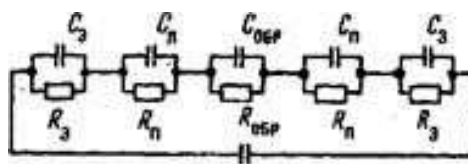


Рисунок 6.2 – Эквивалентная электрическая схема системы электрод – прокладка – образец – прокладка – электрод

Следовательно, если в плече сравнения сопротивление R и емкость C включены параллельно, то мостовая цепь (рис. 6.1) имеет сопротивления

$$Z_1 = 1 / (1 / R_1 + j\omega C_1); \quad Z_2 = R_2; \quad Z_3 = R_3 \quad \text{и} \quad Z_4 = Z = 1 / (1 / R + j\omega C).$$

При конечном сопротивлении индикатора нуля ток в измерительной диагонали равен нулю при разности потенциалов между вершинами этой диагонали $\Delta U_{cd} = 0$ (рис. 6.1). Но при этом должны быть равны падения напряжений в плечах моста: первом и четвертом, втором и третьем. Таким образом, нужно, чтобы

$$\Delta U_{ac} = \Delta U_{ad}; \quad \Delta U_{cd} = \Delta U_{db}; \quad (6.1)$$

падения напряжений соответственно равны

$$\Delta U_{ac} = I_1 Z_1; \quad \Delta U_{cb} = I_1 Z_2; \quad \Delta U_{ad} = I_2 Z; \quad \Delta U_{db} = I_2 Z_3.$$

Подставив эти произведения в равенство (6.1) и разделив полученные выражения одно на другое, получим условия равновесия моста

$$Z_1 Z_3 = Z Z_2 \quad (6.2)$$

С учетом комплексных сопротивлений будем иметь

$$\begin{aligned} \left[\frac{1}{R_1} + j\omega C_1 \right] R_3 &= \left[\frac{1}{R} + j\omega C \right] R_2 \quad \text{или} \\ R_3 / R + j\omega C R_3 &= R_2 / R_1 + j\omega C_1 R_2. \end{aligned}$$

Приравнивая отдельно вещественные и мнимые составляющие в выражении (6.2), получаем $R_3/R = R_2/R_1$; $CR_3 = C_1 R_2$. Так как $R_2 = R_3$, то в момент равновесия моста активное сопротивление системы складывается из образца, прокладок и электродов $R_l = R$ и емкости $C_l = C$.

Для получения сопротивления образца $R_{обр}$ R_l должно быть исправлено за переходные сопротивления R_9 на контактах «прокладки – электроды» и за сопротивления прокладок, которые входят в измеренное сопротивление R_l .

Эти сопротивления зависят от минерализации и состава раствора, насыщающего образцы и прокладки, температуры, материала и степени чистоты поверхности электродов (электроды покрываются окислами металлов и пузырьками газов), частоты, плотности тока и т. п. Сопротивление R_9 , за которое необходимо исправить определенное сопротивление R_l , находится путем измерения сопротивления R' системы из двух электродов и двух прокладок при помощи той же мостовой схемы: $R_9 = R_2 R' / R_3$ (где R' – показания декад магазина сопротивлений, включенного в четвертое плечо моста), так как $R_2 = R_3$, то $R_9 = R'$.

В результате

$$R_{обр} = R_l - R_9. \quad (6.3)$$

Удельное сопротивление (Ом·м) образца породы определяется по формуле

$$\rho_{\text{уд}} = R_{\text{обр}} F / L ,$$

где F , L – площадь поперечного сечения и длина образца, соответственно.

Оборудование и материалы

1. Уравновешенный четырехплечный измерительный мост переменного тока постоянной разности фаз.
2. Кернодержатель, предназначенный для плотного прижатия к образцу электродов с прокладками.
3. Латунные электроды и прокладки из войлока или фильтровальной бумаги.
4. Бюксы для хранения прокладок в пластовой воде.
5. Эксикатор для хранения насыщенных образцов в пластовой воде.
6. Соли, необходимые для приготовления раствора, соответствующего пластовой воде.

Указания по технике безопасности

При работе в специализированной лаборатории необходимо соблюдать следующие правила:

1. Не входить в лабораторию без разрешения преподавателя (лаборанта).
2. Не включать без разрешения оборудование.
3. При несчастном случае или поломке оборудования позвать преподавателя (лаборанта).
4. Не трогать провода и разъемы.
5. Не допускать порчи оборудования.
6. Не шуметь.

Указания по порядку выполнения работы

1. Подготовка исследуемых образцов горных пород

Для проведения петрофизических исследований на коллекции образцов, их необходимо, прежде всего, отмыть от всевозможных присутствующих в порах углеводородов и солей.

Процесс очистки порового пространства образца от нефти, битумов, воды и солей называют экстрагированием. От углеводородов образцы экстрагируют органическими растворителями. В качестве растворителей применяют петролейный эфир, бензол, бензин, спиртобензольную смесь и более сложные смеси, например, четырехкомпонентную смесь спирта, хлороформа, четырёххлористого углерода и бензина в соотношении. Выбор того или иного растворителя или смеси определяется способностью растворять нефти и битумы. Оптимальный растворитель, обеспечивающий требуемую полноту извлечения углеводородов и одновременную сохранность образцов, следует подбирать экспериментально.

Если образцы обладают высокой или средней проницаемостью и стойкие к воде, соли могут быть удалены путем продавливания воды через образец (таким же образом можно заменить ранее заполнявшую пластовую воду на воду иной минерализации). Считают, что для этого достаточно профильтровать через образец воду в количестве 10 объемов порового пространства.

Следующей операцией в подготовке образцов к исследованию образцов является их сушка. Эта операция проводится в сушильных шкафах с терморегуляторами. В зависимости от вещественного состава, для плотных неглинистых пород поддерживают температуру камеры 103° – 105°С. Для предотвращения адсорбции влаги из окружающего воздуха, образцы охлаждают в эксикаторе с находящимся в нем поглотителем влаги, например, хлористым кальцием.

Насыщение может осуществляться различными способами: капиллярным впитыванием, насыщением под вакуумом, насыщением под

давлением и т. д. Капиллярное впитывание осуществляется продолжительное время и может не привести к полному насыщению. Образец, погруженный в раствор (имитацию пластовой воды) необходимо выдержать в растворе не менее 5 часов, в зависимости от проницаемости породы. Насыщение же под вакуумом или под давлением обеспечивает более быстрое и полное заполнение пор горной породы раствором, однако такие методы использования требуют специальных насосов. При впитывании жидкости, из породы выходят пузырьки воздуха. Процесс насыщения можно считать завершенным тогда, когда прекращается выделение пузырьков.

Порода может наполняться пластовой водой или её имитацией. Модель пластовой воды нетрудно изготовить самостоятельно. Для этого необходима дистиллированная или деионизированная вода. Деионизированная вода более предпочтительна, так как в ней не содержится ионов примесей, которые бы могли влиять на значение удельного электрического сопротивления. Для изготовления модели пластовой воды также необходимы соли, ионы которых содержатся в реальных пластовых водах. Главные химические компоненты в подземных водах: хлор-ион Cl , сульфат-ион SO_4 , гидрокарбонатный и карбонатный ионы HCO_3 и CO_3 , а также ионы щелочных и щелочноземельных металлов и оксидов: натрия Na , кальция Ca , магния Mg , железа Fe и SiO_2 (в коллоидном состоянии). Однако может быть достаточным использование лишь одной соли – хлорида натрия $NaCl$, так как она обладает хорошей растворимостью, а растворы этой соли хорошо проводят электрический ток.

В зависимости от необходимого значения минерализации раствора, соли добавляются в дистиллированную воду в необходимых пропорциях, после чего раствор тщательно перемешивается до полного растворения солей.

2. Измерительная часть

Для определения сопротивления используется измерительный мост,

платформа NI ELVIS II или мультиметр (тестер).

Измерения проводятся на подготовленных заранее породах (очищенных от солей, нефтепродуктов, насыщенных минерализованной водой) в следующем порядке:

2.1. Измеряем геометрические размеры образцов – длину, ширину высоту, диаметр (в случае, если образцы цилиндрической формы).

2.1. Подготавливаем кернодержатель. Положите на внутренние стороны пластин платиновую фольгу (можно использовать алюминиевую). В данном случае фольга используется в качестве электродов.

2.3. Помещаем образец породы между пластинами кернодержателя. При этом подложите фольгу так, чтобы она контактировала со всей боковой поверхностью образца. Затем плотно закрепите образец. Рекомендованное усилие, приложенное к породе – не менее 0,4 Мпа. Если образец недостаточно крепок, давление может быть меньше.

2.4. Включаем мультиметр в режиме измерения самых низких значений сопротивления, щупы замкните накоротко (соедините между собой). Измеренное сопротивление погрешности необходимо записать для исключения в дальнейшем сопротивления проводов и щупов из показаний. После этого подключите щупы к электродам. Измерения проводятся ступенчато, т.е. сначала включается измерение наибольшего диапазона, потом измерения на более низких диапазонах. Как только значения перестали определяться, мультиметр стоит перевести на измерение предыдущего (большего) диапазона. Стоит помнить, что чем меньше диапазон измерений, тем выше точность измерений. Исходя из этого, следует переводить мультиметр в наиболее чувствительный режим. Проведите измерения несколько раз, чтобы уменьшить погрешность. Рассчитайте среднее значение сопротивления.

2.5. Нагреваем образец в растворе, если проводится исследование зависимости значений удельного электрического сопротивления от температуры породы (раствора). Как только температура жидкости достигнет

необходимого значения, выдерживайте образец в растворе не менее 20 минут, поддерживая температуру минерализованной воды.

Измеренные значения сопротивления записываются, пересчитываются в значения УЭС, строятся графики зависимости УЭС горных пород ρ или удельной электропроводности σ от температуры насыщенного образца.

3. Обработка результатов измерений

Порядок расчета УЭС следующий:

3.1. Вычитаем погрешность. Для повышения точности определения УЭС, необходимо учесть погрешность прибора (сопротивление проводов и щупов). Для этого из измеренного значения вычитите сопротивление погрешности:

$$R = R_{изм} - R_{погр}, \quad (6.4)$$

где R – значение электрического сопротивления с учетом погрешности;

$R_{изм}$ – измеренное значение сопротивления;

$R_{погр}$ – сопротивление погрешности.

3.2. Рассчитываем геометрический коэффициент. Так как удельное электрическое сопротивление – характеристика вещества, то для его нахождения вводится геометрический коэффициент, учитывающий размеры образцов, с помощью которого будет возможен переход к удельной величине.

$$K = \frac{\sqrt{S_1 \cdot S_2}}{L}, \quad (6.5)$$

где K – геометрический коэффициент;

S_1, S_2 – площади сторон образца, контактирующих с электродами;

L – высота или толщина образца породы (измеряется между прижимаемыми сторонами образца).

Площади оснований в случае, если образец цилиндрической формы находятся по следующей формуле:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (6.6)$$

где S – площадь основания;

d – диаметр образца.

Если образец кубической формы, то площадь его граней находится по формуле:

$$S = a^2, \quad (6.7)$$

где S – площадь грани;

a – длина стороны грани.

3.3. Рассчитываем значения удельного электрического сопротивления по формуле:

$$\rho = K \cdot R, \quad (6.8)$$

где ρ – значение удельного электрического сопротивления;

K – геометрический коэффициент;

R – значение электрического сопротивления с учетом погрешности.

3.4. По полученным значениям строится график. Он наглядно показывает зависимость значений УЭС от температуры. Для построений можно воспользоваться редактором Microsoft Excel.

3.5. При петрофизических исследованиях зачастую используют не значение удельного электрического сопротивления, а значения обратной величины – удельной электрической проводимости (УЭП). Поскольку эти величины обратные, то можно перейти от одной к другой, используя формулу:

$$\rho = \frac{1}{\sigma}, \quad (6.9)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление;

σ – удельная электрическая проводимость.

По значениям УЭП, как и по значениям УЭС, строится график зависимости от температуры.

Содержание отчета

Отчет формируем в соответствии с приложением А.

Экспериментальные и рассчитанные значения записываются по форме, приведенной в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Измеренные величины	1	2	№ опыта	3	4
$R_{пор}$, Ом					
$R_{изм}$, Ом					
d_1 , м					
d_2 , м					
L , м					
t , °С					
Рассчитанные величины					
R , Ом					
S_1 , м ²					
S_2 , м ²					
K , м					
ρ , Ом · м					

Значения УЭС и УЭП, в зависимости от температуры породы, записываются по форме, приведенной в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Величины	Температура породы t , °С			
ρ , Ом · м				
σ , См · м				

Контрольные вопросы

1. Что такое удельное электрическое сопротивление?
2. Что такое удельная электрическая проводимость?
3. Как подготовить образец к проведению опыта?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7

Ядерно-физические свойства

Цель работы. Ознакомление с понятием удельного электрического сопротивления и факторами, определяющими удельное электрическое сопротивление горных пород. Освоение методики определения удельного электрического сопротивления горных пород мостовым способом.

Формируемые компетенции или их части

ПК-13 Наличием высокой теоретической и математической подготовки, а также подготовки по теоретическим, методическим и алгоритмическим основам создания новейших технологических процессов геологической разведки, позволяющим быстро реализовывать научные достижения, использовать современный аппарат математического моделирования при решении прикладных научных задач.

Теоретическая часть

Способность горных пород проводить постоянный электрический ток, т. е. формировать упорядоченный поток заряженных частиц (электронов, ионов) под действием электрического поля, оценивается удельным электрическим сопротивлением ρ , измеряющимся в Ом·м или удельной электрической проводимостью σ , измеряющейся в См/м:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = RS / l, \quad (7.1)$$

где R – сопротивление проводника;

l – длина проводника, м;

S – площадь поперечного сечения проводника, м².

Сопротивление возникающему электрическому току вызывается хаотическим (тепловым) перемещением заряженных частиц и зависит от

строения электронной оболочки атомов, кристаллохимических структур минералов и ионизационных свойств водных растворов солей.

С точки зрения электропроводности горные породы можно рассматривать в общем случае как трехкомпонентные образования, состоящие из твердого вещества (кристаллический скелет), жидкости (чаще всего водные растворы солей, в отдельных случаях нефть) и газа.

По природе электропроводности выделяются: проводники (электронные и ионные), полупроводники и диэлектрики.

Высокой электропроводностью обладают металлы ($\rho = 10^{-4} \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Электропроводность металлов электронная. Она обусловливается специфической металлической формой кристаллической связи. Основная особенность последней – наличие нелокализованных электронов (или многоцентровых орбит), охватывающих весь кристалл металла. Чем больше нелокализованных электронов, тем выше проводимость металлов.

Характерная особенность электронных проводников – увеличение сопротивления с повышением температуры, что обусловливается возрастающим хаотическим движением электронов. Наблюдается зависимость сопротивления от химических примесей и возрастание при этом ρ . Следствием сказанного является непостоянство удельного сопротивления рудных минералов, которое может меняться на 2–3 порядка.

Ряд минералов с ионной формой кристаллической связи характеризуется ионной проводимостью. Наиболее типична ионная проводимость для электролитов, а в естественных условиях – для воды, заполняющей поры горных пород. При отрыве электронов от атомов или при их присоединении нейтральность атомов нарушается, и они становятся соответственно положительно или отрицательно заряженными ионами. Движение ионов под действием внешнего электрического поля вызывает электрический ток, который в отличие от тока в электронных проводниках сопровождается перенесением вещества. Удельное сопротивление ионных

проводников уменьшается с повышением температуры, а в водных растворах солей – с увеличением степени минерализации.

Свойства полупроводников имеют ряд химических элементов и большинство силикатных и окисных элементов с ковалентной или ионной формами кристаллической связи. Хотя в строении многих минералов принимают участие элементы с электронной проводимостью, жесткие решетки минералов обуславливают слабую подвижность электронов и, как правило, высокое сопротивление (10^4 – 10^8 Ом·м).

Полупроводники могут обладать собственно электронной и дырочной проводимостью. Первая создается за счет движения электронов, не менее свободного, чем в проводниках. При этом движении все время освобождаются места на электронных орбитах соседних атомов (дырки), которые как бы передвигаются в обратном направлении. В химически чистых элементах и минералах количество передвигающихся электронов и дырок равно, но при наличии химических примесей, даже в ничтожном количестве, это равновесие нарушается и наблюдается типично электронная или типично дырочная проводимость, различающаяся по знаку; происходит резкое увеличение или уменьшение сопротивления с образованием на границе запорного слоя. Характерной особенностью полупроводников является уменьшение сопротивления с повышением температуры; при дырочной проводимости в некоторых полупроводниках увеличение t до 800°C сопровождается понижением сопротивления в 10^6 раз. Для всех полупроводников характерна очень большая зависимость сопротивления от малейших химических примесей, например, избыток кислорода в 0,1 % уменьшает сопротивление куприта в 10^4 раз. Особенность полупроводников проявляется в большой чувствительности к различного рода облучениям (фотоэффект и др.).

Диэлектриками являются химические элементы и минералы с ковалентной формой связи и наиболее плотными упаковками атомов в

решетке (островные и цепочечные структуры). Удельное сопротивление минералов 10^{12} – 10^{16} Ом·м, а некоторых элементов 10^{23} – 10^{25} Ом·м. В сильных электрических полях диэлектрики обладают электронной проводимостью. Зависимость сопротивления от температуры аналогична полупроводникам.

Газовый компонент породы чаще всего представляет собой изолятор тока, так как все газы в нормальных условиях не проводят ток. Электропроводность у них возникает, как и у жидкого компонента породы, при ионизации – отщеплении от атомов и молекул газов электронов.

Все минералы по величине удельного электрического сопротивления можно условно разделить на три группы.

В первую группу входят самородные элементы. Все они, за исключением серы, являются весьма хорошими проводниками с электронной проводимостью. Их ρ составляет 10^0 – $1,5 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

Вторую группу образуют сульфиды и оксиды. В подавляющем большинстве они имеют относительно высокую электропроводность (10^{-5} – 10^2 Ом·м). Среди сульфидов из ряда резко выделяются высоким удельным сопротивлением (10^4 – 10^{10} Ом·м) киноварь и антимонит, к ним близок по величине удельного сопротивления сфалерит. У окислов аномально высокоомными являются кварц, корунд и шпинель.

Галоиды, карбонаты, вольфраматы, силикаты и алюмосиликаты составляют третью, наиболее распространенную в природе группу минералов, для которых характерна ковалентная или ионная форма кристаллической связи, все они являются диэлектриками.

Удельное электрическое сопротивление какого-либо минерала любой группы существенно непостоянно, оно варьирует в пределах двух и более порядков. Большой диапазон изменения электропроводности каждого минерала обусловлен, главным образом, колебаниями в содержании химических и механических примесей.

Величина и тип электропроводности горных пород определяются рядом факторов, решающими среди которых являются:

- водонасыщенность;
- минерализация поровой влаги;
- пористость, структура порового пространства;
- водопроницаемость;
- литологический состав пород, глинистость;
- структурно-текстурное строение;
- температура;
- давление.

Влияние фазового и минерального составов на удельное электрическое сопротивление горных пород весьма существенно. Породообразующие минералы, из которых состоит скелет породы, являются диэлектриками; газовая фаза также представляет собой изолятор электрического тока. Поэтому любая порода, лишенная влаги и не содержащая в значительных количествах углистого вещества, рудных и акцессорных минералов проводников или полупроводников, обладает высоким удельным электрическим сопротивлением, близким по величине к удельному сопротивлению породообразующих минералов. Однако породы с такой ничтожно малой электропроводностью в естественном залегании встречаются весьма редко. Это связано с тем, что в породе, как правило, содержится в той или иной мере жидкая фаза, удельное сопротивление которой на несколько порядков меньше породообразующих минералов.

Сведения, полученные в результате лабораторных определений, используются при проектировании токовых методов электрометрии скважин и электроразведки, при интерпретации результатов этих исследований, а также для решения многих других горно-геологических задач.

Электрическое сопротивление (Ом) образца породы может быть измерено многочисленными способами, которые подразделяются на две основные группы: непосредственной оценки (по приборам) и сравнения в

равновесном режиме (рис. 7.1).

В каждой из названных групп существуют модификации прямых (прибором измеряется электрическое сопротивление, рис. 7.1, *а–ж*) и косвенных способов (прибором измеряются разности потенциалов ΔU на образце, $\Delta U_{эт}$ эталонном сопротивлении $R_{эт}$ в измерительной цепи или ΔU на образце и силы тока I в измерительной цепи с последующим расчетом сопротивления по формулам $R_{обр} = (\Delta U / \Delta U_{эт}) R_{эт}$ или $R_{обр} = \Delta U / I$, рис. 7.1, *з–с*).

Измерения могут быть выполнены на постоянном (рис. 7.1, *а–д, з–м, р*), на переменном (рис. 7.1, *е, ж, н–п, м, у*) и на пульсирующем токе (рис. 7.1, *с*).

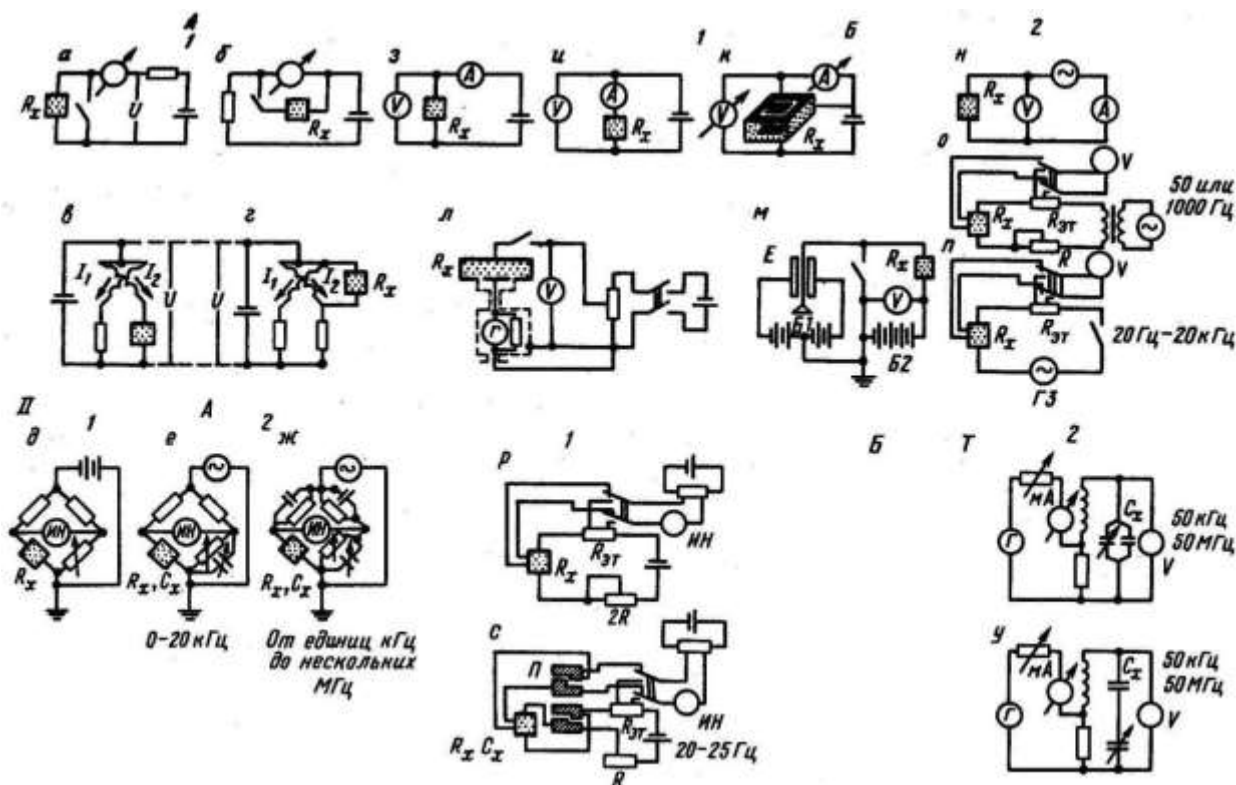


Рисунок 7.1 – Электрические схемы измерения $R_{обр}$

I – непосредственной оценки (оценка по приборам),

II – сравнения в равновесном режиме, *A* – прямых, *B* – косвенных;

I – схемы постоянного тока: *а* – мегомметра, *б* – омметра, *в, г* – омметра с логометрическим измерителем, *д* – моста, *з, и* – вольтметра-амперметра,

к – вольтметра-амперметра с охранным кольцом,

л – вольтметра-гальванометра с охранным кольцом,

м – вольтметра-электромметра, *р* – компенсатора;

2 – схема переменного тока: *е, ж* – моста; *н* – вольтметра-амперметра,

п – вольтметра, *с* – компенсатора с пульсатором, *т, у* – резонансные для измерения больших и малых сопротивлений;

E – электромметр; *Г* – гальванометр; *ИН* – индикатор нуля; *П* – пульсатор;

B1, B2 – батареи; R_x, C_x – соответственно сопротивление и емкость образца;

A – амперметр; mA – миллиамперметр; V – вольтметр; I_1, I_2 – ток;
 V – напряжение; ГЗ-36 – звуковой генератор

При использовании прямых способов непосредственной оценки сопротивления на постоянном токе измерения проводятся омметром (мегомметром, терраомметром); если применяются косвенные способы на постоянном токе, то измерения осуществляются вольтметром, вольтметром-амперметром, вольтметром-амперметром с охранным кольцом, вольтметром-электрометром и др.; если косвенные способы на переменном токе, то используют вольтметр и вольтметр-амперметр.

При способе сравнения в равновесном режиме прямое определение сопротивления на постоянном и переменном токе производится по мостовым двухэлектродным схемам. К косвенным на постоянном и переменном токе принадлежат компенсационные и резонансные способы. В косвенных способах сравниваются напряжения на образце и эталонном сопротивлении в измерительной схеме и по этим данным рассчитывается сопротивление.

Измерения $R_{обр}$ путем непосредственной оценки, особенно на постоянном токе (в связи с поляризацией электродов), менее точны, чем на переменном токе в равновесном режиме. В связи с этим в петрофизических лабораториях чаще применяются мостовые двухэлектродные и компенсационные четырехэлектродные схемы измерения сопротивления образцов на переменном токе, по наименованию которых получили свое название и описанные способы определения удельного электрического сопротивления.

При определении удельного электрического сопротивления образца породы мостовым способом на его противоположные грани накладываются увлажненные электролитом прокладки и на них латунные или свинцовые электроды. Электроды включают в схему измерительного моста переменного тока (рис. 7.2). Образец породы, прокладки и электроды имеют не только активные сопротивления $R_{обр}$, R_n , но и емкости $C_{обр}$, C_n и C_ε , их комплексное сопротивление $Z = Z_\varepsilon + Z_n + Z_{обр} + Z_n + Z_\varepsilon = 2Z_\varepsilon + Z_{обр} + 2Z_n$ (эквивалентная электрическая схема дана на рис. 7.3).

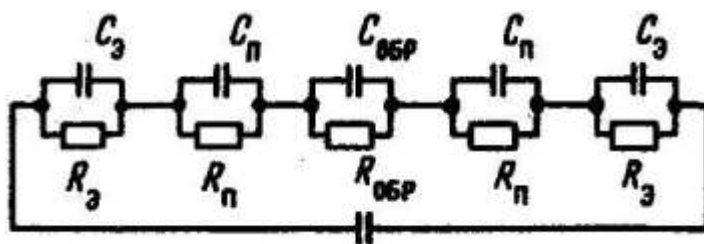


Рисунок 7.2 – Общая схема четырехплечного моста переменного тока для измерения сопротивления $R_{обр}$ образцов горных пород

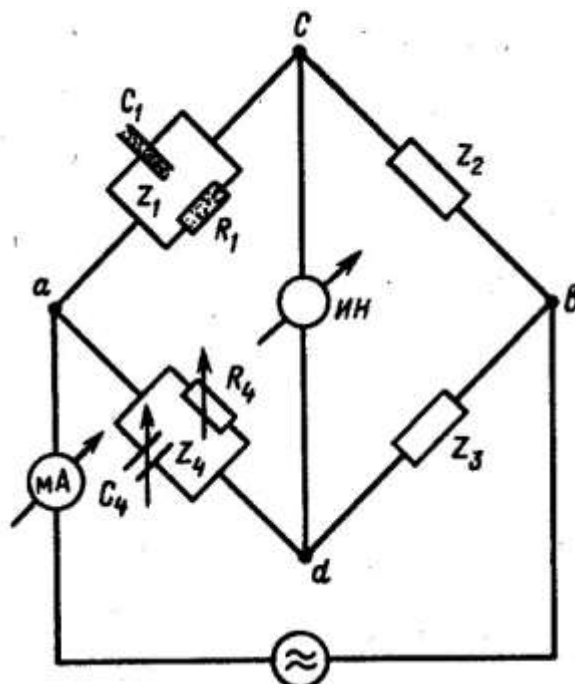


Рисунок 7.3 – Эквивалентная электрическая схема системы электрод – прокладка – образец – прокладка – электрод

Плечо сравнения моста должно состоять из параллельно или последовательно включенных активного сопротивления R_4 и емкости C_4 . В дальнейшем для сокращения записи отсчитываемые по декадам моста сопротивление R_4 и емкость C_4 и, следовательно, комплексное сопротивление Z_4 даются без индексов (R, C, Z). Вспомогательными плечами обычно являются активные сопротивления $R_2 = R_3$.

Следовательно, если в плече сравнения сопротивление R и емкость C включены параллельно, то мостовая цепь (см. рис. 7.2) имеет сопротивления

$$Z_1 = 1/(1/R_1 + j\omega C_1); Z_2 = R_2; Z_3 = R_3 \text{ и } Z_4 = Z = 1/(R + j\omega C).$$

При конечном сопротивлении индикатора нуля ток в измерительной диагонали равен нулю при разности потенциалов между вершинами этой

диагонали $\Delta U_{cd} = 0$ (см. рис. 7.2). Но при этом должны быть равны падения напряжений в плечах моста: первом и четвертом, втором и третьем. Таким образом, нужно, чтобы

$$\Delta U_{ac} = \Delta U_{ad}; \Delta U_{cb} = \Delta U_{db}; \quad (7.2)$$

падения напряжений соответственно равны

$$\Delta U_{ac} = I_1 Z_1; \Delta U_{cb} = I_1 Z_2; \Delta U_{ad} = I_2 Z; \Delta U_{db} = I_2 Z_3. \quad (7.3)$$

Подставив эти произведения в равенство (7.2) и разделив полученные выражения одно на другое, получим условия равновесия моста

$$Z_1 Z_3 = Z Z_2. \quad (7.4)$$

С учетом комплексных сопротивлений будем иметь

$$[1/(1/R_1) + j\omega C_1] R_3 = [1/(1/R) + j\omega C] R_2 \text{ или}$$

$$R_3/R + j\omega C R_3 = R_2/R_1 + j\omega C_1 R_2.$$

Приравнивая отдельно вещественные и мнимые составляющие в выражении (7.4), получаем $R_3/R = R_2/R_1$; $C R_3 = C_1 R_2$. Так как $R_2 = R_3$, то в момент равновесия моста активное сопротивление системы складывается из образца, прокладок и электродов $R_1 = R$ емкости $C_1 = C$.

Для получения сопротивления образца $R_{обп}$ R_1 должно быть исправлено за переходные сопротивления R_9 на контактах «прокладки – электроды» и за сопротивления прокладок, которые входят в измеренное сопротивление R_1 .

Эти сопротивления зависят от минерализации и состава раствора, насыщающего образцы и прокладки, температуры, материала и степени чистоты поверхности электродов (электроды покрываются окислами металлов и пузырьками газов), частоты, плотности тока и т. п. Сопротивление R_9 , за которое необходимо исправить определенное сопротивление R_1 , находится путем измерения сопротивления R' системы из двух электродов и двух прокладок при помощи той же мостовой схемы: $R_9 = R_2 R' / R_3$ (где R' – показания декад магазина сопротивлений, включенного в четвертое плечо моста), так как $R_2 = R_3$, то $R_9 = R'$.

В результате

$$R_{обп} = R_1 - R_9. \quad (7.5)$$

Удельное сопротивление (Ом·м) образца породы определяется по формуле:

$$\rho_{в.н.} = R_{обр} F / L, \quad (7.6)$$

где F, L – соответственно площадь поперечного сечения и длина образца.

Оборудование и материалы

1. Уравновешенный четырехплечный измерительный мост переменного тока постоянной разности фаз $(\varphi_2 - \varphi_3) = 0$ с индикатором нуля переменного тока и звуковым генератором.
2. Кернодержатель, предназначенный для плотного прижатия электродов с прокладками к исследуемому образцу.
3. Латунные электроды и прокладки из войлока или фильтровальной бумаги.
4. Бюксы для хранения прокладок в пластовой воде.
5. Эксикатор для хранения насыщенных образцов в пластовой воде.
6. Соли, необходимые для приготовления раствора соответствующего пластовой воде.

Указания по технике безопасности

При работе в специализированной лаборатории необходимо соблюдать следующие правила:

1. Не входить в лабораторию без разрешения преподавателя (лаборанта).
2. Не включать без разрешения оборудование.
3. При несчастном случае или поломке оборудования позвать преподавателя (лаборанта).
4. Не трогать провода и разъемы.
5. Не допускать порчи оборудования.
6. Не шуметь.

Указания по порядку выполнения работы

1. Проверяют и подготавливают аппаратуру к работе, проверяют заземление, схему включения, прогревают приборы в течение 15 мин, устанавливают рабочую частоту 1000 Гц.
2. Измеряют длину L и диаметр d образца и рассчитывают его сечение F .
3. Устанавливают такую величину тока питания моста чтобы плотность тока через образец не превышала 1 А/м^2 ($0,1 \text{ мА/см}^2$). При такой плотности тока не наблюдается изменения минерального состава образца и заметного нагревания.
4. Зажимают в кернодержателе образец и измеряют его сопротивление $R_{обр}$.
5. Определяют сопротивление системы электроды + прокладки, для чего удаляют из кернодержателя образец и соединяют между собой электроды с находящимися между ними прокладками.
6. Рассчитывают сопротивление $R_{обр}$ по формуле $R_{обр} = R_I - R_э$ и удельное электрическое сопротивление $\rho_{в.н.} = R_{обр}F/L$.

Содержание отчета

Отчет формируем в соответствии с приложением А.

Исходные данные и результаты определений $\rho_{в.н.}$ мостовым способом переменного тока записываются по форме, приведенной в табл. 7.1.

Таблица 7.1

№	Порода	d , м	L , м	F , м ²	I , А	j , А/м ²	Сопротивление, Ом			$\rho_{в.н.}$, Ом · м
							R	$R_э$	$R_{обр}$	

Контрольные вопросы

1. От каких свойств породы зависит величина ее удельного электрического сопротивления?

2. Что влияет при лабораторных исследованиях на точность измерения $\rho_{вп}$?
3. Почему сила тока в цепи питания мостовой схемы не соответствует расчетному значению?
4. Почему при измерении $\rho_{вп}$ желательно применять переменный ток?
5. Исходя из каких положений принята плотность тока $j = 1 \text{ А/м}^2$ при измерении $\rho_{вп}$?
6. Чему равен параметр пористости цилиндрического образца ($d = 3 \text{ см}$, $l = 3 \text{ см}$), насыщенного водой с $\rho_{в} = 0,2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и имеющего сопротивление $R=200 \text{ Ом}$.
7. Почему при определении $\rho_{вп}$ четырехэлектродным способом силу тока не определяют непосредственно миллиамперметром?
8. Почему при изучении удельного электрического сопротивления пород является правомочной замена пластовой воды на ее модель на базе соли $NaCl$?
9. С какой целью в плече сравнения моста устанавливаются магазины сопротивлений и емкостей?

Приложение А

Требования к оформлению отчета по выполнению лабораторных работ

Лабораторная работа представляет собой научный отчет небольшого объема, в котором обобщается работа в рамках определенной темы, проведенная студентом.

Отчёт по лабораторной работе оформляется индивидуально каждым студентом, выполнившим необходимые эксперименты (независимо от того, выполнялся ли эксперимент индивидуально или в составе группы студентов). Страницы отчёта следует пронумеровать (титульный лист не нумеруется, далее идет страница 2 и т. д.).

Отчеты по лабораторным работам оформляются на листах А и собираются в альбом лабораторных работ

Образец титульного листа

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГАОУ ВО
«Северо-Кавказский федеральный университет»
Кафедра «Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых»
ОТЧЕТ
по лабораторной работе № _
« _____ »
наименование работы
по дисциплине «ФИЗИКА ГОРНЫХ ПОРОД»
Выполнил студент группы _____

Ф.И.О.
Проверил преподаватель

Ф.И.О.
Ставрополь, 20__г.

Цель работы: приводится формулировка цели лабораторной работы. Формулировки цели для каждой лабораторной работы приведены в методических указаниях.

Теоретическая часть: приводятся теоретические сведения, которые могут помочь во время защиты лабораторной работы.

Оборудование и материалы: приводится перечень использованного оборудования и материалов.

Порядок выполнения работы: описываются последовательно этапы выполнения работы с указанием результатов.

Вывод: кратко описываются итоги проделанной работы и приводится анализ полученных результатов.

Параметры форматирования

Текст работы должен быть напечатан через 1,5 интервала на одной стороне стандартного листа белой бумаги (А4).

Текст и другие отпечатанные элементы работы должны быть черными, контуры букв и знаков – четкими, без ореола и затенения.

Шрифт Times New Roman, размер шрифта 14.

Названия глав и параграфов выделяются полужирным шрифтом.

Лист с текстом должен иметь поля: слева – 30 мм, справа – 10 мм, сверху – 20 мм, снизу – 20 мм.

Необходимо различать в тексте **дефис** (-) (например, корреляционно-регрессионный) и **тире** (–) (Alt + 0150).

Нумерация рисунков, таблиц и формул должна соотноситься с номером лабораторной работы. Например, в лабораторной работе 1 таблицы и рисунки нумеруются так: Таблица 1.1, Рисунок 1.1, (1.1) и так далее.

Рисунки должны быть оформлены с учетом особенности черно-белой печати (рекомендуется использовать в качестве заливки различные виды штриховки и узоров, в графиках различные виды линий – пунктирные, сплошные и т. д., разное оформление точек, по которым строится график – кружочки, квадраты, ромбы, треугольники).

Рисунки нумеруются снизу (Рисунок 1.1 – Название).

Надписи на рисунках должны читаться.

Рисунки должны читаться отдельно от текста, поэтому оси должны иметь название и единицы измерения;

Таблицы должны иметь название. Таблицы нумеруются сверху (Таблица 1.1 – Название).

Формулы выполняются в редакторе формул **MathType** (желательно). Если в вашем Microsoft Word нет этого редактора, то нажимаем вкладку *Вставка* → *Объект* → *Microsoft Equation 3.0*, в появившемся окне пишем

формулу. Формулы выравниваются по центру, их номера ставятся при помощи табулятора в круглых скобках по правому краю. Допускается выполнение формул и уравнений рукописным способом черными чернилами. *Заголовки* должны быть выделены относительно основного текста, например, выполнены в полужирном стиле.

Страницы нумеруются арабскими цифрами. Номер страницы ставится в центре нижней части листа без точки. Титульный лист включается в общую нумерацию, номер на нем не ставится.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания
по выполнению самостоятельной работы
по дисциплине «Физика горных пород»
для специальности 21.05.03 Технология геологической разведки

Ставрополь
2026

Пояснительная записка

Технологическая карта самостоятельной работы студента

Методические рекомендации по выполнению заданий

Список литературы, рекомендуемый к использованию в
самостоятельной работе студентов

Пояснительная записка

В становлении и формировании мировоззрения философия всегда играла особую роль, связанную с ее многовековым опытом критически-рефлексивного размышления над ценностями и жизненными ориентациями человека. Философское образование играет исключительно важную роль для специалиста любого профиля. Изучение философии – один из важнейших каналов формирования гуманистически ориентированного мировоззрения будущих врачей. В этом в значительной мере и заключается смысл и необходимость изучения философии как учебной дисциплины в высшей профессиональной школе.

Наряду с аудиторной работой одной из форм учебного процесса, его существенной частью является самостоятельная работа студентов (СРС).

Задачами СРС являются:

- развитие и привитие навыков самостоятельной учебной работы и формирование потребностей в самообразовании и социализации;
- освоение, углубление содержания и основных положений курса, выносимых на самостоятельное изучение студента; в ходе составления опорного конспекта, в ходе подготовки к семинарским занятиям
- использование материала, собранного и полученного в ходе самостоятельных занятий при подготовке и написании докладов, рефератов, для эффективной подготовки к итоговому контролю.

Самостоятельная работа студентов может осуществляться как в аудитории, так и вне ее, обычно это в основном внеаудиторная деятельность студента. Для активного владения знаниями в процессе аудиторной работы необходимо не только понимание учебного материала, но и творческое его восприятие.

Основные формы реализации самостоятельной работы и контроля знаний являются:

Комплект разноуровневых задач и заданий – индивидуальное решение репродуктивных, реконструктивных и творческих заданий, позволяющих оценивать и диагностировать уровень обученности, уровень умений и навыков студентов по темам дисциплины. Процедура проведения этой формы учебной деятельности студента включает в себя письменное выполнение заданий трех уровней и защиту их на практическом занятии. При проверке задания, оцениваются полнота и самостоятельность выполнения заданий, оригинальность решения.

Опорный конспект темы – письменный текст, в котором кратко и последовательно изложено содержание основного источника информации. Конспектировать – значит приводить к некоему порядку сведения, почерпнутые из оригинала. В основе процесса лежит систематизация прочитанного или услышанного. Записи могут делаться как в виде точных выдержек, цитат, так и в форме свободной подачи смысла. Данный вид самостоятельной работы направлен на формирование представлений о конфликтах.

Собеседование – средство контроля, организованное как специальная беседа преподавателя со студентом на темы, связанные с изучаемой дисциплиной, и рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по определенному разделу, теме, проблеме и т.п.

Их содержание должно сформировать умение анализировать философско-методологические и научные тексты, обосновывать своё отношение к изложенным в них оценкам, составлять краткие конспекты, тезисы прочитанного, умение применять полученные знания для постановки и решения исследовательских задач, связанных с изучением студентами той или иной области природы и культуры. Разнообразие заданий позволяет учитывать индивидуальные особенности студентов при организации самостоятельной работы.

Четкое выполнение самостоятельной работы студентами обеспечит заблаговременную подготовку к занятию, высокое качество усвоения материала, возможность применения теоретических знаний на практике.

Технологическая карта самостоятельной работы студента

Код реализуемой компетенции	Вид деятельности студентов	Итоговый продукт самостоятельной работы	Средства и технологии оценки	Объем часов
2 семестр				
ОПК-3	Изучение литературы по темам № 1 – 2	Конспект	Собеседование	28
ОПК-3	Подготовка к лекциям	Конспект	Опрос	28
ОПК-3	Подготовка к практическому занятию	Индивидуальные задания	Защита индивидуальных заданий	28
ОПК-3	Подготовка к контрольной работе	Индивидуальные задания	Защита индивидуальных заданий	28
Итого за 2 семестр				112
3 семестр				
ОПК-3	Изучение литературы по темам № 3– 6	Конспект	Собеседование	12
ОПК-3	Подготовка к лекциям	Конспект	Опрос	12
ОПК-3	Подготовка к практическому занятию	Индивидуальные задания	Защита индивидуальных заданий	12
ОПК-3	Подготовка к экзамену	Вопросы и задачи	Экзамен	28
Итого за 3 семестр				54
4 семестр				
ОПК-3	Изучение литературы по темам № 6– 10	Конспект	Собеседование	4
ОПК-3	Подготовка к лекциям	Конспект	Опрос	4
ОПК-3	Подготовка к практическому занятию	Индивидуальные задания	Защита индивидуальных заданий	4
ОПК-3	Подготовка к экзамену	Вопросы и задачи	Экзамен	30
Итого за 4 семестр				42
Итого				208

Методические рекомендации по изучению теоретического материала

Работа с конспектом лекций

Просмотрите конспект сразу после занятий. Отметьте материал конспекта лекций, который вызывает затруднения для понимания. Попытайтесь найти ответы на затруднительные вопросы, используя предлагаемую литературу. Если самостоятельно не удалось разобраться в материале, сформулируйте вопросы и обратитесь на текущей консультации или на ближайшей лекции за помощью к преподавателю.

Каждую неделю отводите время для повторения пройденного материала, проверяя свои знания, умения и навыки по контрольным вопросам и тестам. Умение студентов быстро и правильно подобрать литературу, необходимую для выполнения учебных заданий и научной работы, является залогом успешного обучения. Самостоятельный подбор литературы осуществляется при подготовке к семинарским, лабораторным занятиям, при написании курсовых работ, научных рефератов.

Выполнение СРС на занятиях с проверкой результатов преподавателем позволяет студентам усваивать изучаемый материал более глубоко, меняется отношение к лекциям, так как без понимания теории предмета, без хорошего конспекта трудно рассчитывать на успех в решении заданий. Это улучшает посещаемость как практических, так и лекционных занятий.

При подготовке к лекциям-беседам тема сообщается студентам заранее. Участники дискуссии делятся на группы по 8 человек, в течение 10—15 мин готовят свой вариант решения проблемы. Следующим этапом дискуссии является выступление представителей от каждой группы из 8 человек и защиты своего варианта решения. В конце общего обсуждения ведущий подводит итоги дискуссии, дает оценку совместно найденного варианта решения.

Методические рекомендации по организации работы с литературой

Изучение и анализ литературных источников является обязательным видом самостоятельной работы студентов. Изучение литературы по избранной теме имеет своей задачей проследить характер постановки и решения определенной проблемы различными авторами, аргументацию их выводов и обобщений, провести анализ и систематизировать полученный материал на основе собственного осмысления с целью выяснения современного состояния вопроса.

Проработка отобранного материала обязательно должна идти с одновременным ведением записей прочитанного и своих замечаний. Запись может иметь как форму конспекта, так и выписок, а также картотеку положений, тезисов, идей, методик, что в дальнейшем облегчит классификацию и систематизацию полученного материала. Такого рода записи являются лучшим способом накопления и первичной обработки материал, одной из обязательных форм организации умственного труда.

Планом удобно пользоваться при подготовке к устному выступлению по выбранной теме. Каждый пункт плана должен раскрывать одну из сторон избранной темы, а весь план должен охватывать ее целиком.

Тезисы предполагают сжатое изложение основных положений текста в форме утверждения или отрицания. Они являются более совершенной формой записей и представляют основу для дискуссии. К тому же их легко запомнить.

Аннотация – краткое изложение содержания – дает общее представление о работе.

Резюме кратко характеризует выводы, главные итоги источника.

Конспект является наиболее распространенной формой ведения записей. Основную ткань конспекта составляют тезисы, дополненные доказательствами и рассуждениями. Конспект может быть текстуальным, свободным или тематическим. Текстуальный представляет собой цитатник с сохранением логики работы и структуры текста. Свободный конспект основан на изложении материала в том порядке, который более удобен автору. В этом смысле конспект представляет собирание воедино мыслей, разбросанных по всей книге. Тематический конспект может быть составлен по нескольким источникам, где за основу берется тема, интерпретируемая по-разному.

Экономия времени дает использование при записях различного рода сокращений, аббревиатуры и т.д. многие используют для регистрации исследуемых тем систему карточек. Преимущество карточек в том, что тема там излагается очень сжато, и они очень удобны в использовании, т.к. их можно разложить на столе, перегруппировать и без труда найти искомую тему.

Список литературы, рекомендуемый к использованию в самостоятельной работе студентов

Зеливянская, О. Е. (СКФУ). Физика горных пород : учебное пособие(курс лекций) для студентов специальности 21.05.03

«Технология геологической разведки» / О. Е. Зеливянская ; Сев.- Кав. федер. ун-т. - Ставрополь : СКФУ, 2014. - 156 с

Дополнительная литература

Добрынин, В. М. Петрофизика (физика горных пород) : учебник для вузов / В. М. Добрынин, Б. Ю. Вендельштейн, Д. А. Кожевников. - М. : Нефть и газ ; РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2004. - 368 с. : ил. - Библиогр.: с. 355-357. - Предм. указ.: с.358-362. - ISBN 5-7246-0295-4

Зинченко, В. С. Петрофизические основы гидрогеологической и инженерно-геологической интерпретации геофизических данных : учеб. пособие / В. С. Зинченко ; Рос. гос.

геологоразвед. ун-т им. С. Орджоникидзе. - М. : Тверь : Изд-во АИС, 2005. - 387 с. : ил., табл. - Гриф: Доп. МО. - Библиогр.: с. 378-382. - ISBN 5-94789-117-4

Петрофизика : учебник для вузов / Г. С. Вахромеев, Л. Я. Ерофеев, В. С. Канайкина, Г. Г. Номоконова. - Томск : Изд-во Томского ун-та, 1997. - 462 с. : ил. - Библиогр.: с. 456-458. - ISBN 5- 7511-0851-5

Ржевский, В. В. Основы физики горных пород : учебник для вузов / В. В. Ржевский, Г. Я. Новик. - 6-е изд. - М. : URSS, 2012.

- 360 с. : ил. - (Классика инженерной мысли: горное дело). - Гриф: Доп. МО. - Библиогр.: с. 335-336. - ISBN 978-5-397-03053-3

Ржевский, В. В. Основы физики горных пород : учебник для вузов / В. В. Ржевский, Г. Я. Новик. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - М. : Недра, 1973. - 286 с. : ил. - Библиогр.: с. 280-282

Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика) : справочник геофизика / под ред. Н. Б. Дортман. - М. : Недра, 1976. - 527 с. : ил. - Библиогр.: с. 501-525

Интернет-ресурсы

<http://ansatte.uit.no/webgeology/> сайт Университета Тромсё (University of Tromsø), Норвегия

<http://oilcraft.ru/load/2> - нефтегазовый портал

<http://www.geokniga.org/inboxes> - Геологический портал GeoKniga