

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания по выполнению лабораторных работ

ФИЗИКА ГОРНЫХ ПОРОД

Специальность	21.05.02 Прикладная геология
Специализация	Геология месторождений нефти и газа
Квалификация выпускника	Горный инженер-геолог
Форма обучения	очная

Ставрополь, 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1 Определение плотности жидкости пикнометрическим способом.....	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2 Определение плотности твердой фазы пикнометрическим способом	10
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3 Определение плотности абсолютно сухой породы гидростатическим взвешиванием	16
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4 Магнитометрический способ определения остаточной намагниченности, азимута склонения и угла наклона	26
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5 Определение удельного электрического сопротивления пластовой воды	39
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6 Определение удельного электрического сопротивления максимально влажных горных пород мостовым способом	44
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7 Определение удельного электрического сопротивления горных пород мостовым способом	55

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8 Определение диэлектрической
проницаемости мостовым способом**

.....

68

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9 Определение скорости
распространения упругих продольных волн способом
прозвучивания**

.....

78

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10 Определение тепловых свойств
состояния методом мгновенного источника тепла**

.....

86

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 11 Определение гамма-активности пород

.....

95

**Приложение А Требования к оформлению отчета по выполнению
лабораторных работ**

.....

103

Литература

.....

107

ВВЕДЕНИЕ

Целью освоения дисциплины является формирование набора компетенций будущего специалиста в области обучения, воспитания и развития, соответствующим целям ОП ВО специальности «Геология месторождений нефти и газа».

Задачи дисциплины – ознакомить студентов с применением современных методов математического моделирования в геолого-геофизической практике.

Ценность и актуальность настоящего издания заключается в том, что за последние 5 лет не издавались федеральные учебники по математическому моделированию в геофизике.

Настоящее издание обобщает многолетний опыт автора по проведению лабораторных занятий по данной дисциплине, а также опыт предыдущих учебных изданий и фондовых материалов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

Определение плотности жидкости пикнометрическим способом

Тема (2): Плотность горных пород

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

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_g насыщающей ее воды или по найденным плотностям σ_g , σ_n и σ_z воды, нефти и газа и коэффициентам k_g , k_n , k_z и водо-, нефте- и газонасыщения рассчитывают плотность σ_n породы.

Плотности твердой фазы σ_t варьируют в пределах 1,0 – 7,0 г/см³, сухих пород σ_c – от 0,5 до 7,0 г/см³, влажных σ_{en} – от 1,1 до 7,0 г/см³.

В зависимости от концентрации солей плотность вод увеличивается от 1 (пресная вода) до 1,26 г/см³ (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 °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 асфальтово-смолистых компонентов, обладающих плотностью порядка 1 г/см³ и выше, в-третьих, от химической природы углеводородов, составляющих основную массу нефти.

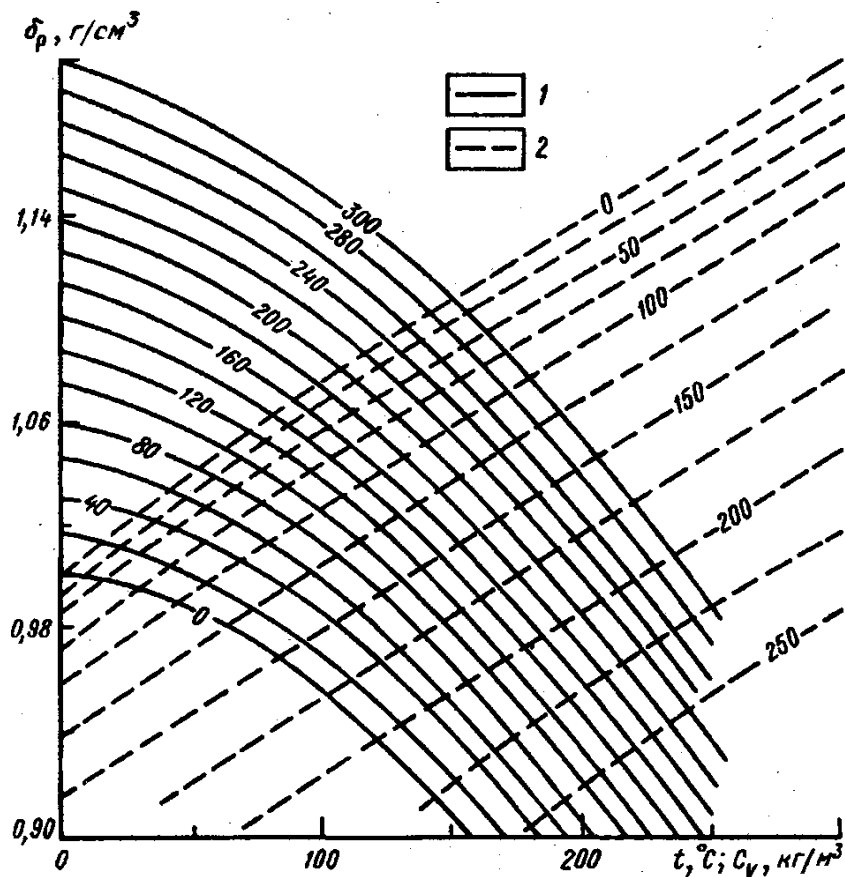


Рисунок 1.1 – Зависимость плотности растворов NaCl от объемной концентрации C_v и температуры t

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

$$V_n = \frac{m_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}}} = \frac{m_{\text{н.в}} - m_{\text{н}}}{\rho_{\text{в}}}, \quad (1.1)$$

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

Оборудование и материалы

1. Лабораторные весы.
2. Пикнометры.
3. Стеклянные 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
$$V_n = \frac{m_{nв} - m_n}{\rho_{в}}$$
 объем пикнометра.

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 $m_{n.ж}$ пикнометра с жидкостью.

3.3. Рассчитывают плотность жидкости (г/см^3) по формуле:

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

4. Вычисление погрешности измерений.

Рассчитываем наибольшую метрологическую относительную погрешность:

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

При взвешивании на лабораторных весах ВЛТЭ-1100 погрешности $\Delta m_n = \Delta m_{п.б} = \Delta m_{п.жс} = 0,01$ 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	V_n , см ³	$\sigma_{жс}$, г/см ³	$\frac{\Delta \delta_{жс}}{\delta_{жс}}$, %
		m_n	$m_{п.б}$	$m_{п.жс}$				

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

Определение плотности твердой фазы пикнометрическим способом

Тема (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.

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 $m_{\text{п.т.ж}}$, заполняющей до метки оставшийся объем пикнометра.

Зная эти массы, можно рассчитать плотность твердой фазы породы:

$$\sigma^T = \frac{(m_{\text{п.т}} - m_{\text{п}}) \sigma_{\text{ж}}}{(m_{\text{п.ж}} - m_{\text{п}} - m_{\text{п.т.ж}} + m_{\text{п.т}})} \quad (2.2)$$

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 $\sigma_{\tau} = \left(\frac{(m_{п.т.} - m_{п.})\sigma_{\text{ж}}}{m_{п.ж} - m_{п.} - m_{п.т.ж} - m_{п.т.}} \right)$ ПЛОТНОСТЬ

твёрдой фазы породы.

3. Вычисление погрешности измерений.

Рассчитываем наибольшую метрологическую относительную погрешность:

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

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

Содержание отчета

Отчет формируем в соответствии с приложением А.

Исходные данные и результаты для определения σ_{τ} пикнометрическим способом записываются по форме, приведенной в табл. 2.1.

Таблица 2.1

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

Контрольные вопросы

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

6. В чем сущность пикнометрического способа определения твердой фазы?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

Определение плотности абсолютно сухой породы гидростатическим взвешиванием

Тема (2): Плотность 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 .

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: $V_{c.об} = \frac{m_{c.об} - m_{жс.об}}{\delta_{жс}}$, *об (непроницаемая оболочка), затем

определяется объем материала, покрывающего образец по формуле: $V_{об} = (m_{с.об} - m_c) / \delta_{об}$, 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:

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

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

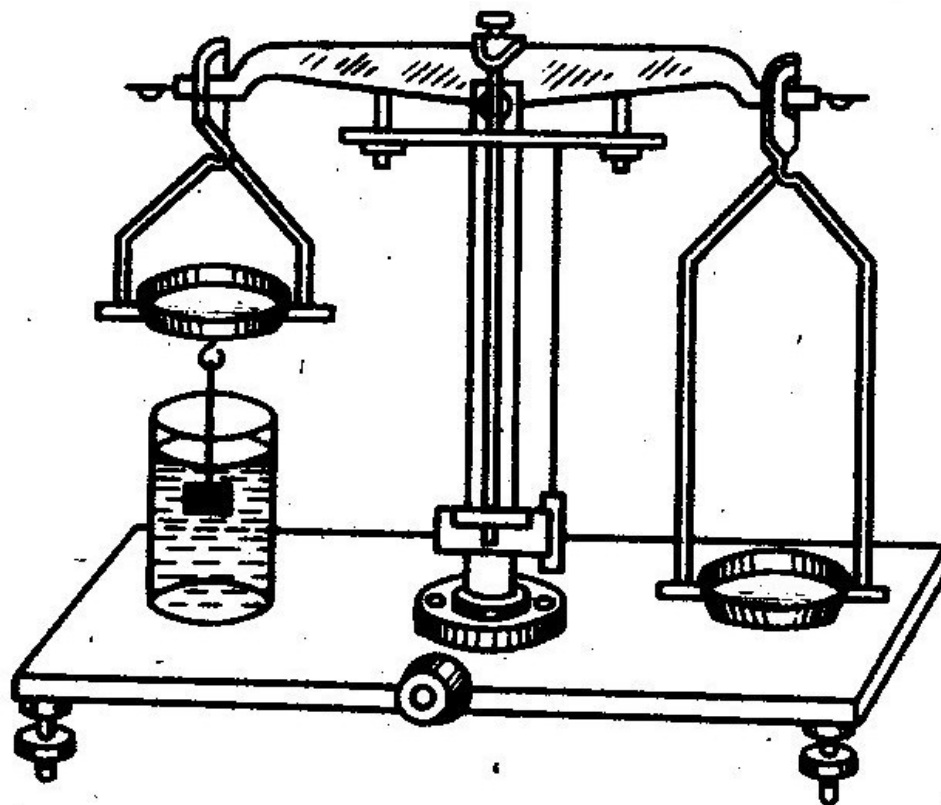


Рисунок 3.1 – Гидростатические весы
для взвешивания образцов в воде

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

$$m_{ж} = m_{ж \text{ с.колб.пр}} - m_{ж \text{ колб}} - m_{пр}$$

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

3.3. Затем находим плотность породы по формуле:

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

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

4. Вычисление погрешности измерений.

Рассчитываем наибольшую метрологическую относительную погрешность:

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

при $\delta_c = 1 \text{ г/см}^3$ и $\Delta m_c^* = \Delta m_c$, 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

Магнитометрический способ определения остаточной намагниченности, азимута склонения и угла наклона

Тема (3): Магнитные 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.

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 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:

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

Мерой намагничивания вещества служит вектор $\vec{J}$. Он равен векторной сумме всех магнитных моментов $\vec{M}_M$ молекул, заключенных в единице объема вещества:

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

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 $700 - 1000^\circ\text{C}$.

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 $\vec{J}_i$, 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 $\vec{J}_i$.

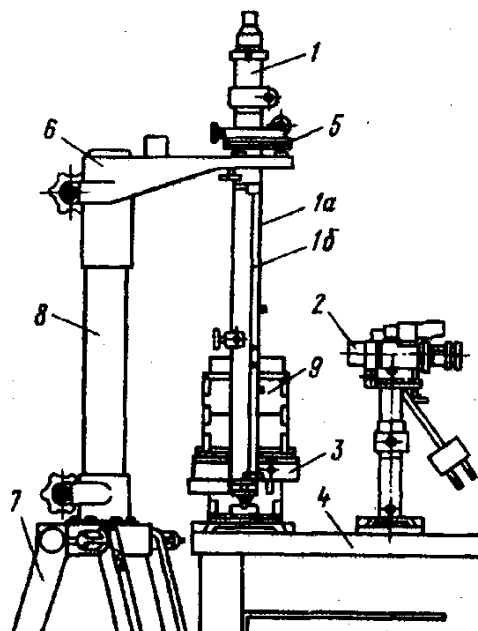


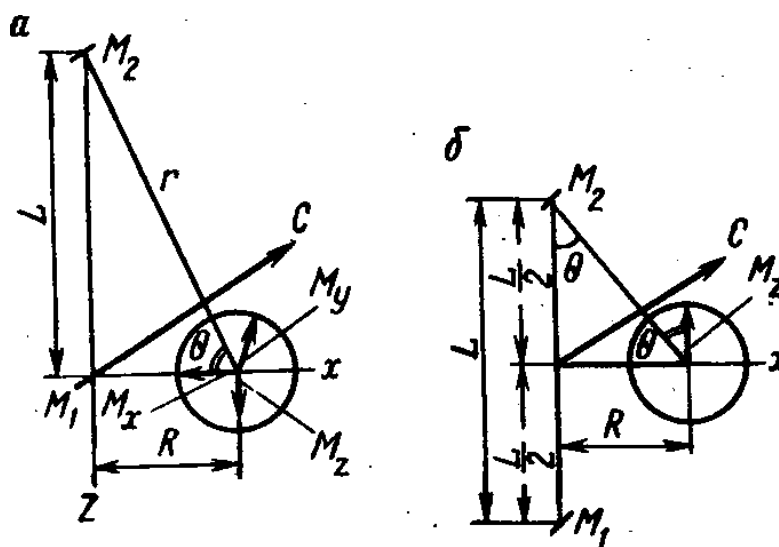
Рисунок 4.1 – Схема астатического магнитометра
 1 – цилиндрический корпус магнитометра (а – защитный кожух, б – торсионный подвес); 2 – система двухмагнитная с зеркалом 3 и коти́ровочным магнитом; 4 – подвес системы; 5 – демпфер; 6 – арретир; 7 – опоры; 8 – немагнитный держатель; 9 – крючок с подвеской

На уровне нижнего магнита астатической системы (рис. 4.2, а) определяются проекции M_x , M_y , 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: *a* – на уровне нижнего магнита,
б – в равноудаленном положении от магнитов

Оборудование и материалы

1. Магнитометр астатический.
2. Контейнеры для образцов 50×50×50 мм и 70×70×70 мм.

3. Образцы правильной геометрической формы размером до 70×70×70 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 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 ($A \cdot m^2/\text{дел}$)

$$E_m = \frac{A_m \cdot K \cdot I \cdot 10^5}{n}, \quad (4.7)$$

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 $70 \times 70 \times$ 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. Рассчитывают модуль вектора $\vec{J} = \sqrt{\vec{J}_x^2 + \vec{J}_y^2 + \vec{J}_z^2}$

1.15. Определяют направление вектора:

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

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

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

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 т, 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:

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

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

По аналогичным формулам рассчитывают проекции моментов $\vec{M}_{iy}$, $\vec{M}_{iz}$, $\vec{M}_z$.

2.9. Определяют проекции вектора остаточной намагниченности $\vec{J}_x = \vec{M}_x / V$; $\vec{J}_y = \vec{M}_y / V$; $\vec{J}_z = \vec{M}_z / V$;

2.10. Находят модуль вектора остаточной намагниченности:

$$\vec{J} = \sqrt{\vec{J}_x^2 + \vec{J}_y^2 + \vec{J}_z^2}. \quad (4.13)$$

2.11. Определяют направление вектора:

$$\begin{aligned} \text{азимут } A &= \arctg \frac{J_x}{J_y}; \\ \text{склонение } D &= \arcsin \frac{J_x}{\sqrt{J_x^2 + J_y^2}}; \end{aligned}$$

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

Если известна вертикальная составляющая магнитного поля в данной точке H , возможно определить магнитную восприимчивость χ по составляющим векторов индуктивной намагниченности

$$\vec{J}_{ix}, \vec{J}_{iy}, \vec{J}_{iz}.$$

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 :

$$\chi_x = J_{ix} / H_z; \quad \chi_y = J_{iy} / H_z; \quad \chi_z = J_{iz} / H_z \quad \text{и среднюю величину}$$

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

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 ?
4. В каких единицах в системе СИ измеряются намагниченность вещества J и напряженность магнитного поля H ?
5. Для каких магнетиков справедливы приведенные формулы определения магнитной восприимчивости $\chi = \frac{J}{H}$ и относительной магнитной проницаемости $\mu = \frac{B}{B_0}$? Почему?
6. Для какой цели производится поворот образца на 180° при

определении вектора намагниченности с помощью магнитометра?

7. В чем принципиальная разница измерения проекций магнитного момента на уровне нижнего магнита и в равноудаленной точке?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

Определение удельного электрического сопротивления пластовой воды

Тема (4): Электрические свойства горных пород.

Цель работы. Изучение удельного электрического сопротивления пластовой воды для решения различных промыслово-геофизических 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_{ϵ} и по эталонному графику $R_{\epsilon} = f(\rho_{\epsilon})$ находят удельное электрическое сопротивление воды ρ_{ϵ} . При измерениях на переменном или пульсирующем токе требования к стабильности электродов снижаются и используется чаще всего принцип непосредственной оценки ρ_{ϵ} 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 (большего) 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

Определение удельного электрического сопротивления максимально влажных горных пород мостовым способом

Тема (4): Электрические свойства горных пород.

Цель работы. Изучение удельного электрического сопротивления максимально влажных горных пород для решения различных промыслово-геофизических 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 $R_2 = R_3$.

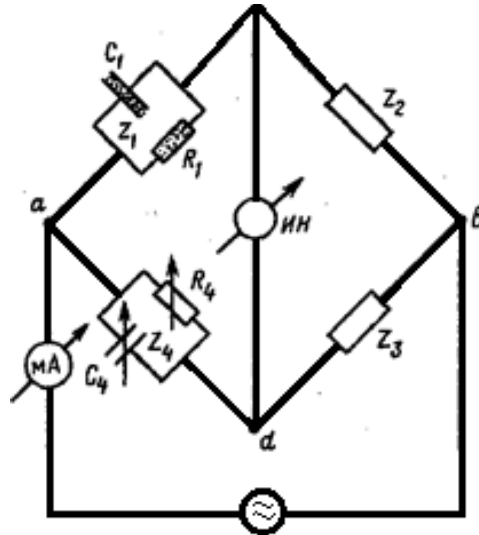


Рисунок 6.1 – Общая схема четырехплечного моста переменного тока для измерения сопротивления образцов горных пород

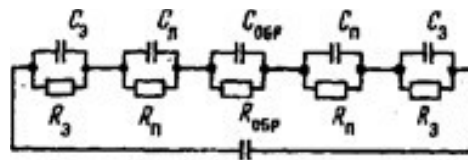


Рисунок 6.2 – Эквивалентная электрическая схема системы электрод – прокладка – образец – прокладка – электрод

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

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

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

Приравнявая отдельно вещественные и мнимые составляющие в выражении (6.2), получаем $R_3/R = R_2/R$; $CR_3 = C_1 R_2$. 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_s 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_s , 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: $R_s = R_2 R' / R_3$ (где R' – показания декад магазина сопротивлений, включенного в четвертое плечо моста), так как $R_2 = R_3$, то $R_s = R'$.

В результате

$$R_{обр} = R_l - R_s. \quad (6.3)$$

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

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

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.

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

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
$R_{погр}$, Ом					
$R_{изм}$, Ом					
d_1 , м					
d_2 , м					
L , м					
t , °C					
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 , °C			
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

Определение удельного электрического сопротивления горных пород мостовым способом

Тема (4): Электрические свойства горных пород.

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.

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*).

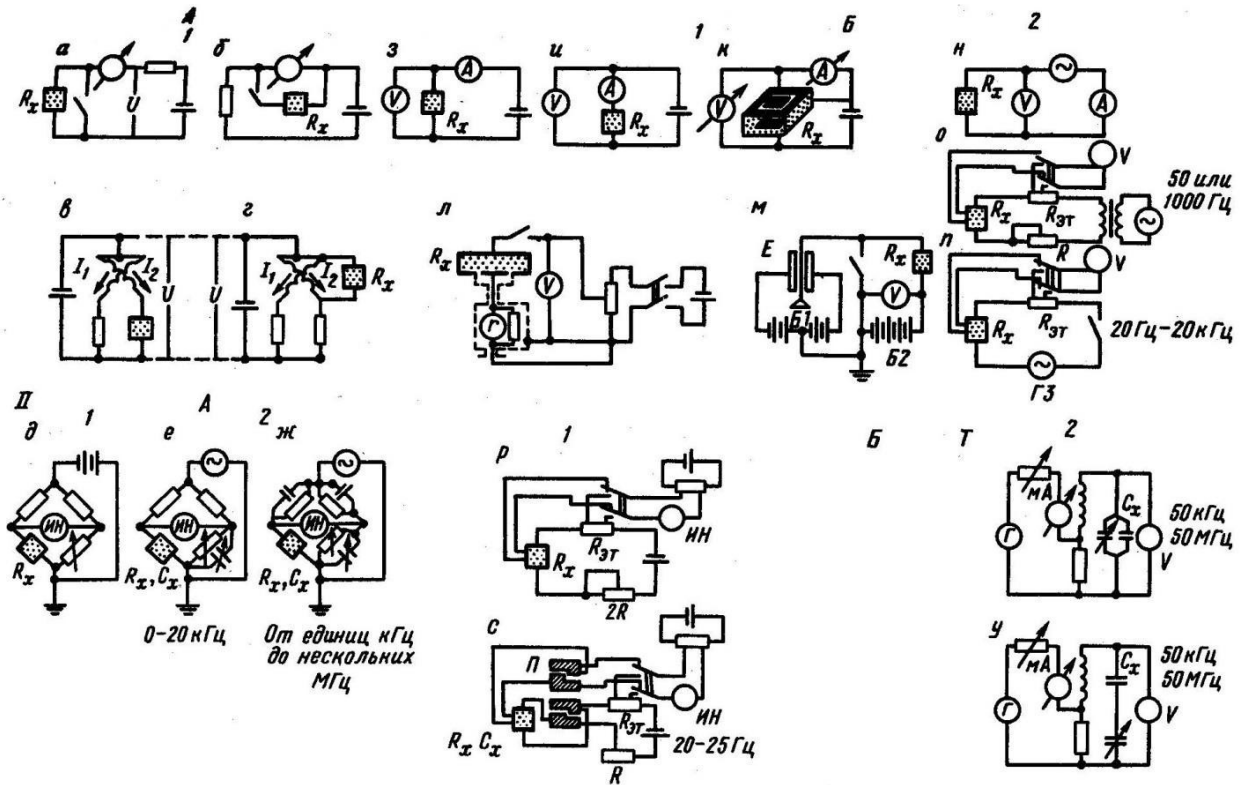


Рисунок 7.1 – Электрические схемы измерения $\rho_{обр}$

I – непосредственной оценки (оценка по приборам),

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

I – схемы постоянного тока: *a* – 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; *мА* – 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, вольтметр-амперметром, вольтметр-амперметром с охранным кольцом, вольтметр-электромметром 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 $C_э$, их комплексное сопротивление $Z = Z_э + Z_n + Z_{обр} + Z_n + Z_э = 2Z_э + Z_{обр} + 2Z_n$ (эквивалентная электрическая схема дана на рис. 7.3).

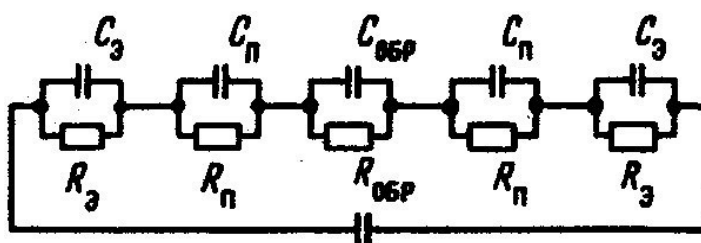


Рисунок 7.2 – Общая схема четырехплечного моста переменного тока для измерения сопротивления $R_{обр}$ образцов горных пород

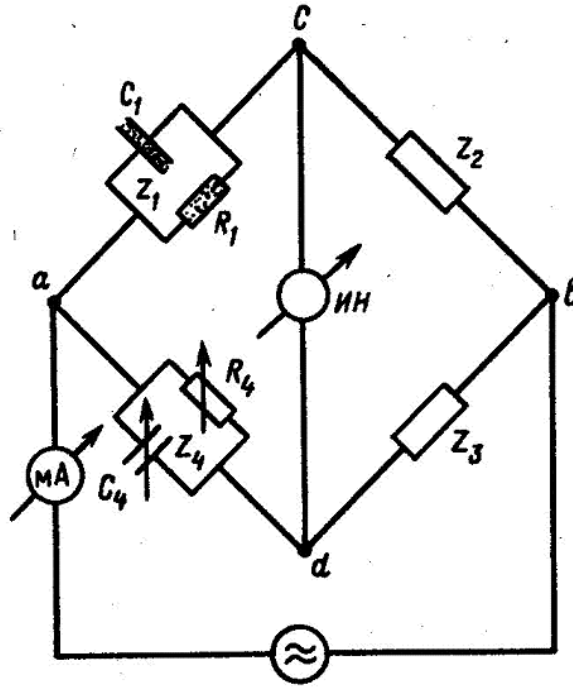


Рисунок 7.3 – Эквивалентная электрическая схема системы
электрод – прокладка – образец – прокладка – электрод

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

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

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

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

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

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

Приравнявая 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 $R_{обр}$ 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

$$R_{обр} = R_1 - R_9. \quad (7.5)$$

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 $R_{обр} = R_l - R_э$ 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	$d, \text{ м}$	$L, \text{ м}$	$F, \text{ м}^2$	$I, \text{ А}$	$j, \text{ А/м}^2$	Сопротивление, Ом			$\rho_{в.н.} \text{ Ом} \cdot \text{ м}$
							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 $\rho_{в\text{ п}}$?
3. Почему сила тока в цепи питания мостовой схемы не соответствует расчетному значению?
4. Почему при измерении $\rho_{в\text{ п}}$ желательно применять переменный ток?
5. Исходя из каких положений принята плотность тока $j = 1 \text{ А/м}^2$ при измерении $\rho_{в\text{ п}}$?
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 $\rho_{в\text{ п}}$ 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?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8

Определение диэлектрической проницаемости мостовым способом

Тема (4): Электрические свойства горных пород.

Цель работы. Ознакомление с понятием диэлектрической проницаемости горных пород. Освоение методики определения диэлектрической проницаемости горных пород мостовым способом.

Теоретическая часть

Диэлектрические свойства горных пород в основном характеризуются диэлектрической проницаемостью ε и тангенсом угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$.

Диэлектрическая проницаемость ε характеризует поляризацию горных пород под действием электромагнитного поля. В результате электронной, атомной, дипольной и других поляризаций пород происходит относительное смещение связанных зарядов разного знака и уменьшение напряженности E приложенного поля.

Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = \varepsilon' / \varepsilon_0 = E_0 / E$ показывает, во сколько раз уменьшилась напряженность E электрического поля в породе по отношению к напряженности E_0 в вакууме (ε' – абсолютная диэлектрическая проницаемость; ε_0 – диэлектрическая проницаемость в вакууме, равная единице).

Для породы и вакуума $D = \varepsilon' E$; $D = \varepsilon_0 E$. Здесь D – вектор смещения, связанный с вектором поляризации P и напряженностью E электрического поля в породе соотношениями

$$D = \varepsilon_0 E + 4\pi P = E(\varepsilon_0 + 4\pi\chi) = \varepsilon' E; \chi = P/\varepsilon,$$

где χ – поляризуемость диэлектрика.

Диэлектрическая проницаемость пород в переменных электрических полях с частотой ω , соизмеримой с частотой электронных или молекулярных колебаний частиц, создающих диэлектрическую поляризацию, является комплексной величиной

$$\varepsilon = (\omega) = \varepsilon_1(\omega) - j\varepsilon_2'(\omega).$$

В этом случае вектор D имеет составляющую $\varepsilon_1'(\omega)E$ совпадающую по фазе с вектором E , и составляющую $\varepsilon_2'(\omega)E$, отстающую от E по фазе на $\pi/2$. Возникающие при этом потери электрической энергии, носящие название диэлектрических, характеризуются углом потерь δ , для которого

$$\operatorname{tg} \delta = \varepsilon_2' / \varepsilon_1' = \sigma_1' / \sigma_2',$$

где σ_1' и σ_2' – активная и реактивная проводимости породы

Минералы и горные породы в зависимости от состава, структуры, состояния (влажности, температуры) и условий измерения (в частности, частоты тока) могут характеризоваться значениями ε и $\operatorname{tg} \delta$, изменяющимися соответственно от $<2,5$ до $>5 \cdot 10^5$ и от $<5 \cdot 10^{-4}$ до >1 .

Лабораторное изучение диэлектрической проницаемости ε и тангенса $\operatorname{tg} \delta$ угла диэлектрических потерь минералов и пород необходимо для:

- выяснения процессов, происходящих в минералах и породах, находящихся в электрических полях;
- установления связи этих величин с молекулярной и ионной структурой минералов; степенью их чистоты; составом, структурой и текстурой твердой фазы минералов и пород; природой и содержанием порозаполнителя пород; взаимодействием фаз; частотой электрического тока, температурой и давлением;

- контроля за изменением структуры минералов и пород под действием температуры и давления;

- наблюдения за динамикой влажности, нефте- и газонасыщения минералов, почв, пород, полезных ископаемых, диэлектрическими методами и определения характера изменения этих свойств по разрезам и площадям;

- расчетов расстояний распространения радиоволн в горных породах при подземной радиосвязи и радиоразведке;

- решения задач разрушения пород электромагнитными волнами.

Определение ε и $\operatorname{tg}\delta$ производится мостовыми, резонансными и другими способами. При использовании того или иного способа исходят из принятого диапазона частот, свойств пород и заданной точности измерения.

Обычно ε и $\operatorname{tg}\delta$ пород определяют в диапазоне частот от 0 до 10^8 Гц. При измерениях на частотах от 1 до 10^6 Гц применяют мостовые, а при высокочастотных измерениях (от 10^5 до 10^8 Гц) резонансные способы или специальные мостовые.

Мостовые схемы позволяют определить ε и $\operatorname{tg}\delta$ при относительно высоких значениях угла потерь исследуемых горных пород. При этом мостовыми способами нередко определяют кажущуюся диэлектрическую проницаемость ε_k , созданную диэлектрической поляризацией (упругим смещением электронов и ионов, ориентацией диполей, структурной поляризацией) образцов пород, а также накоплением заряда i их при электродном слое. Для определения диэлектрической проницаемости и тангенса диэлектрических потерь используются различные модификации моста Уитстона, рассчитанные на узкие и широкие диапазоны частот. При исследованиях ε и $\operatorname{tg}\delta$ в значительных пределах частот последние предпочтительнее, так как в них устраняются погрешности, созданные различием установок.

В практике обычно применяются мостовые схемы Шеренга, трансформаторные мосты, двойные Т-образные мосты и другие

измерительные схемы.

Горная порода рассматривается как диэлектрик с потерями и считается, что она может быть представлена эквивалентной схемой (рис. 8.1).

При незначительном активном сопротивлении R , шунтирующем емкость C , реактивное сопротивление велико и определение ε представляет трудности. Поэтому для успешных определений ε необходимо, чтобы для измерительного конденсатора с породой соблюдалось условие $\operatorname{tg} \delta \leq 1$.

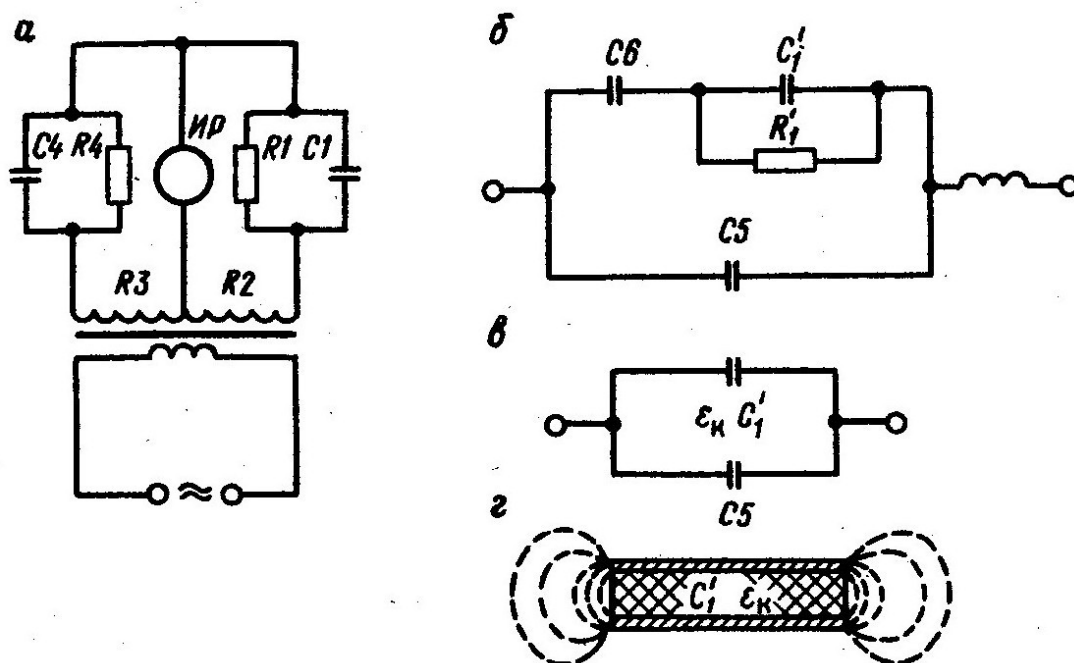


Рисунок 8.1 – Принципиальная схема моста с индуктивно связанными плечами и конденсатора с образцом

a – мост; конденсатор: $б$ – измерительный, $в$ – плоский дисковый, $г$ – плоский

Конденсатор с породой представляет одно из основных плеч моста, с комплексным сопротивлением $Z_1 = R_1 + j\omega C$. Вторым основным плечом

является комплексное сопротивление Z_4 , состоящее из параллельно включенных сопротивления и емкости C_4 . Плечо Z_4 позволяет уравновесить мост по модулю и фазе. Вспомогательными плечами моста служат равные активные сопротивления $Z_2 = R_2$ и $Z_3 = R_3$, из которых складывается сопротивление вторичной обмотки трансформатора со средней точкой (с

выводом от этой точки) звукового генератора. Плечи R_2 и R_3 индуктивно связаны с первичной обмоткой трансформатора. Равновесие мостовой схемы устанавливается с помощью электронного вольтметра ИР (индикатор равновесия).

В момент равновесия схемы искомая емкость $C_1 = C_4$ и сопротивление $R_1 = R_4$. При этом емкость C_1 обусловлена не только диэлектрической поляризацией породы, но и накоплением заряда в приэлектродном слое. C_1 тем более отличается от емкости C_n образца, созданной диэлектрической поляризацией, чем меньше частота тока, проходящего через образец. Сопротивление R_1 включает сопротивление, вызванное наличием приэлектродных зарядов в образце и электрохимическими процессами на поверхности электродов.

Так как кажущаяся диэлектрическая проницаемость образца породы

$$\varepsilon_k = C_1/C_0, \quad (8.1)$$

то очевидно, что для определения ε_k кроме C_1 должна быть известна емкость конденсатора C_0 в безвоздушном пространстве с учетом его краевой емкости.

Обычно при определении ε применяются двухэлектродные конденсаторы, которым соответствует эквивалентная схема на рис. 8.1. Для этих конденсаторов

$$C_1 = C_5 + \frac{\varepsilon C_6' C_6}{C_6' + C_6 C_\varepsilon} \quad \text{и} \quad C_0 = C_5' + \frac{C_0' C_6'}{C_0' + C_6'},$$

где C_1 , C_5 и C_6 – емкости соответственно активная (рабочая), паразитная, обусловленная полями рассеяния (краевыми полями конденсатора) и емкостью между подводящими проводами, и паразитная, учитывающая емкости зазоров между образцом и обкладками конденсатора; обе

паразитные емкости зависят от конструкции и размеров конденсатора; C_0' C_5' ,

и C_6' – активные и паразитные емкости после удаления из конденсатора образца.

Если расстояние между пластинами конденсатора мало, по сравнению с диаметром электродов, как у плоского дискового конденсатора, то при $C_1 \geq C_2$ изменение C_5 при внесении образца невелико при $\varepsilon \leq 20$ толщине образца 1–6 мм. При электродах, плотно прижатых к образцу, $C_6 \approx \infty$. В этих условиях эквивалентная схема конденсатора преобразуется к виду, изображенному на рис. 8, б.

Существенно уменьшается влияние перераспределения полей в случае, когда образец находится в центральной части конденсатора.

Емкость C_0 определяется калибровкой. Калибровка цилиндрических конденсаторов, предназначенных для измерения ε и $\operatorname{tg} \delta$ рыхлых пород (песков, алевроитов и других) и почв производится по воде и воздуху. При этом способе калибровки измеряются емкости конденсатора $C_{вз}$, $C_в$ и C_1 соответственно при воздухе, воде и образце породы между его пластинами, находящимися на не изменяющемся расстоянии друг от друга и при постоянной температуре.

С учетом формулы (8.1) разность между диэлектрическими проницаемостями $\varepsilon_в$ и $\varepsilon_{вз}$ при воде и воздухе между пластинами конденсатора определяется выражением $\varepsilon_в - \varepsilon_{вз} = \frac{C_в - C_{вз}}{C_0}$, откуда $C_0 = \frac{C_в - C_{вз}}{\varepsilon_в - \varepsilon_{вз}}$, так как $\varepsilon_{вз} \approx 1$

и $\varepsilon_в = 80,1$ при $t = 20^\circ\text{C}$, то

$$C_0 = \frac{C_в - C_{вз}}{80,1 - 1}. \quad (8.2)$$

Конденсаторы могут быть также прокалиброваны по трем-четырем жидкостям с известными значениями ε , например, при $t = 20^\circ\text{C}$, по касторовому маслу $\varepsilon = 4,6$, этиловому спирту $\varepsilon = 25,8$, глицерину $\varepsilon = 56,2$, дистиллированной воде $\varepsilon = 80,1$. C_0 – угловой коэффициент прямой $C_{1i} = C_0 \varepsilon_{ki} + C_5$, где C_5 – емкость рассеяния и проводов.

Плоские конденсаторы, предназначенные для определения ε и $\operatorname{tg} \delta$ сцементированных образцов пород, градуируются по воздуху и химически

чистому парафину с температурой плавления 46°C ($\varepsilon_{\text{пар}}=2,0$ при 18°C), при этом

$$C_0 = \frac{C_{\text{пар}} - C_{\text{вз}}}{\varepsilon_{\text{пар}} - 1} \approx C_{\text{пар}} - C_{\text{вз}}. \quad (8.3)$$

Зная C_0 и $C_{\text{вз}}$, измеряя емкость C_1 конденсатора с образцом, рассчитывают ε_{κ} ;

$$\varepsilon_{\kappa} = \frac{C_1 - C_{\text{вз}}}{C_0} + \varepsilon_{\text{вз}} = \frac{C_1 - C_{\text{вз}}}{C_0} + 1. \quad (8.4)$$

Оборудование и материалы

1. Высокочувствительный и точный трансформаторный мост.
2. Конденсатор для определения ε сцементированных пород.
3. Безреактивный переменный резистор Tesla 1M6/G – BF и переменный резистор СПО-4, 7А-1ВТ экранированы и находятся в металлической коробке, к которой крепятся градуированные шкалы.
4. Магазин емкостей Р544 и конденсатор переменной емкости Р512 для переменного тока частотой 40 – 10 000 Гц позволяют измерить емкости от единиц пикофард до 1 мФ. Подстроенный конденсатор КПК-2-25, экранированный от внешних электромагнитных полей, предназначен для компенсации паразитных емкостей установки при ее наладке. Звуковой генератор ГЗ-33 является источником переменного тока частотой 0,02 – 200 кГц.
5. Электронный вольтметр ВЗ-42 (или заменяющие его вольтметры ВЗ-6; ВЗ-13; ВЗ-38; ВЗ-40) позволяет измерять средние, амплитудные и эффективные значения напряжений переменного тока любой формы в пределах 0,03 – 300 мВ (до 300 В).

Конденсатор с породой является основным плечом моста. Другое плечо содержит параллельно соединенные сопротивление и емкость. Сопротивление представляет последовательное соединение сопротивлений магазина Р517, Tesla 1M6/G–BF и СПО-4, 7А-1 ВТ, а емкость – последовательное включение магазинов емкостей Р544 и Р512.

Вспомогательные плечи моста содержат сопротивление R_2 - R_3 вторичной обмотки трансформатора, с помощью которой мост питается переменным синусоидальным током звуковой частоты.

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. Собирают схему моста, мост заземляют; схему включают в цепь переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц и дают прогреться в течение 30 мин, устанавливают на генераторе частоту 5 или 1 кГц.

2. Настраивают схему.

3. Градуируют конденсатор:

а) изготавливают из х. ч. парафина диски диаметром $d_{\text{пар}} = 30$ мм и толщиной $l_{\text{пар}} = 2,5; 3,5; 4,5$ мм со строго параллельными отшлифованными торцами;

б) помещают диски один за другим в конденсатор для сцементированных образцов, предварительно хорошо промытый дистиллированной водой и обезжиренный ацетоном или спиртом;

в) включают конденсатор в схему моста и подают на его пластины от генератора напряжение 10 В при частоте 5 МГц;

- г) измеряют поочередно емкости конденсатора $C_{\text{пар}i}$ ($i = 1, 2, 3$) с образцами парафина толщиной $l_{\text{пар}} = 2,5, 3,5, 4,5$ мм;
- д) измеряют емкости конденсатора $C_{\text{вз}i}$, заполненного воздухом при пластинах, раздвинутых на расстояние 2,5; 3,5 и 4,5 мм при том же режиме;
- е) рассчитывают геометрические емкости конденсатора по формуле (8.2);
- ж) строят зависимость $C_0 = f(l_k)$, где l_k – расстояние между пластинами конденсатора;
- з) отмывают образцы от солей и нефти и изготавливают диски диаметром $d = 30$ мм и толщиной $L = 3-4$ мм так, чтобы их основания были параллельны и пришлифованы. Определяют размеры дисков штангенциркулем.
4. Определяют (по данным отдельных опытов) плотности σ_t твердой фазы образца и увлажняющей его воды.
5. Высушивают диски до постоянной массы при температуре 105°C и взвешивают их на аналитических весах m_c .
6. Увлажняют образцы и снова взвешивают m_n .
7. Помещают диск в конденсатор, который включают в схему моста, предварительно поместив между образцом и пластинами конденсатора оловянные прокладки.
8. Измеряют емкости C_{1j} образца при заданных частотах f_j ($j = 1, \dots, 6$) и напряжении на пластинах конденсатора, равном 10 В.
9. Выключают конденсатор из схемы и вынимают из него образец.
10. Промывают конденсатор, насухо вытирают, раздвигают его пластины на расстояние l_k , равное толщине образца L , затем включают конденсатор в схему и мостом измеряют $C_{\text{вз}i}$ при частоте 5 МГц или более и напряжении 10 В.
11. Рассчитывают по формулам (8.3, 8.4) диэлектрическую проницаемость для каждой заданной частоты.

Содержание отчета

Отчет формируем в соответствии с приложением А.

Контрольные вопросы

1. Как связана диэлектрическая проницаемость пород с характером заполнения порового пространства?
2. Влияет ли минеральный состав пород на величину ε ?
3. Какие вы знаете способы оценки ε пород в лаборатории?
4. Влияет ли на поляризацию пород величина напряженности поляризующего поля?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9

Определение скорости распространения упругих продольных волн способом прозвучивания

Тема (5): Упругие свойства горных пород.

Цель работы. Ознакомление с упругими модулями и упругими свойствами горных пород. Освоение методики определения скорости распространения упругих продольных волн способом прозвучивания.

Теоретическая часть

Под действием приложенных извне сил, вследствие присущей им упругости, породы изменяют свою структуру (форму) и размеры. Однако они способны возвращаться к начальному состоянию после снятия деформировавших их усилий, не превосходивших предела упругости.

Способность горных пород сохранять упругость, передавать упругие деформации с определенной скоростью и поглощать упругую энергию определяется комплексом физических характеристик, объединяемых обобщающим понятием – *упругие свойства*. К числу этих характеристик относятся модули Юнга E , сдвига G , всестороннего сжатия K , скорости распространения продольных v_P , поперечных v_S и поверхностных v_R упругих волн, коэффициенты Пуассона σ_n , объемного сжатия β , поглощение продольных, поперечных и поверхностных упругих волн α_P , α_S и α_R .

Упругость однородно-анизотропных пород описывается большим числом (до 21) независимых коэффициентов упругости, скоростей упругих волн и коэффициентов поглощения.

Модули E , G и K (Па) являются коэффициентами пропорциональности в уравнениях, связывающих напряжения σ (Па), созданные в породе определенными усилиями с соответствующими им деформациями.

Коэффициент сжимаемости (Па^{-1}) – это величина, обратная модулю всестороннего сжатия $\beta = 1/K$. Коэффициент Пуассона $= l_2/l_1$ (где l_2 и l_1 – поперечная и продольная деформации бруска породы, к торцовым граням которого приложены равные растягивающие или сжимающие усилия) характеризует интенсивность поперечных деформаций пород при приложении к образцу продольных усилий.

Скорости v_P , v_S и v_R (м/с) распространения упругих колебаний связаны с временами τ_P , τ_S и τ_R (мкс/м) распространения упругих продольных, поперечных и поверхностных волн в образце породы следующими равенствами. Для продольных волн $v_P = l/\tau_P$, для поперечных волн $v_S = l/\tau_S$, для поверхностных волн $v_R = l/\tau_R$, где l – длина образца.

При распространении волн любого типа в образце породы их энергия переходит в энергию рассеянных волн и убывает вследствие потерь.

Амплитуда упругой волны изменяется с расстоянием x от точечного источника колебаний, где находится начало отсчета, по закону

$$A = A_0 \left(\frac{x}{x_0} \right)^{-n} \exp^{-\alpha(x-x_0)},$$

где A_0 – амплитуда на расстоянии x_0 от источника, находящегося на линии, проходящей через центр источника колебаний и точку x ; n – амплитудный показатель расхождения волны от источника в зависимости от типа волны, структуры и степени неоднородности породы; α – амплитудный коэффициент поглощения.

В реальных горных породах обнаруживаются одновременно как

рассеяние, так и затухание упругой волны, обусловленные их неидеальной упругостью и неоднородностью.

Петрофизические величины, характеризующие упругие свойства горных пород, должны быть известны при решении следующих задач:

1. Выяснение строения и напряженного состояния земной коры и верхней мантии методами сейсмологии и глубинного сейсмического зондирования.
2. Исследование послойной зональности упругих свойств осадочных горных пород.
3. Тектоническое районирование.
4. Выяснение механизма распространения, поглощенных упругих волн в горных породах и их деформации при различных видах напряжений.
5. Изучение корреляционных связей между рассматриваемыми и другими петрофизическими и петрохимическими величинами.
6. Оценка пределов изменения величин, характеризующих упругие свойства различных типов и групп горных пород.
7. Разработка новых модификаций и повышение эффективности имеющихся методов сейсмической разведки и акустических методов исследования скважин.
8. Расчет и конструирование горных машин и механизмов.
9. Обоснование параметров взрывных работ.
10. Оценка устойчивости массивов пород, обнажаемых горными выработками.

Коэффициенты и модули упругости сухих образцов пород, определенные динамическими способами, изменяются в следующих пределах: модуль Юнга E ($< 0,3-22$) $\cdot 10^{10}$ Па, модуль сдвига G ($< 0,1-9$) $\cdot 10^{10}$ Па, модуль всестороннего сжатия K ($< 0,15-14$) $\cdot 10^{10}$ Па, коэффициент Пуассона $\sigma_{\text{п}}$ 0,08–0,42.

Малые значения модулей упругости E , G и K относятся к рыхлым,

большие – к плотным породам. Наименьшие величины σ_n установлены у преимущественно кварцевых пород (кварцитов и др.). Влажность пород снижает величины модулей и коэффициентов упругости.

Скорость v_p распространения упругих волн в горных породах изменяется от < 300 до $8\,000$ м/с и более. Скорости v_s и v_R варьируют в менее широких пределах. Коэффициенты α_p поглощения продольных волн при частоте 1 МГц для свежих магматических пород колеблются в пределах $0,8\text{--}5$ м⁻¹. Для выветрелых гранитов и граносиенитов α_p выше – от 11 до 14 м. Еще большие значения для тех же пород имеют коэффициенты поглощения поперечных волн – от 18 до 27 м⁻¹. В водонасыщенных песках при частоте 30–35 кГц $\alpha_p = 0,21$ м⁻¹, а при частоте 80–90 кГц достигает $1,5$ м⁻¹, в нефтенасыщенном песке при тех же частотах его величины соответственно равны 4,2 и 5,6 м⁻¹.

Величины, характеризующие упругие свойства горных пород, зависят от их состава, структуры, частоты упругих колебаний, температуры и давления.

Способы определения коэффициентов упругости E , σ_n , P , K , G подразделяются на статические и динамические.

В статических способах при помощи механических, оптико-механических, акустических, электромеханических и других тензометров определяются линейные перемещения или деформации при заданных напряжениях сжатия, реже растяжения, изгиба или кручения, по которым рассчитываются коэффициенты упругости.

В импульсных динамических способах для определения коэффициентов упругости в одном или двух образцах пород возбуждаются звуковые или ультразвуковые колебания и регистрируются две скорости распространения колебаний v_p и v_{pct} в неограниченной по размерам породе и в ее стержне; v_p и v_s – продольных и поперечных колебаний или v_p и v_R – продольных и поверхностных (релеевских) колебаний. По этим скоростям и

плотности сухой породы σ_s можно рассчитать основные коэффициенты упругости.

Для определения скорости упругих волн разработаны резонансные звуковые и импульсные ультразвуковые способы.

Резонансные способы продольных и изгибных колебаний, несмотря на их относительно простую аппаратуру, применяются гораздо реже импульсных, к которым относятся способы прозвучивания, продольного профилирования, кратких отражений и критических углов. Это объясняется большой точностью импульсных способов, наглядностью экспериментальных данных, легкой их расшифровкой; значительными пределами, в которых может быть изменена скорость, и возможностью применения этих способов в широком диапазоне давлений и температур.

Оценка скорости распространения ультразвуковых волн сводится к определению времени прохождения ультразвуковых импульсов через образцы заданной длины или к установлению времени запаздывания эхо- сигнала. Эти времена составляют от 10 до 100 мкс при длине пути до 1 м в породах и жидкостях.

Коэффициент α поглощения упругих волн в образцах горных пород определяется резонансными и импульсными способами. В резонансных способах используются стоячие волны. Эти способы достаточно точны и имеют относительно малогабаритную аппаратуру. Основной недостаток заключается в сложности перехода от линейных значений α для стержня к объемному коэффициенту поглощения и трудности изготовления стержней породы.

В импульсных способах используются бегущие волны. Из этих способов при обычных давлениях наибольшее распространение получили модификации прозвучивания под углом 45° к граням образца, продольного профилирования, многократных отражений

Методом прозвучивания скорость распространения волн в образцах

пород v_p , v_s и v_R определяется по данным измерений на образце длиной L (м), времени τ (с) пробега упругой ультразвуковой волны.

$$v_p = L/\tau. \quad (9.1)$$

Равенство v_p скорости распространения продольных упругих волн в безграничной среде (массиве) v_{pm} соблюдается только при $r/\lambda > 1$ (где r – радиус образца; λ – длина ультразвуковой волны), при $r/\lambda < 0,3$ измеряется скорость v_{pct} в стержне породы.

Разные отношения r/λ получают, применяя образцы различного диаметра или используя волны различной частоты так, чтобы r/λ было вначале меньше 0,3, а затем больше 1,25. Это позволяет определить v_{pm} и v_{pct} при изучении двух образцов одной и той же породы различного диаметра или одного образца с пьезодатчиками различной частоты.

Оборудование и материалы

1. Для определения времени пробега упругой ультразвуковой волны через образец породы используется стандартная аппаратура, содержащая прибор для прозвучивания образцов (либо специальный кернодержатель), генератор высоковольтных импульсов, комплект приборов, состоящий из усилителя, источников питания и др. К такой аппаратуре относятся ИПА, «Бетон», ИСУ-1, УЗИЗ и др., описание которых дано в специальной литературе.

2. Вакуумный эксикатор и насос или вакуумный шкаф, сосуд для насыщения образцов пород раствором, соответствующим пластовой воде.

3. Штангенциркуль или микрометр для измерения пути пробега упругой волны в образце (длина образца) L .

4. Химически чистые или чистые для анализа NaCl, KCl, CaCl₂ и др.

5. Глицерин, солидол и другие вещества для улучшения акустического контакта образца с датчиками кернодержателя.

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. Отбирают керны сцементированных пород без трещин и включений, если трещины не характерны для породы в целом, то они уменьшают амплитуду прошедшей волны и дают неточные времена первых вступлений.

2. Изготавливают из кернов образцы определенных размеров в виде кубов, параллелепипедов, цилиндров или произвольной формы. Размеры образца должны быть тем больше, чем выше скорость распространения упругих волн и больше их длина. Должно также соблюдаться определенное соотношение между поперечными размерами образца и длиной волны (см. выше).

3. Высушивают образцы и насыщают их под вакуумом минерализованной водой, аналогичной пластовой воде.

4. Включают установку в сеть и дают приборам прогреться.
5. Измеряют время задержки импульса τ_z в аппаратуре.
6. Устанавливают образец в прибор между излучателем и приемником.
7. Измеряют время τ прохождения волны через образец

$$T = \tau_{обр+з} - \tau_z. \quad (9.2)$$

8. Измеряют длину образца L (путь волны в образце).

9. Рассчитывают скорость v_p распространения упругой волны по формуле $v_p = L/\tau$.

Содержание отчета

Отчет формируем в соответствии с приложением А.

Исходные данные и результаты записываются по форме, приведенной в табл. 9.1.

Таблица 9.1

№ образца	Расстояние между датчиками, L , м	Задержка, с			Скорость, v_p , м/с
		$\tau_{обр+з}$	τ_z	τ	

Контрольные вопросы

1. Каким видам напряженного состояния отвечают модуль Юнга, коэффициент Пуассона и другие простые коэффициенты упругости и какими единицами они измеряются?
2. Какие типы упругих волн распространяются в горных породах?
3. Какой смысл имеет амплитудный коэффициент поглощения?
4. Для решения каких задач необходимы знания об упругих свойствах горных пород?
5. Назовите пределы изменения упругих волн и коэффициента поглощения в горных породах.
6. Какие способы определения коэффициентов упругости и скоростей упругих волн вы знаете?
7. В чем суть метода прозвучивания?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10

Определение тепловых свойств состояния методом мгновенного источника тепла

Тема (6): Теплофизические свойства горных пород.

Цель работы. Ознакомление с термическими параметрами и тепловыми свойствами горных пород. Освоение методики определения тепловых свойств способом мгновенного источника тепла. Определение теплопроводности и температуропроводности исследуемого материала путём постепенного подогрева.

Теоретическая часть

К наиболее важным величинам, позволяющим оценить тепловые свойства пород, относятся коэффициенты теплопроводности λ (тепловое удельное сопротивление $\xi = 1/\lambda$); удельных массовой c_m и объемной c_v теплоемкостей и температуропроводности a .

Величина λ , Вт/(м·К) является коэффициентом пропорциональности в уравнении

$$\frac{Q}{\tau} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{x} F,$$

связывающем количество теплоты Q (Дж), перенесенной в единицу времени τ (с) через плоский слой толщиной x (м), сечением F (м²) при градиенте температур $(T_1 - T_2)/x$ [К/м].

Удельные массовая c_m [Дж/(кг·К)] и объемная c_v [Дж/(м³·К)] теплоемкости характеризуют свойства пород поглощать тепловую энергию при теплообмене. Удельные теплоемкости горных пород невелики и варьируют в пределах $c_m = 1\,700\text{--}6\,300$ Дж/(кг·К), $c_v = (75\text{--}94) \cdot 10^8$ Дж/(м³·К).

Температуропроводность пород (м²/с)

$$a = \frac{\lambda}{c \delta} = \frac{1}{\xi c \delta} = \frac{1}{\xi c} = \frac{\lambda}{c}$$

является комплексным параметром и характеризует скорость изменения температуры пород вследствие поглощения или отдачи тепла.

Коэффициенты зависят от минерального состава пород, соотношения их фаз, температуры и давления. Коэффициент теплопроводности изменяется от 83,8 до 2933 Вт/(мК).

Сведения о тепловых свойствах горных пород необходимы при интерпретации результатов термических исследований скважин и геотермических исследований недр, терморазведке полезных ископаемых, проведении тепловых расчетов в нефтегазопромысловой практике, теоретических исследованиях, связанных с выбором рациональных методов эксплуатации, интенсификации добычи нефти и газа и проведении теплового воздействия на пласт, контроле за разработкой нефтяных и газовых месторождений и составлении проекта доразведки и доразработки месторождений нефти и газа и подсчете их запасов, выявлении характера зависимости тепловых характеристик от других физических свойств пород, температуры и давления и т. п.

Лабораторные способы определения тепловых свойств горных пород разнообразны и подразделяются на способы стационарного и нестационарного тепловых режимов. Способ нестационарного теплового

режима включает следующие модификации – регулярного квазистационарного и нестационарного тепловых полей.

Способы стационарного, регулярного и квазистационарного тепловых режимов имеют ряд недостатков. Они требуют применения сложной и громоздкой аппаратуры, больших размеров образцов (диаметром не менее 100–150 мм), значительной продолжительности единичного определения (несколько часов) и установления из единичного опыта только одного из тепловых коэффициентов.

Наиболее удобны для изучения тепловых свойств горных пород нестационарные способы (нерегулярного теплового поля). Они характеризуются быстротой проведения опыта (несколько минут), сравнительной простотой применяемых установок, возможностью определения из одного опыта коэффициентов λ , a , c_m (c_v).

Из большого числа модификаций способов нерегулярного теплового поля наилучшими для определения тепловых свойств горных пород являются зондовые. Используемые при этом тепловые датчики и приемники-зонды имеют различную форму: плоскую, цилиндрическую, сферическую, эллипсоидальную и др. Они могут работать в режиме остывания после сообщенного им мгновенно (или известной продолжительности) теплового импульса или при постоянной температуре.

Зондовые способы называются по форме зонда или по продолжительности действия источника тепловой энергии, например, способы плоского и сферического источника тепла, мгновенного, импульсного и постоянно действующего источника тепла и т. п.

С помощью рассматриваемого способа мгновенного источника тепла изучается распространение теплового потока от нагревателя – зонда, помещенного в испытуемый образец горной породы. Индикатором изменения теплового потока служит дифференциальная термопара, горячий спай которой находится в образце на некотором расстоянии x от нагревателя,

а холодный прижимается к торцу образца. Для более точного определения расстояния x из керна изготавливаются два цилиндра с одинаковыми диаметром и высотой и диск того же диаметра толщиной x .

Нагреватель и горячий спай термопары располагают между диском и цилиндром породы (рис. 10.1). Всю систему помещают в струбционный зажим для обеспечения плотного контакта между частями составного образца и устанавливают в термостат (кондуктометр). Нагреватель, включенный на короткий промежуток времени, выделяет тепло, которое распространяется по образцу породы. Температура образца породы вначале повышается, достигает максимума $t_{\max}$ за время $\tau_{\max}$, а затем понижается вследствие рассеяния тепла.

Интегрирование дифференциального уравнения теплопроводности с учетом граничных условий позволяет получить два равенства для определения температуропроводности и теплопроводности образца породы:

$$a_0 = x_2 / 2\tau_{\max} ; \quad (10.1)$$

$$\lambda^0 = \frac{0,121 Q_x}{F \tau_{\max}}. \quad (10.2)$$

Здесь нуль в индексе указывает на то, что a и λ определены с мгновенно действующим источником тепла.

Последняя формула получена с учетом соотношения

$$\frac{Q_x}{F} = -\lambda \operatorname{grad} t = -\lambda \frac{\partial(t_{\max} - t_{\text{вз}})}{\partial x},$$

где Q_x – количество тепла, выделенное нагревателем за время τ его работы и замеренное на расстоянии x от нагревателя; $t_{\text{вз}}$ температура воздуха.

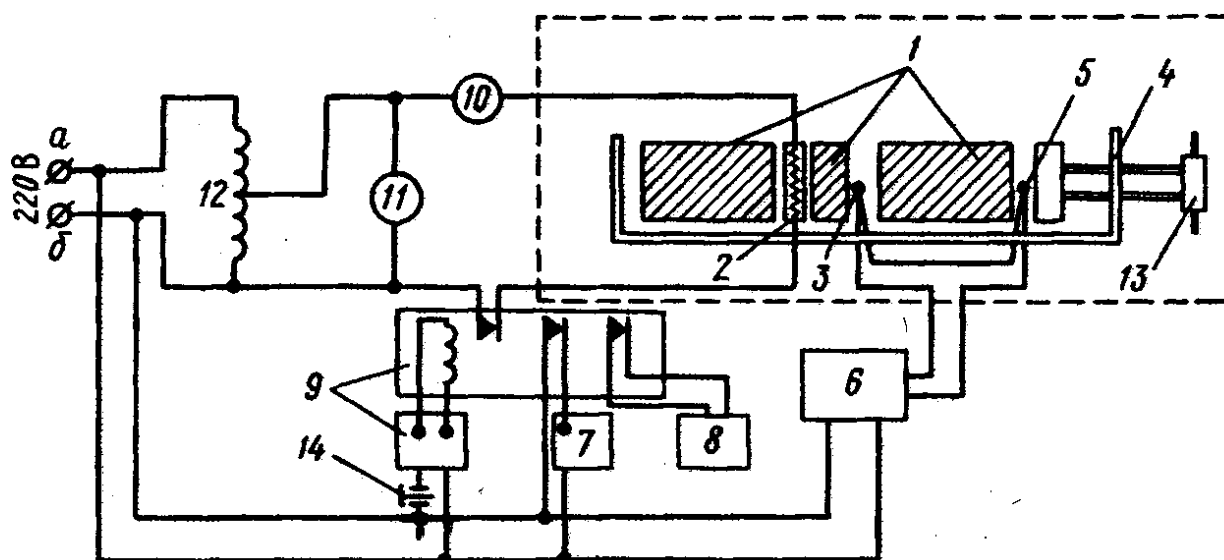


Рисунок 10.1 – Схема установки определения тепловых свойств горных пород

1–5 – кондуктометр, 6 – автоматический электронный потенциометр типа ЭПП-09; 7 – секундомер электромеханический; 8 – секундомер электронный; 9 – реле времени с магнитным пускателем, 10 – амперметр, 11 – вольтметр, 12 – автотрансформатор со стабилизатором напряжений, 13 – струбиционный захват; 14 – ключ

Максимальная температура $t_{\max}$, необходимая для расчета a и λ , определяется по максимальным показателям шкалы потенциометра ЭПП-09, отградуированной в градусах Цельсия. Количество выделенного нагревателем тепла Q_x пропорционально времени его работы τ , напряжению U на зажимах нагревательной нихромовой проволоки и силе проходящего по ней тока; $Q_x = IU_x$.

Время $\tau_{\max}$ устанавливается по показаниям второго секундомера, который включается автоматически одновременно с нагревателем и выключается вручную, когда температура достигает значения $t_{\max}$. Площадь сечения образца рассчитывают по его диаметру, измеренному штангенциркулем.

Коэффициенты теплоемкости c_m и c_v рассчитывают по формулам

$$c^m = \frac{\lambda}{a\delta_n}; \quad (10.3)$$

$$c = \frac{\lambda}{m \cdot a}. \quad (10.4)$$

Мгновенное действие нагревателя обычно приводит к большим погрешностям в определении количества выделившегося тепла Q_x , что заставляет включать нагреватель на некоторое время $\tau_k > \tau$.

Оборудование и материалы.

1. Исследуемый материал.
2. Нагреватель в виде пластины из меди площадью 50 см².
3. Секундомер.
4. Горелка (можно заменить зажигалкой).

Указания по технике безопасности

При работе в специализированной лаборатории необходимо соблюдать следующие правила:

1. Не входить в лабораторию без разрешения преподавателя (лаборанта).
2. Соблюдать технику безопасности работы с электроприборами и горючими веществами.
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. Подготовка используемых образцов

Ход эксперимента и правильность полученных результатов зависят от правильного выбора исследуемого материала (образца).

Для проведения исследований образцы необходимо привести в состояние, пригодное для эксперимента, а именно: отмыть от возможно присутствующих в порах солей, углеводов и других примесей. Это делается специальным способом, называемым экстрагированием.

Экстрагирование (экстракция) – это извлечение веществ из различных материалов при помощи растворителей (экстрагентов) в специальных приборах, называемых экстракторами. Необходимо учитывать правильную концентрацию растворяющих веществ в экстрактированном веществе, иначе исследуемый материал будет повреждён. 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.

2. Измерительная часть

Исследуемый образец (рисунок 10.2) помещаем на пластину сопротивлением 7 – 10 Ом из меди, нагревать его следует спустя некоторое время, чтобы выровнять температуру с окружающей средой. Только после этого начинаем постепенно нагревать. В процессе можно останавливаться на небольшие промежутки времени. Нагреваем в течение 7 – 10 минут. Одновременно с включением нагревателя включаем секундомер и фиксируем время.



Рисунок 10.2 – Исследуемый материал – кварц

Формула для расчета теплопроводности:

$$\lambda^0 = \frac{0,121Q}{S\Delta t_0 \Delta T_m} . \quad (10.5)$$

Формула для расчета температуропроводности:

$$\alpha_0 = \frac{d^2}{2\Delta t_0} , \quad (10.6)$$

где Q – количество тепла, выделенное нагревателем за время его работы, Дж;

S – площадь нагревателя, м^2 ;

Δt_0 – время работы нагревателя;

ΔT_m – максимальное повышение температуры относительно среды;

d – диаметр пластины.

Единица измерения теплопроводности $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$

Единица измерения температуропроводности $\text{м}^2/\text{с}$.

Пусть $Q = 2,5$ кДж.

Нуль в индексе указывает на то, что λ и α определены с мгновенно действующим источником тепла.

Теплоемкость c_0 рассчитывают по формуле:

$$c_0 = \frac{\lambda_0}{\alpha_0} \quad (10.7)$$

3. Обработка результатов измерений

После завершения проделанного опыта необходимо перейти к вычислению необходимых величин. Все величины обязательно должны быть переведены в систему СИ.

3.1. По формуле $a_0 = x^2 / 2\tau$ находится температуропроводность образца в данных условиях.

3.2. По формуле $\lambda_0 = Q_x / (F\tau_{\max})$ вычисляется теплопроводность.

3.3. Определяется теплоёмкость в виде отношения теплопроводности к температуропроводности $c_m = \frac{\lambda}{a}$.

Опыт проводится на нескольких образцах, выданных преподавателем. Составляется таблица, в которую заносятся вычисленные значения.

Содержание отчета

Отчет формируем в соответствии с приложением А.

Контрольные вопросы

1. Что такое теплопроводность и от каких параметров она зависит?
2. Что такое температуропроводность и от каких параметров она зависит?
3. Что такое экстрагирование?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 11

Определение гамма-активности пород

Тема (7): Ядерно-физические свойства.

Цель работы: Освоение методики анализа дискретных совокупностей геологических данных, полученных в условиях малых значений вероятности события.

Теоретическая часть

При решении геологических задач используется еще одно дискретное распределение – *распределение Пуассона*. Особенностью этого распределения является возможность количественной оценки вероятности события при малых значениях p (при $p \rightarrow 0$ биномиальное распределение теряет смысл).

Вероятность таких событий оценивается по асимптотической формуле Пуассона.

$$P(k\lambda) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}, \quad (5.1)$$

где $P(k\lambda)$ – вероятность;

λ – единственный параметр распределения, вычисляемый по формуле

$$\lambda = h_{cp} = \sigma^2 = Np. \quad (5.2)$$

Последнее обстоятельство является характерной чертой этого распределения: $\frac{h_c}{p} = \sigma^2$ совокупность может быть описана формулой

Пуассона.

Для проверки соответствия исходной совокупности распределению Пуассона широко применяются критерий Пирсона.

Критерий Пирсона χ^2 представляет собой сумму квадратов отклонений эмпирических частот от теоретических, отнесенную к теоретическим частотам ряда распределений:

$$\chi^2 = \sum_{j=0}^m \frac{(f_j - F_j)^2}{F_j},$$

где χ^2 – значение критерия;

f_j – число элементов совокупности, попавших в j -й интервал;

F_j – теоретическое число элементов совокупности, соответствующее выбранного закону распределения;

n – число интервалов.

Распределение χ^2 табулировано.

Рассчитанное значение χ^2 сравнивается с табличным для заданного уровня значимости α и числа степеней свободы $K=s-2$, где s – число различных групп выборки, обычно совпадающее с количество наблюдавшихся различных вариантов реализации случайного события в одном испытании, т.е. $s=r+1$.

Пример. Рассмотрим особенности распределения Пуассона на примере задачи определения оптимального объема шлиховых проб.

Поиски коренных месторождений золота, алмазов, касситерита, тантало-ниобатов и других полезных ископаемых осуществляют по минералогическим ореолам рассеяния в рыхлых отложениях шлиховым методом. Шлихи представляют собой концентрат тяжелых минералов,

полученный при промывке материала проб. Объем проб может изменяться от первых кубических дециметров до нескольких кубических метров. Опоискование пробами малого размера требует относительно небольших затрат времени, однако может приводить к "пропуску" ореола, особенно при низкой концентрации полезного минерала в опробуемых отложениях. Более надежны в этом смысле пробы большого объема, отбор и обработка которых, однако, требует повышенных затрат.

Для оценки зависимости между объемом пробы, концентрацией полезного минерала в ореоле и вероятностью попадания в пробу того или иного количества его зерен (кристаллов) проведено экспериментальное опробование, результаты которого представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Количество зерен монацита в экспериментальных пробах

№ п/п	Объем проб, дм ³			№ п/п	Объем проб, дм ³			№ п/п	Объем проб, дм ³		
	2	5	10		2	5	10		2	5	10
1	0	0	0	15	0	0	0	29	0	1	0
2	0	0	0	16	0	0	2	30	0	1	2
3	0	0	0	17	0	0	0	31	1	0	0
4	0	0	0	18	0	0	1	32	0	0	0
5	0	0	0	19	1	0	1	33	0	0	1
6	0	1	0	20	0	0	0	34	0	3	0
7	0	0	2	21	0	2	0	35	1	0	0
8	1	0	1	22	0	1	1	36	0	0	1
9	0	1	1	23	0	0	0	37	0	0	0
10	0	0	1	24	0	0	0	38	0	0	1
11	0	1	0	25	1	0	1	39	0	0	0
12	0	0	0	26	0	0	1	40	0	0	1
13	0	0	1	27	0	0	1				
14	2	0	0	28	0	0	0				

Опробование проводилось пробами объемом 2, 5 и 10 дм³ соосно (т.е. в одних и тех же точках). В пробах определялось число зерен минерала, что и отражено в табл. 5.1.

Требуется определить объем проб, гарантирующий обнаружение ореола единичной пробой с вероятностью 99 %.

Решение задачи начинается с выбора статистической модели, описывающей распределение дискретных величин. Проверку закона распределения будем осуществлять для данных опробования пробами одного объема.

Оценку математического ожидания вычисляют с учетом всех результатов опробования. Подсчитываем общее число зерен монацита на участке Q . В данном случае $Q=38$.

Определяется суммарный объем проб по участку:

$$V_{\text{общ}}=40 \cdot (2+5+10)=680 \text{ дм}^2.$$

Вычисляется средняя концентрация (в шт/дм³) зерен монацита на участке:

$$q = Q/V_{\text{общ}},$$

$$q=38/680=0,056.$$

Математическое ожидание (λ) числа зерен в пробах определенного объема $V_{\text{пр}}$ находят из выражения

$$\lambda = qV_{\text{пр}},$$

$$\lambda = 0,056 * 2 = 0,112 \text{ шт.}$$

Для использования параметров теоретического распределения при обосновании объема шлиховых проб необходимо убедиться в соответствии эмпирических данных теоретической модели. Оно оценивается с помощью критерия Пирсона χ^2 через сопоставления эмпирических и теоретических частот распределения в каждом i -классе случайной величины ($i=0, 1, 2, \dots, x, m$).

Теоретическую вероятность попадания в пробу того или иного числа зерен минерала (x) находят следующим образом:

$$P(x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!}.$$

Например, для первого участка вероятность «пропуска» ореола ($x=0$) по пробам объемом 2 дм² составляет

$$P(0) = \frac{0,112^0}{e^{-0,112} \cdot 0!} = 0,894$$

Ожидаемую частоту встречи проб с x числом зерен минерала по выборке в N определяют по формуле

$$N_x = NP(x).$$

Эмпирическую частоту встречаемости проб с x числом зерен фиксируют по выборке; данные заносят в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Эмпирическая частота встречаемости проб с x числом зерен

<i>Число зерен минерала в пробе, x</i>	<i>Эмпирическая частота встречаемости, N_x^*</i>	<i>$P(x)$</i>	<i>Ожидаемая частота встречаемости, N_x</i>
0	34	0,894044	35,76177
1	5	0,100133	4,005318
2	1	0,005607	0,224298

Значения критерия χ^2 , используемого для проверки гипотезы о соответствии эмпирического распределения теоретическому, вычисляем по формуле

$$\chi^2 = \sum_{x=0}^m \frac{(N_x - N_x^*)^2}{N_x},$$

где $m=0, 1, 2, \dots$ классы (значения) величины x .

В результате вычислений получаем $\chi^2=3,016467$.

Вычисленное значение величины χ^2 сравниваем со значением, определяемым по таблице (см. приложение И), для заданного уровня значимости и числа степеней свободы K .

Число степеней свободы равно числу классов минус 2, т. е. $K=1$; за уровень значимости принимается 0,05. Таким образом, табличное $\chi^2=3,841$.

Если вычисленное значение χ^2 меньше табличного, то гипотеза о соответствии распределения эмпирических данных закону Пуассона можно принять.

Для нашего примера $3,016467 < 3,841$, т. е. гипотеза о соответствии эмпирических данных закону Пуассона считается доказанной.

Принятие гипотезы позволяет использовать соотношение между вероятностью фиксации в пробе x числа зерен полезного минерала и величиной математического ожидания (λ) для определения оптимального объема пробы.

При заданной вероятности «пропуска» ореола ($x=0$) можно вычислить соответствующую ей величину математического ожидания события. Если ореол должен быть зафиксирован с вероятностью 99 % (0,99), то вероятность его пропуска составит $1-0,99=0,01$.

Отсюда

$$P(x) = \frac{\lambda^0 e^{-\lambda}}{0!} = e^{-\lambda} = 0,01,$$

$$\lambda = \frac{\lg 0,01}{-\lg e} = \frac{-2}{-0,4343} = 4,6.$$

Итак, объем проб должен выбираться с таким расчетом, чтобы в него при данной концентрации полезного минерала попадало в среднем не менее 4,6 зерен. В зависимости от концентрации (c) объем проб $V=\lambda/c$.

Например, при $c=0,1$ шт/дм³ и $\lambda=4,6$ необходимо отбирать пробы объемом не менее 46 дм³.

Зависимость между степенью концентрации и объемом проб для заданной вероятности обнаружения ореола отобразим графически (рисунок 5.1).

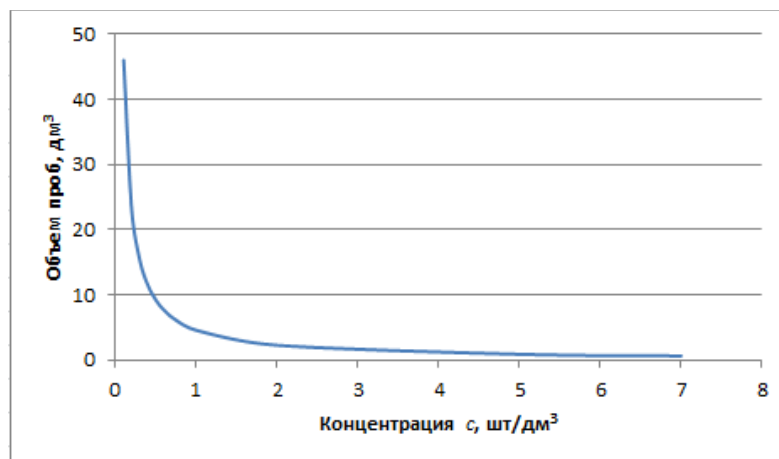


Рисунок 5.1

Выбор достаточного объема проб осуществляется по графику через ожидаемый уровень концентрации полезного минерала в ореоле.

Оборудование и материалы

Работа выполняется в компьютерном классе. Системные требования – Windows 2000, XP, Microsoft Office 10.

Исходными данными для выполнения работы являются совокупности геолого-геофизических данных, приведённые в Приложении Г.

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

Работу выполняем, следуя последовательности вычислений в приведенном примере.

Производим проверку принадлежности исходной совокупности к распределению Пуассона.

Определяем суммарный объем проб $V_{\text{общ}}$ на участке.

Вычисляем среднюю концентрацию зерен монацита на участке q .

Определяем математическое ожидание λ числа зерен в пробах определенного объема.

Содержание отчета

Отчет оформляется в соответствии с требованиями, приведенными в приложении А.

Контрольные вопросы

1. Дайте характеристику условиям применения распределения Пуассона.
2. Как определяются теоретические и фактические частоты в случае использования распределения Пуассона?
3. Какие геологические задачи можно решить, используя распределение Пуассона?

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.

Методические указания

по организации и проведению самостоятельной работы
по дисциплине

ФИЗИКА ГОРНЫХ ПОРОД

Специальность
Специализация

21.05.02 Прикладная геология
Геология месторождений нефти и газа

Методические рекомендации предназначены для студентов специальности-

21.05.02. Прикладная геология, специализация -Геология месторождений нефти и газа.

Цель методических рекомендаций:

1. Методическое сопровождение процесса введения и реализации требований федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (далее ФГОС ВО), помощь при разработке рабочих учебных программ дисциплин образовательной программы (далее ОП).

2. Создания в образовательном учреждении учебно-методического обеспечения образовательного процесса.

Методические рекомендации определяют сущность самостоятельной работы студентов в вузе, ее назначение, планирование, формы организации и виды контроля.

1. Нормативное обеспечение самостоятельной работы в ФГОС ВО
2. Назначение и виды самостоятельной работы студентов
3. Контроль самостоятельной работы студентов преподавателями

1. Нормативное обеспечение самостоятельной работы в ФГОС ВО

1.1. Требования к условиям реализации ОП:

- требования к обязательному минимуму содержания образовательной программы подготовки бакалавра, к условиям ее реализации и срокам ее освоения определяются настоящим ФГОС ВО;

- в программу специалитета входит «Дисциплины (модули)», который включает дисциплины (модули), относящиеся к обязательной части программы и дисциплины (модули), относящиеся к части, формируемой участниками образовательных отношений. Дисциплины (модули), относящиеся к обязательной части программы специалитета, являются обязательными для освоения обучающимся вне зависимости от направленности (профиля) программы, которую он осваивает. Набор дисциплин (модулей), относящихся к обязательной части программы специалитета, вуз определяет самостоятельно в объеме, установленном настоящим ФГОС ВО. Дисциплины (модули), относящиеся к части, формируемой участниками образовательных отношений определяют направленность (профиль) программы. Набор дисциплин (модулей), относящихся к части, формируемой участниками образовательных отношений, определяет вуз самостоятельно в объеме, установленном настоящим ФГОС ВО. После выбора обучающимся направленности (профиля) программы, набор соответствующих дисциплин (модулей) становится обязательным для освоения обучающимся;

- максимальный объем учебной нагрузки студента устанавливается 54 часа в неделю, включая все виды аудиторной и внеаудиторной (самостоятельной) учебной работы.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся должны быть оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду организации. Библиотека вуза должна иметь достаточное количество современных учебников и учебных пособий по всем дисциплинам и постоянно восполняться научной литературой и периодическими изданиями нефтегазового профиля.

Объем времени, отведенный на внеаудиторную самостоятельную работу, находит отражение:

- в рабочем учебном плане,
- в рабочих программах учебных дисциплин с распределением по разделам или конкретным темам.

2. Назначение и виды самостоятельной работы студентов

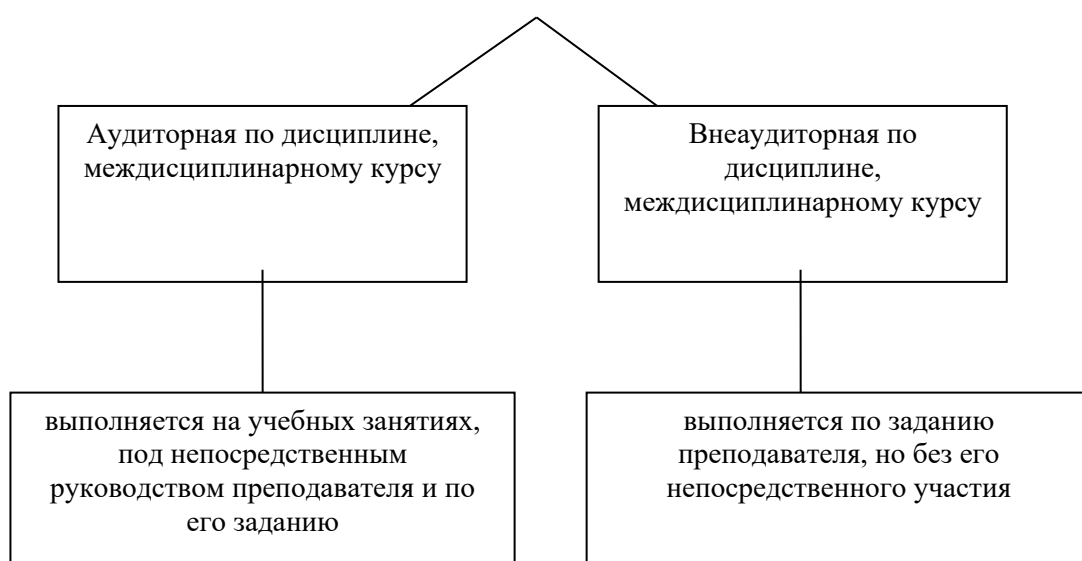
Самостоятельная работа проводится с целью:

- систематизации и закрепления полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубления и расширения теоретических знаний;
- формирования умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;

- развития познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности, организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, совершенствованию и самоорганизации;
- формирования практических (общеучебных и профессиональных) умений и навыков;
- развитию исследовательских умений.

Внеаудиторная самостоятельная работа – планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия.

В учебном процессе образовательного учреждения выделяются два вида самостоятельной работы:



3. Контроль самостоятельной работы студентов преподавателями

Контроль самостоятельной работы студентов предусматривает:

- соотнесение содержания контроля с целями обучения;
- объективность контроля;
- валидность контроля (соответствие предъявляемых заданий тому, что предполагается проверить);
- дифференциацию контрольно-измерительных материалов.

Формы контроля самостоятельной работы

1. Просмотр и проверка выполнения самостоятельной работы преподавателем.
2. Самопроверка, взаимопроверка выполненного задания в группе.
3. Обсуждение результатов выполненной работы на занятии.
4. Тестирование.
5. Письменный опрос.
6. Устный опрос.
7. Индивидуальное собеседование.
8. Коллоквиум.

9. Отчет о проделанной работе.
10. Защита рефератов или курсовой работы.
11. Творческий конкурс.
12. Интернет-конференции.
13. Контрольная работа.

Критерии оценки результатов самостоятельной работы

Критериями оценок результатов внеаудиторной самостоятельной работы студента являются:

- уровень освоения студентами учебного материала;
- умения студента использовать теоретические знания при выполнении практических задач;
- сформированность общеучебных умений;
- умения студента активно использовать электронные образовательные ресурсы, находить требующуюся информацию, изучать ее и применять на практике;
- обоснованность и четкость изложения ответа;
- оформление материала в соответствии с требованиями;
- умение ориентироваться в потоке информации, выделять главное;
- умение четко сформулировать проблему, предложив ее решение, критически оценить решение и его последствия;
- умение показать, проанализировать альтернативные возможности, варианты действий;
- умение сформировать свою позицию, оценку и аргументировать ее.

Содержание внеаудиторной самостоятельной деятельности студентов

Методические указания для студентов по выполнению самостоятельной работы:

1. Подготовка к лекциям;
2. Подготовка к практическим занятиям;
- 3 Самостоятельное изучение учебной литературы.

Литература

Основная литература:

1. 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

1. 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
2. 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
3. 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
4. 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
5. 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
6. 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

- 1 <http://ansatte.uit.no/webgeology/> сайт Университета Тромсё (University of Tromsø), Норвегия
- 2 <http://oilcraft.ru/load/2> - нефтегазовый портал
- 3 <http://www.geokniga.org/inboxes> - Геологический портал GeoKniga