



Федеральное агентство по образованию  
ГОУ ВПО  
"Уральский государственный горный  
университет"

Л. Н. Лукашевич, О. В. Садырева, Л. К. Катанова

**ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ  
ЯВЛЕНИЙ В ГОРНОМ ДЕЛЕ**

**Часть 2  
Электричество, магнетизм**

*Учебно-методическое пособие*  
к лекциям по дисциплине «Физика»  
для преподавателей кафедры физики  
и студентов всех специальностей

Екатеринбург  
2010

Федеральное агентство по образованию  
ГОУ ВПО  
"Уральский государственный горный университет"

ОДОБРЕНО  
Методической комиссией  
Института геологии и геофизики  
“ “\_\_\_\_\_ 2010 г.  
Председатель комиссии  
\_\_\_\_\_проф. С. Н. Тагильцев

Л. Н. Лукашевич, О. В. Садырева, Л. К. Катанова

## ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

Часть 2  
Электричество, магнетизм

*Учебно-методическое пособие*  
к лекциям по дисциплине «Физика»  
для преподавателей кафедры физики  
и студентов всех специальностей

Рецензент: *Е. В. Коророва*, ст. преподаватель кафедры литологии и геологии горючих ископаемых УГГУ

Учебно-методическое пособие рассмотрено на заседании кафедры физики 11 февраля 2010 г. (протокол № 41) и рекомендовано для издания в УГГУ.

**Лукашевич Л. Н., Садырева О. В., Катанова Л. К.**

Л 84 ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ГОРНОМ ДЕЛЕ. Часть 2. Электричество, магнетизм: учебно-методическое пособие к лекциям по дисциплине «Физика» для преподавателей кафедры физики и студентов всех специальностей / Л. Н. Лукашевич, О. В. Садырева, Л. К. Катанова. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. – 31 с.

В пособии приведены примеры применения физических явлений в горном деле по темам, соответствующим разделам курса физики «Электростатика, постоянный ток, магнетизм, электромагнитные колебания и волны». Рассмотрены основы методов разведочной геофизики (электроразведки и магниторазведки), обогащения полезных ископаемых, примеры применения пьезоэффекта, электролиза, вихревых токов, электромагнитных колебаний в горном деле.

Приведены примеры использования электрических, магнитных свойств горных пород при их разрушении.

Все разделы составлены совместно коллективом авторов.

© Лукашевич Л. Н., Садырева О. В.,  
Катанова Л. К., 2010  
© Уральский государственный  
горный университет, 2010

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА.....	4
1.1. Очистка воздуха от пыли.....	4
1.2. Диэлектрическая проницаемость пород и минералов.....	5
1.3. Электрическое обогащение полезных ископаемых.....	7
1.4. Применение пьезоэффекта.....	9
2. ПОСТОЯННЫЙ ТОК.....	10
2.1. Удельное электрическое сопротивление.....	10
2.2. Электрические методы разведки.....	11
2.3. Использование электролиза.....	12
2.4. Метод электромоделирования при расчете вентиляционных сетей....	13
2.5. Электрические методы разрушения горных пород.....	14
2.6. Применение электродвигателей в горном деле.....	14
3. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ.....	16
3.1. Магнитные свойства пород и минералов.....	16
3.2. Магниторазведка.....	17
3.3. Аэромагнитная съемка при поисках полезных ископаемых.....	19
3.4. Магнитный картаж.....	20
3.5. Магнитное обогащение.....	20
3.6. Магнитные способы разрушения пород.....	21
3.7. Использование МГД-генераторов.....	22
3.8. Электромагнитный расходомер.....	22
3.9. Использование вихревых токов.....	23
3.10. Электромагнитные датчики.....	24
4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ.....	24
4.1. Электромагнитные колебания в разведке полезных ископаемых.....	24
4.2. Метод радиоволнового просвечивания.....	25
4.3. Метод радиоинтроскопии.....	26
4.4. Интерференционный метод.....	27
4.5. Применение токов (полей) высокой частоты.....	27
4.6. Метод теплового пробоя для дробления негабарита.....	28
4.7. Резонаторный метод.....	28
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	29

# 1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

## 1.1. Очистка воздуха от пыли

Наиболее важная часть применения электростатики – отделение твердых частиц от газа.

*Пыль* – это твердые частицы размером менее 0,5 мм, содержащиеся в исходной руде и продуктах обогащения, а также в воздухе в виде взвесей, образующихся при дроблении и сухом измельчении полезных ископаемых, электросепарации, сушке, в местах пересыпки сухих продуктов и т. п. [1]. Помимо пыли, в атмосферу могут попадать отработанные дымовые газы, вредные химические соединения и т. п.

Находящаяся в атмосферном воздухе пыль оказывает отрицательное воздействие на организм человека, находящегося как внутри, так и вне производственного помещения, наносит ущерб почве, воде, растительности. Помимо указанных негативных воздействий, мелкодисперсная пыль некоторых минералов может образовывать взрывоопасные смеси с воздухом.

Наличие пыли в продуктах обогащения приводит к потерям ценных компонентов при транспортировке концентратов в открытых емкостях, загрязнению окружающей среды, опасности возникновения взрывов и пожаров при хранении запыленных продуктов и их последующей переработке.

Во всех электростатических установках для улавливания пыли из газа предусмотрено два этапа: *электризация и собирание*. При этом используют ионизаторы, состоящие из тонких проводов, стержней с острыми краями, решеток с остриями и т. п. При изучении свойств кварцевой пыли было установлено, что частицы пыли приобретают электрический заряд во время движения в потоке воздуха в результате трения о воздух и стойки труб [2].

В промышленных служебных помещениях производят искусственную ионизацию с помощью ионных пылеосадителей для очистки воздуха от пыли. При кратковременной ионизации воздуха величина заряда на частицах пыли увеличивается в десятки раз. Появляются крупные частицы, состоящие из тысяч мелких, которые быстро осаждаются.

В подземных горных выработках необходимо регулярно производить орошение стенок и кровли выработок при бурении и взрывных работах, отбитой руды в местах погрузки и ее транспортирования. Исследованиями установлено, что в пыли, образующейся при бурении шпуров, преобладают положительные заряды, а в пыли, образующейся при взрывании, транспортировании и погрузке руды – отрицательные. Пыль, возникающая при бурении, приобретает мощный заряд, равный десяткам тысяч элементарных зарядов, что способствует эффективному улавливанию пыли при правильном применении электрических полей.

## **1.2. Диэлектрическая проницаемость пород и минералов**

*Диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$*  любого вещества называется безразмерный коэффициент, показывающий, во сколько раз напряженность электрического поля в вакууме отличается от напряженности поля в этом веществе.

Диэлектрическая проницаемость большинства породообразующих минералов колеблется от 3 до 10, редко достигает значения 25. Значения  $\epsilon$  некоторых минералов и горных пород приведены в табл. 1.1.

**Диэлектрическая проницаемость некоторых минералов и горных пород**

Материал	$\epsilon$	Материал	$\epsilon$	
Алмаз	5,7	Песчаник сухой	4,6 ÷ 5,9	
Сера	4,1	Песчаник, насыщенный водой, %	7,4	
Нефть	2,0 ÷ 3,0			15
Кварц	3,5 ÷ 4,5			28
Гранит	4,5 ÷ 5,4	Сфалерит	6,9 ÷ 12,1	
Гипс	4,2 ÷ 7,9	Базальт	18,8	
Полевой шпат	4,5 ÷ 7,2	Пирит	34 ÷ 81	
Доломит	6,3 ÷ 8,2	Графит	81	
Кальцит	7,5 ÷ 8,7	Рутил	80 ÷ 173	

В любой горной породе имеются свободные и связанные заряды. Связанные заряды при наличии электрического поля смещаются, создавая на поверхности породы неуравновешенные заряды, собственное поле которых направлено против внешнего и ослабляет его. Время поляризации и ее величина зависят от подвижности атомов. Наибольшей поляризуемостью обладают пирит, халькопирит и графит [4].

Диэлектрическая проницаемость воды равна 81. Отсюда следует, что  $\epsilon$  горных пород существенно зависит от их влажности. Для пород с относительно малой влажностью  $\epsilon$  измеряется несколькими единицами, полностью насыщенные водой сильно пористые породы имеют диэлектрическую проницаемость 14–40.

Основным методом определения диэлектрической проницаемости образцов пород является метод плоского конденсатора. Из образца породы вырезается пластинка, которая в качестве диэлектрика помещается между электродами плоского конденсатора, затем измеряется емкость такого конденсатора.

### 1.3. Электрическое обогащение полезных ископаемых

Электрический метод обогащения основан на различном поведении в электрическом поле частиц, отличающихся электрическими свойствами: *диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$* , *удельной проводимостью*, *трибоэлектрическим эффектом* (способностью приобретать заряд за счет трения), *пироэлектрическим эффектом* (способностью приобретать заряд при нагревании) и пр. [1]

Основными электрическими силами, действующими на частицу, являются кулоновская, сила зеркального отображения, пондеромоторная. Наряду с указанными силами, на характер движения минеральных частиц в электрическом поле оказывают влияние силы тяжести, центробежные, сопротивления и др.

Кулоновская сила

$$F_э = E q,$$

где  $E$  – напряженность электрического поля;

$q$  – заряд частицы.

Руду измельчают в тонкий порошок, он попадает между вертикальными пластинами, находящимися под высоким напряжением. В зависимости от электрических свойств, размера и формы минеральные частицы движутся по различным траекториям и могут быть разделены.

В зависимости от знака заряда частицы и полярности электрода частица может либо притягиваться к электроду, либо отталкиваться от него. Сила зеркального отображения  $F_3$  проявляется, если частица находится вблизи электрода, и стремится удержать частицу на электроде или вблизи него.

$$F_3 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon d^2} ,$$

где  $d$  – расстояние от частицы до электрода;

$\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды.

В неоднородном электрическом поле на частицу действует пондеромоторная сила  $F_{\Pi}$ , выталкивающая частицу в участки поля с меньшей напряженностью.

Диэлектрическая сепарация может быть осуществлена на металлической конвейерной ленте, представляющей собой один из электродов. Вторые электроды установлены над лентой. Двигаясь в жидкости с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{ж}$ , минералы, у которых проницаемость  $\epsilon_{м} > \epsilon_{ж}$ , притягиваются к ленте и разгружаются в конце ее в приемник, а минералы, для которых  $\epsilon_{м} < \epsilon_{ж}$ , выталкиваются из поля. Если зерно минерала не движется, то  $\epsilon_{м} = \epsilon_{ж}$  [5]. (Здесь  $\epsilon_{м}$  – диэлектрическая проницаемость минерала,  $\epsilon_{ж}$  – диэлектрическая проницаемость жидкости).

Необходимым условием успешной электрической сепарации является сообщение разделяемым компонентам электрических зарядов, которые должны быть максимально различны по своей величине. Одним из способов зарядки частиц является зарядка трением – *трибозарядка*. Она может происходить двумя путями: при контакте и трении частиц материала между собой, в результате чего материалы приобретают противоположные заряды, а также в результате контакта частиц с поверхностью, вещество которой выбрано так, чтобы разделяемые компоненты при контакте с этой поверхностью получали заряды, различные по величине и, желательно, по знаку. Величину и знак приобретаемого заряда можно регулировать условиями нагрева материала и окружающей среды, влажностью среды, реагентной обработкой [6].

#### 1.4. Применение пьезоэффекта

В горном деле широкое применение находят прямой и обратный пьезоэлектрические эффекты. Известно более тысячи соединений, которым присущи пьезоэлектрические свойства. Пьезоэффект изучен в сотнях минералов, в том числе в кварце, турмалине, сфалерите, нефелине. Этот эффект наблюдается в горных породах, содержащих минералы-пьезоэлектрики, в гранитах, гнейсах и др. Пьезоэффект используется для получения информации о горных породах в геофизических методах разведки полезных ископаемых [4].

На свойстве некоторых горных пород поляризоваться под действием упругих волн основан пьезоэлектрический метод разведки. Он применяется в наземном, скважинном и шахтном вариантах при поиске, разведке и эксплуатации месторождений полезных ископаемых, связанных с кварцевыми и пегматитовыми образованиями. Это месторождения золота, горного хрусталя, цветных камней, полиметаллов.

При проведении морской сейсморазведки десятки пьезоприемников заключают в специальную сейсмокосу, которую помещают вдоль трассы корабля неглубоко под поверхностью воды во взвешенном состоянии. Последовательно производят небольшие взрывы посредством специальной металлической камеры с газовой взрывной смесью и принимают упругие колебания. Электрические сигналы, поступающие от пьезосейсмоприемников, записывают быстродействующей регистрирующей установкой на борту корабля и затем подвергают тщательному анализу с применением вычислительной техники.

На основании данных сейсморазведки добывают на Каспийском шельфе миллионы тонн нефти из морских скважин, пробуренных в указанных геофизиками местах. Под толщами вод океанов и морей обнаружены залежи каменного угля, железных руд, фосфоритов, ценнейшие рудные россыпи с большим содержанием редких металлов и другие ископаемые [7].

Обратный пьезоэффект используется в генераторах ультразвука. Ультразвуковая аппаратура помогает в разведке полезных ископаемых, исследовании горных пород, в контроле и автоматизации производственных измерений, при обогащении полезных ископаемых, каротаже буровых скважин и во многих других случаях [8].

## 2. ПОСТОЯННЫЙ ТОК

### 2.1. Удельное электрическое сопротивление

Удельное электрическое сопротивление минералов и горных пород изменяется в широких пределах – от  $10^{-6}$  до  $10^{20}$  Ом·м. Самое низкое удельное сопротивление имеют самородные металлы: платина, золото, серебро, медь. У графита, железного колчедана оно меняется в пределах  $10^{-6} \div 10^{-2}$  Ом·м. Наиболее распространенные минералы – кварц, полевые шпаты, слюда, каменная соль – имеют удельное сопротивление  $10^{10} \div 10^{14}$  Ом·м. Они являются хорошими изоляторами. У нефти удельное сопротивление от  $2 \cdot 10^9$  до  $10^{16}$  Ом·м, у каменного угля – от  $10^2$  до  $10^6$  Ом·м. Эти и другие значения удельного сопротивления  $\rho$  приводятся в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Удельное электрическое сопротивление некоторых минералов и горных пород

Материал	$\rho$ , Ом·м	Материал	$\rho$ , Ом·м
Графит	$10^{-6} \div 10^{-4}$	Гранит	$10^6 \div 10^8$
Пирит	$10^{-4} \div 10^{-1}$	Мрамор	$10^6 \div 10^7$
Уголь каменный	$10^2 \div 10^6$	Кварцит	$10^6 \div 10^8$
Нефть	$10^9 \div 10^{16}$	Глина	$10^3 \div 10^5$
Кварц	$10^{10} \div 10^{14}$	Песчаник	$10^5 \div 10^6$
Слюда	$10^{14} \div 10^{15}$	Известняк	$10^5 \div 10^7$

Таким образом, удельное электрическое сопротивление минералов и пород различается более чем на 10 порядков и является одним из самых информативных физических свойств при изучении глубоких недр Земли. Следует отметить, что удельное электрическое сопротивление пород зави-

сит еще и от температуры. Сопротивление мерзлых пород возрастает в десятки раз, так как лед является диэлектриком.

Определение удельного сопротивления горных пород производится мостовым методом.

Горные породы в условиях естественного залегания содержат в поровом пространстве токопроводящие минерализованные или пресные воды, иногда нефть и газы. Поэтому удельное сопротивление пород зависит не только от материала их твердой фазы, но и жидкостей и газов. Это обстоятельство позволяет по данным измерения удельного сопротивления выделять в разрезах скважин коллекторы, содержащие воду, нефть и газ, определять их пористость и нефтегазонасыщенность, проводить подсчеты запасов нефти и газа [9].

Весьма низкие удельные сопротивления многих рудных минералов и очень высокие удельные сопротивления у природных солей дают возможность выявлять наличие этих ископаемых в разрезах скважин.

Наличие трещин резко изменяет физические свойства массива пород. В зависимости от соотношения количества воды или воздуха, находящихся в трещинах, электрическое сопротивление падает или растет. Трещиноватость пород вызывает их электрическую анизотропию: неодинаковую электропроводность в разных направлениях [10]. Отсюда возникает возможность использования кругового зондирования для определения господствующего простирания трещин и изменения их интенсивности на различной глубине (геоэлектрические методы изучения трещиноватости).

## **2.2. Электрические методы разведки**

Физической основой методов электроразведки являются, во-первых, зависимость электромагнитного поля от электромагнитных свойств среды, в которой это поле существует или искусственно создается, во-вторых, различие электрических свойств горных пород и руд, слагающих геологические разрезы.

Горные породы в зависимости от их состава, структуры и условий залегания обладают различными электромагнитными свойствами: удельным сопротивлением  $\rho$ , диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , поляризуемостью  $\eta$ , магнитной проницаемостью  $\mu$  и др. Таким образом, реальный геологический разрез можно рассматривать как часть пространства, заполненную средами с различными электрическими свойствами.

Способ изучения геоэлектрического разреза, принятый в электроразведке, заключается в том, что на земной поверхности, в горных выработках или скважинах наблюдают естественные или искусственно созданные электромагнитные поля.

По характеру решаемых геологических задач в электроразведке выделяются *три основных направления* ее применения [10]:

*структурное направление* – изучение глубинного строения земной коры, решение регионально-тектонических задач, поиски и разведка структур, благоприятных для скопления нефти и газа, а также исследование геологических структур каменноугольных бассейнов и месторождений;

*рудное направление* – поиски и разведка месторождения руд черных, цветных и других металлов, включая изучение геологического строения рудных районов;

*инженерно-геологическое направление* – изучение оснований под инженерные сооружения, поиски структур, благоприятных для водонакопления, решение мелиоративных задач.

### **2.3. Использование электролиза**

Процесс электролитической добычи металлов из недр Земли состоит в предварительном растворении руды и последующем электролизе, осуществляемом с помощью электродов, погруженных в раствор через скважины. Ионную проводимость пород можно использовать для выделения или концентрации вблизи электродов полезных компонентов без предварительного растворения минералов. Ионной проводимостью обладают стекла, галоид-

ные соединения, сульфаты, соли щелочных, щелочноземельных и легко ионизируемых тяжелых металлов. Большинство этих металлов имеют униполярную проводимость, то есть в электрическом поле перемещаются либо катионы, либо анионы. Процесс ионного переноса вещества медленный, поэтому для получения желаемого результата прохождение тока через массив должно быть длительным [4].

Путем электролиза с помощью гальванической ванны на заводах получают чистые металлы: медь, алюминий и другие.

#### **2.4. Метод электромоделирования при расчете вентиляционных сетей**

Метод электромоделирования основан на аналогии, которая имеется между законами движения воздуха по горным выработкам и уравнениями, характеризующими распределение токов и напряжений в сети. Этим методом можно рассчитывать сложные вентиляционные сети, представляющие систему соединенных между собой подземных выработок и обеспечивающие направленное движение воздуха для проветривания. Источниками тяги являются шахтные вентиляторы, вентиляционные регуляторы и сооружения, пути утечек воздуха [11].

Аналогия проводится с электрическими цепями, включающими параллельное, последовательное, диагональное, параллельно-последовательное соединение проводов; источникам тяги соответствуют источники тока в электрической сети.

Метод электромоделирования применяется также при расчетах компрессорных станций, при решении некоторых задач, связанных с закачкой воды в пласт и других случаях.

## **2.5. Электрические методы разрушения горных пород**

Разрушение пород плавлением применяется при бурении шпуров и скважин. В породе преобразуется электрическая энергия в тепловую, порода нагревается джоулевым теплом тока. Подвод напряжения может осуществляться с помощью тугоплавких или охлаждаемых изнутри электродов. Недостатком метода является трудность удаления расплава [4].

В электрогидравлических дробилках разрушение горных пород происходит под действием высоковольтного разряда в жидкости. Этот метод применяется при бурении, дроблении и измельчении пород. Разрушение пород при электрогидравлическом эффекте идет за счет следующих явлений: сверхвысоких гидравлических ударных волн, явлений кавитации, ультразвукового излучения, резонансных явлений. В опытах по дроблению кристаллов алмаза с вмещающими породами было достигнуто полное измельчение вмещающих пород без каких-либо повреждений алмаза [12].

Для взрывания в шахтах, опасных по пыли и газу, применяются специальные конденсаторные взрывные машинки. Электровзрывная сеть подключается на тысячные доли секунды к конденсатору, который заряжается от источника тока. В качестве измерительных приборов при электровзрывании применяются амперметры, вольтметры, омметры; для измерения сопротивлений электродетонаторов, проводников и электровзрывных сетей используются взрывные мостики.

## **2.6. Применение электродвигателей в горном деле**

В качестве двигателей для привода буровых установок используются электродвигатели и двигатели внутреннего сгорания (дизельные и карбюраторные).

Современные установки для разведочного бурения преимущественно получают привод от электродвигателей. Но при работе в районах, где отсутствует электроэнергия, а также на самоходных буровых установках предусматривается привод от двигателей внутреннего сгорания – *дизелей*. Карбюраторные двигатели применяются при работе в труднодоступных и труднопроходимых районах.

В зависимости от вида двигателей, установленных на локомотивах, последние делятся на электровозы, воздуховозы, дизелевозы и инерционные локомотивы – *гировозы*. Гировозы находят применение в подземных условиях, заменяя аккумуляторные электровозы на вспомогательной откатке [13].

Рудничные электровозы оборудуют тяговыми двигателями постоянного тока. Аккумуляторные электровозы питаются током от батареи, установленной на электровозе, зарядку, замену и ремонт аккумуляторных батарей производят в зарядных камерах.

Контактные электровозы по сравнению с аккумуляторными дешевле, проще по конструкции, имеют большую скорость движения, меньше расходуют электроэнергию при откатке. Недостатком является искрообразование между токоприемником и контактным проводом, между колесами и рельсами, вследствие чего применение их в шахтах, опасных по газу и пыли, ограничено.

Аккумуляторные электровозы предназначены для транспортирования вагонеток с полезными ископаемыми, породой, вспомогательными материалами по главным откаточным выработкам шахт, опасных по газу и пыли.

Гировозы с электроприводом разгона маховика используются для транспортирования по подготовительным и участковым вентиляционным выработкам шахт, опасных по пыли и газу.

### 3. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

#### 3.1. Магнитные свойства пород и минералов

Магнитные свойства одних и тех же минералов различных месторождений могут изменяться в очень широких пределах. Кроме того, магнитные свойства сильномагнитных минералов одного и того же месторождения зависят от формы и размера зерен, от напряженности магнитного поля и ряда других факторов [4].

По магнитным свойствам все минералы и горные породы принято классифицировать на сильномагнитные, слабомагнитные и немагнитные. К сильным, или ферромагнитным, относятся железосодержащие минералы с удельной магнитной восприимчивостью не менее  $3 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/кг, извлекаемые на сепараторах со слабым полем напряженностью  $\sim 120$  кА/м (магнетит). К слабомагнитным относится большая группа минералов с восприимчивостью от  $10^{-7}$  до  $15 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/кг, которые извлекаются на сепараторах с сильным полем  $(8 \div 16) \cdot 10^5$  А/м (ильменит, сидерит, гематит). К немагнитным относятся минералы, обладающие удельной магнитной восприимчивостью со значениями менее  $15 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/кг и не извлекаемые методом магнитной сепарации в поле до  $16 \cdot 10^5$  А/м (кварц, пирит и др.).

Минералы делят на три группы: диа-, пара- и ферромагнитные, примеры таких минералов приводятся в табл. 3.1.

Таблица 3.1

**Пределы изменения магнитной проницаемости  $\mu$   
и объемной магнитной восприимчивости  $\chi$  минералов, пород**

Тип магнетика	$\mu$	$\chi \cdot 10^6$	Минералы и породы
Диамагнетик	$0,999836 \div 1,0$	$-200 \div 0$	Апатит, плагиоклаз, вода, уголь, галит, кальцит, кварц
Парамагнетик	$1,0 \div 1,0064$	$0 \div 10^4$	Воздух, доломит, пироксен, хромит
Ферромагнетик	$1,0064 \div 5$	$10^4 \div 4 \cdot 10^6$	$\gamma$ -гематит, лимонит, магнетит, пирротин

Горные породы представляют собой смеси минералов и в зависимости от преобладания того или иного минерала условно могут быть отнесены к диа-, пара- или ферромагнитным.

Большинство минералов диа- или парамагнитны. Их магнитная восприимчивость определяется химическим составом, структурой решеток, типом кристаллической связи. Ковалентные соединения обладают очень слабым магнетизмом, восприимчивость ионных соединений меняется в широких пределах и связана с валентностью ионов.

*Магнитная восприимчивость  $\chi$*  – один из важнейших параметров горных пород, характеризующих их магнитные свойства. Она является мерой их способности приобретать собственный магнитный момент под действием внешнего магнитного поля. С изменением минерального состава горных пород меняется и магнитная восприимчивость, измерение которой используется для структурно-геологического картирования и для определения содержания железа в руде [12].

Магнитное поле оказывает заметное воздействие лишь на ферромагнитные горные породы. Для них существенны и магнитные потери за счет индукционных вихревых токов и процесса перемагничивания (потери на гистерезис). Первые имеют большие значения при высоких температурах, когда снижается электрическое сопротивление пород; потери на гистерезис выше точки Кюри практически отсутствуют.

Электромагнитное поле существенно меняет механические свойства пород: уменьшается модуль Юнга, предел прочности при сжатии и пр.

### **3.2. Магниторазведка**

Это один из методов разведочной геофизики, основанный на изучении магнитного поля Земли и магнитных свойств горных пород. Магниторазведка особенно ценна при поисках и разведке слепых, не вскрытых эрозией месторождений и при изучении закрытых районов. Ее проводят совместно с грави-, электро- и сейсморазведкой.

Земля, как космическое тело определенного внутреннего строения, генерирует постоянное магнитное поле, называемое нормальным или первичным. Многие горные породы и руды обладают магнитными свойствами и способны под воздействием этого поля приобретать намагниченность и создавать аномальные или вторичные магнитные поля [9].

Для их выявления производят специальные магнитометрические съемки, измеряют вертикальную и горизонтальную составляющие напряженности магнитного поля Земли. По выявленным аномалиям можно обнаружить намагниченные тела, определить их форму, размеры и глубину залегания, получить сведения об особенностях геологического строения исследуемого участка без бурения скважин [14].

Для создания магнитного поля в магниторазведке используют постоянные магниты или электрический ток. Для получения однородного поля служат *кольца Гельмгольца*. Они представляют собой две плоские тонкие катушки одинакового радиуса; плоскости их параллельны, центры расположены на общей нормали к плоскостям, расстояние между ними близко к их радиусу. По катушкам пропускают в одном направлении равные по величине токи. Магнитное поле в промежутке между кольцами близко к однородному, его используют для определения намагниченности и магнитной восприимчивости горных пород [15].

Для ферромагнитных горных пород характерно уменьшение остаточной намагниченности  $J_{ост}$  и коэрцитивной силы  $H_c$  с повышением температуры, их отношение имеет максимум при 500–600 °С.

Изменение магнитной проницаемости руд с изменением температуры используется в методах обнаружения участков массива с повышенной температурой. У антиферромагнетиков (пирролюзит,  $\alpha$ -гематит, алабандин, сидерит) наблюдается резкое увеличение магнитной проницаемости при температуре фазового перехода за счет изменения направления магнитных моментов подрешеток, ориентирующихся параллельно.

Породы обретают магнитные свойства в процессе формирования. В случае магматических пород (базальтов) магнитные свойства у ферромагнетиков появляются при охлаждении ниже точки Кюри (от 300 до 600 °С). Они сильно намагничиваются в том геомагнитном поле, которое существует во время застывания лавы. Их остаточная намагниченность весьма устойчива и сохраняет направление независимо от последующих изменений магнитного поля Земли. Остаточная намагниченность осадочных пород в сто раз слабее, чем у магматических.

Магниторазведку применяют при поисках таких полезных ископаемых, как полиметаллические, сульфидные, медно-никелевые, марганцевые руды, бокситы, россыпные месторождения золота, платины, вольфрама, молибдена и др. Это оказывается возможным благодаря тому, что в рудах в качестве примесей часто содержатся ферромагнитные минералы или же они сами обладают повышенной магнитной восприимчивостью. Хорошие результаты получают иногда при разведке кимберлитовых трубок, к которым приурочены месторождения алмазов [16].

### **3.3. Аэромагнитная съемка при поисках полезных ископаемых**

Для измерения магнитного поля на поверхности Земли, на море и в воздухе используют магнитометры. Действие одного из видов магнитометров основано на вращении рамки в магнитном поле Земли.

Магнитометр, установленный на самолете, автоматически записывает на ленту показания, а геофизик, находящийся в самолете, отмечает на карте выявленные аномалии [17].

При помощи аэромагнитной съемки производят поиск нефтяных и газовых месторождений, выявляют крупные тектонические нарушения и границы их распространения, определяют глубину залегания пород, создающих магнитные аномалии, с последующим использованием вычисленных глубин для построения структурно-тектонических схем.

### **3.4. Магнитный каротаж**

Это метод определения магнитной восприимчивости и проницаемости горных пород непосредственно в скважинах. Магнитометрия скважин проводится с целью определения зон промышленного скопления магнитных железных руд и их качества [9].

Другим методом магнитометрии скважин является метод измерения напряженности земного магнитного поля. По данным определения полной или вертикальной составляющей напряженности магнитного поля Земли в скважине изучают породы, выявляют рудные тела, не только пересеченные скважиной, но и расположенные на достаточном удалении от нее.

### **3.5. Магнитное обогащение**

Магнитное обогащение основано на различии магнитных свойств компонентов руд черных, редких и цветных металлов. Сущность магнитного метода обогащения заключается в воздействии на частицы руды магнитной и механической сил, в результате которого частицы с разными магнитными свойствами приобретают различные траектории движения. Перемещаясь по своим траекториям, магнитные и немагнитные частицы выводятся в виде отдельных продуктов, отличающихся не только по магнитным свойствам, но и по вещественному составу [14].

В рабочей зоне магнитного сепаратора создается неоднородное магнитное поле, обуславливающее появление сил, действующих на частицы. В зависимости от магнитной восприимчивости рудных частиц их разделение осуществляется в слабых или сильных полях.

На обогатительных фабриках применяются *МГД-сепараторы*, состоящие из электромагнита, кюветы из диэлектрика, металлических электродов, подключенных к клеммам источника тока. В результате действия электро-

магнитных полей жидкие электролиты и растворы солей искусственно утяжеляются и при погружении в них минеральных смесей происходит разделение частиц по плотности [18].

Зависимость магнитной проницаемости породы от содержания в ней ферромагнитных минералов используется для контроля качества измельченной магнетитовой руды на конвейерной ленте и в пульпопроводах. Одним датчиком измеряют магнитную восприимчивость эталона, другим – пробы. Сравнивая эти данные, находят объемное содержание полезного компонента. Предварительный обжиг некоторых руд приводит к появлению ферромагнитных компонентов, что позволяет применять магнитные методы определения состава и для руд немагнитных в исходном состоянии [14].

Магнитные методы широко применяются для обогащения руд черных металлов, при доводке концентратов редких и цветных металлов, для удаления магнитных примесей из кварцевых песков и др. материалов [1].

### **3.6. Магнитные способы разрушения пород**

Эти способы основаны на разогреве пород высокочастотными магнитными полями. Хорошо проводящие породы и породы ферромагнитные нагреваются в переменных магнитных полях. Например, воздействие на породу ( $\mu = 3$ ,  $\rho = 10^4$  Ом·м) магнитным полем частотой 0,2 МГц и напряженностью  $7 \cdot 10^4$  А/м в течение двух минут приводит к ее растрескиванию. Глубина эффективного прогрева составляет 6–8 см [14].

Изменение прочности и упругих характеристик минералов под действием высокочастотного электромагнитного поля позволяет использовать метод электромагнитной обработки как предварительный при измельчении полезных ископаемых в мельницах, что повышает эффективность измельчения.

### 3.7. Использование МГД-генераторов

МГД-генераторы применяются в сейсморазведке для электромагнитного зондирования земной коры. Электрический ток, возникающий в МГД-генераторе, пропускают через электроды, опущенные в Землю. Источник тока создает электрическое поле, распределение которого зависит от геологического строения участка земной коры и удельного сопротивления слагающих его горных пород [18].

Экспериментально обнаружено, что электропроводность пород в очаге землетрясения начинает меняться задолго до самого события. Это позволяет использовать МГД-генераторы для прогноза землетрясений. Чтобы охватить наблюдениями все сейсмоопасные районы нашей страны, достаточно примерно пятидесяти МГД-установок.

### 3.8. Электромагнитный расходомер

Принцип действия электромагнитных расходомеров основан на изме-

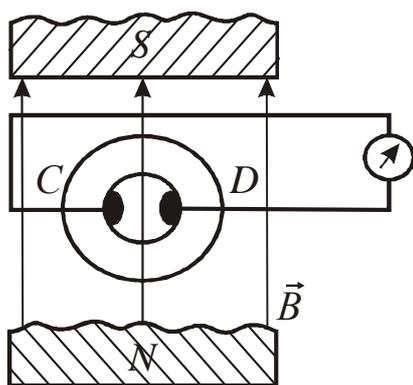


Рис. 3.1. Схема расходомера

рению эдс индукции, возникающей на электродах  $C$  и  $D$  при движении проводящей жидкости в магнитном поле (рис. 3.1). Участок трубопровода, изготовленный из немагнитного материала и покрытый изнутри электрической изоляцией, расположен между полюсами магнита  $N$  и  $S$ . Поле направлено перпендикулярно оси трубы [19].

Основное требование, предъявляемое к таким расходомерам, - это линейная зависимость выходного сигнала от объемного расхода жидкости. С помощью электромагнитных расходомеров измеряют расход щелочей, кислот, растворов солей, различных суспензий, пульп на обогатительных фаб-

риках. Расходомеры больших диаметров (0,4÷4 м) применяются для измерения скоростей при транспортировке угольных, рудных, глинистых и песчаных пульп в гидротранспорте, строительстве и др. Измеряемые скорости могут составлять от сотых долей до десятков метров в секунду.

### **3.9. Использование вихревых токов**

Магнитные (индукционные) способы разрушения ферромагнитных горных пород основаны на поглощении магнитной энергии горными породами, при этом в породе возникают термические напряжения, приводящие к ее разрушению. Выделение тепла в магнетиках, находящихся в высокочастотном поле, обусловлено вихревыми токами.

Технологические процессы с применением индукционного нагрева используются при ремонте оборудования в подземных условиях и на поверхности шахт, для повышения выносливости элементов бурильной колонны. В поверхностном слое деталей в результате электромагнитной индукции возникают вихревые токи, обуславливающие большие скорости нагрева в зоне, подлежащей упрочнению [20].

С помощью вихревых токов изучается удельная электропроводность горных пород при индукционном каротаже скважин. В скважину опускают индукционный зонд, состоящий из генераторной и измерительной катушек. На генераторную катушку подается ток частотой 20–50 кГц, магнитное поле которого создает в окружающем пространстве вихревые токи, распространяющиеся по окружностям с центром по оси скважины. В свою очередь, магнитное поле вихревых токов индуцирует эдс в измерительной катушке. Этот метод позволяет установить наличие проводящих рудных тел по данным, полученным в ходе измерений.

### **3.10. Электромагнитные датчики**

На обогатительных фабриках для контроля качества продуктов обогащения применяют электромагнитный метод, основанный на измерении магнитной проницаемости пульпы. При этом используются индуктивные и индукционные датчики [19].

Действие индуктивного датчика основано на зависимости индуктивности от магнитного сопротивления системы. При прохождении через полость катушки пульпы, содержащей ферромагнитный материал, изменяется магнитное сопротивление системы и ток, протекающий по этой катушке. По величине изменения тока судят о содержании магнитного материала в пульпе.

Действие индукционного датчика основано на изменении взаимной индуктивности двух систем обмоток при изменении магнитного потока в одной из них, при этом в другой обмотке возникает эдс. С помощью градуированного датчика-расходомера можно контролировать расход пульпы в некоторых точках обогатительной фабрики.

На изменении индуктивности катушек с изменением плотности магнетитовой или ферросилициевой суспензии основан электромагнитный метод измерения плотности. Суспензия проходит через катушку индуктивности, смонтированную на трубопроводе. Индуктивное сопротивление катушки меняется при изменении плотности суспензии.

## **4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ**

### **4.1. Электромагнитные колебания в разведке полезных ископаемых**

Законы распространения переменного электромагнитного поля удалось раскрыть на основе уравнений Максвелла, в частности, уменьшение интенсивности поля с расстоянием и поглощение энергии в случае прохож-

дения волны через горные породы. Часть энергии поля при этом переходит в тепло, передаваемое непосредственно породам [7].

Уменьшение амплитуды плоской электромагнитной волны за счет поглощения энергии проводящими горными породами происходит по экспоненциальному закону и описывается уравнением

$$A = A_0 e^{-br},$$

где  $r$  – расстояние между источником колебаний и пунктом, в котором наблюдается поле с амплитудой  $A$ ;

$A_0$  – амплитуда поля в источнике колебаний;

$b$  – коэффициент поглощения.

Коэффициент поглощения тем больше, чем меньше удельное сопротивление  $\rho$  и чем больше частота  $\nu$  электромагнитного поля. Чем больше частота, тем на меньшем расстоянии поглотится энергия поля при прохождении пород. Практически глубина разведки ограничивается величиной, равной половине длины волны в данной породе.

При разведке полезных ископаемых кроме удельного сопротивления пород учитывают их диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$ . Необходимость этого вытекает из уравнений Максвелла, в которые введены токи смещения, пропорциональные  $\nu$  и  $\epsilon$ . На основе этих уравнений геофизики рассчитывают схему движения зарядов и плотность тока  $j$  на разных глубинах для типичных случаев сочетания расположения питающих электродов и слоев пород с разными  $\rho$  [21].

## **4.2. Метод радиоволнового просвечивания**

Для разведки полезных ископаемых геофизики используют многие особенности распространения и возбуждения электромагнитного поля в горных породах. В последние годы большое внимание уделяется развитию радио-

волновых методов разведки в диапазоне частот от десятков до сотен тысяч и миллионов герц.

Один из методов заключается в просвечивании массивов пород в горных выработках и между скважинами. Он основан на изучении степени поглощения энергий электромагнитных волн при прохождении их через просвечиваемую толщу горных пород и обнаружении в пространстве между выработками или скважинами рудных тел, обладающих хорошей электропроводностью. Явление отражения волн от рудных тел позволяет определять рудные месторождения между скважинами [7].

С помощью радиоволн проводят подземную радиолокацию недр Земли: в одну скважину опускают портативную радиостанцию, в другую – приемник. Если между скважинами нет рудных тел, то приемник будет принимать радиосигнал, который фиксируется измерительным устройством. При наличии руды радиосигнал отразится от ее поверхности и до приемника не дойдет. Между скважинами будет «радиотень».

Пронизывание пластов Земли радиоволнами используют при поисках нефтяных и газовых месторождений, рудных и угольных месторождений, при поиске пресных вод.

### **4.3. Метод радиоинтроскопии**

Радиоволны, излучаемые или рассеиваемые телами, в том числе горными породами, минералами, несут информацию о внутренней структуре и физическом состоянии этих тел.

Устройство, с помощью которого можно собрать и расшифровать полученную радиоинформацию, называется *радиоинтроскопом*. Он не только формирует радиоизображение того или иного тела (минерала), но и преобразует его в видимое изображение [22].

Для радиоволн прозрачны почти все неметаллические тела, что позволяет использовать радиоинтроскопы для выявления структурных неоднородностей, остаточных напряжений, скрытых дефектов и т. п.

#### **4.4. Интерференционный метод**

Этот метод основан на приеме радиоволн, излучаемых с земной поверхности и отраженных от границы раздела между двумя горными породами, обладающими разными электрическими свойствами.

Прямые и отраженные волны интерферируют в приемнике. Результат интерференции зависит от глубины отражающей поверхности [4].

В зависимости от фаз прямой и отраженной волн интенсивность приема будет усиливаться или ослабляться. Изменяя частоту волн, можно выявить на определенных частотах максимумы и минимумы.

Интерференционный метод можно применять тогда, когда верхние слои пород имеют высокое электрическое сопротивление.

#### **4.5. Применение токов (полей) высокой частоты**

В поле высокочастотных токов можно разрушать магнитные руды. Индукционный виток, создающий магнитное поле, располагают на поверхности ферромагнитной породы и перемещают по карьере специальным тягачом. Порода под индуктором нагревается и разрушается [23].

Токами высокой частоты можно дробить такие крепкие породы, как гранит, диабаз, известняк, производить оттаивание мерзлых грунтов.

Токи высокой частоты используют при обогащении полезных ископаемых, поскольку нагрев породы ими является избирательным; одни компоненты нагреваются сильнее, чем другие, трещины проходят по их границам, а не беспорядочно.

Электромагнитные поля с частотой более 300 МГц применяют в радиоволновых методах разрушения пород. При этом не происходит непосредственного контакта с разрушаемой породой. Электромагнитная волна специальной антенной-излучателем направляется в массив в виде сконцентрированного луча, в породе возникают термические напряжения, способные ее разрушить [24].

#### **4.6. Метод теплового пробоя для дробления негабарита**

В зависимости от удельного сопротивления породы для инициирования в ней теплового пробоя используют напряжение промышленной или высокой частоты. Источники энергии промышленной частоты применяют для разрушения пород, содержащих магнетит, сульфиды и другие полупроводящие минералы с малым начальным сопротивлением. Генераторы высокой частоты, используемые для теплового пробоя, работают на частотах от сотен килогерц до единиц мегагерц [12].

#### **4.7. Резонаторный метод**

Это метод разрушения негабаритов горных пород-диэлектриков с помощью стоячих волн. Разрушаемый объем породы окружается токопроводящими стенками, внутри которых возбуждаются колебания. При этом образуются стоячие волны, в пучностях которых концентрируется энергия и преобразуется из электромагнитной в тепловую. Внутренние породоразрушающие очаги располагаются друг от друга на расстоянии, равном половине длины волны излучения. Энергоемкость разрушения снижается в три-пять раз по сравнению с известными методами.

Резонаторный метод исключает потери энергии за счет рассеяния ее в свободном пространстве, предотвращает вредное воздействие излучений на организм человека [25].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Комлев С. Г.* Основы обогащения полезных ископаемых. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2007. 121 с.
2. *Киселев Н. Д.* Очистка воздуха от пыли методом искусственной ионизации. М.: Машиностроение, 1966. 72 с.
3. *Справочник по борьбе с пылью в горнодобывающей промышленности* / под ред. А. С. Кузьмича. М.: Недра, 1982. 240 с.
4. *Ржевский В. В., Новик Г. Я.* Основы физики горных пород: учебник для вузов. М.: Недра, 1984. 359 с.
5. *Физические основы электрической сепарации* / под ред. В. М. Ревнивцева. М.: Недра, 1983. 271 с.
6. *Месеняшин А. И.* Электрическая сепарация в сильных полях. М.: Недра, 1978. 175 с.
7. *Иванов А. Г.* Физика в разведке земных недр. М.: Недра, 1971. 200 с.
8. *Кондрашев С. Н.* Пьезоэлектрический метод разведки. М.: Недра, 1980. 181 с.
9. *Дахнов В. Н.* К познанию недр Земли: геофизические методы исследования скважин. М.: Недра, 1968. 144 с.
10. *Якубовский Ю. В., Ляхов Л. Л.* Электроразведка. М.: Недра, 1988. 395 с.
11. *Комаров В. Б.* Рудничная вентиляция. М.: Недра, 1969. 416 с.
12. *Мисник Ю. М., Хоминский В. А.* Разрушение горных пород электрофизическим методом. Л: ЛГИ, 1984. 93 с.
13. *Виравов А. А.* Шахтные электровозы и гировозы. М.: Недра, 1972. 263 с.
14. *Вонсовский С. В.* Магнетизм. М.: Наука, 1984. 208 с.
15. *Гринкевич Г. И.* Магниторазведка. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 1998. 288 с.
16. *Геофизические методы исследования* / под ред. В. К. Хмелевского. М.: Недра, 1988. 396 с.
17. *Темко С. В., Соловьев Г. А., Милантьев В. П.* Физика раскрывает тайны Земли. М.: Просвещение, 1976. 128 с.
18. *МГД-генераторы в сейсморазведке* // Наука и человечество, 1981. М.: Знание, 1981. С. 346–348.
19. *Шерклиф Дж.* Теория электромагнитного измерения расхода. М.: Мир, 1965. 207 с.

20. *Заворотько Ю. М.* Геофизические методы исследования скважин. М.: Недра, 1983. 208 с.
21. *Денисов С. Б.* Высокочастотные электромагнитные методы исследования нефтяных и газовых скважин. М.: Недра, 1986. 142 с.
22. *Меркулов А. П.* Магнитные поля-трусеники. М.: Машиностроение, 1978. 184 с.
23. *Арт Э. И.* Применение токов высокой частоты в горном деле. М.: Недра, 1967. 312 с.
24. *Бабат Г. И.* Токи высокой частоты. М.: Знание, 1956. 47 с.
25. *Аузин А. К.* Электроразведка. М.: Недра, 1977. 134 с.

Учебное издание

Лидия Николаевна Лукашевич  
Ольга Владимировна Садырева  
Людмила Кузьминична Катанова

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ  
ЯВЛЕНИЙ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

Часть 2

Электричество, магнетизм

*Учебно-методическое пособие*  
к лекциям по дисциплине «Физика»  
для преподавателей кафедры физики и  
студентов всех специальностей

Редактор С. Ф. Правдин

Корректурa кафедры физики  
Л. Н. Лукашевич  
Компьютерная верстка  
О. В. Садырева

Подписано в печать

Бумага писчая. Формат бумаги 60×84 1/16. Печать на ризографе.

Гарнитура Times New Roman

Печ. л. 1,9. Уч.-изд.л. 1,66. Тираж 100 экз. Заказ №

Издательство УГГУ

620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.

Уральский государственный горный университет

Отпечатано с оригинал-макета

в лаборатории множительной техники УГГУ