



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 1**  
**Механика, молекулярная физика  
и термодинамика**

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

Екатеринбург  
2009

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

ОДОБРЕНО  
Методической комиссией  
Института геологии и геофизики  
“ “\_\_\_\_\_ 2009 г.  
Председатель комиссии  
\_\_\_\_\_ проф. С. Н. Тагильцев

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

## ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

Часть 1

Механика, молекулярная физика  
и термодинамика

*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 УГГУ

Учебно-методическое пособие рассмотрено на заседании кафедры физики 9 октября 2009 г. (протокол № 38) 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 1. Механика, молекулярная физика и термодинамика: 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, 2009. – 35 с.

В пособии приведены примеры применения физических явлений в горном деле по темам, соответствующим разделам курса физики "Механика, молекулярная физика и термодинамика". Рассмотрены основы методов разведочной геофизики (гравиразведки и сейсморазведки), обогащения полезных ископаемых, примеры применения законов сохранения, механических колебаний в горном деле.

Приведены примеры использования тепловых свойств горных пород при их разрушении, говорится о роли процессов переноса в горных массивах.

Учебно-методическое пособие предназначено для преподавателей физики и студентов всех специальностей учебных заведений горного профиля. Все разделы составлены совместно коллективом ниже перечисленных авторов.

© Лукашевич Л. Н., Садырева О. В.,  
Катанова Л. К., 2009  
© Уральский государственный  
горный университет, 2009

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. МЕХАНИКА.....	6
1.1. Гравиразведка.....	6
1.2. Движение пород под действием силы тяжести.....	10
1.3. Гравитационное обогащение.....	11
1.4. Применение законов сохранения в горном деле.....	12
1.5. Примеры использования вращательного движения в горном деле.....	14
1.6. Вибрации в горной технике.....	16
1.7. Сейсморазведка.....	17
1.8. Ультразвуки и инфразвуки в горном деле.....	20
2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА.....	22
2.1. Броуновское движение.....	22
2.2. Барометрическое распределение.....	23
2.3. Температура горных пород и ее измерение.....	23
2.4. Изопроцессы в горном деле.....	24
2.5. Роль процессов переноса в горных массивах.....	25
2.6. Примеры использования теплоты в горном деле.....	28
2.7. Эффект Джоуля–Томсона. Сжиженные газы.....	29
2.8. Применение поверхностно–активных веществ.....	30
2.9. Роль явлений капиллярности в горном деле.....	31
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	33

## ВВЕДЕНИЕ

Техника и физика находятся в непрерывной связи друг с другом. Развитие техники дает физикам в руки более совершенные, более точные приборы и новые методы исследования, позволяющие проникнуть в глубину вещества. Влияние техники и науки друг на друга взаимно.

Открытие законов квантовой электроники и разработка основ нелинейной оптики привели к созданию лазеров, совершивших переворот во многих областях техники. В горном деле их применяют с целью измерения расстояний и точного задания направлений подземных горных выработок (маркшейдерская шахтная служба), но уже очевидно, что в обозримом будущем они будут применяться и для разрушения горных пород, для проведения горных выработок в массивах пород самой высокой прочности.

При изучении свойств и состояния горных пород в их естественном залегании широко используются различные физические явления: электрические, магнитные, радиоволновые, ультразвуковые, сейсмоакустические, радиоактивные, тепловые и др. Разработка и внедрение новых (забойных и массивных) методов наряду с применением уже созданных является важной задачей горной науки. Основные достоинства физических методов - отсутствие разрушающих и повреждающих воздействий на испытуемый образец или массив, возможность неограниченного повторения испытаний, быстрота их проведения и практически "мгновенное" получение результатов [1].

Разработан ряд физических методов обогащения полезных ископаемых, в которых разделение минералов осуществляется специальными машинами, аппаратами, основанными на действии сил тяжести, электрических, магнитных сил, на различных физико-химических явлениях,

например, на разной степени слипания рудных минеральных частиц с воздушными пузырьками.

Эффективность действия этих машин и аппаратов связана с различием физических свойств минералов, входящих в состав руд, углей и пустых пород.

Успехи горной науки и промышленности сегодня определяют богатство, могущество и процветание страны. Добываемые горняками полезные ископаемые – основа всех отраслей промышленности и будущего материально-технического прогресса в целом.

Большие задачи, стоящие перед горняками, требуют общих усилий ученых, инженеров, техников, рабочих-горняков всех специальностей и профессий.

Горная наука, как и наука вообще, всегда в развитии, в непрерывном обновлении.

Совсем недавно возникла новая наука - *геотехнология*, которая разрабатывает методы бесшахтной добычи и подземного обогащения полезных ископаемых. Воздействуя на месторождение разнообразными растворами, кислотами, щелочами или носителями тепла, извлекают полезные элементы из руд прямо в недрах. Разнообразны средства интенсификации самих геотехнологических процессов – воздействие ультразвуком, токами высокой частоты, применение поверхностно-активных добавок, другие физические, химические и биологические факторы.

Соединение достижений физической химии, минералогии, теории твердого тела привело к возникновению гидрометаллургии. Гидрометаллургия – это наиболее современные и перспективные способы извлечения из руд и россыпей золота, платины, редкоземельных и радиоактивных элементов.

Одно из важнейших направлений развития горного дела – физика горных пород.

Специалисты новых профессий: горный инженер-физик и горный инженер-геотехнолог должны глубоко знать физику твердого тела (горных пород), технологические процессы, новые физико-химические методы добычи полезных ископаемых.

Профессия горняка вечна и бесконечно изменчива. Еще недавно – отбойный молоток, лошадь, вагонетка в шахте, а сегодня – пульт управления комбайном-автоматом и подземной монорельсовой дорогой. Завтрашний день горного дела – шахты и карьеры-автоматы, геотехнологические заводы-лаборатории, подводные суда для добычи полезных ископаемых со дна морей и океанов. Этот день потребует новых усилий ученых, инженеров-горняков всех специальностей [2].

Современный горный инженер, как и инженер любого профиля, должен владеть физикой в такой мере, чтобы быть в состоянии применять ее новейшие достижения в своей будущей деятельности творчески.

Техника будущего – это физика в ее различных приложениях.

## **1. МЕХАНИКА**

### **1.1. Гравиразведка**

*Гравитационная разведка* – метод разведочной геофизики, основанный на изучении поля силы тяжести на поверхности Земли и вблизи нее. *Физическая основа гравиразведки* – различие плотностей пород, рудных и нерудных полезных ископаемых. В гравиразведке измеряются плотности горных пород, выполняются абсолютные и относительные измерения ускорения свободного падения и его производных, выделяются аномалии гравитационного поля, проводится их геологическое истолкование.

Благоприятными физико-геологическими условиями для применения гравиразведки являются достаточная дифференцированность горных по-

род по плотности, относительно большие размеры изучаемых объектов, небольшая глубина залегания, отсутствие помех [3].

### 1.1.1. Плотность горных пород

Изучение плотности горных пород и полезных ископаемых необходимо для проведения интерпретации результатов гравиметрических измерений.

Плотность горных пород и руд обычно измеряют на образцах способом гидростатического взвешивания приборами, называемыми *денситометрами*. В таблице 1.1 приведены значения плотностей геологических образований.

Таблица 1.1

#### Плотность минералов и горных пород

Минералы	$D, \text{ г/см}^3$	Горные породы	$D, \text{ г/см}^3$
Нефть	0,8 ÷ 1,0	Песок	1,4 ÷ 1,7
Вода	1,0	Глина	1,6 ÷ 2,2
Уголь	1,1 ÷ 1,4	Песчаник	1,8 ÷ 2,8
Каменная соль	2,1 ÷ 2,4	Мергель	2,0 ÷ 2,6
Гипс	2,2 ÷ 2,3	Известняк	2,3 ÷ 2,9
Сидерит	3,7 ÷ 3,9	Туфы	2,5 ÷ 2,7
Халькопирит	4,1 ÷ 4,3	Гранит, гнейс	2,5 ÷ 2,9
Гематит, магнетит	4,9 ÷ 5,2	Габбро	2,8 ÷ 3,1
Галенит	7,5 ÷ 7,8	Перидотит	2,8 ÷ 3,4

Плотность осадочных пород зависит от пористости и минералогического состава, а у изверженных и метаморфических пород, пористость которых обычно не превышает 1–2 %, от минералогического состава.



Руды металлических полезных ископаемых, как правило, имеют высокую плотность за счет присутствия тяжелых минералов из класса оксидов или сульфидов.

Средняя плотность земной коры составляет  $2,7 \text{ г/см}^3$ , вещества Земли –  $5,5 \text{ г/см}^3$ , земного ядра –  $10,1 \text{ г/см}^3$ .

### 1.1.2. Способы измерения ускорения свободного падения

При решении задач гравиразведки необходимо измерять ускорение свободного падения с точностью до  $0,1 \text{ мГал}$  ( $1 \text{ мГал} = 10^{-5} \text{ м/с}^2$ ). Для этого можно использовать различные способы [4].

Первым величину земного ускорения экспериментально определил Галилей в 1590 году, наблюдая за падением тел с Пизанской башни и используя соотношение  $S = (gt^2)/2$ .

Этот способ не получил практического распространения из-за крайне низкой точности, и о нем не вспоминали несколько веков, но в последнее время к нему вернулись на совершенно новой технической основе. Применение в гравиметрии кварцевых стабилизаторов частоты и атомных эталонов времени позволило поднять предел точности измерения времени до  $10^{-10}$  с, а внедрение лазеров привело к аналогичному пересмотру возможностей в измерении пути, пройденного падающим телом. Баллистические гравиметры, использующие эти достижения, дают возможность определять абсолютное значение ускорения свободного падения до  $10^{-9}$  его величины. Такие приборы начали внедрять при создании опорных гравиметрических сетей высшего класса. Для широких производственных съемок такие гравиметры пока не используют из-за их дороговизны и недостаточной портативности.

Долгое время ускорение свободного падения измеряли с помощью колеблющегося маятника, используя соотношение  $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ .

Чтобы измерить  $g$  с предельной для маятниковых приборов точностью  $\pm 1$  мГал, приходилось проводить наблюдения на одном пункте в течение полусуток, так как лишь при большом числе колебаний можно оценить период с достаточной точностью. Кроме того, в этом методе необходимо вводить поправки, учитывающие ход часов, влияние окружающей атмосферы, температуру, качание штатива, влияние амплитуды колебаний, растяжение маятника, влияние магнитного поля.

В результате маятниковые приборы оказались вытесненными в геофизических партиях другими более производительными устройствами, но возможно использование маятникового метода в сочетании с новейшей электронной аппаратурой (время наблюдения составляет  $\sim 0,5$  часа).

Применяемые в настоящее время портативные гравиметры (массой не более 5 кг) позволяют получать за 1-2 минуты значение  $g$  с погрешностью до 0,02 мГал. В них используется принцип пружинных весов. Растяжение пружины зависит от значения ускорения свободного падения в данном месте Земли. Измеряемая величина  $\Delta g$  пропорциональна изменению длины  $\Delta l$  пружины.

Пружины бывают металлические, кварцевые любой формы: спиральные, ленточные, винтовые. Идею использования пружинных весов для измерения  $g$  впервые высказал М. В. Ломоносов. Им была предложена конструкция газового гравиметра, в котором в качестве рабочего упругого элемента использовался объем газа. Окончательная реализация этой идеи из-за трудностей технического порядка оказалась возможной лишь в 30–40-х годах XX века.

В обычных условиях наземных съемок гравиметры при измерениях ставят на жесткое основание. Однако оказывается возможным проводить измерения и на море. Донные гравиметры с дистанционным управлением, а также приборы, работающие на движущихся судах во время волнений и качки на море, позволяют определять  $g$  с точностью до нескольких мГал.

Многие страны проводят систематические гравиметровые съемки мирового океана и акваторий внутренних морей.

Измерения проводят также и с летательных аппаратов. Современные аэрогравиметры позволяют измерять поле силы тяжести с погрешностью до 0,4 мГал.

## **1.2. Движение пород под действием силы тяжести**

Гравитационные силы являются мощным фактором, влияющим на устойчивость земной поверхности. Из этого следует, что водные массы, скопления наносов и глыбы коренных пород при отсутствии достаточно надежного упора стремятся под действием своего веса сместиться вниз по склонам, что приводит к образованию оползней, обвалов и грязевых потоков, очень опасных и причиняющих значительный ущерб [5].

Почти при всех гравитационных перемещениях грунта решающую роль играет вода, которая как смазка уменьшает силу сцепления между частицами пород и увлажняет возможные плоскости скольжения.

Вздутие, выпирание грунта в результате перераспределения нагрузок или потери прочности пород могут иметь место на земной поверхности в тех случаях, когда она подстилается неустойчивыми породами, такими как глины. Эти явления наблюдаются также на участках проведения горных или строительных работ, в том числе при открытой разработке месторождений полезных ископаемых или стройматериалов.

Процесс оседания грунта может быть результатом откачки жидкости (воды, нефти) или газа в тех случаях, когда эти процессы сопровождаются уплотнением грунта или вмещающих пород.

### 1.3. Гравитационное обогащение

Разделение минеральных частиц, входящих в состав руд, углей и пустых пород, основано на действии сил тяжести и сопротивления и на различии физических и физико-химических свойств (размеров, формы, плотности, смачиваемости водой, степени слипания с воздушными пузырьками и т. д.). Эти различия сказываются на характере и скорости движения частиц в текучих средах [6].

Гравитационное обогащение осуществляется в воздушных и жидких (вода, органические жидкости, водные суспензии) средах различной плотности и вязкости. В основе расчетов лежит определение относительных скоростей перемещения частиц.

Гравитационное обогащение рассматривается как процесс установления равновесия и достижения минимума потенциальной энергии системой частиц, находящихся в поле сил тяжести в состоянии неустойчивого равновесия. Скорость гравитационного разделения оценивается по понижению центра тяжести взвеси, а его эффективность – по убыли потенциальной энергии смеси.

Обогащение полезных ископаемых в тяжелых средах основано на разделении минеральной смеси по плотности ее компонентов. Минералы меньшей плотности, чем тяжелая среда, всплывают в ней, а более тяжелые погружаются, вследствие чего и происходит разделение на всплывший (легкий) и потонувший (тяжелый) продукты.

Перспективно применение обогащения в тяжелых жидкостях в аппаратах с динамическими условиями разделения: гидроциклонах, центрифугах, центробежных сепараторах. В этих аппаратах более тяжелые и крупные частицы, поступающие с исходной пульпой, отбрасываются центробежной силой на внутреннюю поверхность цилиндра и увлекаются вращающимся нисходящим потоком вниз [7].

Гидроциклоны применяют для классификации материалов по крупности (классификаторы); отделения избытка воды и шламов от зернистого материала (сгустители); обогащения полезных ископаемых по плотности, в том числе в тяжелых жидкостях или утяжеленных тонкозернистых минеральных суспензиях (сепараторы); очистки жидкостей от твердых частиц (осветлители).

Гидроциклоны находят широкое применение в качестве классификаторов и сепараторов в горнорудной, как осветлители – в химической и нефтехимической промышленности, гидрометаллургии. В последнем качестве гидроциклоны используют также для регенерации и очистки глинистого раствора от выбуренной породы (в процессе бурения нефтяных и газовых скважин), а также в технологических операциях, связанных с эксплуатацией нефтяных скважин и с внутрипромышленным сбором и транспортом нефти.

#### **1.4. Применение законов сохранения в горном деле**

Законы сохранения энергии, массы, импульса используются в работе инжекторов, гидроэлеваторов и гидромониторов [7].

*Инжектор* – струйный насос для нагнетания газов, паров и жидкостей в различные аппараты, резервуары и трубопроводы, а также для сжатия газов и паров. Инжекторы используются для непрерывного смешивания двух потоков веществ и передачи энергии инжектирующего (рабочего) потока инжектируемому. Смешиваемые потоки могут находиться в газовой, паровой и жидкой фазах.

В горной промышленности инжекторы применяют для пневмо- и гидротранспорта (гидроэлеваторы) различных сыпучих материалов; для подъема и перекачки воды из колодцев и скважин; для создания непрерывного вентиляционного потока; для усиления тяги в дымоходах.

*Гидроэлеватор* – насос струйного типа для подъема и перемещения жидкостей и гидросмесей. Применяется для гидротранспортирования, подводного всасывания грунта, для повышения геодезической высоты всасывания землесосного снаряда с трюмным грунтовым насосом. При работе гидроэлеватора струя воды, вытекающая под большим давлением из насадки, создает в камере насоса разрежение. Этим обеспечивается подсос гидросмеси через всасывающий патрубок. Кинетическая энергия струи воды передается гидросмеси и в диффузоре переходит в потенциальную энергию потока.

*Гидромонитор* (водомет) – устройство для создания водяных струй и управления их полетом. Используется при гидроотбойке и размыве горной породы; для разработки россыпей, месторождений угля, песчано-гравийных строительных материалов; на гидровскрышных работах; при скважинной гидродобыче; в гидротехническом строительстве; для пескоструйной обработки призабойных зон при скважинной добыче полезных ископаемых.

Пневматические инструменты приводятся в движение сжатым до 5–7 атмосфер воздухом, энергия которого преобразуется в механическую работу. К ним относятся клепальные, отбойные молотки и другие инструменты с возвратно-поступательным движением рабочих органов. Благодаря малым массам и большим ускорениям рабочих органов удается развить значительные усилия, передаваемые на обрабатываемые предметы, например при работе бурильными молотками, которые применяются для бурения шпуров в породах средней и высокой крепости при проходке шахтных стволов горизонтальных и наклонных выработок [8].

Рост глубины разработок требует создания эффективных инженерных методов оценки состояния горного массива, надежных способов выемки полезных ископаемых, решения проблемы предотвращения выбросов, лавинных разрушений и других динамических явлений в шахтах. При

проведении горных работ стремятся управлять освободившейся потенциальной энергией сил горного давления и использовать ее для горного производства.

Определенный интерес представляют вопросы исследования явления выброса: имеется ли проникновение в пласт, находящийся в невыбросоопасном состоянии, инициирование выброса и использование его для добычи угля, который извлекают по скважинам в выработку или на поверхность.

### **1.5. Примеры использования вращательного движения в горном деле**

Вращательное движение совершают многочисленные элементы различных машин, применяемых в разведочном бурении, буровых станков и установок, двигателей, насосов транспортных средств, вспомогательных приспособлений и устройств [9].

При вращательном бурении шпуров разрушение горных пород производится резцами, вращающимися в шпуре и находящимися под действием осевой нагрузки. Резец, срезая породу тонкими слоями, постепенно углубляется в нее. Разрушенная порода (буровая мука) непрерывно выдвигается из шпура по винтовой поверхности бура.

Кинетическая энергия, передаваемая на забой шпура, прямо пропорциональна квадрату числа оборотов. Эта энергия, за исключением небольших потерь, будет полностью расходоваться на полезную работу разрушения породы и на дальнейшее углубление забоя шпура.

Электрические сверла применяют главным образом при бурении мягких горных пород, таких как каменный и бурый угли, некрепкие известняки, гипс, мел, глинистые сланцы, а также при бурении мерзлых грунтов.

С целью внедрения вращательного бурения в крепких породах в Свердловском горном институте было сконструировано сверло, работающее на сверхвысоких скоростях, при таких скоростях разрушение шпура происходит при незначительной толщине снимаемого слоя породы и небольшом осевом давлении электрического сверла, при этом мощность двигателя может быть небольшая.

Вентиляторы используются для проветривания строящихся и действующих шахт. Проветривание строящихся шахт осуществляется сквозной струей воздуха, создаваемой вентилятором, установленным на поверхности. Различные типы шахтных вентиляторов имеют скорость вращения рабочего колеса от 500 до 1500 об/мин, диаметр рабочего колеса от 1 до 3,6 м, массу от 3 до 50 т.

*Гировоз* – инерционный локомотив, для его движения используется кинетическая энергия вращающегося маховика. Маховик раскручивается пневматическим двигателем, периодически подсоединяемым к воздушной сети с давлением 100 – 600 кПа. Гировозы применяются для откатки вагонеток по рельсовым путям горизонтальных выработок шахт, опасных по взрыву газа или пыли. Служат вспомогательным транспортом в гидрошахтах и шахтах сплошной конвейеризации, могут использоваться для доставки оборудования, породы [10].

*Бегуны* – машины для измельчения и смешивания материалов в результате их перемещения, раздавливания и частичного истирания. Бегуны выполняются с вращающимися металлическими или каменными катками диаметром 0,6 – 1,8 м. Бегуны применяют в горнорудной промышленности, на обогатительных фабриках, в промышленности строительных материалов и др.



## 1.6. Вибрации в горной технике

*Вибрации* – механические колебания с большой частотой и малой амплитудой. Под действием вибрирования резко уменьшается трение между частицами материала, а также между материалом и внедренным в него телом. Этот эффект уменьшения трения обычно и используется в технологических процессах. При помощи вибратора в грунт погружается вибронд, который вырезает из естественного напластования грунтов керн. Поднятый на поверхность керн дает наглядное представление о геологическом разрезе скважин.

Существует вибрационный способ бурения скважин, при котором для разрушения породы используют механические колебания с частотой 1200–2500 колебаний в минуту. Такие колебания создаются вибрационной машиной и передаются породоразрушающему инструменту через колонну бурильных труб. Вибрационный способ разрушения мягких, рыхлых пород осуществляется при погружении специального забойного инструмента под действием вынужденных продольных колебаний и осевой нагрузки [11].

Вибрационное бурение применяется при бурении неглубоких скважин (25–30 м) различного назначения: при геологической съемке, сейсморазведке, разведке россыпных месторождений, инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях.

Вибрационные машины используются при бурении скважин в мерзлых грунтах, для свинчивания обсадных труб, для откачки воды из скважин малого диаметра. В горном и подземном строительстве вибрирование применяют для проходки шахт в пльвунах.

Все более широкое применение находят различные типы вибрационных питателей и конвейеров для выпуска, доставки и погрузки руды в пределах очистного блока. Виброконвейеры используются на шахтах для транспортировки твердых и абразивных грузов. С помощью вибраторов очистка вагонеток происходит за несколько секунд [12].

Вибрация применяется и для *сепарации* – разделения сыпучих смесей в зависимости от размеров частиц, формы, упругости, плотности материала. Для этого используются ситовые (решетные) сепараторы, вибрационные грохоты и др.

Вибрацию применяют для разрушения, дробления и перемалывания материалов. Для измельчения твердых материалов служат вибрационные мельницы, которые позволяют доводить размеры частиц до 2–3 мкм. Дробление руды и строительных материалов осуществляется вибрационными машинами – дробилками.

С помощью вибрации пробивают прочные перекрытия, погружают сваи в грунт, обрабатывают поверхности металлов, перемещают сыпучие материалы, проводят точение, сверление, абразивную обработку.

Но вибрации могут оказывать и вредное воздействие. При вибрациях быстрее срываются детали турбобура, наблюдаются поломки бурильных труб, ухудшается условие образования керна горных пород в геологоразведочном бурении. Для виброзащиты используют амортизаторы, которые конструируют так, чтобы частота внешних вынужденных колебаний не совпала с собственной частотой, в этом случае удастся избежать резонанса – наиболее опасного режима вибрации. Гашение колебаний достигается также за счет их рассеивания в специальных материалах, обладающих большим коэффициентом внутреннего трения [13].

## **1.7. Сейсморазведка**

*Сейсморазведка* – это геофизический метод, основанный на изучении характеристик поля упругих колебаний с целью исследования строения земной коры, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых.

Физической основой сейсмического метода разведки является зависимость скорости распространения упругих волн, возбужденных искусственным путем, от минерального состава и структуры изучаемых пород. Определяя скорость распространения продольных и поперечных волн, можно сде-

лать заключение о природе веществ, через которые проходят упругие волны. От места взрыва через землю бегут волны деформации, скорость которых зависит от механических свойств пород. Измеряя скорость распространения волн на различных расстояниях от места взрыва, оценивают характер залегающих [14].

Сейсмические методы разведки созданы на базе науки о землетрясениях – *сейсмологии*. Они основаны на изучении времени, пути и скорости распространения сейсмических колебаний в толще земной коры от очага возмущения к пункту наблюдения. Скорость волн непосредственно связана с упругими свойствами горных пород, что и помогает геофизикам определять особенности геологического строения района исследований.

Скорости волн зависят от состава слагающих породы минералов, а также пористости, влажности и строения пород. Значения скоростей нарастают от слабосцементированных к монолитным осадочным и далее к кристаллическим изверженным и метаморфическим породам [15].

Скорости продольных и поперечных волн зависят от модулей Юнга  $E$  и сдвига  $G$ , плотности среды  $D$ .

$$v_P = \sqrt{E/D} , \quad v_S = \sqrt{G/D} .$$

Модуль Юнга для горных пород меняется в больших пределах: у осадочных пород от  $0,03 \cdot 10^{10}$  до  $9 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>, у кристаллических – от  $3 \cdot 10^{10}$  до  $16 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>.

В сейсморазведке изучают главным образом продольные волны, так как, во-первых, большинство источников упругих колебаний генерируют именно их, во-вторых, продольные волны, имея более высокие скорости, первыми приходят к пунктам регистрации, меньше затухают при распространении, чем поперечные [16].

Приборы, расположенные на сейсмостанции, регистрируют толчок от происшедшего на расстоянии  $L$  землетрясения дважды через промежуток времени

$$t = \frac{L}{v_{\text{попер}}} - \frac{L}{v_{\text{прод}}}.$$

Измеряя его, можно оценить расстояние от сейсмостанции до очага землетрясения.

Землетрясения возникают при поднятии или опускании крупных частей земной коры и смятии последней в складки под действием огромных внутренних давлений. Поэтому наиболее сильные землетрясения происходят в тех областях, где продолжается образование гор, и в зонах разломов коры.

Упругие волны можно возбудить и искусственным путем: взрывом, ударом или вибрацией.

Возбуждение тех или иных волн зависит от типа сейсмического источника. Взрыв в скважине, удар падающего на землю груза будут генерировать преимущественно продольные волны, а удар в вертикальную стенку шурфа сбоку - поперечные.

Различные горные породы характеризуются разной скоростью распространения сейсмических волн, что видно из табл. 2.

Таблица 2

**Скорости распространения продольных и поперечных волн**

Минерал, порода	Скорость продольных волн $v_P$ , км/с	Скорость поперечных волн $v_S$ , км/с
Глина	1,2 ÷ 2,5	0,1 ÷ 0,8
Песчаник	1,8 ÷ 4,0	0,7 ÷ 2,1
Мел	1,8 ÷ 3,5	0,7 ÷ 1,8
Известняк, доломит	2,5 ÷ 6,0	1,2 ÷ 3,5
Мергель	2,6 ÷ 3,5	1,1 ÷ 1,8
Каменная соль	4,2 ÷ 5,5	2,1 ÷ 3,0
Гранит	4,0 ÷ 5,7	1,8 ÷ 3,5
Габбро	6,0 ÷ 7,0	3,2 ÷ 3,7
Перидотит	7,8 ÷ 8,2	4,1 ÷ 4,5
Метаморфические породы	4,5 ÷ 6,8	2,4 ÷ 3,8

В зависимости от того, по данным каких волн изучается строение Земли, методы сейсморазведки получили название методов преломленных или отраженных волн. Для приема волн используются высокочувствительные сейсмографы, регистрирующие смещение в несколько микрометров.

Сейсморазведка применяется при поиске и разведке нефтяных и газовых месторождений, залегающих на глубинах, исчисляемых километрами. Этим методом были открыты почти все нефте- и газоносные структуры Тюменской области.

### **1.8. Ультразвуки и инфразвуки в горном деле**

*Ультразвуком* называются упругие волны с частотами от  $2 \cdot 10^4$  до  $10^{14}$  Гц. Свойства и особенности таких волн дают возможность их широкого применения в горной промышленности.

Ультразвук используется как средство изучения упругих свойств горных пород резонансным и импульсным методами. При первом методе продольные стоячие волны возбуждают с помощью пьезопреобразователей. Плавно увеличивая от нулевого значения частоту колебаний, возбужденных в образце, добиваются резонанса. Первая резонансная частота при этом равна минимальной (основной) частоте собственных колебаний образца, которая простыми соотношениями связана с модулями упругости и плотностью среды [1].

При импульсном методе в исследуемую среду периодически излучаются в виде короткого пакета ультразвуковые импульсы. Колебания, распространяясь в среде, усиливаются и подаются на индикатор, с помощью которого измеряется время распространения импульса. При известном расстоянии между пьезопреобразователями определяется скорость распространения волны в образце. Этот метод нагляден, более точен, дает возможность измерять широкий диапазон скоростей распространения и

поглощения ультразвука в большом интервале температур и давлений исследуемой среды.

Явление отражения и поглощения ультразвуковых колебаний в массиве горных пород лежит в основе дефектоскопии, с помощью которой решается ряд задач: обнаружение нарушений сплошности массива; установление места и протяженности расслоений горных пород; определение мощности и границы напластований; изучение напряженного состояния горных пород [17].

Зависимость скорости распространения ультразвука от плотности среды позволяет применять его для контроля при проходке стволов шахт методом замораживания.

Ультразвуковые колебания применяют для интенсификации процессов обогащения полезных ископаемых. Ультразвуковой метод можно использовать при обогащении черных металлов и нерудных материалов. Ультразвуковые колебания вызывают коагуляцию, т. е. слипание или укрупнение угольных зерен, в то время как зерна пустой породы не слипаются, а следовательно, и не увеличиваются в размерах. На специальных решетчатых приспособлениях отделяют уголь от породы [18].

Геофизики предложили использовать ультразвуковые волны для обнаружения подземных пустот, которые можно либо ликвидировать, закачав туда воду вместе с пустой породой шахтных и горных выработок, либо превратить в хранилище газа.

Упругие волны с частотами ниже 16 Гц называют *инфразвуком*. Вопросы практического применения инфразвуковых волн еще мало изучены.

Миллионами тонн исчисляется ежегодная добыча строительного щебня. Сама технология производства щебня проста, но большую трудность представляет промывка – очистка известняка от глины, песка и других посторонних примесей. Чем чище щебень, тем прочнее бетон. Инфразвуком вызываются волнообразные колебания рабочего органа агрегата.

Амплитуду колебаний устанавливают в зависимости от вида сырья. При этом чистоту очистки можно довести до идеальной. Процесс промывки непрерывный. Производительность установки 100 м<sup>3</sup> щебня в час. Инфразвуковой агрегат можно столь же эффективно использовать в металлургической, химической и других отраслях промышленности.

Инфразвук открывает путь к созданию принципиально нового класса машин и механизмов вибрационного действия. Применяв его в качестве источника механоакустических колебаний, в Ленинграде была создана оригинальная виброустановка. Ее использовали при формовке изделий из металла, железобетона, цемента.

В лаборатории звуковой и инфразвуковой техники Московского горного института создали принципиально новый фильтр. По идее любой фильтр должен свободно пропускать чистую воду и задерживать посторонние примеси, но твердые частицы забивают ячейки. В новой конструкции акустическая инфразвуковая волна постоянно отталкивает частицы от фильтра, заставляя их оседать на дно установки.

## **2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА**

### **2.1. Броуновское движение**

Броуновское движение является как бы увеличенным по масштабу, но замедленным по темпу воспроизведением теплового движения молекул [19].

Броуновское движение можно наблюдать в торфяных системах. Частицы дисперсной фазы в торфе испытывают броуновское движение вследствие беспорядочных ударов, наносимых молекулами среды; частицы торфа размером около 5 мкм колеблются около положений равновесия. В системах с частицами больших размеров броуновское движение практически отсутствует. С увеличением размера и массы частиц возрастает инерция. Истинный

путь частицы торфа найти нельзя, но можно определить среднее расстояние, на которое она смещается за единицу времени.

## **2.2. Барометрическое распределение**

При спуске в шахту давление воздуха увеличивается. На глубине 3 км оно возрастает в полтора раза. Наибольшее воздушное давление, которое еще способен переносить человеческий организм, составляет  $3 \cdot 10^5$  Па. Расчет с помощью барометрической формулы показывает, что такое давление будет на глубине 9 км.

Барометрическая формула применяется для определения статического давления столба газа в скважине. При бурении встречаются случаи, когда в скважине может оказаться столб газа или воздуха достаточно большой высоты. Это может быть вызвано, например, поступлением газа из газового пласта, понижением уровня жидкости в скважине с помощью компрессора, бурением с продувкой воздухом и газом [20].

## **2.3. Температура горных пород и ее измерение**

Температура является одним из внешних факторов, определяющих физико-технические параметры горных пород и минералов. Особый интерес представляют температуры, при которых происходят те или иные физические и термохимические эффекты, например, температуры плавления, возгонки, фазовых превращений, диссоциации и т. д. [16].

Все параметры пород, характеризующие их пластичность, ползучесть, релаксацию напряжений, с повышением температуры увеличиваются, а вязкость пород – снижается. Изменение температуры породы приводит к изменению не только ее прочности, но и механизма разрушения, а также сказывается на тепловых и электромагнитных свойствах горных пород.



Метод георазведки, основанный на изучении температур горных пород, называется *терморазведкой*. Для измерения температур грунтов в шурфах и буровых скважинах используют ртутные термометры, термопары, электрические термометры сопротивления, а также высокоточные (до 0,01 °С) электронные аномалий-термометры.

Измерив температуру в разведочных буровых скважинах, строят на картах изолинии температур, вводят поправки на суточные, сезонные температурные колебания и делают вывод по полученным данным о местоположении и размерах залежей полезных ископаемых [17].

В термическом методе исследования скважин (термокаротаж) используют как естественные температурные поля Земли, так и искусственные, создаваемые нагнетанием горячих пульп в скважины. Характер распределения тепловых полей в скважине зависит от тепловых свойств (теплопроводности, температуропроводности) пород, окружающих скважину.

Данные термокаротажа позволяют решать многие задачи: получить информацию о теплофизических свойствах горных пород, установить геотермический градиент, исследовать геологический разрез скважины и геологические особенности месторождений, выявить полезные ископаемые – газы, нефть, определить границы зоны многолетней мерзлоты, мест подтока глубинных вод, зоны оттаивания, степень промерзания пород и т. д.

#### **2.4. Изопроцессы в горном деле**

Примером изотермического процесса является хранение сжиженных газов в подземных изотермических хранилищах. На законе Бойля-Мариотта основан принцип действия дистанционного уровнемера для автоматического контроля уровня промывочной жидкости при бурении скважин, принцип действия шахтного самоспасателя и др. [21].

Изобарический процесс осуществляется при подземной газификации твердого топлива, при которой за счет горного давления и давления воздуха, нагнетаемого в пласт угля, общее давление в газовых продуктах сгорания остается постоянным.

На законе Гей-Люссака основан обогрев воздуха калориферными установками. Примером изохорического процесса может служить термическое и электротермическое дробление негабаритов горных пород.

Адиабатическими являются процессы, происходящие при работе компрессорных установок, расширение и сжатие горючей смеси в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания, истечение газов через сопла реактивных двигателей и плазменных горелок. В природе практически не существует адиабатных процессов. Некоторые процессы в горных породах можно отнести к квазиадиабатным с некоторым приближением [22].

Для воздуха  $\gamma = 1,4$ . При сжатии воздуха в компрессорах осуществляется политропический процесс с показателем политропы  $\eta = 1,2 \div 1,3$ . Такое сжатие при  $\eta < \gamma$  выгоднее адиабатического, так как при этом за цикл затрачивается меньшая работа.

## **2.5. Роль процессов переноса в горных массивах**

Процессы тепло– и массопереноса играют важную роль в развитии явлений, которые происходят в горных массивах под действием теплового поля.

В подземных сооружениях (шахтах, рудниках, скважинах) происходит тепло– и массообмен между горным массивом и вентиляционной струей. Изучение этих явлений позволяет правильно выбирать и поддерживать тепловой режим шахт и рудников, нормализовать температурный режим геотермальных скважин с помощью теплоизоляции бурильной колонны [23].

Процессы теплопереноса в верхних слоях земной коры определяют тепловой режим работы при подземной разработке полезных ископаемых (особенно глубинных горизонтов). Передача тепла в массиве горных пород осуществляется посредством теплопроводности, излучения и конвекции.

Для исследования вопросов, связанных с разрушением горных пород, использованием глубинного тепла, поведением горного массива при термических способах добычи полезных ископаемых, замораживанием пород при проходке выработок, гидрооттаиванием при бурении мерзлых пород в условиях Севера важно знать способность горных пород проводить тепло в различном температурном состоянии. Последнее определяется величиной коэффициента теплопроводности пород. На зависимости коэффициента теплопроводности от влажности основан перспективный физический метод оценки влажности пород.

Процессы массообмена в горных массивах определяются законами диффузии. В атмосфере процессы диффузии широко проявляются в равномерном распределении газов, в довольно быстром переносе огромных количеств угольной кислоты, выбрасываемой вулканами и вырабатываемой промышленностью, в распределении кислорода, в накапливании гелия в земной коре. Интенсивны эти процессы и в морских водоемах [24].

Благодаря диффузии в Земле в мельчайших капиллярах и трещинах, прорезающих породы, идут медленные процессы переноса вещества, при этом, например, мрамор становится более прозрачным, твердые агаты окрашиваются в различные тона.

Существует отрасль горной науки – *аэрология*, которая изучает свойства атмосферы шахт и карьеров, законы движения воздуха, переноса газообразных примесей, пыли и тепла в горных выработках, внутрикарьерном производстве.

Коэффициент внутреннего трения горных пород или вязкость деформирования очень велика, она составляет  $10^{11} \div 10^{13}$  Па·с. Понятие вязко-

сти горных пород связывают не с коэффициентом внутреннего трения, а с показателем вязкости пород при разрушении. Вязкие породы имеют высокую прочность и трудно поддаются разрушению. Горные породы с высокой степенью вязкости и с небольшой твердостью легко бурятся, но у них плохая взрываемость. Вязкость горных пород необходимо учитывать при проведении горных выработок.

*Вязкость* – одна из основных технических характеристик нефти, продуктов ее переработки, газовых конденсатов и фракций. Она определяет характер процессов извлечения нефти, ее подъема на поверхность, условия перевозки и перекачки продуктов, гидродинамическое сопротивление при их транспортировке по трубопроводам.

Вязкость жидкостей уменьшается в процессе увеличения нагрузки (тиксотропия). Это свойство используют при бурении скважин, так как оно позволяет уменьшить затраты энергии на промывку за счет снижения вязкости раствора. Условия промывки забоя скважины зависят и от свойств используемой жидкости, особенно от вязкости. Чем больше вязкость, тем больше сопротивление струе жидкости и тем меньше будет эффект.

С повышением температуры вязкость уменьшается. Это сыграло свою роль в рудообразовании. Горячие рудные растворы из больших глубин Земли, где высокие давления и горные породы сильно уплотнены, через поры и трещины переносили вещество и отлагали его в благоприятных геологических условиях, постепенно формируя месторождения полезных ископаемых.

Вязкость необходимо учитывать при обогащении полезных ископаемых, так как она влияет на скорость относительного перемещения частиц в суспензии. Зная вязкость, можно определять скорости оседания частиц тумана, дыма, пыли при изучении работы пылесосов.

## 2.6. Примеры использования теплоты в горном деле

Широкое применение находит теплота в технологии добычи полезных ископаемых. Изменяя тепловое состояние горных пород, можно добиться их расплавления, изменения структуры и других свойств.

Изучением тепловых процессов в горных породах занимается термодинамика горных пород. Ее задачами являются совершенствование методов добычи и переработки полезных ископаемых с помощью тепла, борьба с высокими температурами в глубоких выработках, выбор наиболее эффективных способов добычи полезных ископаемых [17].

При подземной разработке месторождений полезных ископаемых задача теплового режима горных выработок имеет важное значение, особенно на больших глубинах и в районах вечной мерзлоты.

Изучение процессов теплообмена и тепловых свойств пород в зависимости от температуры позволяют правильно выбрать тепловой режим шахт и рудников.

В породах, имеющих кремнистое основание, производят термическое бурение скважин при помощи горелок реактивного типа. Разрушение породы происходит в основном за счет термических напряжений, возникающих вследствие неравномерности нагревания во времени отдельных слоев кварца [23].

В плазменных бурах высокотемпературная струя ионизированных газов образуется при прохождении сжатого воздуха через мощный электродуговой разряд. Наиболее эффективно разрушаются породы, сложенные минералами с различными коэффициентами теплового расширения, имеющие небольшие коэффициенты теплопроводности и большие значения модуля упругости.

В ряде случаев забой скважины подвергают воздействию знакопеременных температурных полей: поочередно обрабатывают потоками горячего и охлажденного газа или жидкого азота. В результате резких темпе-

ратурных колебаний разрушение породы происходит значительно более быстрое, чем при одном только нагреве. При этом становится возможным разрушать породы, которые не бурятся обычными газовыми горелками. Это связано с тем, что породы при охлаждении становятся более хрупкими [25].

При термическом способе укрепления пород нагретый воздух или раскаленные продукты сгорания нагнетают через скважины в пористые породы, в результате чего они становятся монолитными, прочными, повышают свою воздухо- и влагонепроницаемость.

Среди термических методов широко известна подземная газификация углей. Она заключается в их подземном сжигании и отводе получающегося горючего или технологического газа. В простейшем случае для этого бурят две скважины, вскрывающие пласт, предназначенный для газификации. Между скважинами производят сбойку, при этом создается канал, по которому могут проходить газы и воздух. Пласт поджигают, в одну скважину непрерывно подают воздух, из другой отводят горючий газ. В зависимости от режима дутья получают газ различного химического состава.

## **2.7. Эффект Джоуля-Томсона. Сжиженные газы**

Температура реального газа уменьшается при адиабатическом расширении без совершения им работы. Это явление получило название *эффекта Джоуля-Томсона*. В технике этот эффект используется для охлаждения газов при их сжижении.

Сжиженные газы применяются в установках для кондиционирования шахтного воздуха. Существуют методы разработки залежей полезных ископаемых, основанные на охлаждении пород с помощью сжиженных газов. При локальном сильном охлаждении поверхности породы интенсивной струей низкотемпературного газа, например жидкого азота, в породе возникают растягивающие напряжения [17].

Огромные трудности встают перед строителями шахт, туннелей, подземных железных дорог, когда при проходке встречаются водоносные грунты – пльвуны. Вода вместе с разжиженной породой заливает шахту, делает работу невозможной. В борьбе с такими пльвунами большую помощь строителям оказывает холодильная техника. Пльвуны замораживают, превращают в лед и подвергают обычной обработке [26].

При пересечении скважиной водоносного слоя замораживание проводят путем нагнетания в пласт под давлением метана, используя при этом эффект Джоуля–Томсона (понижение температуры при фильтрации газа через пористый массив).

Понижение температуры при быстром расширении газа отмечено и при выделении газа из нефтеносных и газоносных пластов в скважину. По минимуму на температурной кривой можно выделять такие пласты. Наиболее благоприятные результаты получаются в том случае, когда пластовое давление гораздо больше давления в скважине, а из пласта в скважину поступает большое количество газа [27].

Термокаротаж по эффекту охлаждения проводится или сразу после промывки скважины и прекращения циркуляции бурового раствора, или при установившемся тепловом режиме.

## **2.8. Применение поверхностно–активных веществ**

Вещества, ослабляющие поверхностное натяжение жидкости и собирающиеся в поверхностном слое при их растворении, называются *поверхностно-активными веществами* (ПАВ). Известны сотни различных ПАВ.

ПАВ оказывают влияние на механическую скорость бурения скважин. Использование растворов сульфанола позволяет увеличить механическую скорость бурения на 20 %. Адсорбируясь на поверхности горных пород, молекулы ПАВ проникают в мелкие трещины, помогают разрушению [17].

ПАВ применяются для обезвоживания и обессоливания нефтей, увеличения нефтеотдачи пластов и продуктивности эксплуатационных скважин, предотвращения коррозии нефтепромыслового оборудования, борьбы с отложением парафина, улучшения качества нефтепродуктов, предотвращения обвалов при бурении глинистых пород [28].

ПАВ широко используются при флотационном обогащении каменных углей, руд цветных металлов и др.

Флотационный метод основан на различной способности частиц закрепляться на границе раздела двух фаз вследствие различия удельных поверхностных энергий минералов. Для воды поверхностная энергия определяется поверхностным натяжением [29].

Если минералы закрепляются на границе раздела вода – масло, то этот процесс называется масляной флотацией; если в поверхностном слое жидкости – пленочной флотацией; в пенном слое – пенной сепарацией; на пузырьках газа в воде – пенной флотацией. Последняя широко применяется в настоящее время.

В процессе пенной флотации взаимодействуют три фазы: твердая – минерал, жидкая – вода, газообразная – воздух. Зерно минерала закрепляется на поверхности воздушного пузырька, в результате чего в пульпе появляются минерализованные пузырьки, которые вместе с частицей всплывают вверх. На поверхности воздушного пузырька в пульпе способны закрепляться только несмачиваемые частицы. Смачиваемые водой частицы пустой породы постепенно осаждаются на дно.

## **2.9. Роль явлений капиллярности в горном деле**

Одним из основных физико-механических показателей горной породы является пористость, которая характеризуется объемом всех пустот и трещин в ней. Различают некапиллярную пористость при диаметре пор более 0,5 мм или ширине трещины более 0,25 мм и капиллярную – при меньших размерах пор или трещин.



Пористость возникает в породах, содержащих минералы, растворимые в воде. Образование растворов и наличие капиллярных трещин вызывает капиллярное давление, которое поднимает жидкость на значительную высоту, что может сильно изменить общий характер циркуляции подземных вод.

Под влиянием капиллярного давления могут возникнуть такие явления, как набухание и вспучивание, т. е. увеличение горной породы в объеме. Это приводит к разрушению не только ее самой, но и прилегающих к ней других пород, следствием чего могут быть самые неожиданные явления, например, прорыв воды [30].

Высота капиллярного поднятия зависит от диаметра капилляров. Крупнозернистые грунты обладают меньшей способностью капиллярного поднятия, чем мелкозернистые, но капиллярное поднятие в мелкозернистых грунтах происходит весьма медленно, в течение месяцев.

Это явление приходится учитывать при торфяных разработках. Многократные переезды машин, производящих те или иные технологические операции, значительно уплотняют верхние слои торфяной залежи, что приводит к уменьшению диаметра капилляров и к большему увлажнению разрабатываемого слоя. Высота капиллярного поднятия может увеличиться на 20 – 40 %, поэтому для нормальной сушки торфа понижают уровень грунтовых вод до 1 м от поверхности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ржевский В. В.* Акустические методы исследования и контроля горных пород в массиве. М.: Наука, 1973. 224 с.
2. *Турчанинов И. А.* Физики в шахтерских касках. М.: Недра, 1986. 128 с.
3. *Вахромеев Г. С.* Введение в разведочную геофизику. М.: Недра, 1988. 135 с.
4. *Темко С. В., Соловьев Г. А., Милантьев В. П.* Физика раскрывает тайны Земли. М.: Просвещение, 1976. 128 с.
5. *Уотсон Дж.* Геология и человек: введение в прикладную геологию. Л.: Недра, 1986. 184 с.
6. *Шохин В. Н., Лопатин А. Г.* Гравитационные методы обогащения. М.: Недра, 1993. 340 с.
7. *Горная энциклопедия* / гл. ред. Е. А. Козловский. М.: Сов. энциклопедия. Т. 2, 1986. 575 с.
8. *Вайнберг Д. В., Писаренко Г. С.* Механические колебания и их роль в технике. М.: Наука, 1965. 276 с.
9. *Ребрик Б. М.* Практическая механика в разведочном бурении. М.: Недра, 1982. 319 с.
10. *Горная энциклопедия* / гл. ред. Е. А. Козловский. М.: Сов. энциклопедия. Т. I, 1984. 560 с.
11. *Диментберг Ф. М., Фролов К. В.* Вибрация в технике и человек. М.: Знание, 1987. 160 с.
12. *Советов Г. А., Жабин Н. И.* Основы бурения и горного дела. М.: Недра, 1991. 367 с.
13. *Копылов В. Е.* Бурение?... Интересно! М.: Недра, 1981. 160 с.
14. *Иванов А. Г.* Физика в разведке земных недр. М.: Недра, 1971. 200 с.
15. *Бондаренко В. М, Демура Г. В., Ларионов А. М.* Общий курс геофизических методов разведки. М.: Недра, 1986. 453 с.
16. *Дахнов В. Н.* К познанию недр Земли: геофизические методы исследования скважин. М.: Недра, 1968. 144 с.
17. *Ржевский В. В., Новик Г. Я.* Основы физики горных пород: учебник для вузов. М.: Недра, 1984. 359 с.
18. *Хорбенко И. Г.* Звук, ультразвук, инфразвук. М.: Знание, 1986. 192 с.
19. Курс физики торфа. Часть I / Е. Г. Базин и [др.]. Калинин: КГУ, 1977. 77 с.
20. *Мирзаджанзаде А. Х., Спивак А. И., Мавлютов М. Р.* Гидроаэромеханика в бурении: учебное пособие. Уфа: Изд. УНИ, 1984. 238 с.

21. *Дмитриев А. П., Гончаров С. А.* Термодинамические процессы в горных породах. М.: Недра, 1983. 312 с.
22. *Хаджиков Г. Н., Бутаков С. А.* Горная механика. М.: Недра, 1982. 407 с.
23. *Дмитриев А. П., Гончаров С. А.* Термодинамическое и комбинированное разрушение горных пород. М.: Недра, 1978. 303 с.
24. *Кремнев О. А., Журавленко В. Я.* Тепло– и массообмен в горном массиве и подземных сооружениях. Киев: Наук. думка, 1986. 340 с.
25. *Ягунов А. В.* Тепловое разрушение горных пород и огневое бурение. М.: Недра, 1972. 162 с.
26. *Разведочная геофизика* / под ред. Д. С. Микова. – Томск.: ТГУ, 1974. – 382 с.
27. *Новик Г. Я., Кузьяев Л. С.* Основы физики горных пород: сборник задач и упражнений. М.: МГИ, 1983. 46 с.
28. *Применение ПАВ в нефтяной промышленности* / под общ. ред. П. А. Ребиндера. М.: Гостоптехиздат, 1961. 288 с.
29. *Комлев С. Г.* Основы обогащения полезных ископаемых. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2007. 121 с.
30. *Пименов М. А.* Гидротехника в торфяном производстве. Минск: Высш. шк., 1976. 320 с.

Учебное издание

Лидия Николаевна Лукашевич  
Ольга Владимировна Садырева  
Людмила Кузьминична Катанова

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ  
ЯВЛЕНИЙ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

Часть 1

Механика, молекулярная физика  
и термодинамика

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

Редактор В. В. Баклаева

Подписано в печать. Бумага писчая. Формат бумаги 60×84 1/16.  
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.  
Печ. л. 2,19. Уч.-изд. л. 1,94. Тираж 200 экз. Заказ №

Издательство УГГУ  
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.  
Уральский государственный горный университет  
Отпечатано с оригинал-макета  
в лаборатории множительной техники УГГУ