

№ 2721

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»

Кафедра физических процессов горного производства
и геоконтроля

С.А. Гончаров
П.Н. Пащенко
А.В. Плотникова

Физика горных пород

Физические явления и эффекты в практике
горного производства

Учебное пособие

Рекомендовано редакционно-издательским
советом университета



Москва 2016

УДК 622.25
Г65

Рецензент
д-р техн. наук, проф. В.В. Мельник

Гончаров С.А.

Г65 Физика горных пород : физические явления и эффекты в практике горного производства : учеб. пособие / С.А. Гончаров, П.Н. Пашенков, А.В. Плотникова. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2016. – 27 с.

ISBN 978-5-87623-973-0

В учебном пособии изложены способы и средства использования при добыче и переработке полезных ископаемых механических эффектов, молекулярных явлений, гидростатических и гидрогазодинамических явлений и эффектов, колебательных и волновых явлений и эффектов, электромагнитных явлений.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям «Горное дело» и «Физические процессы горного производства».

УДК 622.25

ISBN 978-5-87623-973-0

© Гончаров С.А., Пашенков П.Н.,
Плотникова А.В., 2016
© НИТУ «МИСиС», 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Общие сведения о физических явлениях и эффектах в горных технологиях.....	4
2. Механические эффекты	6
2.1. Силы инерции	6
2.2. Центробежные силы инерции.....	6
2.3. Трение	7
2.4. Деформации	8
2.5. Силы гравитационного поля.....	9
2.6. Горное давление	10
2.7. Горный удар	10
2.8. Внезапный выброс.....	11
3. Молекулярные явления.....	12
3.1. Тепловое расширение горных пород.....	12
3.2. Фазовые переходы в минералах и горных породах.....	12
3.3. Поверхностное натяжение воды	13
3.4. Капиллярность	14
3.5. Сорбция	15
3.6. Диффузия.....	15
3.7. Тепломассообмен.....	16
4. Гидростатика и гидроаэродинамика	17
4.1. Течение жидкости и газа.....	17
4.2. Скачок уплотнения	19
4.3. Гидравлические удары	19
4.4. Внезапный прорыв вод и пльвунов.....	19
5. Колебания и волны	21
5.1. Механические колебания.....	21
5.2. Акустика	21
5.3. Волновое движение	22
6. Электромагнитные явления	23
6.1. Электропроводимость	23
6.2. Электромагнитное поле	23
6.3. Магнетики	24
Литература	26

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ И ЭФФЕКТАХ В ГОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Объектом труда в горной промышленности являются массив горных пород и собственно горная порода. Массив горных пород и горная порода, их качественные и количественные характеристики (свойства и состояние) изменяются под действием различных физических полей (механических, тепловых, электрических и т.д.). Эти изменения сопровождаются разного рода физическими явлениями и эффектами в горных породах и массивах.

На ранних стадиях развития горного производства технология добычи и переработки полезных ископаемых основывалась на механическом воздействии на горную породу. В настоящее время область воздействий на горный массив и горную породу в горном производстве значительно расширилась. Используются тепловые, электрические, волновые, гидравлические, оптические и химические воздействия, которые приводят к изменению свойств горного массива и горных пород не только на макро-, но и на микроуровне, что сопровождается физическими явлениями и эффектами, протекающими в горном массиве и собственно в горной породе. Примером является выщелачивание руды одновременно при гидравлическом и химическом воздействиях на рудное тело, находящееся в массиве горных пород. При этом имеют место два явления: гидрорасчленение массива горных пород и химическое растворение извлекаемого из рудного тела минерала.

Расширение круга физических явлений и эффектов на макро- и микроуровне, изменяющих свойства и состояние массива горных пород, в конечном итоге позволяет повысить производительность технологических процессов добычи и переработки полезных ископаемых, их экономическую эффективность и экологическую безопасность.

Воздействие на массив горных пород и на горную породу каким-либо одним физическим полем может приводить к физическим явлениям и эффектам в породе, физическая природа которых соответствует не только данному физическому воздействию, но и другим физическим явлениям и эффектам, свойственным другим физическим полям. Например, при механическом разрушении горной породы в ней возникают также механические явления и эффекты: напряжения и деформации, а при импульсном электромагнитном воздействии на

горную породу, содержащую минералы – ферромагнетики, в них возникает явление магнитострикции, которое приводит к механическим эффектам (напряжениям и деформациям) на границах этих минералов с соседними минералами данной породы.

В настоящее время известен широкий круг физических явлений и эффектов, которые используются в практике добычи и переработки полезных ископаемых.

2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

2.1. Силы инерции

Эти силы возникают в случае приложения к массиву горных пород или к самой горной породе внешней силы с ускорением в процессе их разрушения. При этом увеличивается количество движения, а энергоёмкость процессов разрушения породы уменьшается. Вследствие этого энергоёмкость статического разрушения горных пород значительно выше энергоёмкости их разрушения при динамических нагрузках. В подтверждение этого энергоёмкость разрушения пород в дробилках, где происходит практически статическое воздействие на породу, значительно выше, чем при взрывном разрушении горных пород, когда превалирует динамическая составляющая нагрузки на породу, обусловленная ускорением сил взрывного нагружения. При этом энергоёмкость разрушения пород более высокобризантированными взрывчатыми веществами (скорость их детонации выше, чем низкобризантированных) ниже, чем взрывное разрушение пород низкобризантированными взрывчатыми веществами.

2.2. Центробежные силы инерции

Эти силы возникают под действием *центростремительной силы* при вращении тела. Примером использования такой силы может служить измельчение руды во вращающихся мельницах. В таких мельницах измельчающими телами являются высокоабразивные стальные шары или стержни, находящиеся внутри цилиндрической пустотельной мельницы, расположенной с небольшим уклоном в сторону разгрузки продуктов измельчения руды. Загрузка исходной рудой такой наклонной мельницы происходит поточно в верхней её части.

При вращении мельницы возникает центробежная сила F :

$$F = \frac{mv^2}{r},$$

где m – масса вращающихся в мельнице тел (шаров, стержней, кусков руды);

v – линейная скорость вращения мельницы;

r – внутренний радиус мельницы.

Скорость вращения мельницы подбирают такой, чтобы в зависимости от крупности кусков руды на входе мельницы под действием

центробежных сил измельчающие шары (стержни) достигали апогея, а куски руды (масса которых значительно меньше массы шаров) не достигали этой высоты. При падении шаров (стержней) под действием сил гравитации из точек апогея на нижнюю внутреннюю поверхность цилиндрической мельницы куски руды оказываются между этой поверхностью и падающими шарами (стержнями). Поскольку масса отдельных шаров (стержней) на порядок и более выше массы отдельных кусков руды, происходит их измельчение.

2.3. Трение

Различают *трение покоя* и *трение при скольжении одного тела относительно другого*. Трение покоя имеет место в горном производстве при контакте связных горных пород с поверхностью добычного и транспортного оборудования. В этом случае между связной породой и поверхностью добычного или транспортного горного оборудования возникают силы *адгезии*, что приводит к *налипанию* связных пород к этим поверхностям, а в период отрицательных температур – к *намерзанию*.

Силы адгезии связных пород к твёрдой поверхности складываются из двух составляющих: *капиллярной* и *электростатической*. Капиллярная составляющая обусловлена поверхностным натяжением физически связной водой, находящейся в связной породе, с твёрдой поверхностью добычного или транспортного оборудования. Электростатическая составляющая адгезии (прилипания) обусловлена различием по величине, а в большинстве случаев и по знаку, электростатического заряда между частицами связной породы и твёрдой поверхности добычного и транспортного горного оборудования.

Капиллярная и электростатическая составляющие сил адгезии являются причиной слипания минералов концентрата между собой и с частицами флюсовых добавок при производстве окатышей, которые горно-обогащительные комбинаты отправляют на металлургические заводы. Изготовление окатышей осуществляют во вращающихся трубчатых или тарельчатых окомковательных машинах. Трубчатые окомковательные машины представляют собой трубу, расположенную с небольшим наклоном к горизонту. В верхнюю часть трубы загружаются концентрат, флюсовые добавки и адгезив (как правило, это доломитовая мука). При вращении трубы происходит пересыпание шихты с верхних участков в нижние. При этом происходит слипание частиц шихты между собой. Скорость вращения трубы выби-

рают такой, чтобы частицы шихты не достигали апогея. Длину трубы и угол ее наклона выбирают так, чтобы в месте разгрузки окатыши были заданного (требуемого) диаметра.

Тарельчатая окомковательная машина представляет собой диск в виде тарелки, наклонённой к горизонту под углом 15...20°. Загрузка шихты на тарелку происходит в верхней её части, разгрузка окатышей – в нижней. Диаметр и скорость вращения тарелки выбирают такими, чтобы в месте разгрузки окатышей их диаметр соответствовал заданному размеру.

Трение скольжения имеет место при измельчении руды в струйных мельницах, а также в шаровых мельницах на последних стадиях измельчения руды (третьей и четвёртой). В этом случае измельчение руды происходит главным образом за счет трения частиц руды между собой или с измельчающими телами (шарами).

Строительство подземных сооружений (микротоннелей) в рыхлых и связных породах в условиях мегаполисов в большинстве случаев осуществляют с помощью продавливания. При этом трубы (будущие микротоннели) продавливают в грунт с помощью гидродомкратов. В этом случае на внутренней и внешней поверхности труб возникают силы трения скольжения, после преодоления которых происходит продвижение (продавливание) труб в грунте.

2.4. Деформации

Деформации в массиве горных пород и в собственно горных породах происходят при их разрушении. При деформации изменяется пространственное положение отдельных точек горного массива (горных пород) относительно друг друга. Причинами деформации горных пород и массивов могут быть различные силы: механические, гравитационные, электрические, магнитные, температурные, а также фазовые переходы в отдельных минералах, слагающих горную породу.

Деформации в горных породах и массивах возникают в технологических процессах добычи и переработки полезных ископаемых.

В массиве горных пород при отсутствии вмешательства человека или природы имеет место статическое равновесие и какие-либо деформации отсутствуют. При технологических процессах добычи и переработки полезных ископаемых возникают деформации сжатия, сдвига и растяжения. Они подразделяются на упругие деформации, которые исчезают в породе после снятия нагрузки, и пластические, которые остаются в породе после снятия нагрузки. В зависимости от этого

горные породы делятся на *упругие* (весьма прочные кристаллические породы магматического происхождения), *упруго-пластические* (слабопрочные породы магматического происхождения и осадочные породы), *пластические* (связные породы).

В случае приложения внешней нагрузки в горной породе (массиве) возникают структурные и текстурные деформации. Структурные деформации возникают на границах минералов, слагающих горную породу, текстурные – на границах слоёв пород. И структурные и текстурные деформации в горных породах возникают в результате формирования *дислокаций* на границах минералов или слоёв горных пород при внешних или внутренних нагрузках.

2.5. Силы гравитационного поля

Гравитационное поле – это силовое поле, обусловленное притяжением Земли за вычетом центробежной силы, которая возникает вследствие суточного вращения Земли; силы гравитации незначительно зависят также от притяжения Луны и Солнца. Гравитационное поле Земли характеризуется потенциалом силы тяжести; размерность этого поля $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$.

Гравитационное поле используется во многих технологических процессах горного производства, основными из которых являются *гравитационное обогащение* полезных ископаемых и *выпуск руды из обрабатываемых подземным способом блоков* при системах разработки с *магасинированием руды*, а также с *этажным или подэтажным её обрушением*.

Гравитационное обогащение – это разделение минералов в зависимости от их плотности и крупности в поле силы тяжести или центробежных сил. В результате происходит отделение пустой породы от извлекаемого полезного минерала с получением концентрата. При гравитационном обогащении используется сила земного притяжения; иногда дополнительно используют поля центробежных сил или электромагнитных (при *магнетогидростатической и магнетогидродинамической сепарации*).

Выпуск руды – это извлечение обрушенного полезного ископаемого из очистного пространства через рудоспуски или дучки под действием силы тяжести. Через рудоспуски полезное ископаемое выпускают в откаточные сосуды (вагонетки), через дучки – на горизонт выпуска руды (скреперования, вторичного дробления).

Выпуск руды из обрабатываемых подземным способом блоков (при системах разработки с магасинированием руды или с обруше-

нием вмещающих пород) происходит из объемов взорванной или обрушенной руды в виде *эллипсоида вращения*, располагающегося над выпускным отверстием, при этом большая ось эллипсоида ориентирована вдоль оси *выпускного отверстия*.

Расстояние между выпускными отверстиями выбирают таким, чтобы обеспечить *максимально возможное извлечение руды* из обрабатываемого блока при *минимально возможном её разубоживании*. Это расстояние зависит от крупности отбитой (или обрушенной) руды и её сыпучести.

2.6. Горное давление

Горное давление – это явление, обусловленное силами гравитации, вызывающее напряжения и деформации, возникающие в массиве горных пород. Его влияние необходимо учитывать при оценке деформаций и напряжений в стенках выработок и скважин, а также в целиках при подземной разработке полезных ископаемых. Эти напряжения и деформации при креплении подземных горных выработок возникают на поверхности контакта «порода – крепь» в результате действия, главным образом, гравитационных и тектонических сил, а также при изменении температуры разных слоёв земной коры.

Формой проявления горного давления является *деформирование горных пород*, которое приводит к потере ими устойчивости, формированию нагрузок на крепь, динамическим явлениям: *горным ударами, внезапным выбросам*. Поэтому при проведении горных выработок предварительно рассчитывают горное давление с целью определения прочности несущих конструкций подземных сооружений (стенок выработок, целиков и крепей) и выбора способа управления горным давлением.

2.7. Горный удар

Горный удар – это явление внезапного быстропотекающего разрушения предельно напряжённой части массива полезного ископаемого (породы), прилегающей к подземной выработке. Горные удары сопровождаются выбросом полезного ископаемого (пород) в горную выработку, сильным звуковым эффектом, возникновением мощной воздушной волны.

Горный удар вызывается наличием в массиве горных пород тектонических напряжений, превышающих гравитационные напряжения, иногда в несколько раз.

В горных ударах участвуют потенциальная энергия упругого сжатия пласта полезного ископаемого в очаге разрушения и энергия упругих деформаций окружающих пород. Динамический характер потери устойчивости при горных ударах обусловлен превышением притока энергии над её поглощением при разрушении. По силе проявления горных ударов выделяют стреляния, толчки, микроудары и собственно горные удары. Последние проявляются в *краевых частях подготовительных и очистных выработок, в целиках*.

2.8. Внезапный выброс

Внезапный выброс – это явление самопроизвольного выброса газа, твёрдого полезного ископаемого (угля, соли) или вмещающей породы в подземную горную выработку из забоя или призабойной зоны массива; продолжительность внезапного выброса – до нескольких секунд.

С увеличением глубины разработки полезного ископаемого возрастают частота и сила внезапных выбросов, которые происходят, как правило, через несколько минут после прекращения работ в забое горной выработки. В процессе внезапного выброса в пласте полезного ископаемого или в массиве горных пород образуется полость обычно грушевидной или кавернообразной формы объёмом до нескольких тысяч кубических метров.

Между полостью выброса в угольном пласте и плоскостью забоя иногда остаётся целик толщиной 2...4 м. Горная выработка при внезапных выбросах заполняется раздробленной массой полезного ископаемого, породой и природным газом.

Внезапные выбросы угля и газа происходят в основном на глубинах свыше 250 м в пластах мощностью от 0,5 до 2,5 м, при этом чем больше мощность угольного пласта, тем выше интенсивность выброса.

3. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

3.1. Тепловое расширение горных пород

Горные породы, как и все вещества, имеют атомно-молекулярную структуру. С повышением температуры горных пород в кристаллической решётке слагающих минералов увеличивается расстояние между атомами и молекулами, в результате чего минералы и в целом горные породы расширяются при условии, что внешнее давление остаётся постоянным.

Тепловое расширение скальных крепких горных пород при их локальном интенсивном нагреве обеспечивает *термическое хрупкое разрушение при бурении и расширении скважин огневыми станками, термической поверхностной обработке каменных изделий*. В этом случае в горной породе возникают упругие термические напряжения как в отдельных её минералах, так и на их границах (структурные термические напряжения). Когда эти напряжения (в основном растягивающие и сдвиговые) достигают предела прочности соответственно на растяжение или сдвиг, происходит поверхностное разрушение породы в виде шелушения.

Тепловое расширение скальных крепких пород лежит в основе разрушения негабаритов электротермическим способом, когда в канале породы, соединяющем два электрода, расположенных на противоположных сторонах негабарита, происходит нагрев, что приводит к возникновению термических растягивающих напряжений, которые направлены тангенциально к каналу теплового пробоя между электродами. При достижении предельных значений этих растягивающих напряжений происходит разрушение негабарита.

3.2. Фазовые переходы в минералах и горных породах

Фазовые переходы подразделяются на *фазовые переходы первого и второго рода*. При фазовых переходах первого рода выделяется или поглощается теплота, которая называется *теплотой фазового перехода*.

Фазовые переходы первого рода имеют место при агрегатных превращениях вещества. Существует четыре *агрегатных состояния*: твёрдое, жидкое, газообразное и плазменное. Два первых агрегатных состояния в связных водонасыщенных породах имеют место при проходке в них подземных выработок с применением предварительного замораживания пород.

При замораживании связанных водонасыщенных пород в объёме *ледопородного ограждения* в форме полого цилиндра вокруг будущей горной выработки происходит выделение теплоты фазового перехода «вода – лёд», для чего требуется такой расход хладонотителя в замораживающих колонках, который бы обеспечивал не только переход воды из жидкого состояния в твёрдое, но и нейтрализацию выделяющего тепла при агрегатном превращении «вода – лёд».

При оттаивании ледопородного ограждения после сооружения горной выработки, внутри него происходит агрегатное превращение «лёд – вода», что сопровождается поглощением теплоты фазового перехода.

Фазовые переходы второго рода (полиморфные превращения) имеют место в минералах и горных породах при изменении их температуры. При этом в их твёрдом состоянии происходит *перекристаллизация*, что сопровождается скачкообразным изменением таких макроскопических свойств, как теплоёмкость, теплопроводность, коэффициент теплового расширения. Например кварц при температуре 573 °С переходит из β-кварца в α-кварц (при этом он перекристаллизовывается из тригональной сингонии в гексагональную), а при температуре 870 °С α-кварц переходит в α-тридимит, при этом его сингония не изменяется.

В настоящее время известно около 400 минералов, которым присуще явление полиморфизма.

3.3. Поверхностное натяжение воды

Энергия молекул воды, входящих в соприкосновение с минеральными частицами породы или с твёрдой поверхностью добычного и транспортного горного оборудования, отлична от энергии молекул внутри неё. У внутренних молекул воды все соседние молекулы энергетически одинаковы, что соответствует их состоянию равновесия. Поверхностные молекулы воды, входящие в соприкосновение с минеральными частицами породы или с рабочей поверхностью добычного или транспортного горного оборудования, имеют определённую нескомпенсированную энергию. Разность между энергией поверхностных молекул воды и энергией её внутренних молекул называется *поверхностной энергией*. Она пропорциональна числу поверхностных молекул (т.е. поверхности соприкосновения с твёрдым телом) и характеризуется *коэффициентом поверхностного натяжения*.

Поверхностное натяжение физически связанной воды в связанных породах определяет собой и их склонность к прилипанию к твёрдой поверхности добычного и транспортного горного оборудования.

Эта склонность характеризуется *капиллярной составляющей адгезии* (прилипания) связанных пород к указанным поверхностям. Для уменьшения этой составляющей адгезии связанных пород к твёрдой поверхности добычного и транспортного горного оборудования её покрывают гидрофобным (водоотталкивающим) материалом, способствующим уменьшению сил поверхностного натяжения воды.

Поверхностное натяжение воды с добавлением в неё различных веществ (повышающих или понижающих её поверхностное натяжение) используется при *обогащении флотацией*.

Обогащение полезных ископаемых методом *флотации* основано на применении *флотореагентов*, обеспечивающих или увеличение поверхностного натяжения жидкости при соприкосновении с извлекаемым минералом, или уменьшение поверхностного натяжения при контакте с извлекаемым минералом. В первом случае флотореагенты называются *подавителями*, они обеспечивают погружение извлекаемого минерала на дно флотоустановки, во втором случае – *собирателями*, они обеспечивают всплытие извлекаемого минерала на поверхность флотоустановки.

3.4. Капиллярность

Сыпучие и связанные горные породы имеют мельчайшие зазоры между отдельными минеральными частицами. Эти зазоры можно аппроксимировать как капилляры, по которым возможно движение жидкости. Это происходит под действием *капиллярного давления*, обусловленного искривлением поверхности раздела фаз на границе «твёрдая поверхность – жидкость». Для выпуклой поверхности раздела фаз капиллярное давление положительно. Это свойственно минералам и породам, обладающим свойством *гидрофобности* (угли, сланцы). Для вогнутой поверхности это давление отрицательно, что соответствует смачиванию минералов и пород неорганического происхождения (магматические и метаморфические породы), а также смачиванию рабочих поверхностей добычного и транспортного горного оборудования. Следствием этого является налипание, а в зимний период года – замерзание связанных пород на добычное и транспортное горное оборудование.

В значительно меньшей степени капиллярность свойственна скальным и полускальным породам.

Движение влаги по капиллярам породы происходит при наличии градиента влажности в различных её участках или же под действием внешнего гидравлического давления. Последнее имеет место при *гидрорасчленении угольных пластов* с целью их дегазации (удаления метана) перед добычей угля.

Движение влаги по капиллярам пород возможно и под действием градиента температуры. Влага в породе при этом движется от мест с более высокой температурой в места с более низкой температурой. Это явление называется *термодиффузией влаги* и широко используется как средство борьбы с налипанием, а в период отрицательных температур как средство борьбы с намерзанием связанных пород на рабочую поверхность транспортного горного оборудования. Примером этого может служить *обогрев рабочей поверхности кузовов автосамосвалов* выхлопными газами их двигателей.

3.5. Сорбция

Известно, что любая поверхность вещества обладает *свободной поверхностной энергией*. В практике горного производства такой поверхностью является рабочая поверхность добычного и транспортного горного оборудования.

В горном производстве примером сорбции является энергетическое поглощение рабочей поверхностью добычного и транспортного горного оборудования частиц сыпучей и особенно связанной горной породы. Чем мельче частицы породы, тем сильнее силы сорбции. Последнее обстоятельство обусловлено тем, что с уменьшением размера минеральных частиц породы увеличивается их *нескомпенсированный электростатический потенциал*. Минеральные частицы рыхлой и особенно связанной породы в процессе их сорбции к рабочей поверхности добычного и транспортного горного оборудования являются *сорбентом*, а рабочая поверхность этого оборудования – *сорбтивом*. Это взаимодействие, как было сказано выше, называется *адгезией*. Взаимодействие минеральных частиц породы между собой называется *когезией*. Когезионное взаимодействие минеральных частиц между собой в значительно большей степени свойственно скальным породам в отличие от рыхлых и связанных пород. При этом силы когезии в скальных породах увеличиваются с уменьшением размера минеральных частиц, слагающих данную породу. Подтверждением этого является тот факт, что мелкозернистые породы прочнее крупнозернистых при одинаковом минеральном составе.

3.6. Диффузия

Диффузия в практике горного производства – это процесс выравнивания содержания жидкости или газа в горной породе при наличии градиента влажности или газообильности в ней.

Перемещение жидкости или газа в порах породы под действием температуры называется *термодиффузией*. Об использовании этого физического эффекта в горном производстве было сказано выше (см. разд. 3.4) применительно к борьбе с налипанием и намерзанием связанных пород на рабочую поверхность транспортного оборудования (самосвалов).

3.7. Тепломассообмен

Тепломассообмен в горном производстве имеет место при *сушке горной массы* и при *термическом хрупком разрушении скальных горных пород*. Передача тепла от газообразного теплоносителя к породе осуществляется при этом за счёт *конвекции*.

Процесс сушки концентрата с целью предотвращения его смерзания применяют горнообрабатывающие предприятия при отправке его на металлургические заводы в зимний период времени.

При сушке концентрата его влажность доводят до значения не более 3 %. При этой влажности концентрат не смерзается.

Сушку концентрата осуществляют в *колонных аппаратах* со встречными потоками: сверху свободно падают минеральные частицы концентрата, а снизу навстречу ему подают газовый теплоноситель. В таких аппаратах концентрат помимо его сушки за счёт конвективного теплообмена в процессе падения сверху вниз досушивается в нижнем, так называемом *кипящем слое*.

Скорость движения газового теплоносителя снизу вверх в сушильных аппаратах подбирают такой, чтобы она была меньше *скорости витания* самых мелких частиц концентрата, что предотвращает их выброс в атмосферу.

При термическом хрупком разрушении скальных горных пород интенсивность их конвективного теплообмена с высокотемпературной газовой струей зависит от *коэффициента теплоотдачи* (количества тепла, поступающего от теплоносителя к породе в единицу времени на единицу её площади). Этот коэффициент в свою очередь зависит от скорости высокотемпературного газового теплоносителя. Скорость высокотемпературного (примерно 2000 К) газового теплоносителя для хрупкого термического разрушения скальных горных пород должна быть не менее 3...4 чисел Маха (*числом Маха называется отношение скорости потока к скорости звука в этом потоке*).

4. ГИДРОСТАТИКА И ГИДРОАЭРОДИНАМИКА

Гидростатика изучает закономерности равновесия в жидкостях и газах при воздействии на них внешних сил.

Гидроаэродинамика изучает закономерности движения жидкостей и газов при их движении относительно твёрдых тел.

Эти закономерности основаны на двух фундаментальных законах: *законе Архимеда*, утверждающем, что на твёрдое тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, равная силе тяжести жидкости, вытесненной твёрдым телом; *законе Паскаля*, в соответствии с которым внешняя сила, приложенная к поверхности жидкости или газа, передаётся по всем направлениям без изменений. Закон Паскаля выполняется вследствие того, что молекулы жидкости или газа имеют возможность свободного перемещения относительно друг друга.

Закон Паскаля положен в основу принципа работы всех *гидронасосов* и *компрессоров*, используемых в практике горного производства.

4.1. Течение жидкости и газа

Упорядоченное движение жидкостей и газов без межслойного перемешивания называется *ламинарным течением*. Оно имеет место при скоростях жидкостей и газов, не превышающих некоторого порога. При скоростях жидкости или газа выше этого порога их движение осуществляется по сложным беспорядочным траекториям. Такое их движение называется *турбулентным*.

При ламинарном течении жидкостей и газов в трубопроводах гидронасосов и компрессоров передача энергии от слоя к слою вдоль направления движения потока происходит с равномерным убыванием его скорости от центра к стенкам трубопровода.

Для ламинарного движения потока справедливо *уравнение (закон) Бернулли*, который утверждает, что полное давление (P) ламинарного потока жидкости или газа при встрече с твёрдой преградой складывается из статического давления жидкости или газа, создаваемого насосом или компрессором (P_0) и динамического (P_d), обусловленного плотностью (ρ) и скоростью жидкости или газа (v) при их встрече с твёрдой преградой. При этом

$$P_d = \frac{\rho v^2}{2}.$$

Закон Бернулли в практике горного производства используется при *гидродобыче полезных ископаемых* с помощью водяной струи и при *очистке транспортных средств* (думпкаров) от *налипшей или намёрзшей горной массы*.

При встрече водяной или газовой струи с разрушаемой горной породой (при гидродобыче) или с внутренней поверхностью думпкара (при очистке этой поверхности от прилипшей или примёрзшей горной массы) скорость струи вдоль потока при встрече с преградой (горной породой при гидродобыче или с внутренней поверхностью думпкара при его очистке от прилипшей или намёрзшей горной массы) становится равной нулю. При этом формируется *пристеночная струя*, направленная вдоль поверхности пород или вдоль внутренней поверхности думпкара. И в том и в другом случае скорость пристеночного потока на поверхности преграды равна нулю. По мере удаления от этой преграды скорость пристеночной струи возрастает, достигает максимума на некотором удалении от преграды, а затем по мере удаления от преграды скорость пристеночной струи убывает, стремясь к нулю. При этом давление на поверхности преграды в направлении, перпендикулярном движению струи (перпендикулярно поверхности преграды), равно атмосферному, а по мере удаления от поверхности преграды это давление уменьшается, достигает минимума в точках максимальной скорости пристеночной струи в связи с её максимальным разрежением (уменьшением плотности), а затем возрастает до атмосферного.

Таким образом создаётся *отрицательное давление*, направленное перпендикулярно поверхности преграды, что обеспечивает растягивающее напряжение, приложенное к поверхности преграды. Когда это отрицательное давление превышает предел прочности породы на растяжение, происходит её разрушение (при гидродобыче), или же отрыв прилипшей горной массы от внутренней поверхности думпкара (при их очистке от прилипшей или намёрзшей горной массы).

Отрицательное давление в точках максимальной скорости пристеночной струи достигается равным пределу прочности на растяжение породы при её гидродобыче или же значению силы адгезии прилипшей или примёрзшей горной массы к внутренней поверхности думпкаров при её очистке горячей струёй реактивного авиационного двигателя. Это отрицательное давление достигается при достаточной для этого скорости ортогонального потока водяной струи (при гидродобыче пород) или же ортогональной газовой струи реактивного авиадвигателя (при очистке транспортных средств от налипшей или намёрзшей породы).

4.2. Скачок уплотнения

Явление формирования скачка уплотнения имеет место в случае ортогонального торможения высокоскоростной и высокотемпературной газовой струи о поверхность скальных пород при их хрупком термическом разрушении в процессе поверхностной термической обработки каменных изделий или же при термическом способе бурения и расширения взрывных скважин на карьерах. При этом в непосредственной близости от поверхности разрушаемой породы в направлении ортогонального торможения струи формируется скачок уплотнения в виде эллипсоида вращения с максимальным диаметром, расположенным параллельно разрушаемой поверхности породы. В скачке уплотнения скорость газовой струи в ортогональном направлении становится равной нулю, а температура, плотность и давление достигают максимальных значений. За скачком уплотнения начинает формироваться пристеночная струя, о чём было сказано в предыдущем разделе.

4.3. Гидравлические удары

Гидравлические удары возникают в жидкостях при резком повышении их давления. Это явление возникает при быстром перекрывании задвижек на водяных трубопроводах, а также в местах их сильного изгиба. Снизить отрицательное влияние гидравлического удара в этих случаях возможно медленным перекрыванием задвижек на водяных трубопроводах, а также путём плавного уменьшения их кривизны в местах поворота.

В практике горного производства имеет место и положительное влияние гидравлических ударов при электрогидравлическом способе разрушения негабаритов (электрогидравлический эффект Юткина). В этом случае в шпур, пробуренный в негабарите, заливают воду и помещают два электрода, с помощью которых обеспечивают мощный электрический разряд в воде. При этом в воде формируется гидравлический удар, действующий на стенки шпура, что обеспечивает растягивающие напряжения в негабарите, под действием которых негабарит разрушается.

4.4. Внезапный прорыв вод и пльвунов

Это явление сопровождается усиленным поступлением в горную выработку воды или рыхлых водонасыщенных пород, обладающих пльвуниными свойствами. Внезапный прорыв вод и пльвунов происходит в результате самопроизвольного или принудительного разрушения

водоупорных пород в выработке. Это явление наблюдается чаще всего в начальной стадии освоения обводнённых месторождений полезных ископаемых при отсутствии предварительного дренажа.

Наибольшую опасность внезапные прорывы воды и пьезунов представляют при проходке наклонных и крутопадающих выработок.

Продолжительность внезапных прорывов пьезунов составляет несколько минут (реже часов), а воды – несколько суток или месяцев.

Первоначальные большие притоки воды обычно быстро уменьшаются, приближаясь к постоянной величине расхода, или полностью прекращаются при исчерпании ресурсов воды, заполнении выработок пьезунами или достижении равновесия между силами гидродинамического давления и трения грунтовой массы о стенки выработки.

Одной из основных причин внезапных прорывов на шахтах и карьерах является недостаточное снижение напора подземных вод при проведении *дренажных работ* или неудовлетворительная защита горных выработок от воды *барражными устройствами.*

5. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

5.1. Механические колебания

Колебание – это процесс, повторяющийся через одинаковые промежутки времени. *Механические колебания – это процесс отклонения тела от положения равновесия в одну и в другую сторону на одинаковое расстояние через одинаковые промежутки времени.*

Механические колебания широко используются в процессах разрушения горных пород. Так, в практике горного производства широко используется *ударно-вращательное бурение* с помощью перфораторов и *ударное с помощью отбойных молотков*. В этих случаях при возвратно-поступательных колебаниях породоразрушающего инструмента, направленных вдоль его оси, уменьшаются силы его трения о породу, что приводит к снижению энергоёмкости разрушения породы и увеличению производительности инструмента.

Кроме этого в практике бурения скважины используется *вибробурение* (виброшарошечное бурение в частности), когда на шарошечное долото одновременно со статическим давлением действуют вибрационные колебания, генерируемые с помощью виброустановок, расположенных непосредственно над шарошечным долотом.

При механической обработке каменных изделий широко используется *бучардирование – процесс ударно-вращательного воздействия на обрабатываемую поверхность с помощью специального инструмента – бучарды*, рабочий орган которой снабжён штырями из твёрдого сплава. На рабочий орган бучарды передаются ударные механические колебания, генерируемые сжатым воздухом, по принципу перфоратора или отбойного молотка.

5.2. Акустика

Акустика – это явление, связанное с движением прямого и отражённого звукового сигнала при встрече с неоднородностью среды или преградой.

В практике горного производства это явление широко используется для контроля степени трещиноватости массива горных пород, его текстуры, наличия неоднородностей, контроля технологических процессов (например, контроля диаметра и толщины ледопородного ограждения при сооружении горных выработок в связных водонасыщенных породах).

Все способы акустического контроля параметров технологических процессов горного производства основаны на *эффекте отражения акустической волны при встрече с неоднородностью в массиве*.

Акустические колебания в ряде случаев, как и механические колебания, используют для интенсификации технологических процессов горного производства (например, для интенсификации *процесса дегламации продуктов измельчения руды на обогатительных фабриках*).

5.3. Волновое движение

Волна – это возмущение, распространяющееся с конечной скоростью в пространстве и несущее в себе энергию.

Волновое движение сопровождается переносом энергии без переноса вещества.

В практике горного производства волновое движение в массиве горных пород возникает при взрывных работах. Эти движения по своей амплитуде затухают по мере удаления от эпицентра взрыва в массиве горных пород.

При массовых взрывах на карьерах эти колебания (сейсмические волны) в горном массиве могут вызвать деформации, которые негативно влияют на устойчивость зданий и сооружений, если последние находятся в зоне их действия. В связи с этим существуют нормативные правила по массовым взрывам на карьерах. Этими правилами предусмотрено максимально допустимое количество взрывчатого вещества (ВВ), взрываемого одновременно на карьерах. Это количество ВВ регламентируется в зависимости от расстояния до ближайших зданий и сооружений.

6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

6.1. Электропроводимость

Известно, что электропроводимость металлов с повышением температуры уменьшается, а электрическое сопротивление увеличивается.

У полупроводников и диэлектриков, которыми являются горные породы, с повышением температуры электрическое сопротивление падает, а электропроводимость увеличивается, что используется при *электротермическом способе разрушения негабаритов* при разработке железистых кварцитов на карьерах.

При этом два электрода располагают на противоположных сторонах негабарита. На эти электроды подаётся высокое (до 3000 В) напряжение. Под действием этого напряжения в канале железистых кварцитов негабарита, соединяющем электроды, возникает небольшой ток. При этом порода в канале нагревается, что приводит к увеличению проводимости в нём, а это, в свою очередь, приводит к увеличению температуры. Далее этот процесс происходит лавинообразно. В конечном итоге железистые кварциты в объёме канала пробоя расплавляются, что приводит к возникновению тангенциальных (по отношению к каналу) термических напряжений в негабарите. При увеличении диаметра расплавленного канала до определённого значения (в зависимости от размера негабарита) растягивающие термические напряжения достигают предела прочности на растяжение и негабарит разрушается.

6.2. Электромагнитное поле

Электромагнитное поле является совокупностью электрического и магнитного полей. Изменяющиеся электрические и магнитные поля индуцируют друг друга.

Импульсные электромагнитные поля возможно использовать для обработки руды, содержащей *минералы-ферромагнетики, пьезострикторы и электрострикторы, перед её измельчением в мельницах на обогатительных фабриках* с целью снижения энергоёмкости измельчения руды и увеличения производительности мельниц по готовому классу.

В этом случае под действием магнитного поля в минералах-ферромагнетиках возникает явление *магнитострикции*. При этом минералы-ферромагнетики по одним кристаллографическим осям

удлиняются, а по другим – сокращаются. В целом минералы ферромагнетики при этом меняют свою форму и размеры. В связи с явлением магнитострикции в минералах-ферромагнетиках на границе срастания их с соседними минералами, возникают сдвиговые напряжения, что при импульсном магнитном воздействии приводит к ослаблению межзеренных связей, а это в свою очередь обеспечивает снижение энергоёмкости измельчения руды. Опытные-промышленные испытания, проведённые на железистых кварцитах, содержащих минералы магнетита (они являются ферромагнетиками), позволили снизить энергоёмкость измельчения руды на 10...12 % и повысить производительность мельниц по готовому классу на 5...6 %.

При импульсной электромагнитной обработке руды, содержащей минералы-электрострикторы и пьезостриктеры (такими минералами являются минералы кварца, магнетита и частично гематита) происходит также изменение их формы и размеров.

Опытные-промышленные испытания, проведённые на черновом концентрате рудного, тонковкрапленного в зёрна кварца золота, показали снижение потери золота в хвостах с 6...8 % до 1...2 %.

6.3. Магнетики

К магнетикам относятся твёрдые вещества, способные под действием магнитного поля приобретать собственный магнитный момент (намагничиваться). По величине и направлению этого момента твёрдые вещества делятся на диамагнетики и парамагнетики.

В практике горного производства широко используется магнитная сепарация для извлечения минералов-парамагнетиков из руды, предварительно измельчённой до размеров меньше меньшего размера минерала-парамагнетика. Магнитная сепарация повсеместно применяется при обогащении железистых кварцитов с целью извлечения минералов магнетита.

Магнитный сепаратор представляет собой корытообразную ёмкость с вращающимся магнитным барабаном, расположенным в этой ёмкости вдоль её оси. В ёмкость по пульповоду подаётся пульпа, содержащая железистые кварциты, измолотые до размеров готового класса. Готовым классом считается размер продуктов измельчения меньше меньшего размера минералов магнетита. На разных горно-обогатительных комбинатах, добывающих железистые кварциты, этот размер изменяется от 40 до 70 мкм (микрон).

При вращении магнитного барабана, нижняя половина которого находится в пульпе корыта, частицы магнетита притягиваются к барабану. В верхней части магнитного барабана (выше уровня пульпы в корыте) устанавливаются скребки, которые очищают магнитный барабан от зёрен магнетита. Получаемый таким образом магнетитовый концентрат направляют для сушки в горизонтальные сушильные печи, где он расстилается на паллеты (конвейер из металлических секций). Температура в печи постепенно увеличивается от естественной температуры на входе в неё до 700...800 °С на выходе. Длина печи составляет порядка 25 м. Полученный сухой магнетитовый концентрат направляется потребителям (на металлургические заводы) или же на окомкование для получения окатышей, которые затем поступают на металлургические заводы.

Литература

Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. Физические величины: Справ. М.: Энергоатомиздат, 1991.

Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. М.: Недра, 1984.

Учебное издание

Гончаров Степан Алексеевич
Пащенко Павел Николаевич
Плотникова Анна Валерьевна

ФИЗИКА ГОРНЫХ ПОРОД

**Физические явления и эффекты в практике горного
производства**

Учебное пособие

Редактор *Т.А. Кравченко*

Компьютерная верстка *М.А. Шамарина*

Подписано в печать 11.03.16	Рег. № 670	Уч.-изд. л. 1,7
Формат 60 × 90 ¹ / ₁₆	Электронная версия	Заказ 4978

Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»,
119049, Москва, Ленинский пр-т, 4

Издательский Дом МИСиС,
119049, Москва, Ленинский пр-т, 4
Тел. (495) 638-45-22

Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСиС
119049, Москва, Ленинский пр-т, 4
тел. (499) 236-76-17, тел./факс (499) 236-76-35

