Горные машины

В двух частях

Часть 1

Основы теории

Для студентов учреждений
высшего образования

Горные машины

Допущено
Министерством образования
Республики Беларусь
в качестве учебного пособия для студентов
учреждений высшего образования
по специальностям «Горные машины
и оборудование», «Разработка месторождений
полезных ископаемых»

Под общей редакцией В.Я. Прушака

В двух частях

Часть 1

Основы теории

Минск
«Вышэйшая школа»
2018

УДК 622(075.8)
ББК 33я73
Г69

А в т о р ы: Г.В. Казаченко, Г.А. Басалай, В.Я. Щерба, В.Я. Прушак

Р е ц е н з е н т ы: кафедра «Теоретическая механика и теория механизмов и машин» учреждения образования «Белорусский государственный аграрно-технический университет» (заведующий кафедрой доктор технических наук, профессор *А.Н. Орда*); доцент кафедры «Гидропневмоавтоматика» учреждения образования «Гомельский государственный университет имени П.О. Сухого» кандидат технических наук *В.В. Пинчук*

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или любой ее части не может быть осуществлено без разрешения издательства.

Г69 **Горные** машины : учебное пособие. В 2 ч. Ч. 1. Основы теории / Г. В. Казаченко [и др.] ; под общ. ред. В. Я. Прушака. – Минск : Вышэйшая школа, 2018. – 183 с. : ил.
ISBN 978-985-06-2931-9.

Отражены общие вопросы теории горных машин как сложных технических систем для выемки полезных ископаемых из земной коры. Рассматриваются основные способы формирования уравнений состояния машин в процессе их работы. Пространственное положение машин определено с помощью декартовых координат какой-либо характерной точки и углов Эйлера. Взаимодействие исполнительных органов с массивом горной породы характеризуется рядом параметров, среди которых значительное внимание уделено глубине резания и затратам энергии на разрушение породы. Освещены также способы подачи исполнительных органов на забой и механизмы перемещения горных машин.

Для студентов учреждений высшего образования по специальностям «Горные машины и оборудование», «Разработка месторождений полезных ископаемых». Может быть полезно для специалистов горнодобывающей промышленности, занимающихся созданием и эксплуатацией горной техники.

УДК 622(075.8)
ББК 33я73

ISBN 978-985-06-2931-9 (ч. 1)
ISBN 978-985-06-2930-2

© Оформление. УП «Издательство “Вышэйшая школа”», 2018

ПРЕДИСЛОВИЕ

В Республике Беларусь добыча полезных ископаемых обеспечивает деятельность многих отраслей промышленности, строительства и сельского хозяйства. В настоящее время значительная доля разведанных месторождений полезных ископаемых разрабатывается. Среди таких месторождений в первую очередь следует отметить залежи калийных солей с общими запасами более 5 млрд т, которые сосредоточены в Припятском прогибе: Старобинское, Петриковское и Октябрьское месторождения. Сейчас основная добыча калийных солей ведется на Старобинском месторождении. Петриковское месторождение находится в состоянии подготовки к промышленной добыче. Наряду с добычей калийных солей ведется добыча каменной (пищевой) соли, запасы которой (около 20 млрд т) расположены в трех крупнейших месторождениях Припятского прогиба: Мозырском, Давыдовском и Старобинском.

Ведется добыча некоторых видов горючих полезных ископаемых – нефти и попутного газа, а также торфа. Разведанные и освоенные нефтяные запасы позволяют ежегодно добывать около 1,5 млн т нефти при ежегодной потребности Беларуси более 12 млн т. Торфяные месторождения расположены по всей территории республики. Их общие запасы составляют около 4 млрд т при ежегодной добыче около 3 млн т для производства топливных брикетов и использования в сельском хозяйстве. На территории республики известны также месторождения бурого угля и горючих сланцев, которые в настоящее время не разрабатываются, в основном по экономическим причинам.

В сельском хозяйстве для раскисления почв используется доломитовая мука – основная продукция предприятия (карьера) по добыче доломита, расположенного в Витебском районе (Руба). Ежегодная добыча доломита достигает почти 4 млн т. В Республике Беларусь добывается значительное количество сырья для строительной промышленности. Прежде всего это строительный камень, песчано-гравийные смеси, стекольные и формовочные пески, глины и сырье для производства цемента. Среди производств по добыче и переработке строительных материалов наиболее крупным и известным предприятием является РУПП «Гранит».

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедр горного профиля Белорусского национального технического университета и специалистам ряда предприятий горной промышленности и горного машиностроения, ценные советы которых учтены при подготовке пособия. Чрезвычайно признательны авторы рецензентам – доктору технических наук, профессору А.Н. Орде, кандидату технических наук В.В. Пинчуку за важные замечания, способствовавшие улучшению содержания книги.

Авторы

1. ОБЩАЯ СТРУКТУРА И ОСНОВЫ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ МАШИН

1.1. Структура современных горных машин и требования к ним

Большое количественное и качественное разнообразие горных машин затрудняет их отображение какой-либо одной общей структурной, функциональной или расчетной схемой. Тем не менее в целях систематизации изложения будем рассматривать горную машину как техническую систему, состоящую из механизмов и устройств (рис. 1.1).

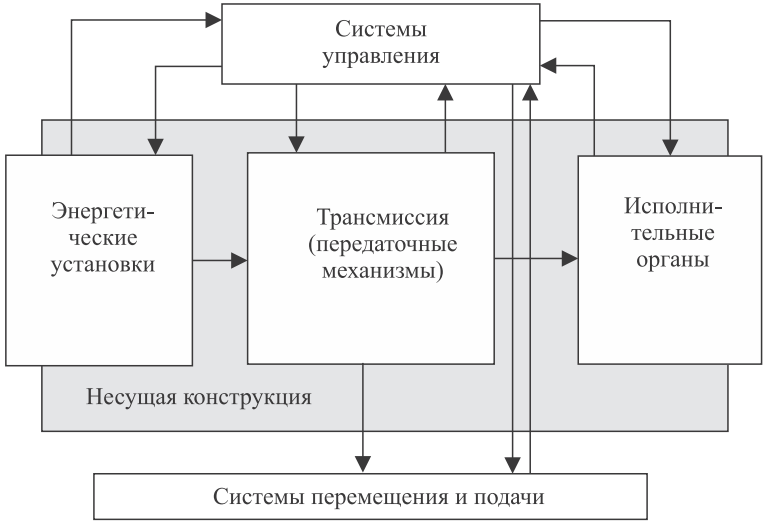


Рис. 1.1. Структурная схема горной машины

Представленная на рис. 1.1 схема указывает на техническую сложность горной машины как большой системы. Вместе с тем каждая часть этой системы также имеет непростую конструкцию и в этом смысле может быть изучена самостоятельно. Исполнительные органы и другие части машины так или иначе взаимодействуют с горной породой, свойства которой в значительной степени определяют конструкцию и режимные параметры работы горных машин. Современные технологии горного производства, объемы горных работ и условия их выполнения, а также уровень развития техники позволяют сформу-

лировать к таким машинам ряд требований, которые можно разделить на общие и специальные.

Общие требования подразделяются на технические, экономические, социальные и экологические. *Технические требования* обычно вносятся в документацию, сопровождающую машину весь ее жизненный цикл, и отражают ее технический уровень, надежность и условия эксплуатации. *Экономические требования* объединяют сведения о цене, уровне затрат при эксплуатации, ремонте и утилизации машины. *Социальные требования* подразумевают обеспечение необходимых санитарно-гигиенических условий работы персонала, безопасности и комфортности его труда, легкости и удобства управления. *Экологические требования* выражаются мероприятиями по защите окружающей среды от вредных воздействий, возникающих при работе машин.

В зависимости от конкретных условий эксплуатации к горным машинам предъявляется также ряд ***специальных требований***, ужесточающих их производство и эксплуатацию: взрыво- и пожаробезопасность, проходимость, маневренность, габаритные размеры и т.п. Например, габаритные требования выражают способность машины перемещаться в ограниченном пространстве горных выработок. Некоторые другие специальные требования зависят от конкретных условий работы тех или иных машин.

1.2. Основные свойства горных пород и их исчисление

Под **горными породами** понимают природные минеральные агрегаты, составляющие кору Земли. Горные породы по происхождению и образованию их месторождений делятся на магматические, осадочные и метаморфические. ***Магматические породы*** образовались путем подъема и извержения расплавленных минералов мантии, затвердевших на поверхности земли. ***Осадочные породы*** – это породы, образовавшиеся за счет природных процессов, происходящих на поверхности (механический перенос, химические и биологические процессы, атмосферные воздействия). Под ***метаморфическими породами*** понимают породы, образовавшиеся за счет изменений более ранних магматических и осадочных пород.

В зависимости от вида и силы связей между минеральными агрегатами горные породы делят на твердые, связные и рыхлые. Иногда к горным породам относят также воду и другие жидкие и газообразные минералы.

К ***твердым породам*** относят породы, в которых связи между образующими их минеральными агрегатами носят химическую природу и

определяют их прочный, жесткий характер (кварцит, гранит, базальт). ***Связные породы*** отличаются тем, что сила связи между образующими их минеральными агрегатами изменяется в зависимости от содержания воды, температуры и других физических свойств. К ***рыхлым породам*** относят породы, в которых связи между минеральными агрегатами практически отсутствуют.

Физические свойства горных пород – качественные и количественные характеристики их поведения при воздействии механических нагрузок и физических полей различной природы. Обычно эти свойства с количественной стороны определяются значениями физических величин, которые оцениваются технически нормированными методами с применением специальных измерительных приборов. Физические свойства горных пород обусловлены их механическими, тепловыми и электромагнитными характеристиками.

Наибольшее влияние на условия работы горных машин оказывают их механические характеристики – размерно-плотностные, прочностные, упругопластичные, реологические и др.

В группе размерно-плотностных свойств наиболее значимы плотность и фракционный состав природной либо измельченной тем или иным способом породы. ***Плотность*** ρ горных пород изменяется в земной коре от 1000 до 4700 кг/м^3. Ее определение основано на формуле

$$\rho = \frac{dm}{dV}, \tag{1.1}$$

где dm – дифференциал массы; dV – дифференциал объема, занимаемого породой.

В практических способах определения плотности используется интегральный вариант формулы (1.1): масса образца горной породы делится на его объем, т.е. $\rho = m/V$. Плотность горных пород тесно связана с рядом других характеристик: пористостью, трещиноватостью, степенью разрыхления, влажностью.

Фракционный состав горных пород в естественном состоянии, а также подвергнутых разрушению горнодобывающими и горноперерабатывающими машинами, оценивается с помощью относительных выходов частиц породы определенных размеров. Эти выходы определяются посредством применения различных законов распределения частиц по их размерам, выражаемых дифференциальными и интегральными кривыми распределения (рис. 1.2).

С помощью дифференциальной функции распределения легко подсчитать массу частиц породы с эквивалентными размерами от l_1 до l_2 в ее некотором объеме массой m. Выход таких частиц по массе

$$m_{l_1-l_2} = m\int_{l_1}^{l_2} f(l)\cdot dl, \qquad (1.2)$$

где $m_{l_1-l_2}$ – масса частиц с эквивалентными размерами в интервале $l_1 - l_2$; dl – дифференциал эквивалентного размера.

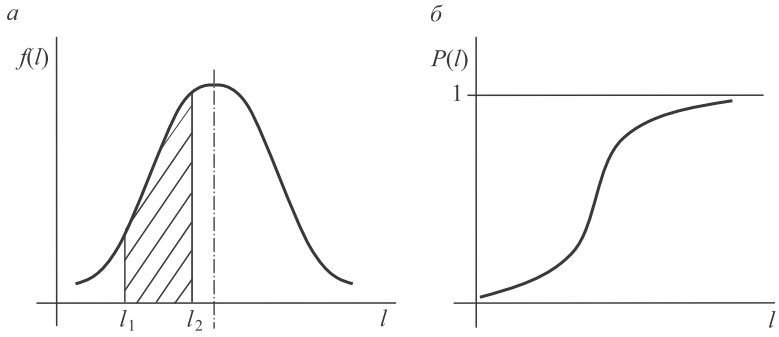


Рис. 1.2. Дифференциальная и интегральная кривые распределения частиц породы по размерам:
а – дифференциальная функция распределения *f*(*l*); *б* – интегральная функция распределения *P*(*l*); *l* – некоторый эквивалентный по реальному объему частиц породы размер, т.е. диаметр шара, ребро куба, объем которых равен объему частицы породы; *P* – вероятность содержания в породе частиц с эквивалентным размером, меньшим, чем *l*

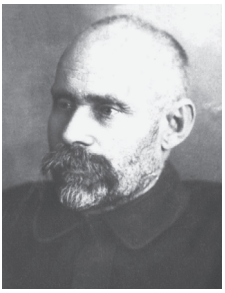
В качестве эквивалентного размера чаще всего выбирают диаметр.

Обычно дифференциальную функцию распределения строят или выбирают на основе математической обработки гистограмм распределения по результатам ситового или, в некоторых случаях, другого способа разделения частиц по размерам. Существует достаточно большое число законов распределения частиц породы по размерам, с помощью которых определяется фракционный состав породы как в естественном состоянии, так и на различных стадиях ее переработки.

Наиболее общей характеристикой прочностных свойств считается ***коэффициент крепости*** и построенная на его основе шкала прочности профессора М.М. Протодьяконова. Эта шкала основана на определении коэффициента крепости путем деления временного сопротивления сжатию породы на 10:

$$f = \frac{\sigma_{сж}}{10}, \qquad (1.3)$$

где $\sigma_{сж}$ – сопротивление сжатию, МПа.



Протодьяконов Михаил Михайлович (1874–1930, г. Ташкент) – русский и советский ученый в области горного дела.

Основные труды посвящены расчетам горного давления, рудничной крепи. Предложил шкалу оценки крепости горных пород. Работы Протодьяконова опубликованы в «Горном журнале» (например, «О некоторых попытках применения математики к горному искусству», 1909, и др.), а также отдельными изданиями («Давление горных пород и рудничное крепление», 1930, и др.).

Для рыхлых и текучих горных пород используются другие способы определения коэффициента f.

От коэффициента крепости горных пород зависят затраты на разрушение, особенно механическим способом, массива породы в залежи. Шкала Протодьяконова до настоящего времени является основой оценки прочностных характеристик большинства горных пород (табл. 1.1).

Таблица 1.1. **Категории горных пород в зависимости от значения коэффициента крепости**

Категория	Степень крепости	Примеры пород	Коэффициент крепости
1	Породы высшей крепости	Базальты, кварциты	20 и более
2	Очень крепкие	Крепкие граниты	15
3	Крепкие породы	Граниты, мрамор, очень крепкие известняки	10...8
4	Достаточно крепкие	Обыкновенные песчаники, железные руды, сланцы	6...5
5	Породы средней крепости	Глинистые сланцы, мергель,	5...4
6	Довольно мягкие породы	Мягкие сланцы, мел, крепкие угли, калийные соли, каменистый грунт	4...3
7	Мягкие породы	Глина, мягкий уголь, гравий	1...0,8
8	Землистые породы	Растительный грунт, торф, суглинок	0,6
9	Сыпучие породы	Песок, мягкий гравий, насыпной грунт	0,5
10	Плывущие породы	Плывуны, сапропель в водоемах, другие разжиженные породы	0,3

Существуют и более подробные шкалы прочности, построенные на основе того же коэффициента крепости.

Вместе с коэффициентом крепости Протодьяконова для определения прочностных свойств горных пород используют ***пределы прочности*** при сжатии, растяжении и изгибе. Упругие свойства горных пород чаще всего характеризуются модулем Юнга (модулем упругости) E и коэффициентом Пуассона μ. Хотя в классическом для материаловедения виде эти характеристики для большинства горных пород определить затруднительно, тем не менее в исследованиях и расчетах горных машин они используются очень часто и понимаются как величины, определенные классическим способом:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon},\ \mu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}, \tag{1.4}$$

где σ – напряжение растяжения (сжатия) образца породы; ε – относительная продольная деформация, $\varepsilon = dl / l$ (dl – удлинение образца, l – длина испытуемого образца); ε' – относительная поперечная деформация, $\varepsilon' = dl'/l'$ (dl' – поперечный размер образца, l' – изменение образца).

Помимо модуля упругости часто используется такая характеристика горных пород, как модуль сдвига

$$G = \frac{\tau}{\gamma}, \tag{1.5}$$

где τ – касательное напряжение при сдвиге; γ – угол сдвига.

Модули упругости E и сдвига G при соблюдении закона Гука связаны соотношением

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}. \tag{1.6}$$

В некоторых механизмах горные породы подвергаются всестороннему сжатию. Их свойства в таких случаях могут характеризоваться модулем объемной деформации

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)}. \tag{1.7}$$

Вышеприведенные модули могут, строго говоря, использоваться только при нагрузках на горную породу, не вызывающих деформаций, превышающих упругие. Под упругими понимаются такие деформации, которые исчезают после снятия нагрузок. В тех ситуациях, когда деформации пород не являются упругими, для описания напряженно-деформированного состояния применимы более сложные зависимости между напряжениями и деформациями.

Ряд горных пород при определенных внешних условиях даже в случаях небольших величин напряжений претерпевает деформации, которые не исчезают после снятия напряжений. Такие деформации называются пластическими. Под ***пластичностью*** горных пород понимается их свойство претерпевать деформации под действием внешних нагрузок без нарушения макросплошности и оставаться в деформированном состоянии после снятия нагрузок. Это свойство характеризуется показателем пластичности, который представляет собой отношение работы, затраченной на деформирование образца породы до его разрушения, к той ее части, которая соответствует упругим деформациям. В зависимости от значения этого коэффициента горные породы по пластичности делятся на шесть категорий (табл. 1.2).

Таблица 1.2. **Значения коэффициентов пластичности для различных категорий горных пород**

Значение коэффициента пластичности	1	2	3	4	5	6
Категория породы	1	1...2	2...3	3...4	4...6	Более 6

К первой категории относятся так называемые хрупкие породы, разрушение которых происходит в области упругих деформаций, т.е. до достижения предела пропорциональности между относительной деформацией и напряжением сжатия. Большинство пород проявляют как упругие, так и пластические свойства. Характер поведения различных пород под действием сжимающего напряжения представлен на рис. 1.3.

Для *хрупких пород* характерна линейная зависимость между напряжениями и деформациями вплоть до достижения предела прочности. *Упругопластичные породы* наделены упругими свойствами на некотором начальном участке кривой деформации и нелинейной зависимостью между деформацией и напряжением после достижения последним некоторого значения, называемого пределом пропорциональности. *Вязкопластичные породы* деформируются при небольших напряжениях и упругими свойствами не обладают.

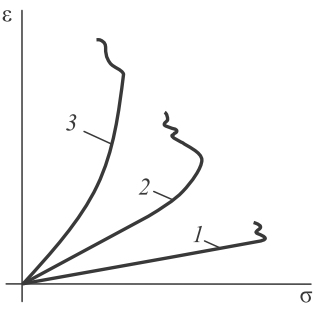


Рис. 1.3. Характерные кривые поведения горных пород под действием сжимающего напряжения:
1 – хрупкие породы; *2* – упругопластичные; *3* – вязкопластичные

Прочностные свойства горных пород характеризуются также их ***твердостью*** и ***контактной прочностью***. Сравнение твердости

горных пород выполняется методом царапания, на основе которого построена шкала Мооса – шкала эталонных значений твердости для десяти минералов: 1 – тальк; 2 – гипс; 3 – кальцит; 4 – флюорит; 5 – апатит; 6 – ортоклаз; 7 – кварц; 8 – топаз; 9 – корунд; 10 – алмаз. Поскольку на основании этой шкалы устанавливается только относительная твердость, то разработаны также методы определения количественных значений твердости. Эти методы в некоторой степени напоминают способы определения твердости металлов (Бринелля, Роквелла, Викерса). Вместе с тем их применение учитывает особенности поведения горных пород и их специально подготовленных образцов под нагрузкой со стороны разрушающего инструмента. Количественно показатели твердости и контактной прочности устанавливаются по результатам вдавливания в образцы горных пород инденторов с плоским круглым основанием. При этом показатели твердости определяются при вдавливании индентора в образец горной породы, поверхность которого отшлифована, а показатели контактной прочности – при вдавливании штампа в естественный образец горной породы (методы Шрейнера и Барона). Разница в их значениях составляет примерно 30%. Твердость обычно на 30% меньше контактной прочности. Обе характеристики измеряются в единицах давления.

Надежность работы горных машин в значительной мере зависит от степени износа породоразрушающего инструмента, которая в основном определяется ***абразивностью*** горных пород. В Институте горного дела имени А.А. Скочинского предложен метод оценки абразивности путем измерения потери массы стального стержня после его вращения при опоре на образец горной породы под действием осевого усилия 150 Н с частотой 400 об/мин в течение 10 мин. По этому показателю горные породы разделены на 8 классов: от малоабразивных с показателем абразивности менее 5 до абразивных в высшей степени с показателем абразивности более 90. Показатель абразивности измеряется в миллиграммах.

При расчетах производительности горных машин и энергоемкости разрушения пород часто пользуются такими свойствами горных пород, как пористость, трещиноватость, разрыхляемость.

Под ***пористостью*** горных пород понимается наличие в них пустот различной формы и размеров. Показателем пористости служит отношение объема пор к полному объему породы.

Трещиноватость оценивается пустотами в массиве, которые образованы трещинами. Хотя общепринятого показателя количественной оценки трещиноватости не существует, тем не менее она учитывается как при организации горных производств, так и при определении затрат мощности на их проведение. При этом рост трещиноватости

обычно уменьшает затраты энергии на разрушение массива полезного ископаемого, но увеличивает общие затраты на обеспечение безопасности ведения горных работ.

Трещиноватость и пористость горных пород влияют на такое их свойство, как ***разрыхляемость***, которое оценивается коэффициентом разрыхления

$$K_{\text{р}} = \frac{V_{\text{р}}}{V}, \tag{1.8}$$

где $V_{\text{р}}$ – объем породы после ее разрушения тем или иным способом; V – объем той же породы в массиве.

Величина коэффициента $K_{\text{р}}$ зависит как от состояния породы в массиве, так и от способа разрушения и изменяется в пределах от 1,05 до 2,5.

Важным показателем механических свойств большинства горных пород является их ***связность***, характеризующая силу связей между частицами и агрегатами, из которых они состоят. Это свойство можно считать противоположным свойству хрупкости и следует учитывать при выборе породоразрушающих инструментов. При разрушении пород гидравлическим способом и их транспортировании таким способом необходимо знать ***показатели вязкости*** гидросмесей и других жидких сред. Чаще всего используется показатель вязкости, введенный еще Ньютоном для определения напряжения трения между слоями жидкости:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dn}, \tag{1.9}$$

где τ – напряжение трения; η – коэффициент пропорциональности; dv / dn – градиент скорости по нормали к ней.

Коэффициент пропорциональности η называют ***динамической вязкостью***. В источниках информации, посвященных свойствам горных пород, используется также еще одно понятие вязкости, которое оценивается произведением предела прочности на сжатие на коэффициент пластичности и характеризует способность породы необратимо поглощать энергию в процессе деформирования.

Для оценки взаимодействия режущих элементов механических органов разрушения с породой используются такие ее характеристики, как ***сопротивляемость резанию*** и ***удельное сопротивление резанию*** (подробнее об этом см. в разделе 2).

Большинство перечисленных свойств пород определяется опытным путем с использованием специальных приборов и технических устройств.

Более глубокое и полное описание других характеристик, отражающих взаимодействие горных машин с породами, можно найти в источниках, посвященных физическим свойствам горных пород, например в [1], а также в нормативных документах профильных институтов и других ведомств.

1.3. Пространственная ориентация горной машины

Большинство горных машин, выполняя операции по выемке, транспортированию и переработке полезных ископаемых тем или иным образом, сами перемещаются в пространстве. Эти перемещения могут быть как непрерывными, так и периодическими. В любом случае для определения движения машины в целом и отдельных ее механизмов и частей необходимо выбрать системы координат.

Неподвижная система координат обычно связывается с географическим положением месторождения полезного ископаемого. Подвижная система координат передвигается вместе с машиной, и ее полюс совмещается с какой-либо характерной точкой машины (центр масс, центр опорной площади и т.д.). Положение подвижной системы координат относительно неподвижной обычно задается декартовыми координатами ее полюса и тремя углами Эйлера, с помощью которых определяется сферическое движение подвижной системы.

При использовании углов Эйлера положение подвижной системы обычно определяют таблицей косинусов между осями подвижной и неподвижной систем декартовых координат. Углы Эйлера введем подобно корабельным и самолетным осям (согласно работе А.И. Лурье [2]) таким образом, что перевод неподвижной системы *OXYZ* в положение подвижной системы осуществляется тремя последовательными поворотами (рис. 1.4):

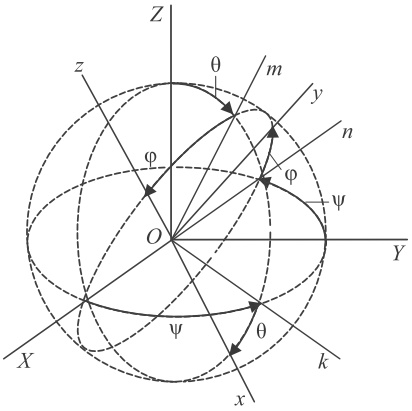


Рис. 1.4. Ориентация подвижных осей

- на угол ψ вокруг оси *OZ*;
- на угол θ вокруг оси *On*, с которой совпадает ось *Oy* после первого поворота;
- на угол φ вокруг оси *Ox*, с которой совпадает ось *OX* после двух предыдущих поворотов.

Заметим, что после первого поворота ось *OX* займет положение

Ok, ось *OZ* после второго поворота совпадает с *Om* и после третьего – с *Oz*, ось *OY* переходит в промежуточное положение *On* после первого поворота и в положение *Oy* – после третьего. Углы ψ, θ, φ называют соответственно углами рыскания, поперечного и продольного крена.

Угол ψ часто называют курсовым. Если ось *OY* расположить по направлению меридиана, то угол ψ есть не что иное, как азимут.



Лурье Анатолий Исакович (1901–1980) – советский ученый в области теоретической и аналитической механики. Окончил гимназию в г. Могилеве. В 1920 г. поступил в Уральский горный институт, откуда в 1923 г. перевелся на физико-механический факультет Петроградского политехнического института. К преподаванию в институте в то время на факультет были привлечены виднейшие ученые, пользовавшиеся европейской известностью. Математику преподавали С.Н. Бернштейн, Я.Д. Тамаркин, А.А. Адамов, Н.М. Гюнтер, физику – А.Ф. Иоффе, Н.Н. Семенов, Я.И. Френкель, механику – И.В. Мещерский, А.А. Фридман, Е.Л. Николаи.

Основные труды Лурье включают монографии и учебники по теоретической и аналитической механике, теориям устойчивости, упругости и автоматического регулирования.

Таблицу косинусов между подвижными и неподвижными осями вычислим как произведение трех матриц направляющих косинусов, образующихся после каждого из перечисленных поворотов. Обозначив эти матрицы соответственно через a_ψ, a_θ и a_φ, имеем

$$a_\psi = \begin{array}{c} \begin{matrix} X & Y & Z \end{matrix} \\ \left\| \begin{matrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{matrix} \right\| \begin{matrix} k \\ n \\ Z \end{matrix} \end{array} \qquad (1.10)$$

Элементы этой матрицы (рис. 1.4) равны косинусам углов между соответствующими осями (например, $\cos(X,k) = \cos\psi$, $\cos(Z,k) = 0$).

Аналогично

$$a_\theta = \begin{array}{c} \begin{matrix} k & n & Z \end{matrix} \\ \left\| \begin{matrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{matrix} \right\| \begin{matrix} x \\ n \\ m \end{matrix} \end{array} \qquad (1.11)$$

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ 3

ПРЕДИСЛОВИЕ 4

ВВЕДЕНИЕ 5

1. ОБЩАЯ СТРУКТУРА И ОСНОВЫ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ МАШИН 11

1.1. Структура современных горных машин и требования к ним 11
1.2. Основные свойства горных пород и их исчисление 12
1.3. Пространственная ориентация горной машины 20
1.4. Положение центра масс и центра давления машины 23

Контрольные вопросы 31

2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ОРГАНАМИ 32

2.1. Способы разрушения горных пород 32
2.2. Теоретические основы механического разрушения горных пород 32
2.3. Взаимодействие разрушающих элементов с массивом породы 34
2.4. Особенности разрушения горных пород бурением 42
2.5. Кинематические характеристики взаимодействия режущих элементов с породой 43

Контрольные вопросы 60

3. УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ГОРНЫХ МАШИН 61

3.1. Способы составления уравнений движения 61
3.2. Основные методы исчисления производительности и потребляемой мощности 63
3.3. Примеры формирования некоторых уравнений движения 69
3.3.1. Общие положения 69
3.3.2. Формирование уравнений Лагранжа 70
3.3.3. Использование уравнений Аппеля 73
3.3.4. Использование балансовых соотношений 80

Контрольные вопросы 95

4. МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГОРНЫХ МАШИН И ПОДАЧИ ИХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ НА ЗАБОЙ 96

4.1. Общие сведения 96
4.2. Трение между движителем и опорным основанием 97

4.3. Колесные опорно-ходовые устройства горных машин 105
4.3.1. Особенности и режимы движения колес 105
4.3.2. Сопротивление движению колесных движителей. 108
4.3.3. Ядро сечения колесного движителя 116
4.3.4. Мощность для передвижения колесного движителя 123
4.3.5. Условия возможности передвижения машины на колесном движителе 124
4.3.6. Системы поворота колесных движителей. 125
4.4. Гусеничные движители 129
4.4.1. Принципиальные схемы и принцип действия гусеничного движителя 129
4.4.2. Основные кинематические соотношения. 130
4.4.3. Мощность для передвижения гусеничного движителя. 131
4.4.4. Коэффициент сопротивления деформированию несущего основания 133
4.4.5. Распределение давления на несущее основание и его деформации . . 135
4.4.6. Условия прямолинейного движения гусеничного движителя 139
4.4.7. Поворот гусеничной машины 140
4.4.8. Условия выполнения поворота гусеничной машины 147
4.5. Шагающие механизмы перемещения 150
4.5.1. История создания и использования шагающих механизмов перемещения 150
4.5.2. Основы расчета устойчивости машин на шагающих движителях . . . 151
4.5.3. Мощность для работы механизма шагания и условия возможности перемещения машины 163
4.6. Автономные и специальные механизмы подачи. 168

Контрольные вопросы 171

5. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТА НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРНЫХ МЕХАНИЗМОВ ГОРНЫХ МАШИН 172

5.1. Общие замечания 172
5.2. Особенности расчета механизма поворота верхней платформы экскаватора 172
5.3. Основы расчета горных машин и механизмов с переменными массами . . . 175

Контрольные вопросы 179

ЛИТЕРАТУРА 180

Учебное издание

ГОРНЫЕ МАШИНЫ

Учебное пособие

В двух частях

Часть 1

Казаченко Георгий Васильевич
Басалай Григорий Антонович
Щерба Владимир Яковлевич
Прушак Виктор Яковлевич

Основы теории

Редактор *Е.В. Савицкая*
Художественный редактор *Т.В. Шабунько*
Технический редактор *Н.А. Лебедевич*
Корректор *Т.В. Кульнис*
Компьютерная верстка *Н.В. Шабуни*

Подписано в печать 08.08.2018. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Newton». Офсетная печать. Усл. печ. л. 10, 7. Уч.-изд. л. 13,6. Тираж 450 экз. Заказ 891.

Республиканское унитарное предприятие «Издательство "Вышэйшая школа"». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/3 от 08.07.2013. Пр. Победителей, 11, 220004, Минск. e-mail: market@vshph.com http: // vshph.com

Республиканское унитарное предприятие «СтройМедиаПроект».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/42 от 13.02.2014. Ул. В. Хоружей, 13/61, 220123, Минск.