

**№ 2819**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

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

Кафедра геологии и маркшейдерского дела

Ю.В. Кириченко

В.В. Ческидов

С.А. Пуневский

# Геомеханика

Инженерно-геологическое обеспечение  
управления состоянием массивов горных пород

Учебное пособие

Утверждено Методическим советом НИТУ «МИСиС»



Москва 2017

УДК 55  
К43

Рецензенты:

канд. техн. наук *А.А. Скворцов* (ООО «Газпром геотехнологии»);  
проф., канд. техн. наук *Д.В. Пастухин*

**Кириченко Ю.В.**

К43 Геомеханика : инженерно-геологическое обеспечение управления состоянием массивов горных пород : учеб. пособие / Ю.В. Кириченко, В.В. Ческидов, С.А. Пуневский. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2017. – 90 с.  
ISBN 978-5-906846-37-2

Приводятся краткие сведения о механических процессах в массивах горных пород и техногенных отложений. Рассмотрены методы решения основных задач по установлению и прогнозу изменения геомеханических критериев экологической безопасности инженерной деятельности.

Предназначено для студентов, обучающихся по дисциплине «Геомеханика» для специализаций «Открытые горные работы», «Горнопромышленная экология» и др.

УДК 55

ISBN 978-5-906846-37-2

© Ю.В. Кириченко,  
В.В. Ческидов,  
С.А. Пуневский, 2017  
© НИТУ «МИСиС», 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	5
1. Физическое состояние и классификационные показатели пород....	6
1.1. Плотность, виды плотности.....	6
1.2. Пустотность пород и ее количественная оценка.....	6
1.3. Влажность и ее показатели.....	7
1.4. Классификация пород по коэффициенту водонасыщения.....	8
1.5. Контрольные вопросы.....	9
1.6. Решение задач.....	9
2. Оценка классификационных показателей горных пород.....	19
2.1. Общие сведения.....	19
2.2. Пластичность и консистенция глинистых пород.....	19
2.3. Контрольные вопросы.....	21
2.4. Решение задач.....	21
3. Сжимаемость горных пород под воздействием внешних нагрузок.....	24
3.1. Общие сведения.....	24
3.2. Основные показатели сжимаемости.....	26
3.3. Контрольные вопросы.....	27
3.4. Решение задач.....	27
4. Консолидация горных пород.....	31
4.1. Общие сведения об уплотнении водонасыщенных пород.....	31
4.2. Основные понятия о теории фильтрационной консолидации.....	31
4.3. Степень уплотнения и осадки породных массивов.....	33
4.4. Контрольные вопросы.....	35
4.5. Решение задач.....	35
5. Прочность горных пород.....	40
5.1. Пределы прочности.....	40
5.2. Испытания пород на сдвиговую прочность.....	41
5.3. Контрольные вопросы.....	44
5.4. Решение задач.....	45
6. Устойчивость откосных сооружений.....	48
6.1. Принцип расчета устойчивости.....	48
6.2. Построение вероятной кривой скольжения.....	49
6.3. Контрольные вопросы.....	51
6.4. Решение задач.....	51

7. Геомеханическое обоснование дальнейшего использования техногенных массивов .....	66
7.1. Общие сведения .....	66
7.2. Несущая способность слабых оснований .....	66
7.3. Инженерно-геологическое районирование намывных территорий.....	68
7.4. Контрольные вопросы.....	73
7.5. Решение задач .....	73
Список использованных источников.....	77
Приложение 1. Инструкция пользователя программы для определения коэффициента запаса устойчивости откосных сооружений .....	78
Приложение 2. Порядок выполнения практической работы по определению прочностных и компрессионных характеристик горных пород.....	81

## Предисловие

Горная геомеханика – научная дисциплина, изучающая направленно-деформированное состояние массивов, физико-механические свойства слагающих их пород и отложений, а также закономерное изменение состояния массивов и свойства пород при разработке месторождений полезных ископаемых.

Геомеханика открытых горных работ рассматривает вопросы устойчивости карьерных откосов, оценки несущей способности естественных и искусственных оснований, прогноза деформаций сдвига и уплотнения бортовых и отвальных массивов, направленного изменения и контроля массивов пород в бортах карьеров, а также техногенных насыпных и намывных массивов отвалов, гидроотвалов и хвостохранилищ.

Пособие содержит примеры выполнения практических работ по дисциплинам «Геомеханика» (специализация «Открытые горные работы»), «Наука о Земле» (специализация «Горнопромышленная экология») и «Управление состоянием массивов» (направленность «Информационные технологии геологического обеспечения геотехнологий») и позволяет решать основные задачи по установлению и прогнозу изменения геомеханических критериев экологической безопасности инженерной деятельности на основе результатов инженерно-геологического районирования массивов.

В пособии приводятся краткие сведения о механических процессах в массивах горных пород и техногенных отложений, характере и закономерностях изменения свойств пород и отложений их направленно-деформированного состояния, даются примеры решения геомеханических задач, рассматриваются современные методы воздействия на массив.

Расчетно-графические работы сопровождаются инженерными расчетами на ЭВМ по оригинальным программам, разработанным сотрудниками кафедры геологии и маркшейдерского дела (приложение 1). В приложении 2 рассмотрен порядок выполнения практической работы по определению физико-механических свойств горных пород.

В подготовке пособия принимали участие проф. кафедры ГИМД канд. техн. наук М.В. Щекина и аспирант И.А. Мельниченко.

# 1. ФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ И КЛАССИФИКАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОРОД

## 1.1. Плотность, виды плотности

Состояние горных пород в условиях естественного залегания или в образце определяют такие показатели, как плотность в естественном состоянии, плотность минеральных частиц, плотность сухой породы, пористость, влажность. По ним можно косвенно судить о прочностных и деформационных свойствах породы, устойчивости инженерных сооружений, а также об их изменении под влиянием современных геологических и горно-геологических процессов, вызванных инженерной деятельностью.

В общем случае показатель плотности породы определяется **плотностью минеральных частиц**, т.е. минеральным составом, а также **пористостью** (наличием пустот в породе) и **влажностью**. Увеличение плотности минеральных частиц, слагающих породу, повышает показатель плотности, увеличение пористости уменьшает ее, а увеличение влажности при неизменной пористости приводит к повышению. Плотность породы характеризует ее физическое состояние и степень уплотненности. Так, для глинистых пород уменьшение разницы между значениями плотности в естественном состоянии и плотности минеральных частиц свидетельствует об уплотнении породы. Плотность минеральных частиц не отражает непосредственно физическое состояние породы и не используется в инженерных расчетах, но эта величина необходима для вычисления других показателей, например пористости. Плотность сухой породы также как и плотность породы отражает степень ее уплотненности и обычно используется в качестве контрольного показателя уплотненности земляных сооружений – отвалов, насыпей, дамб.

## 1.2. Пустотность пород и ее количественная оценка

Количество в породе пустот характеризуется **пористостью**  $n$ , которая равна отношению объема пор  $V_n$  ко всему объему  $V_0$  образца. Под **коэффициентом пористости**  $\varepsilon$  понимают отношение объема пор  $V_n$  в породе к объему твердой части – минерального скелета  $V_c$ .

По размерам поры делят на некапиллярные (больше 0,5 мм), капиллярные (0,5...0,0002 мм) и субкапиллярные (меньше 0,0002 мм).

В некапиллярных порах подземные воды движутся под воздействием силы тяжести или гидростатического напора; в капиллярных в основном под влиянием капиллярных сил; в субкапиллярных вода находится в связанном состоянии. Поры могут быть открытыми (сообщающимися) или закрытыми (несообщающимися). Течение жидкости происходит **по сообщающимся порам**, которые образуют **активное поровое пространство**. Сообщающиеся и несообщающиеся поры образуют общее поровое пространство. Выделяют также **эффективную пористость** (эффективное поровое пространство), под которым понимают общий объем сообщающихся пор, за вычетом пространства, занятого связанной водой. В раздельнозернистых грунтах преобладают сверхкапиллярные (некапиллярные) и капиллярные поры и эффективное поровое пространство незначительно отличается от общего порового пространства. Для глинистых пород толщина слоя связанной воды соизмерима с размером пор и эффективное поровое пространство значительно меньше общего. Наличие активной пористости (активного порового пространства) определяет движение жидкости в породах и способность их к деформациям (уплотнению).

Пористость определяет **плотность, прочность, деформируемость, водопроницаемость** пород, влияет на такие их качества, как **сопротивляемость выветриванию, морозостойчивость, сейсмостойкость**. Абсолютные значения пористости грунтов изменяются от долей процента до 60 % и более (например, глинистые породы, находящиеся на начальных стадиях литификации, торф, илы), а коэффициент пористости может превышать 100 % (например, у сапропелей может достигать 1200 %, или 12 долей ед.).

Физические свойства пород зависят не только от абсолютного значения пористости, но также и от структурных особенностей порового пространства – размеров и формы пор, распределения их в объеме породы.

### 1.3. Влажность и ее показатели

В условиях естественного залегания в порах и трещинах обычно находится вода, количество которой определяет **естественную влажность** породы и оказывает влияние на его состояние и свойства. Ниже уровня грунтовых вод естественная влажность пород почти не изменяется, выше – в зоне аэрации – наблюдаются суточные, сезонные и годовые колебания этой величины, связанные с природными факторами: изменениями температуры, атмосферного давления, выпадением осад-

ков, положением уровня грунтовых вод, а также с воздействием инженерных работ, вызывающих подпор грунтовых вод, утечки из водопроводных и дренажных систем и очистных сооружений.

Влажность раздельно-зернистых и глинистых пород в условиях естественного залегания изменяется в больших пределах. Так, естественная влажность песков  $W$  в зоне аэрации достигает 4...5 %, в зоне капиллярного увлажнения и насыщения – 27...30 %. В глинистых породах малой и средней степени литификации (глины, уплотненные глины) эта величина изменяется от 12...15 до 50...60 %, и в породах высокой степени литификации (аргиллиты) снижается до 3...5 %. Естественная влажность песков при прочих равных геологических условиях изменяется в зависимости от их гранулярного состава, наличия примесей глинистых частиц и органики, а также от плотности сложения. Естественная влажность глинистых пород изменяется в зависимости от степени их дисперсности, минерального состава тонкодисперсной части, емкости поглощения и состава обменных катионов, примесей органики и степени литификации.

Для инженерно-геологической оценки пород обычно используют такие показатели, как **весовая**  $W$  и **объемная** влажности  $W_o$ , а также **коэффициент водонасыщения**  $G$ , который равен отношению объема воды в порах  $V_v$  к общему объему пор  $V_p$ .

#### 1.4. Классификация пород по коэффициенту водонасыщения

По коэффициенту водонасыщения  $G$ , изменяющемуся от 0 до 1, выделяют породы: маловлажные (менее 0,5), влажные (0,5...0,8) и водонасыщенные (более 0,8). Коэффициент водонасыщения характеризует также фазовый состав песчаных и глинистых пород. Различают следующие состояния:

1) абсолютно сухую породу ( $G = 0$ ); состоит из двух фаз – минерального скелета и воздуха (газов) в порах. В такое состояние она переходит в лабораторных условиях путем высушивания при температуре 105...110 °С до постоянной массы;

2) воздушно-сухая порода ( $G \leq 0,2$ ); состоит из трех фаз – скелета, воздуха пор и физически связанной воды. При подобной влажности песчаные породы рыхлые и сыпучие, а глинистые отличаются наибольшей прочностью и связностью;

3) маловлажная ( $G = 0,2...0,5$ ); состоит из трех фаз – скелета, воды (физически связанной с поровой) и воздуха; встречается в зоне аэра-



ции и капиллярного увлажнения. При такой влажности песчаные породы имеют кажущуюся связность, глинистые находятся в твердом, полутвердом, тугопластичном или мягкопластичном состояниях;

4) влажная ( $0,5 < G < 0,95$ ); состоит из трех фаз – твердой, поровой влаги и воздуха, имеет повсеместное распространение на различных глубинах. Состояние изменяется в зависимости от плотности, влажности и степени литификации;

5) водонасыщенная ( $G \cong 1$ ); состоит из двух фаз – минерального скелета и воды, полностью заполняющей поры. Полностью водонасыщенными являются породы, залегающие ниже уровня грунтовых вод, донные отложения водоемов или намывные техногенные отложения, складированные в недавнее время.

Необходимо отметить, что показатели состояния породы взаимосвязаны и могут быть выражены в формулах при их определении друг через друга.

## 1.5. Контрольные вопросы

1. Дайте определение плотности породы.
2. Виды плотности.
3. Какими показателями характеризуется плотность породы?
4. Что такое «активное поровое пространство»?
5. Какие поры вы знаете?
6. Виды влажности.
7. От каких внешних факторов зависит естественная влажность породы.
8. Приведите примерные значения влажности для раздельнозернистых, связных (глинистых) и твердых пород.
9. Что характеризует коэффициент водонасыщения?
10. Приведите классификацию состояния пород по коэффициенту водонасыщения?

## 1.6. Решение задач

### Задача 1. Определение показателей свойств горной породы.

Образец породы объемом  $V_0$  и массой  $q_0$  после высушивания в термощкафу при температуре 105...110 °С занимает объем  $V_c$  и весит  $q_c$  (табл. 1.1).

Определить:

- плотность породы в естественном состоянии  $\gamma$ , г/см<sup>3</sup>;
- плотность минеральных частиц  $\Delta$ , г/см<sup>3</sup>;
- плотность сухой породы  $\gamma_c$ , г/см<sup>3</sup>;