

И.В. Баклашов
Б.А. Картозия
А.Н. Шашенко
В.Н. Борисов

ГЕОМЕХАНИКА

В двух томах

Том 2

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

*Допущено Министерством образования и науки
Российской Федерации в качестве учебника для
студентов высших учебных заведений, обучаю-
щихся по направлению подготовки бакалавров
и магистров «Горное дело» и по специальностям
«Физические процессы горного или нефтегазово-
го производства» и «Шахтное и подземное стро-
ительство» направления подготовки дипломи-
рованных специалистов «Горное дело»*

МОСКВА
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА
2004



ВЫСШЕЕ ГОРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

УДК 622.02:531

ББК 33.1

Б 19

*Экспертиза проведена
Министерством образования и науки Российской Федерации
(приказ № 1564 от 08.04.2004)*

*Книга соответствует «Гигиеническим требованиям к изданиям
книжным для взрослых. СанПиН 1.2.1253-03», утвержденным
Главным государственным санитарным врачом России
30 марта 2003 г.*

Рецензенты:

Кафедра «Горное дело и проведение горно-разведочных выработок»
Московского государственного геологоразведочного университета
(зав. кафедрой проф., д-р техн. наук Л.Г. Грабчак)

Ведущий научный сотрудник ИПКОН РАН,
д-р техн. наук В.Н. Одинцев

Баклашов И.В., Картозия Б.А., Шашенко А.Н., Борисов В.Н.

Б 19 Геомеханика: Учебник для вузов. В 2 т. — М.: Издательство
Московского государственного горного университета, 2004. —
Т. 2. Геомеханические процессы. — 249 с.: ил.
ISBN 5-7418-0326-1 (в пер.)

Приведены методы исследования геомеханических процессов, включая современные численные методы конечных и граничных элементов, а также физическое моделирование и инструментальные методы в натуральных условиях. Изложенные методы использованы для анализа геомеханических процессов вокруг каппгальных горных выработок и подземных сооружений. Рассмотрены процессы взаимодействия массивов горных пород с подземными сооружениями. В заключительной части приведены наиболее характерные инженерные задачи геомеханики с численными расчетами.

И.В. Баклашов — д-р техн. наук, проф. кафедры «Физика горных пород и процессов» Московского государственного горного университета (МГГУ); Б.А. Картозия — проф., д-р техн. наук, первый проректор МГГУ; А.Н. Шашенко — проф., д-р техн. наук, проректор Национальной горной академии Украины (г. Днепрпетровск); В.Н. Борисов — профессор кафедры «Строительство подземных сооружений и шахт» МГГУ.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров «Горное дело» и по специальностям «Физические процессы горного или нефтегазового производства» и «Шахтное и подземное строительство» направления подготовки дипломированных специалистов «Горное дело».

УДК 622.02:531

ББК 33.1

ISBN 5-7418-0327-X

ISBN 5-7418-0326-1 (Т. 2)

© И.В. Баклашов, Б.А. Картозия, А.Н.
Шашенко, В.Н. Борисов, 2004

© Издательство МГГУ, 2004

© Дизайн книги. Издательство МГГУ,
2004

1.1. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ В ГЕОМЕХАНИКЕ

1.1.1. Общие сведения

Рассмотренные в первом томе учебника аналитические задачи были решены применительно к одиночным протяженным выработкам, не испытывающим влияния других выработок или выработанного пространства лавы. В том случае, если такое влияние имеется, решение намного усложняется, получение достаточно компактных аналитических зависимостей становится невозможным. Например, плоское сечение подготовительной выработки арочной формы, сопрягающейся с выработанным пространством лавы (рис. 1.1), представляет собой плоскость, ослабленную вырезом достаточно сложной формы.

Наличие области обрушенных пород создает дополнительную неоднородность рассматриваемого массива. Получить решение такой задачи методами, рассмотренными выше, для приведенной области, даже в предположении, что массив деформируется только упруго, не представляется возможным. В инженерной практике для учета перечисленных выше факторов, которые не удастся ввести в расчетную схему, используют различные коэффициенты, полученные, как правило, эмпирическим путем на основе обобщения натурных наблюдений или данных лабораторных испытаний. Однако использование эмпирических коэффициентов, «подправляющих» аналитическое решение, ограничено теми конкретными условиями, в которых проводились наблюдения или эксперимент. Такой подход чреват эффектом «накопления ошибок»: проектировщик выбирает значение нужных ему коэффициентов из некоторого диапазона (иногда довольно широкого), не имея достаточного основания для выбора именно этих значений. Чем больше коэффициентов нужно ввести, тем больше вероятность того, что получаемая в результате величина отклоняется от своего истинного значения, и тем больше это отклонение.

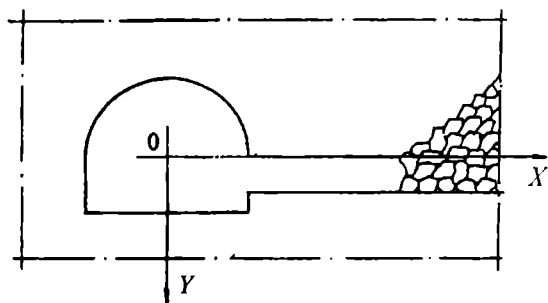


Рис. 1.1. Плоское сечение выработки, сопряженной с выработанным пространством лавы

Более точное решение поставленной задачи можно получить, если рас-

четная схема и метод решения позволяют изначально учесть интересующие исследователя факторы. Широкие возможности открывают в этом плане так называемые численные методы решения, заимствованные из механики деформируемого твердого тела. Наиболее эффективные из них — *метод конечных элементов (МКЭ)* и *метод граничных элементов (МГЭ)*. Интенсивное их развитие и применение в практике инженерных расчетов стало возможным с развитием и доступностью вычислительной техники. В последние два десятилетия благодаря применению этих методов существенно расширился класс задач, решаемых в геомеханике.

1.1.2. Метод конечных элементов

Решение задач механики деформируемого твердого тела методом конечных элементов основывается на применении приближенных методов вычислений, методов матричной и линейной алгебры. Сформулированный впервые в 50-е годы — время ЭВМ первого поколения, МКЭ рассматривался сначала как вариант расширения и развития матричного метода расчета конструкций. В настоящее время общепризнана связь этого метода с классическими методами строительной механики, вариационными и разностными методами. Подробное его изложение применительно к задачам геомеханики содержится в [1]. Ниже приведен укрупненный алгоритм МКЭ с описанием его составляющих (опущены некоторые выводы и не рассматриваются частные детали используемого математического аппарата).

Рассмотрим уже известную задачу о протяженной горной выработке, с тем отличием, что форма поперечного сечения выработки произвольна, а окружающий породный массив может быть неоднородным по своим деформационным свойствам (например, слоистый). Сечение выработки, перпендикулярное к ее продольной оси, представляет собой тяжелую весомую полуплоскость с соответствующим вырезом. При расчетах полных напряжений она может быть заменена невесомым плоским прямоугольником со сторонами a и b (рис. 1.2) и с отверстием такой же формы в центре, нагруженным на внешних границах сжимающими напряжениями, равными начальным напряжениям в массиве на глубине заложения выработки.

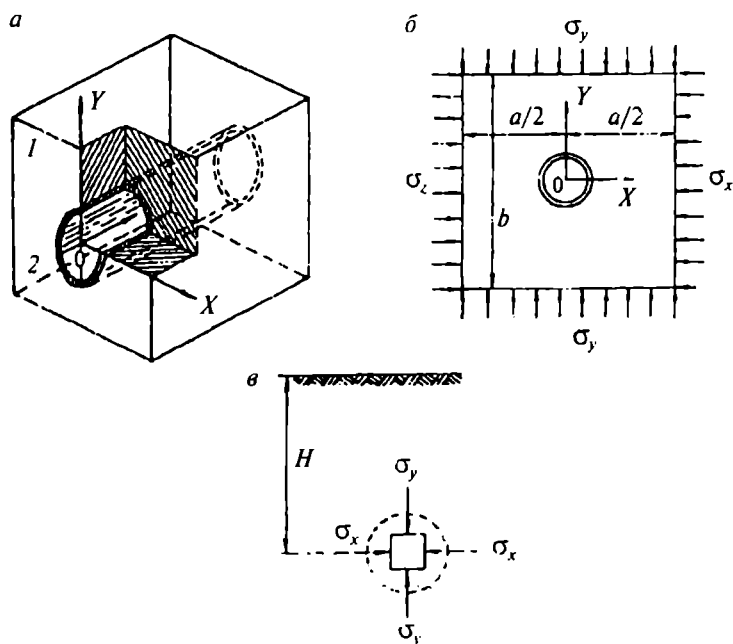


Рис. 1.2. Условия нагружения закрепленной горизонтальной выработки (2) в породном массиве (1):

a — физическая модель; b — расчетная модель, или расчетная схема; c — начальные напряжения в массиве на глубине заложения выработки

ОГЛАВЛЕНИЕ

А

Глава 1

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	5
1.1. Численные методы в геомеханике	7
1.1.1. Общие сведения	7
1.1.2. Метод конечных элементов	8
1.1.3. Метод граничных элементов	17
1.2. Физическое моделирование геомеханических процессов в лабораторных условиях	23
1.2.1. Общие сведения	23
1.2.2. Основные положения теории подобия	26
1.2.3. Метод центробежного моделирования	31
1.2.4. Метод эквивалентных материалов	34
1.2.5. Поляризационно-оптический метод	41
1.2.6. Другие методы моделирования	49
1.3. Инструментальные методы исследования геомеханических процессов в натурных условиях	52
1.3.1. Измерение деформаций и напряжений на поверхности горных выработок	52
1.3.2. Измерение деформаций и напряжений в глубине массива	55
1.3.3. Измерение перемещений в окрестности горных выработок	61
1.3.4. Измерение нагрузки на крепь горных выработок	64
1.3.5. Автоматизированная система геомеханического мониторинга	73
1.3.6. Оценка структурно-механических особенностей породных массивов методами томографии	77

Глава 2

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

ВОКРУГ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК	81
2.1. Геомеханические процессы вокруг протяженных капитальных горных выработок и подземных сооружений	83
2.1.1. Общие сведения о геомеханических процессах вокруг горных выработок	83
2.1.2. Геомеханические процессы допредельного деформирования	87
2.1.3. Геомеханические процессы запредельного деформирования и разрушения	110
2.2. Особенности геомеханических процессов в окрестности забоя и сопряжений горных выработок	128
2.2.1. Геомеханические процессы деформирования и разрушения в окрестности забоя горных выработок	128
2.2.2. Геомеханические процессы деформирования и разрушения в окрестности сопряжения горных выработок	130

А

2.3. Геомеханические процессы вокруг капитальных горных выработок и подземных сооружений камерного типа	133
2.3.1. Геомеханические процессы допредельного деформирования	133
2.3.2. Геомеханические процессы запредельного деформирования и разрушения.....	140
2.4. Геомеханические процессы взаимодействия массивов горных пород с подземными сооружениями.....	145
2.4.1. Устойчивость породных обнажений	145
2.4.2. Формирование нагрузки на крепь выработок от локальных вывалов и при сплошном сводообразовании	159
2.4.3. Формирование нагрузки в условиях совместного деформирования крепи и массива	171

Глава 3

ИНЖЕНЕРНЫЕ ЗАДАЧИ ГЕОМЕХАНИКИ ПРИ ПОДЗЕМНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ	187
3.1. Оценка устойчивости незакрепленных горных выработок.....	189
3.1.1. Определение допустимого пролета незакрепленных выработок	189
3.1.2. Прогнозирование долговременной устойчивости выработок	197
3.1.3. Определение допустимого расстояния между двумя параллельными выработками.....	200
3.1.4. Определение параметров способа предотвращения пучения почвы взрывной разгрузкой пород с последующим их упорочнением	202
3.2. Геомеханическое обоснование параметров крепления горных выработок.....	207
3.2.1. Определение категории устойчивости и выбор крепи горных выработок в соляных породах.....	207
3.2.2. Определение параметров крепей на основе глубинного упорочнения вмещающих пород.....	211
3.2.3. Определение параметров крепи регулируемого сопротивления	218
3.2.4. Определение параметров способа перекрепления горных выработок глубинным упорочнением вмещающих пород.....	228
3.3. Определение нагрузки на крепь горных выработок.....	232
3.3.1. Определение нагрузки на крепь выработки в породах I категории устойчивости.....	232
3.3.2. Определение толщины монолитной бетонной крепи с использованием принципа «технологической податливости».....	235
3.3.3. Определение нагрузки на металлобетонную крепь.....	240
3.3.4. Определение нагрузок на крепь выработок камерного типа	244
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	247