

**Горная  
книга**

A stylized logo of an open book, with the pages represented by curved lines. The logo is positioned to the left of the text 'Горная книга'.

# РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

*Председатель*

*Л.А. ПУЧКОВ*

---

*Зам. председателя*

*Л.Х. ГИТИС*

---

*Члены редсовета*

*И.В. ДЕМЕНТЬЕВ*

---

*А.П. ДМИТРИЕВ*

---

*Б.А. КАРТОЗИЯ*

---

*М.В. КУРЛЕНЯ*

---

*В.И. ОСИПОВ*

---

*Э.М. СОКОЛОВ*

---

*К.Н. ТРУБЕЦКОЙ*

---

*В.В. ХРОНИН*

---

*В.А. ЧАНТУРИЯ*

---

*Е.И. ШЕМЯКИН*

*ректор МГГУ,  
чл.-корр. РАН*

*директор  
Издательства МГГУ*

*академик РАЕН*

*академик РАЕН*

*академик РАЕН*

*академик РАН*

*академик РАН*

*академик МАН ВШ*

*академик РАН*

*профессор*

*академик РАН*

*академик РАН*

Л.А. Пучков  
И.И. Шаровар  
В.Г. Виткалов

# ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

*Допущено Учебно-методическим  
объединением вузов Российской Федерации  
по образованию в области горного дела  
в качестве учебника для студентов  
высших учебных заведений, обучающихся  
по специальности «Подземная разработка  
месторождений полезных ископаемых»  
направления подготовки дипломированных  
специалистов «Горное дело»*

**Высшее  
горное  
образование**



МОСКВА  
ИЗДАТЕЛЬСТВО «ГОРНАЯ КНИГА»  
2006

УДК 622.234

ББК 33.2

П 88

*Федеральная целевая программа «Культура России», подпрограмма «Поддержка полиграфии и книгоиздания России»*

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

*Экспертиза проведена Учебно-методическим объединением высших учебных заведений Российской Федерации по образованию в области горного дела (письмо № 51–155/6 от 27.12.05)*

**Рецензенты:**

- кафедра «Разработка месторождений полезных ископаемых» Московского государственного открытого университета (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. *В.И. Емельянов*);
- д-р техн. наук, проф. *А.Б. Ковальчук* (ОАО «УМЗ групп»)

Книга выпущена по заказу Издательства Московского Государственного горного университета

**Пучков Л.А., Шаровар И.И., Виткалов В.Г.**

П 88

Геотехнологические способы разработки месторождений: Учебник для вузов. — М.: Издательство «Горная книга», 2006. — 322 с.: ил.

ISBN 5-98672-030-X (в пер.)

Рассмотрены физико-химические свойства массива горных пород, физико-химические основы и производственные процессы при геотехнологии. Приведены схемы вскрытия и системы разработки геотехнологическими способами. Изложены основы организации и описаны технические средства скважинной добычи твердых полезных ископаемых. Обобщен передовой опыт применения геотехнологических способов при разработке месторождений в России и зарубежных странах. Рассмотрены основные принципы проектирования геотехнологических методов разработки. Даны указания по выполнению лабораторных работ и курсового проекта.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых» направления подготовки дипломированных специалистов «Горное дело».

УДК 622.234

ББК 33.2

ISBN 5-98672-030-X

© Л.А. Пучков, И.И. Шаровар,  
В.Г. Виткалов, 2006

© Издательство «Горная книга», 2006

© Дизайн книги. Издательство  
МГГУ, 2006

Главным направлением повышения эффективности горного производства, вывода его на уровень рентабельности и прибыльности является ускорение работ по техническому перевооружению шахт на основе перехода на высокопроизводительные технологические схемы подготовки и отработки запасов выемочных полей, а также внедрение горно-добывающей техники нового поколения.

На современном этапе функционирования отечественной экономики проблема технического перевооружения угледобывающей отрасли зависит, главным образом, от реальной инвестиционной политики. В то же время необходим поиск принципиально новых технологий подземной угледобычи, позволяющий без значительных капитальных вложений существенно улучшить технико-экономические показатели горного производства.

Большая часть добытого угля в промышленно развитых странах используется для выработки тепловой и электрической энергии, и эта тенденция доли данного сектора экономики в потреблении угля сохранится на ближайшую перспективу.

Очевидно, что новая «эра угля» продлится до тех пор, пока человечество не изобретет другое, более эффективное и безопасное топливо.

Угольная промышленность имеет среди других отраслей ТЭК наиболее обеспеченную сырьевую базу. Общие балансовые запасы угля в России составляют около 200 млрд т. Такие запасы угля определяют его особую роль в российской энергетике. Он был и остается на перспективу базовым стратегическим топливом для электростанций, металлургии и децентрализованных потребителей.

Развитие энергетики и промышленности неизбежно сопровождается увеличением потребления топлива и полезных ископаемых. Поэтому разработка и внедрение геотехнологических

УДК 622.234

ББК 33.2

П 88

*Федеральная целевая программа «Культура России», подпрограмма «Поддержка полиграфии и книгоиздания России»*

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

*Экспертиза проведена Учебно-методическим объединением высших учебных заведений Российской Федерации по образованию в области горного дела (письмо № 51–155/6 от 27.12.05)*

**Рецензенты:**

- кафедра «Разработка месторождений полезных ископаемых» Московского государственного открытого университета (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. *В.И. Емельянов*);
- д-р техн. наук, проф. *А.Б. Ковальчук* (ОАО «УМЗ групп»)

Книга выпущена по заказу Издательства Московского Государственного горного университета

**Пучков Л.А., Шаровар И.И., Виткалов В.Г.**

П 88

Геотехнологические способы разработки месторождений: Учебник для вузов. — М.: Издательство «Горная книга», 2006. — 322 с.: ил.

ISBN 5-98672-030-X (в пер.)

Рассмотрены физико-химические свойства массива горных пород, физико-химические основы и производственные процессы при геотехнологии. Приведены схемы вскрытия и системы разработки геотехнологическими способами. Изложены основы организации и описаны технические средства скважинной добычи твердых полезных ископаемых. Обобщен передовой опыт применения геотехнологических способов при разработке месторождений в России и зарубежных странах. Рассмотрены основные принципы проектирования геотехнологических методов разработки. Даны указания по выполнению лабораторных работ и курсового проекта.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых» направления подготовки дипломированных специалистов «Горное дело».

УДК 622.234

ББК 33.2

ISBN 5-98672-030-X

© Л.А. Пучков, И.И. Шаровар,  
В.Г. Виткалов, 2006

© Издательство «Горная книга», 2006

© Дизайн книги. Издательство  
МГГУ, 2006

Главным направлением повышения эффективности горного производства, вывода его на уровень рентабельности и прибыльности является ускорение работ по техническому перевооружению шахт на основе перехода на высокопроизводительные технологические схемы подготовки и отработки запасов выемочных полей, а также внедрение горно-добывающей техники нового поколения.

На современном этапе функционирования отечественной экономики проблема технического перевооружения угледобывающей отрасли зависит, главным образом, от реальной инвестиционной политики. В то же время необходим поиск принципиально новых технологий подземной угледобычи, позволяющий без значительных капитальных вложений существенно улучшить технико-экономические показатели горного производства.

Большая часть добытого угля в промышленно развитых странах используется для выработки тепловой и электрической энергии, и эта тенденция доли данного сектора экономики в потреблении угля сохранится на ближайшую перспективу.

Очевидно, что новая «эра угля» продлится до тех пор, пока человечество не изобретет другое, более эффективное и безопасное топливо.

Угольная промышленность имеет среди других отраслей ТЭК наиболее обеспеченную сырьевую базу. Общие балансовые запасы угля в России составляют около 200 млрд т. Такие запасы угля определяют его особую роль в российской энергетике. Он был и остается на перспективу базовым стратегическим топливом для электростанций, металлургии и децентрализованных потребителей.

Развитие энергетики и промышленности неизбежно сопровождается увеличением потребления топлива и полезных ископаемых. Поэтому разработка и внедрение геотехнологических

способов добычи полезных ископаемых, позволяющих избежать перемещения пустых пород и исключить присутствие человека под землей, является актуальной задачей.

Физико-химические и микробиологические способы добычи полезных ископаемых в современных условиях приобретают все большее значение, так как очень остро стоит вопрос об отработке бедных месторождений и месторождений, залегающих на больших глубинах. Они позволяют коренным образом упростить и удешевить добычу минерального сырья.

В учебнике сделана попытка на основании работ, выполненных в России и за рубежом, в том числе проводимых авторами и сотрудниками МГГУ, рассмотреть геотехнологические способы добычи полезных ископаемых и методы перевода их в другое агрегатное состояние.

В области развития геотехнологии большой вклад внесли русские ученые. Д.И. Менделеев предложил идею подземной газификации углей, получившую в дальнейшем развитие в работах английского ученого Д. Рамсея. Академики В.И. Вернадский и Е.Н. Ферсман разработали теоретические основы ряда геохимических процессов. Впервые геотехнологические методы были обобщены И.П. Кириченко. Выдающуюся роль в становлении геотехнологии как науки сыграл академик Н.В. Мельников, впервые создавший в Московском горном институте специальную кафедру и много сделавший от определения основных понятий геотехнологии до практической реализации методов.

В ряде научно-исследовательских и учебных институтов страны в настоящее время функционируют лаборатории, занимающиеся проблемами геотехнологии. Ведущие ученые нашей страны внесли значительный вклад в развитие геотехнологии. Это В.В. Ржевский, Е.И. Шемякин, Д.М. Бронников, А.В. Докукин, В.И. Ревнивцев, Н.М. Проскураков, В.Ж. Арнс, Л.А. Пучков.

Необходимо отметить также вклад в развитие отдельных методов следующих ученых: Д.П. Лобанова, Ю.Д. Дядькина, В.Н. Казака, Р.С. Пермякова, Н.Ф. Кусова, Е.В. Крейнина, П.В. Скафа, В.Г. Бахурова, И.К. Руднева, Д.Т. Десятникова и др.

---

## КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Добыча угля в настоящее время осуществляется, в основном, подземным и открытым способами, которые предусматривают вскрытие и подготовку месторождения, выемку и выдачу его на поверхность. При этом добыча угля требует больших материальных и трудовых ресурсов и является небезопасной для рабочих, а также в резком обострении экологических проблем.

Отработка угольных пластов в Европейской части страны, залегающих в благоприятных горно-геологических условиях, связана с исчерпанием так называемых кондиционных залежей. Геологические запасы некондиционных угольных залежей и пропластков, а также остаточные запасы угольных целиков отработанных шахт измеряются десятками миллиардов тонн. Дефицит кондиционных топлив и постоянно растущий спрос на энергию будут требовать поиска нетрадиционных (геотехнологических) технологий добычи угля на основе широкого внедрения химии в народное хозяйство.

На современном этапе развития науки и техники в горном деле используются в основном лишь механические способы добычи, что связано с работой машин и людей под землей.

Проводимая в стране экономическая реформа выявила кризисное состояние угольной промышленности, выражающееся в низком уровне средств комплексной механизации и, как следствие, в снижении технико-экономических показателей добычи.

Однако на данном этапе развития общества наука позволяет изменить технологию добычи полезных ископаемых и осуществлять эксплуатацию рудных и угольных месторождений без присутствия человека под землей. Такой подход к эксплуатации угольных и рудных месторождений должен сопровождаться качественными изменениями в горном деле: используя химические технологии на месте залегания угольных пластов, перево-

дить их в жидкое или газообразное состояние, что позволит через скважины выдавать продукты на поверхность.

Прогрессивность и перспективность нетрадиционных технологий бесспорна. Следовательно, внедрение малоотходных технологий добычи и переработки полезных ископаемых на месте их залегания позволит избежать выдачи пустой породы на поверхность, резко увеличить производительность труда и улучшить экологическую обстановку.

Горная наука — система научных знаний о природных условиях, геологической среде, технологии, технике и экономике извлечения из недр полезных ископаемых и их первичной переработке.

Она подразделяется на геологические, физико-технические, экономические и горные дисциплины. Горные дисциплины связаны с технологией разведки, разработки и первичной переработки полезных ископаемых. Технология разработки полезных ископаемых включает три направления: открытая, подземная и скважинная технология добычи. Скважинная технология добычи представляет собой технологию добычи воды, нефти, газа и твердых полезных ископаемых. Учение о добыче твердых полезных ископаемых через скважины получило название «геотехнология».

*Геотехнология* — это наука о физических, химических, биохимических и микробиологических методах воздействия на продуктивную залежь для перевода полезных ископаемых в подвижное состояние и последующее извлечение их через скважины, буримые с поверхности до месторождения.

В связи с этим большое значение приобретает дальнейшая разработка микробиологических и физико-химических способов добычи угля, термодинамическая отработка пластов, экстракция угля, гидрогенизация, скважинная гидродобыча, микробиологическое и химическое воздействие на угольный пласт.

Новые методы несут с собой более высокую культуру производства. Помимо технико-экономических методов отработки полезных ископаемых исключается необходимость отводов больших участков земли под горные предприятия. Не обезображивается лик Земли, как это бывает при обычных методах раз-

работки месторождений с их терриконами пустой породы, пульпопроводами, загрязнением территории и водоемов промышленными стоками. Отпадает необходимость борьбы с вредными газами, горными ударами и пылью. И, наконец, новые методы позволяют значительно увеличить запасы полезных ископаемых в уже освоенных регионах, для отработки которых в настоящее время отсутствует эффективная технология и технические средства выемки.

Сущность геотехнологических методов заключается в переводе угля в подвижное агрегатное состояние, которые характеризуются следующими особенностями:

а) технология отработки угольных пластов ведется через скважины (или комбинированным способом), которые служат для вскрытия, подготовки подземных генераторов (реакторов) и добычи через продуктивные скважины;

б) на угольный пласт воздействуют рабочие агенты — микробиологические штаммы, химически активные реагенты, водяной пар, электрический ток, воздух;

в) под влиянием рабочих агентов уголь изменяет свое агрегатное состояние, горючий газ, жидкое синтетические моторное топливо, высокотемпературный газ, гидросмесь, сыпучие, которые могут быть извлечены на поверхность через продуктивные скважины;

г) управление геотехнологическим процессом осуществляется с помощью варьирования технологическими параметрами скважины, генератора (реактора), а также давлением, температурой, расходом газозадушной смеси, количеством и качеством катализатора.

Геотехнологические способы разработки угольных месторождений можно классифицировать по технологическим процессам (рис. 1).

Классификация геотехнологических способов по процессам добычи, в основе которых лежат вид и способ перевода полезного ископаемого в подвижное состояние, приведена в табл. 1.

Особенностями геотехнологических способов разработки полезных ископаемых являются:

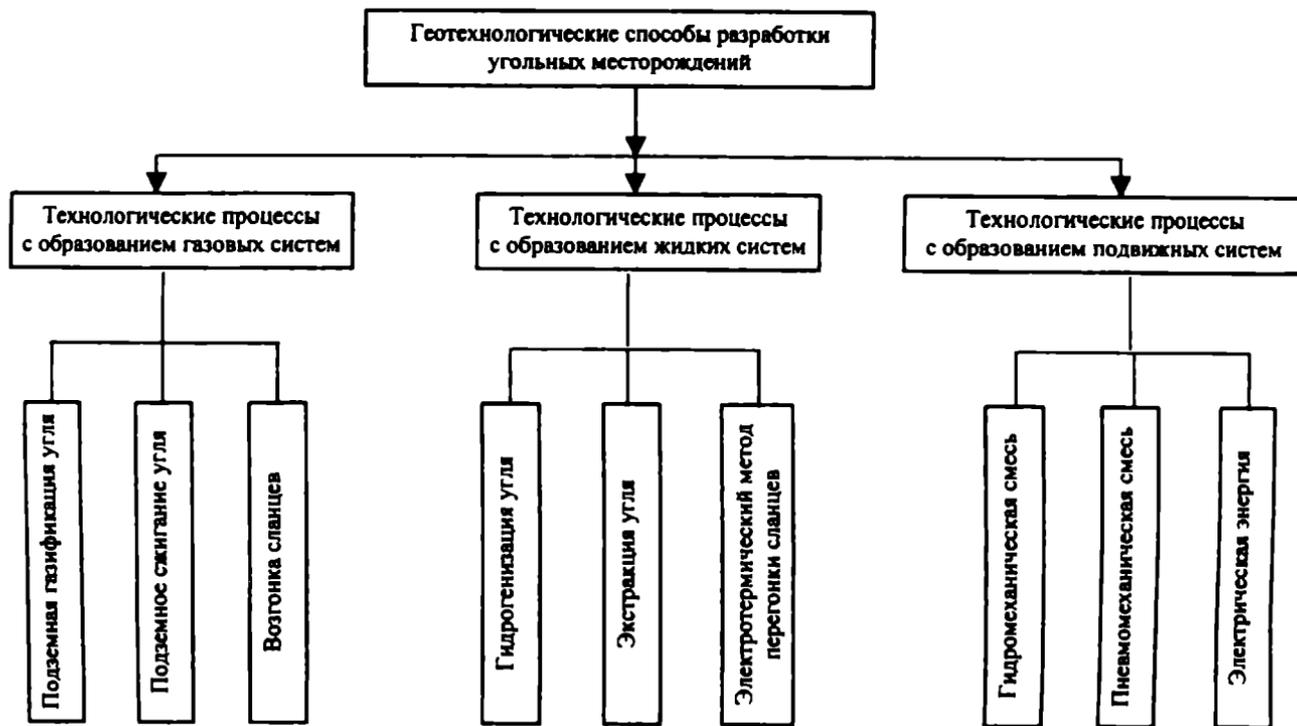


Рис. 1. Классификация геотехнологических способов разработки угольных месторождений

### Классификация геотехнологических способов разработки месторождений полезных ископаемых

Вид подвижного состояния полезного ископаемого	Способ перевода полезного ископаемого в подвижное состояние		
	Физические	Химические	Комбинированные (комплекс физических, химических и биологических воздействий)
Газообразное	Воздействие температуры, давления (сублимация, перегонка)	Окисление, разложение (частичное или полное сжигание, обжиг)	Химические реакции с участием физических полей, микробиологического воздействия
Жидкотекучее (расплав, раствор)	Воздействие температуры, давления (плавление, перегонка, нагрев)	Выщелачивание и растворение с образованием молекулярных растворов)	Растворение, выщелачивание и гидрогенизация с участием физических полей, микробиологического воздействия
Гидромеханическая смесь	Гидропневмо-разрушение, воздействие физическими полями	Растворение связующего вещества	Диспергирование поверхностно-активными веществами, химическими реагентами с участием физических полей, микробиологического воздействия

♦ разработка месторождения ведется через скважины, которые служат для вскрытия, подготовки и добычи полезного ископаемого;

♦ месторождение является и объектом, и местом добычи и переработки полезного ископаемого, т.к. технология предусматривает избирательное извлечение полезного компонента;

♦ геотехнологическое предприятие — промысел (станция) — включает три основных элемента: блок подготовки рабочих агентов, добычное поле, блок переработки продуктивных флюидов;

- ◆ инструментом добычи служат рабочие агенты — энергия или ее носители, вводимые в добычное поле;
- ◆ под воздействием рабочих агентов полезное ископаемое изменяет свое агрегатное состояние или превращается в другое вещество, образуя продуктивные флюиды, которые обладают легкой подвижностью и начинают перемещаться;
- ◆ разработка месторождения имеет зональный характер и перемещается во времени относительно скважин и контуров месторождения;
- ◆ управление добычей осуществляется с поверхности путем изменения характеристики и параметров подачи рабочих агентов.

Геотехнологические способы для добычи ряда полезных ископаемых уже широко используются. К ним относятся: соль, сера, уран, медь и др. По другим полезным ископаемым ведутся полупромышленные, опытные и лабораторные исследования.

В табл. 2. приведены основные сведения о современном состоянии использования геотехнологических способов разработки месторождений полезных ископаемых.

*Таблица 2*

**Современное состояние использования геотехнологических способов**

Способ	Объекты промышленного освоения	Объекты полупромышленных и опытных исследований, разработки, предложения и патенты
Подземное растворение	Месторождения каменной, калийных солей	Месторождения бишофита, соды, глауберовой соли
Подземное выщелачивание	Зоны окисления сульфидных месторождений меди и никеля. Уран инфильтрационных и осадочно-инфильтрационных месторождений, а также забалансовые участки эндогенных месторождений	Месторождения марганца, сульфидные месторождения меди, свинца, цинка и никеля, золота, титана и известняка. Осадочные бурожелезняковые месторождения
Подземная выплавка	Месторождения самородной серы	

Способ	Объекты промышленного освоения	Объекты полупромышленных и опытных исследований, разработки, предложения и патенты
Подземная газификация	Месторождения каменного и бурого углей	Осушенные месторождения серы. Известняк, месторождения горючих сланцев, руд, содержащих мышьяк и ртуть. Сера в непроницаемых рудах, битум и тяжелая нефть. Озокерит, сера вулканогенных месторождений, асфальтит, металлы
Скважинная гидродобыча	Месторождения фосфоритов, строительных песков	Осадочные месторождения металлов, строительные пески и гравий. Титан, золото и алмазы, касситерит в погребенных россыпях, желваковые фосфориты, уголь, мягкие бокситы, железо и т.д.
Добыча полезных ископаемых из подземных вод	Месторождения йодобромистых вод, содержащих бор, уран, стронций	Сточные воды шахт, рудников и нефтепромыслов
Извлечение и использование тепла Земли	Природные парогидротермы	Тепло «сухих» горных пород

Основными проблемами геотехнологии являются:

- ◆ установление связи физико-геологической обстановки залежи, полезного ископаемого и вмещающих пород с рабочими агентами и средствами добычи на уровне молекул, ионов, атомов;

- ◆ совершенствование управления геотехнологическими процессами с целью повышения их производительности и селективности;

- ◆ создание новых и совершенствование известных технологий прямого превращения ископаемого в целевые компоненты, основанных на малооперационности, поточности, простоте

обслуживания и надежности, безотходности, малой энергоемкости, высокой производительности труда и низкой себестоимости;

- ◆ совершенствование технологии переработки и утилизации добытых продуктивных флюидов;

- ◆ охрана окружающей среды и социальные аспекты горного дела.

Цель дисциплины — получение знаний по производственным процессам, технологическим схемам и методам разработки месторождений полезных ископаемых геотехнологическими методами. Она призвана дополнить объем полученных знаний по различным технологиям разработки месторождений твердых полезных ископаемых (открытой, подземной, комбинированной) наиболее индустриальным и перспективным методом — геотехнологией.

В результате изучения дисциплины студент должен приобрести следующие знания и навыки:

- ◆ изучить свойства горных пород как объектов воздействия геотехнологическими методами;

- ◆ изучить физико-химические процессы, протекающие при геотехнологической отработке месторождений;

- ◆ изучить основные и вспомогательные производственные процессы, характерные для геотехнологии;

- ◆ изучить технологические схемы геотехнологических методов;

- ◆ получить навыки проектирования производственных процессов и технологических схем геотехнологии.

Горная наука в своем развитии опирается на достижения математики, физики, химии, геологии, биологии, техники и общей экономики.

Данный курс опирается на знания следующих дисциплин: геология, основы технологии горных работ, управление состоянием массива горных пород, подземная разработка пластовых месторождений, физика горных пород и процессов и другие.

С целью выбора геотехнологического метода отработки месторождения полезного ископаемого необходимо тщательно изучить физико-химические параметры и горно-геологические условия его залегания. Необходимым условием использования геотехнологического способа отработки является технологическая обеспеченность данного процесса и экономическая эффективность получения конечного продукта.

Ниже представлен краткий обзор уже апробированных в промышленности нетрадиционных методов отработки полезных ископаемых, а также предложены перспективные направления дальнейшего развития геотехнологических методов разработки.

Основным направлением совершенствования технологии добычи полезных ископаемых является создание эффективных, безопасных и экологически чистых технологических процессов на базе технологических методов.

# ОСНОВЫ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СПОСОБОВ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

1.1. Физико-химические свойства  
массива горных пород

1.2. Физико-химические основы  
геотехнологических процессов

1.3. Производственные процессы  
при геотехнологии

1.4. Вскрытие и системы разработки  
месторождений геотехнологическими  
способами

## Глава

# 1

---

## **1.1. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД**

В геотехнологии неприемлемо рассмотрение отдельно взятых горных пород. Необходимо исследовать массив горных пород, представляющий собой гетерогенную систему, включающую различные компоненты в твердой, жидкой и газообразной фазах. Исследование массива горных пород заключается в изучении состояния (положение залежи, мощность, обводненность, условия питания и разгрузки), состава (минеральный, химический, гранулометрический, состав рН пластовых вод), строения (структура и текстура руд, пористость и трещиноватость, неоднородность в разрезе и плане) и свойств (фильтрационные — проницаемость, водопроницаемость, размываемость, вязкость, пластичность, размокаемость, влагоемкость и т.д.).

Горная порода — это природное образование минералов, слагающих самостоятельные геологические тела. Осадочные породы — породы, возникшие путем отложения из воды или воздуха продуктов разрушения магматических и метаморфических пород (песчаники, известняки, алевролиты, глинистые сланцы, ископаемые угли и др.).

Трудоемкость извлечения горных пород из недр зависит от физико-механических свойств. Физико-механические свойства пород зависят от строения породы и условий залегания.

Вопросы состояния, состава и строения массивов горных пород изучаются в курсе геологических дисциплин. Частично уже изучены и свойства массивов в курсе «Физика горных пород». Ниже рассмотрены только специфические свойства массивов, важные при геотехнологии.

### **1.1.1. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД**

Гидравлические свойства массива горных пород имеют наибольшее значение для геотехнологических способов разработки месторождений полезных ископаемых. Основной группой

гидравлических свойств являются фильтрационные. Их иногда называют коллекторскими. В первую очередь фильтрационные свойства зависят от пористости, т.е. совокупности всех пустот в горных породах, заключенных между минеральными частицами или их агрегатами.

**Плотность** — масса единицы объема породы (минерального скелета) со всеми содержащимися в ее порах жидкостями и газами. Вес единицы объема твердой фазы породы называется *удельным весом* породы, а вес единицы объема породы в естественном состоянии — *объемным весом*.

Плотность породы

$$\Delta = \frac{V_1}{V} = \frac{\gamma}{\rho}, \quad (1.1)$$

где  $V$  — полный объем породы, взятый в массиве,  $\text{м}^3$ ;  $V_1$  — объем породы в массиве, занимаемый минеральным веществом,  $\text{м}^3$ ;  $\gamma$  — плотность породы в массиве,  $\text{т}/\text{м}^3$ ;  $\rho$  — плотность породы,  $\text{т}/\text{м}^3$ .

Если порода сложена из минералов примерно одинаковой плотности, то ее объемная плотность в основном зависит от пористости. Объемная плотность известняков может меняться от 1,5 до 2,5  $\text{г}/\text{см}^3$ , в то время как плотность слагающего известняка кальцита равна 2,7  $\text{г}/\text{см}^3$ .

**Пористость** — суммарный относительный объем пор, содержащийся в горной породе. Она зависит от формы и размеров зерен, слагающих породу, от степени их отсортированности, сцементированности и уплотненности. Пористость объема породы, взятого в массиве,

$$n = \frac{V_n}{V} = 1 - \frac{\gamma}{\rho}. \quad (1.2)$$

Тогда коэффициент пористости породы определится из следующего выражения:

$$\varepsilon = \frac{\rho}{\gamma} - 1. \quad (1.3)$$

*Общая пористость* — отношение объема пустот и пор к объему горной породы.

Отношение объема пор к объему минерального скелета породы называется коэффициентом пористости.

По величине поры подразделяются на субкапиллярные (диаметр пустот менее 0,2 мкм), капиллярные (0,2—100 мкм) и сверхкапиллярные (более 100 мкм). Поры часто могут соединяться с внешней средой и между собой, образуя сплошные извилистые каналы.

*Динамическая пористость* учитывает только те поры, по которым может фильтроваться жидкость, иногда ее еще называют открытой (эффективной) пористостью.

Площадь поверхности, образуемая стенками пустот и пор, является одной из важнейших геотехнологических характеристик горной породы — *проницаемостью*.

Свойство горных пород пропускать через себя жидкости и газы характеризуется *коэффициентом проницаемости* и *коэффициентом фильтрации*, которые связаны между собой соотношением:

$$K_{\phi} = \frac{K_{\text{пр}} \rho_{\text{ж}}}{\mu}, \quad (1.4)$$

где  $K_{\phi}$  — коэффициент фильтрации, м/с;  $K_{\text{пр}}$  — коэффициент проницаемости, м<sup>2</sup>;  $\rho_{\text{ж}}$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  — вязкость жидкости, Па·с.

Для целей геотехнологии проницаемость горных пород следует определять в натуральных условиях, т.к. только при этом можно учесть всю гамму влияющих факторов.

Различают абсолютную, эффективную и относительную проницаемость.

*Абсолютная проницаемость* характеризует пропускную способность образца для воздуха при атмосферном давлении и вычисляется по линейному закону фильтрации.

*Эффективная (фазовая) проницаемость* характеризует пропускную способность для различных жидкостей.

*Относительная проницаемость* — отношение эффективной проницаемости к абсолютной.

Практической единицей измерения проницаемости является дарси (Д) — величина проницаемости, присущая образцу породы площадью  $1 \text{ см}^2$ , длиной  $1 \text{ см}$ , через который при давлении  $9,8 \cdot 10^4 \text{ Па}$  проходит в  $1 \text{ с}$   $1 \text{ см}^3$  жидкости вязкостью  $10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ . При этом  $1 \text{ Д} = 1,02 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ .

В практике горного производства широкое распространение получил другой параметр — *коэффициент фильтрации*  $K_{\text{ф}}$ . Практически он представляет собой скорость фильтрации газа или жидкости через породы. Коэффициент фильтрации не учитывает влияние напора пластовых вод и их вязкости на изменение количества фильтрующейся воды. В случае фильтрации воды между коэффициентами пористости и фильтрации существует соотношение:  $1 \text{ Д} = 1 \text{ см/с} = 864 \text{ м/сут}$ .

В зависимости от значения коэффициента фильтрации породы подразделяются на водоупорные ( $K_{\text{ф}} < 0,1 \text{ м/сут}$ ), слабопроницаемые ( $0,1 \leq K_{\text{ф}} < 10$ ), среднепроницаемые ( $10 \leq K_{\text{ф}} < 500$ ) и легкопроницаемые ( $K_{\text{ф}} > 500$ ) [4].

В горных породах различают проницаемость межгранулярную и трещинную, причем последняя значительно выше. Для осадочных пород трещинная проницаемость составляет  $(1,5 \div 4,0) \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$ , а межгранулярная — до  $(1,5 \div 4,0) \cdot 10^{-16} \text{ м}^2$ .

Кроме фильтрационных к гидравлическим свойствам массивов горных пород относятся следующие свойства.

*Влагодержимость* — количество воды, удерживаемой силами молекулярного притяжения на поверхности частиц породы:

$$W_{\text{м}} = \frac{G_{\text{м}} - G_{\text{с}}}{G_{\text{с}}}, \quad (1.5)$$

где  $G_{\text{м}}$  — вес влажного образца породы;  $G_{\text{с}}$  — вес образца породы, высушенного при температуре  $105\text{—}110 \text{ }^\circ\text{C}$ .

*Водопроницаемость* — способность породы пропускать воду. Способность пород пропускать воду характеризуется коэффициентом проницаемости, определяемым из уравнения Дарси:

$$k_{\text{пр}} = \frac{Q}{S} \cdot \frac{l_0}{\Delta F} \cdot \eta, \quad (1.6)$$

где  $\frac{Q}{S}$  — скорость фильтрации, см/с;  $\Delta F$  — перепад давления на пути  $l_0$  фильтрации жидкости, МПа (кгс/см<sup>2</sup>);  $\eta$  — вязкость жидкости, г/(см·с);  $Q$  — расход воды через сечение  $S$  в единицу времени, см<sup>3</sup>/с.

В зависимости от величины коэффициента фильтрации породы подразделяются на водоупорные, слабопроницаемые, среднепроницаемые и легкопроницаемые.

Кроме перечисленных свойств, к гидравлическим свойствам горных пород относятся:

- ◆ *водоотдача* — способность горных пород отдавать воду путем свободного вытекания;

- ◆ *водоустойчивость* — способность горных пород сохранять связность, консистенцию и прочность при взаимодействии с водой;

- ◆ *капиллярность* — способность горных пород поднимать влагу по порам под воздействием капиллярных сил;

- ◆ *набухание* — способность горной породы увеличивать объем под воздействием влаги;

- ◆ *усадка* — способность горной породы уменьшать объем при высыхании;

- ◆ *просадочность* — способность горной породы уменьшать объем при замачивании;

- ◆ *смачиваемость* — способность горной породы входить в молекулярное взаимодействие с жидкостями;

- ◆ *адсорбция* — способность горной породы концентрировать на своей поверхности различные вещества из газов, паров и жидкостей;

- ◆ *абсорбция* — способность горной породы поглощать пары, газы и жидкости;

- ◆ *липкость* — способность горной породы прилипать к различным предметам.

### 1.1.2. ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Тепловые свойства лежат в основе геотехнологических способов разработки месторождений полезных ископаемых, использующихся для перевода их в подвижное состояние нагреванием до определенной температуры.

Способность горных пород к фазовым превращениям подразделяется на плавление, испарение, сублимацию, кристаллизацию и конденсацию.

*Плавление* — способность полезного ископаемого переходить в жидкое состояние при нагревании. Оно характеризуется температурой плавления и удельной теплотой плавления. Под *температурой плавления* понимается температурный интервал, определяющий температуру начала плавления горной массы и полного перехода ее в жидкое состояние. *Удельная теплота плавления* — количество тепла, необходимого для плавления единицы горной массы.

*Испарение* (парообразование) — способность полезного ископаемого переходить из твердой или жидкой фазы в газообразную. Оно оценивается количественно — *теплотой испарения*, — количеством тепла, необходимого для преодоления сил связи между молекулами и их «отрыва» с поверхности.

*Сублимация* — способность полезного ископаемого переходить из твердого состояния в газообразное. Количественно она оценивается *теплотой сублимации*.

*Кристаллизация* — способность полезного ископаемого к образованию и росту кристаллов из расплавов, растворов или газов. Она возникает в результате нарушения равновесия исходной фазы (пресыщение или переохладение). В количественном отношении она характеризуется степенью кристаллизации и температурой кристаллизации. *Степень кристаллизации* — количество вещества, выделившегося в твердую фазу из раствора или расплава. *Температура кристаллизации* — температура, соответствующая началу образования твердой фазы.

*Конденсация* — способность полезного ископаемого переходить из газообразного в твердое или жидкое состояние.

При расчете технологических параметров геотехнологических методов, основанных на нагреве полезного ископаемого, также используются следующие тепловые свойства массивов горных пород: теплопроводность, теплоемкость, тепловое расширение или сжатие.

*Теплопроводность* — способность горной породы передавать тепловую энергию при возникновении разности температур. Она характеризуется коэффициентом теплопроводности и коэффициентом конвекции.

*Теплоемкость* — способность горной породы повышать свое теплосодержание при повышении температуры. Она характеризуется удельной, средней и истинной теплоемкостью, а также коэффициентом температуропроводности.

*Тепловое расширение или сжатие* — способность горной породы изменять свои линейные размеры при изменении температуры. Оно характеризуется коэффициентами объемного и линейного расширения.

### **1.1.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И РАДИАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД**

При наложении на массив горных пород электрических, магнитных или радиационных полей в ряде случаев достигается интенсификация химических и физических процессов геотехнологии. В отдельных случаях удается даже привести полезное ископаемое в подвижное состояние этими воздействиями. Широко используются эти методы воздействия при разведке месторождений, для контроля за ходом геотехнологических процессов, при предварительной переработке добытого полезного ископаемого.

К электрическим свойствам относятся: электропроводность, электрическая прочность, поляризация.

*Электропроводность* характеризуется количественно удельной электропроводностью или удельным электрическим сопротивлением и коэффициентом электрической анизотропии.

*Электрическая прочность* — способность горной породы сопротивляться разрушающему действию электрического на-

пряжения. Количественно она измеряется пробивным напряжением.

*Поляризация* — способность горной породы взаимодействовать с окружающим электрическим полем. Она оценивается относительной диэлектрической проницаемостью и углом диэлектрических потерь.

К магнитным свойствам горных пород относятся: магнитная восприимчивость и остаточная намагниченность.

*Магнитная восприимчивость* — свойство горных пород намагничиваться под воздействием внешнего магнитного поля.

*Остаточная намагниченность* — способность горной породы сохранять намагниченность.

К радиационным свойствам горных пород относятся: естественная радиоактивность и способность поглощать  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - и нейтронное излучение.

*Естественная радиоактивность* — способность горной породы создавать радиоактивное излучение.

#### **1.1.4. НЕКОТОРЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД**

При геотехнологических способах разработки месторождений полезных ископаемых необходимо учитывать и использовать некоторые специфические механические, а также акустические свойства массива горных пород.

К этим специфическим механическим свойствам относятся: тиксотропность, прочность, твердость, вязкость разрушения, упругость, пластичность, компрессионная способность, хрупкость.

*Тиксотропность* — способность горных пород, содержащих коллоидные фракции, под воздействием динамических нагрузок к обратимым переходам из твердого состояния в жидкое. Тиксотропность зависит от вида воздействия, его интенсивности и длительности.

Показателями способности горной породы к разрушению являются чувствительность и предел структурной прочности.

*Прочность* — способность горной породы сопротивляться разрушению под воздействием внешних сил. Она характеризуется количественно: пределом прочности при одноосном сжатии или растяжении, сопротивлением срезу, пределом прочности при изгибе, коэффициентом крепости.

*Твердость* — сопротивляемость породы внедрению острого инструмента. Твердость минералов оценивают по шкале Мооса. Высшая твердость соответствует десяти (алмаз), низшая — единице (тальк).

Прочность горных пород оказывает большое влияние на эффективность отделения пород от массива, разрушение и дробление их механическим или другим способом. Твердость всегда выше предела прочности на одноосное сжатие.

$$H_k = k\sigma_{сж}. \quad (1.7)$$

Для возможности сравнения прочности различных пород с целью создания эффективных средств механизации и приближенной экономической оценки разрушаемости породы проф. М.М. Протодяконовым создана классификация горных пород по коэффициенту крепости, который определяется по следующей зависимости:

$$f = \frac{\sigma_{сж}}{100}, \quad (1.8)$$

где  $\sigma_{сж}$  — предел прочности пород на одноосное сжатие.

Классификация пород, предложенная проф. М.М. Протодяконовым, делит горные породы на десять основных категорий (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Породы	Коэффициент крепости	Категория крепости породы	Плотность породы, т/м <sup>3</sup>
Вязкие кварциты и базальты	20	I	2,8—3
Крепкий гранит, самые крепкие песчаники и известняки	15	II	2,6—2,7

Породы	Коэффициент крепости	Категория крепости породы	Плотность породы, т/м <sup>3</sup>
Очень крепкие песчаники и известняки	10	III	2,5—2,6
Колчедан, крепкий известняк	8	IIIa	2,5
Обыкновенный песчаник, песчанистые сланцы	5—6	IV—IVa	2,3—2,4
Крепкий глинистый сланец, некрепкий песчаник и известняк	3—4	V—Va	2,4—2,8
Антрацит, мягкий сланец, мягкий известняк, мел, каменная соль, гипс, мерзлый грунт, разрушенный песчаник	2	VI	2,2—2,6
Крепкий каменный уголь, разрушенный сланец, отвердевшая глина	1,5	VIa	1,8—2
Каменный уголь средней крепости, прочные наносы, плотная глина	1	VII	1,8
Мягкий уголь, мягкая песчаная глина	0,8	VIIa	1,6
Торф, влажный песок	0,6	VIII	1,5
Добытый уголь, песок, насыпной грунт, гравий	0,5	IX	1,7
Плывуны	0,3	X	1,5—1,8

Для общей относительной оценки трудности разрушения пород доля участия сжимающих, скалывающих и растягивающих усилий различна и характеризуется коэффициентом  $\sigma_{\text{раз}}$ .

Тогда

$$\sigma_{\text{раз}} = k_1 \sigma_{\text{сж}} + k_2 \tau_{\text{сдв}} + k_3 \sigma_{\text{р}}. \quad (1.9)$$

Опытами установлено, что прочность пород при сжатии  $\sigma_{\text{сж}}$  больше, чем при сдвиге  $\tau_{\text{сдв}}$ , а при сдвиге больше, чем при растяжении  $\sigma_{\text{р}}$ , т.е.

$$\sigma_{\text{сж}} > \tau_{\text{сдв}} > \sigma_{\text{р}}. \quad (1.10)$$

Технологические свойства горных пород приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Порода	Предел прочности, МПа		
	на сжатие	на сдвиг	на растяжение
Уголь бурый	5—9	1,1—2,5	0,2—1,5
Уголь каменный	2,4—13	0,1—10	0,1—0,5
Антрацит	10—35	1,5—10	0,5—0,9
Аргиллит	21—77	17—23	1—8
Алевролит	6—68	13—28	8—12
Песчаник	140—176	4—42	5—12
Сланец глинистый	37—52	10—16	0,8—1,2

*Вязкость* — свойство породы оказывать сопротивление движению частиц этой породы относительно друг друга. Для характеристики высокопластичных пород существует понятие вязкости. Трудно разрушаются породы, имеющие высокое значение прочности на сжатие и значительную пластичность. Предельное напряжение, при котором образец породы разрушается, называется пределом прочности.

*Упругость* — способность горной породы восстанавливать после снятия нагрузки свою первоначальную форму и размеры. Количественно она характеризуется модулем Юнга, коэффициентом Пуассона, модулем сдвига, коэффициентом всестороннего сжатия.

*Пластичность* — способность горной породы изменять форму без разрыва сплошности при силовом воздействии и сохранять эту форму при снятии действующей нагрузки. Количественно она характеризуется степенью пластичности, коэффициентами пластичности и уплотнения.

*Компрессионная способность* — способность горной породы сжиматься при вертикальной нагрузке и невозможности бокового расширения. Она характеризуется количественно: коэффициентами уплотнения и консолидации, модулями осадки и полной деформации.

*Хрупкость* — способность горной породы к внезапному разрушению при нагрузке без заметных пластических деформаций. Она количественно характеризуется коэффициентом хрупкости.

Акустические свойства используются и учитываются при разрушении массивов ультразвуковыми волнами, а также при геофизических методах контроля. Они оцениваются акустической проводимостью и поглощением.

**Технологические свойства и классификация каменных углей.** Технологические свойства каменных углей, рассмотренные как объект добывания, обогащения и технологического использования, включают кроме основных свойств горных пород и дополнительные параметры.

Первая группа технологических свойств каменных углей характеризует их как объект добывания со следующими дополнительными параметрами:

◆ *метаноносность* — объем метана, содержащийся в свободном и связанном состояниях в единице массы угля. Наличие метана влияет на выбор технологии подземной разработки угля;

◆ *сопротивляемость резанию* — способность угля противостоять механическому воздействию горного инструмента при резании;

◆ *абразивность* — способность пласта к снятию слоя металла при движении режущего инструмента в угле. В зоне отжима сопротивляемость угля резанию меньше, чем в глубине массива:

$$A_{от} = k_{от}A, \quad (1.11)$$

где  $k_{от}$  — коэффициент отжима, значение которого зависит от типа угля и расстояния от кромки забоя в глубь массива.

**Выбороопасность** — газодинамическое явление в угольных шахтах, проявляющееся в виде внезапных выбросов угля и газа, вызванных концентрацией давления горных пород и энергией сжатого и свободного газа.

**Самовозгораемость** — способность углей к самовозгоранию. Определяется скоростью реакций окисления и критической температурой самовозгорания углей.

Вторая группа технологических свойств каменных углей характеризует их как объект обогащения.

**Обогатимость** — возможность полноты извлечения органической части каменного угля из горной массы или разделение его на продукты с повышенной концентрацией составных компонентов путем применения различных методов обогащения. Обогатимость угля — способность к разделению на продукты обогащения по заданным показателям качества.

При обогащении получают три продукта: концентрат, в котором содержание горючей массы более высокое, чем в исходном угле; промежуточный продукт — смесь частиц угля и породы, попавшей в него в результате несовершенства методов обогащения; отходы обогащения с более высоким содержанием негорючих компонентов, чем в исходной горной массе.

Методы обогащения углей: гравитационный, центробежный, флотационный, химический, электрический и магнитный.

Третья группа технологических свойств углей характеризует их как возможность использования в народном хозяйстве по технологическим параметрам.

**Термическая стойкость** — механическая прочность угля в кусках после термической обработки — изучается для углей, предназначенных для сжигания в топках транспортных средств, полукоксования и гидрирования. Устанавливается путем нагревания антрацита при температуре 900 °С и испытания в барабане на дробимость.

**Спекаемость** — свойство углей размягчаться при нагревании без доступа воздуха до температуры 470—550 °С, проходя стадию пластического состояния, переходить в твердое состояние и образовывать прочный пористый продукт.

**Коксуемость** — способность углей некоторых марок или их смесей давать в промышленных установках при определенном температурном режиме прочный крупнокусковой кокс. Пригодность углей для коксования характеризуется показателями, оп-