

**ФИЗИКО-  
ХИМИЧЕСКАЯ  
ГЕОТЕХНОЛОГИЯ**



# ФИЗИКО- ХИМИЧЕСКАЯ ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

*Под общей редакцией д-ра техн. наук, проф.  
В.Ж. Аренса*

*Допущено Федеральным учебно-методическим объединением  
в сфере высшего образования по УГСН 21.00.00 «Прикладная  
геология, горное дело, нефтегазовое дело и геодезия» в качестве  
учебника для студентов вузов, обучающихся по специальностям  
21.05.02 «Прикладная геология», 21.05.03 «Технология геологи-  
ческой разведки», 21.05.04 «Горное дело», 21.05.06 «Физические  
процессы горного или нефтегазового производства»*

**Горное  
образование**



МОСКВА  
ИЗДАТЕЛЬСТВО «ГОРНАЯ КНИГА»  
2021

УДК 622.277  
ББК 33.1  
А 79

*Книга соответствует «Гигиеническим требованиям к изданиям книжным для взрослых» СанПиН 1.2.1253–03, утвержденным Главным государственным санитарным врачом России 30 марта 2003 г. (ОСТ 29.124–94). Санитарно-эпидемиологическое заключение Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека № 77.99.60.953.Д.014367.12.20*

*Рецензенты:*

- действительный член РАН *А.Н. Дмитриевский* (Институт проблем нефти и газа РАН);
- д-р техн. наук, проф. *В.П. Зубов* (Санкт-Петербургский горный университет);
- д-р техн. наук, проф. *А.М. Коломиец* (Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет);
- действительный член РАН *К.И. Трубецкой* (Институт комплексного освоения недр РАН);
- кафедра «Геотехнические способы и физические процессы горного производства» Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ); зав. кафедрой, д-р техн. наук *А.Л. Вильмис*

**Аренс В.Ж., Богуславский Э.И., Гридин О.М., Крейнин Е.В.,  
Небера В.П., Рыспанов Н.Б., Фазлуллин М.И., Хрулёв А.С.,  
Хчяян Г.Х., Шумилова Л.В.**

А 79 Физико-химическая геотехнология: Учебник / Под общей редакцией проф. В.Ж. Аренса. — М.: Издательство «Горная книга», 2021. — 816 с.: ил.

ISBN 978-5-98672-535-2

В учебнике изложены основные вопросы теории физико-химической геотехнологии (ФХГ), даны основные понятия и представления физико-химических методов добычи полезных ископаемых. Рассмотрены геологические, гидрогеологические и другие факторы, определяющие возможность применения и эффективность методов ФХГ. Описаны методы перевода полезных ископаемых в подвижное состояние, общие схемы геотехнологических предприятий, конструкции добычных скважин, применяемое наземное и подземное оборудование. Рассмотрены экономические, социальные и экологические преимущества ФХГ, вопросы применения физико-химических методов в горнодобывающих отраслях промышленности.

Для специалистов горняков, геологов, а также студентов, магистрантов, аспирантов и докторантов горных и геологических вузов.

The textbook presents the fundamental problems of physical and chemical Geotechnology (FHG), give the basic concepts and ideas of physical and chemical methods of mining. The geo-logic, hydrogeologic, and other factors that determine the possibility of the application and effectiveness of the methods FHG. Methods are described for transfer of minerals are mobilized, the general scheme geotechnological enterprises design production wells, used ground and under-ground equipment. Examined the economic, social and environmental benefits of the use of physical and chemical methods in the mining industry. For miners, geologists, and undergraduate and graduate students of mining and geological universities.

ISBN 978-5-98672-535-2

УДК 622.277  
ББК 33.1

- © Аренс В.Ж., Богуславский Э.И., Гридин О.М., Крейнин Е.В., Небера В.П., Рыспанов Н.Б., Фазлуллин М.И., Хрулёв А.С., Хчяян Г.Х., Шумилова Л.В., 2021
- © Издательство «Горная книга», 2021
- © Дизайн книги.  
Издательство «Горная книга», 2021



9 785986 725352

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предуведомление .....	13
К читателям .....	18

## Часть 1. НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ФХГ

<b>Глава 1. Физико-химическая геотехнология как наука .....</b>	<b>21</b>
1.1. Семейство горных наук — геотехнология .....	21
1.2. Философия ФХГ .....	27
1.3. Основы ФХГ .....	32
1.4. Современное состояние ФХГ .....	34
1.5. Физико-химические методы и их классификация .....	39
1.6. Некоторые понятия и определения .....	41
1.7. Основные направления развития ФХГ .....	45
Вопросы для самопроверки .....	51
Темы для рефератов .....	51
Список литературы .....	51
<b>Глава 2. ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФХГ .....</b>	<b>53</b>
2.1. Горная среда, порода, полезные ископаемые и их свойства .....	53
2.2. Физико-геологические факторы, определяющие эффективность отработки месторождения методами ФХГ .....	59
2.3. Требования методов ФХГ к горно-геологическим условиям месторождения .....	60
2.4. Об исследованиях на месторождении при его подготовке к отработке методами ФХГ .....	62
2.5. Геолого-гидрогеологические работы на предприятиях ФХГ .....	67
Вопросы для самопроверки .....	71
Темы для рефератов .....	71
Список литературы .....	71
<b>Глава 3. ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ФХГ .....</b>	<b>72</b>
3.1. Химия процессов добычи .....	72
3.2. Процесс растворения .....	77
3.3. Процесс выщелачивания .....	79
3.4. Термохимические процессы .....	81
3.5. Тепловые процессы .....	83
3.6. Электрофизические процессы .....	87
3.7. Процесс гидравлического разрушения .....	88
3.8. Процессы, определяющие движение рабочих и продуктивных флюидов .....	91

3.9. Процессы сдвижения и гидроразрыва .....	95
3.10. Процессы взрывного разрушения горных пород .....	99
3.11. Процесс подъема полезного ископаемого .....	102
3.12. Процессы биовыщелачивания .....	105
Вопросы для самопроверки .....	109
Темы для рефератов .....	109
Список литературы .....	109
<b>Глава 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ГЕОТЕХНОЛОГИИ .....</b>	<b>111</b>
4.1. Технологические принципы процесса добычи .....	112
4.2. Методический принцип ФХМ .....	113
4.3. Технологии вскрытия и подготовки месторождений скважинами .....	114
4.3.1. Основные требования к вскрытию месторождения .....	114
4.3.2. Технологии вскрытия и подготовки месторождения скважинами .....	114
4.3.3. Буровое оборудование .....	118
4.3.4. Конструкция скважин .....	119
4.3.5. Бурение скважин .....	120
4.3.6. Бурение наклонно направленных скважин .....	125
4.3.7. Возможность использования техники горизонтально направленного бурения в технологии .....	127
4.3.8. Крепление скважин .....	129
4.3.9. Заканчивание бурения скважин .....	131
4.3.10. Гидравлическая система «скважина–пласт» .....	132
4.3.11. Исследования в скважинах и их документация .....	139
4.4. Средства добычи .....	141
4.4.1. Оборудование предприятий ФХГ .....	141
4.4.2. Оборудование добычных скважин .....	143
4.4.3. Оборудование и инструмент для ремонта скважин .....	149
4.5. Управление и контроль процессом добычи .....	150
Вопросы для самопроверки .....	154
Темы для рефератов .....	154
Список литературы .....	154
<b>Глава 5. ПЕРЕРАБОТКА ПРОДУКТИВНЫХ РАСТВОРОВ .....</b>	<b>156</b>
5.1. Пульпы скважинной гидродобычи .....	156
5.2. Рассолы .....	158
5.3. Продукты выщелачивания .....	158
5.3.1. Выбор высокоэффективного растворителя при выщелачивании .....	158
5.3.2. Химизм процесса выщелачивания .....	163
5.4. Переработка продуктивных растворов выщелачивания .....	167
5.4.1. Оборудование для переработки продуктов выщелачивания, содержащих цветные и благородные металлы .....	167
5.4.2. Оборудование для переработки продуктов скважинного выщелачивания .....	203
Вопросы для самопроверки .....	216
Темы для рефератов .....	217
Список литературы .....	217

<b>Глава 6. ИССЛЕДОВАНИЯ В ФХГ</b> .....	218
6.1. Об исследованиях в ФХГ .....	218
6.2. О путях решения исследовательских задач .....	221
6.3. О направлении исследований в ФХГ и ожидаемых результатах .....	223
6.4. О прогнозировании будущего в исследованиях ФХГ .....	223
6.5. Об организации и проведении исследовательских работ по ФХГ .....	224
6.6. Научитесь проводить исследования (к чему надо себя готовить студенту) .....	225
Вопросы для самопроверки .....	227
Темы для рефератов .....	227
Список литературы .....	227
<b>Глава 7. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ ФХГ</b> .....	228
7.1. Разработка проектной документации .....	229
7.2. Основания для проектирования .....	230
7.3. Основные принципы проектирования .....	232
7.4. Специфика проектирования объектов физико-химической геотехнологии .....	233
7.5. Стадии проектирования, понятие «дорожной карты» .....	234
7.6. Опытно-промышленные эксперименты .....	239
7.7. Общие выводы и рекомендации .....	244
7.8. Инвестиционные риски .....	250
Вопросы для самопроверки .....	252
Темы для рефератов .....	252
Список литературы .....	252
<b>Глава 8. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МЕТОДОВ ФХГ</b> .....	254
8.1. Особенности экономики методов ФХГ .....	254
8.2. Методика выбора метода разработки .....	256
8.3. Структура капитальных вложений .....	259
8.4. Производительность труда и себестоимость добычи .....	260
8.5. Анализ экономики вскрытия месторождения .....	263
8.6. Методика расчета основных параметров добычи .....	266
8.7. Оценка экономической эффективности проектов освоения месторождений методами ФХГ .....	270
8.8. Экономическая эффективность проекта .....	274
Вопросы для самопроверки .....	275
Темы для рефератов .....	276
Список литературы .....	276
<b>Глава 9. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И СОЦИАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ МЕТОДОВ ФХГ</b> .....	277
9.1. План экологической политики горного предприятия, реализующего ФХГ .....	277
9.2. План экологического сопровождения проекта СПВ .....	286
9.3. Охрана земной поверхности .....	290
9.4. Охрана воздушного бассейна .....	291
9.5. Охрана водных ресурсов .....	292

9.6. Социальная политика предприятий (Корпораций), реализующих методы ФХГ .....	293
Вопросы для самопроверки .....	296
Темы для рефератов .....	297
Список литературы .....	297
<b>Глава 10. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ .....</b>	<b>298</b>
10.1. Процессы разработки месторождений через скважины как объекты исследований .....	298
10.2. Основы моделирования .....	302
Вопросы для самопроверки .....	306
Список литературы .....	307
<b>Часть 2. МЕТОДЫ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ ДОБЫЧИ</b>	
<b>Глава 1. ПОДЗЕМНОЕ РАСТВОРЕНИЕ СОЛЕЙ (ПРС) .....</b>	<b>308</b>
1.1. Добыча солей методом подземного растворения .....	309
Вопросы для самопроверки .....	315
Темы для рефератов .....	315
Список литературы .....	315
<b>Глава 2. СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПОДЗЕМНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ .....</b>	<b>317</b>
2.1. Строительство подземных резервуаров в массиве каменной соли .....	317
2.2. Подземные хранилища, создаваемые в многолетнемерзлых породах .....	342
Вопросы для самопроверки .....	347
Список литературы .....	347
<b>Глава 3. ПОДЗЕМНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ МЕТАЛЛОВ (ПВ) .....</b>	<b>348</b>
3.1. Основные сведения о ПВ .....	348
3.2. Минеральная база ПВ .....	354
3.3. Технология ПВ .....	355
3.4. Шахтное выщелачивание без дробления руд .....	358
3.5. Задачи лабораторных и опытных исследований ПВ .....	360
Вопросы для самопроверки .....	366
Темы для рефератов .....	366
Список литературы .....	366
<b>Глава 4. КУЧНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ МЕТАЛЛОВ .....</b>	<b>368</b>
4.1. Основные понятия и представления .....	368
4.2. Современное состояние технологии КВ .....	372
4.3. Общие сведения о кучном выщелачивании металлов .....	378
Вопросы для самопроверки .....	400
Темы для рефератов .....	401
Список литературы .....	401

<b>Глава 5. РУДНИЧНАЯ МИКРОБИОЛОГИЯ И БИОГЕОТЕХНОЛОГИЯ. . . . .</b>	<b>402</b>
5.1. Основы биогеохимии, биогеохимической деятельности микроорганизмов и геологической микробиологии . . . . .	403
5.2. Биогеотехнология металлов . . . . .	412
5.2.1. Переработка сульфидных руд и концентратов с помощью ацидофильных железо- и сероокисляющих микроорганизмов . . . . .	413
5.2.2. Очистка сточных вод металлургии . . . . .	429
5.3. Биогеотехнология нефти. . . . .	436
Вопросы для самопроверки . . . . .	439
Темы для рефератов . . . . .	439
Список литературы . . . . .	439
<b>Глава 6. ПОДЗЕМНАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ УГЛЯ (ПГУ) . . . . .</b>	<b>441</b>
6.1. Основные понятия и представления . . . . .	441
6.2. История развития ПГУ . . . . .	442
6.3. Технология ПГУ . . . . .	442
6.4. Факторы, влияющие на подземную газификацию. . . . .	452
6.5. Гидрогеологические особенности ПГУ . . . . .	453
6.6. Основные направления исследований в области ПГУ . . . . .	454
Вопросы для самопроверки . . . . .	455
Темы для рефератов . . . . .	455
Список литературы . . . . .	455
<b>Глава 7. ПОДЗЕМНОЕ СЖИГАНИЕ СЕРЫ (ПСС) . . . . .</b>	<b>456</b>
Вопросы для самопроверки . . . . .	459
Список литературы . . . . .	459
<b>Глава 8. ПОДЗЕМНАЯ ВЫПЛАВКА СЕРЫ . . . . .</b>	<b>460</b>
8.1. Основные понятия и представления . . . . .	460
8.2. Параметры процесса подземной выплавки серы и их определение . . . . .	461
8.3. Задачи исследований . . . . .	468
Вопросы для самопроверки . . . . .	469
Темы для рефератов . . . . .	469
Список литературы . . . . .	469
<b>Глава 9. ТЕРМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДОБЫЧИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ (ДОБЫЧА ТРУДНО ИЗВЛЕКАЕМЫХ ТОПЛИВ) . . . . .</b>	<b>470</b>
9.1. Угольный метан . . . . .	470
9.2. Сланцевый газ . . . . .	471
9.3. О возможности добычи природных газогидратов методами ФХГ . . . . .	472
9.4. Термические методы разработки высоковязких углеводородов. . . . .	474
9.5. Перспективные физико-химические методы добычи каустобиолитов. . . . .	481
9.6. Подземная газификация и перегонка сланцев . . . . .	482
9.7. О возможности добычи озокерита методами ФХГ. . . . .	487
Вопросы для самопроверки . . . . .	489
Темы для рефератов . . . . .	489
Список литературы . . . . .	489



<b>Глава 10. СКВАЖИННАЯ ГИДРОТЕХНОЛОГИЯ</b> .....	491
10.1. Сквaziнная гидротехнология как направление физико-химической технологии .....	491
10.2. Общая технологическая схема СГД .....	494
10.3. Технологические схемы выемки при СГД .....	496
10.4. Классификация систем разработки при СГД .....	502
10.5. Перспективы и основные направления применения сквaziнной гидротехнологии .....	505
Вопросы для самопроверки .....	506
Список литературы .....	507
<b>Глава 11. ДОБЫЧА МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ДНА МОРЕЙ И ОКЕАНОВ</b> .....	508
11.1. Общая характеристика морей и океанов .....	508
11.2. Морфология морского дна .....	509
11.3. Прибрежно-морские россыпи .....	512
11.4. Донные океанические осадки .....	513
11.5. Глубоководные залежи полезных ископаемых .....	515
11.6. Снаряды гидравлического действия .....	517
11.6.1. Общие сведения .....	517
11.6.2. Землесосные снаряды .....	517
11.6.3. Эжекторные земснаряды .....	518
11.6.4. Эрлифтные установки .....	519
11.7. Снаряды механического действия .....	521
11.7.1. Многочерпаковые драги .....	521
11.7.2. Грейферные снаряды .....	522
11.7.3. Штанговые снаряды .....	524
11.8. Технологические возможности глубоководного оборудования .....	524
11.9. О проблемах добычи минерального сырья со дна морей и океанов .....	527
Вопросы для самопроверки .....	528
Тема для реферата .....	528
Список литературы .....	528
<b>Глава 12. ДОБЫЧА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛА ЗЕМЛИ</b> .....	530
12.1. Общие представления о тепле Земли .....	530
12.2. Понятийный аппарат и терминология (основные понятия и представления) .....	532
12.3. История развития геотермальной энергетики .....	538
12.4. Геотермальная геология .....	541
12.5. Геотермальная технология .....	543
12.6. Технологические процессы глубинной добычи теплоты недр .....	545
12.7. Приповерхностные геотермальные системы .....	557
12.8. Прогнозная геолого-экономическая оценка глубинных ресурсов и запасов тепловой энергии горных пород .....	562
12.9. Прогнозная геолого-экономическая оценка приповерхностных ресурсов и запасов тепловой энергии горных пород .....	573
12.10. Мировой опыт освоения теплоты недр .....	584
12.11. Экономическая оценка экологических преимуществ освоения геотермальных ресурсов .....	588

12.12. Комплексное использование нетрадиционных источников энергии .....	589
Вопросы для самопроверки .....	594
Темы для рефератов .....	594
Список литературы .....	594
<b>Глава 13. ДОБЫЧА ЖИДКОЙ РУДЫ</b> .....	596
13.1. Основные понятия и представления .....	596
13.2. Минеральная база природных и техногенных вод .....	597
13.3. Добыча полезных ископаемых из минерализованных вод .....	598
13.4. Потенциал комплексного освоения обводненных участков нефтегазоконденсатных залежей .....	599
Вопросы для самопроверки .....	600
Список литературы .....	600
<b>Глава 14. О ВОЗМОЖНОСТЯХ ОБРАЗОВАНИЯ НОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ</b> .....	602
<b>Заключение</b> .....	604

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Часть 1

<i>Приложение № 1 к главе 1. Классификация геотехнологических процессов по И.П. Кириченко</i> .....	607
<i>Приложение № 2 к главе 3. Сводка неорганических реагентов, разлагающих минералы (растворители минералов)</i> .....	610
<i>Приложение № 3 к главе 3. Процесс гидравлического разрушения и доставки пород</i> .....	625
<i>Приложение № 4 к главе 3. Способы скважинного подъема на поверхность</i> .....	634
<i>Приложение № 5 к главе 6. О работе межотраслевой лаборатории геотехнологических методов добычи горнохимического сырья (МОНИЛГЕО) и результатах её деятельности</i> .....	641
<i>Приложение № 6 к главе 10. Сводная таблица наиболее распространённых критериев подобия</i> .....	654
<i>Приложение № 7 к главе 2. Гидрофизические свойства руд</i> .....	656

### Часть 2

<i>Приложение № 1 к главе 3. Скважинное подземное выщелачивание (СПВ) урана и пути его совершенствования</i> .....	660
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

<i>Приложение № 2 к главе 3. Перспективы СПВ золота</i> .....	681
<i>Приложение № 3 к главе 3. Подземное выщелачивание фосфорного сырья</i> .....	701
<i>Приложение № 4 к главе 3. Подземное выщелачивание цветных, благородных, редких и радиоактивных металлов из скальных руд</i> .....	706
<i>Приложение № 5 к главе 3. Скважинное подземное выщелачивание полезных компонентов из алюминий- и никельсодержащих руд</i> .....	713
<i>Приложение № 6 к главе 4. Химические реакции с цианидом натрия</i> .....	721
<i>Приложение № 7 к главе 4. Рекомендуемые решения при проектировании установок кучного выщелачивания с учётом опыта работы золотодобывающих компаний России</i> .....	725
<i>Приложение № 8 к главе 4. Определение основных геотехнологических параметров кучного выщелачивания металлов</i> .....	748
<i>Приложение № 9 к главе 9. Разработка газогидратных залежей</i> .....	750
<i>Приложение № 10 к главе 9. Сланцевый газ</i> .....	764
<i>Приложение № 11 к главе 10. Методики расчёта параметров скважинной гидротехнологии</i> .....	777
<i>Приложение № 12 к главе 11. Материалы статьи Ялтанца И.М., Мяскова А.В., Дробаденко В.П., Пастихина Д.В. «Проблемы освоения месторождений твердых полезных ископаемых дна морей и океанов» (журнал «Гидротехническое строительство». 2018. № 11)</i> .....	785
<i>Приложение № 13. Рекомендации по написанию курсовой работы по ФХГ</i> .....	796
<i>Приложение № 14. Смысл жизни. Оценка своего труда. Тесты</i> .....	798
<i>Приложение № 15. Алгоритм решения изобретательских задач</i> .....	810
<i>Коротко об авторах</i> .....	812