



**ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО**

**ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**РЕДАКЦИОННЫЙ  
С О В Е Т**

*Председатель*

**Л.А. ПУЧКОВ**

*Зам. председателя*

**Л.Х. ГИТИС**

*Члены редсовета*

**И.В. ДЕМЕНТЬЕВ**

**А.П. ДМИТРИЕВ**

**Б.А. КАРТОЗИЯ**

**А.В. КОРЧАК**

**М.В. КУРЛЕНЯ**

**В.И. ОСИПОВ**

**В.Л. ПЕТРОВ**

**Э.М. СОКОЛОВ**

**К.Н. ТРУБЕЦКОЙ**

**В.А. ЧАНТУРИЯ**

**Е.И. ШЕМЯКИН**

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МОСКОВСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ГОРНОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

*президент МГГУ,  
чл.-корр. РАН*

*директор  
Издательства МГГУ*

*академик РАЕН*

*академик РАЕН*

*академик РАЕН*

*академик МАН ВШ*

*академик РАН*

*академик РАН*

*академик МАН ВШ*

*академик МАН ВШ*

*академик РАН*

*академик РАН*

*академик РАН*

**ВЫСШЕЕ ГОРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ**

**И.И. ШАРОВАР**

**ГЕО-  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ  
СПОСОБЫ  
РАЗРАБОТКИ  
ПЛАСТОВЫХ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

*Издание 2-е, стереотипное*

*Рекомендовано Министерством образования  
Российской Федерации в качестве учебного  
пособия для студентов высших учебных за-  
ведений, обучающихся по направлению «Гор-  
ное дело» специальности «Подземная разра-  
ботка месторождений полезных ископаемых»*

**МОСКВА**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО  
УНИВЕРСИТЕТА**

**2 0 0 7**



УДК 622.234  
ББК 33.24  
Ш 25

*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 № 77.99.60.953.Д.008501.07.07*

**И.И. Шаровар**

Ш 25 Геотехнологические способы разработки пластовых месторождений. — 2-е изд., стер. — М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2007. — 244 с. ISBN 5-7418-0097-X

Описаны физико-химические свойства горных пород. Изложены физико-химические основы геотехнологических процессов. Рассмотрены производственные процессы при использовании геотехнологических способов для отработки пластовых месторождений. Уделено внимание схемам вскрытия и системам разработки. Приведены технологические схемы скважинной добычи твердых полезных ископаемых. Пособие включает в себя лабораторный практикум по курсу и методические указания по выполнению курсового проекта.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Горное дело» специальности «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых».

УДК 622.234  
ББК 33.24

ISBN 5-7418-0097-X

© И.И. Шаровар, 2006, 2007  
© Издательство МГТУ, 2006, 2007  
© Дизайн книги. Издательство МГТУ, 2006, 2007

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ .....	8
<b>Часть I</b>	
ОСНОВЫ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СПОСОБОВ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ .....	15
1.1 Физико-химические свойства массива горных пород .....	16
1.1.1. Гидравлические свойства массива горных пород .....	16
1.1.2. Тепловые свойства горных пород .....	19
1.1.3. Электромагнитные и радиационные свойства массива горных пород .....	21
1.1.4. Некоторые механические и акустические свойства массива горных пород .....	22
1.2. Физико-химические основы геотехнологических процессов .....	24
1.2.1. Основы процессов растворения и выщелачивания полезных ископаемых .....	25
1.2.2. Термические и термохимические методы воздействия на массив горных пород .....	30
1.2.3. Принцип диспергирования горных пород .....	34
1.2.4. Воздействие электромагнитных полей на массив горных пород .....	34
1.2.5. Гидравлические процессы при геотехнологических способах разработки .....	35
1.3. Производственные процессы при геотехнологии .....	39
1.3.1. Сооружение добычных скважин .....	39
1.3.2. Производство рабочих агентов при геотехнологии .....	51
1.3.3. Поверхностное обслуживание скважин .....	56
1.3.4. Процесс добычи полезного ископаемого геотехнологическими способами .....	57
1.3.5. Процесс управления массивом горных пород при геотехнологии .....	62
1.3.6. Процесс транспортировки полезного ископаемого от места добычи до места переработки .....	71
1.3.7. Комплексная автоматизация производственных процессов геотехнологии .....	72
1.4. Вскрытие и системы разработки месторождений геотехнологическими способами .....	73
1.4.1. Геотехнологические способы вскрытия месторождений .....	73

1.4.2. Геотехнологические системы разработки месторождений	85
1.4.3. Основы выбора геотехнологических систем разработки..	95
1.4.4. Оценка эксплуатационных потерь полезного ископаемого при геотехнологии .....	96
1.5. Технологические схемы скважинной добычи твёрдых полезных ископаемых.....	100
1.5.1. Подземное растворение полезных ископаемых.....	100
1.5.2. Подземная выплавка полезных ископаемых.....	116
1.5.3. Подземная газификация горючих полезных ископаемых.....	122
1.5.4. Подземная газификация полезных ископаемых.....	131
1.5.5. Подземное выщелачивание полезных ископаемых.....	137
1.5.6. Скважинная гидродобыча полезных ископаемых.....	150
1.5.7. Добыча и использование тепла Земли.....	165
<b>Часть II.</b>	
<b>ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО КУРСУ</b> .....	175
2.1. Общие указания по выполнению лабораторных работ.....	176
2.2. Методические указания по проведению лабораторных работ.....	177
2.2.1. Лабораторная работа №1. Подготовка исходных данных для проектирования геотехнологической разработки месторождений полезных ископаемых.....	177
2.2.2. Лабораторная работа №2. Методика расчета производительности гидравлического разрушения.....	181
2.2.3. Лабораторная работа №3. Проектирование подземной газификации углей.....	187
2.2.4. Лабораторная работа №4. Выбор оптимальных технологических параметров скважинной гидродобычи полезных ископаемых.....	192
2.2.5. Лабораторная работа №5. Расчет параметров технологии подземного выщелачивания.....	200
2.2.6. Лабораторная работа №6. Расчет технико-экономических показателей геотехнологии.....	206
<b>Часть III</b>	
<b>МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА</b> .....	213
3.1. Цель и задачи курсового проектирования.....	214
3.2. Организация выполнения курсового проекта.....	214
3.3. Оформление курсового проекта.....	215
3.4. Инструкция по выполнению курсового проекта.....	218
3.4.1. Геологическое описание участка месторождения.....	218
3.4.1.1. Литолого-стратиграфическое описание участка.....	218
3.4.1.2. Расчет промышленных запасов участка.....	219
3.4.2. Обоснование технологической схемы промысла.....	220

3.4.2.1. Выбор способа отработки запасов участка.....	220
3.4.2.2. Подготовка и вскрытие запасов участка.....	220
3.4.2.3. Конструкция буровых скважин и буровое оборудование.....	222
3.4.2.4. Технология добычи.....	223
3.4.2.5. Система разработки.....	224
3.4.2.6. Расчет производственных процессов.....	228
3.4.2.7. Расчет экономической эффективности способа.....	228

<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b> .....	229
<i>Приложение 1.</i> Программа курса «Геотехнологические способы разработки пластовых месторождений».....	230
<i>Приложение 2.</i> Форма титульного листа курсового проекта.....	235
<i>Приложение 3.</i> Образец индивидуального задания на выполнение курсового проекта по дисциплине.....	236

<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	237
---	-----

Горная наука — система научных знаний о природных условиях, геологической среде, технологии, технике и экономике извлечения из недр полезных ископаемых и их первичной переработке [1].

Она подразделяется на геологические, физико-технические, экономические и горные дисциплины. Горные дисциплины связаны с технологии разведки, разработки и первичной переработки полезных ископаемых. Технология разработки полезных ископаемых включает три направления: открытая, подземная и скважинная технологии добычи. Скважинная технология добычи представляет собой технологию добычи воды, нефти, газа и твёрдых полезных ископаемых. Учение о добыче твёрдых полезных ископаемых через скважины получило название геотехнология [2].

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

Впервые курс «Геотехнологические способы разработки месторождений полезных ископаемых» введён в учебные планы подготовки студентов специальности 09.02 в 1987 году. В действующих учебных планах предусматривается изучение этой дисциплины в 9 семестре в течение 17 недель. При этом предусматривается следующая учебная

нагрузка: лекции — 51 час, лабораторные работы — 17, практические занятия — 17, курсовой проект.

Настоящее учебное пособие является одним из первых и призвано дать студентам комплекс знаний по геотехнологии.

Цель дисциплины — получение знаний по производственным процессам, технологическим схемам и методам разработки месторождений полезных ископаемых геотехнологическими методами. Она призвана дополнить объём полученных знаний по различным технологиям разработки месторождений твёрдых 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 своём 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 разра-

ботка пластовых месторождений, физика горных пород и процессов и другие.

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:

- разработка месторождения ведётся через скважины, которые служат для вскрытия, подготовки и добычи полезного ископаемого;

Таблица 1

**Классификация геотехнологических способов разработки месторождений полезных ископаемых [2]**

Вид подвижного состояния полезного ископаемого	Способ перевода полезного ископаемого в подвижное состояние.		
	Физические	Химические	Комбинированные (комплекс физических, химических и биологических воздействий).
1	2	3	4
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.

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
Гидромеханическая смесь.	Гидро-, пневмо-разрушение, воздействие физическими полями.	Растворение связующего вещества.	Диспергирование поверхностно активными веществами, химическими реагентами с участием физических полей, микробиологического воздействия.

- 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 её носители, вводимые в добычное поле;
- под воздействием рабочих агентов полезное ископаемое изменяет своё агрегатное состояние или превращается в другое вещество, образуя продуктивные флюиды, которые обладают лёгкой подвижностью и начинают перемещаться;
- разработка месторождения имеет зональный характер и перемещается во времени относительно скважин и контуров месторождения;
- управление добычей осуществляется с поверхности путём 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 таблице 2. приведены основные сведения о современном состоянии использования геотехнологических способов разработки месторождений полезных ископаемых.

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;

Таблица 2

Современное состояние использования геотехнологических способов [2]

Способ	Объекты промышленного освоения.	Объекты полупромышленных и опытных исследований, разработки, предложения и патенты.
1	2	3
Подземное растворение.	Месторождения каменной, калийных солей.	Месторождения бисфита, 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.

1	2	3
Подземная выплавка.	Месторождения самородной серы.	
Подземная газификация.	Месторождения каменного и бурого угля.	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.

- 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 надёжности, безотходности, малой энергоёмкости, высокой производительности труда и низкой себестоимости;

■ совершенствование технологии переработки и утилизации добытых продуктивных флюидов;

■ охрана окружающей среды и социальные аспекты горного дела.

В области развития геотехнологии большой вклад внесли русские учёные. Д.И. Менделеев предложил идею подземной газификации углей, получившую в дальнейшем развитие в работах английского учёного 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 учёные 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. Аренс.

Необходимо отметить также вклад в развитие отдельных методов следующих учёных: 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.

## **Часть I**

# **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

1.5. Технологические схемы скважинной добычи твердых полезных ископаемых

## 1.1 Физико-химические свойства массивов горных пород

В геотехнологии неприемлемо рассмотрение отдельно взятых горных пород. Необходимо исследовать массив горных пород, представляющий собой гетерогенную систему, включающую различные компоненты в твёрдой, жидкой и газообразной фазах. Исследование массива горных пород заключается в изучении состояния (положение залежи, мощность, обводнённость, 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, влагоёмкость и т.д.).

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, за-

ключённых между минеральными частицами или их агрегатами [4].

**Общая пористость** — отношение объёма пустот и пор к объёму горной породы.

Отношение объёма пор к объёму 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 её ещё 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 [2]:

$$K_{\phi} = \frac{K_{np} \cdot \rho_{ж}}{\mu}, \quad (1.1)$$

где  $K_{\phi}$  — коэффициент фильтрации, м/с;  
 $K_{np}$  — коэффициент проницаемости, м<sup>2</sup>;  
 $\rho_{ж}$  — 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  $1 \text{ Д} = 1,02 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ . [4].

В практике горного производства широкое распространение получил другой параметр — коэффициент фильтрации  $K_f$ . 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 [4]:  $1 \text{ Д} = 1 \text{ см/с} = 864 \text{ м/сут}$ .

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

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

Кроме фильтрационных, к гидравлическим свойствам массивов горных пород относятся:

- влагоёмкость — способность горных пород вмещать и удерживать воду;
- водоотдача — способность горных пород отдавать воду путём 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 объём под воздействием влаги;
- усадка — способность горной породы уменьшать объём при высыхании;
- просадочность — способность горной породы уменьшать объём 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, использующих для перевода их в подвижное состояние нагревание до определённой 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 её в жидкое состояние. *Удельная теплота плавления* — количество тепла, необходимого для плавления единицы горной массы.

**Испарение** (парообразование) — способность полезного ископаемого переходить из твёрдой 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 твёрдого 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 переохлаждение). В количественном отношении она характеризуется степенью кристаллизации и температурой кристаллизации.

*Степень кристаллизации* — количество вещества, выделившегося в твёрдую фазу из раствора или расплава. *Температура кристаллизации* — температура, соответствующая началу образования твёрдой фазы.

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

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

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

**Теплоёмкость** — способность горной породы повышать своё теплосодержание при повышении температуры. Она характеризуется удельной, средней и истинной теплоёмкостью, а также коэффициентом температуропроводности.

**Тепловое расширение или сжатие** — способность горной породы изменять свои линейные размеры при изменении температуры. Оно характеризуется коэффициентами объёмного 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 удаётся 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 напряжения. 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, твёрдость, вязкость разрушения, упругость, пластичность, компрессионная способность, хрупкость.

Тиксотропность — способность горных пород, содержащих коллоидные фракции, под воздействием динамических нагрузок к обратимым переходам из твёрдого 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.

Твёрдость — способность горной породы оказывать сопротивление локальному воздействию. Количественно она характеризуется показателем статической и динамической твёрдости.

Вязкость разрушения — способность горной породы сопротивляться развитию в ней трещин.

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.

## 1.2

### **Физико-химические основы геотехнологических процессов.**

---

В основе геотехнологических способов лежат физические и химические процессы. Физические процессы сопровождаются изменением формы, внешнего вида и физических свойств полезного ископаемого. Химические процессы сопровождаются изменением химического состава и химических свойств полезного ископаемого.

Каждый геотехнологический способ включает не один, а несколько различных процессов, одни из которых являются основными, другие — вспомогательными, третьи — обеспечивающими.

К основным процессам относятся процессы, связанные с добычей полезных ископаемых. Например, процессы перевода полезного ископаемого в подвижное состояние,

доставки рабочих агентов в добычное поле, выдачи продуктивных флюидов на поверхность.

К обеспечивающим процессам относятся процессы, дающие возможность выполнять добычные процессы. К ним относятся: процессы вскрытия и подготовки месторождения, приготовления рабочих агентов, переработки продуктивных флюидов, контроля и управления параметрами добычи, качества и др.

К вспомогательным процессам относятся: энергообеспечение, ремонт добычного оборудования, геолого-маркшейдерское обслуживание добычных работ и т.д.

#### 1.2.1

##### **Основы процессов растворения и выщелачивания полезных ископаемых**

С помощью различных растворителей можно переводить в подвижное состояние многие полезные ископаемые. Такой перевод происходит в результате процессов растворения и выщелачивания, которые различаются механизмом взаимодействия растворителя и полезного ископаемого.

**Растворение** протекает в результате диффузии и межмолекулярного взаимодействия без нарушения химического состава полезного ископаемого. Процесс растворения лежит в основе скважинной добычи растворимых в воде солей: галита, сильвина, бишофита и др.

**Выщелачивание** сопровождается изменением полезного ископаемого как химического соединения и переводом его в раствор. Способом выщелачивания ведётся извлечение из руд металлов, их солей и окислов.

В качестве выщелачивающих агентов используют кислоты и водные растворы солей.

Процесс растворения — гетерогенная реакция, происходящая на границе раздела двух сред: твёрдой и жидкой. Она включает:

- поступление растворителя к поверхности растворимого вещества;
- взаимодействие растворителя и растворимого вещества (межфазные процессы);
- удаление растворённого вещества от поверхности растворимого вещества (диффузионный процесс);

Скорость диффузионного процесса растворения определяется разностью концентраций растворимого вещества на контакте между пограничным слоем насыщенного рассола и общей массой растворителя. По мере насыщения раствора скорость растворения уменьшается по логарифмическому закону.

Различают:

- массовую скорость растворения - количество соли, растворимое в единицу времени с единицы поверхности;
- линейную скорость растворения - расстояние, на которое распространяется растворение в единицу времени.

Скорость растворения зависит от угла наклона поверхности растворимого вещества и температуры растворителя. В то же время она мало зависит от давления.

Особенно сложен процесс, когда имеем дело с растворением одновременно нескольких веществ, например, сильвинита, состоящего из хлористого калия (сильвина) и хлористого натрия (галита).

Кристаллизация соли — процесс, обратный растворению. Она наступает, когда раствор при данной температуре пресыщен и происходит вследствие испарения части растворителя или понижения температуры насыщенного

раствора. Скорость кристаллизации зависит от присутствия в растворе зародышей кристаллов, быстроты охлаждения раствора, перемешивания, высокой начальной температуры, чистоты раствора.

Природа растворения солей очень сложна, ещё больше её осложняет наличие нерастворимых компонентов.

Процесс выщелачивания более сложен, чем процесс растворения. Он описывается сложными дифференциальными уравнениями с учётом влияния формы, размеров и полисперстности частиц, длины слоя, концентрации растворителя, гидродинамики движения жидкости.

Методы химического извлечения минералов, основанные на выщелачивании, предусматривают обычно селективное извлечение полезного компонента.

Механизм процесса выщелачивания определяется структурой и составом растворимого минерала, характером химической связи в его кристаллической решётке, комплексом физико-химических свойств растворителя. В основе выщелачивания могут лежать:

- обменные реакции, при которых происходит образование легкорастворимых соединений за счёт обмена ионами (взаимодействие окислов и солей металлов с кислотами);
- окислительно-восстановительные реакции, при которых происходит образование легкорастворимых соединений за счёт передачи электронов от атомов выщелачивающего агента к атомам минерала и наоборот; вещества, отдающие электроны, называются восстановителями, а принимающие - окислителями;
- реакции с образованием комплексных соединений.

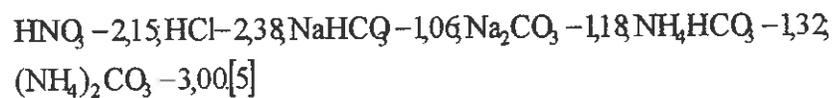
Часто процессы выщелачивания сопровождаются осаждением ценных компонентов или образованием плотных плёночных покрытий на поверхности растворения.

Выщелачивание является основной операцией при извлечении урана на месте залегания руды, так как содержание полезного компонента в них ничтожно мало. Оно определяет величину извлечения и стоимость конечного продукта. Несмотря на многообразие типов месторождений, руд и минералов, содержащих уран, для извлечения его обычно используют водные растворы минеральных кислот или солей карбонатов щелочных металлов.

При подземном выщелачивании к растворителю предъявляются следующие требования:

- обеспечение относительно полного перевода полезного компонента в раствор;
- низкая стоимость реагента и его наличие в народном хозяйстве;
- селективность в процессе выщелачивания;
- обеспечение коррозионной стойкости применяемой аппаратуры и материалов;
- исключение условий, приводящих к засорению пор и капилляров в выщелачиваемой рудной массе и снижающих проницаемость массива;
- возможность осуществления процесса без нагрева, дополнительного измельчения, перемешивания и т.п. («мягкие» условия) [5].

Наиболее дешёвым растворителем для выщелачивания является серная кислота. Другие растворители характеризуются следующими коэффициентами относительно последней:



Для интенсификации процесса при подземном выщелачивании некоторых руд в растворитель добавляется

окислитель. В качестве последнего могут быть использованы: кислород, перманганаты, перекись водорода, азотсодержащие окислители и др.

Процесс выщелачивания включает три основные стадии:

- транспортировку растворителя к поверхности выщелачиваемых минералов;
- химическую реакцию с образованием растворимых солей;
- транспорт растворённых продуктов реакции в объём раствора.

В процессе выщелачивания происходит снижение проницаемости массива. Это явление называется кольматацией. Выделяют следующие формы кольматации:

- химическую, связанную с образованием в порах химических осадков;
- газовую, обусловленную образованием газообразных продуктов в пласте в результате взаимодействия кислоты с карбонатными составляющими пород;
- ионообменную, связанную с изменением размера пор в присутствии органического вещества и глинистых частиц в проницаемых породах под действием изменения pH и минерализации фильтрующихся растворов;
- механическую, вызываемую закупоркой поровых каналов пород механическими взвесями или частицами, содержащимися в фильтрующихся растворах.

При отработке месторождения способом подземного выщелачивания обычно одновременно возникают и сосуществуют несколько форм кольматации.

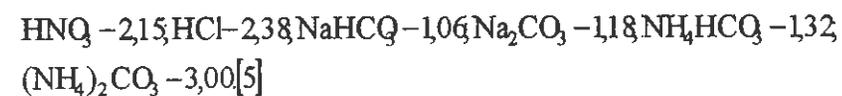
Переведённый в раствор полезный компонент не полностью извлекается в процессе отработки. Часть его поглощается безрудными породами. Это негативный процесс,

Выщелачивание является основной операцией при извлечении урана на месте залегания руды, так как содержание полезного компонента в них ничтожно мало. Оно определяет величину извлечения и стоимость конечного продукта. Несмотря на многообразие типов месторождений, руд и минералов, содержащих уран, для извлечения его обычно используют водные растворы минеральных кислот или солей карбонатов щелочных металлов.

При подземном выщелачивании к растворителю предъявляются следующие требования:

- обеспечение относительно полного перевода полезного компонента в раствор;
- низкая стоимость реагента и его наличие в народном хозяйстве;
- селективность в процессе выщелачивания;
- обеспечение коррозионной стойкости применяемой аппаратуры и материалов;
- исключение условий, приводящих к засорению пор и капилляров в выщелачиваемой рудной массе и снижающих проницаемость массива;
- возможность осуществления процесса без нагрева, дополнительного измельчения, перемешивания и т.п. («мягкие» условия) [5].

Наиболее дешёвым растворителем для выщелачивания является серная кислота. Другие растворители характеризуются следующими коэффициентами относительно последней:



Для интенсификации процесса при подземном выщелачивании некоторых руд в растворитель добавляется

окислитель. В качестве последнего могут быть использованы: кислород, перманганаты, перекись водорода, азотсодержащие окислители и др.

Процесс выщелачивания включает три основные стадии:

- транспортировку растворителя к поверхности выщелачиваемых минералов;
- химическую реакцию с образованием растворимых солей;
- транспорт растворённых продуктов реакции в объём раствора.

В процессе выщелачивания происходит снижение проницаемости массива. Это явление называется кольматацией. Выделяют следующие формы кольматации:

- химическую, связанную с образованием в порах химических осадков;
- газовую, обусловленную образованием газообразных продуктов в пласте в результате взаимодействия кислоты с карбонатными составляющими пород;
- ионообменную, связанную с изменением размера пор в присутствии органического вещества и глинистых частиц в проницаемых породах под действием изменения pH и минерализации фильтрующихся растворов;
- механическую, вызываемую закупоркой поровых каналов пород механическими взвесями или частицами, содержащимися в фильтрующихся растворах.

При отработке месторождения способом подземного выщелачивания обычно одновременно возникают и сосуществуют несколько форм кольматации.

Переведённый в раствор полезный компонент не полностью извлекается в процессе отработки. Часть его поглощается безрудными породами. Это негативный процесс,

определяющий одно из слагаемых потерь полезного ископаемого в недрах.

На практике поглощение растворённого полезного компонента осуществляется покрывающими и подстилающими породами, а также слабопроницаемыми безрудными прослоями рудовмещающего горизонта. Потери за счёт поглощения в первый период выщелачивания могут достигать до 20-30 % относительно общего объёма выщелачиваемого компонента. Однако впоследствии благодаря постоянной фильтрации по проницаемому слою растворителя эти потери могут быть снижены до 5-6 % [5].

По характеру проникновения внутрь куска руды растворители делятся на три типа:

- руды, в которых растворитель просачивается более или менее одновременно и постоянно со всех сторон;
- руды, в которых растворитель проникает сначала по трещинам и плоскостям слоистости, т.е. по основным каналам, а затем из них поступает в мельчайшие поры и капилляры;
- руды, которые при обработке растворителем разрушаются [5].

Пористость рудных монолитов обычно во много раз ниже пористости глин (эффективная пористость скальных руд обычно 0,5-3,0 %), однако размеры пор и капилляров в куске выше, чем в глинистых породах.

### 1.2.2

#### **Термические и термохимические методы воздействия на массив горных пород**

Термическое воздействие на горные породы изменяет агрегатное состояние вещества в форму, удобную для доставки к скважине и на поверхность (жидкость, газ), а

также физические свойства (например, уменьшают вязкость, улучшают условия фильтрации).

Эти процессы эндотермические и требуют подвода тепловой энергии. Подвод тепла может осуществляться различными теплоносителями (дымовые газы, пар, горячая вода и т.п.) или воздействием на пласт различного рода полями.

Выбор температуры воздействия зависит от конкретного полезного ископаемого.

Например, температура плавления озокерита лежит в пределах 50...80 °С, серы 112,8...119 °С, бишофита 117 °С. Причём при температуре ~160 °С вязкость серы повышается примерно в 800 раз. Необходимо отметить, что при превышении определённой температуры начинаются химические превращения вещества.

Характер протекания процессов термического воздействия на горные породы во многом зависит от того, из каких минералов, агрегатных структур состоит массив, стабильности их характеристик.

Наиболее типичным примером теплового воздействия на массив пород является подземная выплавка серы. При этом необходимо выделять две части, выполняющие различные функции. Первая простирается от устья до забоя скважины и является транспортной магистралью. Вторая включает в себя призабойную зону пласта, в которой происходит превращение полезного компонента в жидкое состояние. Такой способ называется подземной выплавкой.

Естественно, что практический эффект зависит от количества подведённого к пласту тепла. Подавая заданные объёмы теплоносителя в пласт, можно регулировать радиус зоны плавления.

Процесс подземной выплавки представляет собой комплекс сложных физических явлений, математическое описание которых не всегда возможно.

При подземной выплавке рудный пласт разогревается до температуры плавления полезного компонента путём нагнетания в массив горячего теплоносителя, который, фильтруясь по трещинам, кавернам и крупным порам, вытесняет холодную воду и выплавляет полезный компонент. Для разогрева пласта могут использоваться различные теплоносители: горячие дымовые газы, парогазовая смесь, пар, горячая вода, рассолы с различным удельным весом. Теплоноситель должен иметь большую удельную теплоёмкость, хорошие вытесняющие свойства и быть дешёвым в производстве. Выбор теплоносителя чрезвычайно важен, т.к. 50-60 % затрат по технологии приходится на получение и подогрев теплоносителя.

Скорость прогрева массива различными теплоносителями характеризуется коэффициентом термоинъекции. Для воздуха, дымовых газов, пара и воды он соответственно составляет: 1, 2, 11, 31, 123 [6]. Наиболее эффективный термоинъекционный агент — горячая вода.

Тепловая энергия на подземном участке вокруг добычной скважины распространяется за счёт:

- кондуктивного теплообмена, интенсивность которого полностью определяется температурными условиями протекания процесса и физическими свойствами рудного тела;
- конвекции, при которой интенсивность процесса зависит от закономерностей движения жидкости, определяемых уравнениями аэрогазодинамики;
- теплообмена между теплоносителями и рудным массивом.

У добычной скважины в зоне плавления взаимодействуют две жидкие и твёрдая фазы (расплавленный полезный компонент, вода и минералы, составляющие рудный скелет).

Расплавленный тепло горячей воды полезный компонент за счёт большего удельного веса стекает к почве пласта призабойной зоны скважины, образуя так называемую лужу, нижняя часть которой соприкасается с холодными подстилающими породами. При прекращении инъекции горячей воды в пласт в результате аварии или при ремонте важным параметром является время остывания расплавленного вещества.

Наиболее разработан процесс подземной выплавки применительно к месторождениям самородной серы.

Термохимические процессы при геотехнологии основаны на энергетических изменениях системы при химических превращениях полезных ископаемых, возникающих под действием внутрипластового теплового очага. Термохимические процессы лежат в основе таких геотехнологических способов как подземное сжигание серы, газификация угля и сланцев, тепловое воздействие на нефтеносные пласты, подземное сжигание угля.

Обычно наличие очага приводит к тому, что в массиве образуются отдельные зоны, для каждой из которых характерны определённые реакции и температуры. Для обоснования оптимального режима термохимического процесса необходимо выяснить:

- распределение физико-химических зон процесса;
- влияние и характер изменения фильтрационных зон;
- характер распространения температурных зон;
- режимы подачи рабочих агентов и т.п.

Одним из резервов развития геотехнологических способов является добыча полезных ископаемых непосредственно из магмы, однако эти процессы ещё недостаточно изучены.

### 1.2.3

#### Принцип диспергирования горных пород

Диспергирование — тонкое измельчение твёрдых тел или жидкостей, в результате которого образуются дисперсионные системы: порошки, суспензии, эмульсии, аэрозоли.

Удельная работа, затрачиваемая на диспергирование, зависит от характеристик и структуры измельчаемой породы, поверхностной энергии и степени измельчения.

Введение поверхностно-активных веществ (ПАВ) — диспергаторов, эмульгаторов, понизителей твёрдости — снижает энергозатраты при диспергировании и повышает дисперсность измельчённой фазы.

Этот процесс пока не нашёл промышленного применения в геотехнологии.

### 1.2.4

#### Воздействие электромагнитных полей на массив горных пород

В основном, эти процессы используются для интенсификации химических реакций и процессов. Их сущность заключается в переводе электрической энергии в тепловую. Прогрев массива зависит от величины напряжённости электрического поля. Поле создаётся с помощью электродов, опускаемых в скважины, расположенные по контуру подлежащего разогреву массива.

Этот способ применялся для разогрева серных руд Предкарпатья и битумов в Башкирии.

### 1.2.5

#### Гидравлические процессы при геотехнологических способах разработки

Эти процессы сводятся к следующим: гидрорасчленение, гидроподъём, гидроотбойка, гидротранспорт.

Гидрорасчленение повышает проницаемость массива за счёт разрыва пласта рабочей жидкостью под большим давлением.

Гидроподъём осуществляется за счёт энергии нагнетаемого рабочего агента, вводимой в скважину энергии сжатого воздуха, погружными насосами и гидроэлеваторами.

Гидроотбойка осуществляется струями рабочей жидкости высокого давления специальными скважинными гидромониторами с гибкими и телескопическими наконечниками.

Гидротранспорт — транспортировка разрушенной породы в виде пульпы — смеси твёрдого и жидкого в определенном соотношении.

Гидромониторная струя является рабочим органом для разрушения, смыва, подъёма горной массы. Она характеризуется размером отдельных структурных элементов, начальным давлением воды на вылете из насадки, силой давления на забой на различных расстояниях от насадки.

Существенное влияние на параметры струи оказывает соотношение плотностей струи и среды, в которой она движется. Свободная незатопленная струя ( $\rho_{ст} > \rho_{ср}$ ) используется при открытой и подземной разработках месторождений полезных ископаемых. Затопленная свободная струя ( $\rho_{ст} = \rho_{ср}$ ) используется при скважинной гидро-

быче, струйной зачистке днища кораблей, в реактивных двигателях и т.д. Несвободная затопленная струя ( $\rho_{ст} < \rho_{ср}$ ) имеет место в эжекторных установках, при гидро-пескоструйной обработке призабойных зон нефте- и серо-добычных скважин, при бурении скважин гидромониторными долотами [7].

Гидромониторные струи делятся на: низкого (до 1 МПа), среднего (до 4 МПа), высокого (более 4 МПа) давления. Движение жидкости в струе характеризуется перемещением частиц воды при отсутствии твёрдых границ русла. Окончательное формирование струи происходит в насадке гидромонитора, назначение которой заключается в преобразовании статического давления воды в кинетическую энергию струи. По мере уменьшения сечения насадки при постоянном расходе воды скорость её увеличивается. Одновременно с этим увеличиваются потери напора в насадке, которые пропорциональны квадрату скорости потока. В конечном сечении насадки статическое давление, за вычетом потерь напора, переходит в скоростной напор.

Структура струи характеризуется геометрическими и гидравлическими параметрами. Начальные параметры струи определяются условиями формирования потока воды в подводящих каналах. Завихрения потока в подводящем канале, неравномерность профиля, турбулентность на входе в насадку, возникновение кавитации при больших напорах ухудшают компактность струи и уменьшают её дальнобойность. На параметры струи влияют вязкость и плотность среды, в которой распространяется струя. Гидравлические и геометрические параметры определяют важнейшие показатели струи на контакте с разрушаемой породой: силу удара и удельное динамическое давление струи.

Увеличение гидростатического давления до глубины 200-300 м существенно ухудшает параметры струи [7].

Разрушение струей в основном применяется при разработке слабо-связных и рыхлых горных пород и реже полускальных.

Размываемость породы определяется физико-геологическими факторами.

К гидравлическим факторам относятся напор и расход (диаметр насадки).

К технологическим факторам относятся условия воздействия струи на забой.

С увеличением пористости, трещиноватости, размокаемости и коэффициента фильтрации увеличивается скорость размыва, а с увеличением крепости, пластичности и коэффициента сцепления она уменьшается. В то же время содержание различных фракций минеральных частиц в горной породе и их сцепление также характеризуют её гидравлическую разрушаемость.

Сложность и недостаточная изученность явления размыва заставляют в настоящее время определять величину потребного напора струи и удельного расхода воды ориентировочно и только в производственных условиях уточнять их опытным путём.

Перемещение разрушенной струей гидромонитора горной массы к всасу выдачного устройства происходит в потоке по почве камеры самотёчным или напорным потоком воды. Кроме того, самотёчная доставка может эффективно использоваться на поверхности от добычных скважин до карты намыва или перекачных землесосов.

Самотёчный транспорт возможен только при наличии определённого уклона. Подвижность смесей твёрдых частиц с жидкостями или газами зависит прежде всего от гранулометрического состава твёрдой фазы, её плотности и от количественного соотношения фаз. По преимущественному содержанию частиц определённых размеров в смеси с водой транспортируемый материал условно делится на

фракции по крупности: кусковую (более 50 мм), крупнозернистую (от 10 до 50 мм), мелкозернистую (2-10 мм), песчаную (0,25-2 мм), пылеватую (0,05-0,25 мм), иловую (0,005-0,05 мм) и глинистую (менее 0,005 мм).

В потоке кусковая и крупнозернистая фракции перемещаются скачкообразно и волочением по дну потока, все же остальные фракции в основном перемещаются во взвешенном состоянии.

Подъем руды по скважине может быть осуществлён гидроэлеватором, эрлифтом или их комбинацией. Транспортирование руды от добычной скважины по трубам осуществляется землесосом или загрузочным аппаратом. При гидроэлеваторном подъёме рабочая вода из насадки гидроэлеватора, создавая вакуум в приёмной камере, засасывает поток гидросмеси и, смешиваясь с ним через диффузор, по трубам выдаёт её на поверхность.

Эрлифтный подъем, несмотря на низкий к.п.д. (10-30%), широко применяется для откачки пульпы ввиду своей простоты, надёжности и, главное, возможности свободного выноса абразивных частиц.

До настоящего времени отсутствует строгая математическая теория эрлифта, которая позволила бы практически рассчитать все его параметры.

Различают следующие основные режимы (структуры) смеси: пузырьковый, поршневой, пенный, капельный. Кроме того, существует множество смешанных режимов. Структура смеси зависит от многих факторов, основными из которых являются расход газа, свойства жидкости, растворимость газа, диаметр подъемных труб, величина погружения эрлифта под динамический уровень откачиваемой жидкости.

Землесосы являются наиболее распространенными аппаратами гидравлического транспортирования самых разнообразных горных пород и относятся к разновидности

турбомашин, конструкция которых имеет специфику, обусловленную наличием твёрдого материала в транспортируемой гидросмеси.

Подъем гидросмеси из зумпфа до выходного отверстия рабочего колеса осуществляется за счёт разности между атмосферным давлением и давлением расхода у входа в рабочее колесо. Выбрасывание гидросмеси в напорный трубопровод осуществляется за счёт энергии, передаваемой потоку лопатками рабочего колеса через вал землесоса от двигателя.

### **1.3 Производственные процессы при геотехнологии**

---

#### **1.3.1 Сооружение добычных скважин**

Для бурения скважин обычно применяют станки, используемые для поискового бурения. Для сооружения скважин большой глубины используются станки шарошечного бурения типа СБШ, небольшой глубины при слабых покрывающих отложениях — станки шнекового вращательного бурения типа СБР, при породах мягких и средней крепости и глубине до 500 м — роторные буровые установки типа УРБ.

Проведены испытания по бурению относительно неглубоких скважин турбобурами конструкции ВНИИБТ. Были также опробованы различные методы бурения геотехнологических скважин высоконапорными струями воды.

Все буровые установки состоят из следующих основных узлов: вышки или мачты; механизмов подъёма,

вращения и промывки; двигателя с трансмиссией; генераторной и компрессорной установок; контрольно-измерительных приборов; превенторов; вспомогательного оборудования.

Удаление буровой мелочи осуществляется промывкой. В качестве промывочной жидкости используется глинистый раствор или вода.

Циркуляция промывочной жидкости — глинистого раствора, — осуществляется обычно с помощью поршневых насосов двойного действия.

Привод большинства буровых установок основан на дизельных двигателях или двигателях внутреннего сгорания. При необходимости бурения большого числа геотехнологических скважин, расположенных относительно недалеко друг от друга, с экологической, технологической и экономической точек зрения, наиболее перспективным является электрический привод бурового станка.

Для предотвращения выброса жидкости и газа при бурении скважин в опасных по выбросам зонах устанавливаются превенторы, герметизирующие пространство между обсадными и бурильными трубами. Противовыбросное оборудование обычно укомплектовывается: превентором с плашками, патрубком с двумя отводами; колонным фланцем, уплотнительными кольцами, четырьмя задвижками высокого давления.

В комплект также входит оборудование для выполнения вспомогательных работ: глиномешалки, сита, гидrocиклоны, желоба, средства очистки глинистого раствора, отопительная установка и др.

Породоразрушающий инструмент (долота) подразделяется по назначению на: сплошного бурения, колонкового бурения, специального назначения.

Долота сплошного бурения разрушают породу по всей площади забоя скважины. Долота колонкового буре-

ния разрушают забой по кольцу с оставлением в центре забоя столбика породы — керна, используемого в дальнейшем после отрыва и извлечения на поверхность для получения геологоразведочных данных об условиях залегания полезного ископаемого и вмещающих пород.

Долота специального назначения используются при увеличении диаметра скважины (разбуривании), а также при различного рода аварийных работах. Различают следующие типы долот специального назначения: пикообразные, эксцентричные, ступенчатые, долота-расширители, долота-фрезы.

При бурении скважин в мягких породах используют лопастные долота, а в породах средней крепости и крепких — шарошечные. При бурении скважин по весьма крепким горным породам используются алмазные и фрезерные, армированные твёрдым сплавом, долота, работающие на принципе истирания.

Лопастные долота, работающие на принципе резания или скалывания, бывают двух- или трёхлопастными.

Шарошечные долота, работающие на принципе дробления и скалывания, чаще всего состоят из трёх конических шарошек.

Бурильные трубы служат для передачи вращательного момента и нагрузки долоту и подачи промывочной жидкости. Соединение бурильных труб осуществляется с помощью замков и ниппелей. Используются обычно телескопические бурильные трубы. Бурильные трубы имеют шестигранную или квадратную форму для передачи вращения колонне от ротора бурового станка. Вертикальность скважин обеспечивается центратором.

При бурении скважин при подземной газификации углей особенность процесса состоит в том, что скважины относительно небольшой глубины но большого диаметра, причем большинство скважин проводится под углом. Вер-

тикальные скважины бурят установкой типа УИТ-40, а наклонные — УНБ - ЗИФ-1200 АМ. [8]

Установка УИТ-40 смонтирована на колёсно-гусеничном прицепе, а установка УНБ — на металлическом рамном основании в виде саней.

Угол наклона вышки УНБ может изменяться от 37 до 60°. В России освоен метод бурения наклонно-горизонтальных скважин (скважины с горизонтальным окончанием) на сравнительно небольшую глубину (до 300 м). Выбор конструкции скважины зависит в первую очередь от применяемого геотехнологического способа и назначения скважины. Существенное влияние при этом оказывают также горно-геологические факторы: глубина, мощность водоносных горизонтов, мощность залежи полезного ископаемого.

Конструкция скважины включает в себя:

- приспособление для задания направления, предназначенное для крепления устья скважины;
- кондуктор, перекрывающий верхнюю часть скважины и обеспечивающий изоляцию водоносных горизонтов, а также вертикальность скважины;
- колонну обсадных труб, которая опускается до залежи.

Приспособление для задания направления при большой глубине скважины тщательно центрируется и надёжно закрепляется, а при скважинах небольшой глубины может вообще не применяться.

Кондуктор обязательно цементируется с подъёмом цемента до устья скважины.

При обнаружении сильных водопритоков или обвалов стенок скважины опускается промежуточная колонна обсадных труб, а дальнейшая обсадка ведётся трубами меньшего диаметра.

Весьма важным при бурении скважин является удаление буровой мелочи. Продувка скважин сжатым воздухом практически не используется.

Обычно при бурении геотехнологических скважин используют две схемы бурения:

- с обратно всасывающей промывкой;
- с частичной аэрацией столба промывочной жидкости.

Схема бурения с обратно всасывающей промывкой приведена на рис. 1.3.1.а). Сущность её заключается в следующем: с глубины 60-80 м эрлифтом, находящимся внутри колонны буровых труб 7 непрерывно откачивается промывочная жидкость; при этом в результате полученного разрежения по кольцевому зазору между буровыми трубами и стенками скважины промывочная жидкость поступает к долоту 8, захватывает буровую мелочь и через отверстие в последнем поступает внутрь колонны буровых труб; через приставку к сальнику-вертлюгу 1 шлам выносится на поверхность не кольматируя (не заштыбовывая) забой скважины. Если водоприток из обуриваемых горных пород недостаточен, в скважину необходимо доливать чистую воду.

Схема бурения с частичной аэрацией столба промывочной жидкости приведена на рис. 1.3.1.б). Эта схема наиболее широко применяется на практике. При этом сохраняется обычная технология бурения с промывкой и используются компрессоры низкого давления (0,6 - 0,8 МПа). В кольцевой зазор между обсадной 7 и промежуточной 4 колоннами нагнетается поток сжатого воздуха 5. Через отверстия в нижней части промежуточной колонны (смеситель) 6 воздух поступает внутрь её. Аэрированный поток промывочной жидкости 3 проходит по зазору между колонной буровых труб 2 и промежуточной колонной, откачивая тем самым буровую мелочь на поверхность. Промывочная же жидкость подаётся по отверстию в ведущей буровой трубе

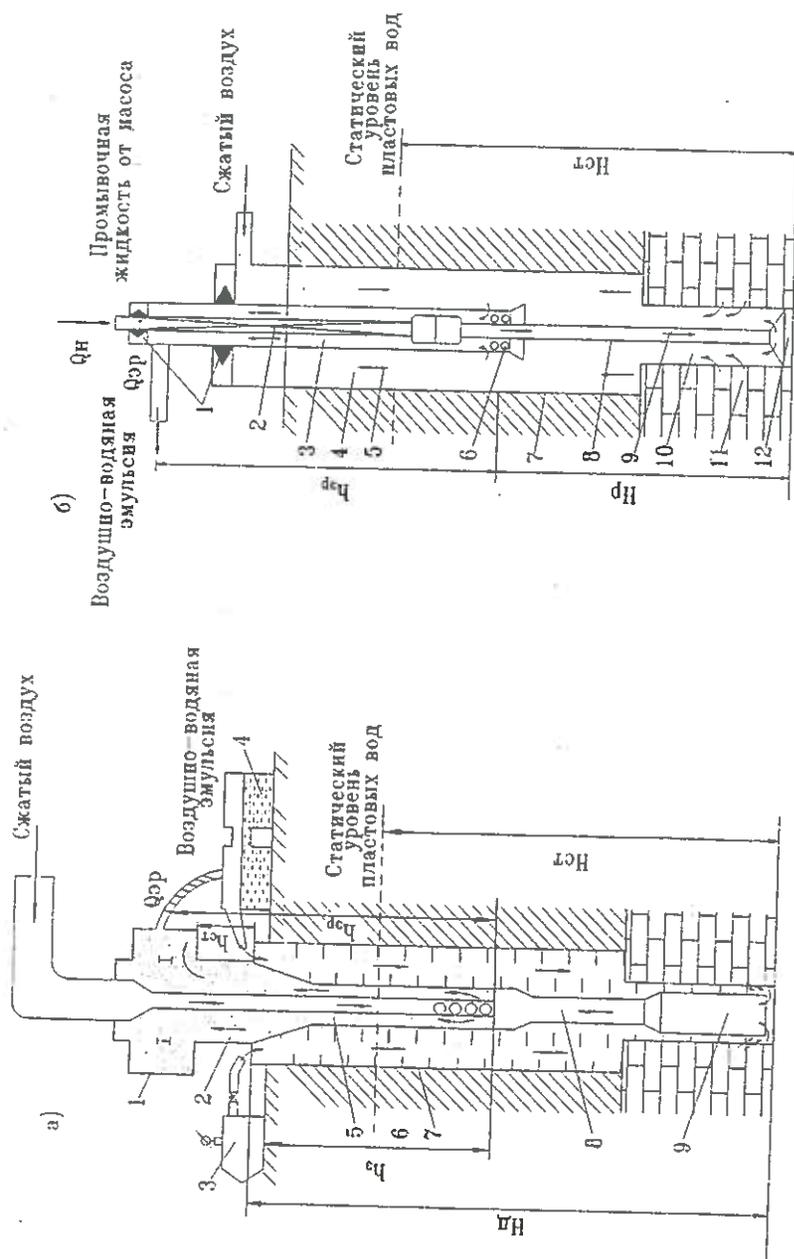


Рис 1.3.1. Схемы промывки, используемые при бурении геотехнологических скважин: а) обратно-всасывающая промывка; б) с частичной аэрацией столба промывочной жидкостью

к шарошечному долоту 12. Этот способ может применяться с использованием компрессоров низкого давления при глубине статического уровня пластовых вод не более 45 м.

Для утяжеления раствора используются добавки порошка барита, гематита, магнетита, пиритовых огарков, колошниковой пыли в количестве от 3,5 до 4,6 г/см<sup>3</sup>. Для повышения качества местных глин используют поверхностно-активные (ПАВ) и химически активные (ХАВ) вещества.

Утяжелители растворов применяются для того, чтобы избежать выброса воды, пара или газа из скважины.

При бурении скважины по полезному ископаемому обычно осуществляется отбор керна. При этом стремятся нанести ему наименьший вред. При бурении по соли в качестве промывочной жидкости используется крепкий раствор соли, при бурении по серной залежи — чистая вода.

Иногда при бурении происходит интенсивное поглощение промывочной жидкости стенками скважины, что сопровождается обрушением стенок скважины при неустойчивых породах.

Для борьбы с поглощением бурового раствора стенками скважины используют различные специальные реагенты: структурообразователи, гелецемент, быстросхватывающиеся смеси и т.п.

Структурообразователи увеличивают вязкость промывочной жидкости. Такой раствор, проникая в трещины и поры массива, закупоривает их. В качестве структурообразователей обычно используются: жидкое стекло (до 5%),

кальцинированная сода (до 6 %); инертные добавки (опилки, рисовая шелуха, кордное волокно, слюда, торф, пакля и т.п.) - (до 3 % и более).

Гельцемент представляет собой смесь глинистого раствора с цементом в пропорции примерно 1:1. Гельцемент закачивают в скважину, продавливают до забоя и через сутки возобновляют бурение.

При сильной закарстованности залежи необходимо не только предотвратить поглощение раствора, но и заполнить наиболее крупные карстовые полости тампонажным раствором в радиусе до 10 м. В качестве тампонажного раствора обычно используется глиноцементный раствор, приготавливаемый из 300 кг цемента на 1 м<sup>3</sup> глинистого раствора и инертных наполнителей.

После вскрытия залежи скважина обсаживается и цементируется. После ожидания затвердевания цемента продолжается бурение. Сооружение скважин, таким образом, сводится к выполнению следующих технологических процессов и операций (Табл. 1.3.1.):

1) бурение и обсадка скважин: бурение, спуск обсадных труб; бурение по продуктивному пласту; подвозка воды и глинистого раствора; подвозка обсадных труб, ГСМ, бурового инструмента.

2) цементирование обсадных колонн: установка устьевого оборудования; приготовление и закачка цементного раствора; подвозка технической воды; подвозка цемента.

3) заканчивание скважин: спуск и подъем насосно-компрессорных и эрлифтных труб, пакеров; откачка; нагне-

тание, кислотная обработка, гидроразрыв; подвозка воды и кислоты для нагнетания.

4) оборудование скважин технологическими колоннами труб: спуск рабочих колонн труб; подвозка труб; опробование герметичности рабочих колонн и задвижек.

Таблица 1.3.1.

Технологические процессы и операции сооружения скважин

Технологический процесс	Выполняемые операции	Оборудование
1	2	3
Бурение и обсадка скважин	Бурение, спуск обсадных труб. Бурение по продуктивному пласту. Подвозка воды и глинистого раствора Подвозка обсадных труб, ГСМ, бурового инструмента	Буровые установки. Буровые установки и компрессоры Автоцистерны. Автомобили-трубовозы и бортовые
Цементирование обсадных колонн	Установка устьевого оборудования. Приготовление и закачка цементного раствора. Подвозка технической воды. Подвозка цемента	Буровые установки. Цементирующие агрегаты. Смесительные машины Автоцистерны Автомобили.

Продолжение таблицы 1.3.1

1	2	3
Заканчивание скважин (гидрогеологические исследования после бурения и кислотной обработки, гидроразрыва)	Спуск и подъём насосно-компрессорных, эрлифтных труб, пакеров. Откачка. Нагнетание, кислотная обработка, гидроразрыв Подвозка воды и кислоты для нагнетания	Буровые установки  Компрессоры Цементирующие агрегаты.  Автоцистерны.
Оборудование скважин технологическими колоннами труб.	Спуск рабочих колонн труб. Подвозка труб.  Опробование герметичности рабочих колонн и задвижек.	Подъёмники на тракторах.  Автомашинно-трубовозы.  Компрессоры, цементирующие агрегаты.

Крепление скважин включает два технологических процесса: спуск обсадных труб и их цементацию.

Обсадные трубы обычно изготавливают цельнотянутыми или цельнокатанными. Соединяются они между собой муфтами или сваркой.

Перед спуском обсадных труб каверномером исследуют профиль скважины и определяют количество необходимого цементного раствора.

Цементация скважины является наиболее ответственным процессом. Перед цементацией затрубное пространство промывается водой или глинистым раствором. Цемент закачивают с помощью цементировочного агрегата.

При сооружении скважин в соляных пластах цементационный раствор приготавливают на насыщенном растворе соли. По окончании цементации скважину оставляют на 16...24 часа в покое для схватывания цементного раствора. Для интенсификации или замедления этого процесса используют ускорители или замедлители затвердевания. Для улучшения цементирующего состава иногда в него добавляют 30-40% кварцевого песка тонкого помола. В качестве ускорителей используются хлористый натрий и хлористый калий, а в качестве замедлителя — сульфит-спиртовая барда или карбоксиметил-целлюлоза.

Опресовка скважин — это испытание их на герметичность. Проводят её в два этапа: первый этап — после застывания цемента до разбуривания цементного башмака под давлением в 2-3 раза выше рабочего; второй этап — после разбуривания башмака в трубе и под колонной обсадных труб при давлении в два раза больше рабочего.

Испытания производят нагнетанием воды. После достижения заданного давления закрывают вентиль и выжидают в течение одного часа. Если давление падает, цементацию повторяют.

После этого приступают к оборудованию добычных скважин. Под оборудованием добычных скважин понимается спуск в них колонн эксплуатационных труб.

Для различных геотехнологических способов используются различные виды оборудования. Набор эксплуатационных труб опускается до забоя скважины, опирается на него или подвешивается на оголовке скважины.

Эксплуатационные трубы обычно перфорированы. Длина участка перфорации зависит от мощности залежи. Диаметр отверстий составляет 18...20 мм, они располагаются в шахматном порядке на расстоянии 80-100 мм.

Диаметр эксплуатационных труб принимают максимально возможным, так как от этого зависит производи-

тельность добычной скважины. Оборудование скважин осуществляют непосредственно перед пуском во избежание коррозии. Эксплуатационные трубы обычно соединяются сваркой.

Устья скважин обычно также проходят эту стадию, заключающуюся в обвязке колонн труб устьевой арматурой, которая герметизирует устье и обеспечивает возможность отдельного движения рабочих агентов.

Конкретный набор оборудования скважин зависит от способа геотехнологии и определяется проектом.

От 30 до 70 % скважин не готовы после испытаний на герметичность обеспечить требуемую приемистость из-за кольматации призабойной части. Требуется проводить гидроразрыв, солянокислотную ванну, гидроперфорацию или торпедирование, что увеличивает стоимость сооружения скважины на 20%.

Перед сдачей скважины проводят комплекс её измерений, включающий:

- электрический каротаж — измерение кажущегося удельного сопротивления и потенциала естественного электрического поля, на основании чего можно судить о гидравлической проницаемости горных пород;
- термокаротаж — выделение слоёв пород с различными температурными свойствами, определяющими литологический состав;
- кавернометрия — определение истинного диаметра скважины для косвенной оценки пористости и трещиноватости;
- инклинометрия — замер кривизны скважины для определения положения забоя скважины в пространстве.

Все данные измерений систематически фиксируются, составляется план горных работ, где указывается порядок бурения и сдачи скважин в эксплуатацию.

### 1.3.2

#### Производство рабочих агентов при геотехнологии

Оборудование для производства рабочих агентов представлено различными насосными агрегатами для создания высокого напора, нагревательными установками для горячей воды и пара, компрессорными и воздуходувными устройствами, установками для приготовления растворов щелочей и кислот необходимой концентрации, регенерационными установками для рабочих сред.

Обычно сооружаются стационарные или полустационарные пункты для подготовки рабочих агентов, а к каждой скважине прокладываются трубопроводы. Обычно трубопроводы монтируют с помощью трубокладчиков и быстроразъемных соединений.

Для каждого способа геотехнологии характерна своя технологическая схема производства рабочих агентов. При скважинной гидродобыче основной элемент этой схемы — обратное водоснабжение. Добытое полезное ископаемое складывается на карте намыва, вода перепускается в приёмный бассейн и вновь насосами подаётся к добычным агрегатам.

Общая часовая потребность воды определяется произведением заданной часовой производительности промысла на удельный расход воды плюс её потери на отдельных звеньях схемы. Обычно потери составляют 15-20 %.

При разработке конкретного месторождения на основании опытных работ определяется необходимое давление струи на насадке гидромонитора для разрушения руды. В соответствии с конкретным проектом устанавливается

длина магистрального и участковых водоводов, их профили со всеми высотными отметками. Определяются общие потери напора в трубопроводе. Местные потери напора (в задвижках, на поворотах, стыках и т.д.) составляют около 10 % от общих потерь. Общий напор определяется как сумма необходимого давления для разрушения и всех потерь.

По расчётным параметрам расхода и напора определяется тип насоса.

Водоводы сооружаются из стальных труб.

Весьма важной задачей при скважинной гидродобыче является осуществление мероприятий по предотвращению поверхностных и подземных (фильтрационных) утечек воды.

При подземной выплавке серы основным рабочим агентом является горячая вода. Принципиально возможны несколько схем производства горячей воды: с применением свежего пара от паровых котлов низкого давления, с применением паровых котлов высокого давления и прямоточных водогрейных котлов.

Выбор котлооборудования основывается на технико-экономических расчётах с учётом условий каждого конкретного случая.

При подземной выплавке серы также используется сжатый воздух. Для его получения организуется компрессорное хозяйство, состоящее из обычных нагнетательных компрессоров.

При глубине залегания до 100 м целесообразно применять передвижные компрессоры с давлением до 0,98 МПа, при глубине до 300 метров следует применять двухступенчатые компрессоры с давлением до 2,45 МПа, при большей глубине — компрессоры с давлением 3,43 - 4,90 МПа.

У места разлива откачиваемой из недр серы устанавливаются газовые сепараторы (трапы).

Схема газового сепаратора приведена на рис. 1.3.2.. Он представляет собой цилиндр с обогреваемой паровой рубашкой 2 и клапаном для сброса воздуха, включающего запорную иглу 1 и поплавков 3. Установка газового сепаратора обеспечивает отделение серы от воздуха, воды и пара и облегчает транспортирование жидкой серы, так как уменьшает в 30-50 раз объём транспортируемой массы и уменьшает расход сжатого воздуха.

Разводка теплоносителя от котельной до добычных скважин и далее до забоя осуществляется по металлическим трубам различных диаметров. Вода, нагретая до 165 °С, из-за содержания в ней свободного кислорода в смеси с серой исключительно агрессивна, поэтому для сооружения эрлифта используются дюймовые трубы из нержавеющей стали. На других технологических звеньях возможно использование толстостенных труб (9-11 мм) из обычных сталей. Важной задачей является переход на эмалированные трубы, способные работать в агрессивной среде при температуре 160-170 °С

В связи с применением при подземном выщелачивании серноокислотного растворителя трубы, используемые для его транспортирования по поверхности и в скважине, должны удовлетворять следующим требованиям [5]:

- обладать высокой коррозионной устойчивостью к слабым растворам кислот;
- иметь необходимую прочность при внутренних и внешних нагрузках;
- допускать возможность повторного использования;
- соединения отдельных труб или плетей должны выполняться в минимальное время при сохранении герметичности в местах соединения;
- серийно изготавливаться в промышленных масштабах;

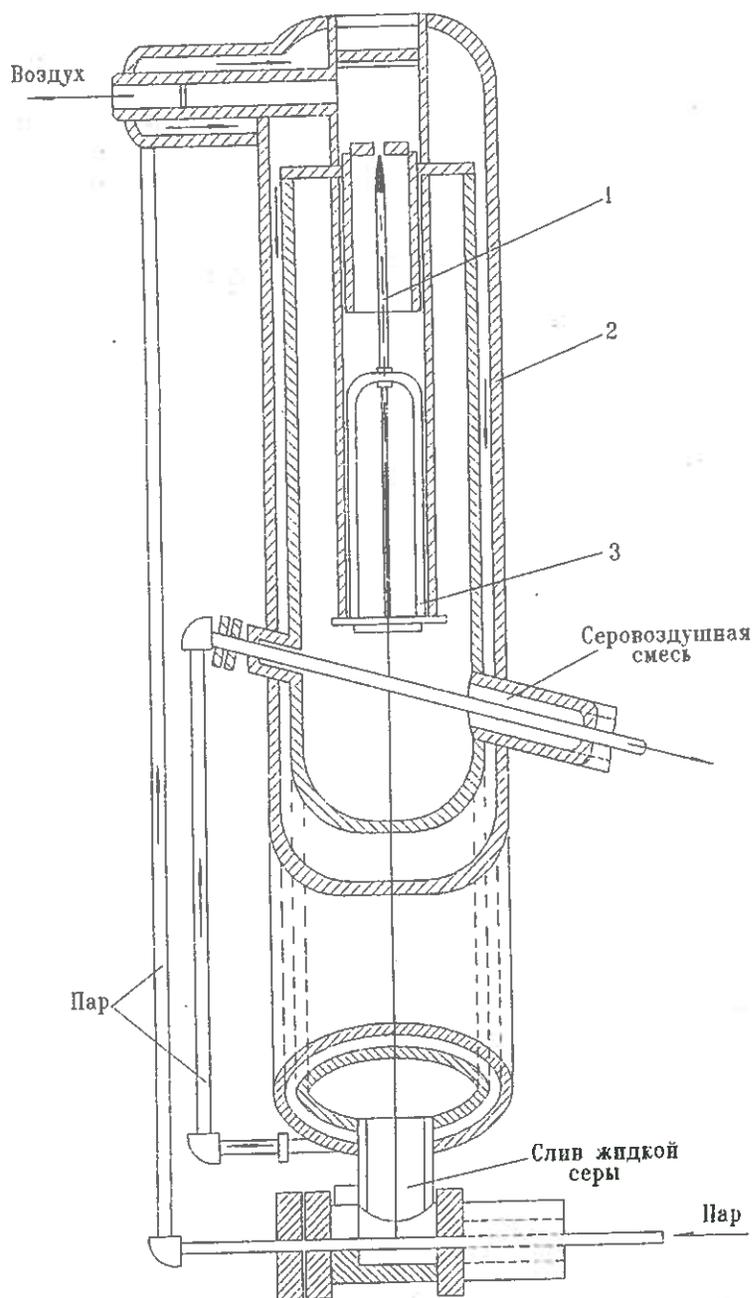


Рис. 1.3.2. Схема газового сепаратора

■ иметь относительно невысокую стоимость.

Были испытаны следующие виды труб: пластмассовые, полиэтиленовые, полипропиленовые, поливинилхлоридные, винипластовые, металлические (из нержавеющей стали), биметаллические (из рядовой стали с внутренним антикоррозионным покрытием); стеклопластиковые, фанерные, асбоцементные, металлопластовые (полиэтилен, армированный металлической сеткой). После всесторонних исследований остановились на полиэтиленовых трубах низкой и высокой плотности (ПНП и ПВП). Они изготавливаются четырёх типов - лёгкого (Л), средне легкого (СЛ), среднего (С), тяжёлого (Т). Из полиэтилена низкой плотности обычно изготавливают трубы диаметром до 160 мм, а ПВП — до 630 мм. Специально для подземного выщелачивания выпускают трубы из ПВП сверхтяжёлого типа (СТ) диаметром 110, 114, 160 и 210 мм с толщиной стенок 18 мм.

Для соединения полиэтиленовых труб используют сварку встык и резьбовое соединение.

Кажущаяся простота сварки встык не всегда оправдана. Из-за нестабильности характеристик труб даже из одной партии, при ручной сварке часто возникают температурные трещины, приводящие к нарушению герметичности шва. Более перспективна сварка с помощью специального сварочного оборудования типа УСВТ-2 и УСГТ-2, обеспечивающие строго регулируемые параметры режима сварки (температура, давление, скорость осадки и др.). Эти установки приспособляются для сварки горизонтальных и вертикальных трубопроводов.

При выборе типа и конструкции соединения труб исходят из следующих основных требований [5]:

■ конструкция и материал соединения должны быть не менее устойчивыми, чем тело трубы к воздействию осевых нагрузок, внутреннего и наружного давления при сохранении герметичности;

■ качественные и технологические показатели соединения не должны снижаться при температуре от -30 до +60 °С;

■ соединение должно быть коррозионно-стойким к 5-10 %-ным растворам серной кислоты и концентрированной соляной кислоте.

Таким образом, производство рабочих агентов имеет своеобразие для каждого из способов геотехнологии.

### 1.3.3

#### Поверхностное обслуживание скважин

На предприятии, отрабатывающем месторождение геотехнологическим способом, должно быть оборудование для обслуживания эксплуатационных скважин и монтажа технологических трубопроводов: специальные самоходные агрегаты, манипуляторы, стационарные монтажные вышки, подъемники и т.п.

Именно степень механизации производственных процессов по обслуживанию добычных скважин определяет уровень эксплуатационных затрат на единицу добытой массы полезного ископаемого.

Монтаж наземных технологических трубопроводов обычно ведут с помощью самоходных трубоукладчиков.

Конкретный набор оборудования для поверхностного обслуживания скважин зависит от применяемого геотехнологического способа и учитывает все его технологические, экологические и экономические особенности. Подробнее поверхностное оборудование и обслуживание гео-

технологических скважин рассмотрено в главе 1.5, где изложены технологические схемы отдельных способов скважинной добычи полезных ископаемых.

Оборудование, устанавливаемое на поверхности для обслуживания геотехнологической скважины, называется устьевым, а располагаемое в скважине — забойным [13].

### 1.3.4

#### Процесс добычи полезного ископаемого геотехнологическими способами

Добычное оборудование включает в себя два типа оборудования:

■ для отделения от массива и доставки полезного ископаемого к забою скважины;

■ для подъема полезного ископаемого на поверхность.

К первому типу относятся: колонны перфорированных труб; скважинные гидромониторы; скважинные нагреватели (горелки, электронагреватели), вибраторы, скважинные излучатели и др.

Ко второму типу относятся: подъемники, эрлифты, гидроэлеваторы, погружные насосы, колонны эксплуатационных труб.

Тип применяемого добычного оборудования полностью определяется самим способом разработки. Забойное оборудование включает колонну эксплуатационных труб, всевозможные перфорированные фильтры, пакеры и, в отдельных случаях (как при скважинной гидродобыче), исполнительные органы, предназначенные для отделения полезного ископаемого от массива.

Конкретный набор добычного оборудования может быть самым различным, не только при использовании раз-

личных методов, но и при отработке разнотипных месторождений одним и тем же методом.

Так, при подземной выплавке серы эксплуатационная колонна включает три концентрических става труб: диаметром 6–8" — для подачи воды; диаметром 3–4" — для выдачи полезного ископаемого; диаметром 1" — для подачи сжатого воздуха, используемого для выдачи полезного ископаемого. В забойной части ставов установлен пакер, отделяющий перфорацию для подвода теплоносителя в пласт, от перфорации для поступления в став расплавленной серы. Конструкции пакеров серодобычных скважин приведены на рис. 1.3.3.

Аналогично выглядит и забойное оборудование при подземном растворении солей.

Выбор оборудования для скважинной гидродобычи зависит от прочностных характеристик полезного ископаемого, глубины залегания и гидростатических условий. Гидродобычной агрегат — гидромонитор — может иметь самую разнообразную конструкцию: телескопический, поворотный, на гибком трубопроводе и т.п. Само забойное оборудование может опускаться в одну или две скважины.

Оборудование скважины для подземного выщелачивания включает нагнетательное и откачное. Эксплуатационные трубы изготавливаются из кислотоустойчивых материалов. В скважинах располагаются трубчатые фильтры с круглой или щелевой перфорацией.

Процесс подъема полезного ископаемого может происходить:

- 1) энергией нагнетательного рабочего агента;
- 2) вводимой в скважину энергией сжатого воздуха или газа;
- 3) погружными насосами;
- 4) гидроэлеваторами.

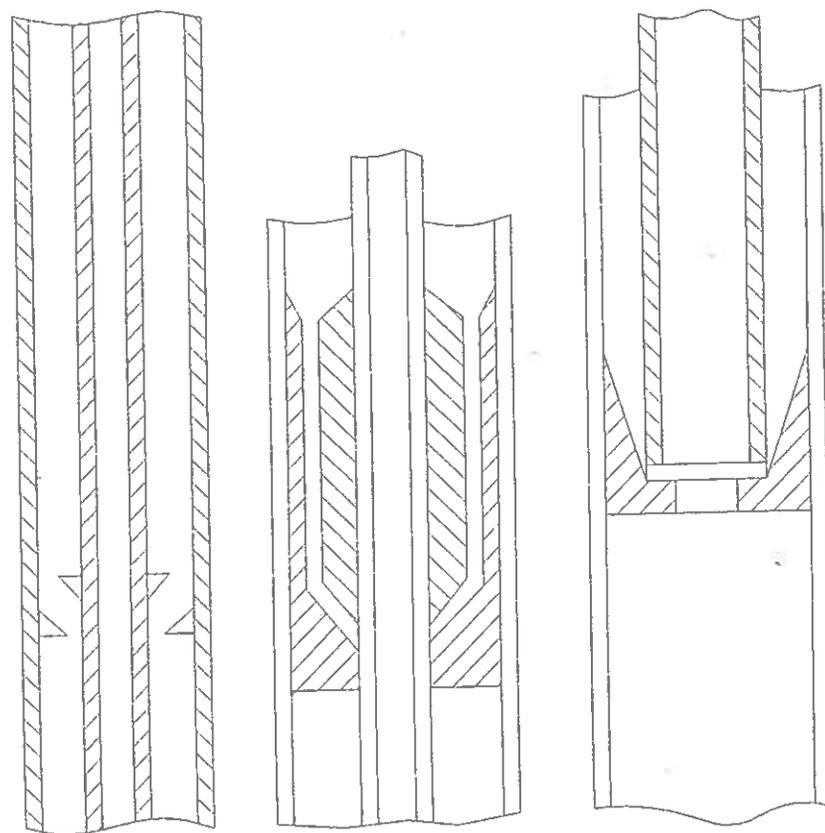


Рис. 1.3.3. Конструкция пакеров серодобычных скважин

Наиболее простым и эффективным средством подъема является нагнетательный эрлифт. Воздух подается по воздухопроводу, а продукт поднимается по кольцевому пространству между воздухоподающей и обсадной трубами. Нижняя часть воздухопровода перфорирована.

Достоинствами эрлифтного подъема являются: простота, надёжность в работе, отсутствие движущихся частей, возможность свободного выноса частиц пород, сопутствующих продуктивным растворам.

Недостатками эрлифтного подъёма являются: относительно низкий к.п.д. (не более 10 %); необходимость наличия специального компрессорного оборудования.

Физика процесса эрлифтного подъёма связана с подъёмом гидросмеси за счёт энергии расширения газа, разности скоростей жидкой и газообразной фаз, работы пузырька газа как негерметичного поршня, снижения удельного веса смеси, поднятия жидкости по закону сообщающихся сосудов. Существует несколько теорий эрлифтирования, тем не менее строгая математическая теория эрлифта, позволяющая практически рассчитать все его параметры, до сих пор отсутствует. Это объясняется нестабильностью структуры газожидкостного потока.

Принципиальная схема гидроэлеваторного подъёма показана на рис. 1.3.4. В центральном гидроэлеваторе напорная вода в камеру смешения 1 поступает из насадки 2. При этом в приёмной камере создаётся вакуум, за счёт которого засасывается поток гидросмеси, который смешивается с потоком воды в смесительной камере 3. Смесь через диффузор 4 поступает в нагнетательный трубопровод 5, и по нему выдаётся на поверхность. Поток гидросмеси засасывается в приёмную камеру и поступает в конфузор 6 через всасывающий патрубок 7, опущенный в гидросмесь.

Эффективность работы гидроэлеватора определяется соотношением расхода перекачиваемой и рабочей жидкостей, а также площадей поперечного сечения камеры смешения и всасывающей трубы. Кроме того, на к.п.д. гидроэлеватора оказывает влияние подпор перекачиваемой жидкости при работе в затопленной добычной камере, а также крупность транспортируемой руды. Экспериментально установлено, что область наибольших к.п.д. не превышает 0,4.

Подъём руды по скважине часто осуществляется комбинацией гидроэлеватора и эрлифта.

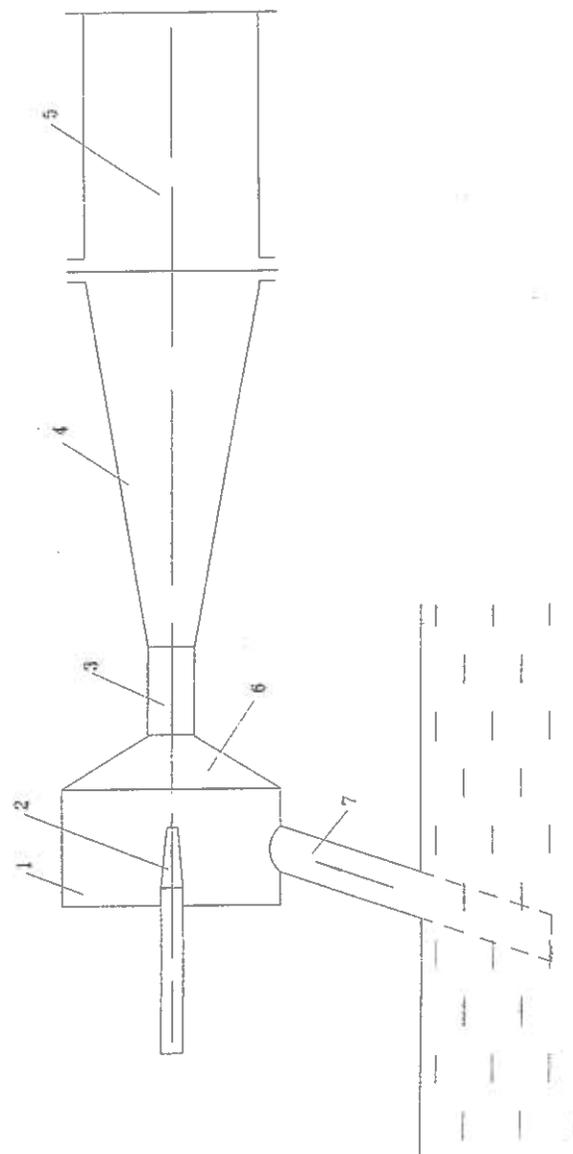


Рис. 1.3.4. Принципиальная схема гидроэлеваторного подъёма.

В 1971-76 г.г. были проведены большие работы по созданию и изготовлению погружных скважинных насосов в коррозионно-стойком исполнении. Были разработаны конструкции, изготовлены, испытаны в производственных условиях и приняты к серийному производству несколько типоразмеров погружных скважинных электрических насосов: УЭЦНК4-100-80, УЭЦНК-160-80, УЭЦНК6-360-150, ЭЦВ6-25-140ХГ и др.

Эти насосы имеют к.п.д. 36-37 % и могут откачивать из скважин продуктивные растворы, содержащие до 10 % серной кислоты и 0,1 г/л механических примесей.

Принципиальная схема установки УЭЦНК4-100-80 для откачки продуктивных растворов при подземном выщелачивании урана приведена на рис.1.3.5.

Испытания и опытная эксплуатация показали, что дебит добычных скважин при применении погружных насосов по сравнению с эрлифтами возрастает в 1,5-2 раза, расход электроэнергии снижается в 4-6 раз. Насосы облегчают автоматизацию процесса подъема растворов и устраняют их распыление на устьях откачных скважин. Особенно эффективна работа погружных насосов в зимнее время, т.к. устраняется возможность промерзания трубопроводов со сжатым воздухом.

### 1.3.5

#### **Процессы управления массивом горных пород при геотехнологии.**

Управление горным давлением при геотехнологии осуществляется выбором параметров технологии, системой расположения выработок, временем отработки и т.п.

Управление массивом горных пород при геотехнологии осуществляется в двух направлениях:

- сдвигение массива горных пород в процессе отработки залежи;

- изменение характеристик проницаемости массива горных пород перед началом добычных работ.

Геотехнологические способы делятся на две группы по принципу извлечения полезного ископаемого:

- методы селективной выемки;

- методы, предусматривающие полную выемку пласта полезного компонента;

Характер проявления горного давления при этих способах различен. При селективной выемке возможны два варианта:

- горное давление не оказывает существенного влияния (извлекается небольшая доля полезного ископаемого по объёму);

- горное давление оказывает существенное влияние, т.к. извлекается ощутимый процент полезного ископаемого.

При использовании методов, при которых извлекается пласт на полную мощность, так же выделяют два варианта:

- призабойное пространство заполнено флюидами под высоким давлением;

- с полным обрушением пород кровли.

Самым важным параметром геотехнологии является размер камер, так как от этого зависит извлечение, степень сдвигения массива, параметры технологического оборудования и т.п.

Наиболее актуальны процессы управления горным давлением при скважинной гидродобыче полезных ископаемых, т.к. пласт разрушается и обрабатывается на полную мощность.

Деформация кровли при скважинной гидродобыче начинается с плавного прогиба. Затем, при увеличении



**Рис. 1.3.5.** Принципиальная схема установки УЭЦНК4-100-80: 1 — датчик протока; 2 — станция управления; 3 — труба водоподъемная ПВП 40×3.7; 4 — стойка с регулировочными винтами; 5 — мерные метки на кабеле; 6 — обсадная труба ПВП 140×12.0; 7 — электрод верхнего уровня; 8 — трос (нержавеющая сталь),  $d = 7.14$  мм; 9 — электрод нижнего уровня; 10 — насос; 11 — фильтр скважины; 12 — компенсационный стакан электродвигателя; 13 — электрод контроля защитной жидкости; 14 — электродвигатель; 15 — направляющий стакан (кожух) электродвигателя.

пролёта камер (около 14 м), начинается по-степенное расслоение кровли и образование трещин. Дальнейшее увеличение размеров пролётов приводит к обрушению кровли. При относительно небольшой мощности покрывающих пород свод обрушения достигает поверхности. Однако уже при глубине 40 м изменения на поверхности земли практически не наблюдаются при обычных размерах камер.

Как показал опыт эксплуатации скважинной гидродобычи, при ширине камеры 14 м междукамерный целик оказывается устойчивым при ширине 4 м при любой мощности покрывающих пород.

Устойчивая площадь обнажения кровли составляла при опытной эксплуатации скважинной гидродобычи  $280 \text{ м}^2$  (20×14 м).

Форма мульды сдвижения поверхности в плане представляет собой симметричную фигуру - воронку, образовавшуюся в результате отработки скважины.

Круглая форма мульды свидетельствует о равномерном оседании поверхности. Скорость оседания поверхности в мульде колебалась от 0,6 до 21,6 мм/мес. Максимальные скорости оседания наблюдались через 2 месяца после окончания отработки камеры, после чего шёл склад процесса сдвижения. Таким образом, в результате отработки скважин и образования площадей обнажения вся налегающая толща до поверхности прогибается плавно, без расслоения. Предварительный угол сдвижения составляет около  $43^\circ$ .

Процесс сдвижения в затопленных камерах существенно замедляется.

Имеются предложения по заполнению отработанных камер закладочным материалом, представляющим собой песок, дробленную породу или отходы производства.

Принципиальная схема отработки залежи с закладкой выработанных блоков приведена на рис. 1.3.6.

Отработка залежи фосфоритосодержащих песков ведётся блоками. Разрабатываемый блок 1 вытянут и обрабатывается через ряд геотехнологических скважин на всю

длину блока. Отбойка руды ведётся слоями в восходящем порядке. Расположенный рядом блок образует целик 2. Следующий за целиком блок и блок, расположенный за очередным целиком, образуют закладываемые блоки 3. После заполнения последних закладочным материалом приступают к слоевой разработке целиков 4. При необходимости полностью исключить сдвиг массива, производят закладку отработанных целиков 5.

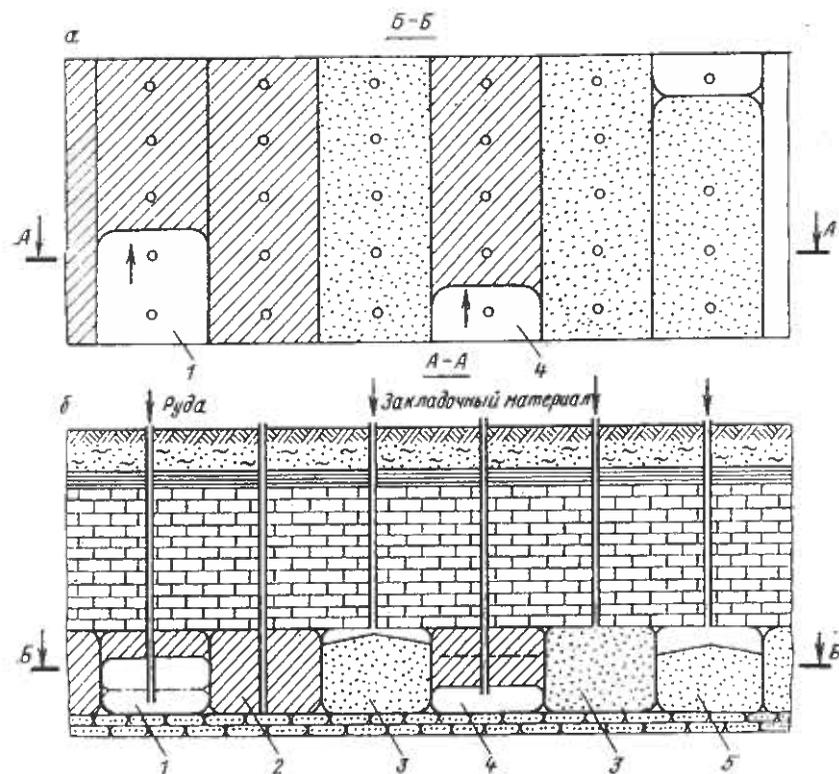


Рис 1.3.6. Принципиальная схема отработки залежи с закладкой вы-

Особенно эффективен метод управления массивом горных пород закладкой, когда в качестве закладочного материала используются отходы производства и вредные вещества. Один из возможных способов захоронения твёрдых промышленных отходов в геотехнологических выемках приведен на рис.1.3.7. [14].

Способ осуществляется следующим образом. Из обычной скважины 1 осуществляется отработка полезного ископаемого одним из геотехнологических методов (предпочтительнее подземное растворение солей во избежание фильтрации через массив), в результате чего образуется подземная полость 2.

Подлежащие захоронению твёрдые отходы подают в автоклав 3, оснащённый мешалкой, в котором их суспендируют в жидкости с превосходящей их плотностью, температура кипения которой ниже температуры вмещающих подземную полость горных пород. В качестве такой жидкости может быть использован дифтордибром-метан, имеющий плотность 2,28 г/см<sup>3</sup>, температуру кипения 23,8 °С. Подготовленную суспензию заливают в скважину. По истечении некоторого времени жидкая фаза суспензии, подогреваемая теплом земных недр, начинает испаряться и уровень налива суспензии в скважине понижается.

Для обеспечения возможности повторного использования применяемой жидкости устье скважины подключают к системе сжижения выходящих из неё паров, состоящей из компрессора 4, конденсатора 5 и ресивера 6. По прекращении поступления отходов жидкости скважину отключают от системы сжижения, а оставшийся погребённым в недрах материал замуровывают цементным раствором.

Для осуществления способа могут быть использованы в зависимости от свойств захороняемых материалов различные галогенпроизводные алканов, жидкий ксенон и

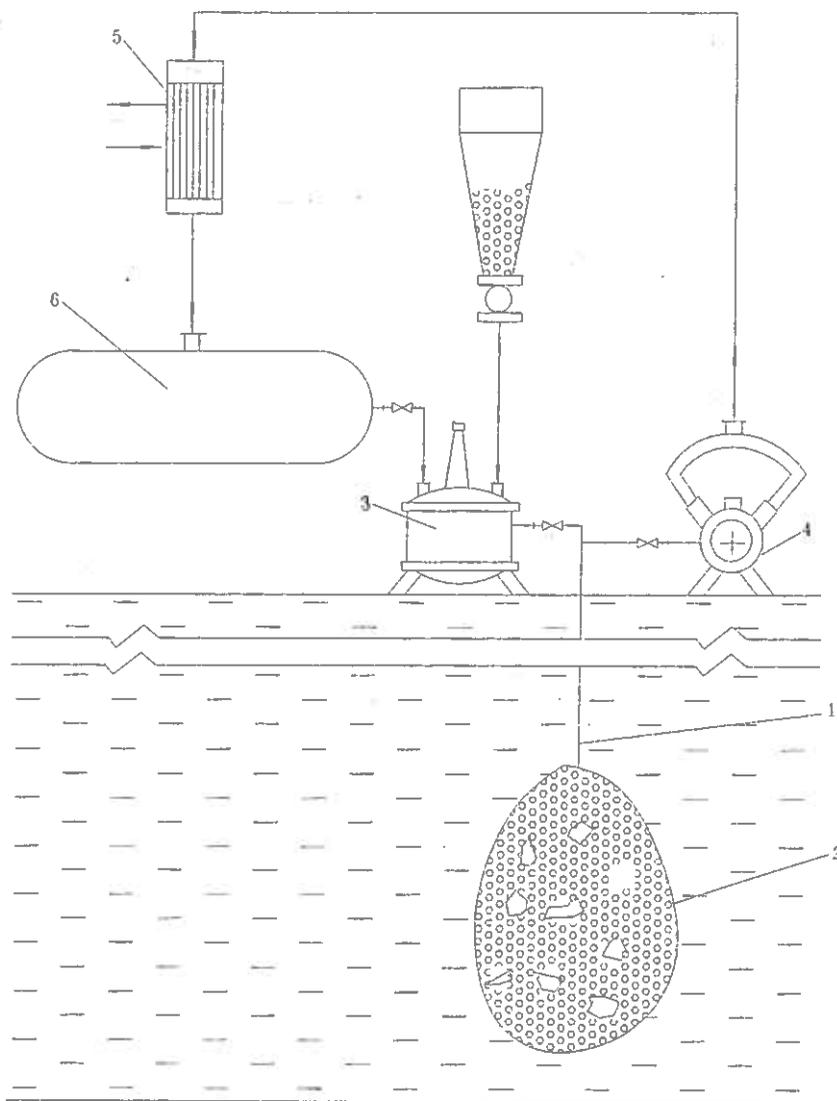


Рис. 1.3.7. Принципиальная схема способа захоронения твердых промышленных отходов в геотехнологических выемках

другие жидкости с высокой плотностью и низкой температурой кипения.

Размещение захороняемых отходов в подземной полости с помощью жидкости с превосходящей их плотностью обеспечивает строгое постоянство равномерности распределения всплывающего в ней материала как по всему зеркалу её поверхности, так и под ним. Материал автоматически сохраняет свою горизонтальность на любой отметке налива суспензии. В сочетании с низкой температурой кипения жидкой фазы, формирующейся по мере опускания мениска суспензии по скважине к кровле полости, штабель не только полностью воспроизводит её форму, но и оказывается в конечном итоге полностью осушенным теплом земных недр.

В сравнении с известным способом, заключающимся в гидротранспортировании предварительно суспендированного в жидкости захороняемого материала в выработанное пространство с последующим расслоением этой суспензии в затопленной ею горной выработке, сливом отстоявшейся жидкой фазы и откачиванием осветленной от твёрдой фазы жидкости на дневную поверхность для повторного использования, предлагаемый способ не требует монтажа насосов и трубопроводов, позволяет снизить энергозатраты, повысить степень использования выработанного пространства. Кроме того, полость заполняется закладываемым материалом под самую кровлю, т.к. последний находится на плаву. Это обеспечивает исключение сдвижения массива горных пород из-за неполноты заполнения полости, что очень важно при захоронении радиоактивных и токсичных отходов.

Для создания фильтрационных каналов в горном массиве, обеспечивающих движение рабочих и продуктивных флюидов, используют гидроразрыв пласта. Он приводит к хрупкому разрушению массива с образованием сетки

и образованием новых трещин. Для закрепления трещин, в них нагнетают твёрдый материал, например, кварцевый песок.

Особенно важно использование этого метода при подземном выщелачивании урана. Повышение проницаемости массива позволяет увеличить расстояние между добычными скважинами. Существует большое число методов повышения проницаемости массива. Основными из них являются различного рода воздействия на залежь: пневмо- и гидрорасчленение; использование энергии криогенных газов в различных режимах и сочетаниях; использование энергии взрыва; физико-химическое, электрическое, вибро-волновое и акустическое воздействие. Эти способы находятся в различной стадии разработки, но наиболее освоено гидрорасчленение.

При подземном выщелачивании необходимо управлять потоками рабочей жидкости, чтобы исключить её проникновение за контуры обрабатываемой залежи и не допустить фильтрацию подземных вод в рабочую зону. Для предотвращения растекания продуктивных растворов и фильтрации подземных вод, используют противофильтрационные завесы, которые могут сооружаться как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях. Для сооружения вертикальных барьеров бурят ряд барражных скважин, которые можно располагать как вдоль, так и поперек залежи. Для сооружения горизонтальных барьеров барражные скважины бурятся по площади до места возведения завесы. Для создания завесы в скважины нагнетается твердеющий материал (цемент, синтетические смолы и др.). Химические барьеры создаются нагнетанием в скважины веществ, которые затвердевают после взаимодействия друг с другом и пластовой водой.

### 1.3.6

#### Процесс транспортировки полезного ископаемого от места добычи до места переработки

Транспортирующее оборудование предназначено для доставки продуктов добычи от скважины до места складирования или переработки. Такое оборудование представлено: насосными агрегатами, компрессорными и газо-воздушными агрегатами, сгустителями, классификаторами, обезвоживателями, трубами и арматурой и т.п.

Конкретная схема транспортировки, оборудование и его характеристики определяются применяемым геотехнологическим способом и условиями его применения.

Так, например, при подземной выплавке серы вся разводка трубопроводов для доставки добытого полезного ископаемого от скважины до склада осуществляется по металлическим трубам различных диаметров. Сера исключительно агрессивна, и быстро выводит оборудование из строя. Необходимо иметь в виду, что сера должна находиться в трубах в жидкотекучем состоянии, т.е. при температуре 160-170 °С.

При скважинной гидродобыче (СГД) возможны следующие способы доставки разрушенной руды напорной водой: самотёчная по руслу произвольной формы, по лоткам и трубам; принудительной гидромониторной струёй.

Самотёчный транспорт применяется для подачи гидросмеси руды от добычных агрегатов к участковым землесосным установкам. Обычно применяются лотки трапецеидального сечения. Необходимо иметь в виду, что проблемы гидротранспорта резко возрастают при понижении температуры окружающего воздуха ниже 0 °С.

При подземном выщелачивании вся трубная разводка осуществляется из полиэтиленовых или пластмассовых труб или других кислотоустойчивых материалов.

При подземной газификации после предварительной очистки и переработки технологический газ отводится по трубам, где находится под высоким давлением.

Иногда возникает необходимость в частичной переработке добытого продукта, его очистке от вредных примесей, предварительном обогащении и т.п. Эти процессы осуществляются на специальном оборудовании, набор которого зависит от конкретного геотехнологического способа разработки. К этой группе относится также погрузочное и складское оборудование: экскаваторы, грейферные грузчики, краны и т.п.

### **1.3.7**

#### **Комплексная автоматизация производственных процессов геотехнологии**

К средствам контроля технологического процесса геотехнологии и управления им относятся:

- 1) контрольно-измерительные приборы (расходомеры, термопары, манометры, дифманометры и др.);
- 2) средства автоматизации (датчики, усилители, преобразователи, исполнительные механизмы);
- 3) автоматизированные системы управления.

Технические средства АСУ включают контрольно-измерительные приборы и дистанционно управляемые исполнительные механизмы, а также средства автоматической обработки данных (вычисления, сбора, хранения и передачи информации).

Особенно важна проблема комплексной автоматизации производственных процессов при подземной выплавке серы, т.к. необходимо на всём технологическом цикле поддерживать температурный режим в чётко ограниченном диапазоне.

В технологической структуре комплекса подземной выплавки серы выделяются следующие основные звенья: участок водоснабжения; участок водоподготовки; участок подготовки горячей воды и пара; компрессорная; контрольно-распределительная станция; добычный комплекс; склад серы; вспомогательные участки.

Координация работы всех этих звеньев должна быть жёстко увязана и обеспечена диспетчерской службой, сосредотачивающей в себе все каналы подсистем централизованного контроля и учёта, оперативной связи и т.д.

Целесообразность автоматизации технологических процессов геотехнологии определяется экономической эффективностью, однако при ПВС из-за сложности и многокритериальности без неё невозможно обойтись.

## **1.4**

### **Вскрытие и системы разработки месторождений геотехнологическими способами**

---

#### **1.4.1**

##### **Геотехнологические способы вскрытия месторождений**

Под вскрытием месторождения понимается проведение (проходка) выработок, открывающих доступ с поверхности к рудному телу или к пластам полезного ископаемого и обеспечивающих возможность проведения подготовительных работ.

Выработки, обеспечивающие доступ к месторождению полезного ископаемого с поверхности земли и служа-

Основная вскрывающая выработка при геотехнологии — скважина. Скважины обеспечивают также подготовку залежи к разработке и служат для транспортировки рабочих и продуктивных флюидов.

По своему назначению все вскрывающие скважины подразделяются на добычные и вспомогательные. Вспомогательные скважины могут быть разведочными, водоотливными, оценочными и контрольными. Добычные скважины предназначены для добычи полезного ископаемого и могут быть вертикальными, наклонными и наклонно-горизонтальными. Они обычно оборудуются эксплуатационными колоннами труб для доставки к продуктивной залежи рабочего агента и извлечения из недр полезного ископаемого. Диаметр добычной скважины определяется конструктивными размерами её оборудования, а глубина — глубиной залегания полезного ископаемого.

Наклонно-горизонтальные скважины позволяют отрабатывать на одну скважину большие запасы, чем вертикальные.

При большинстве геотехнологических способов разработки месторождений полезных ископаемых скважины являются одновременно вскрывающими, подготовительными и нарезными выработками, т.к. они вскрывают месторождение, подготавливают его к разработке и используются для добычи полезного ископаемого.

Добычные скважины обычно одинаковы, отрабатывают один ограниченный участок месторождения, поэтому для оценки вскрытия, подготовки и разработки (за исключением скважинной гидродобычи) можно рассматривать только одну скважину.

Общее представление о тех условиях, в которых приходится осуществлять вскрытие, и характеристику экономической эффективности системы вскрытия даёт коэффициент вскрытия.

ноmicеской эффективности системы вскрытия даёт коэффициент вскрытия.

Различают несколько коэффициентов вскрытия: геологический, технологический и экономический.

Геологический коэффициент вскрытия - это отношение мощности покрывающих пород к мощности пласта. Определяется из выражения:

$$K_z = \frac{H}{m}, \quad (4.1)$$

где  $H$  — мощность покрывающих пород, м;

$m$  — мощность залежи, м.

Технологический коэффициент вскрытия показывает, какая длина скважины приходится на тонну добываемых запасов. Он определяется из выражения:

$$K_T = \frac{l}{100\Pi V \eta S}, \quad \text{м/т}, \quad (4.2)$$

где  $l$  — длина добычной скважины, м;

$\eta$  — коэффициент извлечения полезного ископаемого в пределах отрабатываемого участка одной скважиной;

$\Pi$  — производительность пласта полезного ископаемого, определяемая из выражения:

$$\Pi = m \cdot \gamma, \quad \text{т/м}^2, \quad (4.3)$$

где  $\gamma$  — объёмная масса полезного ископаемого, т/м<sup>3</sup>;

$V$  — площадь зоны действия скважины, определяемая из выражения:

$$V = \pi R^2, \quad \text{м}^2, \quad (4.4)$$

где  $R$  — радиус участка разрабатываемого одной скважиной, м.

$S$  — среднее содержание полезного ископаемого, %.

Экономический коэффициент вскрытия определяется как отношение затрат на сооружение и оборудование добычной скважины и стоимости полезного ископаемого. Он определяется из выражения:

$$K_3 = \frac{C}{A}, \quad (4.5)$$

где  $C$  — суммарные затраты по бурению, подготовке и оборудованию скважины, руб.;

$A$  — стоимость запасов полезного ископаемого, извлекаемого из скважины, руб.

Вскрытие месторождения является наиболее ответственным этапом при геотехнологии. Малейшие упущения в работах по бурению и подготовке скважины могут привести к её потере или вызвать необходимость в производстве длительных и трудоёмких ремонтных работ.

Вскрытие месторождения геотехнологическими скважинами состоит из ряда последовательно выполняемых операций: выбор места заложения скважины, уточнение конструкции скважины; бурение скважины; обсадка и цементация скважины; опресовка скважины; геологические, гидрогеологические и геофизические исследования скважин; оборудование скважин для эксплуатации; оформление документации и сдача скважины в эксплуатацию.

Выбор места заложения скважин всегда связан с применяемой системой разработки, принятой на данном участке или месторождении. Отклонение от проектного места заложения скважины может нарушить работу соседних скважин и вызвать повышенные потери рабочего агента и полезного ископаемого в недрах.

Уточнение конструкции скважин связано с новыми геологоразведочными данными, полученными перед бурением скважины. При этом уточняется место расположения

пакеров, фильтров и т.д., а также глубина опресовки скважины.

Бурение геотехнологических скважин мало чем отличается от бурения нефтяных, газовых и других типов скважин. Особенность заключается в том, что при бурении геотехнологических скважин осуществляют отбор керна по продуктивной залежи и на несколько метров в боковых породах над и под ним, а бурение по продуктивной толще ведётся с промывкой чистой водой.

Обсадка и цементация скважин иногда ещё называются креплением. Таким образом, крепление скважин выполняется в два этапа: спуск обсадной колонны и цементация затрубного пространства. Обсадные трубы в процессе работы испытывают следующие виды нагрузок:

- наружное давление горных пород;
- внутреннее давление текущих по трубам флюидов;
- продольное растяжение и изгиб труб под действием собственного веса;
- напряжения, возникающие в результате температурного удлинения.

Наиболее предпочтительны в качестве обсадных сварные трубы, так как они обладают следующими преимуществами:

- уменьшается зазор между стенками скважины и наружным диаметром колонны за счёт отсутствия муфт между трубами;
- увеличивается прочность и герметичность обсадной колонны;
- значительная экономия металла и цемента.

Цементация добычных скважин — важнейший процесс при подготовке их к эксплуатации, так как она обеспечивает герметичность и, следовательно, успешную их работу. Цементация защищает также колонну обсадных труб от

воздействия агрессивных высокоминерализованных пластовых вод. Объемы цементации, марки используемого цемента, вид наполнителя, конструкция возводимой крепи зависят от конкретного геотехнологического способа разработки и типа месторождения полезного ископаемого. Обычно используют цементы марки 300-500. При геотехнологических способах, связанных с высокой температурой протекающих процессов, используются специальные термостойкие цементы. При цементации в глинистых и соляных породах цементный раствор приготавливается не на пресной воде, а на насыщенном водном растворе соли (360 кг на 1 м<sup>3</sup>). Промывка скважин перед цементацией и продавка цемента после окончания тампонажа также ведётся насыщенным раствором поваренной соли. После окончания работ по цементации обсадной колонны скважину оставляют для ожидания затвердевания цемента (ОЗЦ) на 16-24 часа. Этот период уменьшается, если в него добавляют ускорители схватывания, например, жидкое стекло.

Опресовка скважин представляет собой испытания их на герметичность. Обычно она производится в три приёма:

- испытание герметичности обсадной колонны, которая проводится после затвердевания цемента, но до разбуривания цементного башмака, под давлением в 2-3 раза превышающим давление рабочего агента в процессе разработки;
- испытание герметичности цементации, которое проводится после разбуривания цементного башмака в трубе и под обсадной колонной под давлением, соответствующим двойному давлению рабочего агента;
- испытание герметичности скважины в целом, которое производится после окончания проходки.

Испытания герметичности проводят водой, нагнетаемой в скважину поршневым насосом бурового станка, а при значительной приемистости скважины - центробежным насосом. При затрубных появлениях воды приступают к повторной цементации, так называемому «лечению» скважин.

Исследования скважин проводятся после окончания бурения перед их оборудованием. При этом производится опробование рудного пласта как по кернам, так и геофизическими методами. Кроме этого проводят гидрогеологические исследования с целью выявления дебита воды, времени восстановления уровня, качества воды и т.д.

Оборудование скважин зависит от конкретного геотехнологического способа и определяется проектом.

Оформление документации и сдача скважины в эксплуатацию являются завершающей операцией вскрытия. Бурение скважин ведётся в соответствии с утверждённым планом горных работ, где указываются порядок бурения и сдачи в эксплуатацию добычных и вспомогательных скважин. При бурении каждой добычной скважины составляются следующие документы:

- буровой журнал и геологический паспорт скважины;
- акт о заложении скважины с указанием точного её местонахождения;
- акт контрольного замера глубины скважины;
- акт на скрытые работы, в котором указываются порядок бурения и разбуривания скважин;
- акт об обсадке и цементации;
- акт замера искривления скважин;
- отчёт о проведённых гидрогеологических исследованиях;
- отчёт о проведённых геофизических испытаниях;

- акт на оборудование скважины с указанием точного расположения всех труб по отношению к почве пласта.

Во многом эффективность эксплуатации скважин зависит от полноты сведений, содержащихся в документации, так как от этого зависит правильность принятия решений при осложнениях и авариях, а также осуществление мероприятий по воздействию на пласт для повышения эффективности процесса.

Так как вскрытие является важным этапом геотехнологической отработки месторождений, постоянно ведутся работы по совершенствованию схем вскрытия.

Различают три основных проблемы геотехнологии:

- улучшение качества вскрытия продуктивных пластов за счёт совершенствования техники и технологии бурения (повышение скорости бурения, механизация буровых работ, возможность обсадки скважины буровым станком и извлечения обсадной колонны);

- эффективное сооружение наклонно-направленных скважин;
- подготовка месторождения к его эффективной разработке через скважины.

Выбор способа вскрытия зависит от следующих факторов:

- технологическая схема разработки;
- размеры месторождения в плане;
- условия залегания залежи (мощность, угол падения, глубина залегания);
- физико-механические свойства полезного ископаемого и вмещающих пород;
- рельеф поверхности.

Классификация скважинных методов вскрытия приведена в табл. 1.4.1 [2].

Классификация скважинных методов вскрытия

Способ вскрытия месторождения	Область применения
1	2
1. Отдельной скважиной: а) вертикальной	Скважинная гидродобыча (устойчивые покрывающие породы), подземное растворение солей (мощные залежи).
б) наклонной, наклонно-горизонтальной	Скважинная гидродобыча (неустойчивые покрывающие породы).
2. Группой скважин: а) спаренными	Скважинная гидродобыча (небольшая глубина залегания), подземное растворение солей, добыча тепла Земли.
б) взаимодействующими (вертикальными, наклонными и вертикальными)	Подземное выщелачивание металлов, выплавка серы, газификация угля (залежи небольшой мощности)
3. Горной выработкой и скважинами: а) скважинами из подземных выработок; б) скважинами с поверхности и из подземных выработок; в) подземными горными выработками.	Отработка локальных рудных тел в сочетании с традиционной технологией добычи.

Принципиальные схемы вскрытия месторождения отдельными скважинами приведены на рис. 1.4.1.

При вскрытии месторождений отдельной вертикальной скважиной (Рис. 1.4.1.а) на устье оборудуется кондуктор 1. Колонна обсадных труб 2 опускается только до кровли обрабатываемой залежи. Затрубное пространство 3 за

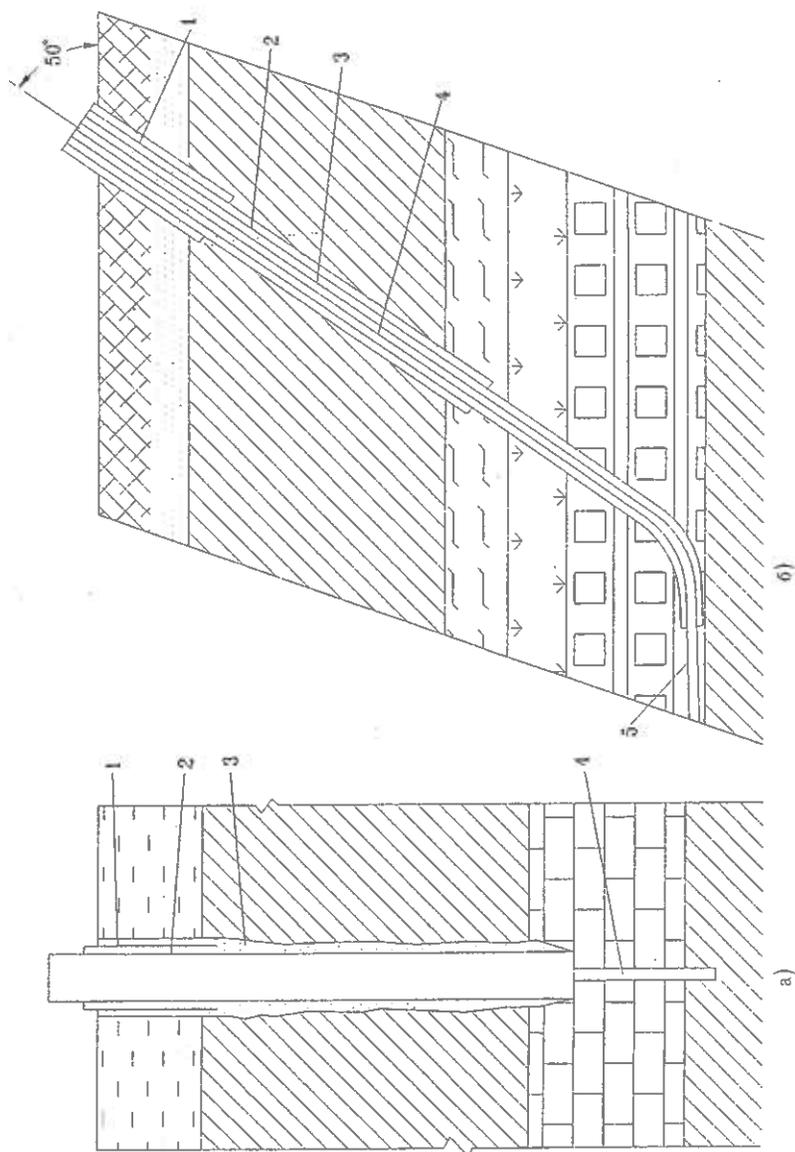


Рис. 1.4.1. Принципиальные схемы вскрытия месторождения отдельными скважинами: а) отдельной вертикальной скважиной; б) отдельной наклонно-горизонтальной скважиной

полняется цементным раствором. Участок скважины в продуктивной толще 4 обычно проводится без крепления.

При вскрытии месторождения отдельной наклонно-горизонтальной скважиной (Рис.1.4.1.б) в её устье размещается направляющая колонна 1. До кровли залежи опускается промежуточная колонна 2. Обсадная колонна 3 опускается до почвы залежи или до окончания наклонной части скважины. Горизонтальная часть скважины оборудуется обычно водоподводящей колонной 4. (Обычно этот способ вскрытия используется при подземном растворении пластов каменной соли 5.).

Принципиальные схемы вскрытия месторождения группой скважин показаны на рис. 1.4.2.

При вскрытии месторождений полезных ископаемых спаренными вертикальными скважинами (Рис. 1.4.2. а), например, при скважинной гидродобыче, одна скважина обычно является гидромониторной 1, а вторая эрлифтной 2.

При вскрытии месторождений полезных ископаемых взаимодействующими наклонными и вертикальными скважинами (Рис.1.4.2.б), например, при подземной газификации крутых угольных пластов, одна скважина является розжиговой 1, вторая — дутьевой 2, а третья — газоотводящей 3.

Схемы вскрытия горной выработкой и скважинами весьма разнообразны и зависят от конкретной схемы взаимного размещения горных выработок и залежи. Однако эти схемы не являются в полном смысле геотехнологическими, так как требуется наличие горных выработок, подземных или открытых.

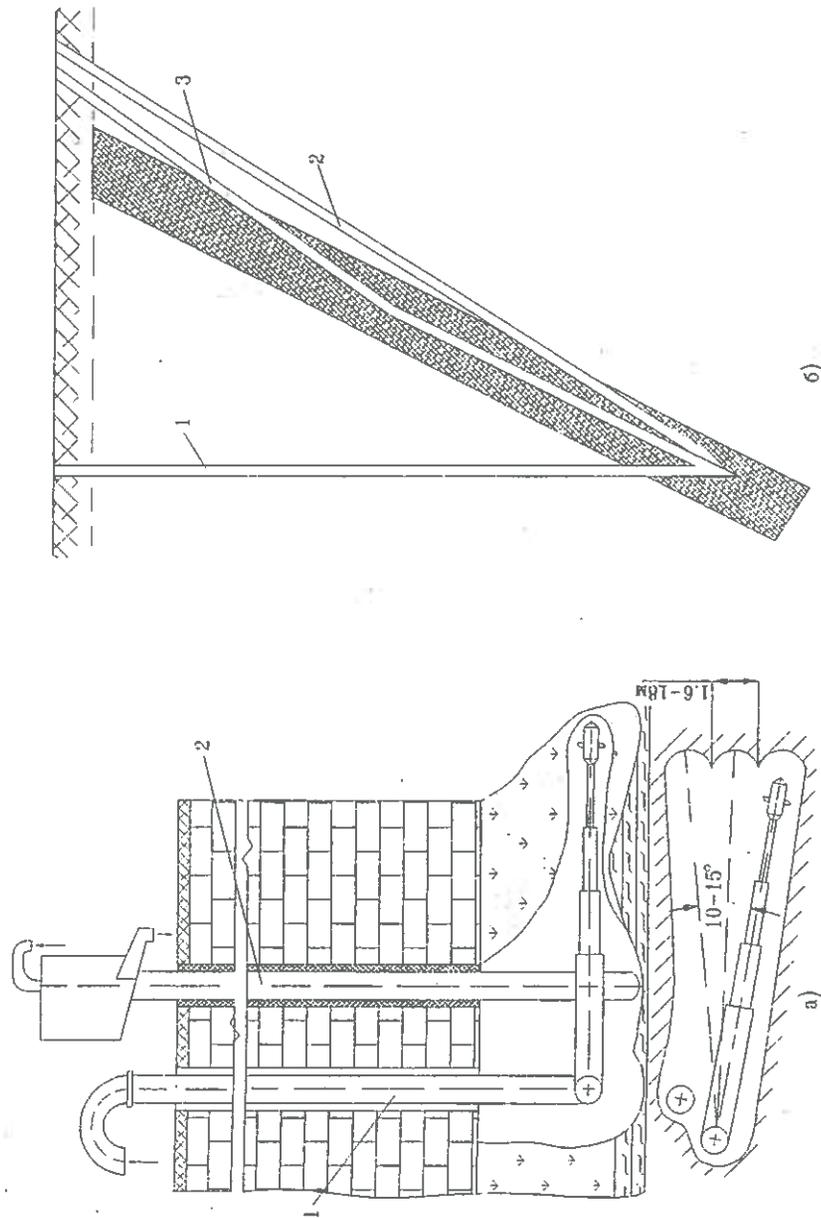


Рис. 1.4.2. Принципиальная схема вскрытия месторождения группой скважин: а) спаренными вертикальными скважинами при СГД; б) взаимодействующими наклонными и вертикальными скважинами при ПГУ

## 1.4.2 Геотехнологические системы разработки месторождений.

Под системой разработки месторождений полезных ископаемых геотехнологическими способами понимается порядок расположения, проходки и включения в работу добычных и вспомогательных скважин, увязанный в пространстве и времени.

Цель любого производственного процесса — получение максимального эффекта при минимальных затратах. Дополнительными технологическими и экономическими требованиями, предъявляемыми к системам разработки являются:

- обеспечение заданного уровня извлечения;
- обеспечение заданного уровня добычи;
- достижение минимальной себестоимости;
- обеспечение экологической чистоты.

В первую очередь система разработки определяется сеткой расположения скважин, которая зависит от горно-геологических условий и от способа отделения полезного ископаемого, способа управления горным давлением.

Для каждого способа геотехнологической отработки месторождений полезных ископаемых характерны определенные варианты размещения скважин и технологии добычи.

Классификация геотехнологических систем разработки по способу подготовки месторождения приведена в табл. 1.4.2 [2].

По сути дела системы с индексами III и IV не являются в чистом виде геотехнологическими, а - комбинированными [5].

Наиболее характерно понятие системы разработки при скважинной гидродобыче, так как при этом способе очень четко выражается понятие очистного забоя. Форма очистного забоя, последовательность и направление очистной выемки, кроме параметров, характеризующих элементы залегания месторождения, во многом определяются используемым оборудованием и приемами ведения технологического процесса. При способе скважинной гидродобычи в очистном забое выполняются практически все основные производственные процессы, осуществляемые и в очистном забое шахты или рудника: отбойка, доставка и управление кровлей. Как видно, отсутствует только процесс крепления кровли, но при большинстве рудных систем разработки он также отсутствует.

Таблица 1.4.2

### Классификация геотехнологических систем разработки

Индекс системы	Название системы разработки	Технологическая схема.
I	Скважинами - камерами	Отдельными скважинами
		Сдвоенными скважинами
II	Взаимодействующими скважинами	Рядами
		Ячейками
III	Скважинами и подземными выработками	Скважинами с поверхности и выработками
		Выработками и скважинами из них
IV	Традиционная	Орошение магазина
		Орошение отработанных блоков

При скважинной гидродобыче важным элементом технологии является технологическая схема выемки руды в камере, отличающаяся по направлению действия гидромониторной струи и схемы доставки разрушенной руды к всасу выдачного устройства. Принципиальные технологические схемы выемки руды в камере при скважинной гидродобыче приведены на рис. 1.4.3. Различают схемы выемки: встречным, попутным, совмещенным забоями и комбинированный способ выемки.

При схеме выемки встречным забоем направление разрушающей струи гидромонитора не совпадает с направлением смывающей струи. (Рис. 1.4.3. б).

При схеме выемки попутным забоем направление разрушающей струи гидромонитора совпадает полностью или частично с направлением смывающей струи (Рис. 1.4.3. а).

При схеме выемки совмещенным забоем струи боковых насадок гидромонитора попутным забоем разрушают пласт руды и смывают её к всасу пульпоподъемного механизма, а струи передних насадок встречным забоем разрабатывают пласт (Рис. 1.4.3. в).

При комбинированном способе выемки две рядом расположенные камеры отрабатываются по схеме встречным или совмещенным забоями, а отработка междукамерного целика и смыв отбитой руды с почвы камеры ведутся по схеме попутного забоя.

В любом случае, при углах падения залежи менее  $5^{\circ}$  необходимо организовать принудительную доставку разрушенной руды к всасу пульпо-подъемного механизма либо созданием искусственного уклона в почве камеры, что сопровождается разубоживанием руды, либо гидромонитор-

ной струёй. При углах падения залежи более  $5^\circ$  доставка разрушенной руды осуществляется самотёком.

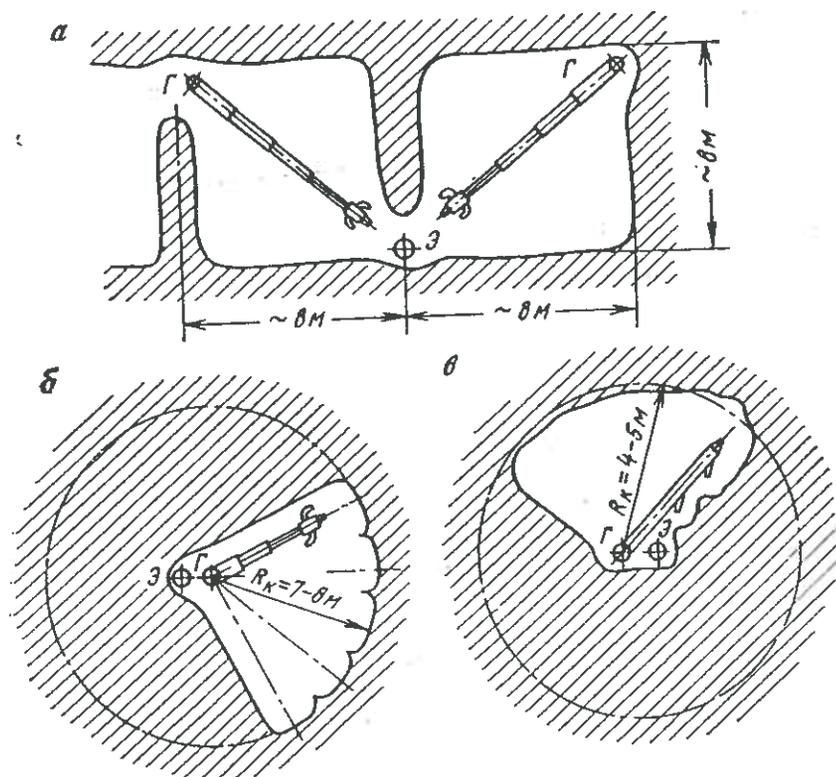


Рис. 1.4.3. Принципиальные технологические схемы выемки руды в камере при скважинной гидродобыче: а) попутным забоем, б) встречным забоем, в) совмещенным забоем

В зависимости от стадийности отработки залежи в камере различают следующие технологические схемы: сплошным, почвоуступным и потолкоуступным забоями.

При отработке залежи сплошным забоем пласт отрабатывается на всю мощность за один приём. При этом возможны два варианта:

- пласт отрабатывается гидромониторной струёй на всю мощность;
- пласт подрезается гидромониторной струей у почвы, а вышерасположенная толща обрушается под воздействием горного давления.

При отработке залежи почвоуступным забоем пласт разрабатывается слоями сверху вниз.

При отработке залежи потолкоуступным забоем пласт разрабатывается слоями снизу вверх.

Форма отработанного пространства обычно бывает круглой при одиночных добывающих скважинах, а при взаимодействующих — в принципе, любой, что определяется расположением добычных скважин друг относительно друга, контурами залежи и формой, размещением и размерами целиков.

Существует несколько классификаций геотехнологических систем разработки, но наиболее удачной, на наш взгляд, является классификация по способу управления горным давлением. По этому признаку различают:

- системы с открытым очистным пространством;
- системы с обрушением или плавной посадкой вмещающих пород;
- системы с закладкой выработанного пространства.

Наиболее распространённые варианты систем разработки скважинной гидродобычи с открытым очистным пространством приведены на рис. 1.4.4.

При системе с камерами круглой формы и целиками, приведённой на рис. 1.4.4.а, каждая камера вскрывается двумя добычными скважинами 1 и 2, расположенными в центре добычной камеры 5 круглой формы. Одна из скважин является гидромониторной, а вторая — эрлифтной. Между камерами оставляются целики 4 сложной формы в плане.

При блоковой системе с ленточными целиками, приведённой на рис. 1.4.4.б, добычные скважины 1,2,3 располагаются в два ряда. Отработка залежи ведётся блоками. При отработке двух рядов добычных скважин образуется вытянутая по простиранию добычная камера - блок 5. Одновременно обрабатываются три скважины, при этом разрушается участок залежи треугольной формы. Между камерами оставляется ленточный целик 4. Расстояние между ленточными целиками определяется устойчивостью пролетов камер.

При камерной системе с звездообразными целиками, приведённой на рис. 1.4.4.в, добычные скважины 1,2,3 располагаются в вершинах равностороннего треугольника. Отработка залежи ведётся гексагональными камерами-блоками 5. На границах и в центре блоков располагаются целики 4, имеющие сложную звездообразную трёхлучевую форму. Угол между лучами двух соседних целиков составляет  $60^\circ$ . Ширина лучей - целиков составляет 1,0 - 1,5 м. Расстояние между добычными скважинами зависит от многих факторов и колеблется от 15 до 25 м.

Обычно системы с открытым очистным пространством применяются при устойчивых покрывающих породах.

При мощности залежи 2-3 м выемка руды осуществляется сплошным забоем, при большей — слоями. При этом слои оформляются таким образом, чтобы уклона почвы в них было достаточно для самотёчной доставки разрушенной руды.

Коэффициент извлечения руды при системах с открытым очистным пространством зависит от горно-геологических и горнотехнических факторов и колеблется в пределах 50-70 %.

Достоинством систем с открытым очистным пространством является то, что добычные агрегаты располага-

ются над целиками, а добыча осуществляется, в основном, попутным забоем.

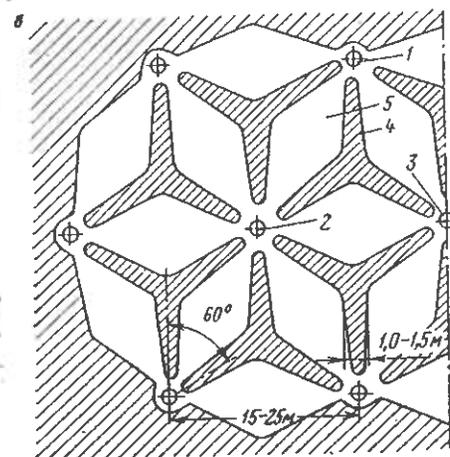
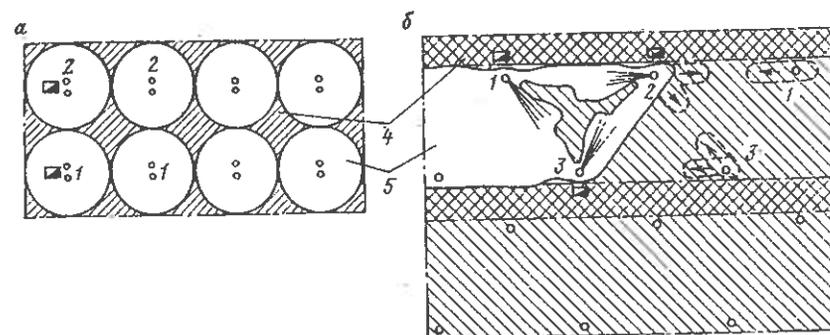


Рис. 1.4.4. Наиболее распространенные варианты систем разработки скважинной гидродобычи с открытым очистным пространством: а) камерная система с целиками; б) блоковая система с ленточными целиками; в) камерная система с звездообразными целиками

Наиболее распространённые варианты систем разработки скважинной гидродобычи с обрушением или плавной посадкой вмещающих пород приведены на рис. 1.4.5.

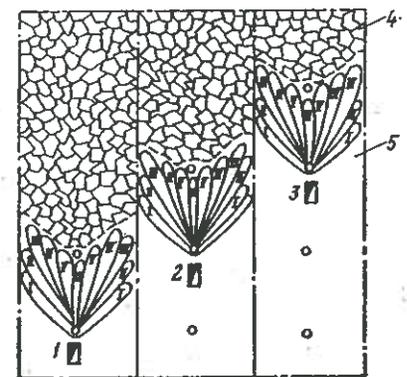
При системе с отдельными агрегатами, приведённой на рис. 1.4.5.а, отработка ведётся полосами по падению. В одновременной работе могут находиться одна или несколько полос. Добычные скважины 1, 2, 3 бурятся по центру полосы. Отработка участка 5 ведётся заходками I-VI от границ полосы к центру. После выемки заходок происходит обрушение или плавное опускание вмещающих пород 4. Выемка руды в одновременно отрабатываемых полосах ведётся обычно с опережением на одну скважину.

При системе с взаимодействующими агрегатами отрабатываемый участок залежи разбивается на ромбы, в вершинах которых бурятся добычные скважины 1, 2, 3, 1', 2', 3'.

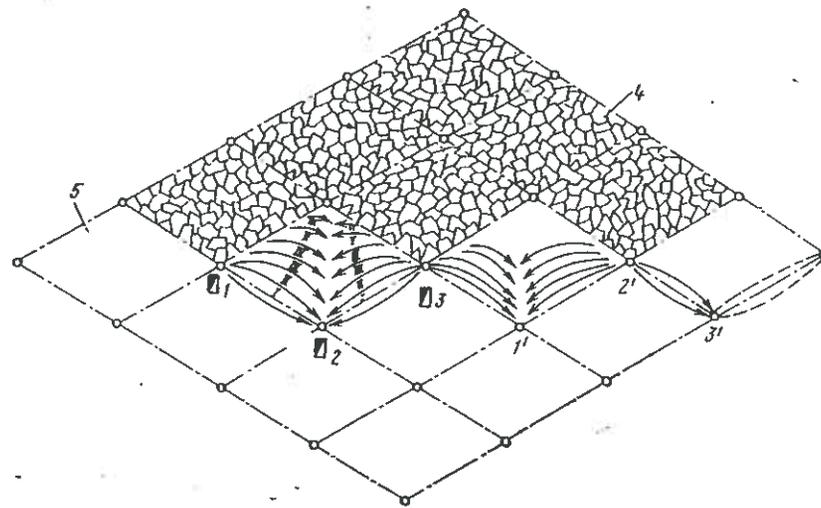
Отработка участков-ромбов 5 ведётся последовательно или одновременно. Скважины, пробуренные в боковых вершинах ромбов 1, 3 являются гидромониторными, а в нижней — 2, 1', 3' — эрлифтными. Отработка участков-ромбов ведётся по падению. При этом назначение скважин (гидромониторных и эрлифтных) может меняться. Отработка участка ведётся заходками I-VI, начиная снизу вверх. После отработки последней заходки VI происходит обрушение или плавное опускание вмещающих пород 4.

Системы разработки с обрушением или плавным опусканием вмещающих пород обычно применяются для выемки пластов, залегающих под неустойчивыми или пластичными породами. При необходимости возможно применение способов принудительного обрушения кровли гидроразрывом, взрывным торпедированием и т.п. Для уменьшения скорости обрушения кровли возможно оставление временных или податливых подзавальных целиков.

Сетка расположения скважин при системах разработки с обрушением и плавным опусканием зависит от числа взаимодействующих агрегатов, скорости подвигания очистного забоя и т.п.



а)



б)

Рис 1.4.5. Наиболее распространенные варианты разработки скважинной гидродобычи с обрушением или плавной посадкой вмещающих пород: а) отдельными агрегатами; б) взаимодействующими агрегатами.

При системах с обрушением и плавным опусканием вмещающих пород возможно вскрытие наклонными скважинами, расположенными за пределами зоны сдвижения покрывающих пород. Это позволяет существенно увеличить объём добычи из одной скважины и обеспечить полную безопасность ведения горных работ.

Системы разработки скважинной гидродобычи с закладкой выработанного пространства обычно применяются при добыче особо ценных руд, когда не допускается оставление целиков, или когда необходимо исключить или значительно уменьшить оседание земной поверхности. Один из возможных вариантов системы разработки с закладкой выработанного пространства приведён на рис.1.3.6. Область применения этих систем может увеличиться, если вместо закладочного материала применять соответствующим образом подготовленные бытовые и вредные промышленные отходы.

Отработка залежи может вестись на всю мощность или слоями, но закладка возводится одновременно на всю мощность залежи снизу вверх. После окончания отработки и заполнения камер закладочным материалом приступают к погашению межкамерных целиков с или без закладки.

При технологии подземного выщелачивания выделяют три группы систем разработки, отличающихся схемой расположения скважин:

- 1) площадные (ячеистые) системы;
- 2) линейные системы;
- 3) комбинированные системы.

Площадные (ячеистые) системы расположения скважин характерны наличием отдельных ячеек по всей площади залежи, при этом на каждую ячейку бурится одна откачная и несколько закачных скважин.

Линейные системы расположения скважин отличаются чередованием рядов откачных и закачных скважин.

Комбинированные системы расположения скважин включают элементы площадных и линейных систем. К комбинированным системам относятся также системы с использованием вертикальных и горизонтальных противодиффузионных завес, предотвращающих некоторые негативные особенности применяемых систем разработки, рассмотренные в главе 1.5.

### **1.4.3 Основы выбора геотехнологических систем разработки**

Выбор системы разработки — значит определить направление отработки залежи в целом и установить сетку размещения скважин. Основными элементами системы разработки являются: направление отработки, сетка скважин, порядок ввода скважин в эксплуатацию во времени и пространстве.

При выборе элементов системы разработки необходимо учитывать влияние следующих факторов:

- глубина залегания залежи;
- технологичность процесса добычи;
- извлекаемость полезного ископаемого;
- производительность пласта;
- условия залегания;
- неоднородности пласта;
- рельеф почвы залежи.

Математически проблема выбора более рациональной системы разработки сводится к максимизации целевой функции при наличии начальных и конечных условий. Максимизируемой функцией обычно служит прибыль. Суммарная прибыль за весь срок эксплуатации месторождения определяется из выражения:

$$П = \sum_{i=1}^T (C_i - C_i) B_i \eta_i, \quad (4.6)$$

где  $T$  — число периодов при обработке месторождения;  
 $C_i$  — цена продукции в  $i$ -ый период эксплуатации месторождения, руб./т;  
 $C_i$  — себестоимость продукции в  $i$ -ый период эксплуатации месторождения, руб./т;  
 $B_i$  — балансовые запасы, обрабатываемые в  $i$ -ый период эксплуатации месторождения, т;  
 $\eta_i$  — коэффициент извлечения запасов, обрабатываемых в  $i$ -ый период эксплуатации месторождения.

Различные значения цены в определённые периоды эксплуатации месторождения определяются изменением качества получаемой продукции из-за горно-геологических и горнотехнических условий.

Расчёт величин, входящих в формулу (1.4.6) представляет наиболее сложную задачу, требующую разработки детальной расчётной схемы и для каждого конкретного случая разработку методики их расчёта.

#### 1.4.4

##### Оценка эксплуатационных потерь полезного ископаемого при геотехнологии

Степень извлечения непосредственно зависит от системы разработки. Технически возможно извлекать 100 % запасов, но это экономически неоправданно.

Как правило, геотехнологические способы отличаются небольшой степенью извлечения, однако возможна повторная обработка месторождения.

Обычно пользуются текущим, конечным и максимальным коэффициентами извлечения. Соответственно: текущий — в момент добычи; конечный — к моменту заве-

ршения добычи; максимальный — предельно возможный.

Оценка вариантов разработки с учётом потерь полезного ископаемого приводится на основе учёта ценности разрабатываемого месторождения. Следовательно, при выборе варианта технологической схемы добычи необходимо соизмерять размеры экономического выигрыша и экономического ущерба, связанных со структурой и величиной потерь полезного ископаемого.

Общий коэффициент извлечения удобно дифференцировать на две величины:

$$\eta = \eta_T \cdot \eta_m, \quad (4.7)$$

где  $\eta_T$  — технологический коэффициент извлечения (коэффициент извлечения отбитого полезного ископаемого), который определяется из соотношения:

$$\eta_T = \frac{G_\xi}{G_\Delta}, \quad (4.8)$$

где  $G_\xi$  — количество извлечённого полезного ископаемого, т.;

$G_\Delta$  — количество полезного ископаемого в контурах, разрушаемых при добыче, т.;

$\eta_P$  — коэффициент извлечения, определяющий потери, связанные с системой разработки месторождения, который определяется из соотношения:

$$\eta_P = \frac{V_P}{V_{II}}, \quad (4.9)$$

где  $V_P$  — объём запасов полезного ископаемого в контурах, разрушаемых при добыче (не учитывается объём целиков), м<sup>3</sup>;

$V_{II}$  — общий объём залежи, запроектированной к обработке (учитывается объём целиков), м<sup>3</sup>

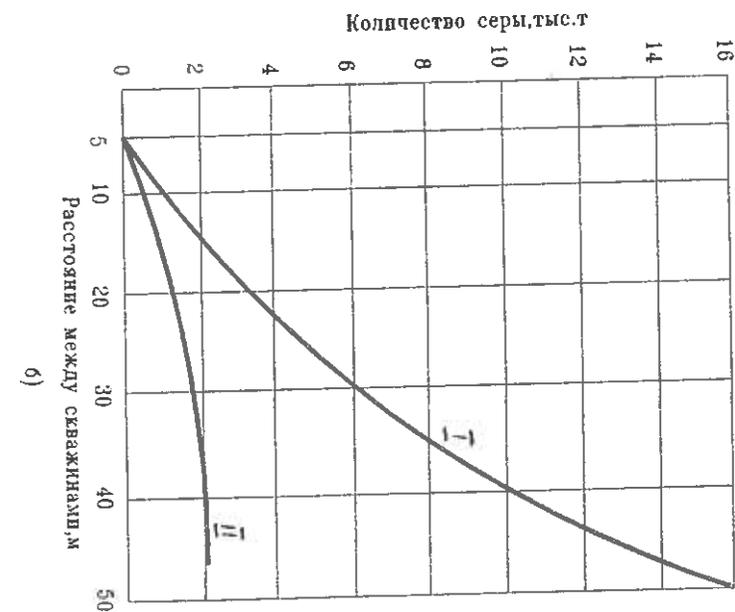
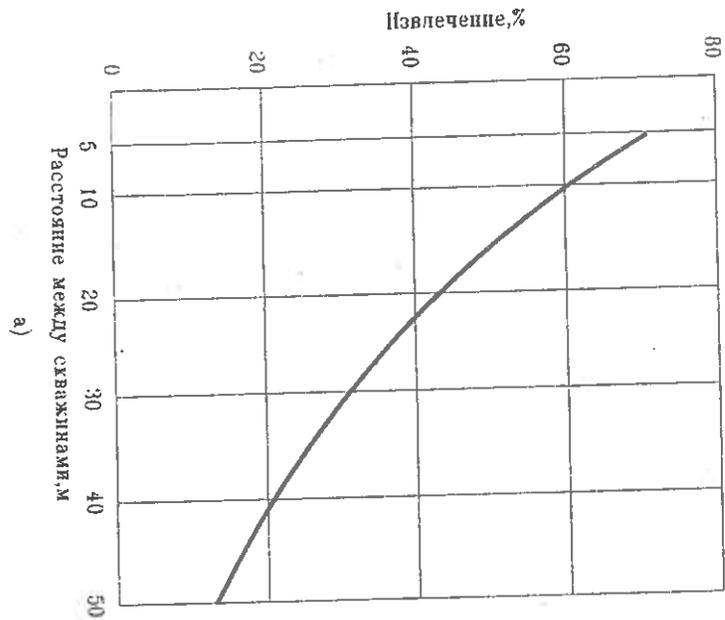


Рис. 1.4.6. Зависимость коэффициента извлечения и количества извлекаемой серы из одной скважины от расстояния между ними: а) коэффициент извлечения; б) запасы и извлечение

В основном, извлечение полезного ископаемого зависит от расстояния между скважинами. Для иллюстрации зависимости коэффициента извлечения и количества добываемого полезного ископаемого из одной скважины от расстояния между скважинами приведены графики на рис. 1.4.6., полученные при подземной выплавке серы на Язовском месторождении.

Как видно из приведённых графиков, при увеличении расстояния между скважинами коэффициент извлечения уменьшается нелинейно, асимптотически приближаясь к определённому значению.

Конкретные расчёты для различных вариантов расположения скважин показывают, что в рассматриваемых условиях наиболее эффективна сетка скважин 25x25 м и извлечение 40-50 %.

Графики на рис. 1.4.6.б показывают, что с изменением расстояния между скважинами запасы, приходящиеся на одну скважину, изменяются по параболе, а извлекаемые запасы - по гиперболе.

Очевидно, что для каждого месторождения и даже его участков должна быть своя оптимальная сетка скважин, обеспечивающая наиболее эффективную разработку месторождения, которая учитывает как извлечение полезного компонента, так и экономическую и технологическую стороны разработки.

## 1.5.

### Технологические схемы скважинной добычи твёрдых полезных ископаемых

#### 1.5.1

##### Подземное растворение полезных ископаемых

Подземное растворение солей является наиболее древним из геотехнологических способов разработки месторождений полезных ископаемых. Ещё в Древнем Китае в первом тысячелетии до нашей эры для добычи соляных растворов впервые осуществлялось бурение скважин глубиной до 900 м диаметром 12-15 см [15]. В XVII веке в России действовало 435 буровых скважин глубиной до 270 м для подъёма естественных рассолов [17].

Подземное растворение — способ добычи полезных ископаемых через скважины путём перевода в водный раствор одного или нескольких компонентов в недрах. Одновременно с добычей при подземном растворении осуществляются обогащение, очистка (для поваренной соли) и избирательное извлечение (для калийных солей).

В конце 19 — начале 20 вв. разработаны и освоены способы растворения каменной соли в подземных выработках и через буровые скважины с поверхности. Первый промысел в России по разработке соляных залежей через скважины построен в 1910 г. на Новокарфагенском месторождении в Донецкой области Украины [16].

В настоящее время подземному растворению подвергают каменную и калийную соли, а также бишофит и боросолевые руды. Следующие соли являются перспективными для подземного растворения: галит ( $NaCl$ ), сильвин

( $K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$ ), каинит ( $KCl \cdot MgSO_4 \cdot 3H_2O$ ), кизерит ( $MgSO_4 \cdot H_2O$ ), бишофит ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ) [17].

В Канаде (Саскачеван) с 1964 г. действует первое предприятие по добыче калийной соли методом подземного растворения.

Сущность способа подземного растворения заключается в следующем. Толщу пород пересекают скважиной, которую обсаживают колонной труб. По водоподающей колонне в скважину поступает пресная вода, которая растворяет соль. Под давлением растворяющей жидкости образовавшийся рассол поднимают на поверхность по рассолоподъёмной колонне труб.

Горнодобывающие предприятия, осуществляющие добычу соли способом подземного растворения, называются рассолопромыслами. В состав рассолопромысла входит комплекс наземных и подземных производственных объектов, обеспечивающих непрерывную добычу и подачу рассола потребителю. Схема сооружений рассолопромысла приведена на рис. 1.5.1.

Обработка залежи ведётся камерами 1 через добычные скважины 2. Подача воды в камеры и откачка рассола осуществляется насосной станцией 3 с контрольно-распределительным пунктом. Подача электроэнергии потребителям осуществляется линией электропередачи через трансформаторную подстанцию 4. На поверхности рассолопромысла располагаются завод-потребитель 5, административное здание 6, хранилище слабых рассолов 7, резервуар воды и рассола 8, насосная станция нерастворителя 9, резервуары нерастворителя 10.

Основными технологическими сооружениями рассолопромысла являются добычные скважины подземного растворения. Конструкция скважины определяется исходя из особенностей геологического строения залежи, гидрогеологических условий, физико-механических характери-

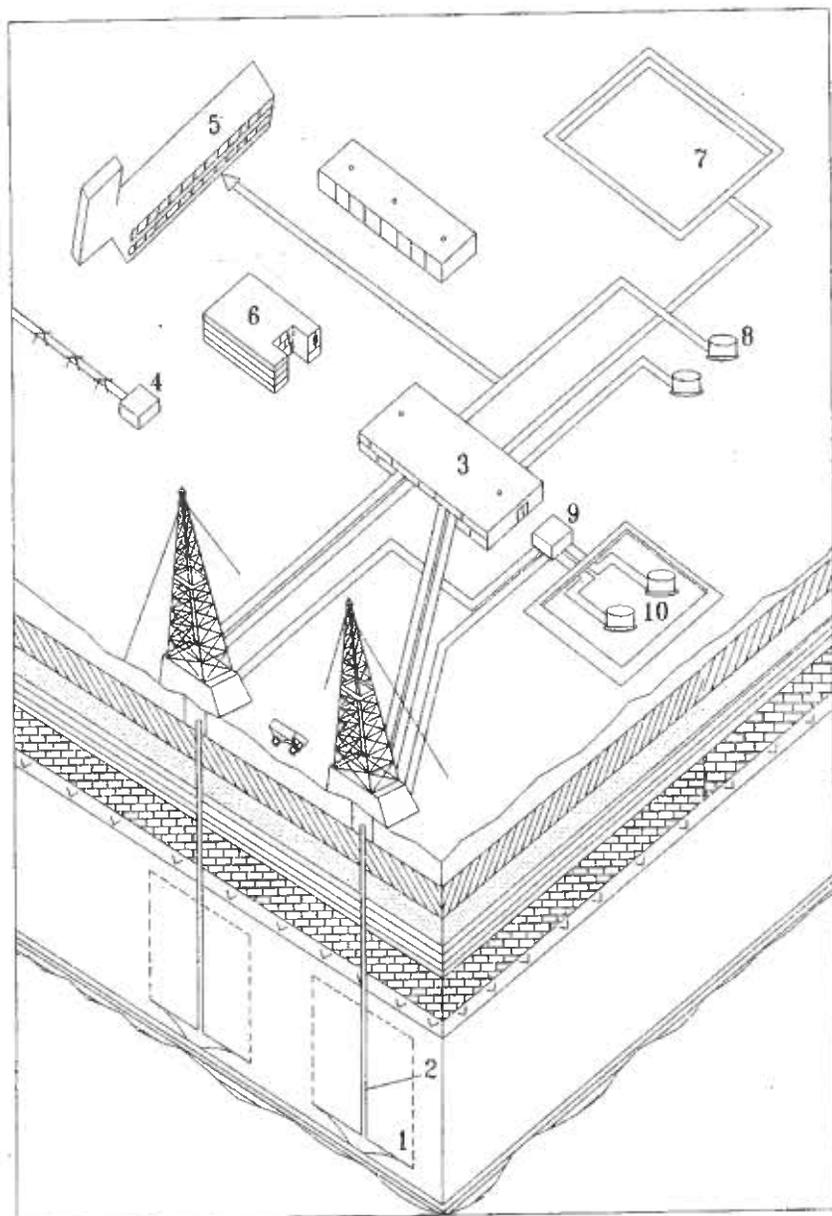


Рис 1.5.1. Схема сооружений рассолопромысла

стик пород и других условий.

Скважины подземного растворения оборудуются направляющим устройством, кондуктором, промежуточными обсадными, эксплуатационными и технологическими свободновисящими колоннами. Диаметр эксплуатационной колонны составляет до 325 мм, а диаметр технологической водоподающей — до 219 мм, рассолоподъемной — до 146 мм.

На устье скважины монтируется специальный оголовок, обеспечивающий герметизацию устья, герметичное разобщение технологических колонн и возможность их подъема и спуска.

Схемы вскрытия при подземном растворении могут быть: вертикальными, наклонными и наклонно-горизонтальными скважинами. Рассол обычно поднимают по вертикальной скважине. При использовании наклонных скважин извлечение может превышать 50 % [17].

Системы разработки могут быть: индивидуальными и взаимодействующими скважинами.

При подземном растворении солей возможны следующие способы управления процессом: прямоточные, противоточные, гидроврубные, послойного растворения.

Преимущественно используется способ, основанный на работе скважин по принципу «выдавливания рассола», когда нагнетается пресная вода, а рассол поднимается под этим давлением.

Различают схемы неуправляемого и управляемого подземного растворения. При неуправляемом подземном растворении применяется противоточный способ, когда нагнетание растворителя осуществляется по затрубному пространству, а выдавливание образующегося рассола - через центральную колонну. При управляемом подземном растворении применяется прямоточный способ, когда изменяется схема подачи агентов.

Уже к 80 -м годам XX века способы прямого управления процессом не применяются из-за низких технико-экономических показателей: извлечение запасов — до 5 %, производительность скважины — до 7-10 м<sup>3</sup>/час, непродолжительный срок эксплуатации скважин — до 5 - 7 лет [16].

К управляемым схемам подземного растворения относятся гидроврубные и послонного растворения.

Способ гидровруба был предложен в 1933 г. американским учёным Э. Трэпом, а с 1936 г. этот метод начали применять в США. Способ был усовершенствован и внедрён в отечественную практику с 1947 г. на Славянском месторождении П.А. Кулле, который использовал в качестве нерастворителя нефть и её производные или воздух.

Гидровруб — это горная выработка, создаваемая искусственным путем в нижней части соляного пласта и имеющая форму горизонтального кольца. Идея гидровруба была выдвинута Ф. Жанро в 1907 г, который обосновал возможность оседания нерастворимых и не препятствующих процессу растворения частиц на заранее подготовленное дно камеры.

Способ гидровруба применяют на Райгородском рассолопромысле в Башкирии и ряде рассолопромыслов в США, расположенных в штатах Мичиган и Техас.

Сущность способа заключается в следующем. В скважину опускают три трубы. Нерастворитель подают в пространство между третьей и второй от стенки скважины трубами, растворитель — между первой и второй, рассол поднимается по центральной трубе. После образования в рубке нерастворитель убирают и начинают процесс интенсивной отработки соляной залежи снизу вверх.

Ряд недостатков, присущих способу гидровруба, был устранён в способе послонного (ступенчатого) растворения. Принципиальная схема послонной выемки камер при под-

земном растворении солей приведена на рис.1.5.2. Сущность способа заключается в отработке соляной залежи снизу вверх отдельными горизонтальными слоями (ступенями). Высота слоя составляет 5 -15 м, а диаметр — 100 м.

Сущность способа заключается в том, что после образования гидровруба на первой ступени, водоподводящую колонну труб поднимают до отметки верхней границы второй ступени, а рассолоподъёмную — на высоту, обеспечивающую возможность получения чистых рассолов. При этом систематически подают жидкий нерастворитель.

Кровля каждого слоя изолируется слоем нерастворителя и за его уровнем ведётся систематический контроль. Это позволяет извлекать из каждого слоя заранее заданное расчётное количество соли и управлять процессом формирования камер.

В камере выделяется четыре зоны: активная, формирования рассола, консервации, закладки.

Активная зона (I) охватывает верхние 2/3 камеры, в ней происходит интенсивное движение жидкости. Зона формирования рассола (II), в которой растворитель насыщается солью, находится в верхней половине камеры и является частью активной зоны. Зона консервации (III) охватывает нижнюю 1/3 камеры и включает зону закладки (IV), расположенную в самой нижней части камеры.

Слои (ступени) на рис.1.5.2 пронумерованы арабскими цифрами 1-10. Русские буквы на этом же рисунке означают: В — вода, Р — раствор, Н — нерастворитель. Способ послонной выемки получил наибольшее распространение и в настоящее время является основным при эксплуатации рассолодобычных скважин. При этом способе извлечение составляет более 20 %, производительность скважины достигает 70-100 м<sup>3</sup>/ час и появляется возможность отрабатывать залежи соли с содержанием до 30 %

нерастворимых включений и управлять процессом формирования камер. Глубина разработки колеблется от 200-300 до 1800 м [16,17].

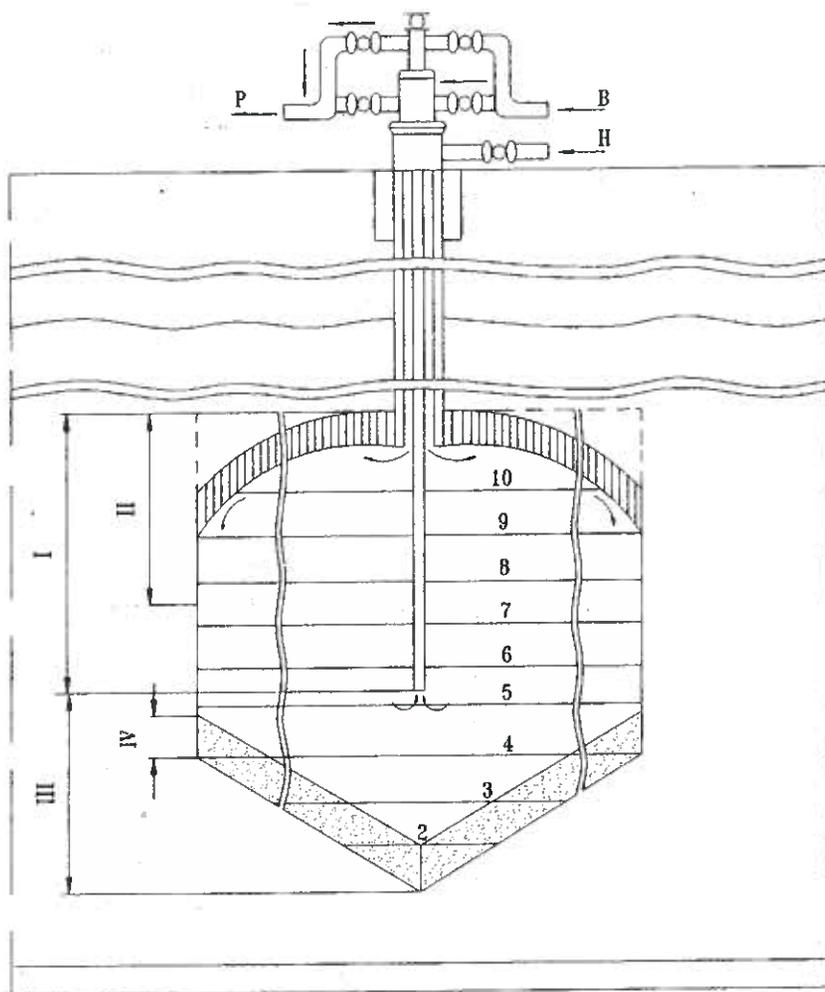


Рис.1.5.2. Принципиальная схема послойной выемки камер при подземном растворении солей: В — вода; Р — раствор; Н — нерастворитель; I — активная зона; II — зона формирования рассола; III — зона консервации; IV — зона закладки

Метод послойной выемки применяют в странах СНГ (Усольско - Сибирский, Яр-Бишкадакский, Приереванский рассолопромыслы), в Болгарии (Мировское месторождение), в Румынии (месторождения Окта-Мурем, Окнеле-Марь, Тыриу-Окиа), в США. Недостатком способа является получение растворов слабой концентрации в период размыва вруса.

Обработка камер подземного растворения осуществляется в два этапа: подготовительный и эксплуатационный.

На подготовительном этапе создаётся начальная поверхность растворения соли путём размыва горизонтальной полости небольшой высоты — гидровруба, обеспечивающей получения промышленной производительности камеры по кондиционному рассолу. Продолжительность этого периода составляет 360-540 суток. Размыв полости производят ступенями. Число ступеней и высота каждой из них определяются горно-геологическими условиями месторождения, качественной характеристикой соли и заданным временем размыва.

При зашламовании нижней части рассолозаборной колонны применяют реверсивный режим работы скважины: прямоток меняют на противоток и наоборот.

На эксплуатационном этапе осуществляется добыча полезного ископаемого. Его начинают после образования камеры заданной ёмкости и формы и выхода рассола концентрацией 305 г/л. При этом прекращают подачу воды, выпускают нерастворитель и приподнимают технологические колонны. Башмаки устанавливают на уровне кровли очередного слоя, а положение рассолоподъёмной колонны определяют высотой зоны закладки камеры нерастворимыми включениями. После этого скважину вновь заполняют нерастворителем и процесс возобновляют.

Высоту эксплуатационной ступени определяют по формуле [17]:

$$h_{cm} = \frac{V}{\pi R^2}, \text{ м,} \quad (5.1)$$

где  $V$  — объём соли в слое,  $\text{м}^2$ ;

$R$  — радиус камеры, м; обычно составляет  $R = 100-120$  м.

Производительность скважины определяется из выражения [17]:

$$q = 1,4V_k + 4S, \text{ м}^3/\text{час.}, \quad (5.2)$$

где  $V_k$  — объём камеры,  $\text{м}^3$ .

Время отработки слоя определяется по формуле [17]:

$$T = \frac{R}{\omega}, \text{ сут.}, \quad (5.3)$$

где  $\omega$  — скорость растворения боковых стенок камеры,  $\text{м/сут.}$ ; принимается  $\omega = 0,01-0,22$   $\text{м/сут.}$  [17].

В подготовительный период образуется большое количество слабых растворов концентрацией до 200 г/л. Для их утилизации или захоронения используют глубокие подземные водоносные горизонты, а также применяют для законтурного заводнения при разработке нефтяных залежей с поддержанием пластового давления.

В зависимости от порядка отработки соляных месторождений и способа управления горным давлением различают системы камерного, батарейного и сплошного растворения.

При системе камерного растворения отработка залежи ведётся камерами через индивидуальные или взаимодействующие скважины, между которыми оставляются целики, исключающие возможные деформации поверхности.

При камерной разработке залежи индивидуальными скважинами возможны три варианта размещения камер, приведённые на рис. 1.5.3.

При разработке пластов простого строения используется система с размещением камер в пределах всей разрабатываемой толщи полезного ископаемого (Рис. 1.5.3.а).

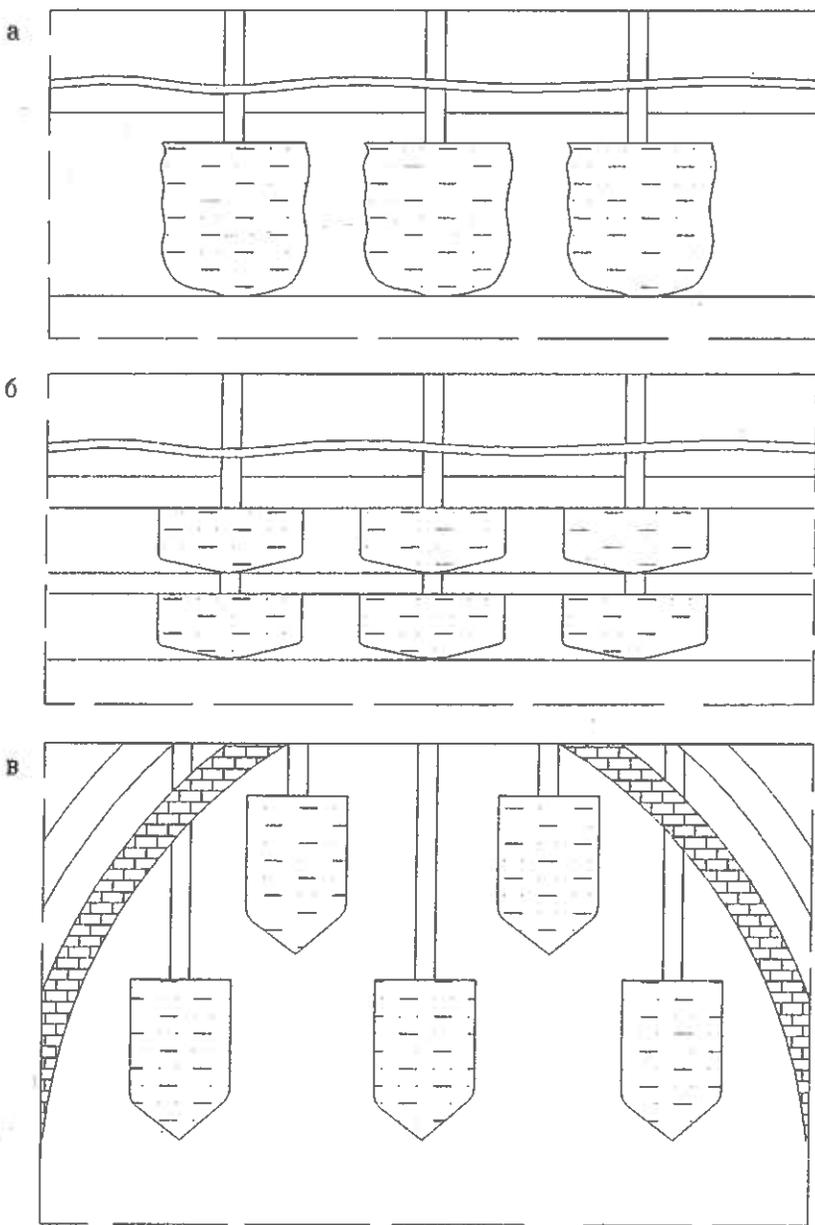
При разработке пластов сложного строения или сближенных пластов используется камерно-этажная система с соосным размещением камер в пределах мощности каждой пачки или кондиционного пласта (Рис. 1.5.3.б).

При разработке мощных соляных залежей, куполов и месторождений сложной формы залегания используются камерно-этажная система с несоосным размещением камер по мощности залежи (Рис. 1.5.3.в).

При камерной разработке залежи взаимодействующими скважинами отработка ведётся сдвоенными скважинами. При этой системе на подготовительном этапе скважины размываются индивидуально, а на эксплуатационном, после сбойки взаимодействующих скважин размывом или гидроразрывом — совместно. При этом скважины используются поочередно: то как водоподающая, то как рассолозаборная. Этот способ с 60-х годов применяется на Яр-Бишкадакском рассолопромысле, однако не нашёл широкого распространения из-за сложности поддержания уровня нерастворителя на заданной глубине.

К батарейной системе относится схема поэтапной отработки камер через взаимодействующие скважины, приведённая на рис. 1.5.4. Вначале отработка камер ведётся через индивидуальные скважины, а затем, после сбойки, новые камеры подключаются к объёмам действующих камер. Камера первого этапа 1 с помощью канала-сбойки 2 соединяется с камерой, обрабатываемой у подключенной скважины 3. Вода (В) подаётся в скважину второго этапа, а раствор (Р) отбирается из скважины первого этапа. Нерастворитель (Н) подаётся в обе скважины одновременно.

Этот способ активно внедряется в промышленность, т.к. позволяет обрабатывать запасы, оставляемые в между-



*Рис.1.5.3. Варианты размещения камер при подземном растворении солей: а) размещением в пределах всей разрабатываемой толщи; б) с соосным размещением в пределах каждой пачки залежи, в) с несоосным размещением по мощности залежи*

камерных целиках через группы взаимодействующих скважин, благодаря чему повышается извлечение полезного ископаемого. Между камер, образуемых группой скважин, всё же оставляются целики для предотвращения сдвижения поверхности.

При системе сплошного растворения участок месторождения вскрывается группой скважин, которые соединяются между собой у подошвы залежи гидроразрывом или гидроврубом для образования единого искусственного рассольного горизонта. Отработка залежи ведётся подачей воды в водоприёмные скважины, расположенные со стороны восстания пласта, и отбора рассола из рассолозаборных скважин, расположенных со стороны падения.

При отработке свиты пластов или пластов сложного строения подача воды осуществляется первоначально в нижний пласт или пачку.

Вовлечение в отработку верхних пластов происходит при естественном обрушении пропластков несолевых пород, разделяющих продуктивные пласты. Если это обрушение не происходит, проводят перфорацию обсадных колонн водоприёмных скважин.

Обычно сплошная система применяется при отработке маломощных залежей, так как при этом происходит деформация (просадка) земной поверхности. По этой причине этот способ имеет ограниченное распространение и используется только на Новокарфагенском рассолопромысле.

Для интенсификации процесса растворения используются горнотехнические и физико-химические методы. К горнотехническим методам относятся: принудительное об-

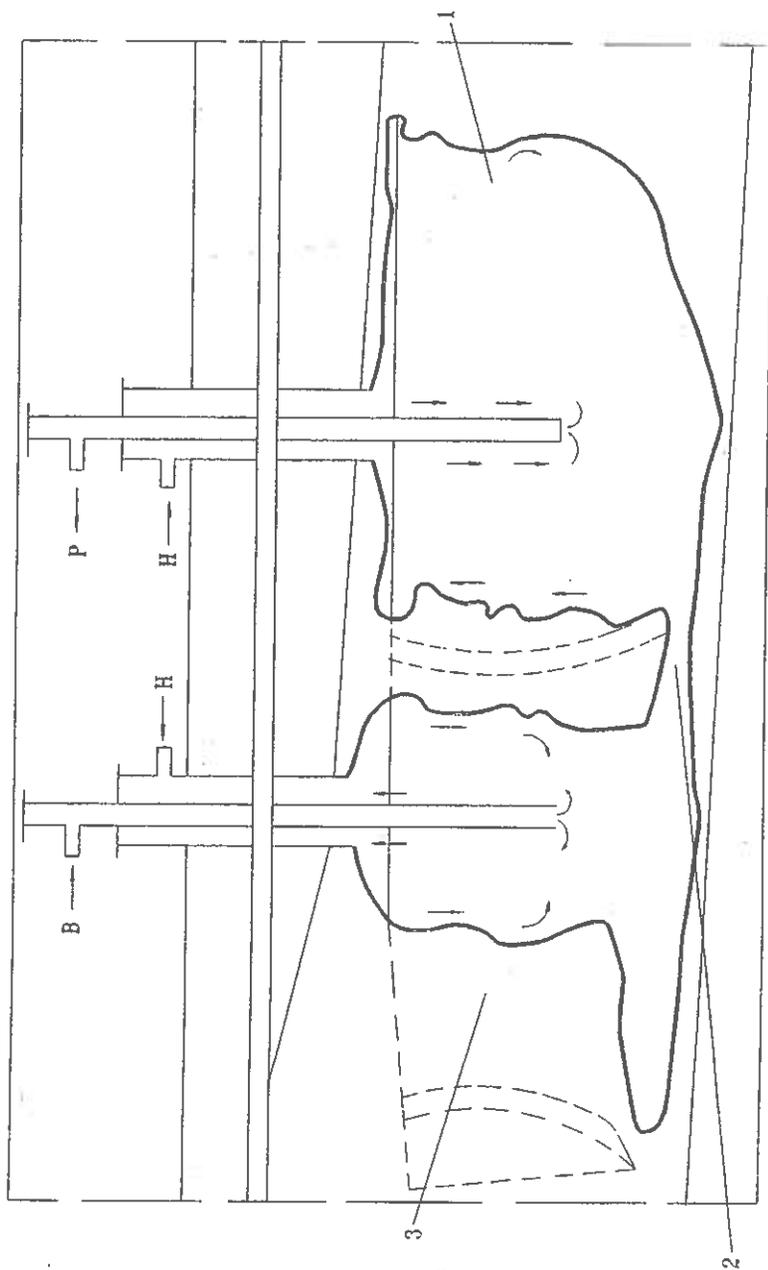


Рис. 1.5.4. Батарейная система при поэтапной отработке камер через взаимодействующие скважины: В — вода; Р — раствор; Н — нерастворитель

рушение слоёв, рыхление полезного ископаемого в массиве, гидравлический разрыв пласта и т.п. К физико-химическим методам относятся: добавка реагентов, использование новых видов рабочих агентов, воздействие физических полей, использование поверхностно- и химически активных веществ и др.

Контроль за уровнем нерастворителя в камере при подземном растворении осуществляется регулярно одним из известных методов: манометрическим, подбашмачным, радиоактивным и др.

Параметры подземных камер определяются расчётным путём и ежегодными гидролокационными съёмками.

Камеры подземного растворения отличаются высокой устойчивостью, поэтому их используют для подземного хранения нефтепродуктов и сжиженных газов, а также захоронения токсичных отходов производства.

Способ подземного растворения солей получил широкое распространение в мировой горнодобывающей промышленности. Основная часть добычи каменной соли для содовой, хлорной, пищевой и других отраслей промышленности обеспечивается именно этим способом, благодаря относительной простоте организации добычи и высоким экономическим показателям. Так, производительность труда при подземном растворении в 4 раза выше, а удельные капитальные затраты в 7 раз ниже, чем при шахтном способе добычи.

В настоящее время подземным растворением добывают около 30 млн. т каменной соли в Болгарии, Румынии, Польше, Австрии, Великобритании [17].

Особенно эффективны рассолопромыслы как сырьевые базы содовых и химических производств. По рентабельности они предпочтительнее, чем цехи по растворению привозной соли, добытой не только подземным способом, но и открытым способом в солевых озёрах. Важнейшими факторами, которые влияют на технико-экономические показатели рассолодобычи, являются следующие: горнотехнические условия; источник водоснабжения; мощность предприятия; расстояние транспортировки; численность персонала; качество рассолов.

Для условий Яр-Бишкадакского месторождения характерны следующие показатели:

- мощность пластов — 450 мм;
- глубина скважин — 1180 мм;
- мощность промысла — 16000 тыс. м<sup>3</sup>/год;
- число скважин — 48;
- расстояние транспортирования — 25 км;
- численность трудящихся — 260;
- себестоимость рассола (в ценах до 01.01.91 г.) — 0,117 руб./м<sup>3</sup>.

Метод подземного растворения применяется для разработки месторождений бишофита с целью получения хлормagneиевых рассолов, которые применяют для: приготовления буровых растворов, образования плёнки на сыпучих материалах с целью предотвращения их распыления, ускорения твердения бетона, затвердения магнезиального цемента, тушения лесных пожаров с воздуха, пропитки древесины, использования в качестве минеральной подкормки для скота, в медицине для лечения хронических заболеваний опорно-двигательного аппарата.

С 1976 г. на Светлоярском участке Волгоградского месторождения бишофита ведутся работы по добыче рассо-

ла с глубины 1761 м. Мощность пласта составляла 52 м и включала 96 % бишофита ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ). Рассол получался прямой и обратной промывкой пресной водой через скважину диаметром 114 мм с торпедированием массива. Концентрация получаемого хлормagneиевого рассола составляла 430 г/л. Вместе с бишофитом в раствор переходили все примеси в виде макро- и микроэлементов ( $MgBr$ ,  $CaSO_4$ ,  $NaCl$ ,  $KCl$ ,  $MgSO_4$ ). В качестве растворителя бишофита могут использоваться насыщенные хлорнатриевые рассолы и стоки от действующих производств.

Подземное растворение может использоваться при разработке борсолевых руд. Основным потребителем бора является атомная промышленность, так как он является хорошим поглотителем протонов. Обычно борсолевые руды находятся в галитовом растворимом водой массиве. Борные минералы легко растворяются кислотами. К борсолевым рудам относятся: лангбейнит — полигалитовая руда (галит — 49,5 %, полигалит — 3,6 %, сильвин — 5,5 %, калиборит — 4,1 %, магнезит — 0,97 %) и карналлит-кизеритовая руда (галит — 47,6 %, ангидрит — 1,7 %, полигалит — 1,9 %, кизерит — 14,1 %, сильвин — 0,45 %, борацит — 3,22 %, преображенскит — 1,9 %).

Были проведены экспериментальные работы по извлечению бора из руд, предварительно разрушенных взрывом и залитым раствором, представляющим собой насыщенный раствор хлористого натрия, подкисленный до 5 % серной кислотой. Было установлено, что в течение 15 суток содержание окиси бора  $B_2O_3$  в рудах составляло 0,12-0,2 условных единиц при высокой степени извлечения в раствор. При этом процесс выщелачивания оксида бора происходил без растворения пород, вмещающих рудное тело.

## 1.5.2

### Подземная выплавка полезных ископаемых

Как видно из табл. 0.2., основным объектом промышленного освоения способа подземной выплавки полезных ископаемых являются месторождения самородной серы. Наиболее полно этот способ описан в работе [6]. Самородную серу содержат известняковые серные руды, где она находится в виде отдельного несвязного вещества. До 70 % всего её производства приходилось на месторождения самородной серы, так как её удобнее и легче перерабатывать [6]. Однако в середине 80-х годов, в связи с необходимостью утилизации серы, содержащейся в нефти, природном газе, и получающейся при коксохимическом и металлургическом производствах, доля серы, получаемой при разработке месторождений самородной серы постоянно снижается и составляет только около 30 % [18].

В бывшем СССР добыча природной серы составляла 3,5 тыс. т из общего количества её производства 5,5 тыс. т, т.е. около 64 %.

Серу добывают различными способами, но наиболее универсальным является способ подземной выплавки, которым могут разрабатываться до 50 % промышленных запасов серных месторождений, залегающих на глубинах от 120 до 600 м и более. При этом коэффициент извлечения достигает 40 %. Основными производителями самородной серы являются Иран, Мексика, США и Чили. Из 12 млн. т серы, полученной в мире в 1986 г., только 4 млн. т добыты способом подземной выплавки.

Способ подземной выплавки серы (ПВС) (метод Фраша) начал применяться с 1894 г. в штате Луизиана в США, а был предложен в 1890 г. применительно к месторождениям Мексиканского залива. С 1912 г. уже половина мирового производства комовой серы осуществлялось этим

способом. Примерно третья часть природной серы добывалась в США, причём более половины из этого количества - по методу Фраша.

Способ подземной выплавки серы используется для разработки серных месторождений в США и Мексике (месторождения Мексиканского залива), Польше (Тарнобжегском месторождении и месторождении Башня), Ираке (Мишракское месторождение) [18].

В бывшем СССР добыча серы начинает развиваться с 30-х годов, когда были открыты месторождения в Поволжье и Туркмении. В 50-х годах открыты месторождения Предкарпатья на Украине, на базе которых были созданы Роздольское (1958 г.) и Яворовское (1970 г.) производственные объединения по добыче серы. На территории современной России из разрабатываемых находится только Водинское месторождение самородной серы в Среднем Поволжье. В бывшем СССР этот метод начал применяться с 1968 г. при разработке месторождений Предкарпатья, а также Гаурдакского месторождения.

Различают четыре геотехнологических способа получения серы из самородных руд:

- выплавка горячей водой;
- возгонка или экстракция;
- выплавка за счёт сжигания части серы;
- выплавка токами высокой частоты.

Широко применяется только подземная выплавка серы горячей водой, на которую приходится 83 % всей добычи геотехнологическими способами.

Процесс добычи основан на теплообмене между теплоносителем (горячая вода), подаваемым через скважины с поверхности, и рудным массивом. При этом используется свойство серы плавиться при температуре 112,8 - 119 °С.

Способ ПВС основан на бурении скважин с поверхности обычными буровыми станками, их обсадке трубами

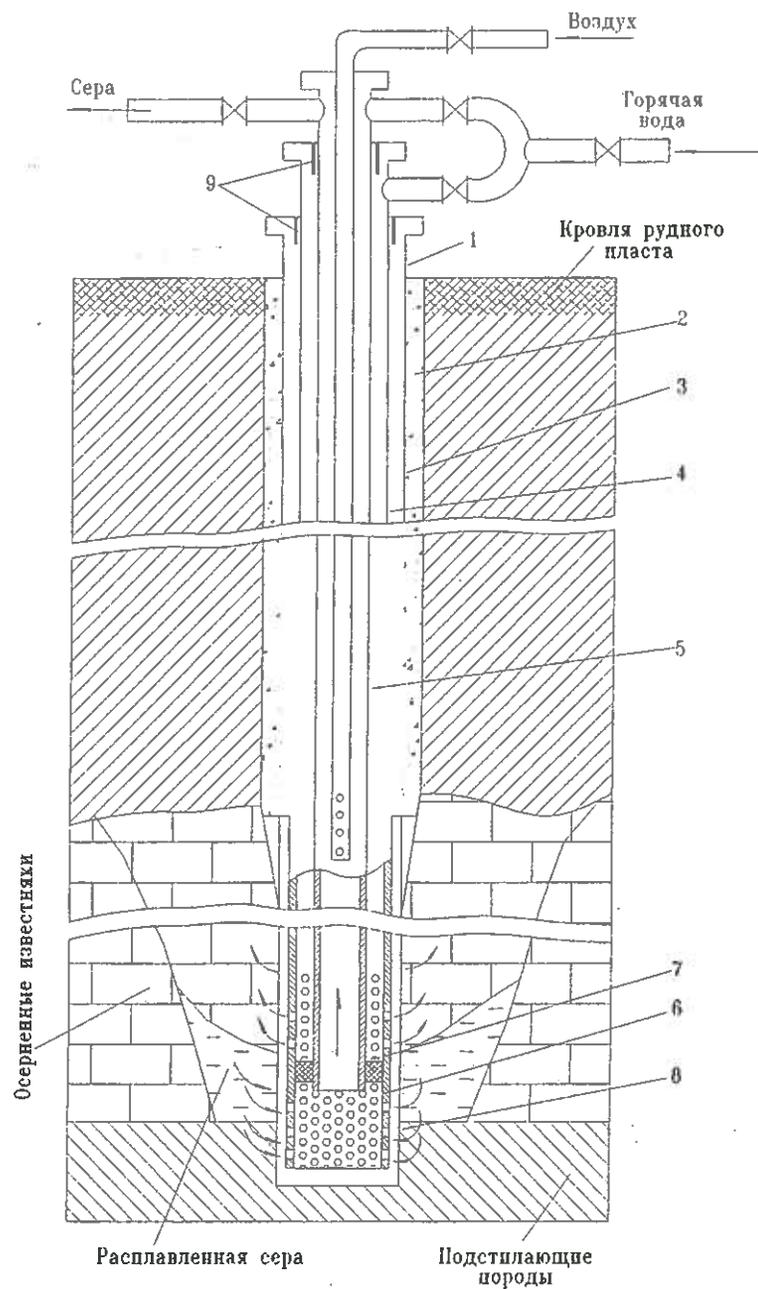


Рис. 1.5.5. Принципиальная схема добычной скважины при способе ПВС

до серосодержащей залежи и цементации скважины. Принципиальная схема добычной скважины при способе ПВС представлена на рис. 1.5.5.

Скважина пробуривается до залежи, после чего спускается обсадная колонна 1. Для обеспечения герметичности скважины осуществляется затрубная цементация 2. После этого скважина пробуривается на всю мощность залежи. В пробуренную скважину опускают три концентрически расположенные колонны труб: водоподающую 5, серную 4, воздушную 3. Диаметры колонн труб равны соответственно 6, 3, 1". Устье скважины оборудуют оголовком, обеспечивающим подачу горячей воды в зазор между шести- и трёхдюймовыми трубами. В нижней части водоподающей колонны имеется перфорация, которая с помощью разделительного пакера 6 делится на верхнюю — водяную 7 и нижнюю — серную 8. Горячая вода поступает через верхнюю перфорацию в сероносную залежь, разогревает её и расплавляет серу. Расплавленная сера, как более тяжёлая, чем вода, стекает к скважине и скапливается в нижней части скважины, проникая через нижнюю перфорацию в серную колонну. Высота подъёма расплавленной серы по скважине определяется гидростатическим давлением у почвы залежи. Воздушная колонна опущена ниже верхнего уровня серы в серной колонне. Подачей по однодюймовой трубе сжатого воздуха расплавленная сера эмульгируется и выдаётся на поверхность в промежутке между трёх- и однодюймовой трубами. Так как степень прогрева отдельных колонн различная, для компенсации температурных колебаний в устье скважины между отдельными трубопроводами установлены сальниковые компенсаторы 9.

Расплавленная сера, выходящая из скважины, направляется через отстойные резервуары (сепараторы) в

фильтры для очистки и далее на склад готовой продукции. Для предотвращения остывания серы все трубопроводы и бассейны постоянно обогреваются.

В результате непрерывной закачки горячей воды в массив, возрастает пластовое давление. Для его регулирования и управления технологическим процессом добычи серы сооружают водоотливные скважины. Очень важным является экономия теплоносителя, так как затраты на его приготовление составляют более половины общих расходов.

В процессе длительной эксплуатации добычных скважин возникают различного рода неполадки, приводящие к прекращению выдачи серы. Для их предотвращения рекомендуется периодически поворачивать колонны труб и промывать затрубное пространство и перфорацию раствором каустической соды.

Параметры технологии определяются условиями залегания рудной залежи и свойствами руды и вмещающих пород: мощность залежи, трещиноватость и пористость рудного массива, содержание серы, гидродинамический режим рудного тела, подвергаемого разработке и т.д.

Разработка начинается после обустройства месторождения или его участка добычными скважинами. Расположение скважин и порядок их включения являются основными вопросами проектирования и эксплуатации месторождения. Они определяют такие важнейшие технологические и экономические параметры как: извлечение серы, производительность скважины, время работы скважины, степень взаимного влияния скважин (интерференция), удельный расход теплоносителя, объем капитальных затрат, себестоимость и т.п.

Схема расположения скважин на месторождении зависит от геолого-гидрогеологических условий залежи и может быть линейной (скважины добычные, промежуточ-

ные, водоотливные) или блочной (добычные скважины располагаются в шахматном порядке в виде ячеек). Блок-ячейки выделяются на основе анализа геолого-гидрогеологических условий рудной залежи по разреженной сетке [19].

Экономическая эффективность способа определяется следующими параметрами:

- капитальные затраты на технологический комплекс поверхности (котельная, компрессорная, здания и сооружения);
- капитальные затраты на сооружение скважины;
- запасы, отрабатываемые на одну скважину;
- эксплуатационные расходы на добычу;
- время работы скважины;
- срок службы предприятия.

С целью повышения эффективности ПВС проводились многочисленные научно-исследовательские работы по её совершенствованию, не нашедшие, однако, широкого применения на практике. К основным из них относятся:

- использование теплоносителей большой плотности, так как от этого зависит конусность зоны плавления, что во многом определяет коэффициент извлечения серы из массива; однако использование рассолов, в т.ч. морской воды, и суспензий существенно усложняют процесс и приводят к выходу из строя оборудования из-за коррозии и кольматации каналов;
- бурение наклонных скважин, т.к. вертикальные быстро выходят из строя в результате сдвигения массива пород при его подработке, сокращая срок их службы;
- использование в качестве теплоносителя дымовых газов, получаемых в котельной на поверхности

или с помощью специальной горелки, опускаемой в скважину;

- использование для прогрева массива электролиза или погружного электронагревателя;

- использование для прогрева массива энергии взрыва, в т.ч. атомного.

Основные технико-экономические показатели способа подземной выплавки серы, полученные на предприятиях бывшего СССР следующие:

- удельный расход теплоносителя — 17-30 м<sup>3</sup> / т;

- удельный расход сжатого воздуха — 30 м<sup>3</sup> / т;

- извлечение серы из недр — 40 %.

В России практически не осталось освоенных месторождений самородной серы.

Создание собственного производства комовой серы на базе разведанных месторождений в различных регионах Российской Федерации наиболее предпочтительно на основе способа подземной выплавки, как наиболее экономичного, безопасного и экологичного.

Область применения способа подземной выплавки постоянно расширяется. Ведутся масштабные работы по освоению этим способом месторождений ртути, битумов, высоковязкой нефти и других полезных ископаемых. Совершенствование подземной выплавки осуществляется за счёт изменения температуры теплоносителя, добавления в его состав поверхностноактивных веществ и др. [19].

### 1.5.3

#### **Подземная газификация горючих полезных ископаемых**

Подземная газификация углей (ПГУ) — способ разработки угольных месторождений, основанный на физико-химических превращениях полезного ископаемого в горю-

чие газы с помощью свободного или связанного кислорода в недрах на месте залегания [20].

Идея подземной газификации угля принадлежит Д.И. Менделееву и сформулирована им в 1888 г. В дальнейшем эту идею развил английский учёный - химик У. Рамсей в 1912 г.

Начиная с 1930 г., в СССР начинают вести опытно-промышленные исследования подземной газификации угля. В начале подземные газогенераторы подготавливались подземным способом, а уголь предварительно измельчался, а затем магазинировался в специальных камерах, после чего производилась его газификация. Таким образом, под землёй практически моделировался обычный газогенератор, однако получить устойчивый процесс не удалось, так как наблюдалось сильное разубоживание горючих газов воздухом.

Производственный участок, на котором производится газификация полезного ископаемого и отвод полученного газа, называется подземным газогенератором.

В 1934 г. осуществлён на Горловской станции подземной газификации принципиально новый способ. Он заключался в том, что по пласту проводились две параллельные выработки, которые сбивались в нижней части горизонтальной выработкой. В одну выработку подавалось дутьё, а из другой отводился горючий газ. В дальнейшем вместо выработок стали бурить скважины.

Уже в конце 1933 г. советскими учёными И.Е. Коробчанским, В.А. Матвеевым, В.П. Скафой, Д.И. Филипповым было предложено проводить подземную газификацию углей в горизонтальном канале при подготовке газогенератора бесшахтным способом.

Этот метод стали называть поточным, и он приобрёл современный вид, приведённый на рис. 1.5.6.

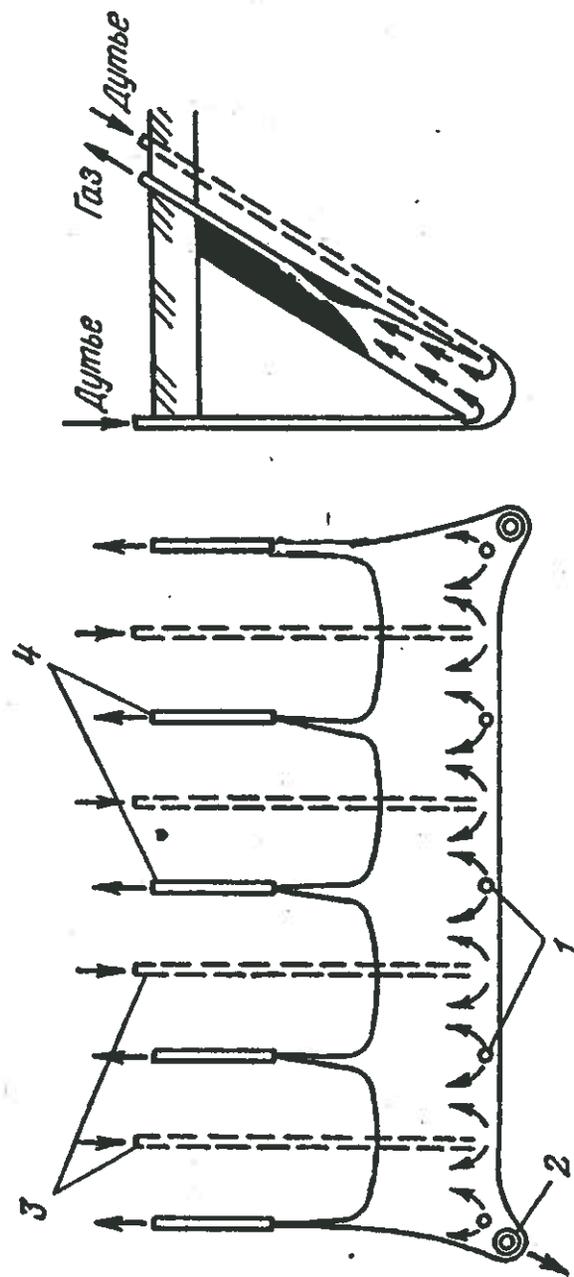


Рис. 1.5.6. Принципиальная схема подземной газификации крутых угольных пластов бесшахтным методом

В 1945-48 гг. в СССР были разработаны системы подземной газификации углей, основанные на бесшахтном методе подготовки подземных газогенераторов, заключающемся во вскрытии участка угольного пласта буровыми скважинами и создании в его целике первоначальных каналов газификации.

При разработке крутых пластов поточным методом (Рис. 1.5.6.) бурятся три вида скважин. Вертикальные дутьевые скважины 1 располагаются в ряд, ограничивая подземный газогенератор по падению пласта. Наклонные газоотводящие скважины 2 бурятся по падению пласта по середине мощности, а крайние из них ограничивают обрабатываемый участок по простиранию. Наклонные дутьевые скважины 3 бурятся в почве пласта до нижней границы обрабатываемого участка. Наклонные дутьевые скважины располагаются между наклонными газоотводящими. Дутьё в подземный газогенератор подаётся по вертикальным и наклонным дутьевым скважинам, а газы подземной газификации отводятся по наклонным газоотводящим скважинам.

В дальнейшем этот скважинный поточный метод заменил все прочие. Станции подземной газификации были сооружены во всех угледобывающих бассейнах СССР. Однако, в конце 50-х годов применение способа подземной газификации начинают свёртывать, в конце 80-х годов только две станции подземной газификации действовали на территории бывшего СССР: Южно-Абинская в Кузбассе и Ангренская в Узбекистане. Общий объём производимого газа в 1980 г. составил 1,5 млрд. м<sup>3</sup>. В настоящее время метод подземной газификации угля нигде не применяется.

Теплота сгорания и состав получаемого газа зависят от вида дутья, качества угля, а также от геологических условий залегания угольного пласта. Минимальная мощность пластов, ниже которой тепловые потери возрастают настолько, что подземная газификация становится нерента-

бельной, — 1,5-2,0 м. Низшая теоретическая теплота сгорания газа, полученного на воздушном дутье при газификации бурых углей составляет 3,3 МДж/м<sup>3</sup>, а каменных — 3,8-5,0 МДж/м<sup>3</sup>, применение дутья, обогащенного кислородом (до 65 %), увеличивает теплоту сгорания газа до 6,9 — 7,5 МДж/м<sup>3</sup>. По химическому составу получаемый при подземной газификации газ пригоден для синтеза аммиака и углеводородов.

Основными достоинствами подземной газификации угля являются: относительно небольшой объем подземных работ; отсутствие необходимости дополнительной подготовки топлива у потребителя; сохранность плодородного слоя почвы в пределах горного отвода, т.к. отсутствуют породные отвалы и др.; чистота воздушного бассейна; более низкая, при прочих равных условиях, по сравнению с традиционными способами добычи стоимость топлива.

Основными недостатками подземной газификации является: относительно невысокая теплота сжигания газа; трудность контроля распространения фронта газификации.

В начале 70-х годов возрос интерес к подземной газификации каменных углей. Наибольший интерес к методу проявляли в США, Бельгии, ФРГ. Основным объектом внедрения метода были пласты, залегающие на большой глубине, свыше 800-1000 м при этом существенно меняется само содержание процесса. Предполагается получить заменитель природного газа. При этом основной составляющей получаемого газа является метан. Для его образования в пласт подают водород, который в условиях высоких давлений соединяется с заранее активированным углеродом пласта. Несмотря на широкие научные исследования, промышленных установок подземной газификации на новых принципах пока не создано.

При скважинной подготовке подземных газогенераторов наиболее сложной технической задачей является создание каналов в угольном пласте между двумя скважинами.

Наиболее распространен фильтрационный метод сбойки скважин. Сущность его заключается в перемещении очага горения навстречу дутьевому потоку (противоточная сбойка) или по потоку (прямоточная).

Скважины обсаживают до пласта и цементируют затрубное пространство. В скважины подают дутье и отжимают влагу из пласта. Затем в одной скважине, называемой розжиговой, создают очаг горения, поддерживаемый за счет кислородного дутья. Периодически розжиговую скважину очищают от продуктов горения. Завершающий этап сбойки характеризуется резким падением давления, бурным выделением газов и повышением их качества. Более часто применяется противоточная сбойка.

Более прогрессивным методом сбойки является гидроразрыв пласта с последующей огневой проработкой. Эксплуатационные затраты по этому методу в 3-4 раза ниже, чем при воздушно-фильтрационной сбойке.

Существует сбойка направленным бурением скважин. Этот метод чаще применяется при разработке крутых пластов, когда каналы газификации располагаются по падению пласта. Обычно после бурения канала проводят его огневую проработку.

Более совершенным в техническом отношении является метод электросбойки. Опущенные в скважину электроды при включении их в электрическую цепь приводят к сухой перегонке угля с образованием кокса. Уголь становится хорошим проводником, обеспечивающим тепловой пробой пласта. Важное качество способа — высокая направленность сбойки.

Различают наземную и подземную части газогенераторов. К наземной части относятся: головки дутьевых и га-

зоотводящих скважин, трубопроводы для подвода дутья к скважинам, газопроводы, аппараты для очистки и охлаждения газа, приборы для контроля и управления.

Подземная часть газогенераторов включает: дутьевые и газоотводящие скважины, каналы газификации, а также водоотливные, дренажные и наблюдательные скважины.

Различают две схемы подземных газогенераторов: с изолированными каналами; с каналами, объединёнными посредством единого канала розжига.

Диаметр дутьевых скважин должен быть не менее 250-300 мм, а газоотводящих — 350-400 мм. На крутых и наклонных пластах расстояние между каналами газификации составляет 50-60 м. На пологих пластах расстояние между скважинами в ряду колеблется от 25 до 60 м.

Система выгазования включает определённый порядок проведения подготовительных и огневых работ во времени и пространстве. Подготовительные работы включают: бурение скважин, подготовку каналов газификации, обеспечение водоотлива. Под огневыми работами подразумевается собственно процесс газификации угля.

В основном газы подземной газификации используются как низкокалорийное топливо после очистки, охлаждения и сушки.

Однако, в последнее время всё шире отмечалось использование газов ПГУ для производства химического сырья (Рис. 1.5.7.).

Выделение сероводорода осуществляют с помощью поглотителя растворов этанол-аминов, а из него получают элементарную серу по методу Клауса.

Для синтеза аммиака производится каталитическое превращение окиси углерода в двуокись углерода и водород.

В ходе выполненных работ по подземной газификации были освоены в промышленных масштабах:

1) бесшахтная газификация буроугольных пластов мощностью от 2 до 22 м и глубиной залегания от 30 до 250 м, каменноугольных пластов мощностью от 0,6 до 10 м на глубинах от 40-50 до 400 м с соблюдением безопасных границ работы вблизи действующих шахт и угольных разрезов;

2) устойчивое получение с применением воздушного дутья энергетического газа при подземной газификации бурых углей с теплотой сгорания 3,55 МДж/м<sup>3</sup> и каменных 3,35 - 4,19 МДж/м<sup>3</sup> при выходе газа с 1 кг угля для бурых углей 2-3 м<sup>3</sup>, а для каменных — 4-5 м<sup>3</sup> [21].

В результате проведённых научно-исследовательских работ:

- разработаны и внедрены способы подготовки для газификации исходных каналов в угольном пласте;
- выявлены основные черты динамики газообразования, установлены основные закономерности этого процесса и связи этих закономерностей с горно- и гидрогеологическими условиями;
- разработаны и внедрены схемы газификации для месторождений бурых и каменных углей;
- установлено влияние ряда технологических, горно- и гидрогеологических факторов на процесс ПГУ;
- разработана технология бурения скважин для ПГУ;
- разработаны нормативы потерь угля при газификации крутопадающих пластов;
- разработаны временные критерии на подбор угольных месторождений для ПГУ и т.д.

Для получения газа ПГУ высокого качества при поточном методе необходимо:

- обеспечивать снижение потерь тепловой энергии из угольного канала в окружающую среду;

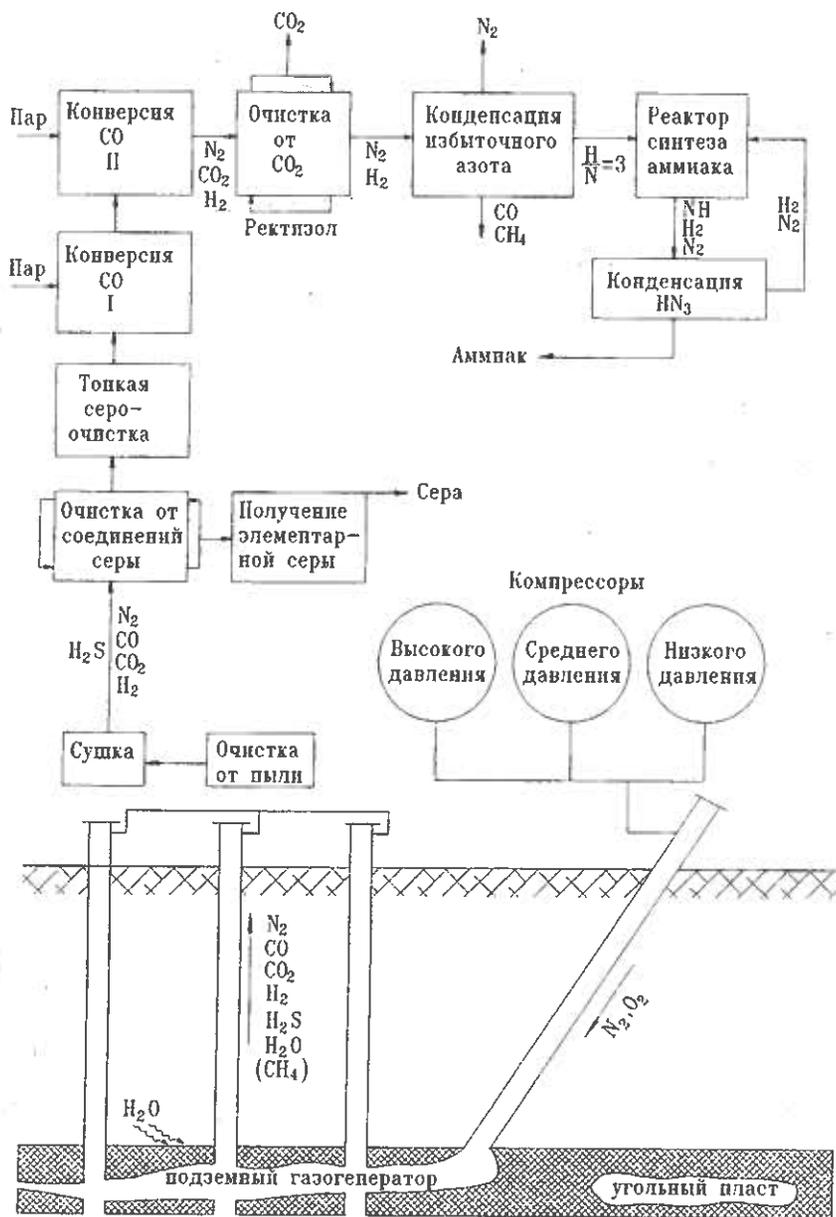


Рис.1.5.7. Схема использования газов ПГУ для производства химического сырья

- увязывать продольные размеры подземного газогенератора с количеством подаваемого в него воздуха;
- поддерживать соотношения между продольными размерами зон обмена энергией в угольном канале и длиной этого канала на оптимальном уровне;
- свести к минимуму внешний водоприток в подземный газогенератор [22].

Задача сохранения российского приоритета в области подземной газификации угля и конкурентоспособности отечественной технологии на мировом топливном рынке требует значительного расширения и интенсификации работ в этой области.

#### 1.5.4 Подземное сжигание полезных ископаемых

Идея подземного сжигания угля (ПСУ) с целью использования тепла в хозяйственных целях известна с древних времён. После создания технологии подземной газификации угля и получения положительных результатов её промышленной эксплуатации к этой идее вернулись снова, уже на новом технологическом уровне. В 1956 г. при проведении конкурса на научную и проектную разработку предложений по подземной газификации углей было подано несколько предложений по подземному сжиганию, которые, однако, не приняли к участию в конкурсе [23].

В дальнейшем были выполнены исследования по использованию физического тепла газов, получаемых при подземной газификации углей. Температура отходящих газов при подземной газификации углей составляет 400-600 °С. В котле-утилизаторе пар вырабатывается за счёт охлаждения до 150 °С. При этом химический к.п.д. с учётом использования физического тепла отходящих газов может быть увеличен с 50 до 62,5 % [24]. Однако до реализации этой идеи в промышленных масштабах дело так и не дошло.

Только после длительного перерыва, в 80-х годах, к идее использования тепла газов подземного сжигания угля вернулись вновь. Решая задачу комплексного использования энергоресурсов угольного месторождения, академиком В.В. Ржевским была предложена идея многостадийной отработки шахтных полей, которая заключается в последовательном чередовании стадий: добыча метана, частичное извлечение угля, подземное сжигание или газификация оставшихся в недрах запасов с утилизацией выделяющегося при этом тепла [25].

Постановлением Государственного комитета СССР по науке и технике «О развитии научно-исследовательских и опытных работ в области подземной газификации угля» от 3.10.83 г. №559 предусматривалось развернуть в Московском горном институте научно-исследовательские и экспериментальные работы по проблеме «Углегаз». В развитие этого Постановления было намечено организовать экспериментальные участки в различных угледобывающих бассейнах страны для испытания этой технологии в широкой гамме горно-геологических условий.

Были отработаны два экспериментальных участка технологии ПСУ «Углегаз». В отличие от ПГУ при ПСУ используется всасывающая схема подачи дутья, что существенно расширяет область применения данной технологии. Ей могут обрабатываться участки, подработанные ранее горными работами, а также участки, расположенные вблизи с действующими шахтами.

Именно на таких участках и функционировали две экспериментальные установки ПСУ: на шахте №1 «Острый» ш/у «Кураховское» п.о. Селидовуголь [26]. И на участке шахты «Киреевская» п.о. Тулауголь [27]. В ходе испытаний отрабатывались параметры технологии, способы розжига, сбойки, управления очагом горения, системы очистки дымовых газов. Была доказана принципиальная возможность осуществления данной технологии в промышленных условиях, в первую очередь, для целей местного теплоснабжения.

На шахте №1 «Острый» были сожжены два блока. При сжигании первого блока он вскрывался двумя воздухоподающими и двумя воздухоотводящими скважинами. Диаметр скважины составлял 550 мм, а диаметр обсадных труб — 425 мм. Депрессия воздушной сети составляла 0,7-3,6 кПа. Максимальная температура горения достигала 800-1000 °С. На сжигание 1 м<sup>3</sup> углеродного вещества требуется 8-10 м<sup>3</sup> воздуха. Скорость перемещения зоны горения составляла 1м/сут., а максимальная — 5-5,3 м/сут., при расходе воздуха 1,3-1,7 м<sup>3</sup>/с. Потери тепла на нагрев пород составляли 37 %, а на испарение влаги — 20 %. Коэффициент получения физического тепла достигал 14 %. Состав газов, получающихся при подземном сжигании: O<sub>2</sub> — 4-13 %; CO<sub>2</sub>

— 5,3-11,2 %;  $CO$  — 0,2-2,3 %;  $H_2$  — 0,2-3,2 %;  $CH_4$  — 0-0,7 %;  $SO_2$  — 0,004-0,2 %;  $H_2S_3$  — 0,02-0,7 %. Остановка дымососов при сжигании запасов блока показала возможность работы за счёт тепловой депрессии без расхода электроэнергии [26].

Аналогичные результаты были получены и на шахте «Киреевская», где на первом этапе был сожжён блок площадью  $970 \text{ м}^2$  [27].

Тем не менее, ряд технических вопросов не нашёл технического решения. Важнейшим из них является опасность загрязнения подземных водоносных горизонтов фенолами, образующимися при низкотемпературном горении угля в пласте. Единственный метод, позволяющий хотя бы как-то решить эту проблему — промывка выгазованного пространства с последующей биологической очисткой откачиваемой воды. Однако этот процесс протекает очень медленно, и постоянно будет ограничивать мощность станции ПСУ.

В ряде работ предлагается кардинально решить эту проблему переходом на высокотемпературное сжигание, при котором фенолы сами сгорают в пласте, а дутьё осуществляется обогащённым кислородом воздухом.

Второй трудноразрешимой проблемой является управление очагом горения. Как показал опыт эксплуатации подземных газогенераторов, огневой забой не перемещается последовательно, чаще всего в массиве прогорают каналы в местах с повышенной проницаемостью. В предложении учёных Московского государственного горного университета для управления очагом горения предлагается организовать завесу из газов, не поддерживающих горение, на

участке массива между подводящей и отводящей выработкой огневого забоя. Принципиальная схема способа представлена на рис.1.5.8 [28]. В качестве газов, не поддерживающих горение, может использоваться азот, углекислый газ, дымовые газы.

Третьей трудноразрешимой проблемой является последовательное включение в работу новых участков угольного пласта. При шахтном способе подготовки пластов к подземному сжиганию возможно использование как пластовых, так и полевых выработок. При пластовой и полевой подготовке свежая струя подаётся в режиме фильтрации по контуру выработанное пространство — целик, а отводится, соответственно по поддерживаемой пластовой или полевой выработке. При этом необходимо при полевой подготовке обеспечивать периодическую сбойку полевой выработки с пластом.

Известно предложение, где включение новых участков в работу осуществляется автоматически путем выплавления предварительно заложенных легкоплавкими материалами каналов по мере приближения очага горения [29].

В концептуальном плане для организации подземного сжигания необходимо решить вопрос о том, будут отводиться газы через стационарную одну выработку блока, или через большое количество скважин большого диаметра. Очевидно, что второй способ вызывает противоречие в стремлении обеспечить экологическую чистоту производства и может рекомендоваться только для отдельных изолированных участков.

По ряду причин объективного и субъективного характера к 90-м годам все работы по подземному сжиганию углей были прекращены, хотя в ходе крупномасштабных научно-исследовательских работ были получены обнадеживающие результаты.

Основы метода подземного сжигания угля изложены в ряде публикаций учёных Московского государственного горного университета [30-33].

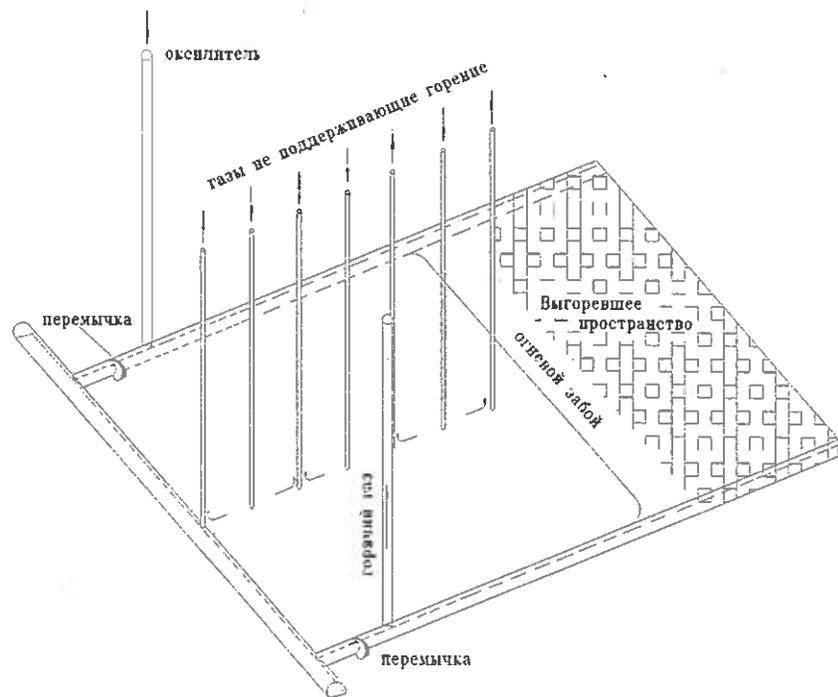


Рис. 1.5.8. Принципиальная схема управления процессом подземного горения угля с помощью завесы газов, не поддерживающих горение

## 1.5.5

### Подземное выщелачивание полезных ископаемых

Наиболее широко подземное выщелачивание применяется при добыче урана. В первую очередь это относится к месторождениям гидрогенного генезиса, представленным бедными или убогими рудами, а также месторождениям, залегающим в сложных горно-геологических и гидрогеологических условиях [5].

Метод подземного выщелачивания (ПВ) начал разрабатываться с 1962 г. Подземное выщелачивание - геотехнологический способ добычи урана путём избирательного его растворения химическими реагентами из руд на месте их залегания и последующего извлечения из урансодержащих растворов

На некоторых месторождениях построены предприятия и ведётся добыча урана способом подземного выщелачивания. На ряде месторождений проведены опытно-промышленные работы по добыче урана этим способом. На некоторых предприятиях ПВ стало основным методом добычи урана. Несомненно, что число таких предприятий будет увеличиваться с увеличением добычи урана.

Основными преимуществами способа ПВ перед традиционными открытой и подземной разработкой являются:

- 1) вовлечение в разработку бедных, убогих и забалансовых руд, а также месторождений, характеризующихся сложными условиями залегания и имеющих крупные запасы урана по вполне приемлемой стоимости единицы конечной продукции, что значительно расширяет сырьевую базу;
- 2) снижение в 2-4 раза капитальных вложений на строительство предприятий и, следовательно, сокращение сроков строительства;
- 3) повышение в 2-4 раза производительности труда

по конечной продукции и соответствующее сокращение численности работающих;

4) значительное улучшение условий труда на предприятиях, добывающих уран;

5) уменьшение отрицательного воздействия на окружающую среду, особенно на поверхность земли и воздушный бассейн.

Обзор способов подземного выщелачивания при добыче полезных ископаемых изложен в ряде публикаций [2,5,9-12].

Разработка месторождения способом подземного выщелачивания возможна при следующих основных условиях:

- подлежащий извлечению металл присутствует в рудах в форме минералов, легко разрушающихся слабыми водными растворами выщелачивающего реагента;

- входящие в состав руд породобразующие материалы имеют низкую кислотоёмкость в условиях взаимодействия с технологическими растворами;

- руды либо обладают естественной проницаемостью, либо становятся растворопроницаемыми после искусственного раздробления;

- условия залегания руд и горнотехническая обстановка в районе месторождения могут быть рационально использованы для осуществления всех процессов геотехнологии.

Хорошая растворимость в подземных водах минералов, содержащих уран, отмечена ещё В. И. Вернадским. Среди урановых минералов в месторождениях, обрабатываемых способом ПВ, следует отметить: окислы урана — настуран и уранинит; силикаты урана — коффинит и ненадкевит. Главнейшим из них является настуран.

Всё многообразие урановых месторождений класси-

фицируется по технологическим группам, типам и подтипам, как это приведено в табл. 1.5.1. [5].

При ПВ необходимо соблюдать баланс откачиваемых и закачиваемых растворов, т.е. суммарные расходы откачных и закачных скважин должны быть одинаковы ( $\sum Q_{отк} = \sum Q_{зак}$ ). При  $\sum Q_{отк} > \sum Q_{зак}$  продуктивные растворы разубоживаются за счёт привлечения пластовых вод из безрудной части месторождения.

При  $\sum Q_{отк} < \sum Q_{зак}$  происходит утечка закачиваемого в пласт технологического раствора за пределы рудной залежи. Несоблюдение баланса, как следует из сказанного, недопустимо.

Система разработки месторождения (или его части) способом ПВ -совокупность вскрывающих, подготовительных выработок и определенный порядок их проведения и эксплуатации, увязанный во времени и пространстве с управляемым химико-технологическим процессом перевода металла из руды в раствор.

Системы ПВ различаются между собой по большому числу признаков, но важнейшими из них являются: принципиальные схемы вскрытия месторождений, способы подготовки рудных залежей к выщелачиванию (с естественной или искусственной проницаемостью), а также схемы движения растворов.

Схемы вскрытия ПВ можно подразделить на скважинные с поверхности, шахтные и комбинированные. Шахтные схемы вскрытия предусматривают проведение подземных горных выработок с поверхности (вертикальные и наклонные стволы, штольни). При комбинированных схемах вскрытия используются как подземные горные выработки, так и скважины, пробуренные с поверхности. Очевидно, что последние два вида схем вскрытия не вполне соответствуют определению геотехнологических способов

**Классификация урановых месторождений, обрабатываемых  
способом подземного выщелачивания**

Технологическая группа (по проницаемости руд для растворов).	Технологический тип (по условиям образования скважности и составу рудомещающих пород).	Технологический подтип (по форме рудных тел).
1	2	3
1. Месторождения с естественной проницаемостью: рудные тела проницаемы для растворов ( $K_{\phi} > 0,1$ м/сут.)	1. Месторождения с поровой проницаемостью рудных залежей в песках.	1. Месторождения с выдержанными простыми пластообразными залежами.
		2. Месторождения с выдержанными тектонически осложненными пластообразными залежами.
		3. Месторождения с разобъединенными небольшими пластообразными и линзообразными рудными залежами.
	2. Месторождения с порово-трещинной проницаемостью рудных залежей в песчаниках и алевролитах.	1. Месторождения с выдержанными тектонически осложненными пластообразными рудными залежами.
		3. Месторождения с трещинной проницаемостью рудных тел и кристаллических пород в пределах пор выветривания.
	3. Месторождения с трещинной проницаемостью рудных тел и кристаллических пород в пределах пор выветривания.	1. Месторождения с неправильными по форме, преимущественно штокерковыми рудными телами.

1	2	3
2. Месторождения с искусственно создаваемой проницаемостью: рудные тела практически непроницаемы для растворов, но сохраняющие проницаемость, создаваемую искусственно ( $K_{\phi} \leq 0,1$ м/сут.).	1. Месторождения с низкой порово-трещинной проницаемостью рудных залежей в алевролитах.	1. Месторождения с пластообразными рудными залежами.
	2. Месторождения с низкой порово-трещинной проницаемостью рудных тел в кристаллических породах.	1. Месторождения с штокерковыми рудными телами.  2. Месторождения с пластообразными рудными телами.

и в дальнейшем не рассматриваются. Процесс подготовки месторождений к обработке способом ПВ через скважины, пробуренные с поверхности, включает кроме бурения и обвязки скважин поверхностными коммуникациями, оснащение узлов рабочим (технологическим и контрольно-измерительным) оборудованием и приборами. Подготовка рудных залежей к выщелачиванию включает также первую стадию закисления эксплуатационного блока, создание временных гидрозавес для ограничения движения или направления растворов и в ряде случаев расчленение рудомещающих пород гидроразрывом.

По условиям движения растворов выделяются фильтрационная, инфильтрационная и пульсационно-статическая схемы. Фильтрационная схема основана на использова-

нии постоянного или периодически действующего потока растворов реагента, заполняющего все трещины и поры рудоносного массива за счёт разности напоров у закачных и откачных скважин (устройств). Инфильтрационная схема основана на использовании инфильтрационного потока раствора реагента, движение которого по рудному телу (отбитой или замагазинированной руде) происходит под действием сил гравитации от оросительных устройств к дренажным. Пульсационно-статическая схема заключается в периодическом затоплении (заполнении) выщелачивающим реагентом участков рудных тел в естественном залегании, отработанных пространств рудников или специально подготовленных камер с замагазинированной рудой с последующим отбором продуктивных растворов (иногда этот способ называют иммерсионным).

Бесшахтные (скважинные) системы подземного выщелачивания металла из руд с естественной проницаемостью делятся на три группы: с площадным (ячейковым) расположением скважин и фильтрационным режимом; с линейным расположением технологических скважин и фильтрационным режимом; с противофильтрационными завесами, с различным расположением и режимами выщелачивания.

Схема расположения скважин зависит от морфологических особенностей рудной залежи и гидрогеологических условий продуктивного горизонта. Наиболее распространённые варианты расположения рабочих скважин приведены на рис. 1.5.9.

Основными структурными единицами скважинной системы разработки способом ПВ являются: элементарный ряд (ячейка), эксплуатационный блок, эксплуатационный участок, эксплуатационное поле.

Элементарной ячейкой принято называть часть продуктивной толщи, запасы которой обрабатываются одной откач-

ной скважиной. Ячейка пространственно ограничивается контурами, которые в максимальной степени должны быть приближены к различным гидродинамическим границам (водоупорам, контурам закачных скважин, нейтральным и краевым линиям тока), с тем, чтобы ячейка функционировала по возможности в гидродинамически замкнутом режиме.

Эксплуатационный блок — часть продуктивной толщи, включающая группу смежных элементарных ячеек, характеризующихся по возможности однородными распределением запасов, геохимическим строением и вещественным составом руд и рудовмещающих пород, одновременно вводимых в эксплуатацию и обрабатываемых в едином геотехнологическом режиме.

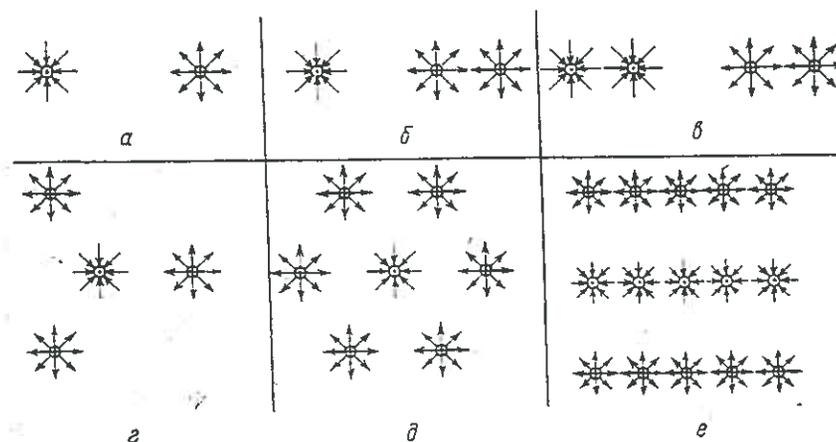


Рис. 1.5.9. Наиболее распространённые варианты расположения рабочих скважин: а — две разнозначные скважины; б — одна откачная и две закачные скважины; в — две откачные и две закачные скважины; г — три закачные и одна откачная скважины; д — шесть закачных и одна откачная скважины; е — два ряда закачных и один ряд откачных скважин.

Эксплуатационный участок — группа смежных эксплуатационных блоков, имеющая самостоятельную систему коммуникаций и установки контроля и управления геотехнологическим режимом процесса ПВ.

Эксплуатационное поле — объединённые в единое целое несколько эксплуатационных участков, привязанных обычно к единой технологической установке (перерабатывающему комплексу).

Отработка запасов в эксплуатационном блоке ПВ осуществляется в три этапа:

- 1) вскрытие запасов, т.е. бурение и освоение скважин, обвязка их технологическими коммуникациями и оснащение контрольно-измерительной аппаратурой;
- 2) ведение технологического процесса в недрах, т.е. транспортирование к рудным залежам рабочих растворов, технологическая подготовка руд к выщелачиванию, формирование продуктивных растворов, транспортировка их к откачным скважинам и подъём на поверхность;
- 3) ликвидация отработанных блоков, т.е. восстановление первоначального состояния рудовмещающего водоносного горизонта в пределах блока и поверхности земли.

Сам технологический этап обработки запасов урана способом ПВ также делится на три стадии:

- 1) закисление рудной залежи, т.е. подготовка рудовмещающего водоносного горизонта к формированию и движению в нём потока продуктивных растворов;
- 2) активное выщелачивание урана, т.е. формирование и извлечение из блока кондиционных продуктивных растворов;
- 3) довыщелачивание («отмывка») урана, т.е. по су-

ществу вытеснение остаточных (после прекращения активной стадии выщелачивания) урансодержащих кондиционных растворов пластовыми водами или бедными (маточными) растворами.

Для каждой стадии характерна определённая кислотность рабочего раствора, которая зависит, в первую очередь, от карбонатности рудовмещающих отложений. Так, при карбонатности до 1 % по  $\text{CO}_2$  принят следующий режим кислотности: на стадии закисления — 20-30 г/л, на стадии активного выщелачивания — 10 г/л, на стадии «отмывки» — маточный раствор.

Являясь главным звеном технологической и информационной цепи, буровая скважина выполняет следующие функции: геологическая разведка, вскрытие и подготовка запасов, отработка запасов, управление движением технологических растворов в продуктивной толще путём создания в эксплуатационном блоке гидродинамической обстановки, в максимальной степени способствующей течению процессов ПВ, контроль количества и качества откачиваемых и закачиваемых растворов, создание противодиффузионных завес, контроль гидродинамических и физико-химических параметров процесса, контроль полноты извлечения урана из руд, охрана окружающей среды от возможного физико-химического загрязнения.

Скважины разделяются по назначению на технологические, барражные, наблюдательные, контрольные и разведочные.

Технологические скважины предназначены для подачи в недра рабочих растворов — закачные (нагнетательные) и подъёма технологических растворов на поверхность — откачные (разгрузочные). Через эти скважины осуществляют также регулирование гидродинамического режима в продуктивной толще.

Барражные скважины предназначаются для создания

вертикальных и горизонтальных противofильтрационных завес, ограничивающих растекание выщелачивающих растворов за пределы эксплуатационного блока, а также для уменьшения охвата этими растворами пород, вмещающих рудную залежь.

Наблюдательные скважины предназначаются для наблюдения и контроля за условиями формирования растворов в пределах эксплуатационного блока, гидродинамическим состоянием продуктивного водоносного горизонта, растеканием технологических растворов за пределы эксплуатационных участков и их возможным перетеканием в над- и подрудный водоносные горизонты.

Контрольные скважины бурятся на отработанных участках для контроля полноты извлечения полезного компонента из недр, а также для решения других задач (контроль изменений в недрах, состояния загрязнения и т.п.).

Разведочные скважины бурятся на всех стадиях геологоразведочных работ — от поисковых до эксплуатационно-разведочных.

Технологические, барражные и наблюдательные скважины относятся к категории эксплуатационных, а все остальные — вспомогательных.

В зависимости от схемы движения растворов и схемы расположения технологических скважин различают три группы расположения скважин: с площадным (ячейстым), линейным и комбинированным.

Площадные (ячейстые) системы расположения скважин обычно используются при разработке горизонтальных или слабо наклонных залежей осадочного происхождения. Площадная система размещения скважин с гексагональными и треугольными ячейками приведена на рис. 1.5.10. Межскважинное расстояние обычно небольшое — 8-20 м. Площадные системы используются довольно редко.

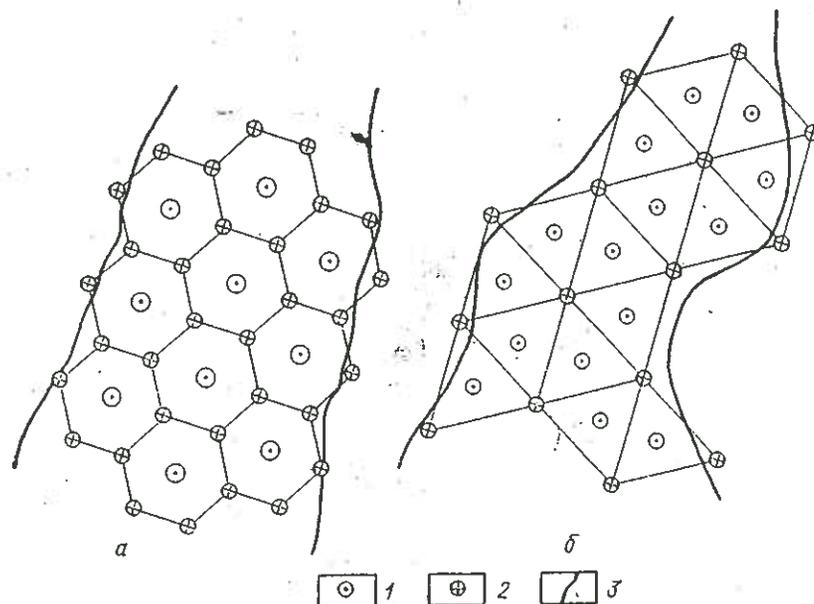


Рис. 1.5.10. Площадные (ячейстые) системы расположения скважин: а) с гексагональными ячейками; б) с треугольными ячейками; 1. Скважины откачные; 2. Скважины закачные; 3. Контур рудной залежи

Линейные системы расположения скважин состоят из последовательно чередующихся рядов откачных и закачных скважин. Наиболее часто встречающиеся варианты линейной системы расположения скважин приведены на рис. 1.5.11. Расстояния между рядами скважин и скважинами в ряду колеблются в широких пределах от 15 до 50 м и более. Добычная ячейка обычно состоит из двух закачных и одной откачной скважины, принадлежащих к трём последовательно расположенным рядам. Линейные системы весьма широко применяются на практике при разработке месторождений любого типа.

Наиболее благоприятной считается линейная система с шахматным расположением скважин при соотношении расстояний между скважинами в ряду и между рядами 1:2.

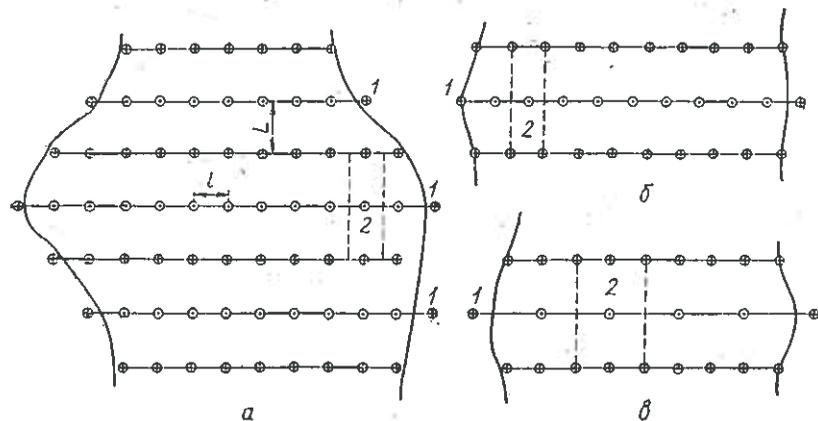


Рис. 1.5.11. Линейные системы расположения скважин: а) прямоугольная; б) шахматная, в) с отношением числа откачных скважин к числу закачных — 1/2, 1/5 и т.д

Комбинированные системы включают элементы площадной и линейной систем, к ним относятся также системы с использованием противодиффузионных горизонтальных и вертикальных завес для ограничения растекания выщелачивающего реагента в горизонтальном и вертикальном направлениях. Для уменьшения утечки рабочего раствора на некотором расстоянии от рудного тела вверх и вниз по току подземных вод разбуривается по два ряда скважин. Схема разработки месторождения с завесами приведена на рис.1.5.12. Внешние ряды скважин (№1 - №5) служат для создания механического барьера. Для этого в эти ряды скважин нагнетается твердеющий материал (цемент, синтетические смолы и др.). Нагнетанием в скважины

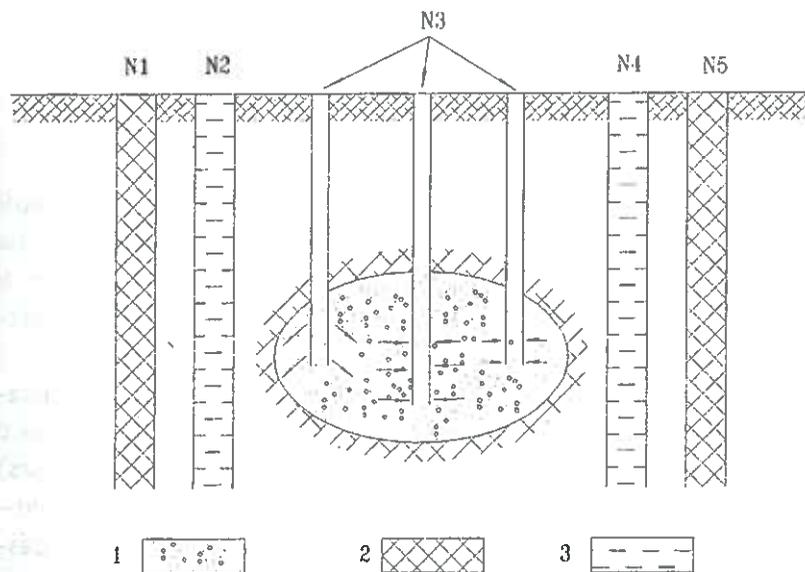
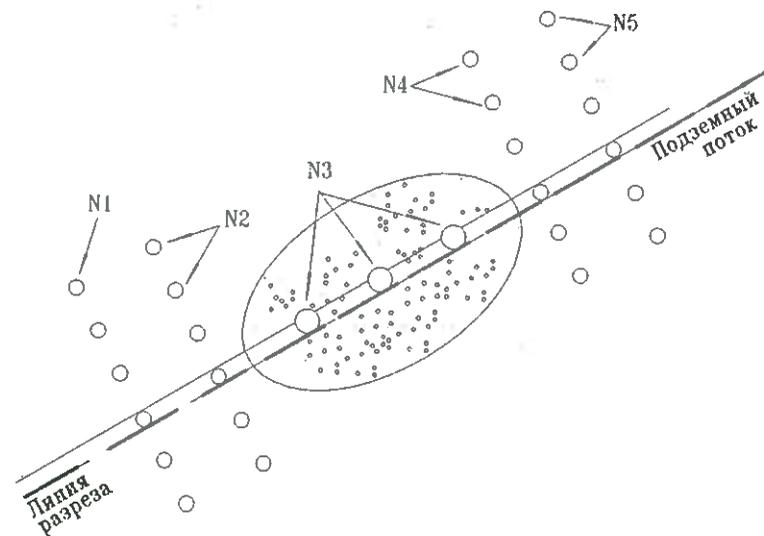


Рис. 1.5.12. Схема разработки месторождения с завесами

внутренних рядов (№2 - №4) веществ, которые затвердевают после взаимодействия друг с другом и пластовой водой, создаётся химический барьер. Аналогичные барьеры могут создаваться над и под рудной залежью.

Имеется опыт по гидроразрыву пластов с последующим формированием на месте разрыва искусственных непроницаемых пропластков из глиноцементной смеси или твердеющих синтетических смол.

Работы по созданию гидрозавес и гидроразрыву весьма трудоёмки и дорогостоящи, поэтому целесообразность их проведения должна подтверждаться в каждом конкретном случае технико-экономическими расчётами.

Принципиальная технологическая схема переработки продуктивных растворов подземного выщелачивания приведена на рис 1.5.13. На ряде предприятий попутно с ураном извлекается и молибден, изучается возможность получения и других элементов, в первую очередь, селена.

### 1.5.6

#### Скважинная гидродобыча полезных ископаемых

Скважинная гидродобыча (СГД) - метод подземной добычи твёрдых полезных ископаемых, основанный на приведении полезного ископаемого на месте залегания в подвижное состояние путём гидромеханического воздействия и выдачи его в виде гидросмеси на поверхность.

Основными технологическими процессами при скважинной гидродобыче являются: вскрытие месторождения с помощью скважин, гидравлическое разрушение (разрыв) напорной струей воды (в осушенном или затопленном очистном пространстве), дезинтеграция и перевод в забое разрушенной массы в гидросмесь, транспортирование (самотечное или напорное) гидросмеси от забоя до пульпоприёмной скважины (выработки), подъём гидросмеси на по-

верхность, обогащение, складирование хвостов обогащения, осветление оборотной воды и водоснабжение, управление горным давлением. Принципиальная технологическая схема предприятия скважинной гидродобычи приведена на рис.1.5.14. [34].

Способ скважинной гидродобычи предложен советским инженером В. Г. Вишняковым в 1935 г.

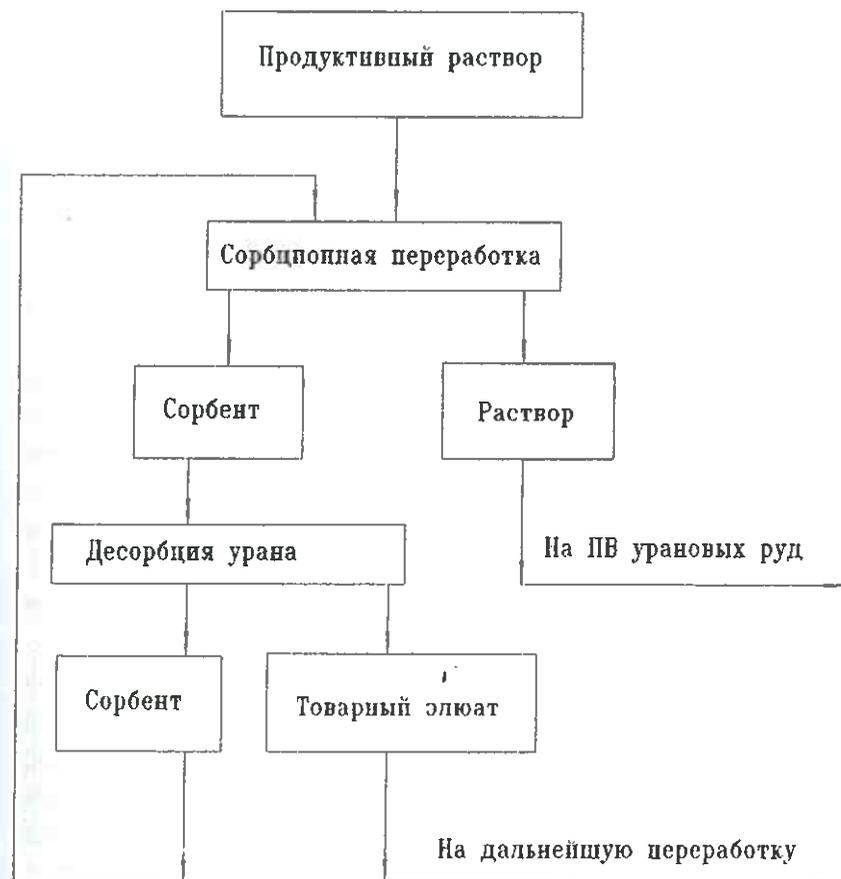
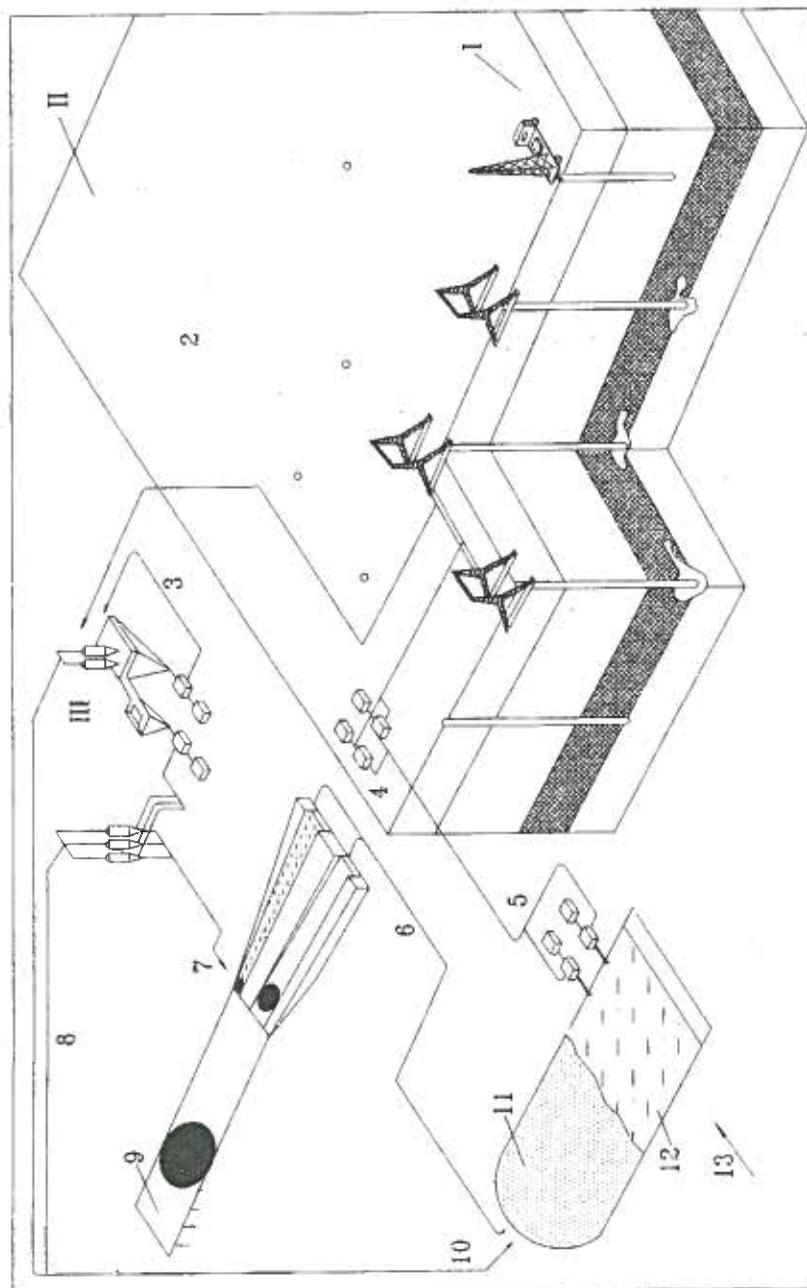


Рис. 1.5.13. Принципиальная технологическая схема сорбционной переработки продуктивных растворов подземного выщелачивания



*Рис. 1.5.14. Принципиальная технологическая схема предприятия скважинной гидродобычи: I — участок скважинной гидродобычи; II — участок повторной обработки целиков выщелачиванием; III — участок обогащения*

Он использовался при разработке фосфоритов и песков стекольной промышленности в 60-х годах в Польше и сыпного золота в 70-х годах в Канаде.

Основные работы по созданию промышленных разцов технических средств и технологических схем отсытятся к 70-м годам. С 1970 г. в США серийно выпускаются установки скважинной гидродобычи, используемые для добычи мягких бокситовых руд, нефтеносных песчаников, урана. Промышленная разработка месторождений урановых песчаников способом скважинной гидродобычи началась в США с конца 1979 г.

В СССР и России скважинную гидродобычу применяли при добыче фосфоритов, а также обводнённых кременнистых песков, залегающих под слоем многолетнемерзлоты в районе нефтяных месторождений Тюменской области для создания промышленных площадок буровых установок [34].

Обычно методом скважинной гидродобычи разрабатываются рыхлые, слабосцементированные руды.

Перспективными для этого метода являются всевозможные диспергируемые, пористые, рыхлые и слабосвязные залежи полезных ископаемых, к которым относятся: месторождения торфа, фосфорит- и марганецсодержащие образования, россыпные месторождения золота, олова, янтаря, алмазов, титана, осадочные месторождения редких и диоксидных руд, мягкие бокситовые руды, битуминозные песчаники, угли, горючие сланцы и т.п.

Скважинная гидродобыча может применяться как самостоятельный способ геотехнологической разрабо-

так и в комбинации с последующим подземным выщелачиванием при разработке песчано-глинистых и глинистых отложений.

Способ СГД может использоваться как вспомогательный (подготавливающий) для повышения эффективности подземного выщелачивания в залежи полезного ископаемого с недостаточной естественной проницаемостью.

Скважинная гидродобыча может использоваться для разведки (опробования) осадочных и россыпных месторождений, залегающих в сложных горно-геологических условиях, так как позволяет повысить достоверность геологоразведочных данных и поднимать на поверхность большие технологические пробы весом до 100 т и более.

В соответствии с технологической схемой, приведённой на рис. 1.5.14., на предприятии выделяют три участка: I — участок скважинной гидродобычи; II — участок повторной отработки целиков выщелачиванием; III — участок обогащения.

На участке повторной отработки целиков выщелачиванием используются те же скважины, что и на участке скважинной гидродобычи, но одни из них являются скважинами подачи растворителя 1, а другие — скважинами откачки раствора для сорбции 2.

Предприятие СГД включает: полигон с разбуренными скважинами и уложенными трубопроводами для подачи сжатого воздуха, напорной воды и гидротранспорта пульпы 3 до склада; осветлительный бассейн, насосную и компрессорную станции, электроподстанцию и другие подсобные службы.

Под технологией добычи полезных ископаемых методом СГД понимается совокупность производственных операций по разрушению и смыву руды, увязанная во времени и пространстве. Последовательность их выполнения составляет технологическую схему способу СГД.

Методы отработки добычной камеры могут отличаться по направлению действия струи гидромонитора и схеме доставки разрушенной руды к всасу выдачного устройства:

- встречным забоем — когда направление разрушающей струи не совпадает с направлением смыывающей насадки;
- попутным забоем — когда они полностью или частично совпадают;
- совмещенным забоем, — когда струи боковых насадок гидромонитора попутным забоем разрушают пласт руды и смыывают её к всасу пульпоподъёмного механизма, а струи передних насадок встречным забоем разрабатывают пласт;
- комбинированным забоем — когда сперва две рядом расположенные камеры обрабатывают встречным или совмещенным забоем, а затем попутным забоем производится отработка междукамерных целиков и зачистка почвы камеры.

Горные породы делятся на две группы: с жёсткими связями, без жёстких связей. Для диспергирования методом СГД наиболее предпочтительны породы без жёстких связей. Различают: связные (глинистые, лессовые) и рыхлые горные породы. Существует несколько методов разрушения:

- фильтрационным потоком, когда происходит вымывание отдельных составляющих массива;
- гидромониторной струей, когда происходит разрушение массива и вынос продуктов разрушения.

Наиболее эффективен второй метод разрушения. В результате воздействия струи на забой, в нём образуется лунка в форме параболоида, размеры которого зависят от крепости породы и времени воздействия. После удаления разрушенных частиц из лунки, в ней образуются трещины.

Если удар наносится под углом к поверхности, происходит отделение частиц от массива.

Отработка очистных камер может осуществляться встречным, попутным или боковым забоями.

При встречном забое направление самотёчного движения потока пульпы противоположно движению гидромониторной струи. Отработка встречным забоем эффективна при разработке мощных залежей полезных ископаемых, превышающих 3 м, любого залегания, а также маломощных пологих, наклонных, круто-наклонных и крутых залежей с углами наклона более  $6-8^\circ$ , когда уклон почвы забоя обеспечивает эффективное самотечное транспортирование отбитой горной массы к выдочной скважине.

При попутном забое направление движения потока пульпы совпадает с направлением струи, и её энергия используется не только для отбойки, но и для принудительной доставки отбитой массы полезного ископаемого к выдочному устройству, что позволяет вести отработку тонких и весьма тонких (менее 1 м) пологозалегających (уклон менее  $6^\circ$ ) и горизонтальных залежей полезного ископаемого с минимумом потерь и разубоживания.

При боковом забое по контуру очистной камеры или в центре её до начала очистной выемки ниже почвы рудной залежи проводятся транспортные щели с уклоном более  $6^\circ$  в сторону зумпфа выдочного устройства. Отбитая горная масса смывается струей гидромонитора в указанную щель, где обеспечены условия для эффективного самотёчного гидротранспортирования.

Размеры камер определяются в основном устойчивостью пород кровли залежи. Так как отработка камеры ведётся без присутствия людей в очистном забое, а средства контроля за состоянием кровли чрезвычайно сложны, размыв ведётся непрерывно, вплоть до обрушения пород кровли. Время отработки камер невелико, отбойка ведётся за-

топленной струей при подпоре пород кровли жидкостью с учётом гидростатического давления, поэтому имеется возможность обрабатывать залежи с неустойчивыми вмещающими породами, разработка которых традиционным подземным способом не эффективна [34-36].

Отработка залежи может вестись или одиночными камерами, или сплошным забоем в отступающем порядке управляемой посадкой кровли. Возможно управление кровлей полной закладкой.

По состоянию очистного пространства в процессе разработки выделяют 3 технологические схемы скважинной гидродобычи: с отбойкой полезного ископаемого: в осушенном очистном пространстве свободными струями, в затопленном очистном пространстве свободными затопленными струями, с использованием пльвунных свойств полезного ископаемого и разрушением несвободными затопленными струями.

Схема скважинной гидродобычи с отбойкой полезного ископаемого в осушенном забое, применяемая при больших притоках воды, позволяет разрабатывать горные породы значительной крепости, осуществлять эффективную доставку отбитой горной массы, легко управлять очистными работами и горным давлением.

Схема скважинной гидродобычи с отбойкой полезного ископаемого в затопленном забое позволяет вести разработку несвязных залежей полезных ископаемых на больших глубинах в условиях больших водопритоков, в частности под водоёмами и на шельфе Мирового океана.

Схема скважинной гидродобычи с использованием пльвунных свойств полезного ископаемого, а также пльвунное состояние за счёт управляемого разрушения естественной структуры массива в связных горных породах применяется при достаточной мощности залежи полезного

ископаемого (более 3 м). Для доставки рудной массы в псевдоплавунном или плавунном состоянии к выдачному устройству используется давление вышележащих пород.

Вода в скважины подаётся по трубам с площадки насосной станции 4, куда подводится напорная вода 5. Разделение жидкого и твёрдого осуществляется на специальной площадке, в результате чего получается слив 6 и концентрат 7. При этом выделяется из грузопотока также шлам 8. Отгрузка концентрата осуществляется с погрузочной эстакады 9. Хвосты обогащения 10 поступают в хвостохранилище 11. Обратная вода осветляется в пруде-отстойнике 12, куда также подаётся и подпиточная вода 13.

Основной инструмент для разрушения полезного ископаемого — напорная вода. Обычно это гидромониторная струя воды. Интенсификация разрушения достигается воздействием вибрации, взрыва, химического или микробиологического воздействий. Выдача полезного ископаемого на поверхность осуществляется эрлифтом, гидроэлеватором, погружными насосами или их комбинацией.

Технология СГД в принципе заключается в следующем:

- проведение детальной разведки и планировки поверхности;
- вскрытие месторождения бурением добычных скважин диаметром 250-500 мм до подстилающих пород пласта;
- подготовительные работы по подаче воды, сжатого воздуха, электроэнергии;
- разрушение струей воды руды и выдача её на поверхность в виде гидросмеси;
- гидротранспортирование в приёмные бункеры.

Системы разработки при СГД могут быть различными: с открытым пространством, с обрушением покрывающих пород, с закладкой выработанного пространства; ком-

бинированные.

Выбор той или иной системы разработки зависит от конкретных условий залегания месторождения.

Хотя первые предложения по применению скважинных гидромониторов относятся к 1936 г., широкого распространения метод СГД до сих пор не получил.

Различные способы разрушения горных пород и доставки их на поверхность предлагают С. Астон, Г. Вилдл, Б.В. Исмагилов, Д.И. Шпак и другие ученые [38].

Разрабатываются способы скважинной гидродобычи песчано-гравийных материалов, россыпного золота, руд других металлов из россыпных месторождений. Наиболее успешные результаты получены в США при разработке уранового месторождения. Ведутся работы по СГД в Польше. В бывшем СССР в начале 70-х гг. обнадеживающие результаты получены на Кенгисепском месторождении фосфоритоносных песков.

В 60-е-70-е гг. обобщаются теоретические и методологические основы скважинной гидродобычи твёрдых полезных ископаемых в трудах В.Ж. Аренса, Д.П. Лобанова, Н.В. Мельникова, А.И. Калабина и др.

После разработки участка производится его рекультивация.

Эффективность СГД определяется количеством руды, добываемой из одной скважины. Комплекс оборудования для разработки месторождений способом скважинной гидродобычи называется скважинным гидродобычным агрегатом. Он состоит из наземноуправляющей установки (НУУ) и скважинного гидродобычного снаряда (СГС).

В качестве НУУ используются специальные самоходные и несамоходные устройства — манипуляторы с гидравлическим или электромеханическим приводом, осуществляющие по определённой программе (жёсткой или адаптивной) операции по очистной выемке. К таким опера-

циям относятся: перемещение скважинного гидродобычного снаряда с заданной скоростью в вертикальной плоскости в пределах мощности залежи, повороты СГС в пределах угла раскрытия камеры; перевод гидромонитора на обработку следующей очистной камеры. Обычно в качестве НУУ используются те же буровые агрегаты, которыми осуществлялось бурение скважин [37].

Схема добычного снаряда скважинной гидродобычи приведена на рис. 1.5.15. Скважинный гидродобычный снаряд состоит из верхнего оголовка питателя I, набора секций става (водовода и пульповода) II, нижнего оголовка с гидромонитором и выдачным устройством III. На рисунке римской цифрой IV показан рудный пласт, а цифрой V - налегающие породы.

Верхний оголовок СГС включает подъемное устройство 1, верхнюю изогнутую часть пульповода 2, поворотное устройство 3, грундбуксу 4, верхний герметизирующий сальник 5, водовод, монтируемый из обсадных труб 6. Отдельные секции става монтируются с помощью муфтового соединения пульповода 7 и водовода 8. В налегающих породах перед вскрытием залежи устанавливается пакер 9.

Отбойка полезного ископаемого осуществляется гидромонитором 10, режим работы которого управляется регулирующим клапаном 11. Для пропуска и снижения сопротивления движению пульпы в пульповоде устанавливается обтекатель гидромонитора 12. В состав нижнего оголовка также входит смесительная камера гидроэлеватора 13 с насадкой 14. Заканчивается СГС клапаном бурового устройства 15 и буровым долотом 16. Отбитая горная масса скапливается в зумфовой части скважины 17.

При технологической схеме СГД с осушенным очистным пространством применяются скважинные гидромониторы:

■ встроенные, выполненные в виде цилиндрического

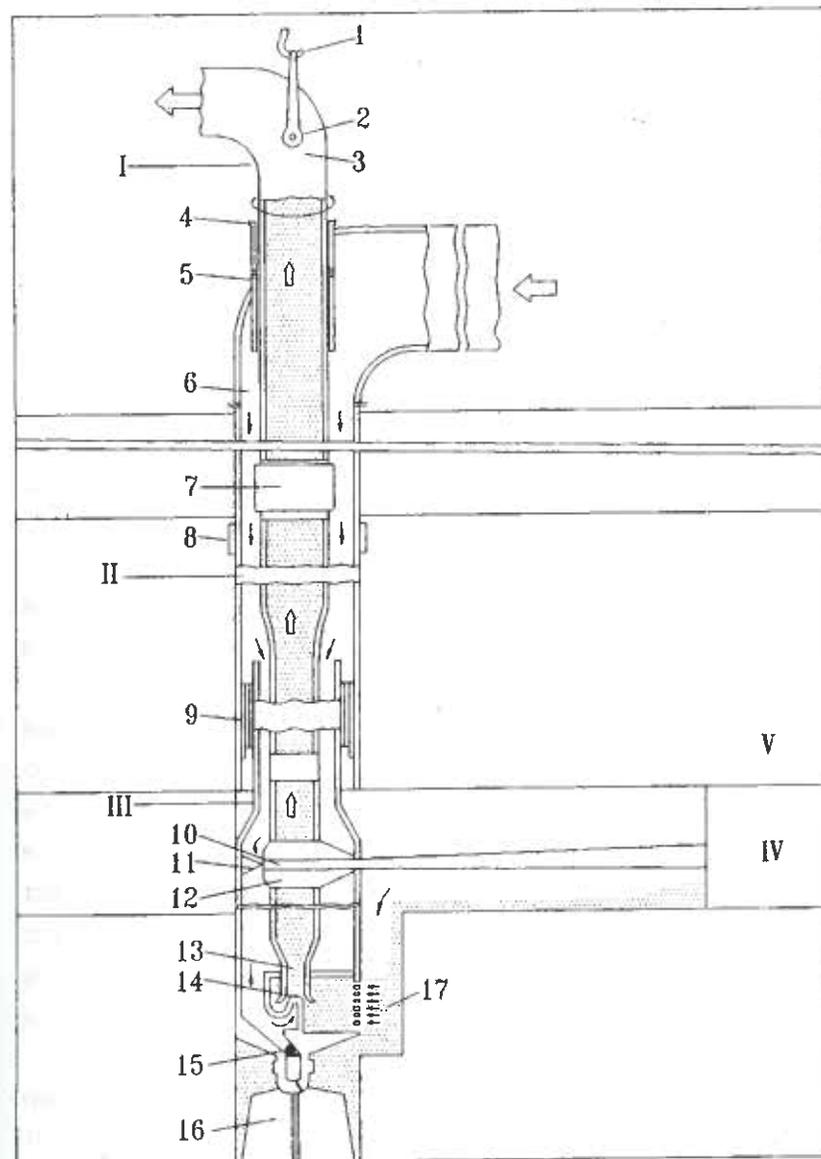


Рис. 1.5.15. Схема добычного снаряда скважинной гидродобычи: I — верхний оголовок питателя; II — набор секций става (водовода и пульповода); III — нижний оголовок с гидромонитором и выдачным устройством; IV — рудный пласт; V — налегающие породы

патрубка и расположенные внутри СГС под углом  $90^\circ$  к его продольной оси;

■ выводные, располагаемые шарнирно и занимающие при спусках и подъёмах вертикальное положение в специальном углублении на внешней трубе СГС и выводящиеся в рабочее горизонтальное положение с помощью гидропривода или автоматически за счёт силы реакции струи.

Выводной гидромонитор имеет вращающуюся головку с системой насадок, закреплённую на телескопическом стволе.

Система насадок включает: центральную — врубную, не вращающуюся (20-40 мм), боковую отбойную (15-20 мм), направленную в сторону забоя под углом  $20-50^\circ$  к оси ствола и боковую транспортирующую (20-30 мм), направленную назад, в сторону выдачного механизма, и наклоненную под углом  $10-15^\circ$  к оси ствола.

Существует большое количество механизмов управления выводом телескопического ствола в горизонтальное положение, в том числе с гибким всасом. Длина става в рабочем положении — 6-8 м, в собранном — 1,75 м. Перемещение разрушенной горной массы к всасу выдачного устройства происходит в потоке по почве камеры самотёчным или напорным потоком.

Содержание глинистых частиц повышает устойчивость смеси.

Для трогания образцов различной формы и крупности требуются различные скорости потока.

Наибольшее распространение при СГД получил эрлифтный подъём. Эрлифтный подъём имеет очень низкий к.п.д. (10-30 %), но широко применяется для откачки пуль-

пы. Его достоинства: простота, надёжность, возможность свободного выноса абразивных частиц. Кроме эрлифтов для подъёма полезного ископаемого может быть использован гидроэлеватор, землесосы.

Для подъёма рудной пульпы с глубины до 120-150 м используются высоконапорные гидроэлеваторы центрального, кольцевого или комбинированного типов, позволяющие осушать очистное пространство.

Для увеличения высоты подъёма до 300 м разработаны комбинированные схемы подъёма, в которых основным подъёмным устройством является гидроэлеватор, вспомогательным — эрлифт.

При технологической схеме СГД с затопленным пространством в связи с быстрым гашением энергии свободных затопленных струй применяются гидромониторы: шаговые реактивные, телескопические выдвижные и выводные, удлиняющиеся до 8-12 м по мере продвижения забоя.

При этой технологической схеме подъём рудной пульпы осуществляется эрлифтами.

При технологической схеме СГД с использованием плавучих свойств руды применяются короткоствольные встроенные невыдвижные гидромониторы или разрушение за счёт создания различий гидравлического градиента в разных частях залежи полезного ископаемого.

Подъём рудной пульпы при этой технологической схеме осуществляется гидроэлеваторами, эрлифтами или путём создания на месте разработки избыточного гидростатического давления.

Став промежуточных секций СГД собирается из соосно-расположенных труб различного диаметра, за счёт че-

го образуются полости для подачи воды, сжатого воздуха и подъёма пульпы. Монтаж всех колонн става может вестись с буровой установки одновременно со спуском нижнего оголовка. Такой СГС может осуществлять бурение скважин с обратной всасывающей промывкой. Гидромонитор при этой конструкции имеет возможность практически неограниченного продольного перемещения относительно поверхности. Колонны става могут монтироваться отдельно. При этом наружная труба СГС используется в неустойчивых налегающих породах в качестве обсадной, а нижний оголовок с пакером, перекрывающим межтрубное пространство, опускается на забой вместе с внутренней трубой. Продольное перемещение гидромонитора при такой конструкции ограничено длиной хода секции нижнего оголовка в пакере, составляющей до 10 м. При необходимости нижний оголовок может быть извлечён из скважины без подъёма наружной (обсадной) трубы. Верхний оголовок в зависимости от принятой конструкции става изготавливается в виде двухпроходного или однопроходного вертлюга [37].

Метод скважинной гидродобычи требует ещё серьёзных научно-технических и опытно-конструкторских работ для повышения его надёжности и расширения области применения.

На освоенных месторождениях его эффективность доказана промышленной эксплуатацией. В последние годы существенно возрос объём научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по распространению способа СГД на месторождениях ископаемых углей со сложными горно-геологическими условиями залегания.

## 1.5.7

### Добыча и использование тепла Земли

В последние годы исследуются возможности использования глубинного тепла Земли в качестве дополнительного источника энергии. Эта идея, выдвинутая впервые К.Э. Циолковским в 1897 г., развита в дальнейшем В.А. Обручевым (1920 г.) и Ч. Парсоном (1925 г.). Она положена в основу исследований 60-х-70-х гг. по геотермике. Проблема разрабатывается в дальнейшем Ю.Д. Дядькиным, Э.В. Богуславским и др. (СССР), во Франции и США [38].

Большие работы по добыче и использованию тепла Земли ведутся в ФРГ. С конца 1994 г. геотермальными водами обеспечиваются 640 квартир в г. Нойштадте-Глеве. Горячая вода добывается с глубины 2250 м с температурой 100 °С. Из общей мощности построенной ТЭЦ в 9,5 МВт 6,5 МВт производятся за счёт геотермальных вод [38].

Опыт разработки геотермальных месторождений изложен в монографии Ю.Д. Дядькина [40].

Внимание к геотермальным месторождениям обусловлено тем, что пригодные для использования их ресурсы составляют 137 трлн. т условного топлива, что на порядок превосходит топливные ресурсы мира. Кроме того, опыт использования геотермальных теплоносителей в благоприятных условиях в 2-5 раз выгоднее топливных и атомных энергоустановок [41-43]. Однако доля геотермальной электроэнергии в мировом топливно-энергетическом балансе чрезвычайно мала и составляет около 0,16 % [40]. Хотя практическое использование тепла Земли началось ещё 4 тыс. лет назад, начало научного изучения - 25 веков тому назад, только в 1828 г. в Лардеролло в Италии был сделан первый шаг в геотехнологии — начали бу-

ритель первую геотермальную скважину. В 1905 г. в Италии начала действовать первая Гео ГЭС [2].

*Геотермальная технология* — совокупность знаний о способах, средствах, и процессах добычи, обработки и доставки потребителям геотермальных теплоносителей, обеспечивающих экономическую эффективность их использования.

*Геотермальные ресурсы* — та часть теплосодержания твёрдой, жидкой и газообразной фаз земной коры, которая может быть эффективно извлечена из недр и использована при данном уровне развития геотермальной технологии и энергетики.

*Геотермальная система* — совокупность природных образований, инженерных сооружений, технических средств и обусловленных ими физических и технологических процессов, обеспечивающая добычу из недр, обработку и доставку потребителю кондиционного теплоносителя в условиях данного геотермального месторождения.

Принципиальная схема геотермальной циркуляционной системы приведена на рис. 1.5.16.

Основными элементами такой системы являются: зона теплоотбора с геотермальным коллектором, геотермальные скважины, поверхностный технологический комплекс. В систему входят как минимум две скважины: НС — нагнетательная и ДС — добычная. Для увеличения площади контакта теплоносителя с породным массивом, в последнем формируются трещины гидроразрыва  $T_r$ , образующие геотермальный коллектор.

Поверхностный технологический комплекс включает: Н — циркуляционные насосы, ТО — промежуточный теплообменник между контурами первичного и рабочего

теплоносителя, Мтт — магистральную теплотрассу;  $Q_{дг}$  — теплообменник для получения дополнительной внешней энергии при догреве теплоносителя; П — теплообменный аппарат потребителя;  $M_{вп}$  — магистральный водопровод.

*Зона теплоотбора* — это участок массива, примыкающий к геотермальным скважинам, в котором осуществляется дренирование природных и фильтрация нагнетаемых с поверхности теплоносителей и охлаждение твёрдых горных пород.

*Геотермальный коллектор* — совокупность естественных или искусственных фильтрационных каналов в зоне теплоотбора, в которых формируется и поступает к добычным геотермальным скважинам поток природного или нагретого в процессе теплообмена с горячими породами геотермального теплоносителя.

Геотермальные скважины делятся на:

- параметрические (для изучения геотермических и гидрологических условий региона);
- разведочные (для изучения геотермального месторождения и подсчета запасов);
- эксплуатационные (для вскрытия коллекторов и обеспечения добычи энергии);
- разведочно-эксплуатационные.

Эксплуатационные скважины делятся на:

- добычные — для подъёма геотермального теплоносителя на поверхность;
- нагнетательные — для закачки в геотермальный коллектор отработанного теплоносителя;
- вспомогательные — для размещения контрольно-измерительной аппаратуры, добычи подземных вод, подземного захоронения отработанных тепло-

носителей или их вредных компонентов;

■ специальные — для создания искусственных коллекторов, противодиффузионных экранов и завес, других работ, необходимых для повышения эффективности эксплуатации месторождения.

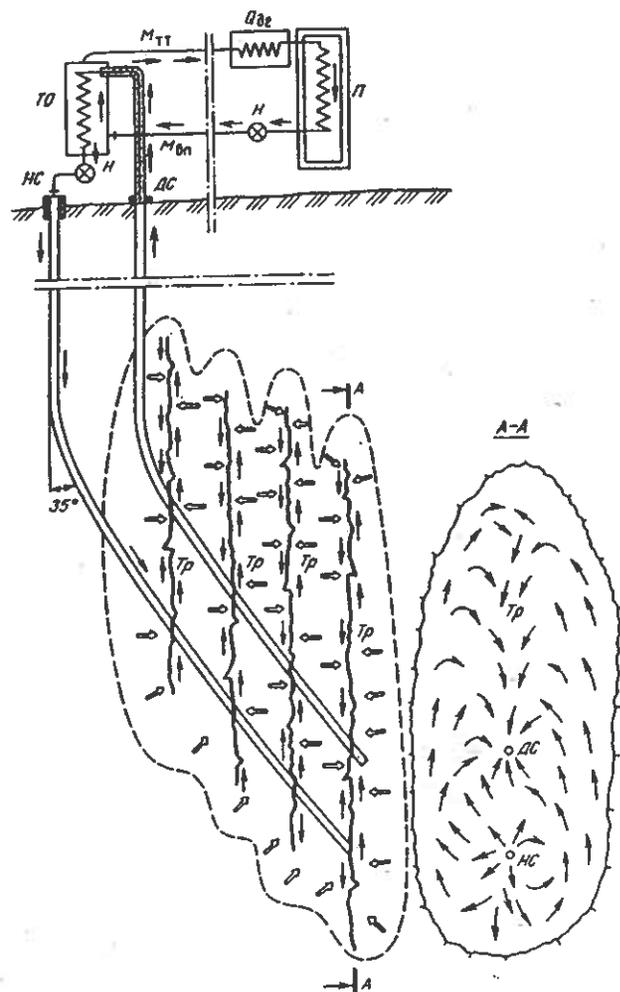


Рис. 1.5.16. Принципиальная схема геотермальной циркуляционной системы.

Технологическая классификация геотермальных систем приведена на рис. 1.5.17 [40]. Она включает три классификационных признака:

- природно-технологические особенности геотермальных коллекторов (группы, классы);
- способы подъема теплоносителя по добычным скважинам (типы систем);
- способы кондиционирования, доставки потребителю, последующей утилизации или сброса теплоносителя (виды систем).

В геотермальных системах первой группы (естественные коллекторы) выделено пять классов, отличающихся по условиям формирования и локализации проницаемости, а также по природе и уровню напора заполняющей поры и трещины жидкости.

Этим же определяется и способ подъема теплоносителя по добычным скважинам. Геотермальные фонтанные системы (ГФС), т.е. самоизлив природного теплоносителя за счёт избыточного  $P_{изб}$  (по отношению к гидростатическому) давлению приведены на рис. 1.5.18 а (трещинные коллекторы), рис. 1.5.18 б (пластовые коллекторы), а также рис. 1.5.18 в (артезианские бассейны геотермальных вод). Если теплоноситель сильноминерализован или содержит токсичные вещества, то переходят к двухконтурным геотермальным системам (ГДКС), приведённым на рис. 1.5.18 г. При этом геотермальная энергия передаётся чистому рабочему теплоносителю в погружных скважинных теплообменниках.

При отсутствии избыточного давления в коллекторе используют насосные гидротермальные системы, показанные на рис. 1.5.18 д.

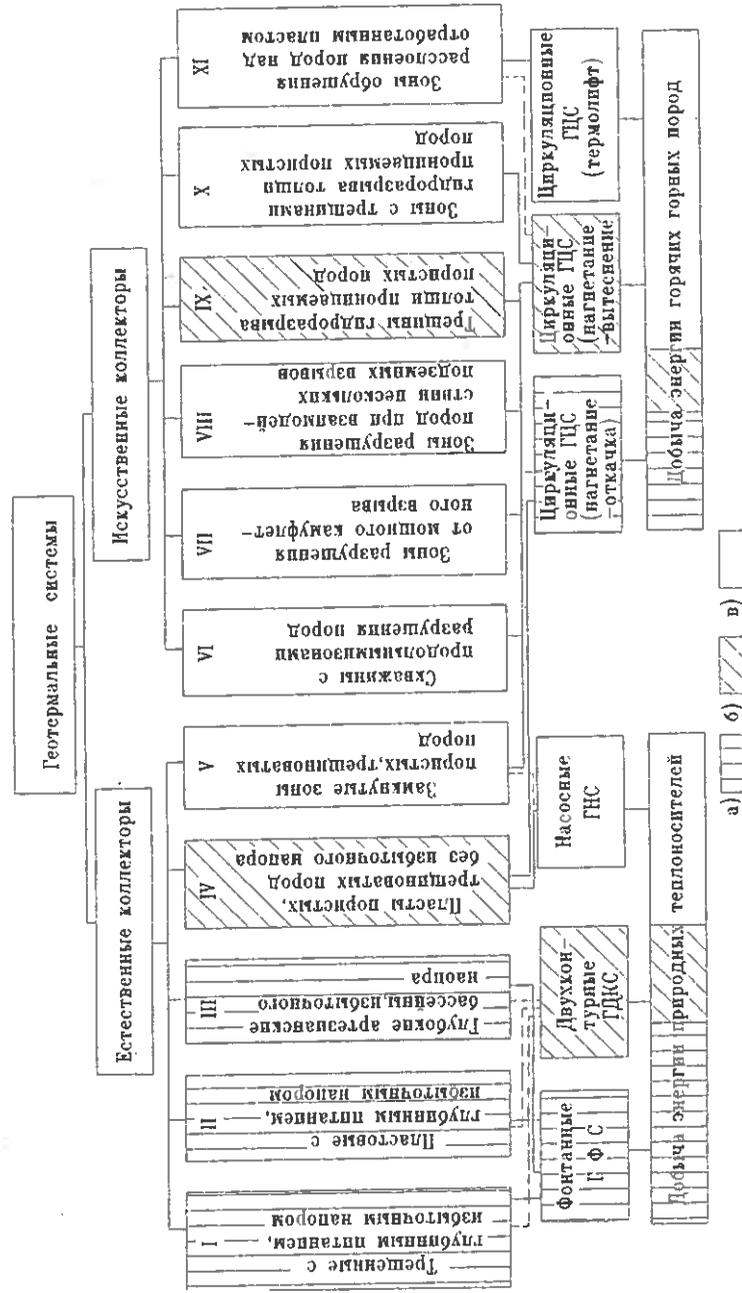
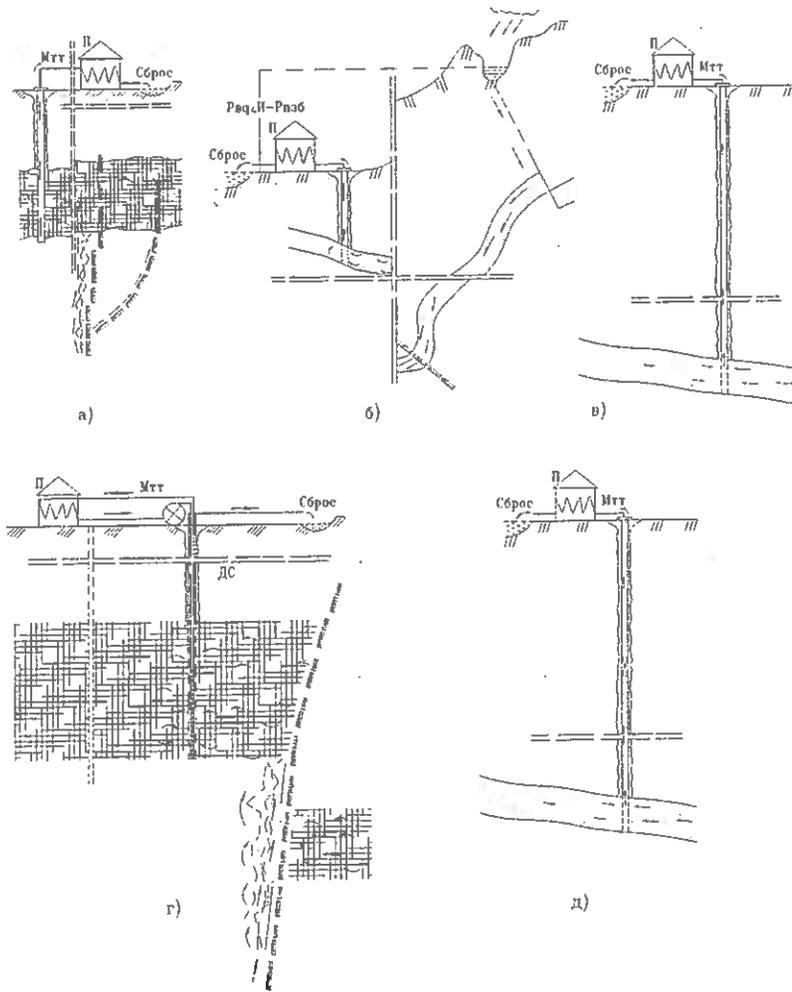


Рис.1.5.17. Технологическая классификация геотермальных систем: а) получили промышленное применение; б) прошли опытную проверку, но еще не распространенные; в) не опробованные

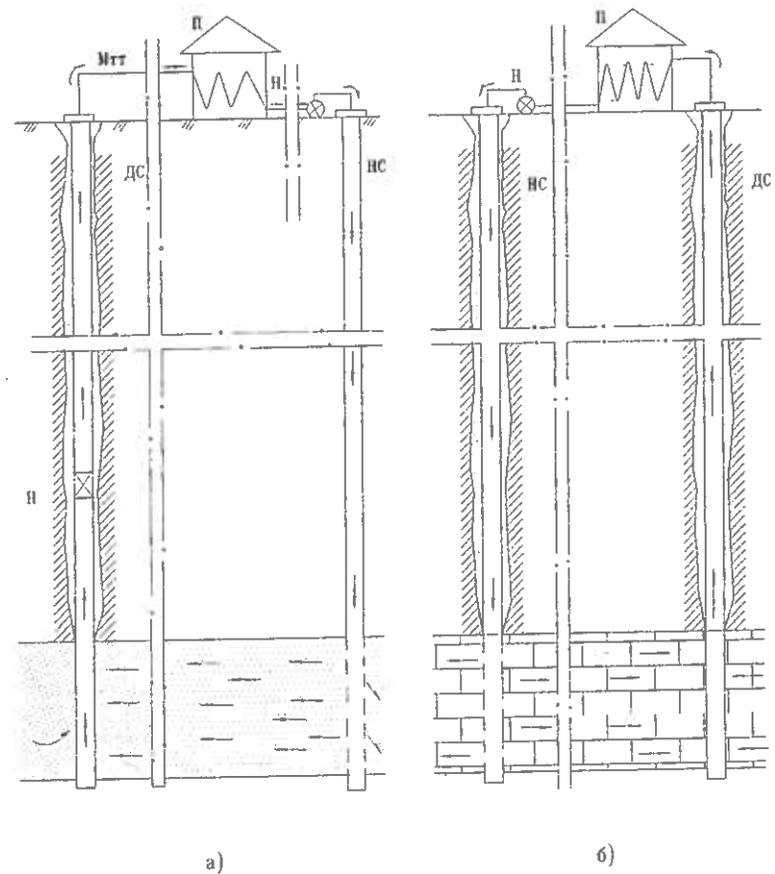
При геотермальной циркуляционной системе (ГЦС) осуществляется не добыча горячего теплоносителя, а его получение за счёт тепла горячих пород коллекторов, чаще всего искусственно созданных. Именно этой технологией и добывается основная часть теплоресурсов месторождения. ГЦС возможна лишь при одновременном использовании насосов как для нагнетания, так и для откачки нагретого горячими породами теплоносителя во избежание чрезмерных утечек его за пределы зоны теплоотбора. ГЦС в режиме нагнетания-откачки показана на рис. 1.5.19 а. Насос Н установлен в добычной скважине и на поверхности перед нагнетательной скважиной. Если зона проницаемости коллектора ограничена, возможна работа ГЦС в режиме нагнетания-вытеснения, как показано на рис. 1.5.19.б. Насос Н подаёт холодную воду через нагнетательную скважину НС, а горячая вода поступает по добычной скважине ДС к потребителю П.

При искусственном создании коллекторов возможно использование ГЦС в режиме термолифта, когда выдача горячей воды осуществляется за счёт разности плотностей горячей и холодной воды.

Все системы разработки гидротермальных месторождений можно разделить на две группы: с обособленными и взаимодействующими зонами теплоотбора. При системах разработки с обособленными зонами возмущения гидрогеологического режима и температурного поля в пределах зоны теплоотбора не оказывают влияния на условия извлечения энергии в соседних скважинах и



**Рис.1.5.18.** Принципиальные схемы фонтанных, двухконтурных и насосных геотермальных систем: а) фонтанные в трещиноватых коллекторах; б) фонтанные в пластовых коллекторах; в) фонтанные в артезианских бассейнах; г) двухконтурные в трещинных коллекторах; д) насосные в артезианских бассейнах.



**Рис. 1.5.19.** Принципиальные схемы циркуляционных систем извлечения геотермальной энергии твердых горячих пород естественных коллекторов: а) по схеме нагнетания - откачки; б) по схеме нагнетания - вытеснения.

разработки с взаимодействующими зонами теплоотбора предполагается частичное «наложение» соседних зон друг на друга при последовательном или одновременном их формировании.

Несмотря на возрастающий интерес к использованию тепла недр Земли, широко он реализован только в уникальных регионах, таких как Исландия, Камчатка.

## **Часть 2**

### **ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО КУРСУ**

**2.1. Общие указания по выполнению  
лабораторных работ**

**2.2. Методические указания по проведению  
лабораторных работ**

## 2.1 Общие указания по выполнению лабораторных работ

---

Представленные в методических указаниях 6 лабораторных работ тематически охватывают всю программу дисциплины и основные геотехнологические способы разработки: скважинную гидродобычу (СГД), подземную газификацию угля (ПГУ), подземное выщелачивание (ПВ).

Все лабораторные работы, за исключением первой, индивидуальные, т.е. каждый студент должен выполнить свой вариант в соответствии с приведенными исходными данными. Вариант задания определяется последней цифрой в номере студента по журналу студенческой группы.

Структура лабораторных работ одинакова и включает: цель работы; теоретические сведения; контрольный пример с решением; вопросы для самоконтроля; варианты исходных данных; литературу.

Все лабораторные работы рассчитаны на два часа занятий.

Все стоимостные параметры, использованные в вариантах исходных данных и контрольных примерах, даны по состоянию на 1 января 1991 года.

Для того, чтобы перевести полученные стоимостные значения в новый масштаб цен, можно воспользоваться в учебных целях следующими коэффициентами пересчета и коэффициентами дефляторами [44]:

- для перевода капитальных затрат и цен на оборудование и материалы — 15400;

- для эксплуатационных расходов, в т.ч. по элементам затрат:
- заработная плата — 1466;
- электроэнергия — 6461;
- амортизационные отчисления — 828.

Лабораторные работы выполняются дома, оформляются и защищаются на двух специально отведенных для этого занятиях.

## 2.2 Методические указания по проведению лабораторных работ

---

### 2.2.1 Лабораторная работа № 1 Подготовка исходных данных для проектирования геотехнологической разработки месторождений полезных ископаемых

**Цель работы.** Изучение особенностей подготовки геологической информации при проектировании разработки месторождений полезных ископаемых геотехнологическими способами.

**Теоретические сведения.** Цель геологоразведочных работ — комплексная оценка месторождения, как сырьевой базы горнодобывающей промышленности.

При разведке должны быть выяснены:

- 1) форма, размер и геологическое строение залежи, глубина залегания, тектонические особенности, содержание полезного компонента и его запасы, мощность, литологический, минералогический и хими-

ческий составы, структурные и текстурные особенности залежи, соотношение полезных компонентов по технологическим свойствам, изменчивость их качественных и количественных характеристик;

2) мощность, литологический состав, степень тектонической нарушенности и элементы залегания покрывающих и подстилающих пород, физико-механические свойства боковых пород;

3) гидрогеологические характеристики водоносных горизонтов, гидрогеологическая блокировка запасов, источники водоснабжения предприятия, прогноз возможных гидрогеологических характеристик при эксплуатации месторождения;

4) газоносность залежи, интенсивность газовыделения, состав газов, их взрывоопасность;

5) экономика и природные условия района месторождения.

Специфические особенности геологоразведочных работ при геотехнологии — детальность физико-геологических исследований параметров залежи, обуславливающих процессы геотехнологии.

Таким образом, исследовательские работы включают общегеологические и геотехнологические исследования.

Геотехнологические исследования:

1) количественная оценка сортов и разновидностей полезного ископаемого;

2) пористость, кавернозность и трещиноватость.

В ходе исследований проводятся следующие виды опробования:

1) химическое — определяется химический состав, содержание полезных компонентов и вредных примесей;

2) минералого-литологическое — изучаются состав минералов, их структурные и текстурные особенности;

3) физическое — устанавливаются физико-механические и теплофизические свойства полезного ископаемого и вмещающих пород;

4) технологическое — изучение извлекаемости полезного ископаемого.

Все виды опробования проводятся по результатам отбора керна секциями длиной 1 м, а на контактах с боковыми породами — 0,5 м.

Перед строительством крупного предприятия осуществляются опытно-промышленные испытания технологии на опытной установке в естественных условиях.

В период подготовки месторождения к эксплуатации проводится комплекс геологических, гидрогеологических и геофизических исследований залежи. Его цель — изучение месторождения как гидроструктуры. Основные методы: гидрогеологические точечное и площадное опробование скважин, сопровождаемое геофизическими измерениями. Для изучения гидрогеологических характеристик месторождения проводят опытные нагнетания и откачки.

В ходе исследований этого комплекса важнейшим является изучение эффективности методов искусственного воздействия на массив с целью улучшения его гидрогеологических свойств.

Гидрогеологические исследования должны проводиться по блокам месторождения с различными типами ус-

ловий залегания полезного ископаемого: по качеству, боковым породам, свойствам и т.п. Должна быть определена неоднородность геолого-гидрологических характеристик как по площади, так и по мощности месторождения.

Подсчет запасов полезного ископаемого, пригодных к отработке геотехнологическими методами, включает:

- 1) определение контуров и площади распространения промышленной залежи;
- 2) среднюю мощность залежи по блокам;
- 3) плотность полезного ископаемого по блокам;
- 4) среднее содержание полезного ископаемого по блокам.

Оконтуривание промышленных запасов осуществляется на основании временных или постоянных кондиций. При установлении кондиций должна учитываться надежность выполненных геолого-гидрологических исследований, т.к. от них зависят все показатели геотехнологических методов.

Главная задача проектирования предприятия по добыче полезного ископаемого геотехнологическими методами — определение оптимального сочетания мощности, срока службы, способа вскрытия, системы разработки и т.п.

При проектировании залежь, добычные скважины и поверхностные сооружения должны рассматриваться как единый комплекс. Наиболее приемлемый метод решения этой задачи — метод вариантов. При этом такие задачи наиболее целесообразно решать методами экономико-математического моделирования с применением ЭВМ.

Основные этапы проектирования геотехнологического предприятия:

- 1) получение задания на проектирование:

- 2) получение исходных данных;
- 3) выбор способа вскрытия и системы разработки месторождения, сетки расположения скважин, очередности бурения и включения в работу скважин;
- 4) выбор основного оборудования для производства рабочих агентов, транспортирования и переработки полученных продуктов, регенерации рабочих агентов, автоматизации и управления производством;
- 5) определение основных технико-экономических показателей будущего предприятия [2].

## 2.2.2

### **Лабораторная работа № 2 Методика расчета производительности гидравлического разрушения**

**Цель работы.** Изучение методики расчета гидравлического разрушения при скважинной гидродобыче.

**Теоретические сведения.** Рабочим органом при методе скважинной гидродобычи (СГД) является гидромониторная струя, которая осуществляет разрушение, смыл и подъем горной массы. СГД ведется затопленной свободной струей, когда плотность материала струи равна плотности среды.

Гидромониторные струи делят на три группы по давлению [7]:

- низкого — до 1 МПа;
- среднего — от 1 до 4 МПа;
- высокого — более 4 МПа.

Основными параметрами гидромониторной струи являются скорость вылета струи, расход воды и диаметр насадки.

Нормальная нагрузка на разрушаемый слой пород определяется из выражения:

$$\sigma = \gamma_n \cdot g \cdot H, \quad (2.1)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\gamma_n$  — плотность вышележащих горных пород, кг/м<sup>3</sup>;

$H$  — глубина залегания пласта, м.

Поровое давление:

$$P_{гидр} = \gamma_s \cdot g \cdot H, \quad (2.2)$$

где  $\gamma_s$  — плотность грунтовых вод, кг/м<sup>3</sup>.

Эффективное напряжение:

$$\sigma_s = \sigma - P_{гидр}, \quad (2.3)$$

Сопротивление сдвигу водонасыщенных пород:

$$\tau_s = C_o + \sigma_s \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (2.4)$$

где  $C_o$  — коэффициент сцепления пород, Па;

$\varphi$  — угол внутреннего трения для породы, градус.

Минимальная удельная сила удара струи, достаточная для разрушения породы:

$$P_{y \min} > \tau_s, \quad (2.5)$$

Давление воды на входе в насадку:

$$P_o = P - \Delta P_c + \gamma_{рж} \cdot g \cdot H - \Delta P_z, \quad (2.6)$$

где  $P$  — давление воды, развиваемое насосом, Па;

$\Delta P_c$  — потери напора в сети; ориентировочно

$\gamma_{рж}$  — плотность рабочей жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta P_z$  — потери напора в гидромониторе; принимаются ориентировочно равными:

$$\Delta P_z = (0,4-0,7) \cdot 10^6, \quad \text{Па.}$$

Начальная скорость истечения струи:

$$U_o = \psi \cdot \sqrt{2 \cdot 10^{-3} \cdot P_o}, \quad \text{м/с,} \quad (2.7)$$

где  $\psi$  — коэффициент скорости; принимается  $\psi = 0,92-0,96$ .

Расход воды определяется по формуле:

$$Q = \frac{\pi \cdot d_n^2}{4} \cdot \alpha \cdot U_o, \quad \text{м}^3/\text{с,} \quad (2.8)$$

где  $\alpha$  — коэффициент сжатия струи; принимается  $\alpha = 1$ ;

$d_n$  — диаметр насадки гидромонитора, м.

Коэффициент структуры потока струи:

$$a = \frac{l}{\frac{l}{0,0625} - \frac{n \cdot P_{гидр}}{10^6}}, \quad (2.9)$$

где  $n$  — опытная величина, определяемая из следующего соотношения в зависимости от значения  $P_{гидр}$ :

$P_{гидр}$ , Мпа.....	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
$n$ .....	1,870	1,471	1,002	0,561	0,20

Расстояние от насадки до забоя, на котором возможно разрушение породы:

$$l = \frac{(1060 \cdot U_o^2 - 0,29 \cdot \tau_s) \cdot d_n}{2 \cdot a \cdot \tau_s}, \quad (2.10)$$

Производительность гидравлического разрушения для условий Кузбасса определяется по формуле Н.Ф. Цяп-

$$\Pi = A \cdot \left( \frac{P_o \cdot 10^{-6}}{g} \right) \cdot (10^3 \cdot d_n)^2 \cdot 10^{-4}, \text{ т/час}, \quad (2.11)$$

где  $A$  — опытный коэффициент, принимаемый обратно пропорционально крепости угля в диапазоне значений: для крепости угля  $f = 0,8 - 1,2$  коэффициент  $A = 1,2 - 1,7$ .

Производительность гидравлического разрушения рыхлых и слабосцементированных песков и песчаников прочностью  $\sigma_{сж} = 0,5 - 2,0$  МПа:

$$\Pi = \frac{K \cdot P_o \cdot 10^{-3}}{g}, \text{ т/час}. \quad (2.12)$$

где  $K$  — опытная постоянная, зависящая от диаметра насадки; для диаметров насадки 11, 15 и 23 мм, принимается соответственно равной 1,2; 2,0; 4,8.

### Контрольный пример

Рассчитать минимальную длину струи, расход воды и производительность скважинного гидромонитора при отбойке полезного ископаемого для следующих условий:

1) разрабатывается фосфоритная руда, представленная водонасыщенными песками, характеризующаяся следующими параметрами:

- коэффициент сцепления  $C_o = 4000$  Па;
- угол внутреннего трения пород  $\varphi = 33^\circ$ ;
- плотность покрывающих пород  $\gamma_n = 2100$  кг/м<sup>3</sup>;
- глубина залегания пласта  $H = 20$  м;
- плотность грунтовых вод  $\gamma_e = 1050$  кг/м<sup>3</sup>;

2) напор центробежного насоса  $P = 2,4 \cdot 10^6$  Па;

3) плотность рабочей жидкости  $\gamma_{р.ж.} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;

4) диаметр насадки  $d_n = 0,024$  м.

### Решение

1. Нормальная нагрузка на разрушаемый слой:

$$\sigma = \gamma_n \cdot g \cdot H = 2100 \cdot 9,81 \cdot 20 = 4,12 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

2. Поровое давление:

$$P_{зудр} = \gamma_e \cdot g \cdot H = 1050 \cdot 9,81 \cdot 20 = 2,06 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

3. Эффективное напряжение:

$$\sigma_s = \sigma - P_{зудр} = 4,12 \cdot 10^5 - 2,06 \cdot 10^5 = 2,06 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

4. Сопротивление сдвигу:

$$\tau_s = C_o + \sigma_s \cdot \text{tg} \varphi = 4000 + 2,06 \cdot 10^5 \text{tg} 33^\circ = 1,23 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

5. Давление воды на входе в насадку:

$$P_o = P - \Delta P_c + \gamma_{р.ж.} \cdot g \cdot H - \Delta P_z = 2,4 \cdot 10^6 - 35 \cdot 10^4 + 1000 \cdot 9,81 \cdot 20 - 55 \cdot 10^5 = 2,01 \cdot 10^6, \text{ Па}$$

6. Начальная скорость истечения струи:

$$U_o = \psi \cdot \sqrt{2 \cdot 10^{-3} \cdot P_o} = 0,94 \cdot \sqrt{2 \cdot 10^{-3} \cdot 2,01 \cdot 10^6} = 63,4 \text{ м/с}.$$

7. Расход воды:

$$Q = \frac{\pi \cdot d_n^2}{4} \cdot \alpha \cdot U_o = 1 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,024^2}{4} \cdot 63,4 = 5,39 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}.$$

8. Коэффициент структуры потока струи:

$$a = \frac{l}{\frac{1}{0,0625} - \frac{n \cdot P_{зудр}}{10^6}} = \frac{l}{\frac{1}{0,0625} - \frac{1,87 \cdot 2,06 \cdot 10^5}{10^6}} = 0,064.$$

9. Расстояние от насадки до забоя:

$$l = \frac{(1060U_0^2 - 0.29\tau_s)d}{2\tau_h} = \frac{0.024(1060 \cdot 63.4^2 - 0.29 \cdot 1.23)}{2 \cdot 0.064 \cdot 1.23 \cdot 10^3} = 0.644 \cdot \text{м.}$$

10. Производительность гидравлического разрушения:

$$\Pi = \frac{K \cdot P_0 \cdot 10^{-3}}{g} = \frac{4.8 \cdot 2.01 \cdot 10^6 \cdot 10^{-3}}{9.81} = 983 \text{ т/час.}$$

### Вопросы для самоконтроля

1. Назовите основные параметры гидромониторной струи.
2. При каком условии происходит разрушение массива гидромониторной струей?
3. Каким образом формируется давление рабочей жидкости на входе в насадку?
4. Чем отличаются условия работы затопленной струи от свободной?
5. Как изменяется длина струи от прочности массива?

Варианты исходных данных приведены в табл. 2.1. Недостающие исходные данные принимайте из примера.

Таблица 2.1

Варианты исходных данных

Варианты	Исходные данные					
	Разрушаемая порода	$c_0$ , Па	$\varphi$ , град.	$H$ , м	$P$ , Па $\cdot 10^{-5}$	$d_n$ , мм
1	2	3	4	5	6	7
1	Песок	500	30	20	1,5	11
2	Песок	5000	32	30	2,0	18
3	Песок	5500	35	40	2,5	23

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7
4	Уголь	6500	36	50	2,0	22
5	Уголь	7000	34	60	2,5	22
6	Уголь	7500	32	70	3,0	18
7	Уголь	8000	30	60	3,5	18
8	Песок	4000	35	60	2,0	22
9	Песок	5000	30	40	1,0	11
10	Песок	5500	32	50	2,5	22

### Литература

1. Аренс В.Ж., Исмагилов Б.В., Шпак Д.Н. Скважинная гидродобыча твердых полезных ископаемых, - М.: Недра, 1980. -229 с.
2. Аренс В.Ж. Скважинная добыча полезных ископаемых (геотехнология). - М.: Недра, 1986. -279 с.

### 2.2.3

#### Лабораторная работа №3.

#### Проектирование подземной газификации углей

**Цель работы.** Изучить методику расчета основных параметров подземной газификации угля.

**Теоретические сведения.** Сущность метода подземной газификации угля (ПГУ) заключается в процессе превращения угля на месте его залегания в горючий газ.

Основными стадиями ПГУ являются: бурение с поверхности земли на угольный пласт скважин; соединение этих скважин каналами, проходящими в угольном пласте; нагнетание в одни скважины воздушного или парокислородного дутья; получение из других скважин газа.

Газообразование происходит в канале за счет химического взаимодействия свободного и связанного кислорода с углеродом и термического разложения угля[8].

Выход, состав и теплота сгорания получаемого газа зависят от состава подаваемого в скважину дутья, марки угля и его состава, геологических условий залегания пласта, его мощности и строения. Теоретически установлено, что теплота сгорания газа, получаемого на воздушном дутье, не превышает 4,4 МДж/м<sup>3</sup>.

При подземной газификации угля основным параметром процесса является интенсивность процесса газификации. Она зависит от ряда влияющих факторов, большинство из которых определяются опытным путем.

Расчет ведется в следующей последовательности [22].

При отсутствии данных об элементарном составе газифицируемого угля теоретический удельный объем сухого воздуха, т.е. без паров воды, подаваемого в блок сжигания для полного сгорания угля определяется по формуле:

$$V_{ce}^o = a' \cdot \frac{0,001 \cdot Q_i^r + 25,1 \cdot W_i^r}{4186}, \text{ нм}^3/\text{кг}, \quad (2.13)$$

где  $Q_i^r$  — низшая теплота сгорания рабочей массы угля, Дж/кг;

$W_i^r$  — влажность рабочей массы угля, %;

$a'$  — опытный коэффициент, зависящий от марки угля; принимается в диапазоне значений  $a' = 1,08 - 1,11$ . [45]

Определяем коэффициент избытка воздуха:

$$\alpha = \left[ 1 - \frac{(21 - x') \cdot O_2'}{2100} \right] \times \left( \frac{21}{21 - O_2' + 0,5CO' + 0,5H_2' + 1,5H_2S' + 2CH_4' + 3C_2H_4'} \right) \quad (2.14)$$

где  $x'$  — опытный коэффициент, определяемый в зависимости от типа угля в диапазоне значений 18,2 - 19,9;

$O_2'$  — содержание в сухом газе ПГУ по объему  $O_2$ , %;

$CO'$  — то же  $CO$ , %;

$CH_4'$  — то же  $CH_4$ , %;

$H_2'$  — то же  $H_2$ , %;

$C_2H_4'$  — то же  $C_2H_4$ , %;

$H_2S'$  — то же  $H_2S$ , %.

Коэффициент, учитывающий утечки газа в подземном газогенераторе:

$$K_y = 1 - \frac{U_y}{100}, \quad (2.15)$$

где  $U_y$  — утечка газа, %.

Реальный выход сухого газа ПГУ из газифицируемого угля:

$$V_{ce}' = V_{ce}^o \cdot (\alpha + 0,01 \cdot x' - 0,21) \cdot K_y, \text{ нм}^3/\text{кг}, \quad (2.16)$$

Химический к.п.д. процесса газификации:

$$\eta = \frac{Q_{из} \cdot V_{ce}'}{Q_i^r}, \quad (2.17)$$

где  $Q_{из}$  — теплота сгорания газа газификации, Дж/м<sup>3</sup>.

Скорость выгазовывания угольного пласта:

$$I = \frac{V}{0,506 \cdot \eta^{-1,9} \cdot m \cdot (0,702 - 0,659 \cdot \eta)}, \text{ т/час.}, \quad (2.18)$$

где  $V$  — абсолютный водоприток в зоны газификации, м<sup>3</sup>/час.;

$m$  — мощность угольного пласта, м.

### Контрольный пример

Рассчитать интенсивность выгазовывания угольного пласта для следующих условий:

- 1) низшая теплота сгорания рабочей массы угля  $Q_i' = 28900000$  Дж/кг;
- 2) влажность рабочей массы угля  $W_i' = 8\%$ ;
- 3) содержание горючих газов в продукте:  $O_2'$  — 0,20%;  $CO'$  — 9,06%;  $H_2'$  — 14,45%;  $H_2S'$  — 0,07%;  $CH_4'$  — 2,72%;  $C_2H_4'$  — 1,02%;
- 4) утечка газа  $U_y$  — 6,9%;
- 5) теплота сгорания газа газификации  $Q_{из} = 4190000$  Дж/м<sup>3</sup>;
- 6) абсолютный водоприток в зоны газификации  $U = 5$  м<sup>3</sup>/час.;
- 7) мощность пласта  $m = 2,0$  м.

### Решение

1. Теоретический объем сухого воздуха, необходимого для полного сгорания угля:

$$V_{ca}^o = \alpha \cdot \frac{0,001 \cdot Q_i' + 25,1 \cdot W_i'}{4186} = \frac{1,1 \cdot (0,001 \cdot 2,89 \cdot 10^7 + 25,1 \cdot 8)}{4186} = 7,65 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

2. Коэффициент избытка воздуха:

$$\alpha = \left[ 1 - \frac{(21 - x^o) \cdot O_2^o}{2100} \right] \times \left( \frac{21}{21 - O_2^o + 0,5CO^o + 0,5H_2^o + 1,5H_2S^o + 2CH_4^o + 3C_2H_4^o} \right) = \left[ 1 - \frac{(21 - 18,2) \cdot 0,2^o}{2100} \right] \times \left( \frac{21}{21 - 0,2 + 0,5 \cdot 9,06 + 0,5 \cdot 14,45 + 1,5 \cdot 0,07 + 2 \cdot 2,72 + 3 \cdot 1,02} \right) = 0,51.$$

4. Коэффициент, учитывающий утечки газа:

$$K_y = 1 - \frac{U_y}{100} = 1 - \frac{6,9}{100} = 0,931.$$

4. Реальный выход сухого газа ПГУ:

$$V_{cz}' = V_{ca}^o \cdot (\alpha + 0,01 \cdot x' - 0,21) \cdot K_y = 7,65 \cdot (0,51 + 0,01 \cdot 18,2 - 0,21) \times 0,931 = 3,68 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

5. Химический к.п.д.:

$$\eta = \frac{Q_{из} \cdot V_{cz}'}{Q_i'} = \frac{4,19 \cdot 10^6 \cdot 3,68}{2,89 \cdot 10^7} = 0,533$$

6. Скорость выгазовывания угольного пласта (т/час.):

$$I = \frac{U}{0,506 \cdot \eta^{-1,9} \cdot m \cdot (0,702 - 0,659 \cdot \eta)} = \frac{5}{0,506 \cdot 0,533^{-1,9} \cdot 2,0 \cdot (0,702 - 0,659 \cdot 0,533)} = 4,26, \text{ т/час}$$

### Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите основные стадии ПГУ.
2. Назовите горючие газы в составе продуктов подземной газификации.
3. Чем объясняются утечки газов ПГУ?
4. Объясните физическую сущность химического к.п.д. ПГУ.
5. Как зависит скорость выгазовывания от мощности пласта?

Варианты исходных данных приведены в табл. 2.2. Недостающие исходные данные принимайте из контрольного примера.

Таблица 2.2

## Варианты исходных данных

Номер варианта	Исходные данные				
	$Q_i \cdot 10^6$ , Дж/кг	$W_i$ , %	$U_i$ , %	$U$ , м <sup>3</sup> /час	$m$ , м
1	28,0	5	5	3,0	1,0
2	27,0	6	7	3,5	1,5
3	26,0	7	9	4,0	2,0
4	25,0	8	11	4,5	2,5
5	29,0	9	5	5,0	3,0
6	30,0	8	7	5,5	3,5
7	31,0	7	9	6,0	4,0
8	28,0	6	11	5,5	4,5
9	29,0	5	5	5,0	5,0
10	30,0	6	7	4,5	5,5

Литература

1. Янченко Г.А. Тепловой баланс процесса подземной газификации угля. Учебное пособие. - М.: МГИ. 1988. - 42 с.
2. Крейнин Е.В. и др. Подземная газификация угольных пластов. - М.: Недра, 1982. - 151 с.

**2.2.4****Лабораторная работа №4  
Выбор оптимальных технологических параметров скважинной гидродобычи полезных ископаемых**

Цель работы. Изучить методику оптимизации технологических параметров геотехнологии.

Теоретические сведения. Многоцелевой характер деятельности предприятия СГД осложняет процесс приня-

раметров. Сложен сам по себе и выбор критерия оценки, единого мнения о нем пока нет.

В последнее время все чаще таким критерием считают суммарную прибыль. Ориентировочно можно оценить оптимальные параметры технологии, исследовав зависимость:

$$\Pi = f(R), \text{ руб./т}, \quad (2.19)$$

где  $\Pi$  — удельная расчетная прибыль от добычи полезного ископаемого, руб./т;

$R$  — радиус камеры, м.

Оценивая прибыль как разность между ценой и себестоимостью, необходимо рассчитать следующие затраты:

- затраты на заработную плату;
- амортизационные отчисления;
- затраты на электроэнергию;
- условно-постоянные расходы;
- расходы на воду.

Расчет ведется в следующей последовательности:

Пошаговые запасы полезного ископаемого одной скважиной:

$$V_{скв} = \pi \cdot R^2 \cdot m \cdot \rho, \text{ т}, \quad (2.20)$$

где  $m$  — мощность залежи, м;

$\rho$  — плотность полезного ископаемого, т/м<sup>3</sup>.

Потери полезного ископаемого в целиках между камерами:

$$Q_{пц} = a^2 \cdot m \cdot \rho - V_{скв}, \text{ т}, \quad (2.21)$$

где  $a$  — расстояние между добычными скважинами, м.

Суммарные потери полезного ископаемого на участке, обрабатываемом одной скважиной:

где  $C_I$  — коэффициент извлечения отбитого полезного ископаемого; ориентировочно  $C_I = 0,95$ .

Продолжительность отработки запасов одной скважиной:

$$t_{доб} = \frac{V_{скв} \cdot C_I}{\Pi'}, \text{ час}, \quad (2.23)$$

где  $\Pi'$  — техническая производительность добычного агрегата по рабочему циклу, т/час.

Время работы одной скважины:

$$t_{скв} = t_m + t_{дем} + t_{доб}, \text{ час}, \quad (2.24)$$

где  $t_m$  — время на монтаж добычного оборудования, час.;

$t_{дем}$  — время на демонтаж добычного оборудования, час.;

Затраты на заработную плату по одной скважине:

$$C_{зар} = \frac{Z_o \cdot n \cdot t_{скв}}{V_{скв} \cdot C_I \cdot T_{см}}, \text{ руб./т}, \quad (2.25)$$

где  $Z_o$  — часовая тарифная ставка рабочего, руб.; ориентировочно  $Z_o = 8,6$  руб. (на 1.01.91);

$n$  — численность звена, чел.; ориентировочно  $n = 3$  чел.;

$T_{см}$  — продолжительность смены, час.; принимается  $T_{см} = 7$  час.

Амортизационные отчисления на скважину:

$$C_{амс} = \frac{C_{скв}}{V_{скв} \cdot C_I}, \text{ руб./т}, \quad (2.26)$$

где  $C_{скв}$  — затраты на сооружение скважины и ее обустройство, руб.

Амортизационные отчисления на добычное оборудование одной скважины:

$$C_{амд} = \frac{C_d \cdot H_d \cdot t_{скв}}{100 \cdot t_{доб} \cdot \Pi' \cdot N_n \cdot T_{доб} \cdot T_{см}}, \text{ руб./т}, \quad (2.27)$$

где  $C_d$  — стоимость добычного оборудования одной скважины, руб.;

$H_d$  — норма амортизации добычного оборудования, %; ориентировочно  $H_d = 3,3$  %;

$T_{доб}$  — число рабочих дней в году,  $T_{доб} = 305$  сут.;

$N_p$  — число добычных смен в сутки.

Амортизационные отчисления на общее оборудование:

$$C_{ам.об} = \frac{C_{об} \cdot H_{об}}{100 \cdot A_{зод}}, \text{ руб./т}, \quad (2.28)$$

где  $C_{об}$  — стоимость общего оборудования, зданий и сооружений, руб.;

$H_{об}$  — средняя норма амортизации общего оборудования, зданий и сооружений, %; ориентировочно  $H_{об} = 10$  %;

$A_{зод}$  — производственная мощность предприятия, т/год.

Суммарные амортизационные отчисления:

$$C_{ам} = C_{амс} + C_{амд} + C_{ам.об}, \text{ руб./т}, \quad (2.29)$$

Затраты на воду:

$$C_{ед} = q_e \cdot C_e, \text{ руб./т}, \quad (2.30)$$

где  $q_e$  — удельный расход воды на добычу, м<sup>3</sup>/т;

$C_e$  — стоимость технической воды, руб./м<sup>3</sup>;  $C_e = 0,069$  руб./м<sup>3</sup> (на 1.01.91).

Условно-постоянные расходы:

$$C_{ун} = (C_{зар} + C_{ам} + C_{ед} + C_{эл}) \cdot K_{ун}, \text{ руб./т}, \quad (2.31)$$

где  $K_{ун}$  — коэффициент, учитывающий условно-постоянные расходы; ориентировочно можно принимать  $K_{ун} = 0,2$ ;

$C_{эл}$  — удельные затраты на электроэнергию, руб./т; ориентировочно  $C_{эл} = 0,40$  руб./т (на 1.01.91).

Суммарная себестоимость добытого полезного ископаемого:

$$C = C_{зxp} + C_{ам} + C_{ед} + C_{эл} + C_{м} + \frac{(V_{срд} + Q_{св}) * C_{раз}}{V_{доб} * C_1} \text{ руб./т, (2.32)}$$

где  $C_{раз}$  — затраты на разведку и подготовку запасов к отработке, руб./т.

Прибыль расчетная:

$$\Pi = (\Pi - C) \cdot A_{зод} \text{ руб./год, (2.33)}$$

где  $\Pi$  — цена полезного ископаемого, руб./т.

### Контрольный пример

Рассчитать прибыль предприятия скважинной гидродобычи для следующих условий (цены даны на 1.01.91):

1. мощность залежи  $m = 2,0$  м;
2. плотность полезного ископаемого  $\rho = 1,6$  т/м<sup>3</sup>;
3. расстояние между добычными скважинами  $a = 20$  м;
4. радиус камеры  $R = 8$  м;
5. техническая производительность скважинного агрегата  $\Pi' = 60$  т/час.;
6. время на монтаж добычного оборудования  $t_m = 8$  час.;
7. время на демонтаж добычного оборудования  $t_{дем} = 10$  час.;
8. затраты на сооружение скважины  $C_{скв} = 800$  руб.;
9. стоимость добычного оборудования одной скважины  $C_d = 10000$  руб.;
10. стоимость общего оборудования  $C_{об} = 100000$  руб.;
11. производственная мощность предприятия

12. удельный расход воды  $q_e = 8$  м<sup>3</sup>/т;

13. затраты на разведку и подготовку запасов  $C_{раз} = 0,5$  руб./т;

14. расчетная цена  $\Pi = 6,5$  руб./т.

### Решение

1. Погашаемые запасы полезного ископаемого с одной скважины:

$$V_{скв} = \pi \cdot R^2 \cdot m \cdot \rho = 3.14 \cdot 8^2 \cdot 2.0 \cdot 1.6 = 644 \text{ т.}$$

2. Потери полезного ископаемого в целиках между камерами:

$$Q_{нц} = a^2 \cdot m \cdot \rho - V_{скв} = 20^2 \cdot 2.0 \cdot 1.6 - 644 = 636 \text{ т.}$$

3. Суммарные потери на участке, обрабатываемом одной скважиной:

$$Q = Q_{нц} + V_{скв} \cdot (1 - C_1) = 636 + 644(1 - 0.95) = 668 \text{ т.}$$

4. Продолжительность отработки запасов одной скважиной:

$$t_{доб} = \frac{V_{скв} \cdot C_1}{\Pi'} = \frac{644 \cdot 0.95}{60} = 10.2 \text{ час.}$$

5. Время работы одной скважины:

$$t_{скв} = t_m + t_{дем} + t_{доб} = 8 + 10 + 10.2 = 28.2 \text{ час.}$$

6. Затраты на заработную плату по одной скважине:

$$C_{зxp} = \frac{Z_o \cdot n \cdot t_{скв}}{V_{скв} \cdot C_1 \cdot T_{см}} = \frac{8.6 \cdot 3 \cdot 28.2}{644 \cdot 0.95 \cdot 7} = 0.17 \text{ руб./т.}$$

7. Амортизационные отчисления на скважину:

$$C_{амс} = \frac{C_{скв}}{V_{скв} \cdot C_1} = \frac{800}{644 \cdot 0.95} = 1.31 \text{ руб./т.}$$

8. Амортизационные отчисления на добычное оборудование:

$$C_{амд} = \frac{C_d \cdot H_d \cdot t_{скв}}{100 \cdot t_{доб} \cdot \Pi' \cdot N_p \cdot T_{доб} \cdot T_{см}} = \frac{10000 \cdot 33 \cdot 28.2}{100 \cdot 10.2 \cdot 60 \cdot 2 \cdot 305 \cdot 7} = 0.04 \text{ руб./т}$$

9. Амортизационные отчисления на общее оборудование:

$$C_{ам.об} = \frac{C_{об} \cdot H_{об}}{100 \cdot A_{2од}} = \frac{1000000 \cdot 10}{100 \cdot 200000} = 0.5 \text{ руб./т.}$$

10. Суммарные амортизационные отчисления:

$$C_{ам} = C_{ам.с.} + C_{ам.д.} + C_{ам.об.} = 1.31 + 0.04 + 0.5 = 1.85 \text{ руб./т.}$$

11. Затраты на воду:

$$C_{ед} = q_e \cdot C_e = 8 \cdot 0.069 = 0.55 \text{ руб./т.}$$

12. Условно-постоянные расходы:

$$C_{уп} = (C_{зар.} + C_{ам} + C_{ед} + C_{эл}) \cdot K_{уп} = (0.17 + 1.85 + 0.55 + 0.40) \times 0.2 = 0.59 \text{ руб./т}$$

13. Суммарная себестоимость:

$$C = C_{зар.} + C_{ам} + C_{ед} + C_{эл} + C_{уп} + \frac{(V_{скв} + Q_{пл}) \cdot C_{раз}}{V_{скв} \cdot C_1} = 0.17 + 1.85 + 0.55 + 0.40 + 0.59 + \frac{(644 + 636) \cdot 0.5}{644 \cdot 0.95} = 4.61 \text{ руб./т}$$

14. Расчетная себестоимость:

$$\Pi = (Ц - C) \cdot A_{2од} = (6.5 - 4.61) \cdot 200000 = 378000 \text{ руб.}$$

Аналогичным образом производится расчет для различных значений  $R$  и определяется область оптимальных значений.

### Вопросы для самоконтроля.

1. Почему задача оптимизации параметров технологии СГД является многокритериальной?
2. Какие виды затрат учитываются в методике расчета?
3. Какие затраты оказывают наиболее существенное влияние на себестоимость?
4. Если при увеличении радиуса камеры возрастает зольность, каким образом изменится расчетная прибыль?
5. При увеличении расстояния между скважинами и постоянном размере целика, как изменится прибыль?

Варианты исходных данных приведены в табл. 2.3. Недостающие исходные данные принять из контрольного примера.

Таблица 2.3

Варианты исходных данных

Вариант	Исходные данные					
	$m, \text{ м}$	$a, \text{ м}$	$R, \text{ м}$	$\Pi', \text{ т/час.}$	$A_{2од}, \text{ т/год.}$	$C_{раз}, \text{ руб/т}$
1	2	3	4	5	6	7
1	1,0	25	10	30	100 000	0,40
2	1,5	20	8	40	150 000	0,45
3	2,0	18	7	50	200 000	0,50
4	2,5	20	8	60	250 000	0,55
5	3,0	25	10	70	300 000	0,60

Продолжение таблицы 2.3

1	2	3	4	5	6	7
6	2,5	20	9	60	350 000	0,65
7	2,0	18	7	50	400 000	0,60
8	1,5	18	6	40	350 000	0,55
9	1,0	20	9	30	300 000	0,50
10	1,5	25	10	20	250 000	0,45

### Литература

1. Аренс В.Ж., Исмагилов Б.В., Шпак Д.Н. Скважинная гидродобыча твердых полезных ископаемых. - М.: Недра, 1980.-230 с.
2. Аренс В.Ж. Скважинная добыча полезных ископаемых. (геотехнология). - М.: Недра, 1986.- 279 с.

### 2.2.5

#### Лабораторная работа №5 Расчет параметров технологии подземного выщелачивания

**Цель работы.** Изучение методики расчета основных параметров подземного выщелачивания.

**Теоретические сведения.** Для выщелачивания обычно используются водные растворы минеральных кислот или солей карбонатов щелочных металлов.

Кислотный способ дает более высокое извлечение, но отличается меньшей, чем у карбонатного способа, селективностью.

Процесс выщелачивания в недрах сводится к переводу минералов из твердой фазы в жидкую за счет их взаимодействия с химическим реагентом.

Увеличение концентрации кислоты при выщелачивании повышает скорость растворения урановых минералов и уменьшает период насыщения пласта химическим рас-

творителем, повышая в то же время его расход на реакцию с породой.

К основным геотехнологическим показателям относятся:

- концентрация металла в продуктивных растворах;
- суммарный дебит скважины;
- дебит откачной скважины;
- число одновременно работающих скважин;
- продолжительность отработки блоков, рядов, ячеек;
- время появления продуктивных растворов в откачных скважинах;
- расход и концентрация растворителя и окислителя;
- размеры повышения и понижения уровня в рабочих скважинах.

Расчет основных параметров выщелачивания ведется в следующей последовательности [5].

Концентрация металла в продуктивных растворах:

$$C_{cp} = \frac{E \cdot P \cdot d}{f \cdot M \cdot \gamma \cdot F}, \quad (2.34)$$

- где  $E$  — коэффициент извлечения металла;
- $P$  — запасы металла на обрабатываемой площади, т;
- $d$  — плотность продуктивного раствора, т/м<sup>3</sup>;
- $f$  — отношение массы выщелачиваемого раствора к массе руды;
- $M$  — средняя мощность пород, прорабатываемая выщелачивающим раствором, м;
- $\gamma$  — объемная масса руды, т/м<sup>3</sup>;
- $F$  — обрабатываемая площадь, м<sup>2</sup>.

Суммарный дебит откачных скважин при эксплуатации:

$$Q_s = \frac{M_e}{C_{cp} \cdot T} \text{ т/сут}, \quad (2.35)$$

где  $M_c$  — проектная годовая производительность предприятия по металлу, т;

$T$  — расчетное число рабочих дней в году, сут.

Дебит откачной скважины:

$$q = M \cdot b \cdot V \text{ т/сут,} \quad (2.36)$$

где  $b$  — средняя ширина потоков растворов,двигающихся к откачной скважине, м;

$V$  — оптимальная скорость фильтрации растворов, м/сут.

Число одновременно работающих откачных скважин:

$$N = \frac{Q_s}{q}, \quad (2.37)$$

Продолжительность отработки площади,приходящейся на одну откачную скважину:

$$t_o = \frac{f \cdot \gamma \cdot M \cdot F_o}{d \cdot q} \text{ сут,} \quad (2.38)$$

где  $F_o$  — площадь отработки,приходящаяся на одну откачную скважину, м<sup>2</sup>.

Время появления продуктивных растворов в откачных скважинах:

$$t_n = \frac{M \cdot n \cdot l \cdot b}{q} \text{ сут,} \quad (2.39)$$

где  $n$  — эффективная пористость;

$l$  — среднее расстояние между откачными и закачными скважинами, м.

Суммарный дебит непродуктивных растворов:

$$Q_n = \frac{Q_n \cdot t_n}{t_o} \text{ т/сут.} \quad (2.40)$$

Уточненное значение средней концентрации металла в растворе при отводе непродуктивных растворов по отдельному трубопроводу:

$$C = \frac{Q_s \cdot C_{cp}}{(Q_s - Q_n)} \quad (2.41)$$

Затраты растворителя на химические реакции с горнорудной массой и на заполнение продуктивного горизонта:

$$P_p = \frac{E \cdot P}{M_c} (Q_s - Q_n) (C_p + C_k) \cdot T \text{ м}^3, \quad (2.42)$$

где  $C_p$  — заданная концентрация растворителя в выщелачивающем растворе;

$C_k$  — концентрация растворителя в извлекаемом растворе.

### Контрольный пример

Определить среднюю концентрацию металла в растворе и затраты растворителя для следующих условий:

1. коэффициент извлечения металла  $E = 0,6$ ;
2. запасы металла на обрабатываемой площади  $P = 1500$  т;
3. плотность продуктивного раствора  $d = 1,2$  т/м<sup>3</sup>;
4. отношение массы выщелачиваемого раствора к массе руды  $f = 0,5$ ;
5. средняя мощность пород, прорабатываемых раствором  $M = 6$  м;
6. объемная масса руды  $\gamma = 2,8$  т/м<sup>3</sup>;
7. обрабатываемая площадь  $F = 160\,000$  м<sup>2</sup>;
8. проектная годовая мощность предприятия по металлу  $M_c = 200$  т;
9. расчетное число рабочих дней в году  $T = 300$  сут.;

10. средняя ширина потоков растворов  $b = 5$  м;
11. скорость фильтрации  $V = 4$  м/сут.;
12. площадь отработки, приходящаяся на одну скважину  $F_o = 100$  м<sup>2</sup>;
13. эффективная пористость  $n = 0,4$ ;
14. расстояние между откачными и закачными скважинами  $l = 10$  м;
15. концентрация растворителя в выщелачиваемом растворе  $C_p = 0,005$ ;
16. концентрация растворителя в извлекаемом растворе  $C_k = 0,002$ .

### Решение

1. Концентрация металла в продуктивных растворах:

$$C_{cp} = \frac{E \cdot P \cdot d}{f \cdot M \cdot \gamma \cdot F} = \frac{0,6 \cdot 1500 \cdot 1,2}{0,5 \cdot 6 \cdot 2,8 \cdot 160000} = 8,14 \cdot 10^{-4}$$

2. Суммарный дебит откачных скважин:

$$Q_2 = \frac{M_e}{C_{cp} \cdot T} = \frac{200}{8,04 \cdot 10^{-4} \cdot 300} = 829 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

3. Дебит откачной скважины:

$$q = M \cdot b \cdot V = 6 \cdot 5 \cdot 4 = 120 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

4. Число одновременно работающих скважин:

$$N = \frac{Q_2}{q} = \frac{829}{120} = 6,91$$

5. Продолжительность отработки запасов одной скважины:

$$t_o = \frac{f \cdot \gamma \cdot M \cdot F_o}{d \cdot q} = \frac{0,5 \cdot 2,8 \cdot 6 \cdot 100}{1,2 \cdot 120} = 5,83 \text{ сут.}$$

6. Время появления продуктивных растворов:

$$t_n = \frac{M \cdot n \cdot l \cdot b}{q} = \frac{6 \cdot 0,4 \cdot 10 \cdot 5}{120} = 1 \text{ сут.}$$

7. Суммарный дебит непродуктивных растворов:

$$Q_n = \frac{Q_2 \cdot t_n}{t_o} = \frac{829 \cdot 1}{5,83} = 142 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

8. Уточненная средняя концентрация металла:

$$C = \frac{Q_2 \cdot C_{cp}}{(Q_2 - Q_n)} = \frac{829 \cdot 8,04 \cdot 10^{-4}}{(829 - 142)} = 9,7 \cdot 10^{-4}$$

9. Затраты растворителя:

$$P_p = \frac{E \cdot P}{M_e} (Q_2 - Q_n) (C_p + C_k) \cdot T = \\ = \frac{0,6 \cdot 1500}{200} (829 - 142) (0,005 - 0,002) \cdot 300 = 2,78 \cdot 10^3 \text{ т}$$

### Вопросы для самоконтроля

1. В чем заключается смысл подземного выщелачивания?
2. Почему не оправдано повышение концентрации кислоты для выщелачивания?
3. Объясните характер зависимости концентрации от соотношения Ж:Т в процессе.
4. Что показывает время  $t_n$ ?
5. Почему необходимо проводить уточнение концентрации за счет  $Q_n$ ?

Варианты исходных данных приведены в табл. 2.4. Недостающие исходные данные принимайте из контрольного примера.

Таблица 2.4

## Варианты исходных данных

Варианты	Исходные данные					
	$P, \text{т}$	$f, \text{м}^2$	$M_e, \text{т}$	$V, \text{м/сут.}$	$F_0, \text{м}^2$	$C_p$
1	2	3	4	5	6	7
1	1500	50000	50	2	100	0,003
2	2000	75000	100	4	125	0,004
3	2500	100000	150	6	150	0,005
4	2000	125000	200	8	175	0,006
5	1500	150000	250	6	200	0,007
6	1000	175000	100	4	175	0,006
7	500	200000	50	2	150	0,005
8	1000	225000	100	2	125	0,004
9	1500	250000	150	4	100	0,004
10	2000	275000	200	6	75	0,005

**Литература**

1. Добыча урана методом подземного выщелачивания. Под ред. В.А.Мамилова. - М.: 1980.-248 с.
2. Аренс В.Ж. Скважинная добыча полезных ископаемых (геотехнология). - М.: Недра. 1986.-279 с.

**2.2.6.****Лабораторная работа №6  
Расчет технико-экономических показателей геотехнологии**

**Цель работы.** Изучение особенностей методики расчета технико-экономических показателей геотехнологии.

**Теоретические сведения.** Существенные отличия

словливают определенную специфичность способов сравнительной оценки методов. Основное отличие в том, что при геотехнологии получают готовый продукт, а при открытой и подземной разработке — горную массу.

При сравнении необходимо учитывать затраты на весь передел руды до конечного продукта [2].

Эффективность разработки основывается на трех основных показателях:

- удельные капиталовложения;
- себестоимость;
- производительность труда.

Кроме этих основных показателей необходимо также учитывать:

- рентабельность;
- срок окупаемости затрат;
- время строительства предприятия;
- коэффициент фондоотдачи;
- годовой экономический эффект;
- снижение потребности и дефицита в оборудовании и материалах.

Необходимо учитывать также социальный фактор — условия охраны труда, по которому геотехнология имеет преимущества, т.к. обеспечивает выемку полезного ископаемого без присутствия людей в очистном забое.

Недостатки традиционных методов по сравнению с геотехнологией:

1. не обеспечивают высоких технико-экономических показателей;
2. неудовлетворительна динамика фондоотдачи из-за высокого удельного веса пассивных фондов (горных выработок);
3. высокая фондоемкость и капиталоемкость;

4. в течение всего периода эксплуатации приходится регулярно подготавливать все новые и новые участки для добычи, привлекая большие средства.

В связи с этим имеются некоторые особенности в оценке методов геотехнологической разработки месторождений полезных ископаемых.

Ниже приведена последовательность определения некоторых показателей.

Коэффициент фондоотдачи определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_o = \frac{M \cdot C_o}{K}, \quad (2.43)$$

где  $M$  — годовой объем конечной продукции, т;  
 $C_o$  — оптовая цена конечной продукции, руб./т;  
 $K$  — капитальные затраты, руб.

Показатель рентабельности определяется из выражения:

$$\mathcal{E}_p = \frac{M(C_o - C)}{\Phi_o + \Phi_{об}}, \quad (2.44)$$

где  $C$  — себестоимость готовой продукции, руб./т;  
 $\Phi_o$  — среднегодовая стоимость основных производственных фондов, руб.;  
 $\Phi_{об}$  — среднегодовая стоимость нормируемых оборотных средств, руб.

Срок окупаемости капиталовложений является величиной, обратной показателю рентабельности:

$$T = \frac{1}{\mathcal{E}_p} \text{ лет.} \quad (2.45)$$

Приведенная себестоимость готовой продукции:

$$C_n = C + \frac{e_n \cdot K}{M} \text{ руб./т,} \quad (2.46)$$

где  $e_n$  — нормативный отраслевой коэффициент экономической эффективности.

Ценность месторождения определяется из выражения:

$$Ц = (C_o - C_n) \cdot 3 \text{ руб.,} \quad (2.47)$$

Допустимая себестоимость полезного ископаемого определяется по формуле:

$$C_o = C_n - \frac{K \cdot e_n}{M(1 - \frac{1}{(1 - e_n)^m})} \text{ руб./т,} \quad (2.48)$$

Экономическая эффективность геотехнологического метода рассчитывается по соотношению:

$$\mathcal{E}_e = (C_1 + \frac{e_n \cdot K_1}{M_1}) - (C + e_n \cdot \frac{K}{M}) \text{ руб./т,} \quad (2.49)$$

где  $C_1$  — себестоимость готовой продукции при традиционных методах разработки месторождений полезных ископаемых, руб./т;

$K_1$  — капитальные затраты при традиционных методах, руб.;

$M_1$  — годовой объем конечной продукции на предприятии при традиционной технологии, т.

### Контрольный пример

Определить показатели экономической эффективности геотехнологического метода по сравнению с методом подземной разработки для следующих условий.

1. годовой объем конечной продукции при геотехнологии  $M = 500000$  т;
2. годовой объем конечной продукции при подземной разработке  $M_1 = 5000000$  т;
3. оптовая цена конечной продукции  $C_o = 100$  руб./т;
4. капитальные затраты при геотехнологии  $K = 1500000$  руб.

5. капитальные затраты при подземной разработке  $K_I = 150000000$  руб.;
6. себестоимость готовой продукции при геотехнологии  $C = 72$  руб./т;
7. себестоимость готовой продукции при подземной разработке  $C_I = 69$  руб./т;
8. среднегодовая стоимость основных производственных фондов при геотехнологии  $\Phi_o = 10000000$  руб.;
9. среднегодовая стоимость нормируемых оборотных средств  $\Phi_{об} = 600000$  руб.;
10. нормативный отраслевой коэффициент экономической эффективности капиталовложений  $e_n = 0,15$ ;
11. промышленные запасы полезного ископаемого  $Z = 160000000$  т.

### Решение

1. Коэффициент фондоотдачи для геотехнологии:

$$\mathcal{E}_o = \frac{M \cdot C_o}{K} = \frac{500000 \cdot 100}{15000000} = 3.33$$

2. Показатель рентабельности для геотехнологии:

$$\mathcal{E}_p = \frac{M(C_o - C)}{\Phi_o + \Phi_{об}} = \frac{500000 \cdot (100 - 72)}{10000000 + 6000000} = 0.875$$

3. Срок окупаемости капиталовложений при геотехнологии:

$$T = \frac{1}{\mathcal{E}_p} = \frac{1}{0.875} = 1.14 \text{ лет.}$$

4. Приведенная себестоимость готовой продукции при геотехнологии:

$$C_n = C + \frac{e_n \cdot K}{M} = 72 + \frac{0.15 \cdot 150000000}{500000} = 76.5 \text{ руб./т.}$$

$$Ц = (C_o - C_n) \cdot Z = (100 - 76.5) \cdot 160000000 = 3.76 \cdot 10^9 \text{ руб.}$$

6. Допустимая себестоимость полезного ископаемого:

$$C_o = C_n - \frac{K \cdot e_n}{M(1 - \frac{1}{(1 - e_n)^n})} = 100 - \frac{15000000 \cdot 0.15}{500000(1 - \frac{1}{(1 + 0.15)^{1.14}})} = 69.4 \text{ руб./т}$$

7. Экономическая эффективность геотехнологического метода по сравнению с подземной разработкой:

$$\mathcal{E}_z = (C_I + \frac{e_n \cdot K_I}{M_I}) - (C + e_n \cdot \frac{K}{M}) = (69 + \frac{0.15 \cdot 150000000}{5000000}) - (72 + 0.15 \cdot \frac{150000000}{500000}) = -3 \text{ руб./т}$$

Знак «минус» перед значением экономической эффективности геотехнологии показывает, что в данных условиях геотехнология не эффективна и уступает подземной разработке.

### Вопросы для самоконтроля

1. Каковы основные отличия геотехнологии от прочих методов разработки месторождений полезных ископаемых?
2. Назовите основные показатели эффективности разработки месторождения полезного ископаемого.
3. Перечислите основные недостатки традиционных методов по сравнению с геотехнологией.
4. Как связаны между собой показатель рентабельности и срок окупаемости?
5. Каков смысл нормативного отраслевого коэффициента экономической эффективности капиталовложений?

Варианты исходных данных приведены в табл. 2.5. Недостающие исходные данные принимайте из контрольного примера.

Таблица 2.5

**Варианты исходных данных**

Варианты	Исходные данные						
	<i>M</i> , тыс.т	<i>C<sub>0</sub></i> , руб./т	<i>K</i> , млн.руб.	<i>C</i> , руб./т	<i>Φ<sub>0</sub></i> , млн.руб.	<i>Z</i> , млн.т	<i>C<sub>1</sub></i> , руб./т
1	2	3	4	5	6	7	8
1	500	300	5,0	270	4,0	150	275
2	720	280	6,5	264	5,5	250	250
3	480	350	5,4	300	4,4	180	310
4	650	325	4,9	275	3,9	400	260
5	725	287	6,0	270	5,0	320	280
6	545	320	5,2	300	4,2	170	290
7	520	270	4,8	250	3,8	200	260
8	620	300	5,0	270	4,0	140	280
9	560	280	5,7	260	4,7	210	270
10	560	275	4,5	250	4,5	150	260

**Литература**

1. *Аренс В.Ж.* Скважинная добыча полезных ископаемых (геотехнология). - М.: Недра, 1986, -279 с.

**Часть 3**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО  
ПРОЕКТА**

3.1. Цель и задачи курсового проектирования

3.2. Организация выполнения курсового проектирования

3.3. Оформление курсового проекта

3.4. Инструкция по выполнению курсового проекта

### **3.1.**

#### **Цель и задачи курсового проектирования.**

---

В ходе выполнения курсового проекта студент углубляет и закрепляет полученные за время обучения знания, приобретает навыки конкретного проектирования и самостоятельной творческой научно-исследовательской работы.

При выполнении курсового проекта необходимо ориентироваться на последние достижения научно-технического прогресса в горнодобывающей и смежных отраслях промышленности.

Теоретической базой при выполнении курсового проекта являются знания, полученные студентами при изучении курса «Геотехнологические способы разработки пластовых месторождений», циклов горных, геологических, общетехнических и общеобразовательных дисциплин.

### **3.2**

#### **Организация выполнения курсового проекта**

---

Задание и титульный лист курсового проекта по принятой форме выдаются студентам в начале IX семестра преподавателем, осуществляющим руководство курсовым проектированием. Задание составляется применительно к условиям конкретного месторождения и предусматривает определенный геотехнологический способ разработки. Спо-

соб разработки и конкретное месторождение задаются преподавателем по согласованию со студентом. Вместе с заданием указывается основная литература.

Кроме того, на консультациях, проводимых преподавателем еженедельно, указываются дополнительная справочная литература, компьютерные программы, отчеты по НИР и ОКР, ГОСТы, типовые проекты и т.п.

Курсовая работа выполняется в течение всего семестра и по мере выполнения руководитель ежемесячно контролирует качество и объем законченных частей.

Законченный курсовой проект — пояснительная записка с приложением результатов расчетов на ЭВМ и чертежи — защищаются перед комиссией кафедры, которая выносит окончательную оценку. Принятый и зачтенный курсовой проект сдается на кафедру для хранения. При неудовлетворительной оценке курсовой проект возвращается для исправления или дополнения, либо выдается новое задание.

### **3.3.**

#### **Оформление курсового проекта.**

---

Курсовой проект включает пояснительную записку в пределах 20-25 страниц, включая необходимый иллюстрационный материал и один лист чертежей формата А1 (594x841мм).

В начале пояснительной записки (после титульного листа) прилагается оригинал индивидуального задания на разработку курсового проекта. Далее следует реферат и ог-

лавление с указанием всех разделов курсового проекта и номеров соответствующих страниц. В тексте даются обоснования принятых технологических решений, их описания. Необходимые пояснения к эскизам и чертежам, а также все расчеты, сведенные, по возможности, в таблицы.

Не допускается помещение в записку выдержек из учебников, учебных пособий, монографий, журнальных статей. Не допускается произвольно опускать отдельные разделы проекта без согласования с руководителем.

В конце пояснительной записки помещается пронумерованный список всей использованной при выполнении курсового проекта литературы, оформленный в соответствии с действующим стандартом. В тексте указываются ссылки в квадратных скобках на номер литературного источника, помещенного в списке литературы, в порядке упоминания.

Пояснительная записка составляется на листах писчей бумаги стандартного формата 203x288мм на одной стороне с оставлением полей слева (30мм) и справа (10мм). Текст пояснительной записки может быть написан разборчиво от руки, напечатан на пишущей машинке или набран на компьютере. Изложение материала должно вестись технически грамотным языком, лаконичным и ясным.

В пояснительной записке приводятся необходимые расчеты, излагается обоснование принимаемых решений и их описания, даются основные организационно-технические показатели.

При проведении расчетов вначале приводится формула, при этом дается ссылка на литературный источник, приводятся пояснения и цифровые значения буквенных обозначений, входящих в формулу, а затем числовые зна-

чения подставляются в формулу и приводится результат расчета.

Графики, эскизы, схемы, помещаемые в пояснительной записке, должны быть выполнены аккуратно с соблюдением общепринятых обозначений и масштаба. Рисунки должны иметь самостоятельную сплошную нумерацию и подрисовочные надписи в соответствии с ГОСТом.

На демонстрационном листе приводится общий вид обрабатываемого участка шахтного поля в плане и разрезе по одной из геологоразведочных линий с указанием разбиения на выемочные блоки. Отдельно на листе показывается конструкция геотехнологических скважин, размещение добычного оборудования на различных стадиях отработки. Указывается структурная схема промысла.

Чертежи выполняются в карандаше или тушью в соответствии с ГОСТом. Конкретное размещение материала на листе согласовывается с преподавателем.

Реферат, приводимый в работе, должен содержать:

- индекс УДК;
- сведения об объеме, количестве иллюстраций, демонстрационных листов, таблиц, использованных источников;
- перечень ключевых слов;
- текст реферата на русском и изучаемом студентом иностранном языке.

Индекс УДК проставляется в соответствии с таблицами УДК после консультации в научно-библиографическом отделе библиотеки МГТУ.

Перечень ключевых слов должен характеризовать содержание курсового проекта и включать от 5 до 15 ключевых слов в именительном падеже, написанных заглавными буквами через запятые. Ключевым словом называется

слово (существительное) или сочетание, выражающее отдельное понятие, существенное для раскрытия содержания текста. Ключевые слова в совокупности должны вне текста давать достаточно полное представление о содержании курсового проекта.

Текст реферата должен содержать:

- объект исследования;
- цель исследования;
- полученные результаты и их новизну;
- эффективность и область применения.

Объем текста реферата должен содержать 1100 — 1200 буквенных знаков.

Не допускается применять в тексте реферата не общепринятые термины, сокращения слов и аббревиатуры.

Ниже приводится инструкция по содержанию курсового проекта. Порядок изложения должен сохраняться и при написании курсового проекта.

## **3.4.** **Инструкция по выполнению** **курсового проекта**

---

### **3.4.1** **Геологическое описание участка месторождения**

#### **3.4.1.1** **Литологическое-стратиграфическое описание участка**

Дается краткое геологическое описание участка месторождения, обрабатываемого геотехнологическим спосо-

бом. При этом описывается: рельеф поверхности, высотные отметки, перепад высот. Указываются размеры участка.

Подробно описывается структурно-литологический разрез участка. При этом указываются мощности слоев покрывающих пород, их прочностные характеристики, водообильность, водоустойчивость, основные физические свойства покрывающих и подстилающих залежь пород.

Подробно описывается пласт полезного ископаемого. При этом описывается его структура с указанием мощности отдельных пачек и прослоек, указываются прочностные характеристики полезного ископаемого и приводятся физические свойства пород, представляющих пачки и прослойки.

Фактологическую информацию по слоям и пачкам желательно приводить в виде таблиц.

Общий объем литолого-стратиграфического описания не должен превышать 4 страницы.

#### **3.4.1.2** **Расчет промышленных запасов участка**

Описывается сеть геологоразведочных скважин. В виде таблицы указываются координаты скважин, высотные отметки рельефа, мощности отдельных слоев покрывающих пород и мощность пласта полезного ископаемого.

Одним из известных методов подсчитываются балансовые запасы участка и с учетом среднестатистического по технологии коэффициента извлечения определяются промышленные.

Общий объем этого параграфа составляет 2 страницы.

### 3.4.2

#### Обоснование технологической схемы промысла

##### 3.4.2.1.

##### Выбор способа отработки запасов участка.

Выбор способа отработки запасов участка осуществляется с помощью табл. 0.1. В работе необходимо дать краткое описание отдельных операций при осуществлении геотехнологического способа разработки месторождений полезных ископаемых используя табл. 3.1.

##### 3.4.2.2

##### Подготовка и вскрытие запасов участка

Объем и содержание работ по подготовке месторождения к отработке зависят от конкретных условий местности. В условиях равнинной сухой местности подготовка сводится к прокладке подъездных путей, линии электро-снабжения, трубопроводов для подачи рабочих агентов и отвода продуктивных флюидов. В условиях заболоченной местности необходимо проведение дренажных работ.

Таблица 3.1

#### Технологическое содержание отдельных операций геотехнологических способов добычи полезных ископаемых

Операции.	Способы осуществления.
1	2
Эксплуатационная разведка.	Уточнение физико-геологической обстановки; получение полной характеристики рудного тела и вмещающих пород; геометризация рудного тела; уточнение запасов; выделение разностей руд; определение гидрогеологических параметров скважин и пласта.

Продолжение таблицы 3.1

1	2
Вскрытие.	Бурение, подготовка и оборудование добычных скважин для обеспечения доступа рабочих агентов к рудному телу; деталлизация строения и состава рудного тела.
Подготовительные работы	Прокладка подъездных дорог, сетей электро-снабжения, участковых трубопроводов, устройство участковых КРП.
Производство рабочих агентов.	Обеспечение добычного участка рабочими флюидами.
Очистная выемка, доставка, подъем.	Перевод полезного компонента в подвижное состояние; управление процессом добычи, доставка к скважине и выдача продуктивного флюида на поверхность.
Управление горным давлением.	Оставление целиков, полное обрушение, закладка камер
Транспорт.	Гидротранспортирование добытых флюидов от добычных скважин на склад и фабрику.
Переработка и складирование	Переработка добытых флюидов, регенерация рабочих флюидов. Размещение в хранилищах отходов и продуктов.
Рекультивация	Вовлечение отторженных горными работами земель в использование, восстановление ценности поверхности земли.

Вскрытие месторождения осуществляется скважинами, которые по своему назначению бывают добычные и вспомогательные (разведочные, водоотливные, контрольные). Вскрытие месторождения состоит из ряда последовательно выполняемых операций: выбора места заложения скважин, уточнение конструкции скважин, бурение и обсадка скважин, геологические, гидрогеологические и геофизические исследования скважин, оборудование скважин

к эксплуатации, оформление документации, сдача скважины в эксплуатацию.

Различают следующие способы вскрытия: отдельной скважиной (вертикальной или наклонной); группой скважин (спаренными скважинами, группой взаимодействующих скважин).

### **3.4.2.3**

#### **Конструкция буровых скважин и буровое оборудование**

Конструкция добычных скважин зависит от применяемого геотехнологического способа, геологических факторов и типа добычного оборудования.

Обсадка добычных скважин на участке залегания рыхлых пород обязательно должна осуществляться.

Тип бурового оборудования зависит от глубины залегания пласта, крепости покрывающих пород и диаметра скважины. При глубине залегания пласта до 30-40 м под слоем прочных покрывающих пород могут применяться буровые станки шарошечного типа СБШ. Для слабых пород возможно применять станки шнекового вращательного бурения типа СБР. При глубинах до 200 м целесообразно применять станки вращательного бурения [7].

Целесообразно, чтобы буровое оборудование сочетало характеристики разведочного бурения (отбор керна, проходку по породам с любыми свойствами и условиями залегания, обсадка, цементация) с возможностью монтажа скважинного оборудования.

Добычные скважины до залежи бурят как обычные геологоразведочные скважины. Особенности бурения скважин: необходимость отбора керна в слабых неустойчивых породах; требования к надежному выявлению контактов

пород с продуктивной залежью при близких физико-механических свойствах; необходимость обеспечения устойчивости стенок в породах небольшой крепости; недопустимость значительных искривлений ствола, так как это усложняет спуск технологических колонн. Крепление скважин выполняется в два этапа: спуск обсадной колонны и цементация затрубного пространства.

Перед оборудованием скважин осуществляется ее исследование и составляется необходимая документация.

### **3.4.2.4**

#### **Технология добычи.**

Технология добычи полезных ископаемых геотехнологическими методами определяется самим методом. Например, для метода скважинной гидродобычи технологические операции, способы их осуществления и влияющие факторы приведены в табл. 3.2.

Выбор схемы очистной выемки и ее параметров, взаимная увязка процессов добычи определяются конкретными условиями разработки и должны обеспечивать заданную производительность добычи при минимальных удельных эксплуатационных затратах и возможно полном извлечении.

При этом должен выполняться расчет параметров отбойки и подъема продуктивных флюидов.

На демонстрационном листе должны быть указаны размещение добычного оборудования в скважине и элементы конструкции скважины.

### 3.4.2.5 Система разработки

Под системой разработки понимается порядок расположения, проходки и отработки добычных скважин, увязанный во времени и пространстве.

Таблица 3.2

#### Технологические операции и влияющие факторы скважинной гидродобычи

Технологическая операция	Способ осуществления	Факторы	
		физико-геологические	технические и технологические
1	2	3	4
Разрушение.	Размыв струей воды, фильтрационное.	Крепость руды, устойчивость кровли и другие физико-механические характеристики руды, мощность пласта.	Порядок и скорость отработки камеры, давление и расход воды, расстояние насадки до забоя.
Доставка.	Самотечная.	Гранулометрический состав, плотность, форма частиц.	Порядок отработки камеры, наклон почвы забоя, расстояние доставки, давление и расход воды.
	Струей.	Те же.	Технология размыва и доставки.
Подъем.	Эрлифтный.	Те же и абразивность.	Регулируемость подачи руды, удаление крупных кусков, высота подъема, диаметр труб, давление и расход воздуха

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4
	Гидроэлеваторный, гидрозрлифтный.	Те же.	Те же и давление и расход воды. Конструктивные параметры гидроэлеватора.
	Противодавлением.	Те же.	Высота подъема, герметичность.
Гидротранспорт.	Самотечный.	Гранулометрический состав, плотность, форма частиц.	Расход, уклон. Размеры лотка и его характеристика.
	Трубопроводный.	Те же.	Расход, плотность пульпы. Диаметр и характеристика трубопровода, землесоса, расстояние транспортирования.
Укладка руды на карте намыва.	Гидравлическая.	Гранулометрический состав, плотность, водоотдача, рельеф местности.	Способы заполнения карты и удаления воды из отвала. Расход и плотность пульпы
Управление горным давлением.	Оставлением целиков.	Устойчивость целиков и потолочин, система разработки.	Порядок отработки. Размер камер и целиков.
	Противодавлением.	Физико-механические свойства руды и пород кровли.	Давление воды в камере.
	Закладкой.	Те же и плотность закладочного материала.	Размеры камеры, технология и полнота закладки.
	Обрушением	Устойчивость кровли.	Порядок выемки запасов.

Конкретная система разработки определяется самым геотехнологическим способом.

Оптимальной системой расположения скважин на месторождении будет являться сетка скважин, обеспечивающая минимальные затраты на 1 т добытого полезного ископаемого при возможно более полном извлечении запасов разрабатываемого месторождения. Применительно к способу скважинной гидродобычи устойчивые параметры камерной системы разработки можно определить по номограмме, представленной на рис. 3.1. По принятому расстоянию между скважинами определяются радиус и площадь камеры, а также коэффициент извлечения полезного ископаемого. Срок отработки месторождения определяется из выражения:

$$t_{мест} = \frac{S_{мест}}{2 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot m_{агр}}, \text{ сут}, \quad (3.1)$$

где  $S_{мест}$  — площадь месторождения,  $\text{м}^2$ ;  
 $b_1, b_2$  — параметры сетки расположения скважин, м;  
 $m_{агр}$  — число одновременно работающих скважин.

Общее число добычных скважин определяется из выражения:

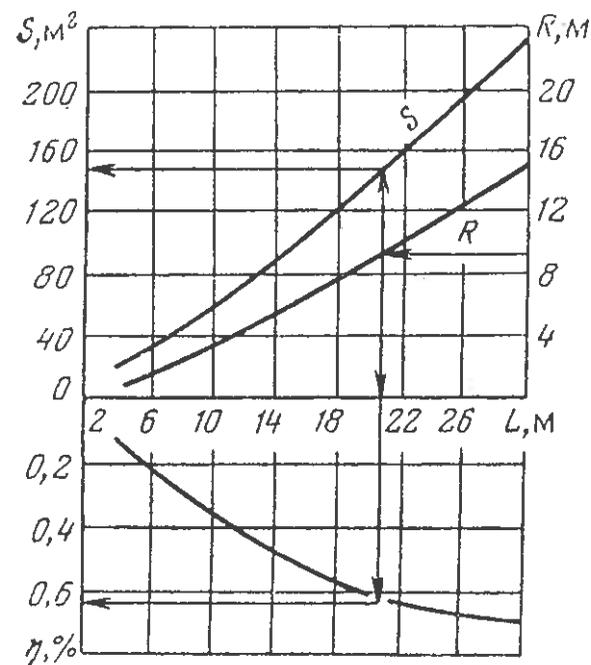
$$m_{скв} = m_{агр} \cdot \frac{t_{мест}}{t_{скв}}, \quad (3.2)$$

где  $t_{скв}$  — срок службы одной добычной скважины, сут.

Проектный уровень добычи:

$$V_{нр} = m_{агр} \cdot V_{скв}, \text{ т/сут}, \quad (3.3)$$

где  $V_{скв}$  — среднесуточная производительность скважины, т/сут.



$\sigma_{сж} = \text{Мпа}$  — предел прочности полезного ископаемого на сжатие;

$h_3 = 20 \text{ м}$  — глубина залегания пласта;

$m = 3,0 \text{ м}$  — мощность пласта.

Рис 3.1. Номограмма для определения устойчивых параметров камерной системы разработки при скважинной гидродобыче:  
 $S$  — площадь целика,  $\text{м}^2$ ;  $L$  — расстояние между скважинами, м;  $\eta$  — коэффициент извлечения полезного ископаемого, %.

### **3.4.2.6.**

#### **Расчет производственных процессов**

Основными производственными процессами являются: перевод полезного ископаемого в подвижное состояние; транспортировка к забою скважины; выдача продуктивных флюидов на поверхность.

При расчете производственных процессов используют методические указания по проведению лабораторных работ, изложенные в части II.

### **3.4.2.7**

#### **Расчет экономической эффективности способа**

Расчет ведется по методическим указаниям, приведенным в 2.2.6. При отсутствии конкретных данных по стоимости оборудования, материалов и т.п., они принимаются ориентировочно.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

Приложение 1

Приложение 2

Приложение 3

## Приложение 1

# ПРОГРАММА

## курса

### "Геотехнологические способы разработки пластовых месторождений"

#### Введение

Цель и задачи курса. Геотехнология в системе горных наук. Классификация геотехнологических методов разработки месторождений твердых полезных ископаемых. Характерные особенности геотехнологических методов. Современное состояние геотехнологических методов разработки. Вклад отечественных ученых в развитие геотехнологии.

#### Физико-химические основы геотехнологии

Свойства горных пород. Горные породы и полезные ископаемые как объекты воздействия геотехнологическими методами разработки. Гидравлические свойства горного массива: пористость, проницаемость, влагоемкость, водоотдача, водостойчивость, капиллярность, набухание, усадка, просадочность, смачиваемость, адсорбция, абсорбция, липкость. Тепловые свойства горных пород: плавление, испарение, сублимация, кристаллизация, конденсация, теплоемкость, теплопроводность, тепловое расширение и сжатие. Электромагнитные свойства горного массива: электропроводность, электрическая прочность, поляризация, магнитная восприимчивость, остаточная намагниченность. Радиационные свойства горных пород. Некоторые механи-

ческие свойства горных пород: тиксотропность, прочность, твердость, вязкость разрушения, упругость, пластичность, компрессионная способность, хрупкость. Акустические свойства горных пород.

Физико-химические основы процессов геотехнологии. Процессы растворения и выщелачивания полезных ископаемых. Термическое воздействие на горные породы. Термохимические процессы при геотехнологии. Принципы диспергирования горных пород. Воздействие электромагнитных полей на массив горных пород. Гидравлические процессы при геотехнологических методах разработки: гидрорасчленение, гидроподъем, гидроотбойка, гидротранспорт.

#### Производственные процессы при геотехнологии

Бурение скважин, их конструкция и применяемое оборудование. Крепление и опресовка скважин. Оборудование добычных скважин.

Производство рабочих агентов геотехнологических методов и применяемое оборудование.

Поверхностное оборудование скважин и применяемое оборудование.

Производственные процессы добычи полезного ископаемого геотехнологическими методами. Типы добычного оборудования. Способы подъема полезного ископаемого по скважине.

Процессы управления массивом горных пород при геотехнологии.

Процессы транспортирования добытого полезного ископаемого до места переработки.

Комплексная автоматизация производственных процессов геотехнологии, аппаратура управления и контроля

## Вскрытие, подготовка и системы разработки месторождений геотехнологическими методами

Требования, предъявляемые к системам вскрытия и подготовки месторождений. Классификация скважинных методов вскрытия. Способы вскрытия месторождений отдельной скважиной, группой скважин, горной выработкой и скважиной.

Требования, предъявляемые к системам разработки при геотехнологических методах добычи. Классификация систем разработки. Системы разработки скважинами-камерами, взаимодействующими скважинами, скважинами и подземными выработками. Основы выбора систем разработки. Оценка потери запасов при геотехнологии.

## Технологические схемы скважинной добычи полезных ископаемых

### Геотехнологические методы разработки

угольных месторождений. Сущность подземной газификации углей. История развития метода. Современное состояние технологии. Создание каналов в угольных пластах. Конструкции подземных газогенераторов. Технологические схемы станций подземной газификации углей. Направления совершенствования подземной газификации углей.

Технология подземного сжигания угля, ее современное состояние и перспективы развития.

Скважинная гидродобыча полезных ископаемых. Гидравлическое разрушение массива в затопленном забое. Гидромониторная доставка отбитой горной массы. Эрлифтный подъем. Технологические схемы скважинной гидродобычи. Современное состояние и перспективы развития скважинной гидродобычи.

Перспективные геотехнологические методы разработки пластовых месторождений полезных ископаемых. Подземная переработка сланцев. Термические методы добычи нефти. Подземное гидрирование углей.

Методы диспергирования и растворения углей. Газодинамический метод добычи угля. Метод гидроимпульсного воздействия на пласт. Методы подземной экстракции.

### Геотехнологические методы разработки рудных месторождений.

Подземное растворение солей, его сущность. Технологические схемы. Современное состояние и перспективы развития.

Подземная выплавка серы, ее сущность. Технологические схемы. Современное состояние и перспективы развития.

Подземное сжигание серы, его сущность. Технологические схемы.

Подземное выщелачивание, его сущность. Технологические схемы. Современное состояние и перспективы развития.

### Проектирование геотехнологических методов разработки.

Особенности проектирования геотехнологии. Исходные данные для проектирования предприятий с геотехнологическими методами разработки.

Методика обоснования эффективности геотехнологии.

Расчет параметров отдельных геотехнологических методов. Принципы проектирования подземной газификации углей. Расчет параметров скважинной гидродобычи. Расчет параметров технологии подземного растворения солей. Расчет параметров подземной выплавки серы. Расчет

параметров подземного сжигания серы. Принципы проектирования подземного выщелачивания.

Расчет технико-экономических показателей геотехнологии.

Оценка влияния геотехнологических методов на окружающую среду.

Программу составил: доцент кафедры ТПУ МГГУ  
к.т.н. Шаровар И.И.

## *Приложение 2*

Министерство образования и науки

Российской Федерации

Федеральное агентство по образованию



Московский государственный горный университет



Кафедра технологии, механизации и организации  
подземной разработки угля

## ***КУРСОВОЙ ПРОЕКТ***

по дисциплине:

**Геотехнологические способы разработки  
пластовых месторождений**

Выполнил: студент группы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(Фамилия И.О.)

Руководитель: проф., докт. техн. наук  
Шаровар И.И.

Москва 2007

### Приложение 3

#### Индивидуальное задание на выполнение курсового проекта по дисциплине "Геотехнологические способы разработки пластовых месторождений."

Спроектировать отработку участка Кенгисепского месторождения фосфоритосодержащих песков для следующих горно-геологических и горнотехнических условий:

1. Размер участка по простиранию, м.....
2. Размер участка по падению, м.....
3. Мощность залежи, м.....
4. Глубина залегания, м.....

Недостающие расчетные данные принимаются в соответствии со значениями варианта выполняемого лабораторного практикума.

Тема реферата: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Задание получено « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 199 \_\_\_\_ г.

Студент \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_)  
(подпись) (Фамилия И.О.)

Руководитель: \_\_\_\_\_ проф., докт. техн. наук  
Шаровар И.И.

### Список литературы

1. Горное дело. Терминологический словарь. М.: Недра, 1990. - 694 с.
2. Аренс В.Ж. Скважинная добыча полезных ископаемых (геотехнология). М.: Недра, 1986. - 279 с.
3. Аренс В. Ж. и др. Новое в технике и технологии бесшахтных методов добычи полезных ископаемых. - Итоги науки и техники. Серия «Разработка месторождений твердых полезных ископаемых». Т. 37. Специальные способы разработки. М.: ВИНТИ, 1987. - 98 с.
4. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. М.: Недра, 1978. - 390 с.
5. Добыча урана методом подземного выщелачивания. М.: Атомиздат, 1980. - 248 с.
6. Аренс В.Ж. Разработка месторождений самородной серы методом подземной выплавки. М.: Недра, 1973. - 264 с.
7. Аренс В.Ж., Исмагилов Б.В., Шпак Д.Н. Скважинная гидродобыча твердых полезных ископаемых. М.: Недра, 1980. - 229 с.
8. Крейнин Е.В. и др. Подземная газификация угольных пластов. М.: Недра, 1982. - 151 с.
9. Новик - Каган В.П. и др. Добыча металлов способом выщелачивания. М.: Цветметинформация, 1970. - с.
10. Бахуров В.Г., Вечеркии С.Г., Луценко И.К. Подземное выщелачивание урановых руд. М.: Атомиздат, 1969.

11. *Бахуров В.Г., Руднева И.К.* Химическая добыча полезных ископаемых (основы процесса, характеристика месторождений, исследования и изыскания, промышленный опыт). М.: Недра, 1972. - 134 с.
12. *Аренс В.Ж.* Геотехнологические методы добычи полезных ископаемых. М.: Недра, 1975. - 263 с.
13. *Бочко Э.А.* Бурение и оборудование геотехнологических скважин. М.: МГРИ, 1982. - 103 с.
14. А. с 1648581 А1. СССР. МКИ<sup>3</sup>, В 09 б 1/00. Способ захоронения твердых промышленных отходов. /А.С. Бродт, А.С. Бурчаков, И.И. Шаровар (СССР). - 3с.
15. *Гейман Л.М.* Горное дело. - Горная энциклопедия. Т.2. Геосферы - Кеная. М.: Советская энциклопедия, 1986. - С.100 - 115.
16. *Резинков В.А.* Растворение подземное. -Горная энциклопедия. Т. 4. Ортии - Социосфера. М.: Советская энциклопедия, 1986.- С. 317 - 319.
17. *Авдохин В.М., Кузьяев Л.С.* Физические процессы горного производства. Раздел «Физико-химические процессы в горных породах». Учебное пособие по дисциплине «Физико-химические процессы» для студентов специальности 0210. М.: МГИ, 1985. - 51 с.
18. *Бролинский Г. И.* и др. Серная промышленность. - Горная энциклопедия. Т. 4. Ортин - Социосфера. М.: Советская энциклопедия. 1989. - С. 527 - 529.
19. *Реутский В.Ф.* Выплавка подземная. - Горная энциклопедия. Т. 1. Аа-лава - Геосистема. М.: Советская энциклопедия, 1984. - С. 459 - 460.
20. *Звягинцев К.Н., Кулакова М.А.* Газификация углей подземная. - Горная энциклопедия. Т. 1. Аа-лава - Геосистема. М.: Советская энциклопедия, 1984. - С. 477 - 478.
21. *Антонова Р.И. и др.* Подземная газификация углей в СССР. Обзор. М.: ЦНИЭИуголь, 1990.-98 с.
22. *Янченко Г.А.* Тепловой баланс процесса подземной газификации угля. Учебное пособие. М.: МГИ, 1988. - 43 с.
23. Итоги конкурса на научную и проектную разработку предложений по подземной газификации углей. - «Подземная газификация углей», 1956, № 8. - С. 53 - 54.
24. *Лавров Н.В.* Перспективы использования физического тепла газов, получаемых при подземной газификации углей. - «Подземная газификация углей.», 1957, № 2. - С. 88 - 90.
25. А. с. 1312951. СССР, МКИ<sup>3</sup>, С 10 j 5/00. Способ добычи горючих полезных ископаемых. /В.В. Ржевский (СССР), - 1 с.
26. *Васючков Ю. Ф., Селиванов Г.И., Янко С.В.* Технология использования энергии подземного сжигания угольных пластов. - Уголь Украины, 1989, №12. - С. 5-8.
27. *Берман Д.В., Захаров П.Г., Урусов В.Б.* Анализ работы экспериментального участка «Углегаз» на шахте «Киреевская» Подмосковского бассейна. - Получение различных видов энергии при подземном сжигании угля по технологии «Углегаз». Сборник научных трудов. М.: МГИ, 1988. - С. 51 - 56.
28. А. с 1710715 А1. СССР. МКИ<sup>3</sup>, Е 21 б 43/295. Способ подземного сжигания угля. /А.С. Бродт, А.С. Бурчаков, Л.А. Пучков, И.И. Шаровар (СССР). - 4 с.
29. А. с. 1761945 А1. СССР. МКИ<sup>3</sup>, Е 21 б 43/285. Способ подземной газификации угля. /А.С. Бродт, А.С. Бурчаков, Л.А. Пучков, И.И. Шаровар (СССР). - 2 с.

30. *Ржевский В.В.* Подземное сжигание углей. Учебное пособие. М.: МГИ, 1990. - 85 с.
31. *Селиванов Г.И., Янченко Г.А., Загоршменный И.М.* Расчет параметров газификации и сжигания угля в подземных условиях. М.: МГУ, 1994. - 69 с.
32. Новая технология разработки угольных и сланцевых месторождений - «Углегаз». - Уголь, 1994, №1. - С.10.
33. Получение различных видов энергии при подземном сжигании угля по технологии «Углегаз». Сборник научных трудов. М.: МГИ, 1988. - 196 с.
34. *Бабичев Н.И.* Скважинная гидродобыча. - Горная энциклопедия. Т.4. Ортин - Социосфера. М.: Советская энциклопедия, 1989. -С. 549-550.
35. *Бабичев Н.И.* Технология скважинной гидродобычи полезных ископаемых. М.: МГРИ, 1981. -84 с.
36. *Бабичев Н.И.* Проектирование геотехнологических комплексов. М.:МГРИ, 1985. -128 с.
37. *Бабичев Н.И.* Скважинный гидродобычной агрегат. - Горная энциклопедия. Т.4. Ортин - Социосфера. М.: Советская энциклопедия, 1989. - С. 553.
38. *Амелин И.Д., Ильина Т.Д.* Скважинная горная технология. - Горная энциклопедия. Т.4. Ортин - Социосфера. М.: Советская энциклопедия, 1989. -С. 550 - 553.
39. 1994 г. - начало осуществления геотермического проекта. - Глюкауф, 1994, №4. - С. 6.
40. *Дядькин Ю.Д.* Разработка геотермальных месторождений. - М.: Недра, 1989. - 229 с.
41. *Дядькин Ю.Д.* Использование тепла Земли. Л.: ЛГИ, 1987. -407 с.

42. *Дворов И.М., Дворов В.И.* Освоение внутриземного тепла. М.: Наука, 1984. - 161 с.
43. Геотермальная энергия. Ресурсы, разработка, использование. М.: Мир, 1975. - 354 с.
44. *Шаровар И.И.* Формирование экологически чистых горно-энергетических комплексов на базе многостадийной отработки угольных месторождений блок-стволами. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: МГГУ, - 34 с.
45. *Шаровар И.И.* Практикум по курсу «Геотехнологические способы разработки месторождений полезных ископаемых». Учебное пособие для студентов специальности 0202. М.: МГГУ, 1993. -36 с.

## ВЫСШЕЕ ГОРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Иван Иванович  
Шаровар

### ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ РАЗРАБОТКИ ПЛАСТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

*Режим выпуска «стандартный»*

*Выпущено в авторской редакции*

Компьютерная верстка и подготовка  
оригинал-макета Э.Ф. Губницкая  
Дизайн серии Е.Б. Капралова  
Зав. производством Н.Д. Уробишкина  
Полиграфическое производство  
Л.Н. Файнгор

Подписано в печать 23.10.2007. Формат 60×90/16.  
Бумага офсетная № 1. Гарнитура «Times».  
Печать трафаретная на цифровом дупликаторе.  
Усл. печ. л. 15,25. Тираж 100 экз.  
Заказ 1609

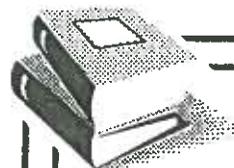
**ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

*Лицензия на издательскую деятельность  
ЛР № 062809. Код издательства 5X7(03)*

*Оригинал-макет подготовлен в издательстве  
«Горная книга»*

Отпечатано в типографии  
Издательства Московского государственного  
горного университета  
*Лицензия на полиграфическую деятельность  
ПЛД № 53-305*

119991 Москва, ГСП-1,  
Ленинский проспект, 6, Издательство МГГУ;  
тел. (495) 236-97-80; факс (495) 956-90-40;  
тел./факс (495) 737-32-65



## К ♦ Н ♦ И ♦ Г ♦ И

ИЗДАТЕЛЬСТВА МОСКОВСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО  
УНИВЕРСИТЕТА  
И ИЗДАТЕЛЬСТВА «ГОРНАЯ КНИГА»

**можно приобрести:**

- ♦ в киоске Издательства МГГУ (м. «Октябрьская»-кольцевая, Ленинский просп., 6, главный корпус, 2-й этаж);
- ♦ заказать через систему «Книга—почтой»; заказы в произвольной форме направлять по адресу:

**119991 Москва, ГСП-1, Ленинский  
проспект, 6, Издательство МГГУ;**

- ♦ заказать по телефонам: **(495) 236-97-80,  
(495) 737-32-65;**
- ♦ заказать по факсам: **(495) 956-90-40,  
(495) 737-32-65;**
- ♦ через **e-mail: info@gornaya-kniga.ru**

Распространение книг осуществляют  
Издательство МГГУ, издательство «Горная книга»  
и ООО «Горкниготорг»

Подробная информация размещена в Интернете  
на сайте [www.gornaya-kniga.ru](http://www.gornaya-kniga.ru)

# СТРУКТУРА АССОЦИАЦИИ «МИР ГОРНОЙ КНИГИ»

