|  |  |
| --- | --- |
| Курс: | Геотехнология урана |
| Модуль 1: | Общие сведения о физико-химической геотехнологии урана |

|  |  |
| --- | --- |
| Автор | Носков Михаил Дмитриевич, д.ф.-м.н. |
|  |  |
| Рецензенты |  |
|  |  |
|  |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Длительность  (рекомендуемая) | 2 часа |
|  |  |
| Главная цель | По окончании изучения темы обучаемый будет иметь общие сведения о физико-химической геотехнологии урана. |
|  |  |
| Промежуточные цели | * Иметь общие сведения о геотехнологическом способе разработки месторождений полезных ископаемых * Объяснить, как происходит подземное выщелачивание урана * Знать условия применения скважинного подземного выщелачивания * Назвать основные преимущества скважинного подземного выщелачивания урана по сравнению с традиционными подземными и открытыми горными способами * Знать основные типы урановых месторождений, разрабатываемых методом подземного выщелачивания |

1.1. **Геотехнологический способ разработки месторождений**

**полезных ископаемых**

Физико-химическая геотехнология – это химические, физико-химические, биохимические и микробиологические методы воздействия на залежь полезных ископаемых на месте их залегания с целью перевода полезных компонентов в подвижное состояние (флюид) и последующее извлечение, как правило, через скважины, буримые с поверхности до месторасположения залежи.

Основными этапами геотехнологического процесса являются:

1) подготовка рабочих агентов (химические вещества, энергия, микроорганизмы и т.д., и их носители) с помощью которых воз-действуют на залежь полезных ископаемых;

2) введение рабочих агентов в залежь полезных ископаемых;

3) перевод полезных компонентов в подвижное состояние в результате действия рабочих агентов;

4) выдача продуктивных флюидов на поверхность;

5) извлечение из продуктивных флюидов полезного компонента.

Геотехнологическое предприятие состоит из трех основных частей: участок подготовки рабочих агентов, добычное (геотехнологическое) поле, участок переработки продуктивных флюидов. Геотехнологическое предприятие представляет собой сложную распределенную природно-антропогенную систему. Управление добычей осуществляется с помощью изменения режимов подачи рабочих агентов и их параметров.

Геотехнологический способ разработки месторождений полезных ископаемых обладает следующими особенностями:

• разработка месторождения ведется с помощью систем технологических скважин, служащих для вскрытия и подготовки месторождения, воздействия на залежь и извлечения полезного компонента;

• залежь полезных ископаемых является одновременно объектом разработки и местом частичной переработки полезного ископаемого;

• разработка месторождения зональна и перемещается во времени;

• управление процессом добычи осуществляется с помощью изменения расположения и режимов работы технологических скважин, параметров (температура, концентрация реагентов т т.д.) рабочего агента;

• управление процессом добычи осложняется недостатком информации о состоянии продуктивного горизонта и параметрах технологического процесса, значительной инерционностью (время реакции системы на управляющее воздействие может составлять несколько месяцев), ограниченными возможностями воздействия на движение флюидов, большим числом различных взаимосвязанных физико-химических процессов, происходящих в продуктивном горизонте.

Классификация геотехнологических способов разработки месторождений, в зависимости от вида подвижного состояния и характера воздействия на залежь полезных ископаемых, приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 Способы воздействия на залежь полезных ископаемых

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Вид подвижного состояния полезного ископаемого | Способ перевода полезного ископаемого в подвижное состояние | | |
| Физические | Химические | Комбинированные  (комплекс воздействий) |
| Газообразное | Воздействие температуры, давления, сублимация, перегонка | Окисление, разложение, частичное или полное сжигание, обжиг | Химические реакции с участием физических полей, микробиологического воздействия |
| Жидкотекучее  (расплав, раствор). | Воздействие температуры, давления, плавление, перегонка, нагрев | Выщелачивание и растворение с образованием молекулярных растворов | Растворение, выще-лачивание и гидро-генизация с участием физических полей, микробиологического воздействия |
| Гидро-механическая смесь | Гидро-, пневмо-разрушение, воздействие физическими полями | Растворение связующего вещества | Диспергирование поверхностно активными веществами, химическими реагентами с участием физических полей, микро-биологического воздействия |

В таблице 1.2 приведены сведения о применении геотехнологических способах разработки месторождений полезных ископаемых.

Таблица 1.2. Геотехнологических способы разработки месторождений

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Способ | Объекты промышленного освоения | Объекты полупромышленных и опытных исследований |
| Подземное растворение | Месторождения каменной, калийных солей | Месторождения бишофита, соды, глауберовой соли |
| Подземное выщелачивание | Сульфидные месторождения меди и никеля. Инфильтрационные месторождения урана, забалансовые участки эндогенных месторождений | Месторождения марганца, сульфидные месторождения меди, свинца, цинка и никеля, золота, титана и известняка. Осадочные бурожелезняковые месторождения |
| Подземная выплавка | Месторождения самородной серы | - |
| Подземная газификация | Месторождения каменного и бурого угля | Известняк, месторождения горючих сланцев, руд, содержащих мышьяк и ртуть. Сера в непроницаемых рудах, битум и тяжелая нефть |
| Скважинная гидродобыча | Месторождения фосфоритов, строительных песков. | Осадочные месторождения металлов, строительные пески и гравий, титан, золото и алмазы, касситерит, фосфориты, уголь, мягкие бокситы, железо и т.д. |
| Добыча из подземных вод | Месторождения йодо-бромистых вод, содержа-щих бор, уран, стронций | Сточные воды шахт, рудников и нефтепромыслов |
| Использование тепла Земли | Природные парогидротермы | Тепло «сухих» горных пород |

Основными достоинствами геотехнологических способов разработки месторождений полезных ископаемых являются:

• экономическая эффективность (меньшие капитальные затраты, короткие сроки и возможность поэтапного ввода предприятия в эксплуата-цию, низкая себестоимость продукции);

• высокая технологичность производства;

• экологическая безопасность и снижение риска производственного травматизма;

• возможность отработки месторождений с низким содержанием полезного компонента (геотехнология позволяет вовлечь в эксплуатацию месторождения с непромышленным содержанием руд, расширить добычу рассеянных элементов), а также разрабатывать глубокозалегающие месторождения, характеризующиеся сложными гидрогеологическими и горно-технологическими условиями.

**1.2 Подземное выщелачивание урана**

Из описанных выше различных геотехнологических способов для разработки месторождений урана применяется подземное выщелачивание. Под выщелачиванием понимается перевод в раствор одного или нескольких компонентов твёрдого вещества с помощью водного или органического растворителя (возможно участие газов - окислителей или восстановителей). Часто применяемые растворители: вода, водные растворы кис-от (в основном серной и соляной) и щелочей (аммиак, едкий натр), солей (углекислый натрий или алюминий), цианиды. Примерами выщелачивания служат щелочное извлечение лигнина из древесины, растворение в горячей воде сахара из свёклы и сахарного тростника, извлечение металлов из руд и концентратов (гидрометаллургия). Как правило, выщелачивание включает в себя два процесса: химический (перевод полезного компонента в растворимое состояние) и физико-химический (растворение).

Основными системами подземного выщелачивания (ПВ) являются:

• скважинная, с использованием естественной проницаемости руд (как правило, пористого типа);

• шахтная, с использованием естественной проницаемости трещиноватых рудовмещающих пород;

• шахтная, с созданием искусственной проницаемости руд буровзрывными работами.

Способ скважинного подземного выщелачивания разрабатывается с начала 1920-х годов и в настоящее время является одним из наиболее перспективных методов добычи урана и ряда других металлов (золота, меди, рения, скандия, молибдена и др.). Скважинное подземное выщелачивание является наиболее привлекательным и эффективным по сравнению с традиционными способами добычи. Уран добывается этим методом с конца 1950-х годов. В настоящее время более половиныы всего урана добывается методом подземного выщелачивания. Особенно широко этот метод применяется в Казахстане, Узбекистане и США, где таким способом добывается практически весь уран. В России способ подземного выщелачивания применяется при разработке Далматовского, Хохловского (Зауральский урановорудный район) и Хиагдинского, Источного, Веншинного (Витимский урановорудный район) месторождений урана.

Методом скважинного подземного выщелачивания разрабатывают месторождения урана, в которых рудное тело находится в хорошо проницаемой геологической среде (как правило, в подземном водоносном горизонте - продуктивном горизонте). Извлечение урана из рудного тела происходит с помощью системы технологических скважин, которые объединяются в технологические ячейки и блоки. Через нагнетательные скважины в продуктивный горизонт нагнетается выщелачивающий (рабочий) раствор, содержащий реагенты, способные растворять минералы урана. В результате физико-химического взаимодействия урановых минералов и вмещающих пород с выщелачивающими реагентами в подземном водоносном горизонте образуется содержащий уран продуктивный раствор, который выдается на поверхность посредством системы откачных скважин. В процессе переработки продуктивного раствора из него извлекается уран, а оставшиеся маточные растворы доукрепляются выщелачивающими реагентами и снова подаются в нагнетательные скважины в качестве рабочего раствора. В настоящее время в качестве рабочих агентов (рабочих растворов) при подземном выщелачивании урана применяются слабые водные растворы серной кислоты, а также карбонаты (бикарбонаты) аммония, натрия, калия, кальция, магния.

Эффективность процесса подземного выщелачивания зависит от типа урановой минерализации. Основными урановыми минералами в месторождениях, отрабатываемых способом скважинного подземного выщелачивания, являются окислы урана (настуран, урановая чернь) и силикаты урана (коффинит). Применительно к подземному выщелачиванию урановые руды можно условно разделить на три группы.

В первую группу входят руды, из которых выщелачивание урана без применения окислителей затруднено. Эти руды содержат минералы, в которых уран находится, в основном, в четырехвалентной (восстановленной) форме (окислы урана - уранинит, настуран или урановая смолка, силикат урана - коффинит).

В рудах второй группы уран находится, по большей части, в шестивалентном состоянии и легко переходит в слабые сернокислотные и щелочные растворы. Минералами, составляющими эти руды, являются гидроокислы - скупит и др., ванадаты - карнотит, тюямунит и др., фосфаты - отенит, торбернит и др., силикаты - уранофан и др.

Третью группу составляют практически не растворимые в слабых сернокислотных и щелочных растворах без применения интенсифицирующих методов (измельчение, подогрев, высокие концентрации выщелачивающих реагентов и т.д.) минералы: давидит, браннерит и др.

Состав некоторых урансодержащих минералов приведен в таблице 1.3.

Таблица 1.3. Урансодержащие минералы

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Минерал | Основной состав минерала | Содержание урана, % |
| [Уранинит](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D1%82) | UO2, UO3 + ThO2, CeO2 | 65-74 |
| [Коффинит](http://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%9A%D0%BE%D1%84%D1%84%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D1%82&action=edit&redlink=1) | U(SiO4)1-x(OH)4x | ~50 |
| [Карнотит](http://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%9A%D0%B0%D1%80%D0%BD%D0%BE%D1%82%D0%B8%D1%82&action=edit&redlink=1) | K2(UO2)2(VO4)2·2H2O | ~50 |
| [Тюямунит](http://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A2%D1%8E%D1%8F%D0%BC%D1%83%D0%BD%D0%B8%D1%82&action=edit&redlink=1) | CaO·2UO3·V2O5·nH2O | 50-60 |
| [Отенит](http://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%9E%D1%82%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%82&action=edit&redlink=1) | Ca(UO2)2(PO4)2·nH2O | ~50 |
| [Торбернит](http://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A2%D0%BE%D1%80%D0%B1%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B8%D1%82&action=edit&redlink=1) | Cu(UO2)2(PO4)2·nH2O | ~50 |
| [Уранофан](http://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A3%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D1%84%D0%B0%D0%BD&action=edit&redlink=1) | CaO·UO2·2SiO2·6H2O | ~57 |
| [Казолит](http://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%9A%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D1%82&action=edit&redlink=1) | PbO2·UO3·SiO2·H2O | ~40 |
| [Самарскит](http://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A1%D0%B0%D0%BC%D0%B0%D1%80%D1%81%D0%BA%D0%B8%D1%82&action=edit&redlink=1) | (Y, Er, Ce, U, Ca, Fe, Pb, Th)· (Nb, Ta, Ti, Sn)2O6 | 3-14 |
| [Браннерит](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B8%D1%82) | (U, Ca, Fe, Y, Th)3Ti5O15 | 40 |
| [Цейнерит](http://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A6%D0%B5%D0%B9%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B8%D1%82&action=edit&redlink=1) | Cu(UO2)2(AsO4)2·nH2O | 50-53 |
| [Шрекингерит](http://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A8%D1%80%D0%B5%D0%BA%D0%B8%D0%BD%D0%B3%D0%B5%D1%80%D0%B8%D1%82&action=edit&redlink=1) | Ca3NaUO2(CO3)3SO4(OH)·9H2O | 25 |

Интенсивность процесса подземного выщелачивания также зависит от доступности поверхности урановых минералов для реагента. Наиболее благоприятными являются условия, когда урановые минералы присутствуют в тонкодисперсных порошковых формах, находятся на открытых поверхностях пор и трещин.

Для успешной разработки месторождений урана методом скважинного подземного выщелачивания необходимо выполнение следующих условий:

• рудное тело и рудовмещающий горизонт обладают высокой проницаемостью;

• гидрогеологическое строение рудовмещающего горизонта позволяет рабочим раствором перемещаться от закачных скважин к рудному телу, и, затем, к откачным скважинам;

• ураносодержащие минералы легко разрушаются под действием рабочих растворов с небольшой концентрацией выщелачивающего реагента с последующим переходом урана в раствор;

• расход выщелачивающего реагента на взаимодействие с породообразующими минералами незначителен.

Основными преимуществами скважинного подземного выщелачивания урана, по сравнению с традиционными подземными и открытыми горными способами, являются:

• возможность разработки месторождений со сложными условиями залегания, вовлечение в отработку бедных и забалансовых руд;

• снижение сроков строительства и капитальных вложений на строительство предприятия;

• высокая технологичность производства;

• повышение производительности труда по конечной продукции;

• улучшение условий труда и снижение риска;

• уменьшение отрицательного воздействия на окружающую среду (прежде всего атмосферу, земную поверхность).

**1.3 Типы урановых месторождений, разрабатываемых методом**

**подземного выщелачивания**

Образование месторождений урана связано с геохимическими особенностями его поведения. Шестивалентные соединения урана имеют высокие миграционные способности в подземных водах в отличие от четырехвалентных соединений. Переходя из раствора в твердую фазу, уран образует как самостоятельные минералы, так и входит в состав неурановых минералов в виде примесей. Из всего разнообразия урановых место-рождений для промышленного освоения наиболее интересны магматогенные (гидротермальные), образующиеся в результате глубинных магматических и метаморфических процессов, и экзогенные, формирующиеся под влиянием факторов земной поверхности. Как правило, месторождения урана, отрабатываемые методом скважинного подземного выщелачивания, относятся к классу экзогенных и объединяются в подгруппу «инфильтрационные» (также используется термин «месторождения зон пластового окисления»).

Согласно современным представлениям, образование месторождений происходит в результате инфильтрации кислородосодержащих атмосферных вод по проницаемым зонам земной коры. Вначале имеет место выщелачивание урана из горных пород, а после израсходования расворенного кислорода на окисление находящихся в породе восстановителей происходит образование плохо растворимых минералов урана. Таким образом, скважинное подземное выщелачивание урана можно рассматривать как процесс, обратный формированию месторождений.

Инфильтрационные месторождения образуются в результате движения подземных вод и отложения переносимого ими урана на окислительно-восстановительном барьере. В соответствии с этим, месторождения урана можно классифицировать по гидрогеологическому виду рудообразующих подземных вод и типу восстановителей.

В зависимости от вида рудообразующих подземных вод инфильтрационные месторождения разделяются на:

• пластово-инфильтрационные (латеральное движение пластовых напорных вод);

• грунтово-инфильтрационные (нисходящее и частично латеральное движение грунтовых ненапорных вод);

• ураноугольные (нисходящее и частично латеральное движение грунтово-пластовых слабонапорных и ненапорных вод);

• трещинно-инфильтрационные (нисходящее движение трещинных ненапорных вод);

• карстово-инфильтрационные (нисходящее движение карстовых ненапорных вод).

По типу восстановителей месторождения можно разделить на образованные сингенетическими восстановителями (углистое вещество, растительный детрит, массивные угли) и эпигенетическими восстановителями (дисульфиды железа, нефть и битумы, восстановительные газы – серово-дород, углеводороды, водород).

Для отработки методом скважинного подземного выщелачивания наиболее подходят пластово- и грунтово-инфильтрационные месторождения. Пластово-инфильтрационные месторождения образуются на геохимических барьерах, созданных различными восстановителями. Грунтово-инфильтрационные месторождения связаны с сингенетическим типом восстановителей.

В соответствии с опытом добычи урана различными системами подземного выщелачивания месторождения можно разделить на технологические группы, типы и подтипы, как это представлено в таблице 1.4.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Технологическая группа | Технологический тип | Технологический подтип |
| Месторождения с естественной проницаемостью: рудные тела проницаемы для растворов, используемых при подземном выщелачивании  (Кф>0,1 м/сут.) | Месторождения с поровой проницаемостью рудных залежей в песках и углистых песках | Месторождения с выдержанными простыми пластообразными рудными залежами |
| Месторождения с выдержанными тектонически осложненными пластообразными рудными залежами |
| Месторождения с разобщенными небольшими пластообразными и линзообразными рудными залежами |
| Месторождения с порово-трещинной проницаемостью рудных залежей | Месторождения с выдержанными тектонически осложненными пластообразными рудными залежами |
| Месторождения с трещинной проницаемостью рудных тел | Месторождения с неправильными по форме преимущественно штоковерковыми рудными телами |
| Месторождения с искусственно созданной проницаемостью: рудные тела, практически непроницаемые для технологических растворов (Кф<0,1 м/сут.), но сохра-няют созданную проницаемость | Месторождения с низкой порово-трещинной проницаемостью рудных залежей в алевролитах | Месторождения с пластообразными рудными залежами |
| Месторождения с низкой порово-трещинной проницаемостью рудных тел в кристаллических породах | Месторождения с штокверковыми рудными телами |
| Месторождения с пластообразными рудными телами |

Таблица 1.4. Геолого-технологическая группировка месторождений урана, отрабатываемых методом подземного выщелачивания