

ЛЕКЦИЯ № 5

Физические методы очистки грунтов

1. Механические методы.

2. Гидродинамические и аэродинамические методы.

3. Термические методы.

4. Электромагнитные методы.

I.

Механическое удаление загрязнителей

Механические методы удаления загрязнений являются простейшими и наиболее универсальными методами очистки массивов от любых загрязнений, однако, в сущности, они являются лишь перенесением загрязнителя из массива в другое место, или предварительным этапом для других способов очистки.

К механическому удалению загрязнений приходится прибегать в тех случаях, когда другие методы очистки неэффективны. Например, почвы, сильно загрязненные с поверхности радионуклидами, механически срезаются на всю мощность загрязненного слоя и вывозятся в места складирования и утилизации.

В настоящее время широко распространено простое механическое удаление загрязненного объема пород с помощью специальных технических средств. Для этого используется различная землеройная и дорожностроительная техника: экскаваторы, бульдозеры, скреперы, фрезы и т.п. С помощью навесной фрезы срезается заданный по глубине слой загрязненного грунта и укладывается в погрузчик.

Механически извлекаемый из массива загрязненный грунт грузится в самосвалы и вывозится в места его дальнейшей переработки в стационарных условиях или хранения. Особенно часто этот метод используется при сильном поверхностном загрязнении, например, радионуклидами или нефтью. При этом механическое удаление загрязнителей обычно эффективно лишь в первые моменты времени после формирования очага загрязнения, например сразу после аварии, повлекшей поверхностное загрязнение почв.

Существенным недостатком метода является необходимость дальнейшей утилизации большого объема пород или почв. Например, загрязненные смолой или нефтью грунты после механического извлечения из массива проходят двухступенчатую термообработку в специальных стационарных или передвижных установках.

Механическая деструкция загрязнителей

Механическая деструкция загрязнителей проводится с целью разрушения загрязнителя на месте или с целью предварительной механической подготовки грунта для его дальнейшей очистки комбинированными методами. Для этого используются: механическое дробление грунта, механическое просеивание, рыхление и др.

Механическое дробление грунта применяется для высвобождения загрязняющих компонентов из породы или для предварительной подготовки грунта для дальнейших воздействий с целью его очистки. Для дробления породы в массиве используются взрывы или различные механизмы.

При очистке от веществ, переносимых во взвешенном состоянии, могут применяться и вибрационные методы, однако чаще они применяются как вспомогательные при промывке. Существенными недостатками вибрационных методов являются малая площадь действия и нарушение структуры массива. Немаловажное ограничение этого метода - крайняя вредность вибрационного воздействия для живых организмов, и в частности для человека. Низкочастотные

механические колебания используются для ускорения процесса рассоления почв. Амплитуда таких колебаний составляет 2-7 мм, а частота -5-50 Гц.

Механическое просеивание грунта в массиве осуществить невозможно, и этот метод применяется лишь для вынутой из массива породы с целью ее подготовки для дальнейшей очистки каким-либо способом. При механическом просеивании можно отделить определенную фракцию грунта (например, наиболее насыщенную загрязнителем) или отделить сам загрязнитель (например, если он представлен твердым кристаллическим веществом).

Механическое перемешивание является важным этапом при использовании целого ряда химических, физико-химических и биологических методов, как показано ниже. Вспашка - это предварительный этап перед промывкой солонцов с целью рассоления, механическое перемешивание используется и в процессе промывки.

Для рассоления почв часто применяется землевание, т.е. механическое нанесение слоя чистой почвы на поверхность загрязненного массива. Для землевания лучше всего подходят черноземные почвы, так как они содержат больше кальция и органического вещества. Во многих случаях может использоваться также землевание со вспашкой. После проведения землевания на одном из полигонов на Алтае за 16 лет содержание в почвах обменного натрия снизилось с 68 до 11%.

Механическая локализация загрязнителей

Механическая локализация загрязнителей в массивах с целью недопущения расползания аномалии осуществляется с помощью механических экранов. Это непроницаемые для загрязнителя экраны, создаваемые из различных природных или искусственных материалов, помещаемые в массив и окружающие очаг загрязнения со всех или некоторых сторон.

Примером создания таких механических экранов являются оборудованные безопасные свалки с непроницаемыми защитными экранами в нижнем основании.

В качестве непроницаемых экранов используются всевозможные пленки, покрытия или слои из синтетических материалов. Технология создания таких механических защитных экранов, являющаяся частью технической мелиорации пород (так называемые геосинтетика и геотекстиль), разрабатывается в специальных отраслях инженерной геоэкологии.

Наиболее простой и часто применяемый способ использования механических защитных экранов - создание водонепроницаемых покрытий на поверхности загрязненных массивов. Это делается, например, для того, чтобы предотвратить растворение загрязнителя за счет выпадающих осадков и тем самым исключить возможное рассеивание загрязненной аномалии и вширь, и вглубь. Такая мера применяется сразу же после возникновения загрязненной аномалии, случившейся, например, при аварии на автотранспорте, проливе токсичных веществ и т.п. Этот экран является временной мерой, применяемой до момента начала работ по ликвидации загрязнения. Естественно, что поверхностные защитные экраны можно создавать лишь на ограниченной площади и, следовательно, применять лишь для локальных загрязнений. В качестве таких поверхностных экранов используются различные водонепроницаемые покрытия -полиэтиленовые пленки, водонепроницаемые ткани и т.п.

Технология создания поверхностных защитных экранов довольно проста. Вокруг очага загрязнения на поверхности массива выкапывается дренажная канава для отвода воды с учетом уклона и рельефа местности. Канава располагается на таком расстоянии от аномалии, чтобы исключить взаимный контакт дренируемой воды и загрязнителя. После подготовки дренажной канавы на поверхность загрязненного массива укладывается защитный экран (пленка, ткань и т.п.) и закрепляется по всему периметру таким образом, чтобы его не сдуло ветром и чтобы дождевая вода с него стекала в дренажную канаву.

Защитные поверхностные пленки являются временными, и после удаления загрязнения они ликвидируются.

II. ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ УДАЛЕНИЕ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ

Гидродинамическое удаление загрязнителей осуществляется путем промывки водой грунтового массива, растворения и фильтрации воды.

Промывка массивов от загрязнителей в общем случае представляет собой один из вариантов выщелачивания или экстракции (гл. 6), в котором выщелачивающей жидкостью является вода. Промывка осуществляется в двух вариантах: при диффузионной промывке происходит переход отмываемого загрязнителя из порового раствора грунта в промывную воду под влиянием разности концентраций при контактировании грунта с промывной жидкостью; при фильтрационной промывке (методом вытеснения) происходит переход загрязнителя в промывную жидкость, частично за счет его вытеснения из порового раствора, замещения промывной жидкостью и растворения.

Методы гидродинамического растворения токсичных загрязнений основаны на способности некоторых экологически опасных соединений образовывать с водой идеальные или неидеальные растворы. В целях очистки промышленно загрязненных почв и грунтов от растворимых солей токсичных соединений используют поверхностное и подземное затопление водой и выщелачивающими растворами. С помощью растворения загрязнений водой удастся очистить почвы от тяжелых металлов (хрома, кадмия, серебра, меди), радионуклидов (америдия и плутония), летучих и растворимых углеводородов, галогенидов, пестицидов, гербицидов и цианогидрида ацетона.

Несмотря на большой класс удаляемых загрязнений, данный метод малоэффективен и может вызвать загрязнение более глубоких почвенных горизонтов и подземных вод. Поэтому применение этого метода в экологических целях возможно только в комплексе с другими химическими и гидродинамическими методами. Метод не применим для изотропных по проницаемости почв и пород.

Промывка массивов от загрязнителя наиболее часто осуществляется по схеме рассоления грунтов, например, применяемого при сельскохозяйственной мелиорации для ликвидации вторичного засоления почв. В этом случае загрязнитель растворяется и разбавляется поступающей в массив водой и выносится либо в специально созданную дренажную систему, либо в нижележащие горизонты подземных вод.

Данный метод очистки имеет ряд ограничений. Он может применяться лишь для таких загрязнителей, токсичное действие которых может быть снижено разбавлением водой, а также когда исключается вредное воздействие загрязнителя на подземные воды. Этот метод не применим к глубоко залегающим загрязнителям и в основном эффективен для удаления поверхностных водорастворимых загрязнителей. Метод требует значительного количества пресной воды.

Перед промывкой поверхность массива выравнивается, глубоко вспахивается и разбивается валиками на чеки - прямоугольные участки размером 0,1-0,3 га. Затем чеки затопляют водой. Промывные нормы воды устанавливают в зависимости от степени загрязненности массива, водопроницаемости грунтов, состава загрязнителя, его растворимости и т.п. Например, для рассоления метрового слоя почвы необходимо 4-10 тыс. м³/га воды. Промывные воды отводят через расселяющий дренаж для того, чтобы они не попали в нижележащие водоносные горизонты. Длительность промывки при рассолении доходит до 1-2 лет, при этом очистка массива никогда не бывает полной. Расселяющий дренаж используют в двух вариантах: вертикальном и горизонтальном. Горизонтальный дренаж может иметь разную глубину (до 3 м, иногда более). Наиболее целесообразен систематический (т.е. равномерно распределенный на территории массива) горизонтальный трубчатый дренаж с уклоном дна не менее 0,001 и нормальным сбросом дренажных вод в водоприемник.

В том случае, если не обеспечивается самотечный сброс дренажных вод, устанавливаются насосные станции, откачивающие дренажные воды. Из водоприемника загрязненные воды подлежат дополнительной очистке каким-либо из специальных способов водоподготовки.

Для прокладки горизонтальной дренажной сети используются различные дренажные машины, различающиеся по способу укладки дрен в грунт (траншейный, узкотраншейный, бестраншейный и т.п.). При наиболее распространенном траншейном способе укладки применяются дренажные машины с рабочим органом в виде ковшовой цепи. Экскаватор-дреноукладчик, передвигаясь на гусеничном ходу, прокладывает траншею ковшами, грунт из которых поступает на ленточный

конвейер и разгружается в насыпь вдоль траншеи. С помощью трубоукладчика в траншею укладываются специальные (пористые или перфорированные) дренажные трубы, которые соединяются между собой и засыпаются.

Вертикальный систематический расселяющий дренаж состоит из системы вертикальных скважин, равномерно размещенных на всей площади загрязненного массива, из которых откачивают воду. Глубина скважин может достигать 30-150 м, диаметр их меняется в пределах 15-30 см и более, высота качания 6-20 м, а расход воды составляет до 25-300 л/с. Количество и чистота скважин определяются исходя из гидрогеологических особенностей массива, концентрации загрязнителя и т.п.

Вертикальный дренаж может успешно работать при наличии достаточно мощного водопроницаемого пласта, находящегося в гидравлической связи с промываемым грунтом.

В легко размываемых (например, лёссовых) грунтах вертикальные дренажные скважины могут создаваться с помощью размыва. Дренаж используется и при очистке массивов от поверхностного нефтяного загрязнения. Для этого создается сеть дренажных канав, где собираются нефтепродукты и вода, в дальнейшем нефтепродукты тем или иным образом из канав извлекаются и утилизируются.

Вариант промывки массивов и загрязненных водонасыщенных пластов пород представлен в виде схемы замкнутого цикла.

В этом случае используется система из нескольких нагнетательных и эксплуатационных скважин. Через нагнетательные скважины подается промывочная вода, поступающая в очищаемый горизонт массива, а через эксплуатационные скважины проводится откачка воды вместе с растворенным в ней загрязнителем.

Откачиваемая "грязная" вода на поверхности подвергается очистке от загрязнителя, проходя через систему водоочистки и попадая в резервуар. Из резервуара вода вновь насосами подается в нагнетательные скважины и т.д. Система водоочистки зависит от состава загрязнителя и состоит из различных сепараторов, очистных блоков и фильтров, с помощью которых от воды отделяется загрязнитель.

Преимуществом подобной замкнутой схемы очистки массива является то, что загрязнитель частично концентрируется, выводится из геологической среды и может в дальнейшем быть подвергнут переработке или утилизации.

Фильтрация применяется чаще всего для очистки поверхностных вод, однако нередко создаются специальные фильтрующие стенки и в грунтовых массивах. Фильтрация может быть как просто механическим (через нейтральные фильтры) для очистки от взвешенных частиц, так и с использованием специфических фильтров, удерживающих растворенные и коллоидные вещества за счет физико-химических взаимодействий.

Наиболее известным методом удаления загрязнения вместе с водой является откачка. Она может применяться самостоятельно и в сочетании с другими методами для всех типов загрязняющих веществ, содержащихся в подземных водах. Откачка проводится с помощью специально оборудованных скважин или игло-фильтровых установок.

Практически во всех случаях нефтяного загрязнения грунтовых вод для очистки используется откачка. Наиболее эффективным при извлечении нефтепродуктов является метод совместной откачки. При использовании этого метода скважина оборудуется двумя насосами, нижний из которых является понижающим (откачивающим воду), а верхний - извлекающим (откачивающим нефтепродукты). Создаваемая нижним насосом воронка депрессии позволяет увеличить приток нефтепродукта к скважине и повысить эффективность очистных работ. Другим способом повышения эффективности извлечения нефтепродуктов является использование для обсыпки зафильтрового пространства скважин смеси гравия и олеофильного материала - фторопласта - в соотношении 1:1.

Существенным преимуществом откачки при удалении монолитного нефтяного загрязнения является возможность последующего использования извлеченных нефтепродуктов. В ряде институтов России (например, в Иркутском университете) разработаны стационарные, передвижные и самоходные установки, позволяющие откачивать нефть и нефтепродукты из техногенных залежей без существенного понижения грунтовых вод. При очистке грунтов и подземных вод от мощного загрязнения нефтью и нефтепродуктами за счет откачки при благоприятных гидрогеологических условиях реально можно извлечь около 30% содержащегося в массиве загрязнения.

Для очистки подземных вод от углеводородов может применяться также следующая комбинированная схема: бурят систему скважин, где из внутренней скважины ведется откачка, а во внешние скважины поступают инъекции воздуха. Широко применяется откачка и при удалении неорганических загрязнителей, например в случае ухудшения качества воды и засоления почв в местах открытой разработки калийных солей. Комплексная очистка территории от загрязнения нефтепродуктами и хромом, никелем и цинком осуществляется с помощью откачки воды из горизонтальных скважин, последующая очистка воды проводится с помощью химических реагентов.

Общим недостатком откачки является сильное нарушение обводненности массива, что изменяет гидродинамический режим территории и свойства пород, слагающих массив.

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Газовое удаление загрязнителей

Близкими по механизму действия к гидродинамическим методам очистки являются аэродинамические методы. При использовании этих методов загрязнение удаляется вместе с циркулирующим в массиве воздухом или газами. К аэродинамическим методам очистки массивов относятся различного рода продувки, а также вакуумная и паровакуумная экстракция. Аэродинамические методы в основном используются для удаления из грунтов газообразных и жидких летучих экотоксикантов.

Самым простым из аэродинамических методов является продувка загрязненного массива воздухом через скважины с выносом загрязнителей на поверхность. Она применяется для веществ-загрязнителей, находящихся в грунте в виде мелких твердых частиц, и проводится по аналогии с очисткой фильтрующих материалов. Продувка воздухом применяется также при локальных загрязнениях нефтяными углеводородами. Недостатками метода продувки являются невысокая степень очистки, малый очищаемый объем и в первом случае нарушение структуры почв и пород.

Более эффективна вакуумная очистка грунтов. Она применяется для очистки массивов, загрязненных газообразными или летучими токсичными компонентами, в основном в зоне аэрации.

Установка вакуумирования состоит из нагнетательной и вакуумной скважин. Через нагнетательную скважину под давлением подается воздух или газ, не реагирующий с загрязнителем. При этом вокруг скважины создается зона компрессии, из которой вытесняется загрязнитель. Радиус этой зоны зависит от давления компрессии и проницаемости грунта. Из расположенной рядом вакуумной скважины поровый воздух откачивается вакуумным насосом, при этом вокруг скважины создается зона разрежения, из которой откачивается токсичный загрязнитель и затем попадает в газовый сепаратор и резервуар для хранения или дальнейшей утилизации.

Вакуумирующие скважины имеют специальное устройство, обеспечивающее их герметичность. Вакуумирование в скважинах осуществляется с помощью специальных вакуумных установок. Большинство таких установок может работать и в режиме вакуумирования, и в режиме нагнетания газа.

НПО "Полет" в рамках конверсионной программы разработало и выпускает вакуумный нефтесборщик для зачистки замазученного грунта и сбора различных нефтепродуктов с поверхности почвы. Установка имеет производительность вакуумного насоса 30 т/ч при разрежении до 0,02 МПа. Максимальный диаметр прокачиваемых в установке частиц загрязненного грунта до 40 мм, диапазон вязкости собираемых нефтепродуктов или шлама 20-300 Па • с.

Кроме того, все более широкое применение получают передвижные вакуумные установки - вакуумные сборщики ("илососы"), смонтированные на шасси грузовых автомобилей и применяемые для сбора слоя нефти (или нефтепродуктов) с поверхности почвы, воды или из понижений рельефа и т.п.

Так, например, Арзамасский завод коммунального машиностроения выпускает такой сборщик на базе КРАЗ-260 с мощностью двигателя 220 кВт. Максимальное разрежение в его цистерне емкостью 7 м³ составляет 0,095 МПа при производительности вакуум-насоса 12 м³/мин. Аналогичные передвижные вакуумные нефтесборщики на автомобильном шасси предлагает Октябрьский завод оборудования нефти и газа нефтяной компании "Лукойл" [2].

НПО "Полет" разработало комбинированную мобильную установку для переработки нефтешлама и замазученных грунтов, располагаемую на четырех трейлерах. На первом находится

блок декантеров с автоматическим приводом, на втором - блок сепараторов, на третьем - система химической обработки твердой фазы и система очистки сточной воды, а на четвертом трейлере - вспомогательное оборудование (транспортёр, система альтернативной термообработки шлама с вращающейся печью сжигания со специальной горелкой и т.п.). Однако установка работает с переотложенным грунтом, а не в самом массиве.

Для сбора с поверхности почв небольших разливов нефти применяются различные портативные или ручные вакуумные сборщики.

Особым видом аэродинамического воздействия является продувка массива горных пород углекислым газом под высоким давлением для очистки от органических веществ, в частности от ароматических углеводородов. Процесс очистки включает в себя экстракцию ароматических углеводородов сверхкритическим углекислым газом и их последующее влажностно-воздушное окисление. Используется углекислый газ под давлением 48-137 атм. Для различных фракций углеводородов достигается эффект очистки от 75 до 99%.

Газовая нейтрализация загрязнителей

Если по каким-либо причинам токсичный загрязнитель невозможно откачать из грунта, то в этом случае его можно нейтрализовать с помощью закачиваемого газа.

Схема и технология таких работ аналогичны газовой силикатизации грунтов, применяемой для закрепления лёссов.

Через нагнетательные скважины в массив компрессорами под давлением закачивается газ, реагирующий с загрязнителем. Газ подбирается таким образом, чтобы нейтрализовать или разрушить загрязнитель. Для технологической реализации этой схемы могут использоваться вакуумные установки.

Метод не применим к инертным по газу загрязнителям, а также он не может использоваться в непористых породах и грунтах с низким коэффициентом проницаемости.

III.

ТЕРМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Термическое удаление загрязнителей

Термические методы удаления загрязнителей основаны на явлении термоосмоса. Метод применим лишь для массивов дисперсных или тонкопористых скальных грунтов, в которых возможен термоосмос.

Термоосмос представляет собой движение жидкости в тонкопористой среде под действием градиента температуры. Это явление всесторонне было исследовано Б. В. Дерягиным, который установил, что в основе термоосмоса лежит отличие энтальпии в различных поверхностных слоях жидкости в капилляре от объемного значения. При наличии вдоль оси капилляра градиента температуры возникает движение жидкости - термоосмос. Скорость термоосмотического потока пропорциональна перепаду температуры на концах капилляра.

Если в массиве загрязнитель содержится в поровом растворе или в парогазовой фазе, то при наличии температурного градиента в разных частях массива он будет двигаться вместе с термоосмотическим потоком жидкости или газа от области с более высокой температурой к области с более низкой температурой. При термоосмосе в не полностью водонасыщенных грунтах передвижение в порах воды или загрязнителя может осуществляться как в жидкой, так и в газовой фазе.

Технологическая реализация термоосмотического удаления загрязнителя базируется на установке, состоящей из источника нагрева породы, который может помещаться в скважину на требуемую глубину, и вакуумного насоса, удаляющего загрязнитель из соседней скважины. В качестве нагревателя могут служить специальные фильтры с электрическими нагревательными элементами. Наиболее рациональна такая схема расположения скважин, при которой в центральной скважине осуществляется нагрев пород, создавая требуемый для термоосмоса температурный градиент, а в окружающих ее скважинах проводится откачка загрязнителя, который передвигается от центра к периферии.

Вакуумируемые скважины при такой схеме соединяются трубопроводом и подключаются к единому вакуумному насосу. Откачиваемый при этом загрязнитель (газ или жидкость) собирается в емкость и затем подлежит утилизации.

Наиболее эффективен термоосмотический метод очистки в не полностью водонасыщенных пористых грунтах зоны аэрации. Недостатком метода является его относительно большая продолжительность: создаваемый температурный градиент необходимо поддерживать в массиве по нескольку дней, поскольку скорость термоосмотического перемещения жидкости в породе весьма мала. Определенным преимуществом метода является то, что он может быть применен в не полностью водонасыщенных грунтах, когда, например, невозможна откачка или промывка загрязнителя.

Термическая деструкция загрязнителей

Термические методы разрушения (деструкции) загрязнителей часто используются в грунтовых массивах. Очистка достигается в разных случаях как за счет нагревания, так и за счет охлаждения массивов. Нагревание используется во всех тех случаях, когда экотоксикант является термически нестойким соединением. При температурном воздействии на загрязнитель он может разлагаться на нетоксичные соединения или разрушаться. Особую роль термические методы, включая сжигание и пиролиз, имеют при конечном уничтожении или разложении отходов-экотоксикантов.

Нагревание грунта с целью деструкции загрязнителя осуществляется с помощью разных термических методов воздействия, многие из которых используются в технической мелиорации грунтов. Ориентировочный расчет температур в массиве на разном расстоянии от теплового источника проводится с помощью специальных диаграмм или графиков.

Для осуществления термической деструкции загрязнителей необходимо иметь информацию об их термической устойчивости. Термостойкость загрязнителя может быть оценена по данным термогравиметрического (ТГ) и дифференциального термического анализа (ДТА). С помощью этих анализов можно оценить те интервалы температур, при которых начинается существенная деструкция вещества-загрязнителя (например, по потере массы). Чем выше температура деструкции, тем более термостойко данное вещество-загрязнитель.

Обычно при повышении температуры в первую очередь начинают испаряться или разрушаться наиболее нетермостойкие загрязнители - летучие углеводороды, нефтепродукты и т.п. В определенной мере показателями термостойкости веществ-загрязнителей могут служить их температуры плавления, кипения, испарения и др.

Нагревание в сочетании с откачкой используется для очистки массивов от хлорбензола, а в сочетании с внесением химических реагентов для разложения полихлоридных бифенилов.

Витрификация представляет собой процесс остеклования грунта при высокой температуре, при этом часть загрязнителей разлагается, а часть стабилизируется. Имеются примеры использования этого метода для модификации пестицидов, ртути, диоксинов, хрома, радиоактивных веществ.

Высказано мнение о возможности использования магматических расплавов действующих вулканов для витрификации и термического разложения экотоксикантов. Согласно предложенному способу, экотоксиканты в специальных капсулах помещаются (сбрасываются) вблизи кратера действующего вулкана или укладываются на пути вытекающего потока магмы, в котором они консервируются. Однако на практике этот способ, очевидно, трудно осуществим.

Термический метод закрепления микроколичеств радиоактивных изотопов в силикатных материалах основан на свойстве глинистых минералов терять свои ионообменные свойства по мере повышения температуры. В бентонитовых глинах относительно надежный эффект был достигнут при 1000 °С. Фиксация может проводиться также в карбонатных породах.

При паровакуумной экстракции загрязненный массив пород нагревают до перехода воды и летучих загрязнений в пар, который затем откачивается вакуумированием. Метод применяется для очистки от углеводородов, ацетона, бензина, соединений ртути и других загрязнителей с относительно низкой температурой испарения. Температура в массиве после такой обработки составляет около 200 °С.

Термическое воздействие на грунты обладает бактерицидным свойством, так как большинство бактерий и токсичных микроорганизмов не выдерживают длительного воздействия повышенных температур, порядка 80-100 °С.

Термическая локализация загрязнителей

Термическая локализация загрязнителей может осуществляться в различных вариантах. Суть их состоит в том, что вокруг очага загрязнения, который необходимо иммобилизовать, создается с помощью термического воздействия непроницаемый монолитный экран из оплавленных или обожженных грунтов, препятствующий рассеиванию загрязнителя.

Так, например, с помощью термического воздействия (нагрева или охлаждения) можно создавать непроницаемые для загрязнителей экраны. Такие экраны с использованием повышенных температур создаются путем обжига или плавления грунтов, расположенных вокруг очага загрязнения. При обжиге частицы грунта спекаются или частично оплавляются, что хорошо видно на электронно-микроскопическом снимке, полученном после термообработки лёссового грунта. Такой грунт становится водостойким, а его водопроницаемость резко падает.

Схема плавления или обжига грунтов для создания непроницаемых экранов хорошо разработана и аналогична схемам, применяемым в технической мелиорации для термического закрепления грунтов. Для этого используются термические установки, работающие на твердом, жидком или газообразном топливе.

При обжиге дисперсных пылевато-глинистых грунтов с целью создания защитных экранов контролируются их плотность и проницаемость. По мере увеличения продолжительности термической обработки плотность грунтов увеличивается, а проницаемость, соответственно, снижается. При использовании отрицательных температур путем замораживания также могут создаваться водонепроницаемые экраны, изолирующие загрязнители. Экраны из замороженных грунтов создаются в таких температурных условиях, где невозможно по тем или иным причинам осуществлять нагрев и плавление пород. Для этого применяются холодильные установки, используемые в технической мелиорации грунтов и строительстве.

IV

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ

Электромагнитные методы очистки грунтов от загрязнений основаны на действии различных электромагнитных полей как на сами вещества-загрязнители, так и на естественные химико-минеральные компоненты грунтов. С помощью этих методов загрязнители могут удаляться из массива, разрушаться на месте или могут быть локализованы защитными экранами.

Магнитное удаление загрязнителей

Использование магнитных полей в технологиях очистки почв, грунтовых массивов, поверхностных и подземных вод пока не получило широкого применения и требует дальнейшего изучения и развития. В настоящее время магнитное воздействие в основном используют для удаления из порового раствора пород и почв, поверхностных и подземных вод ферромагнитных примесей и радионуклидов, а также для мобилизации загрязнений, находящихся в неподвижной или слабоподвижной форме.

На различной способности магнитного поля действовать на те или иные компоненты грунта, включая и загрязнители, обладающие разной магнитной восприимчивостью, основаны способы магнитного удаления загрязнителей. Существуют два варианта применения этих способов: 1) очистка в стационарных наземных установках - магнитных сепараторах; 2) очистка грунтов в массивах.

В первом варианте очищаемый грунт нарушенной структуры (после дробления) поступает в магнитный сепаратор, где, проходя через поле постоянных магнитов, грунт очищается от ферромагнитных примесей. При этом магнитная сепарация может осуществляться сухим и мокрым способом с применением магнитных полей напряженностью от 90 до 1500 кА/м. Крупногабаритные промышленные магнитные сепараторы широко применяются в процессах обогащения руд, очистки порошковых концентратов и т.п.

Во втором варианте магнитный сепаратор особой конструкции помещается через скважину в очищаемый от загрязнений массив. Удаление магнитных примесей осуществляется в водной фазе, находящейся в поровом растворе грунта. Одним из таких способов является метод высокоградиентной магнитной сепарации.

Метод высокоградиентной магнитной сепарации основан на способности некоторых химических неорганических веществ-загрязнителей приобретать различную остаточную намагниченность, что делает метод высокоселективным и позволяет выделять экотоксиканты. Магнитный сепаратор помещают в вертикальных скважинах на глубине с максимальным загрязнением с учетом гидродинамических условий участка. Удаление и консервация загрязнений происходят в поверхностных условиях. Метод разработан и успешно используется для дезактивации почв и пород, содержащих америций, плутоний и другие радионуклиды.

Электромагнитная деструкция загрязнителей

В современных технологиях очистки подземных и поверхностных вод, почв и пород широкое распространение получили различные электромагнитные (волновые) методы воздействия на загрязнения с целью их разрушения. Это обусловлено возможностью применения их как в качестве самостоятельных методов реабилитации геологической среды, так и в комплексе с другими методами. Эффективность электромагнитных методов достаточно высокая, однако вредное воздействие электромагнитного излучения на человека и биоту экосистем в ряде случаев ограничивает круг их применения.

На явлении магнитострикции основаны методы деструкции, дробления твердых токсичных компонентов при их намагничивании. Для разрушения таких компонентов могут применяться магнитострикционные вибраторы.

По-видимому, в определенной мере может использоваться и магнитная обработка грунтов для разрушения токсичных компонентов. Так, например, хорошо известна магнитная обработка воды для удаления из нее примесей и растворенных веществ. Магнитная обработка изменяет многие коллоидно-химические процессы, ускоряет коагуляцию взвесей, смачивание водой твердых минеральных поверхностей, адсорбцию ПАВ, процессы растворения и т.п.

Таким образом, магнитная обработка может в определенной мере использоваться в комплексных способах очистки грунтов от различных загрязнителей.

Наряду с этим может применяться ультразвуковая деструкция загрязнителей. К ультразвуковым относятся колебания и волны с частотами от $(1,5-2) \cdot 10^4$ Гц (15-20 кГц) и до 10⁹ Гц (1 ГГц). Ультразвук ускоряет многие массообменные процессы (растворение, экстрагирование, пропитку грунтов жидкостями и т.п.).

Ультразвуковая обработка эффективна для грубых и нефтяных загрязнений. При этом может происходить частичное разрушение грунта. Ультразвук очищает не только от отдельных частиц загрязнителя, но и от загрязнителей в пленках на поверхности частиц грунта. Эффективность ультразвуковой очистки повышается при резких колебаниях температуры. После ультразвуковой очистки в грунтах активизируются окислительные процессы, что вызывает повышение коррозионной активности, происходит подкисление среды. Одновременно ультразвук производит обеззараживание вод и грунтов.

Процесс ультразвуковой обработки подземных вод применяется для очистки их от загрязнения хлорированной органикой (трихлорэтилена, тетрахлорида и др.) и углеводородами. В методе используют систему ультразвуковых (акустических) нисходящих скважин и ультразвуковой реактор. Это устраняет необходимость транспортировки загрязненных вод на поверхность Земли и применения для очистки не менее токсичных химических реагентов. Метод не требует перемещения загрязнения на твердый сорбент для последующей обработки и обезвреживания. Достоинства метода в частичной или полной очистке вод без откачки их на поверхность, в возможности дальнейшего обезвреживания и применения извлеченных экотоксикантов, а также в низкой себестоимости (50-80 центов на 1 м³ обрабатываемой воды). Метод может быть объединен с обработкой геологической среды паровакуумной экстракцией.

Для очистки почв, пород и подземных вод от хлорированных энергозависимых и полунэнергозависимых органических загрязнений также используют электромагнитную энергию частот радиодиапазона (КР) и сверхвысоких частот (СВЧ). Метод основан на СВЧ-нагреве почв и грунтов на базе диэлектрического механизма в результате физического искажения молекулярной

структуры материала под действием приложенного электромагнитного поля. Физические искажения переходят в механические, а затем в тепловую энергию. В методе могут быть использованы частоты в диапазоне от 0,01 до 60 МГц и выше. Обычно в методе КР используют частоты 6,78 и 13,56 МГц, которые реализуются для использования в промышленном, научном и медицинском оборудовании, а в СВЧ-нагреве - 915 МГц.

Метод дает эффект быстрого нагревания за счет высокой скорости электромагнитного взаимодействия и проникновения в почву по сравнению с конвективным и кондуктивным переносом тепла. При этом СВЧ-нагрев грунтов вызывает разрушение токсичных компонентов, дегидратацию грунтов, окисление, удаление гидроксидов, диссоциацию карбонатов, полиморфные превращения силикатов и плавление пород.

Для деструкции различных загрязнителей в грунтах может использоваться и ультрафиолетовое излучение. Действие ультрафиолетового излучения в химических превращениях веществ-загрязнителей является разновидностью фотолиза. Это невидимое электромагнитное излучение в области спектра между видимым и рентгеновским излучением в пределах длин волн 10-400 нм. Реакции прямого фотолиза происходят, если химическое превращение претерпевает загрязнитель, поглощающий свет. Скорость трансформации вещества при фотолизе определяется скоростью поглощения квантов света и квантовым выходом процесса.

Фотолитические реакции в грунтах не протекают в глубине массивов, куда не проникает ультрафиолетовое излучение. Поэтому они осуществляются лишь в поверхностных слоях массивов.

Метод импульсной ультрафиолетовой очистки основывается на обработке загрязненного трихлорэтиленом, тетрахлоридом или хлороформом грунта в реакторных палатах, содержащих ксеноновые лампы. Импульсный ультрафиолетовый процесс является химическим процессом окисления энергозависимых органических загрязнений, который используется как средство разрушения легких углеводородов. Этим методом удастся достичь относительно высокого уровня очистки грунтов. Однако метод обеспечивает ограниченное удаление первичных продуктов фотоокисления летучих углеводородов, которые при дополнительном УФ-воздействии разлагаются в конечном счете до HCl, CO₂ и, вероятно, формилхлорида. Поэтому эффективные цепные реакции при применении метода возможны, только если исходные содержания загрязнителей не очень высоки. Для более эффективного разложения загрязнителей до менее токсичных соединений, например CO₂, необходимо включать в схему очистки процесс гидролиза и щелочные сорбенты для концентрирования газов.

Энергию ультрафиолетового излучения широко используют для обеззараживания поверхностных вод, и в ряде случаев этот метод обеззараживания воды считается более предпочтительным по сравнению с широко распространенным в России хлорированием воды. Очевидно, при определенных условиях можно осуществлять и ультрафиолетовое обеззараживание почв и пород, поскольку большинство патогенных микробов и бактерий не выдерживают ультрафиолетового излучения.

К электромагнитным методам относят и очистку грунтов с помощью лазеров. При этом процесс деструкции, окисления загрязнителей и обеззараживания грунтов происходит за счет их нагревания. Метод применим при очистке любых пород, почв и искусственных грунтов. Как и во всех описанных выше методах, основанных на высокотемпературном нагреве загрязненных участков геологической среды, в процессе обработки наблюдаются разрушение структуры, изменение свойств и биоты пород. Наряду с этими неблагоприятными экологическими последствиями обработки породы приобретают хорошие прочностные показатели, устойчивость к выветриванию и выщелачиванию. Таким образом, экотоксиканты, которые не были удалены из породы при очистке, прочно закрепляются в ней и не представляют опасности как источники долговременного хронического загрязнения геологической среды и экосистем.

Электромагнитная локализация загрязнений

Создание непроницаемых защитных экранов в грунтах для локализации загрязнителей электромагнитными методами осуществляется в основном на базе СВЧ-энергии (электромагнитное поле с частотой 800-1000 МГц и мощностью более 50 кВт), используемой, как было указано выше, и для деструкции загрязнителей. СВЧ-метод применяется для модификации свойств грунтов с 1980-х годов и активно разрабатывается в настоящее время не только для целей технической мелиорации грунтов, но и для локализации загрязнителей в массивах.

С помощью передвижных СВЧ-установок в массиве на требуемой глубине создается электромагнитное поле сверхвысокой частоты. Температура в месте нагрева достигает таких величин, что происходят не только дегидратация и обжиг грунта, спекание его частиц, но и частичное плавление минеральных компонентов.

В результате этого в массиве может быть сформирован слой сплавленной и обожженной породы, являющийся защитным экраном для загрязнителей. Установлено, что при СВЧ-обжиге при температуре 800-900 °С глинистые грунты приобретают большую прочность и плотность. Водостойкость дисперсные грунты приобретают уже при температуре 400-500 °С. При температуре 900-1000 °С происходит плавление частиц, порода из дисперсной переходит в монолитную скальную. При этом кардинально меняются структура и текстура пород, уменьшается пористость изначально дисперсных грунтов. Например, в суглинках с исходной пористостью 40-50 % после обжига при 800-900 °С она уменьшается до 30-35%, а при температуре 1000 °С она снижается до 15-17%.

При СВЧ-нагреве происходит существенное преобразование химико-минерального состава грунтов. Так, в диапазоне температур 100-300 °С происходит дегидратация грунта с потерей не только свободной, но и связанной воды. Одновременно развивается усадка грунта, увеличивается доля конденсационных структурных связей. При температуре 350-600 °С происходят сгорание органики и деструкция низкотемпературных загрязнителей, окисляются сульфиды (350-500 °С). В диапазоне 450-800 °С удаляются гидроксильные группы из глинистых минералов и загрязнителей с ОН-группами. Одновременно в грунтах формируются необратимые фазовые контакты, доля которых в грунте увеличивается с ростом температуры. В диапазоне 400-900 °С происходит диссоциация карбонатов с образованием оксидов (СаО), обладающих гидравлическими вяжущими свойствами и повышающими рН грунта. Диссоциация слюд происходит при 450-850 °С, а хлоридов при 500-900 °С. Примерно в этом же диапазоне осуществляются полиморфные превращения кварца по схеме: ос-кварц $\rightleftharpoons$ р-кварц $\rightleftharpoons$ (3-тридимит $\rightleftharpoons$ кристобаллит $\rightleftharpoons$ о расплав (стекло). При температуре более 1000 °С происходят плавление и формирование высокотемпературных минеральных фаз в грунте.

Процесс сплавления грунта при создании непроницаемых экранов с помощью СВЧ-поля может в определенной степени регулироваться с помощью введения в грунт гидроксидов железа. Аллюминия, щелочных металлов, кремнезема и других компонентов.

Таким образом, среди физических методов очистки грунтов от загрязнителей существует довольно широкий спектр различных способов, эффективность которых зависит от типа грунта, количества и вида загрязнителя.