

УДК 55.502.55

ГРАВИТАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ОТ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

© 2007 А. А. Голубев

*Российский Государственный Геологоразведочный Университет им. Серго Орджоникидзе,
117997 Москва ул. Миклухо-Маклая д.23; e-mail: ribak_starwii@mail.ru*

Представлены результаты работ направленных на экологическую реабилитацию геологического пространства от мощного углеводородного загрязнения с применением гравитационных методов очистки. Обозначены основные стадии экологической реабилитации. Рассмотрены альтернативные варианты применения гравитационных методов, варибельность инженерного исполнения и дана оценка их эффективности.

ВВЕДЕНИЕ

Добыча углеводородного сырья, без которого цивилизация не может обойтись, сопровождается огромным ущербом для биосферы. В настоящее время ни один из современных промыслов не относится к «безотходным» или экологически безопасным производствам из-за несовершенства технологий добычи или ее нарушений, неудовлетворительного качества или недопустимого износа оборудования. При этом, чем интенсивнее изъятие нефти, тем активнее идет формирование техногенных потоков углеводородов, попадающих в природную среду. Нефть и нефтепродукты являются приоритетными загрязнителями природной среды (Солнцева, 1998 г.).

Ежегодно в России добывается порядка 400-500 млн. тонн нефти. В 2007 г. этот показатель составил 492 млн. тонн. Уровень потерь углеводородного сырья в процессе всего технологического цикла (добыча, переработка, транспортировка, потребление) в России оценивается в 0.5 – 2% от объема добычи (Булатов, 2004 г.). Потери нефти и нефтепродуктов формируют устойчивое загрязнение всех компонентов природной среды. По состоянию на сегодняшний день объем жидких нефтеотходов, накопившихся в геологическом пространстве, оценивается в 100 млн. тон, что четко указывает на масштаб и серьезность этой экологической проблемы (WaseTech, 2007 г.).

Как правило, к загрязняющим объектам относятся нефтеперерабатывающие заводы, магистральные продуктопроводы, склады горюче-смазочных материалов (ГСМ) и прочие объекты топливного обеспечения.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И РЕАБИЛИТАЦИИ

Углеводородное загрязнение геологической среды, особенно мощное с образованием жидкой фазы на поверхности водоносного горизонта, характеризуется сложной многоуровневой структурой. Основные элементы такого рода загрязнений показаны на (рис. 1).

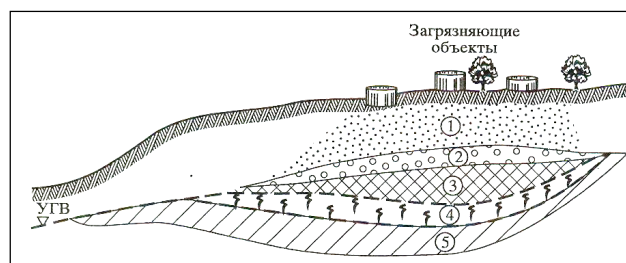


Рис. 1. Обобщенная схема УВ загрязнения геологической среды (Боревский Б.В., Боревский Л.В., Бухарин С.И. 1997 г.):

1 - зона газообразных углеводородов, 2 - зона заземленных углеводородов, 3 - зона углеводородного насыщения (линза жидких нефтепродуктов), 4 - зона капельных углеводородов в воде, 5 - зона эмульгированных и растворенных углеводородов, УГВ - уровень грунтовых вод.

На объектах, загрязненных углеводородами, процесс экологической реабилитации проводился в несколько этапов, в зависимости от степени загрязнения:

1) **Полевые исследования** - включали в себя приповерхностные газо-геохимические исследования (определение концентраций грунтовых газов CH_4 , CO_2 и O_2 на глубине до 1 м) и грунтовые исследования (определение концент-

рации адсорбированных нефтепродуктов до глубины 2 м, с интервалом отбора проб – 0.5 м).

2) **Обработка материалов полевых исследований** – включала в себя статистическую обработку числового материала, построение карт полей концентрации грунтовых газов и карт распределения концентраций адсорбированных нефтепродуктов. Из анализа карт и числового материала рассчитывались основные параметры загрязнения (площадь, объем загрязненного грунта, масса загрязненного грунта, масса парогазовой фазы) и намечались места бурения разведочных скважин.

3) **Бурение разведочных скважин** – проводилось в границах аномалий, выявленных в процессе газо-геохимических и грунтовых исследований. В процессе бурения из скважин отбирались пробы грунта через каждый метр, для определения физических параметров и концентраций адсорбированных нефтепродуктов. В скважинах, при помощи межфазной рулетки (резиствиметра), определялись основные параметры: абсолютные отметки уровня грунтовых вод, абсолютные отметки уровня жидких нефтепродуктов и мощность слоя жидких нефтепродуктов.

4) **Обработка материалов скважинных исследований** – включает в себя построение карт изопахит слоя жидких нефтепродуктов и карт гидроизогипс. Проводится расчет запасов жидких нефтепродуктов в грунтовом массиве. Обобщается информация о фильтрационных свойствах разреза, и намечаются мероприятия по ликвидации загрязнения.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Работы по экологической реабилитации проводились на территории аэродромного хозяйства и прилегающей к нему территории, почвы и подстилающие породы которых сильно загрязнены нефтепродуктами. Объект расположен в Щелковском районе Московской Области в 13 км от московской кольцевой автодороги МКАД по Щелковскому шоссе (рис. 2).

Источниками загрязнения грунтов и грунтовых вод нефтепродуктами являются склады ГСМ, расположенные в юго-восточной части территории изучаемого объекта. Склады эксплуатируются с 1956 г. Топливо к ним доставляется железнодорожным транспортом, в цистернах. Заполнение резервуаров осуществляется по продуктопроводу диаметром 100-150 мм и протяженностью 3.1 км. Резервуары размещены на бетонных основаниях, часть резервуаров заглублены, примерно на 3 м.

Годовой оборот складов ГСМ более 100 тыс. тонн. Основной причиной формирования углеводородного загрязнения почв и подстилающих пород является грубое нарушение правил хранения и технологии прокладки продуктопроводов, а

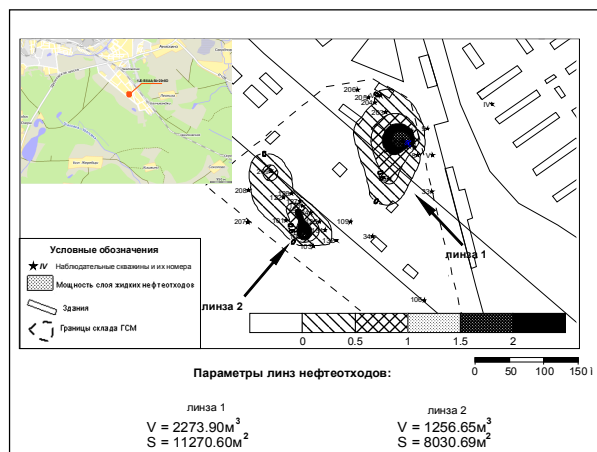


Рис. 2. Жидкофазное углеводородное загрязнение геологической среды на объекте исследования, местоположение на врезке.

именно их подземное заложение. В течение длительного периода (более 30 лет) осуществлялась эксплуатация объектов, находящихся фактически в аварийном состоянии. Через подземные продуктопроводы, при перекачке топлива, нефтепродукты под давлением закачивались в подстилающие породы, так же имели место аварии и технологические проливы, что и сформировало устойчивое углеводородное загрязнение геологической среды.

Сложившаяся неблагоприятная экологическая ситуация осталась бы без внимания если бы ее последствия не коснулись территории жилого поселка, расположенного на недопустимо близком расстоянии от складов ГСМ.

Факты появления нефтепродуктов в подвалах домов и гаражей, колодцах и скважинах известны примерно с 1984-85 гг. Однако только в 2001 году, в связи с обильным паводком и резким подъемом уровня грунтовых вод, загрязнение грунтов углеводородами приобрело характер экологического бедствия. Мощность слоя жидких нефтепродуктов в наблюдательных скважинах, расположенных в близлежащем поселке, достигала 1 м.

За период с 2000-2002 гг. проведена большая профилактическая и ревизионная работа по обновлению складов и замене старых емкостей. Подземные продуктопроводы полностью заменены на новые и имеют надземное заложение.

Несмотря на то, что утечки топлива в процессе технологических операций практически сведены к нулю, масштаб загрязнения геологической среды нефтепродуктами, по прежнему, носит характер экологического бедствия в 2003 г. началась экологическая реабилитация загрязненной территории.

Исследования на объекте включали в себя все перечисленные выше этапы. Комплексное обследование территории позволило параметризовать загрязнение. Результаты расчетов приведены в табл. 1. В табл. 2 приведено процентное соотношение

Таблица 1. Параметры углеводородного загрязнения.

N	Параметр	Значение
1	Объем загрязненного грунта $V_{зг}$ (m^3)	538 936
2	Масса загрязненного грунта $M_{зг}$ (т)	1 077 872
3	Масса адсорбированных нефтепродуктов $M_{нп}$ (кг)	1 819 097
4	Масса углеводородной парогазовой фазы $M_{пг}$ (кг)	46 744
5	Объем жидких нефтепродуктов $V_{нп}$ (m^3)	15 717
6	Объем загрязненных грунтовых вод $V_{зв}$ (m^3)	319 892
7	Масса растворенных НП в грунтовых водах $M_{рн}$ (кг)	1 903

Таблица 2. Статистические характеристики дебитов нефтеотходов на шахтном лучевом дренаже.

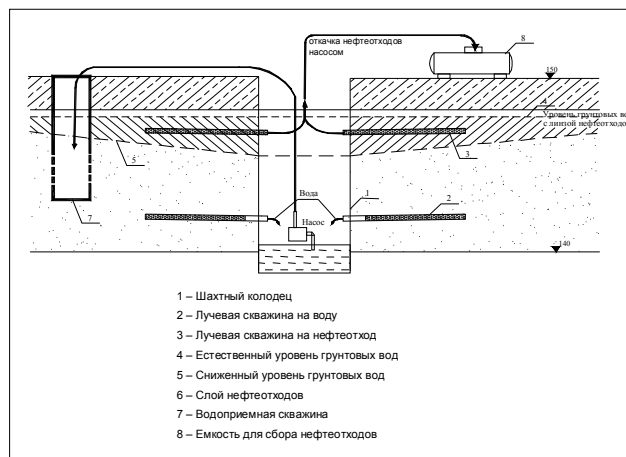
Элемент загрязнения	Масса (т)	Доля (%)
$M_{нп}$	1819.1	13.02
$M_{пг}$	46.7	0.33
$M_{нп}$	12102.1	86.63
$M_{рн}$	1.9	0.01
Итого	13969.8	100.00

массовых долей параметров загрязнения (рис. 2) иллюстрирует жидкофазное углеводородное загрязнение, представленное двумя изолированными линзами — обусловлено гидрогеологическими особенностями объекта, залегающими на первом от поверхности водоносном горизонте на интервале глубин 1.5–3 м от дневной поверхности.

Анализ массовой структуры загрязнения (табл. 2) показал, что его основная доля приходится на жидкие нефтепродукты. Значительное место занимают адсорбированные грунтом нефтепродукты. Парогазовая углеводородная фаза составляет малую часть загрязнения. Минимальная доля приходится на растворенные углеводороды.

Основной, наиболее опасной и высоко мобильной является жидкофазная часть загрязнения. Фактически, она формирует все другие его элементы и определяет масштаб проблемы в целом. По этой причине удаление жидких нефтепродуктов из загрязненной зоны является абсолютно приоритетной задачей. До ее решения, ликвидация других элементов загрязнения, бессмысленна, так как они будут воспроизводиться жидкими нефтепродуктами мигрирующими в грунтовом массиве.

Для ликвидации жидкофазного загрязнения существует множество различных методов, как по инженерному решению, так и по механизму воздействия (Королев, 2001 г.) На данном объекте применялись гравитационные методы (откачка из массива). Для осуществления откачек смеси нефтеотходов и воды из грунтов на объекте были построены и введены в штатную эксплуатацию две одинаковых по принципу и разных по инженерному исполнению системы ликвидации загрязнений. На первой линзе (рис. 2) ликвидация загрязнения осуществлялась шахтным лучевым дренажем, на второй системой вертикальных

**Рис. 3.** Схема двухъярусного шахтно-лучевого дренажа.

скважин специальной конструкции. Описание каждой из систем приведено ниже:

Шахтный лучевой дренаж — включает в себя вертикальный шахтный колодец (рис. 3) — диаметром 4 м и глубиной 8–10 м. Из шахтного колодца, с помощью специальных установок бурятся горизонтальные скважины на двух уровнях разреза.

Нижний ярус скважин, закладывается на 0.5 метров выше кровли водоупора в слое крупнозернистых песков. Он включает четыре горизонтальные скважины, диаметром 70 мм и длиной 50 метров каждая. Скважины перфорированы и оборудованы в виде фильтров, дренирующих водоносный горизонт. Грунтовая вода по дренам поступает в нижнюю часть шахтного колодца и откачивается насосом, что обеспечивает ее постоянный приток в шахту. Данная операция обеспечивает снижение УГВ и формирование воронки депрессии вокруг шахтного колодца. Подтоварная вода, извлеченная из колодца, подается в водопримемные скважины, расположенные выше по потоку грунтовых вод. Это обеспечивает ее возврат в технологический цикл, необходимый для поддержания стационарного режима откачки и стабильных параметров воронки депрессии. В процессе циркуляции, подтоварная вода подвергается произвольной аэрации, вызывающей усиление микробиологического распада растворенных нефтепродуктов (НП) и, как следствие, ее очистку (Михайлов, 2007).

Верхний ярус, включает в себя восемь горизонтальных скважин, диаметром 70 мм, длиной по 25 м каждая. Скважины перфорированы, выполняют роль фильтров, дренирующих залежь жидких нефтепродуктов. Воронка депрессии, сформированная за счет работы нижнего дренажа, фактически является ловушкой для НП, которые постепенно скатываются в ее контур. Глубина воронки, оптимальная для гидрогеологических условий объекта, составляет три метра. Верхний дренаж закладывается на 0.5 м выше уровня ее

дна. Он обеспечивает сбор и отведение нефтепродуктов из контура воронки депрессии в первичный резервуар накопитель, расположенный в шахтном колодце. Из шахтного колодца НП откачиваются насосом в заглубленный резервуар отстойник, расположенный на дневной поверхности. Из резервуара нефтепродукты отгружаются в автотранспорт и вывозятся на утилизацию.

Данная технология позволяет не только эффективно извлекать жидкие нефтеотходы, но и позволяет производить дальнейшую деструкцию загрязнения по средствам биовентеляции (подача смеси воздуха и биологически активных компонентов в верхние дрены ШЛД, что активизирует деятельность бактерий и вытесняет углеводородные газы из грунтов зоны аэрации) (Глазовская, 1984). Указанная операция осуществляется только после ликвидации жидкой фазы загрязнения.

Система вертикальных скважин СВС – представляет собой сеть вертикальных скважин большого диаметра – 426 мм, связанных между собой системой трубопроводов и электросетей. Скважины имеют специальную конструкцию, которая в свою очередь обусловлена только техническими ограничениями, связанными с отведением подтоварных вод, образующихся в процессе откачек. На данном объекте проблема отведения подтоварных вод не решена в районе локализации линзы 2 из-за плохих фильтрационных свойств грунтов и высокого уровня грунтовых вод. Используемая конструкция скважин (рис. 4) обеспечивает максимальную эффективность при дискретных откачках.

Скважины оборудованы одним насосом, который откачивает смесь нефтеотходов и воды в резервуар, где в последствии происходит гравитационное разделение на нефтеотход и воду. Вообще на практике скважины оборудуются двумя

насосами, один для постоянного водопонижения, второй для отбора нефтеотходов (Королев, 2001 г.), но в условиях данного объекта это не оправдано из-за отсутствия водопримных мощностей.

Таким образом, СВС по сути адаптирована к сложным геологическим условиям и техническим ограничениям, из-за модернизаций КПД такой системы существенно снижается, но все равно она оправдана ввиду отсутствия альтернативных решений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ ОЧИСТКИ

Шахтный лучевой дренаж введен в эксплуатацию в декабре 2005 года и с этого момента функционирует в штатном режиме. Исключения составляют лишь краткие периоды остановок, вызванные сбоями в электроснабжении, мелкими авариями, профилактическими и ремонтными работами. Общий срок эксплуатации данного элемента системы ликвидации загрязнений (СЛЗ) составляет 92 недели.

Основным показателем эффективности работы системы является скорость извлечения нефтеотхода (НО) или суммарный дебит. Для осредненной оценки данного показателя использовался весь объем производственных данных накопленных за 91 неделю.

На основании ежедневных объемов откачки НО, рассчитывались среднесуточные дебиты за каждую неделю. Анализ результатов статистической обработки (табл. 3) позволяет оценить эффективность работы системы.

Таблица 3. Статистические характеристики дебитов нефтеотходов на шахтном лучевом дренаже.

№	Стат. параметр	Значение (куб. м/сутки)
1	Среднее	0.325
2	Стандартное отклонение	0.185
3	Интервал	0.964
4	Минимум	0.090
5	Максимум	1.054
6	Количество измерений	91

Система подобного рода является по сути уникальной, так как ее параметры подбираются в каждом случае индивидуально в зависимости от параметров загрязнения и разреза. В процессе эксплуатации выделяется три основных периода:

1. Начальный период - с момента запуска до 19-ой недели эксплуатации. Он характеризуется максимальными скоростями добычи, обусловленными эффектом «вскрытия залежи», а также благоприятными гидродинамическими условиями зимы 2006 г.

2. Второй период - с 20 до 62-ю неделю эксплуатации. Характеризуется падением скоростей добычи. Наблюдаемые эффекты обусловлены неоп-

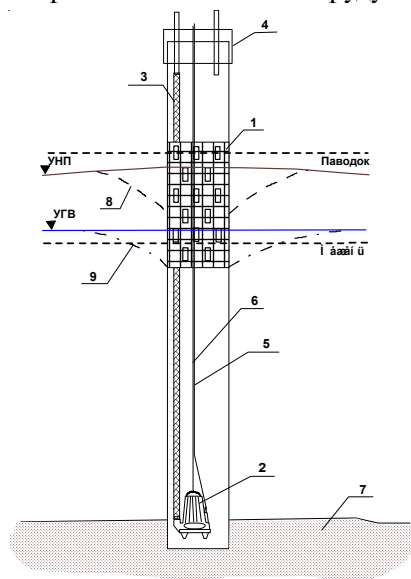


Рис. 4. Скважина для дискретных откачек.

тимальным режимом эксплуатации, вызванным ограничениями по водопримным мощностям, и отсутствием опыта эксплуатации системы в имевших место неблагоприятных гидрогеологических условиях. В данный период шло накопление ценного опыта, который позволил выработать более эффективные режимы эксплуатации ШЛД.

3. Третий период – с 62 по 92-ю неделю. Наблюдается рост скоростей добычи по сравнению с предыдущим периодом, обусловленный вводом системы в оптимальный режим эксплуатации.

Описанные выше периоды хорошо просматриваются на графике зависимости объемов откачки НО от времени (рис. 5).



Рис. 5. Динамика дебита жидких нефтеотходов на шахтном лучевом дренаже.

Всего за весь период эксплуатации ШЛД извлечено более 200 м³ жидких НО. На протяжении всего периода наблюдалась стабильность в работе системы на каждом этапе. Все вышеизложенное характеризует данный метод экологической реабилитации как эффективный.

Система вертикальных скважин введена в строй в августе 2006 года. С этого момента она находится в штатной эксплуатации. Общий срок работы СВС составляет 61 неделю.

В процессе работ осуществляется откачка грунтовой воды и жидких НО из вертикальных скважин. Вода сбрасывается в водопримные скважины.

Основным показателем эффективности работы СВС, также как и ШЛД, является скорость извлечения или суммарный дебит НО. Для расчета осредненной оценки данного показателя использовался весь объем производственных данных, накопленных за 61 неделю. На основании ежедневных объемов откачки НО рассчитывались среднесуточные дебиты за каждую неделю. Анализ результатов статистической обработки (табл. 4), позволил установить следующие закономерности в работе системы:

1. На протяжении всего периода эксплуатации системы наблюдается тенденция снижения дебетов НО. Резкое сокращение продуктивности системы наступает на 28-30 неделе эксплуатации, далее практически выходит на линейную зависимость со среднесуточным дебетом менее 100 л/сут. (рис. 6).

Таблица 4. Статистические характеристики скорости откачки нефтеотходов на системе вертикальных скважин.

№	Стат. параметр	Значение (куб.м/сутки)
1	Среднее	0.161
2	Стандартное отклонение	0.087
3	Интервал	0.352
4	Минимум	0.037
5	Максимум	0.389
6	Количество измерений	60

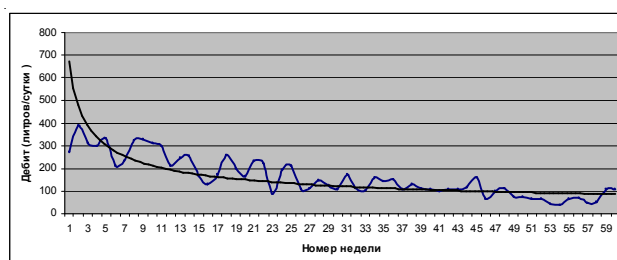


Рис. 6. Динамика дебита жидких нефтеотходов на системе вертикальных скважин.

2. Наблюдаемая закономерность падения продуктивности вызвана, вероятно, двумя основными причинами.

- во первых, незначительный радиус влияния отдельной скважины приводит к относительно быстрому «срабатыванию» основного объема жидких НО, залегающих в указанном контуре, и затем медленному извлечению остаточных углеводородов. Такая ситуация обусловлена, прежде всего, особенностями эксплуатации скважин. Фактически, они ориентированы на медленное натекание нефтеотходов. Активного формирования устойчивых воронок депрессии в водоносном пласте не проводится по ряду технических причин, и в первую очередь из-за отсутствия водопримных мощностей.

- во вторых, перфорация скважин в интервале залегания слоя жидких НО подвергается кольматированию за счет мелкодисперсных частиц, содержащихся в суспензии вода – нефтеотходы. Также, вероятно, имеет место минералообразование на сетке фильтра, вызванное повышенным содержанием железистых соединений в грунтовой воде.

За весь период работы системы было извлечено 75 м³ жидких нефтеотходов. На протяжении всего периода наблюдалась тенденция падения дебетов НО, что характеризует систему, как не стабильную и малоэффективную, однако данные результаты получены в условиях неблагоприятных технических и геологических условий, вероятно возможность постоянного водопонижения позволила бы стабилизировать работу системы и увеличить ее эффективность.

ВЫВОДЫ

Применение гравитационных методов очистки геологической среды позволяет эффективно осуществлять экологическую реабилитацию территорий, сильно загрязненных нефтепродуктами. Анализ эксплуатации систем ликвидации загрязнений типа шахтный лучевой дренаж и система вертикальных скважин позволил сопоставить эффективности работы и возможность альтернативного применения каждой из них:

Эффективность работы шахтного лучевого дренажа выше, чем системы вертикальных скважин, в условиях данного объекта в среднем в 3 раза;

- вариабельность исполнения шахтного лучевого дренажа много больше, чем системы вертикальных скважин это позволяет применять шахтный лучевой дренаж там, где невозможно применять вертикальные скважины, например, на объектах со сложной инфраструктурой (густая дорожная сеть, система кабелей, трубопроводов и т.д.) в силу отсутствия наземных коммуникаций;

- ограничением для обоих видов систем является необходимость отведения большого объема подтоварных вод;

- из анализа эффективности функционирования систем удалось сопоставить соотношение количества скважин, альтернативное одному шахтному дренажу. Таким образом, один шахтный лучевой дренаж заменяет 10-12 скважин.

На сегодняшний день любая экологическая деятельность является затратной и не приносит никаких финансовых доходов, но при ликвидации мощного углеводородного загрязнения, на первом

этапе (откачка жидких нефтеотходов), возникает так называемый эколого-экономический эффект, так как отобранный нефтеотход обладает товарными качествами и его рыночная стоимость колеблется от 4 до 9 руб. за килограмм. Обобщая вышесказанное необходимо отметить что в некоторых случаях, при мощном углеводородном загрязнении затраты на экологическую реабилитацию могут полностью окупаться и даже приносит прибыль в размере первых миллионов рублей, за счет реализации извлеченных нефтеотходов.

Список литературы

- Боревский Б.В., Боревский Л.В., Бухарин С.Н. и др.* К проблеме локализации и ликвидации нефтяных загрязнений на объектах Минобороны. *Геоэкология*. 1997. № 5. С. 75-83.
- Булатов В.И.* Нефть и экология. Научные приоритеты в изучении нефтегазового комплекса. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2004. 154 с.
- Глазовская М.А., Добровольская Н.Г.* Геохимические функции микроорганизмов. —М.: МГУ, 1984. 152 с.
- Королев В.А.* Очистка грунтов от загрязнений. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. 365с.
- Лифшиц А.Б.* Материалы работы круглого стола выставки WaseTech 2007 г. М.: Крокус Экспо, 2007. 52 с.
- Михайлов В. Н., Добровольский А. Д., Добролюбов С. А.* Гидрология М.: «Высшая школа», 2007. 467 с.
- Солнцева Н.П.* Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: МГУ, 1998. 376 с.

GRAVITATIONAL METHODS OF ECOLOGICAL REHABILITATION OF THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT FROM HYDROCARBONIC POLLUTION

A.A. Golubev

The Russian Geological Prospecting University

Results of works directed on ecological rehabilitation of geological space from powerful hydrocarbonic pollution with application of gravitational methods of clearing are presented. The basic stages of ecological rehabilitation are designated. Alternative variants of application of gravitational methods, variability of engineering execution are considered and the estimation of their efficiency is given.