УДК 622.413.4

Е.А.СИНЬКОВА
Горный факультет, аспирантка кафедры экологии, аэрологии и охраны труда

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ГРУНТОВ

На многих объектах, таких как промышленные предприятия, ТЭЦ, котельные транспортные парки, АЗС, склады горючесмазочных материалов и др., часто происходят поверхностные и подземные разливы нефти и нефтепродуктов. Нарушение экологической обстановки в грунтах и почве вызывает необходимость борьбы с утечками и рекультивации загрязненных территорий. Наиболее выгодной с экономической и экологической точки зрения является биоремедиация на месте загрязнения. При этом загрязненное пространство аэрируется через систему фильтровальных каналов, стимулируя жизнедеятельность автохтонных углеводородокисляющих микроорганизмов. Для установления закономерности изменения физико-химических свойств грунтов и параметров системы при бактериальном способе санации, определения критериальных зависимостей и уточнения конструкции биореактора был проведен анализ полевых работ, образцов загрязненного грунта и почв, создана математическая и обоснована физическая модель очага нефтяного загрязнения.

There are many different regions such as mining industrial factories, boilers, transport parks, storages of fuel-and-lubricating materials, gas station and etc. where surface and underground leakages of petroleum hydrocarbons are capable. The violation of ecological conditions in grounds and soil causes of strife with leakages and recultivation of the contaminated territories. The most profitable from the economical and ecological points of view is bioremediation on contaminated areas. Thus contaminated space is aerated through a system of filter tubes, boosting habitability of autochthonous microorganisms, which are capable of oxidizing hydrocarbons. For installation of regularity of change of physicochemical properties of grounds and parameters of a system at biological purification, definition of criteria relations and refinement of a design of the bioreactor the analysis of fieldwork and contaminated ground and soils, mathematical model was conducted, and also the physical model of the centre of petroleum hydrocarbons contamination.

Нефть и нефтепродукты (НП) имеют широкий спектр применения в качестве топлива и химического сырья на промышленных предприятиях, ТЭЦ, котельных, они накапливаются в хранилищах и резервуарах транспортных парков, автозаправочных станций, складов горючесмазочных материалов. На этих объектах часто происходят утечки из подземных емкостей и трубопроводов или поверхностные разливы НП, объем которых в подземном пространстве достигает сотен и тысяч кубических метров. Загрязняя окружающую среду, нефтяные углеводороды (НУ) не только губят флору и фауну, но и наносят вред здоровью человека. Они тормозят интенсивность протекания биологических и биохимических процессов, изменяют количество некоторых видов микроорганизмов в почвах и грунтах, способствуя развитию углеводородокисляющих бактерий, источником питания которых являются метанонафтеновые и ароматические углеводороды. Все это вызывает необходимость борьбы с утечками нефти и НП и рекультивации загрязненных территорий.

Решением задач, связанных с изменением экологической обстановки в местах заражения НУ, занимаются многие ученые-гидрогеологи, почвоведы, биологи, такие как В.А.Мироненко, В.М.Гольдберг, Н.П.Солнцева и др. Их исследования указывают на тот факт, что каждой геоэкологической и природно-климатической обстановке соответствует свой способ очистки грунтов:

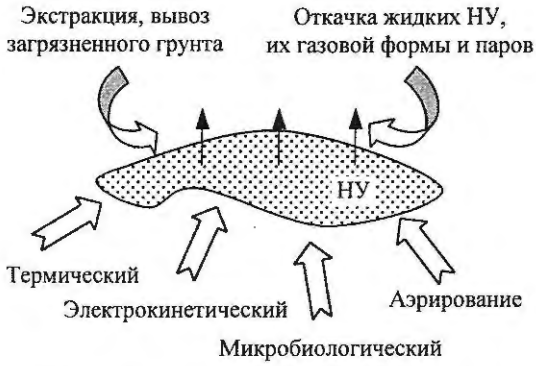


Рис.1. Основные способы очистки грунтов от НУ

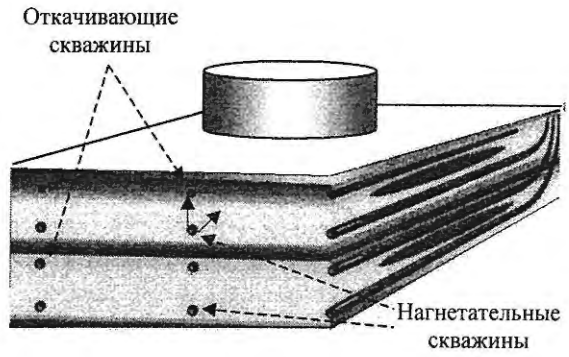


Рис.2. Схема внутригрунтового биореактора

термический, механический, экстракционный, микробиологический или др. (рис.1).

Помимо искусственных способов очистки, возможно естественное разрушение НП в геологическом пространстве путем химического окисления и биогенного разложения. Для биодеградации необходимо наличие в среде электронных акцепторов для протекания окислительно-восстановительных реакций, идущих при разрушении органического вещества в различных окислительно-восстановительных средах, с участием как автохтонных, так и привнесенных микроорганизмов родов Pseudomonas, Bacillus, Candida, Aspergillus и др. при разных pH и значениях свободной энергии Гиббса. К таким реакциям относятся: метанообразование (ферментация), сульфат-редукция, денитрификация, реакции восстановления Fe, Mn и др. В зависимости от интенсивности окисления, определяемого количеством окислителя (например, кислорода) и его активности, может осуществляться частичное или полное окисление НП.

Для ликвидации последствий нефтяных загрязнений как в России, так и за рубежом все шире используется эффект искусственного биологического разрушения НУ в аэробных условиях путем обогащения среды культурами микроорганизмов, адаптированных к загрязняющим веществам, и активизации их деятельности. Такой метод очистки в мировой практике называют биоремедиацией, причем наиболее актуальной является выгодная с экономической и экологической точек зрения очистка непосредственно на месте загрязнения без выемки грунта. При этом сооружается так называемый «внутригрунтовый реактор» (рис.2), представляющий собой систему горизонтальных фильтров, аэрирующих кислородом подземное пространство под существующими производственными установками, АЗС и др. и стимулирующих жизнедеятельность автохтонных микроорганизмов. Часть этих скважин откачивает нагнетаемый другими воздух, пройденный сквозь подземные горизонты и насыщенный CO_2 и легкими НУ. При таком способе санирования для достижения оптимальной нормы разложения вредных компонентов существует два способа: 1) подводить к загрязненному грунту воду, обогащенную O_2, например, при помощи перекиси водорода; 2) осуществлять инъекции воздуха, при которых водонасыщение является лимитом для концентрации клеточной массы в отношении к объему грунта.

В результате проведенных на многих объектах экспериментов Х.Шрайбер, В.И.Комащенко и др.* отмечают, что разложение вредных веществ происходит кислородом, подведенным нагнетаемым объемом воздуха, а не воды. Большинство положительных результатов связаны с исследованиями способов отсасывания воздуха из грунта при использовании вертикальных колодцев (фильтров), в то время как применение горизонтальных фильтров изучено недостаточно. Для детального изучения возможности способа и характеристик не-

Шрайбер Х. Современные методы очистки загрязненных грунтов на месте их залегания: Учебное пособие / Х.Шрайбер, В.И.Комащенко, Й.Мотес М.: Изд-во МГИУ, 2001. 167 с.

обходимого оборудования авторами* была построена математическая модель биореактора в ненасыщенном грунте. Движение воздуха в грунтовом реакторе рассчитывалось на этапе планирования санационных работ с использованием пакета программных средств ФЛУЕНТ. В этот пакет в качестве модельных уравнений входят усредненное по времени уравнение неразрывности и уравнение Рейнольдса с расширением по закону Дарси. В качестве очага загрязнения была рассмотрена территория АЗС, где в результате ошибки при заполнении подземного резервуара, в песчано-гравелистую зону ненасыщенного водой грунта попало около 14 т дизельного топлива. Общая площадь загрязненной территории 30×40 м. Территория представлена переслаиванием плейстоценовых крупно-, среднезернистых и гравелистых песков с прослоями ила и торфяных отложений до глубины 11 м. Неравномерное загрязнение углеводородами из нефтепродуктов отмечено по всему участку до глубины 11 м с повышенной концентрацией в диапазоне глубин от 4 до 8 м и на глубине 10 м, а максимальная концентрация вредных веществ составила 28 мг/г сухого грунта. Для санирования загрязненного участка можно было использовать очистку непосредственно на месте загрязнения и с выемкой и перевозкой грунта. Однако оценка расходов на второй метод составила, по приблизительным подсчетам, около $ 700 тыс., поэтому целесообразнее применить метод биоремедиации на месте загрязнения (рис.2).

Преимущество схемы с горизонтальными фильтрами состоит в том, что удается охватить значительно бóльшую площадь загрязнения; перехватить восходящий поток легких УВ, стремящихся к земной поверхности из почвенных и грунтовых горизонтов; сократить экономические затраты на бурение дополнительных скважин. В конце очистных мероприятий загрязнитель разложился на 30-40 % и уменьшился в среднем на 1200 мг/кг сухой массы, а при внесении минеральных удобрений – на 50-70 %.

Математическая модель системы очистки и проведенные натурные наблюдения на конкретном участке загрязнения не дают полной картины протекания аэрации в горном массиве и изменения параметров при фильтрации воздуха через пористую среду. Предлагаемая технология также не является совершенной. Целью наших исследований являлась оценка влияния физико-химических свойств грунтов и параметров системы на эффективность бактериального способа санации для уточнения конструкции биореактора и возможности его сооружения в районах с другими природно-климатическими и геологическими характеристиками.

По стандартным методикам отбирали образцы грунта на разных объектах нефтяного загрязнения и проводили анализ массовой доли НУ на анализаторе жидкости «Флюорат-02» в межфакультетской химической лаборатории СПГГИ (ТУ). Данные собирали с целью определения концентрации НУ в грунте в холодный период года и сравнения их с данными летних опробований на тех же объектах для построения зависимостей $C_{НУ} = f(T)$ в различные периоды года для климата нашей широты (табл.1). В лаборатории кафедры была построена физическая модель очага нефтяного загрязнения углеводородными соединениями, частично воспроизводящая натурные условия.

Таблица 1

Результаты измерения концентрации НП в грунтах на приборе «Флюорат-02»

Место отбора пробы	Глубина, м	Концентрация НП, мг/г
АЗС № 1	0,2-0,3	120,9
АЗС № 2	0,2-0,3	131,1
	0,5-0,6	80,6
Обочина автомагистрали	0,3	3,2
Промышленная площадка	0,8-1,0	1,9

Из теории подобия, основными критериями моделирования являются числа Re, Pe, Gr, которые характеризуют режим течения воздуха в пористой среде, температуру,

*Насонов И.Д. Моделирование физических процессов в горном деле / И.Д.Насонов, В.И.Ресин. М.: Изд-во Академии горных наук, 1999. 343 с.: ил.

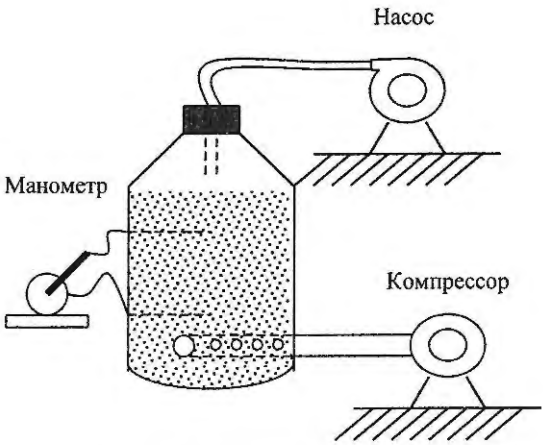


Рис.3. Схема установки для определения параметров фильтрации

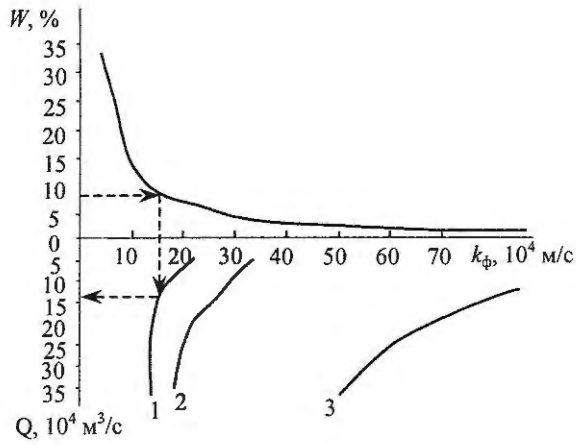


Рис.4. Номограмма для определения расхода воздуха
Классы, мм: 1 – –1+0,5 (утрамбованный);
2 – –1+0,5; 3 – –3+1

Таблица 2

Расчетные параметры моделирования

Размер зерен, мм	Q, м³/с	m	υ, м/с	h, кг/м²	n	$k_п \cdot 10^{-8}$, м²	Re	f
0,5-1,0	0,0015	0,403	0,075	12,20	1,32	0,20	0,21	2,073
	0,0025		0,11	20,60		0,17	0,29	1,500
	0,0036		0,16	33,20		0,15	0,39	1,073

скорость движения воздуха и др.* При расчете параметров движение воздуха было принято ламинарным. Целью экспериментов являлось определение: зависимости между перепадом давления подаваемого газа и скоростью его фильтрации; коэффициентов проницаемости, сопротивления, характера движения воздуха; влияния влажности загрязненного грунта на фильтрацию воздуха и температуры среды на испарение легких фракций УВ.

В цилиндр опытной установки (рис.3) с поперечной площадью F помещается исследуемый грунт (содержащий НП и отобранный непосредственно на месте загрязнения). К нижнему краю цилиндра подводится воздух через перфорированную пластиковую трубу определенного диаметра d и длины l для аэрации слоя грунта, толщина которого L. Компрессор, соединенный непосредственно с трубой, обеспечивает постоянный расход воздуха Q. Верхний край цилиндра соединен с насосом, откачивающим воздух, насыщенный легкими УВ. Задаваясь значениями Q и замеряя манометром соответствующие значения перепада давлений h, на основании известных Q, h, L, υ и F находим коэффициент фильтрации $k_ф$:

$$Q = k_ф F \frac{h}{L\gamma}, \qquad (1)$$

где F – площадь фильтрации воздуха, м²; γ – удельный вес воздуха, Н/м³.

Поскольку изучаемый нами загрязненный грунт имеет практически однородный состав с размерами зерен от 0,5 до 1 мм, дополнительно изучать зависимость фильтрации от состава пористого материала не будем. Предварительные расчеты некоторых характеристик следующие (табл.2):

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho\upsilon\sqrt{k_п}}{\mu}; \quad f = \frac{\Delta p\sqrt{k_п}}{L \cdot 2\rho\upsilon^2};$$

$$k_п = \frac{QL\mu}{\Delta pF\gamma}; \quad \upsilon = \frac{Q}{F}, \qquad (2)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³; υ – скорость движения воздуха, м/с; $k_п$ – коэффициент проницаемости, м²; μ – вязкость воз-

*Насонов И.Д. Моделирование физических процессов в горном деле / И.Д.Насонов, В.И.Ресин. М.: Изд-во Академии горных наук, 1999. 343 с.: ил.

духа, кг·с/м^2; f – коэффициент сопротивления; $\Delta p = h$ – перепад давления.

Результаты расчетов показывают, что для данного класса частиц значения $k_п$ почти не изменяются. Это свидетельствует о том, что данный коэффициент является типичным для ламинарного режима и применение его в уравнениях второго порядка невозможно.

Расход подаваемого воздуха W может быть определен по номограмме (рис.4) на основе известных значений влажности, $k_ф$ и гранулометрического состава исследуемого грунта.

Полученные результаты значительно облегчают последующие эксперименты по биоочистке, а периодические замеры концентрации НУ в грунте на анализаторе «Флюорат-02» дают представление о необходимой продолжительности эксперимента, чистоте его исполнения и эффективности метода.

Научный руководитель д.т.н. проф. *Ю.В.Шувалов*