

УДК 502/504:631.461:631.95

**А. А. МАМАТОВ**Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Московский государственный университет природообустройства»

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ТЕРРИТОРИИ**

*Рассмотрена эффективность методов по очистке грунтов от нефтепродуктов. Представлены результаты анализа исследований. Предложен метод очистки, способ его реализации, модель движения двух несмешивающихся жидкостей в пористой среде.*

*Очистка грунтов, модель фильтрации жидкостей, метод очистки, система очистки.*

*There is considered the method efficiency of the soil cleaning from oil products. The results of the researches analysis are given. There is proposed a method of cleaning, the way of its realization, the model of movement of two immiscible liquids in the porous medium.*

*Soils cleaning, model of liquids filtration, method of cleaning, system of cleaning.*

В условиях все более возрастающих требований к охране окружающей среды возникает потребность в изучении, прогнозировании возможных последствий, совершенствовании методов очистки земель, в том числе земель, загрязненных нефтепродуктами. Загрязнению подвергаются грунты, воздух, почва, биота, поверхностные и грунтовые воды. Локализация образовавшихся очагов загрязнения, очистка почв, грунтов и восстановление качества грунтовых вод – весьма трудная задача, которая усложняется, если произошел аварийный сброс большого объема легких нефтепродуктов, таких как бензин или керосин.

Известно, что распределение легких нефтепродуктов по профилю происходит неравномерно. Значительная их часть находится в капиллярной кайме, а область наибольшего скопления расположена у ее основания. Насыщенность загрязнителя уменьшается под поверхностью грунтовых вод и доходит до гидравлически неподвижной насыщенности на нижней поверхности области загрязнения. Выделенного слоя, где бы присутствовал только нефтепродукт без воды, не образуется. Все это не дает возможности использовать дренирование грунта как эффективный

метод сбора загрязнителя. К тому же дренирование приводит к расширению зоны загрязнения из-за заглубления линий тока нефтепродукта ниже закладки дренажного устройства, а также из-за сорбирования загрязнителя уже чистым грунтом. Использование биодеструкторов неэффективно вследствие неблагоприятных температурных и водно-воздушных условий.

В Московском государственном университете природообустройства проведены лабораторные, полевые и теоретические исследования по снижению содержания нефтепродуктов в грунтах. В лабораторных экспериментах использовали прибор типа Дарси. Через песчаные, суглинистые и глинистые грунты и монолиты фильтровали в различных вариантах керосин и воду, используя метод вытеснения одной жидкости другой. В ходе экспериментов проявлялась неравномерность и скачкообразность в скорости фильтрации. Это было обусловлено изменением соотношения насыщенности жидкостей и появлением капиллярного скачка давлений, возникающего на искривленной поверхности контакта «вода – нефтепродукт».

Снизить содержание нефтепродукта удавалось только до гидравлически

неподвижной его насыщенности, так как при такой насыщенности происходит заземление нефтепродукта в порах грунта, иначе говоря, разрыв сплошности потока. Величина насыщенности зависит от механических, физических свойств грунта и разности внешних давлений на границах области фильтрации, при которой осуществлялось вытеснение.

Полевыми исследованиями показана возможность в относительно короткие сроки реанимировать репродуктивную способность загрязненной почвы простыми агрономическими приемами, направленными на ускорение процессов самоочищения и самовосстановления.

Эксперименты, как лабораторные, так и полевые, продемонстрировали эффективность способа очистки гидравлическим вытеснением нефтепродукта на поверхность грунта. При дренировании грунта удалось максимально извлечь около 40 % всего объема керосина, тогда как при гидравлическом вытеснении – 70 %.

Результаты экспериментов использованы для проверки математической модели и оценки параметров, входящих в систему уравнений. Они подтвердили адекватность математической модели реальным процессам. В ходе экспериментов и теоретических изысканий с использованием математической модели была найдена эффективная технология по очистке почв и грунтов, обильно загрязненных легкими нефтепродуктами. Система очистки по данной технологии должна состоять:

из основных элементов –

противофильтрационной завесы, сооружаемой по границе загрязнения и обеспечивающей практически полную локализацию грунтового скопления нефтепродуктов;

скважин, равномерно размещенных на загрязненной территории, позволяющих осуществлять закачку воды при гидравлическом вытеснении легких нефтепродуктов на поверхность и поддерживать оптимальный водно-

воздушный режим в период доочистки, что немаловажно для восстановления почвенных экосистем;

из временных сооружений – чехов, необходимых для создания слоя воды, на который всплывает загрязнитель;

отстойника-накопителя для нефтепродуктов и загрязненной воды;

сепаратора типа «Cleanbox Oil» (производитель «Pipelife»), при помощи которого осуществляется очистка с конечным содержанием нефтепродуктов в воде до 5 мг/л и расходом на выходе 10 л/с;

резервуара очищенной воды, который легко собирается из специальных пластиковых ящиков «Stormbox» (размер ящика 120×60×30 см; производитель «Pipelife»), и противофильтрационной пленки.

После очистки эта система может функционировать как постоянно действующая мелиоративная система, которая способна регулировать основные режимы почвы в оптимальных пределах.

Лизиметрические эксперименты и математическое моделирование очистки гидравлическим вытеснением на крупных объектах загрязнения, в которых запасы топлива составляют сотни тысяч тонн, показывают, что основные мероприятия могут быть выполнены за один вегетационный период, в частности процессы нагнетания воды и всплытия нефтепродукта можно осуществить за один-два месяца и еще за несколько месяцев произвести доочистку почвы обычными агротехническими приемами, например с помощью глубокой вспашки, позволяющей ускорить испарение нефтепродуктов и уменьшить дефицит кислорода. (Благодаря этому ускоряется физико-химическая и микробиологическая деструкция нефтяных компонентов, сокращается по времени процесс внесения удобрений и высева трав для реабилитации территории).

Для составления эколого-экономического обоснования строительства подобных инженерно-экологических

систем по гидравлическому вытеснению легких нефтепродуктов необходим прогноз эффективности и продолжительности удаления нефтепродуктов, а также оценка объемов их сбора.

В основу предлагаемой модели движения двух несмешивающихся жидкостей в пористой среде положена система дифференциальных уравнений второго порядка параболического типа, описывающих вертикальное движение фаз для воды и нефтепродукта:

$$mC_{\text{вк}} \frac{\partial H_{\text{в}}}{\partial t} - m \frac{\rho_{\text{к}}}{\rho_{\text{в}}} C_{\text{вк}} \frac{\partial H_{\text{к}}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_{\text{в}} f_{\text{в}} \frac{\partial H_{\text{в}}}{\partial x} \right); \quad (1)$$

$$m \frac{\rho_{\text{к}}}{\rho_{\text{в}}} C_{\text{вк}} \frac{\partial H_{\text{к}}}{\partial t} - m(C_{\text{вк}} - C_{\text{в}}) \frac{\partial H_{\text{в}}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_{\text{к}} f_{\text{к}} \frac{\partial H_{\text{к}}}{\partial x} \right), \quad (2)$$

где  $m$  – пористость;  $C_{\text{вк}}$  – емкостный коэффициент, связывающий изменение напоров жидкостей и их насыщенности для воды и керосина ( $C_{\text{в}}$  – соответственно для воды);  $H_{\text{к}}$ ,  $H_{\text{в}}$  – напоры керосина и воды соответственно;  $\rho_{\text{к}}$ ,  $\rho_{\text{в}}$  – плотность керосина и воды соответственно;  $k_{\text{к}}$ ,  $k_{\text{в}}$  – коэффициенты фильтрации керосина и воды при условии полного заполнения пор одной из жидкостей;  $f_{\text{к}}$ ,  $f_{\text{в}}$  – относительные фазовые проницаемости, т.е. коэффициенты, учитывающие снижение проницаемости из-за неполного насыщения пор той или другой жидкостью.

**Коэффициенты**

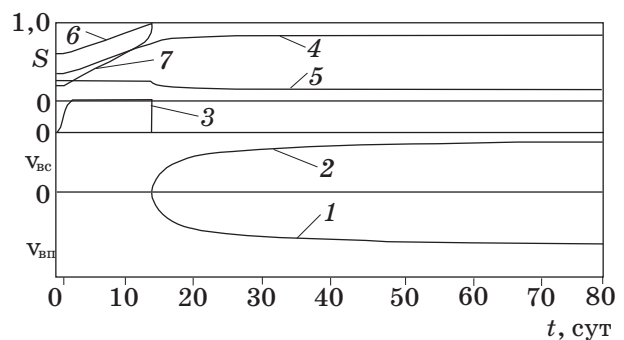
$$f_{\text{к}} = \alpha \left\{ 1 - \exp \left[ -\beta_{\text{к}} \left( \frac{S_{\text{к}} - S_{\text{к}}^*}{1 - S_{\text{к}}^*} \right)^2 \right] \right\}; \quad (3)$$

$$f_{\text{в}} = \left( \frac{S_{\text{в}} - S_{\text{в}}^*}{1 - S_{\text{в}}^*} \right)^{3.5}, \quad (4)$$

где  $S_{\text{к}}$ ,  $S_{\text{к}}^*$  – насыщенность керосина и гидравлически неподвижная его насыщенность соответственно;  $S_{\text{в}}$ ,  $S_{\text{в}}^*$  – насыщенность воды и гидравлически неподвижная ее насыщенность соответственно;  $\alpha = (1 - e^{-\beta_{\text{к}}})^{-1}$ ;  $\beta_{\text{к}}$  – эмпирический коэффициент, равный 4,0.

Казалось бы, при неполном насыщении жидкостями порового простран-

ства систему уравнений (1), (2) надо дополнить уравнением движения газа в порах. Однако автором принято известное в теории влагопереноса допущение, что зона неполного насыщения (а это обычно верхние почвенные слои) содержит помимо обычных пор трещины, обеспечивающие почти свободный обмен между почвенным воздухом и атмосферой, из-за чего давление в почвенном воздухе мало отличается от атмосферного, и надобность в этом уравнении отпадает. На рисунке показаны результаты расчета на математической модели.



**Результаты расчета на математической модели:** 1, 2 – объем впитавшейся воды  $V_{\text{вп}}$  и всплывшего нефтепродукта  $V_{\text{вг}}$ ; 3 – интенсивность нагнетания воды снизу  $q$ ; 4, 5 – средняя во всем расчетном слое насыщенность  $S$  пор водой и нефтепродуктами; 6 – сумма насыщенностей; 7 – глубина зоны полного насыщения

**Выводы**

Благодаря предлагаемой программе и математической модели движения двух несмешивающихся жидкостей в пористой среде, учитывающей гидрогеологические условия, водно-физические свойства грунтов, разную плотность фаз, наличие скачка капиллярного давления на границе раздела фаз, разную смачиваемость и вязкость, можно оценить эффективность проводимых мероприятий.

Материал поступил в редакцию 31.05.10.

**Маматов Андрей Андреевич**, кандидат технических наук, доцент

Тел. 8-916-522-16-34

E-mail: ndrmmtv@ya.ru