

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК.504.5+502.521

ОЦЕНКА ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ УГЛЕВОДОРОДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ

Н.А. КОВАЛЕВСКАЯ*(Витебский государственный университет им. П.М. Машерова);**канд. техн. наук, доц. В.Е. САВЕНОК, А.П. ЗЯЗЮЛЬКИН**(Витебский государственный технологический университет)*

Проанализированы существующие численные методы оценки загрязнения почв техногенных ландшафтов нефтепродуктами, определен опытным путем коэффициент пористости различных типов почв, с помощью которого производится прогнозная оценка их нефтяного загрязнения. Получены опытным путем значения коэффициента пористости, позволяющие определить коэффициенты фильтрации для типов почв, характерных для техногенных ландшафтов Витебской области. Полученные результаты определения коэффициента пористости почв могут быть использованы как при проведении прогнозных оценки возможных последствий нефтяного загрязнения почв, так и непосредственно учтены при ликвидации произошедших аварийных разливов нефти на естественных и техногенных ландшафтах.

Ключевые слова: метод, нефть, оценка, почва, прогноз, расчет.

Введение. Растущие темпы развития современной промышленной и хозяйственной деятельности человека ведут к постоянному увеличению техногенной нагрузки на природную среду. Наиболее распространенными ее загрязнителями являются нефть и нефтепродукты, которые служат универсальным источником энергии во всех сферах хозяйственной деятельности. Эксплуатационные и аварийные разливы нефти и нефтепродуктов приводят к загрязнению почвы и воды.

Для снижения негативных последствий углеводородного загрязнения природной среды используются различные способы и методы. Среди основных элементов оценки прогнозного или фактического нефтяного загрязнения воды и почвы следует отметить численные методы исследования углеводородного загрязнения объектов природной среды.

Целью данной работы является анализ существующих численных методов оценки загрязнения почв техногенных ландшафтов нефтепродуктами, определение опытным путем коэффициента пористости различных типов почв, с помощью которого производится прогнозная оценка их нефтяного загрязнения. При проведении исследований применялись сравнительно-сопоставительный и вычислительный методы.

Установлено, что нефть, попадая на поверхность почвы, растекается под действием капиллярных и поверхностных сил, проникая в поры между частицами грунта, и одновременно распространяется вертикально вниз под действием гравитационных сил. При единовременном разливе нефти насыщенность грунта снижается в связи с фильтрацией в нижние слои почвы. С уменьшением доли нефти в многофазной системе труднее происходит фильтрация в грунте, а достигнув содержания 10–12%, нефть становится неподвижной. Миграция углеводородов в почве рассматривается как результат отдельных механизмов конвекции, диффузии, дисперсии, адсорбции и биохимической деградации [1].

Несмотря на существование значительного количества математических моделей фильтрации и распространения загрязнителя в почве, в исследованиях по данной тематике еще не представлено адекватных специализированных моделей оценки степени загрязнения почвенных сред, которые бы позволили определить динамику миграции углеводородов нефти, фильтрующихся с поверхности земли, и установить закономерности изменения зоны нефтяного загрязнения, а также учитывать поведение фаз и их свойства. Опираясь на свойства и характеристику почв, проводят оценку их экологического состояния и функционирования. М.В. Зильберманом было отмечено [2], что содержание нефтепродуктов в почве нельзя рассматривать как единственный показатель загрязнения. Согласно многочисленным исследованиям, существенное влияние на биологические объекты оказывает не только концентрация нефти и нефтепродуктов в почве, но и характер взаимодействия данных загрязнителей с почвенной массой как абиотическим фактором. При рассмотрении данной системы наблюдается процесс адсорбции, который зависит от структуры порового пространства. Наряду с этим происходит многоступенчатая трансформация углеводородов нефти и нефтепродуктов, которая сопровождается процессом окисления с образованием ряда соединений: альдегидов, кетонов, спиртов и кислот. Однако данные соединения, установленные в ходе химического анализа, не будут определены как продукты окисления углеводородов нефти, а их нахождение в почвенном профиле будет негативно сказываться на биологических объектах. Таким образом, различные концентрации углеводородов нефти и нефтепродуктов и почвенных углеводородов оказывают неодинаковое воздействие на биотический фактор почвенной среды.

С учетом вышесказанного ясно, что объективная оценка воздействия нефтяного загрязнения почвы на экологическое состояние территорий может быть дана только на основе комбинации методов химического анализа, исследования физических характеристик почв и биотестирования.

Одним из главных показателей, согласно [3], является концентрация нефтепродуктов α (г/кг) в грунте. Она определяется по формуле

$$\alpha = \frac{M_{\text{вг}}}{M_{\text{г}}} \cdot 10^3, \quad (1)$$

где $M_{\text{вг}}$ – нефтенасыщенность грунта, т.е. количество нефти, впитавшейся в грунт, т;
 $M_{\text{г}}$ – количество нефтезагрязненного грунта, т.

В данной формуле используется показатель нефтенасыщенности (нефтеемкости) грунта, его значение определяют инструментальным методом или экспериментальным путем, с учетом значений влажности грунта. Количество низкомолекулярных углеводородов $M_{\text{из}}$ (кг), испарившихся с поверхности нефти, разлившейся по поверхности земли при масштабных разливах, может быть рассчитано по формуле

$$M_{\text{из}} = q_3 F_3 10^{-3}, \quad (2)$$

где q_3 – удельная величина выбросов углеводородов в атмосферу с поверхности нефти, разлившейся по земле, кг/м²;

F_3 – площадь загрязнения, м².

Удельная величина выбросов углеводородов определяется по табличным данным в зависимости от следующих величин [8]:

- толщина слоя свободной нефти на поверхности земли;
- продолжительность процесса испарения свободной нефти с поверхности земли;
- средняя температуры поверхности испарения при испарении нефти с поверхности земли.

При определении нефтепродуктов в почве необходимо обязательно учитывать содержание органических соединений самой почвы, так как существуют методы определения накопления нефтепродуктов по содержанию органического углерода. Изначально вычисляют суммарную долю углерода, входящего в состав нефти, а затем вводят поправочный коэффициент накопления нефтепродуктов в почве для сравнительной характеристики загрязненных районов.

Вопрос проникновения углеводородного загрязнителя в грунт рассматривался многими авторами. Так, Н.В. Молоковой [4] представлена математическая модель двухфазной фильтрации, учитывающая движение углеводородных загрязнителей и воздуха в почвенных средах. При проникновении нефти в почву наблюдается процесс фильтрации несмешивающихся фаз. Однако данная модель применима только для верхних однородных слоев почвы. В ходе построения модели учитываются следующие принятые допущения: загрязнитель – несжимаемая жидкость, почва однородна, течение загрязнителя направлено вертикально вниз (вдоль оси Z). Под скоростью линейной фильтрации u (м/с) понимают объем жидкости, протекающей в единицу времени через единичную площадку пористой среды, перпендикулярно направлению потока:

$$u = \frac{Q}{F} = \frac{k \Delta p}{\mu L}, \quad (3)$$

где Q – объемный расход жидкости в единицу времени, м³/с;

μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с,

F – площадь фильтрации, м²;

Δp – внешний перепад давления, Па;

L – длина образца пористой среды, м.

Основными уравнениями, описывающими движение жидкости в пористой среде, являются уравнение неразрывности и закон фильтрации Дарси. С учетом характеристики пористой структуры грунта уравнение неразрывности в декартовой 3-мерной системе координат, описывающее движение углеводородного загрязнителя (однородная жидкость в недеформируемом грунте) и воздуха, может быть представлено системой уравнений

$$m \frac{\partial s}{\partial t} + \left[\frac{\partial(\rho_1 u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_1 u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_1 u_z)}{\partial z} \right] = 0; \quad (4)$$

$$m \frac{\partial(1-s)}{\partial t} + \left[\frac{\partial(\rho_2 u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_2 u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_2 u_z)}{\partial z} \right] = 0,$$

где s – насыщенность пористой среды;

m – пористость материала;
 ρ – плотность;
 $u(u_x, u_y, u_z)$ – вектор скорости фильтрации;
 u_x, u_y, u_z – компоненты вектора фильтрации;
 x, y, z – координаты;
 t – время.
 Закон фильтрации (закон Дарси) может быть записан в виде

$$\begin{aligned} u_1 &= -k \frac{k_1(s)}{\mu_1} (\nabla p_1 - \rho_1 \vec{g}); \\ u_2 &= -k \frac{k_2(s)}{\mu_2} (\nabla p_2 - \rho_2 \vec{g}), \end{aligned} \tag{5}$$

где k – проницаемость пористой среды;
 μ_i – динамическая вязкость i -й фазы;
 p_i – давление i -й фазы;
 ρ_1, ρ_2 – плотность 1-й и 2-й фазы соответственно;
 $k_i(s)$ – относительная фазовая проницаемость i -й фазы;
 \vec{g} – вектор ускорения свободного падения;
 индексы 1 и 2 относятся к загрязнителю и воздуху соответственно.

На основании модели процесса фильтрации загрязнителей в поровом пространстве исследуется интенсивность и характер поступления углеводородов нефти с учетом влияния внешних факторов среды.

С.К. Муратова [5] также исследовала процесс фильтрации загрязнителя в почве принимая во внимание состав воды, ее состояние в поровом пространстве и свойства дисперсных частиц грунта. Учитывая, что движущей силой нефти в пористой среде являются поверхностные явления между нефтью и водой, процесс фильтрации нефти в почвах рассматривается как послойное движение. Вода выполняет роль «транспорта» нефти и нефтепродуктов, следовательно, нужно рассчитать удельное количество воды в поровом пространстве q ($\text{м}^3/\text{м}^3$) с учетом дисперсных частиц грунта:

$$q = 10^{-2} \frac{\rho_v}{\rho_r} m [\varphi_0 - \varphi - W_M], \tag{6}$$

где ρ_v – плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 ρ_r – плотность грунта, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 m – пористость грунта, $\text{м}^3/\text{м}^3$;
 φ_0 – относительная влажность грунта, %;
 W_M – максимальная молекулярная влагоемкость дисперсных частиц размером менее 0,1 мм, %;
 φ – массовое процентное содержание частиц в поровом пространстве размером менее 0,1 мм, %.

В работе Т.С. Шориной [6] представлены результаты урезной активности почв на примере черноземов и установлено, что нефть даже при незначительной концентрации стимулирует активность уреазы. На основании полученных данных автор делает вывод, что стимулирующее действие обусловлено повышением содержания углерода в почве и ведет к активизации азотного обмена. Выявляют изменение кинетики ферментативных реакций природно-технической системы, возникшей при загрязнении почвы нефтью. Критерием степени нарушения экологических функций почвы служит интегральный показатель биологического состояния почв.

Для выявления участков с высокой степенью нефтяного загрязнения создаются и исследуются геофильтрационные математические модели. При исследовании загрязнения почвы компонентами нефти наблюдается процесс фильтрации несмешивающихся фаз. Из трех фаз (углеводород, вода, газ), насыщающих пористую среду, подвижной считается только фаза загрязнителя. Это объясняется тем, что подвижность воздуха высока, так что его давление можно считать атмосферным. Вода же капиллярно связана, следовательно, ее количество в почве постоянно [7].

Согласно проведенному нами анализу [8], основными типами почв (грунтов) на территории Витебской области являются: дерново-подзолистые, местами эродированные на моренных глинах и суглинках, которые составляют 50% от всех типов почв региона; дерново-подзолистые и глеевые преимущественно

на глинах (10,6%); дерново-подзолистые, местами эродированные, на лесах, лесоподобных суглинках и супесях (9,8%); дерново-подзолистые на песках (9%). Таким образом, перечисленные выше типы почв являются, слагаемыми техногенных ландшафтов на территории Витебской области.

Рассматривая фильтрационный процесс, происходящий при проливах нефти на почву (грунт), необходимо учитывать следующие свойства почв: пористость, влагоемкость, водопроницаемость, относительную влажность, растворимость. В лабораторных условиях была проведена оценка пористости некоторых из основных типов почв, характерных для потенциально-опасных с точки зрения нефтяного загрязнения районов Витебской области. Определялся коэффициент пористости m испытуемых почв (грунтов). Опыты проводились со светлыми нефтепродуктами различной плотности, для оценки использовалась расчетная формула

$$m = \frac{V_{\text{п}}}{V} = \frac{V_{\text{ж}} - V_{\text{ост}}}{V}, \quad (7)$$

где m – коэффициент пористости;

$V_{\text{п}}$ – объем, занятый пораами среды, м³;

V – объем грунта, м³;

$V_{\text{ж}}$ – суммарный объем жидкости, используемый для фильтрации, м³;

$V_{\text{ост}}$ – остаточный объем жидкости после завершения фильтрации, м³.

В ходе проведенных исследований нами были получены опытным путем значения коэффициента пористости почв для рассматриваемых типов почв, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициент пористости почв

Тип почвы	Коэффициент пористости, доли
1. Легкий суглинок на границе с супесью	0,196
2. Перегнойно-глеевая, средний суглинок	0,473
3. Песок гравийно-хрящеватый	0,108
4. Дерново-подзолистая, легко суглинистая	0,157
5. Глина средняя, озерно-ледниковая (горизонт В)	0,087

По результатам проведенных исследований установлено, что вариации коэффициента пористости для исследуемых типов почв (грунтов) составляют от 0,087 до 0,473. На основании полученных опытным путем коэффициентов пористости для типов почв 1–5 (см. таблицу 1) были получены коэффициенты фильтрации для этих типов почв. Коэффициенты фильтрации, полученные нами ранее расчетным путем, включающим использование математической модели загрязнения различными нефтепродуктами [8], были уточнены. Однако следует заметить, что расхождение между опытным и расчетным значениями коэффициентов фильтрации находилось в пределах 25–50%, что для прогностических расчетов является допустимым. Для проведения прогностических расчетов загрязнения почв, позволяющих рассчитать площадь и глубину их загрязнения при авариях связанных с разливом нефтепродуктов, необходимо дополнительно задаваться расходом нефтепродукта (количество нефтепродукта на 1 м ширины нефтяного пятна) и его свойствами (плотностью и вязкостью).

Заключение. Для оценки численными методами масштабов и степени загрязнения почвы углеводородами используются различные математические модели, которые должны включать параметры, учитывающие свойства почв. Полученные результаты определения коэффициента пористости почв могут быть использованы как при проведении прогнозной оценки возможных последствий нефтяного загрязнения почв, так и непосредственно учтены при ликвидации произошедших аварийных разливов нефти на естественных и техногенных ландшафтах.

При компьютерном моделировании техногенной нагрузки промышленных объектов на природную среду, в частности аварийных разливов нефти и нефтепродуктов на почву, необходимо учитывать специфику типов и свойств почв районов пролива, а также устойчивость почв к различным воздействиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тюленева, В.А. К вопросу исследования фильтрации нефти в почвах / В.А. Тюленева, В.А Соляник, И.В. Васкина // Вісник КДПУ. – 2006. – № 2 (37) – С. 110–112.
2. Зильберман, М.В. Комплексная оценка воздействия нефтяного загрязнения почвы на экологическое состояние территорий / М.В. Зильберман, Е.А. Порошина, Е.В. Зырянова // Успехи современного естествознания. – 2004. – № 11. – С. 42–43.

3. Методика оценки эколого-экономических последствий загрязнения земель нефтью и нефтепродуктами / В.К. Загвоздкин [и др.] // Проблемы анализа риска. – 2005. – Т. 2. – № 1. – С. 6–32.
4. Молокова, Н.В. Математическое моделирование процессов нефтезагрязнения пористой среды / Н.В. Молокова // Вестн. Сибир. гос. аэрокосмич. ун-та им. М.Ф. Решетнева. – 2010. – № 5. – С. 142–148.
5. Муратова, С.К. Оценка загрязнения нефтью, нефтепродуктами и разработка мероприятия по снижению их негативного воздействия на природную среду : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.36 / С.К. Муратова ; Казахский НТУ им. К.И. Сатпаева. – Алматы, 2010. – 22 с.
6. Шорина, Т.С. Влияние нефтяного загрязнения на биологическую активность черноземов оренбургской области / Т.С. Шорина // Вестн. Оренбург. гос. ун-та. – 2009. – № 6. – С. 651–653.
7. Поташев, К.А. Модели и задачи теории фильтрации в слабых грунтах : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.02.05 / К.А. Поташев ; Казан. гос. ун-т. – Казань, 2007. – 19 с.
8. Савенок, В.Е. Определение нефтепроницаемости почв и грунтов / В.Е. Савенок, Е.В. Шаматульская // Вестн. Віцеб. дзярж. ун-та. – 2014. – № 1 (79). – С. 44–49.

Поступила 15.04.2020

ASSESSMENT OF HYDROCARBON SOIL CONTAMINATION BY NUMERICAL METHODS

N. KOVALVSKAYA, V. SAVENOK, A. ZYAZULKIN

The existing numerical methods for assessing the pollution of soils of technogenic landscapes with oil products are analyzed, the coefficient of porosity of various soil types is determined empirically. With the help of this coefficient a predictive assessment of oil pollution of soils is made. The porosity coefficient values have been obtained empirically, which make it possible to determine the filtration coefficients for the soil types characteristic of the technogenic landscapes of the Vitebsk region. The obtained results of determining the coefficient of soil porosity can be used both in making a predictive assessment of the possible consequences of oil pollution of soils, and directly taken into account during the elimination of the occurred accidental oil spills on natural and technogenic landscapes.

Keywords: *method, oil, assessment, soil, forecast, calculation.*