

УДК: 504.75

**ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ  
МИКРОТОМОГРАФИИ ДЛЯ АНАЛИЗА И МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ПРОЦЕССОВ МИГРАЦИИ НЕФТИ В ПОЧВЕ**  
APPLICATIONS OF COMPUTER MICROTOMOGRAPHY FOR ANALYSIS  
AND MODELING OF OIL MIGRATION IN THE SOIL

**А. С. Никифоров, А. А. Пономарев, В. Г. Парфенов, А. А. Марков,  
М. А. Кадыров**

A. S. Nikiforov, A. A. Ponomarev, V. G. Parfenov, A. A. Markov, M. A. Kadyrov

*Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень*

*Тюменский государственный медицинский университет, г. Тюмень*

*Ключевые слова: аварийные разливы нефти; нефтепроводы; почва;  
защита окружающей среды; компьютерная микротомография*  
*Key words: accidental spills of oil; oil pipeline, soil; environmental protection;  
computer micro tomography*

Надежность систем магистрального трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов является важнейшим фактором стабильности и роста экономического потенциала России. Этим транспортом перемещается почти 99 % нефти и около 25 % нефтепродуктов.

Протяженность нефтепроводных магистральных трубопроводов России составляет почти 50 тыс. км. В состав сооружений магистральных нефтепроводов входят 387 нефтеперекачивающих станций, резервуарные парки общей вместимостью 17 млн куб. м.

Более 30 % всех магистральных нефтепроводов России состоят из труб большого диаметра — 1 020 и 1 220 мм, на них приходится транспортировка свыше 70 % нефти, поставляемой по системе. Средняя протяженность транспортировки нефти по территории России в настоящее время составляет 2 200 км [1].

Функционирование такой сложной технической системы сопряжено с высоким уровнем аварийности и, как следствие, загрязнением окружающей среды.

В 2014 г. в Российской Федерации было зафиксировано 1 780 фактов разлива нефти и ее производных. При этом наибольшее количество нефтеразливов приходится на Уральский федеральный округ и составляет 82,2 % от общего числа. В связи с этим Росприроднадзором было наложено 490 штрафов на 24 юридических лица, производящих добычу и транспортировку нефти в округе, на общую сумму 10,3 млн руб. [2].

Степень надежности трубопроводного транспорта во многом определяет стабильность обеспечения регионов России важнейшими топливно-энергетическими ресурсами. Российские трубопроводные системы наиболее активно развивались в 60–80-е гг. XX века в связи с перемещением добычи нефти на западно-сибирские месторождения. Возрастная структура основных фондов магистрального трубопроводного транспорта нефтепродуктов свидетельствует об их значительном износе (свыше 70 %).

Основные причины разгерметизации промысловых, технологических и магистральных нефтепроводов приведены на рисунке 1. Подавляющее большинство аварий (свыше 50 %) происходит в результате коррозии труб, при этом в основном коррозия имеет электрохимический характер, хотя имеют место и сквозные локальные коррозионные повреждения — свищи, как правило, вызванные действием блуждающих токов. Более 5 % случаев аварийного разрушения нефтепроводов происходят в результате внутренней коррозии труб, вызванной наличием в нефти следов воды. До 25 % аварий приходится на строительные-монтажные работы (СМР).

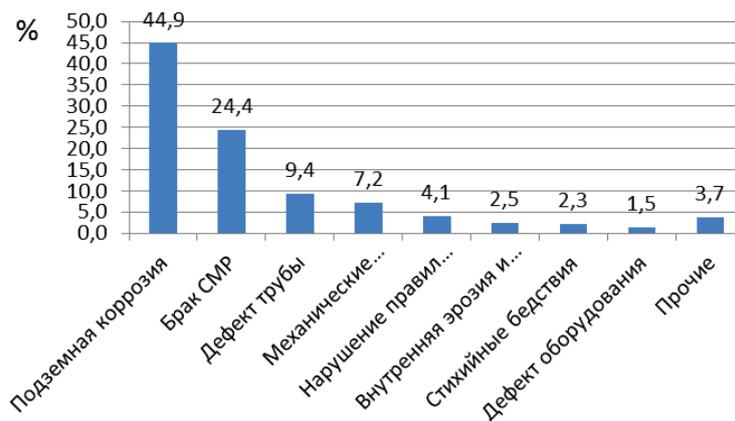


Рис. 1. Основные причины аварий на трубопроводном транспорте [2]

В первую очередь от аварийных разливов нефти и нефтепродуктов страдает почвенно-растительный комплекс, который впоследствии становится источником загрязнения сопредельных сред (воздуха, поверхностных и подземных вод).

Вопросы миграции нефти в почвенном слое в настоящее время являются, безусловно, актуальными, но по-прежнему до конца не изучены.

Объект исследования — почвы районов расположения объектов добычи и транспортирования нефти и нефтепродуктов Западной Сибири.

Цель исследования — анализ вопросов миграции нефти и нефтепродуктов в почвах для оптимизации процесса локализации и ликвидации последствий аварийных разливов нефти.

В настоящее время предварительная диагностика нефтяных загрязнений в почвах проводится непосредственно в поле или полевой лаборатории. Характер загрязнения определяется непосредственно в разрезе. Для этого к ровной лицевой стенке разреза плотно прикладывают лист фильтровальной бумаги. В местах, где почва загрязнена нефтью и нефтепродуктами, на листе бумаги выступают масляные пятна [3].

Объем нефтенасыщенного грунта  $V_{гр}$  вычисляют по формуле

$$V_{гр} = F_{гр} \cdot h_{ср} \quad (1)$$

Средняя глубина  $h_{ср}$  пропитки грунта на всей площади  $F_{гр}$  нефтенасыщенного грунта определяется как среднее арифметическое из шурфовок (не менее пяти, равномерно распределенных по всей поверхности) [4].

Как видно, данная методика основывается на экспертной оценке и усреднении глубины пропитки грунта, что приводит к большим погрешностям при определении толщины срезаемого нефтезагрязненного грунта.

При крупных нефтеразливах количество загрязненного грунта, который необходимо снять с целью рекультивации, будет значительно меняться в зависимости от толщины срезаемого слоя. А это, в свою очередь, будет влиять на качество рекультивационных работ и на экономические показатели.

Все это обуславливает необходимость уточнения методики определения глубины проникновения нефти в грунт.

Существующие инструментальные методы изучения морфологических характеристик грунта (ИК-спектроскопия и флуоресценция, газовая и жидкостная хроматография, оптические и электронные микроскопы) обладают рядом недостатков.

До недавнего времени наиболее популярным методом морфологического изучения строения почвы являлся анализ почвенных шлифов и сколов с помощью оптических и электронных микроскопов. Этот метод имеет два существенных недостатка:

- 1) полученные данные характеризуют двумерное строение почвы;
- 2) при анализе может нарушиться целостность образца.

Методы ИК-спектроскопии и флуоресценции при выполнении массовых анализов ограничены низкой производительностью и высокой стоимостью аналитических работ.

Хроматографические методы исследования отличаются сложным процессом пробоподготовки, необходимостью использования дополнительных реагентов и длительностью процесса.

Для изучения процессов пространственного распределения нефти в поровом пространстве почвы в работе был применен метод рентгеновской микротомографии, который не требует трудоемкой пробоподготовки и позволяет получать массовые морфологические данные о строении порового пространства почв в двумерных и трехмерных изображениях. С помощью томографов исследовали влияние влажности на структуру почвы (Pires et al., 2007), наблюдали морозное изменение почвенной структуры и пористости (Togance et al., 2008). В российском почвоведении томография почв пока менее популярна, хотя первые работы в этой области уже опубликованы [5–9].

Использование рентгеновской микротомографии для исследования нефтезагрязненных грунтов позволит устранить недостатки выше указанных методов.

Для исследования процессов миграции нефти в грунтах были взяты образцы почв, расположенных вдоль трассы магистрального нефтепровода. Были отобраны цилиндрические образцы ненарушенного сложения (микромолиты) диаметром 3 см и высотой 4 см в пластиковые трубки при полевой влажности. Для сохранения полевой влажности образцов трубки с микромолитами были со всех сторон заклеены лабораторной пленкой.

Отобранная почва была охарактеризована как подзолистая по типу почвообразования и супесчаная по механическому составу (Н. А. Качинский, 1950).

Исследование проводилось на компьютерном микротомографе высокого разрешения SkyScan 1172 (Бельгия) с энергией пучка 100 кэВ и фильтром (Cu + Al 0,5 mm) с разрешением 27,8 мкм. Для обработки и количественного анализа изображений были использованы специализированные программы DataViewег и CTап, поставляемые фирмой-изготовителем SkyScan.

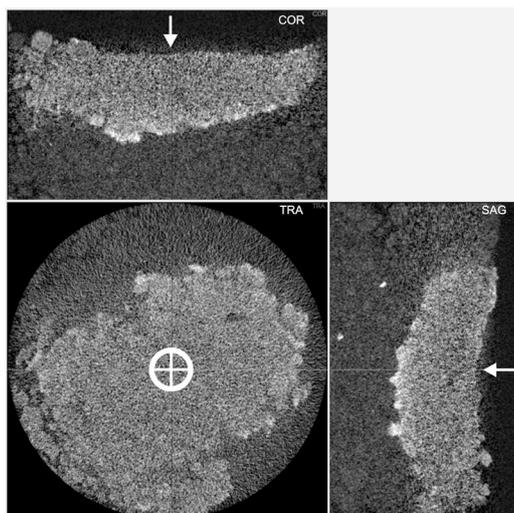
Экспериментальная часть данного исследования заключалась в моделировании на микромоделях грунта аварийных разливов нефти с последующим созданием цифровой 3D-модели пространственного распределения нефти и определении параметров фильтрации.

Изучение пород, заполненных нефтью либо водой, осложнено тем, что жидкости, как правило, имеют низкую плотность, вследствие чего их довольно сложно выделить с помощью метода рентгеновской томографии.

Для устранения этой проблемы было решено применить рентгеноконтрастный агент — йодид натрия, который представляет собой белый гигроскопичный порошок, легко растворимый в воде, спирте, глицерине.

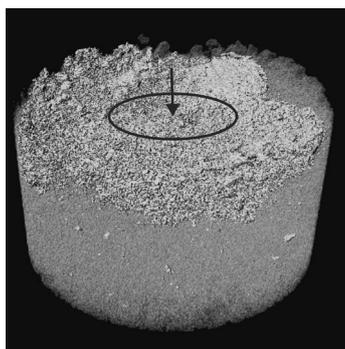
Использование рентгеноконтрастного вещества позволило получить модель распространения нефти в почве при проливе на ее поверхность. Ниже представлена реконструированная микромодель разлива нефти в аксонометрических проекциях (рис. 2), а также 3D-изображение распределения нефти в почве (рис. 3), которое показывает зависимость формы нефтеразлива от рельефа местности.

Глубина проникновения нефти зависит от множества факторов: механического состава почв, строения порового пространства, степени их нарушенности, влажности, уклона местности, выраженности микрорельефа и др.



*Рис. 2. Микро модель разлива нефти на поверхности почвы в аксонометрических проекциях с указанием точки разлива*

Как видно из рисунков, попадая в почву, нефть опускается вертикально вниз под влиянием гравитационных сил и распространяется вширь под действием поверхностных и капиллярных сил (см. рис. 2, 3). Процессы фильтрации происходят неравномерно — наблюдается анизотропное движение нефти, обусловленное формами рельефа микромоделей, сорбционными свойствами почвы, а также анизотропией фильтрационных свойств пустотного пространства.



*Рис. 3. 3D-модель объемного распределения нефти в грунте с указанием точки разлива*

Кроме этого, под влиянием нефти на грунт наблюдается изменение структуры порового пространства, а именно происходят слипания и комкования почвенных частиц. В связи с чем наблюдается уплотнение грунта. Данное наблюдение подтверждает наблюдения А. В. Шамраева и Т. С. Шориной: «Под влиянием нефти увеличивается количество водопрочных агрегатов, структурных отдельностей размером больше 10 мм, происходит агрегирование почвенных частиц, в связи с чем содержание глыбистых частиц увеличивается...» [10].

Таким образом, данные исследования являются одним из этапов изучения и анализа процессов миграции нефти и нефтепродуктов в поровом пространстве почвы. Полученные микротомографические 2D- и 3D-изображения, а также сопровождающие их морфометрические данные являются основой для уточнения существующих математических моделей фильтрации нефти в грунтах.

Развитие представлений о флюидодинамических моделях является актуальным для совершенствования стандартных методик расчета объема нефтезагрязненного грунта. Это позволяет более точно оценить последствия аварийных разливов нефти и разработать организационные и технические мероприятия по минимизации экологических и экономических последствий.

*Список литературы*

1. Сакович Н. Е. Методы и средства ликвидации последствий разливов нефти и нефтепродуктов. – Брянск: Изд-во Брянской ГСХА, 2012. – 198 с.

2. Подовалов Ю. А. Экология нефтегазового производства. – М: Инфра-Инженерия, 2010. – 416 с.
3. РД 39-0147098-015-90. Инструкция по контролю за состоянием почв на объектах предприятий Миннефтепрома.
4. Методика определения ущерба окружающей природной среде при авариях на магистральных нефтепроводах. Утв. Минтопэнерго РФ 1 ноября 1995 г.
5. Pires L. F., Vacchi O. O. S., Reichardt K. Assessment of soil structure repair due to wetting and drying cycles through 2D tomographic image analysis // Soil and Tillage Research. – 2007. – № 4, P. 537–545.
6. Torrance J. K., Elliot T., Martin R., Heck R.J. X-ray computed tomography of frozen soil // Cold regions science and technology. – 2008. – № 53. P. 75–82.
7. Герке К. М., Скворцова Е. Б., Корост Д. В. Томографический метод исследования порового пространства почв: состояние проблемы и изучение некоторых почв России Почвоведение. – 2012. – № 7 С. 781–791.
8. Стрoение порового пространства в подзолистых горизонтах суглинистых почв (анализ 2D- и 3D-изображений) / Скворцова Е. Б. [и др.] // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. – 2013. – Выпуск 71. – С. 65–79.
9. Gerke K. M., Skvortsova E. B., Korost D. V. Variability of soil structure within the same profile studied by the means of mCT Book of abstracts, Pedometrics 2011 – Innovations in pedometrics. 31 August – 2 September, 2011, Trest, Czech Republic. – 2011. – P. 44.
10. Шамраев А. В., Шорина Т. С. Влияние нефти и нефтепродуктов на различные компоненты окружающей среды // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2009. – № 6 (112). – С. 642–645.

#### *Сведения об авторах*

**Никифоров Артур Сергеевич**, ассистент кафедры «Техносферная безопасность», Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)283023, e-mail: arhont607@gmail.com

**Пономарев Андрей Александрович**, лаборант учебно-научной геохимической лаборатории, кафедра «Геология месторождений нефти и газа», Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)444358, e-mail: ponomarev94@mail.ru

**Парфенов Виталий Григорьевич**, к. т. н., доцент кафедры «Техносферная безопасность», Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)283023

**Марков Александр Анатольевич**, к. м. н., доцент кафедры травматологии, ортопедии и военно-полевой хирургии, Тюменский государственный медицинский университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)287018

**Кадиров Марсель Алмазович**, студент, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

#### *Information about the authors*

**Nikiforov A. S.**, Assistant Teacher at the Department of Technosphere Safety, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)283023, e-mail: arhont607@gmail.com

**Ponomarev A. A.**, Laboratory Assistant of the educational-scientific geochemical laboratory at the Department of Geology of Oil and Gas Fields, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)444358, e-mail: ponomarev94@mail.ru

**Parfenov V. G.**, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Technosphere Safety, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)283023

**Markov A. A.**, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor at the Department of Traumatology, Orthopedics and Military Surgery, Tyumen State Medical University, phone: 8(3452)287018

**Kadyrov M. A.**, Undergraduate, Industrial University of Tyumen

## **Пожарная и промышленная безопасность в нефтегазовой отрасли**

УДК 614.841.34

### **АНАЛИЗ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ ВЕЛИЧИН ПОЖАРНОГО РИСКА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ANALYSIS OF A METHOD FOR DETERMINING THE ESTIMATED VALUES OF FIRE RISK ON INDUSTRIAL FACILITIES**

**И. К. Бакиров, А. Р. Загидуллина**

I. K. Bakirov, A. R. Zagidullina

*Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа*

*Ключевые слова: пожарный риск; опасные факторы пожара; массовая скорость выгорания; твердые горючие материалы*

*Key words: fire risk; hazards of fire; mass burnout rate; solid combustible materials*

Определение расчетных величин пожарных рисков сейчас в России можно определить как новое понятие [1, 2]. Сегодня приняты и утверждены в МЧС России две методики определения расчетных величин пожарных рисков: методика определения расчетных величин на производственных объектах и методика определе-