

Организация производства и обеспечение безопасности и экологичности производственных процессов в нефтегазовой отрасли

Organization of production and ensuring the safety and environmental friendliness of production processes in the oil and gas industry

05.02.22 Организация производства (по отраслям) (технические науки)

DOI: 10.31660/0445-0108-2020-2-140-146

УДК 622.691

Методы оценки загрязнения территорий разливами нефти или нефтепродуктов

С. И. Челомбитко*, В. В. Пивень

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

**e-mail: sjlss@mail.ru*

Аннотация. В процессе освоения нефтегазовых месторождений и транспорта углеводородов экология регионов подвергается различным негативным воздействиям. Наиболее тяжелые последствия для окружающей среды наносят аварийные разливы нефтей или нефтепродуктов, случающиеся из-за сквозных повреждений трубопроводов. Загрязненные территории, согласно постановлениям правительства и нормативным отраслевым документам, подлежат обязательной рекультивации. Однако, несмотря на предпринимаемые меры администраций северных регионов по увеличению темпов рекультивации поврежденных территорий, в последние годы наблюдается тенденция роста загрязненных углеводородами площадей.

Различные технологии по рекультивации, проверенные в условиях теплого и умеренного климата, оказываются малоэффективными в регионах с многолетнемерзлыми грунтами. Загрязнение дневной поверхности нефтью или нефтепродуктом приводит к увеличению поглощения лучистой энергии солнца, росту сезонно-талого слоя и развитию разрушительных для территории процессов. Для достижения положительного эффекта в ходе проведения восстановительных мероприятий необходимо учитывать индивидуальные особенности территории и масштабы ее загрязнения.

Ключевые слова: разрывы трубопроводов; разливы нефти и нефтепродуктов; моделирование загрязнения территорий

Methods for assessing territory pollution by oil or petroleum product spills

Sergey I. Chelombitko*, Valeriy V. Piven

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**e-mail: sjlss@mail.ru*

Abstract. During the development of oil and gas fields and transportation of hydrocarbons, the ecology of regions is subject to various negative impacts. The most severe consequences for the environment are caused by accidental spills of oil or petroleum products, which occur due to through damage to pipelines. Polluted territories are subject to mandatory reclamation in accordance with government regulations and industry regulations. However, despite the measures taken by the administrations of the northern regions to increase the rate of reclamation of damaged territories in recent years, there has been a trend of growth of areas contaminated with hydrocarbons.

Various remediation technologies that have been tested in warm and temperate climates are not very effective in regions with permafrost. Pollution of the daytime surface with oil or petroleum products leads to an increase in the absorption of the sun's radiant energy, the growth of the seasonal thaw layer and the development of destructive processes for the territory. To achieve a positive effect as a result of rehabilitation measures, it is necessary to take into account the individual characteristics of the territory and the extent of its pollution.

Key words: ruptures of pipelines; oil and petroleum product spills; modeling of territory pollution

Введение

Интенсивное промышленное освоение нефтегазовых регионов севера России привело к его нынешнему бедственному экологическому состоянию, граничащему с катастрофой [1–3]. В процессе выполнения буровых работ, эксплуатации нефтегазовых месторождений, а также магистрального транспорта нефти или нефтепродуктов случаются аварийные разливы технологических жидкостей и углеводородов. Наибольшие загрязнения территорий происходят из-за утечек нефти или нефтепродуктов при сквозных повреждениях промысловых и магистральных трубопроводов. Только в 2018 году, по сведениям нефтяных компаний, произошло 8 126 разливов нефти и нефтепродуктов. Среднее количество аварий на нефтепроводах Западной Сибири составляет около 35 тыс. раз в год, при этом более 300 из них — с объемом утечки¹ более 10 000 тонн [4]. Продолжающаяся до настоящего времени эксплуатация устаревших трубопроводов, выработавших свой нормативный срок, приводит к ежегодному росту аварийности на 5–9 %. Установлено, что разливы нефти площадью до 1 га чаще всего происходят на месторождениях в результате свищевых (коррозионных) утечек из промысловых трубопроводов, при этом общая площадь загрязненных таким образом территорий² составляет около 80 % от всей загрязненной территории [4]. Как известно, самые крупные разливы нефти в Тюменской области произошли около Белозерска (около 500 000 т) в 1990 году и вблизи станции Нягань (не менее 420 000 т, 1993 г.). Аварийные разливы нефти в северных регионах приводят к тяжелым экологическим последствиям, приводящим иногда к изменению рельефа: появлению впадин, затопленных и увеличивающихся в размерах понижениях местности и даже образованию оврагов [3, 5]. Все загрязненные нефтью или нефтепродуктами территории подлежат рекультивации, для выполнения которой необходимо знать глубину проникновения углеводородов и объем загрязненного почвогрунта. Лучшим способом рекультивации для поврежденной территории

¹ Экологические аспекты деятельности нефтяных компаний. Материалы парламентских слушаний «О влиянии нефтегазовой промышленности на состояние окружающей среды», проводившихся по инициативе Комитета по Экологии Госдумы РФ 5 декабря 2000 г.

² Доклад рабочей группы межведомственной комиссии по экологической безопасности при Совете Безопасности РФ (комиссия Яблокова). – М., 1995. – С. 13–17.

являются снятие и вывоз загрязненного почвогрунта с последующим устройством почвенного слоя. Однако из-за высокой стоимости (иногда из-за невозможности транспортировки в условиях болотистой местности) применяются другие технологии восстановления в зависимости от особенностей поврежденной территории. Определение объема загрязненного почвогрунта на небольших по площади загрязненных участках (менее 1 га) может быть проведено экспериментальным способом, подробно изложенном в работе [6]. Для значительных по размеру поврежденных территорий, площадью в десятки, сотни гектар, такой способ оказывается весьма трудоемким и сложным в реализации из-за необходимости выполнения работ (строительства шурфов, отбора проб) на замасоченной дневной поверхности. В таких случаях возможна оценка глубины проникновения углеводородов в почвогрунт, а также объема загрязненного слоя численным методом путем математического моделирования процесса аварийного растекания жидкости по дневной поверхности с учетом потери массы от инфильтрации и испарения. Применение вычислительных технологий с целью проведения указанных расчетов может быть единственно возможным для удаленных и труднодоступных территорий. Кроме того, экологическое состояние загрязненных нефтью территорий в северных регионах с многолетнемерзлыми породами существенно зависит от протекания тепло- и массообменных процессов. Насыщение углеводородами почвы и подстилающего грунта приводит к изменению их теплофизических свойств, а замасочивание дневной поверхности приводит к существенному увеличению поглощения солнечной (лучистой) энергии. Это способствует ускоренному таянию мерзлых грунтов, увеличению сезонно-талого слоя и может впоследствии привести к развитию деградационных процессов (термоэрозии, солифлюкции, термокарста). Для возможности проведения прогнозных тепловых расчетов по формированию сезонно-талого слоя необходимо знать глубину инфильтрации жидкости на загрязненной территории.

Объект и методы исследования

Объектами исследования являются территории, загрязненные в результате аварийных разливов нефти или нефтепродукта, а также процессы движения жидкостей по дневной поверхности и в пористой среде. В качестве методов исследования использовались аналитические методы математического моделирования движения ньютоновских жидкостей по естественной поверхности, а также инфильтрации жидкости, находящейся на дневной поверхности.

Аварийные разливы нефти или нефтепродукта, возникающие при разрывах трубопроводов, характеризуются

- малыми скоростями течения, при которых потоки являются спокойными, с числом Фруда $Fr < 1$ (исключая небольшую площадь вокруг источника утечки);
- числами Рейнольдса $Re < 500$ (за исключением небольшой области вокруг места истечения), характерными для ламинарного режима течения;
- малой толщиной слоя жидкости (порядка 10^{-3} – 10^{-2} м) и значительно большими линейными размерами нефтяного пятна.

Эти особенности позволяют использовать для математического моделирования процесса растекания нефти или нефтепродукта по естественной поверхности уравнения типа Сен-Венана [7–10]. В частном случае для выполнения расчетов по определению глубины инфильтрации жидкости и объема загрязненного грунта динамические уравнения движения можно представить в следующем виде [11]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(hU_1)}{\partial t} + \frac{\partial(hU_1^2)}{\partial x_1} + \frac{\partial(hU_1U_2)}{\partial x_2} + \frac{g}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x_1} + gh \frac{\partial z_p}{\partial x_1} = \\ & = -\frac{\lambda}{2} U_1 \sqrt{U_1^2 + U_2^2} + \nu \left(\frac{\partial}{\partial x_1} h \frac{\partial U_1}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_2} h \frac{\partial U_1}{\partial x_2} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(hU_2)}{\partial t} + \frac{\partial(hU_2^2)}{\partial x_2} + \frac{\partial(hU_1U_2)}{\partial x_1} + \frac{g}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x_2} + gh \frac{\partial z_p}{\partial x_2} = \\ & = -\frac{\lambda}{2} U_2 \sqrt{U_1^2 + U_2^2} + \nu \left(\frac{\partial}{\partial x_1} h \frac{\partial U_2}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_2} h \frac{\partial U_2}{\partial x_2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

где t — время, с; h — толщина слоя жидкости на дневной поверхности, м; g — ускорение свободного падения м/с²; ν — коэффициент кинематической вязкости жидкости м²/с; z_p — отметка дна (дневной поверхности) потока, м; λ — коэффициент гидравлического сопротивления; U_i — компоненты скорости, осредненной по глубине потока, в направлении x_i , ($i = 1, 2$); ox_1x_2 — прямоугольная горизонтальная система координат.

Для получения замкнутой системы уравнений процесса растекания жидкости по дневной поверхности к уравнениям типа Сен-Венана добавляется уравнение неразрывности следующего вида [7, 8]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hU_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(hU_2)}{\partial x_2} = -(q_i + q_f), \quad (3)$$

где q_i , q_f — объемные потери нефти от испарения и инфильтрации с единицы площади поверхности потока, м/с.

Неизвестными в уравнениях (1)–(3) являются толщина потока $h = h(x_1, x_2, t)$ и компоненты осредненной скорости $U_i = U_i(x_1, x_2, t)$ на соответствующие координатные оси. Решение данной системы нелинейных дифференциальных уравнений с соответствующими краевыми условиями возможно методом конечных разностей, который применительно к уравнениям типа Сен-Венана подробно описан в указанных и других работах авторов по гидравлике открытых потоков [7–10]. Определение краевых условий вокруг источника утечки и на подвижной границе разливающейся жидкости также описано в указанных работах. Для определения потерь массы растекающейся жидкости от испарения в уравнении (3) на каждом временном слое следует использовать известные эмпирические зависимости, учитывающие фракционный состав нефти. Объемные потери нефти или нефтепродукта при инфильтрации в поверхностный слой учитываются в соответствии с законом фильтрации Дарси. Условия его применимости при разливах ньютоновских нефтей и нефтепродуктов полностью выполняются. Наиболее удобная форма представления этого закона представлена П. Я. Полубариновой-Кочиной в работе [12] и имеет следующий вид:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{k}{m} \left(\frac{h + y + h_k}{y} \right),$$

где y — глубина инфильтрации жидкости, м; k — коэффициент инфильтрации жидкости, м/с; h_k — высота капиллярного поднятия жидкости, м; m — коэффициент свободной пористости грунта.

Для удобства применения данного закона найдено решение этого дифференциального уравнения в следующем (неявном) относительно глубины инфильтрации виде

$$t = \frac{m}{k} \left[y - (h_k + h) \ln \left(1 + \frac{y}{(h_k + h)} \right) \right],$$

которое после разложения логарифмической функции в ряд Тейлора и оценки членов ряда представляется в форме

$$y = \sqrt{\frac{2kt(h_k + h)}{m}}. \quad (4)$$

После локализации пятна разлитой жидкости и прекращения истечения из поврежденного трубопровода происходит инфильтрация с уменьшающимся слоем жидкости на дневной поверхности. Для такого случая закон Дарси представлен в виде [12]

$$\frac{dy}{dt} = \frac{k}{m} \left[\frac{h_k + h + y(1-m) + y_f}{y} \right],$$

где y — глубина проникновения жидкости ниже отметки y_f — толщины загрязненного слоя.

Решение данного дифференциального уравнения имеет вид

$$t = \frac{m}{k(1-m)} \left[y - \frac{h_k + h + y}{1-m} \ln \left(1 + \frac{y(1-m)}{(h_k + h + y_f)} \right) \right],$$

которое для удобства применения аналогичным образом было преобразовано к виду

$$y = \sqrt{\frac{2k(h_k + h + y_f)t}{m}}. \quad (5)$$

Результаты

Математическая модель аварийного растекания нефти или нефтепродукта по дневной поверхности (система динамических уравнений течения ньютоновской жидкости (1–2), уравнение неразрывности (3) и краевые условия) из-за своей сложности допускает решение каким-либо численным методом. Построение численных аналогов для уравнений типа Сен-Венана подробно описано в многочисленных работах авторов [7–10], удовлетворительное качество описания как с помощью явных, так и неявных разностных схем подтверждено многолетней инженерной практикой. Расчет глубины инфильтрации жидкости осуществляется на каждом временном слое по формуле (4) после нахождения в узлах вычислительной сетки компонент скорости и толщины потока до прекращения движения жидкости. После прекращения течения жидкости по дневной поверхности дальнейший расчет глубины инфильтрации осуществляется с помощью формулы (5).

Обсуждение

В результате численного решения по предложенной математической модели определяются границы контура пятна за заданный промежуток времени с момента начала утечки (например, за время прибытия аварийно-восстановительной службы к месту повреждения трубопровода), глубина инфильтрации жидкости в узлах вычислительной сетки по площади загрязненной территории, на основании которой вычисляется объем загрязненного почвогрунта.

Данные по профилю местности, физическим свойствам грунтов в полосе отвода являются известными эксплуатирующим организациям еще до начала строительства трубопроводов. Учесть теплообмен растекающейся жидкости с окружающей средой весьма затруднительно из-за проблем в получении необходимой для этого достоверной информации (например, состояние облачности, направление и скорость ветра вблизи дневной поверхности и другие). Однако в ходе проведения оценочных расчетов можно пренебречь теплообменом с окружающей средой и принять вязкость жидкости, соответствующую температуре перекачки в трубопроводе.

Выводы

1. С целью оценки экологического состояния поврежденных разливами нефти или нефтепродуктов территорий *рекомендуется* определять глубину проникновения жидкости и объем загрязнения почвогрунта следующими методами:

- *вычислительным* методом для значительных по площади территорий (более 1 га) на основе математической модели процесса растекания жидкости по дневной поверхности (1)–(3), краевых условий и формул инфильтрации (4) или (5);
- *экспериментальным* методом для малых по площади участков (до 1 га), либо для значительных территорий в случае отсутствия необходимой для расчетов исходной информации (например, при разливах, произошедших в прошлые годы) [6].

2. Полученные результаты оценки загрязнения использовать:

- при выборе технологий и планировании работ по рекультивации поврежденных территорий;
- при выполнении прогнозных тепловых расчетов по формированию сезонно талого слоя, возможному развитию негативных процессов в регионах с многолетнемерзлыми породами.

Библиографический список

1. Российская Арктика на пороге катастрофы / Л. С. Богословская [и др.] – М.: Центр экологической политики России, 1996. – 206 с.
2. Бобылев Л. Н. Как избежать угрозы экологической катастрофы вследствие утечек нефти из магистральных нефтепроводов // Нефтегазовые технологии. – 1999. – № 6. – С. 27–29.
3. Российская Арктика на пороге катастрофы / Под ред. А. В. Яблокова. – М.: Центр экологической политики России, 1996. – 208 с.
4. Низамов Х. Н., Званский В. П., Дербуков В. И. Анализ аварийных ситуаций в трубопроводных системах // Экология и промышленность России. – 1996. – № 5. – С. 41–43.
5. Raisbeck J. M., Mohtadi M. F. The environmental impacts of oil spills on the land in the arctic regions // Water, Air, and Soil Pollution. – 1974. – Vol. 3. – P. 195–208. – Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00166630>.
6. Неволин А. П., Миронов В. В., Челомбитко С. И. Определение потерь нефти при фильтрации в грунт // Нефтепромысловое дело и транспорт нефти. – 1984. – № 4. – С. 28–30.
7. Васильев О. Ф., Гладышев М. Т. О расчете прерывных волн в открытых руслах // Известия АН СССР. Серия: Механика жидкости и газа. – 1966. – № 6. – С. 184–189.

8. Лятхер В. М., Милитеев А. Н. Гидравлические исследования численными методами // Водные ресурсы. – 1981. – № 3. – С. 60–79.
9. Лятхер В. М., Милитеев А. Н., Тогунова Н. П. Исследование плана течений в нижнем бьефе гидротехнических сооружений численными методами // Гидротехническое строительство. – 1978. – № 6. – С. 27–32.
10. Милитеев А. Н. Численные исследования плана течений открытых потоков // Гидравлика и фильтрация: сб. науч. тр. Гидропроекта. – М., 1979. – С. 3–15.
11. Антипов В. Н., Богачев Н. П., Челомбитко С. И. Динамические уравнения процесса растечения нефти по естественной поверхности // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1997. – № 1. – С. 86–89.
12. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. – М.: Наука, 1977. – 664 с.

References

1. Bogoslovskaya, L. S., Bruskina, I. M., Vil'chek, G. E., Vlasov, M. N., Glazovskiy, A. F., Gruz, G. V.,... Tummel', N. V. (1996). Rossiyskaya Arktika na poroge katastrofy. Moscow, Tsentr ekologicheskoy politiki Rossii Publ., 206 p. (In Russian).
2. Bobylev, L. N. (1999). Kak izbezhat' ugrozy ekologicheskoy katastrofy vsledstvie utechek nefi iz magistral'nykh nefteprovodov. Oil & Gas Tecnology, (6), pp. 27-29. (In Russian).
3. Yablokov, A. V. (1996). Rossiyskaya Arktika na poroge katastrofy. Moscow, Tsentr ekologicheskoy politiki Rossii, 208 p. (In Russian).
4. Nizamov, H. N., Zvanskiy, V. P., & Derbukov, V. I. (1996). Analysis of emergency situations in tru-conductive systems//Ecology and industry of Russia, № 5, pp. 41-43. (In Russian).
5. Raisbeck, J. M., & Mohtadi, M. F. (1974). The environmental impacts of oil spills on the land in the arctic regions. Water, Air, and Soil Pollution, 3, pp. 195-208. (In English). Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00166630>
6. Nevolin, A. P., Mironov, V. V., & Chelombitko, S. I. (1984). Opredelenie poter' nefi pri fil'tratsii v grunt. Neftepromyslovoe delo i transport nefi, (4), pp. 28-30. (In Russian).
7. Vasil'ev, O. F., & Gladyshev, M. T. (1966). O raschete preryvnykh voln v otkrytykh ruslakh. Izvestiya AN SSSR. Seriya: Mekhanika zhidkosti i gaza, (6), pp. 184-189. (In Russian).
8. Lyatkher, V. M., & Militeev, A. N. (1981). Gidravlicheskie issledovaniya chislennymi metodami. Vodnye resursy, (3), pp. 60-79. (In Russian).
9. Lyatkher, V. M., Militeev, A. N., & Togunova, N. P. (1978). Issledovanie plana techeniy v nizhnem b'efe gidrotekhnicheskikh sooruzheniy chislennymi metodami. Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo, (6), pp. 27-32. (In Russian).
10. Militeev, A. N. (1979). Chislennye issledovaniya plana techeniy otkrytykh potokov. Gidravlika i fil'tratsiya. Moscow, 1979, pp. 3-15. (In Russian).
11. Antip'ev, V. N., Bogachev, N. P., & Chelombitko, S. I. (1997). Dinamicheskie uravneniya protsessa rastecheniya nefi po estestvennoy poverkhnosti // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz, (1), pp. 86-89. (In Russian).
12. Polubarinova-Kochina, P. Ya. (1977). Teoriya dvizheniya gruntovykh vod. Moscow, Nauka Publ., 664 p. (In Russian).

Сведения об авторах

Челомбитко Сергей Иванович, д. т. н., профессор кафедры машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: sjlss@mail.ru

Пивень Валерий Васильевич, д. т. н., профессор кафедры машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Information about the authors

Sergey I. Chelombitko, Doctor of Engineering, Professor at the Department of Machinery and Equipment of the Oil and Gas Industry, Industrial University of Tyumen, e-mail: sjlss@mail.ru

Valeriy V. Piven, Doctor of Engineering, Professor at the Department of Machinery and Equipment of the Oil and Gas Industry, Industrial University of Tyumen