

УДК 622.691

DOI: 10.31660/0445-0108-2025-1-83-88

## Математическое моделирование аварийных разливов нефти в половодье

**С. И. Челомбитко**

*Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия  
sjlss@mail.ru*

**Аннотация.** В процессе разработки нефтяных месторождений по различным причинам случаются сквозные повреждения промысловых трубопроводов, приводящие к аварийным утечкам и разливам нефти по дневной поверхности.

На основании обследования в 2001 году территорий Ямало-Ненецкого АО специалистами Госкомэкологии было установлено, что половина участков компактного сосредоточения скважин («кустов») содержит нефтяные разливы, при этом с учетом особенностей функционирования утечек на месторождениях реальная площадь загрязнения превышает визуально определенную в 2,5–10 раз. По данным некоторых источников, в России к началу 2000-х годов находилось в эксплуатации около 350 тыс. км внутри промысловых и межпромысловых нефтепроводов, на которых ежегодно происходят 50–60 тыс. сквозных повреждений (порывов, коррозионных отверстий), сопровождающихся утечками, при этом объемы вытекшей нефти оцениваются от 1 до 7 % от общего объема добычи.

Установлено, что ежегодный вынос нефтей и нефтепродуктов крупнейшими реками Западной Сибири в моря Арктики составляет: Обь — до 600 тыс. т, Енисей — до 360 тыс. т, Лена — до 50 тыс. т, а только в бассейне реки Оби каждый год поступает до 1,5 млн т, в результате чего около 250 рек и 1 200 ручьев потеряли свое природное значение. Если аварийные утечки происходят в весеннее время, когда на дневной поверхности существует слой талой воды, то распространение нефтяного пятна по поверхности воды из-за влияния ветра может быть значительным, и, соответственно, способствовать более масштабному и неконтролируемому загрязнению территории. Свободное перемещение нефтяного пятна по водной поверхности может привести к достижению нефтью границ важных охраняемых объектов (рек, озер, ручьев) и последующему их загрязнению. Поэтому математическое моделирование процесса аварийного распространения вытекшей нефти по естественной поверхности, покрытой слоем талой воды, является актуальным для различных ситуаций в инженерной практике.

Выполнение прогнозных расчетов по предлагаемой математической модели дает возможность оценивать динамику распространения нефтяного пятна по водной поверхности, на основании чего можно осуществлять необходимые мероприятия по локализации разлива и недопущению загрязнения важных природоохранных объектов.

**Ключевые слова:** аварии на нефтепроводах, математическое моделирование, разливы нефти в половодье

**Для цитирования:** Челомбитко С. И. Математическое моделирование аварийных разливов нефти в половодье / С. И. Челомбитко. – DOI: 10.31660/0445-0108-2025-1-83-88 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2025. – № 1. – С. 83–88.

## Mathematical modeling of oil spill accidents during high water

**Sergey I. Chelombitko**

*Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia  
sjlss@mail.ru*

*Abstract.* Field pipeline failures can occur for various reasons during oil field development, resulting in emergency oil spills on the surface. In 2001, specialists from the State Committee on Ecology examined the Yamal-Nenets autonomous district and found that half of the areas with dense concentrations of wells referred to as "clusters," contained oil spills. In addition, considering the functioning characteristics of leaks at oil fields, the actual pollution area is estimated to be 2.5 to 10 times larger than what can be visually observed. According to some sources, by the early 2000s, approximately 350,000 kilometres of in-field and inter-field oil pipelines were operational in Russia. These field pipelines experienced between 50,000 to 60,000 failures each year, including ruptures and corrosion holes with leaks. The volume of oil spilt was estimated to range from 1% to 7% of the total production volume.

It has been found that the annual discharge of oils and oil products from major rivers in Western Siberia into the Arctic seas amounts to: the Ob River contributes up to 600,000 tons, the Yenisei River up to 360,000 tons, and the Lena River up to 50,000 tons. In the Ob River basin alone, up to 1.5 million tons of oil are discharged each year, resulting in the loss of natural significance for approximately 250 rivers and 1,200 streams. Emergency leaks that occur in spring, when a layer of meltwater is present on the surface, can cause the oil slick to spread extensively due to wind effects, leading to uncontrolled environmental pollution. Oil slick movement on the water surface may extend to important protected areas, such as rivers, lakes, and streams, resulting in further contamination. Therefore, mathematical modelling of the emergency spread of spilt oil on a natural surface covered with meltwater is essential for addressing various situations in engineering practice. Predictive calculations using the proposed mathematical model allow for the evaluation of the oil slick's spread dynamics, providing the basis for necessary actions to localize the spill and prevent pollution of critical protected natural areas.

Predictive calculations using this mathematical model can help evaluate the dynamics of the oil slick's spread, providing a basis for necessary actions to localize the spill and prevent pollution of critical protected natural areas.

*Keywords:* accidents on oil pipelines, mathematical modeling, oil spills in high water

*For citation:* Chelombitko, S. I. (2025). Mathematical modeling of oil spill accidents during high water. *Oil and Gas Studies*, (1), pp. 83-88. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2025-1-83-88

## **Введение**

В процессе эксплуатации месторождений случаются разливы нефтей и технологических жидкостей. Наиболее значительный ущерб окружающей среде наносится в случаях, когда аварийные утечки происходят при сквозных (коррозионных) повреждениях промысловых трубопроводов весной. В таких ситуациях вытекшая нефть вместе с талыми водами может распространиться за пределы месторождения, попадая в ручьи, озера, реки [1–3]. Ежегодно в поверхностные водоемы Сибири поступает от 4 до 5 млн т нефти и нефтепродуктов, а с «помощью» рек Западной и восточной Сибири в Арктику поступает до 1 млн т нефти и нефтепродуктов [4]. Полностью избежать приводящих к утечкам нефти аварий на трубопроводных системах не представляется возможным. Однако снизить ущерб окружающей среде в отдельных случаях эксплуатирующие организации способны. Для этого, как в рассматриваемом случае, предлагается использовать численное моделирование процесса распространения нефти по водной поверхности, на основе которого можно спланировать и осуществить мероприятия по предотвращению загрязнения углеводородами определенного охранного объекта.

### Объект и методы исследования

Объект исследования — вытекающая из сквозного повреждения трубопровода нефть, которая распространяется по водной поверхности. Основными факторами, влияющими на движение нефтяного пятна, служат силы тяжести, внутреннего (вязкого) трения в жидкости, а также поверхностного трения на границе с воздушным потоком. В процессе исследования применялись получившие широкое распространение аналитические методы, позволяющие на основе математического моделирования открытых потоков выполнять численные расчеты при решении различных инженерных задач.

В основе математической модели процесса распространения нефти по водной поверхности лежат динамические уравнения движения ньютоновской жидкости для осредненного по глубине потока и соответствующее уравнение неразрывности следующего вида [5]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial hU_1}{\partial t} + \left( \frac{\partial hU_1^2}{\partial x_1} + \frac{\partial hU_1U_2}{\partial x_2} \right) + gh \frac{\partial h}{\partial x_1} = \\ & = 0,0026 \frac{\rho_b}{\rho} W_1 W + \nu \sum_{k=1}^2 \left( h \frac{\partial^2 U_1}{\partial x_k^2} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial hU_2}{\partial t} + \left( \frac{\partial hU_2^2}{\partial x_2} + \frac{\partial hU_2U_1}{\partial x_1} \right) + gh \frac{\partial h}{\partial x_2} = \\ & = 0,0026 \frac{\rho_b}{\rho} W_2 W + \nu \sum_{k=1}^2 \left( h \frac{\partial^2 U_2}{\partial x_k^2} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

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

где  $t$  — время, с;  $Ox_1x_2$  — прямоугольная горизонтальная система координат;  $\frac{\partial}{\partial t}, \frac{\partial}{\partial x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2}$  — символы частных производных соответственно по времени и координатам  $x_1, x_2$ ;  $h = h(x_1, x_2, t)$  — глубина слоя нефти на поверхности воды, м;  $g$  — ускорение свободного падения,  $9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости нефти,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $U_i = U_i(x_1, x_2, t)$  — проекции на оси координат осредненной по глубине потока скорости потока нефти,  $\text{м/с}$ ;  $\rho$  — плотность нефти,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho_b$  — плотность воздуха,  $\text{кг/м}^3$ ;  $W_i, W$  — проекции на оси координат и модуль скорости воздушного потока,  $\text{м/с}$ ;  $q_u$  — объемные потери легких углеводородных фракций нефти с единицы площади поверхности от испарения,  $\text{м/с}$ .

Граница пятна разлитой нефти (контур) является подвижной в процессе растекания и принимается переменной функцией  $L = L(x_1, x_2, t)$ , определяемой в ходе решения. Краевые условия для системы нелинейных дифференциальных уравнений (1)–(2) задаются согласно «физике» процесса растекания вязкой жидкости с малыми скоростями (число Рейнольдса  $Re \leq 500$  и соответствует ламинарному режиму течения для открытых потоков):

- на подвижной границе (контуре) пятна нефти полагается глубина потока, равная нулю ( $h = 0$ ), и отсутствует перенос массы жидкости через данную границу;
- в месте утечки задается объемный расход вытекающей из трубопровода нефти.

### Результаты

Аналитическое решение системы нелинейных дифференциальных уравнений 2-го порядка (1)–(3) с заданными краевыми условиями не представляется возможным, поэтому для реализации данной математической модели с целью выполнения инженерных расчетов можно применить какой-либо программный продукт (например, ANSYS) или использовать какой-либо численный метод решения. В нашем случае применялся проверенный в течение нескольких десятилетий для решения подобных систем уравнений (типа Сен-Венана или уравнений мелкой воды) метод конечных разностей, при этом использовались как явная, так и неявная разностные схемы. В последнем случае алгоритм усложняется, так как требуется применение известного метода «прогонки», когда на каждом «временном слое» сначала определяются «прогночные коэффициенты» (прямой ход), а затем значения искомых функций (компонент скорости течения  $U_1, U_2$  и глубины потока  $h$ ) в узлах вычислительной сетки (обратный ход). В случае использования алгоритма на основе явной разностной схемы расчеты проводятся с существенно меньшими «шагами» по времени, общее расчетное время увеличивается, при этом величина каждого «шага» оценивается из условия устойчивости вычислительного алгоритма [5–9].

Сравнительная оценка качества описания конечно-разностных аналогов уравнений (1)–(3) была проведена путем сопоставления результатов численных расчетов с экспериментальными данными по растеканию ньютоновских нефтей на горизонтальной поверхности, покрытой стеклом, при этом кинематическая вязкость нефтей составляла  $7,4 \cdot 10^{-6}$  и  $16 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Наибольшая погрешность вычислений для данных экспериментов — 6,6 %.

### Обсуждение

В реальных условиях при распространении нефти по поверхности воды происходит уменьшение ее массы из-за испарения легких углеводородных фракций, что можно учесть в формуле (2) для выражения  $q_u$ , если воспользоваться известными эмпирическими формулами, полученными под руководством профессора В. Н. Антипьева. Если пренебречь потерями массы жидкости от испарения (например, при отсутствии данных о фракционном составе нефти или низкой температуре воздуха), то, полагая в (3)

$q_u = 0$ , в результате расчетов получим «завышенные» границы распространения нефти, что в подобных условиях вполне допустимо.

### **Выводы**

Рекомендуется применение данной математической модели процесса аварийного распространения нефти по водной поверхности для решения следующих задач:

- нахождения размеров нефтяного пятна за определенное время его распространения;
- нахождения «критического» времени аварийного растекания нефти до достижения определенных размеров нефтяного пятна или границ некоторого охранного объекта (например, озера, реки и т. д.).

Последнее наиболее актуально в инженерной практике, так как позволяет оценить динамику распространения нефти по водной поверхности в течение времени с момента образования утечки, на основе чего можно планировать и выполнять необходимые работы по защите важных природоохранных объектов от загрязнения нефтепродуктами.

### **Список источников**

1. Бобылев, Л. Н. Как избежать угрозы экологической катастрофы вследствие утечек нефти из магистральных нефтепроводов / Л. Н. Бобылев. – Текст : непосредственный // Нефтегазовые технологии. – 1999. – № 6. – С. 27–29.
2. Российская Арктика на пороге катастрофы / Под ред. А. В. Яблокова. – Москва : Центр экологической политики России, 1996. – 208 с. – Текст : непосредственный.
3. Низамов, Х. Н. Анализ аварийных ситуаций в трубопроводных системах / Х. Н. Низамов, В. П. Званский, В. И. Дербуков. – Текст : непосредственный // Экология и промышленность России. – 1996. – № 5. – С. 41–43.
4. Техногенное загрязнение природных вод углеводородами и его экологические последствия / В. М. Гольдберг, В. П. Зверев, А. И. Арбузов [и др.]. – Москва : Наука, 2001. – 125 с. – Текст : непосредственный.
5. Васильев, О. Ф. О расчете прерывных волн в открытых руслах / О. Ф. Васильев, М. Т. Гладышев. – Текст : непосредственный // Известия АН СССР. Серия: Механика жидкости и газа. – 1966. – № 6. – С. 184–189.
6. Лятхер, В. М. Гидравлические исследования численными методами / В. М. Лятхер, А. Н. Милитеев. – Текст : непосредственный // Водные ресурсы. – 1981. – № 3. – С. 60–79.
7. Лятхер, В. М. Исследование плана течений в нижнем бьефе гидротехнических сооружений численными методами / В. М. Лятхер, А. Н. Милитеев, Н. П. Тогунова. – Текст : непосредственный // Гидротехническое строительство. – 1978. – № 6. – С. 27–32.
8. Милитеев А. Н. Численные исследования плана течений открытых потоков / А. Н. Милитеев. – Текст : непосредственный // Гидравлика и фильтрация: сборник научных трудов Гидропроекта. – Москва : Гидропроект, 1979. – С. 3–15.

9. Антипов, В. Н. Динамические уравнения процесса растечения нефти по естественной поверхности / В. Н. Антипов, Н. П. Богачев, С. И. Челомбитко. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1997. – № 1. – С. 86–89.

#### **References**

1. Bobylev, L. N. (1999). How to avoid the threat of an environmental disaster due to oil leaks from main oil pipelines // Oil and gas technologies. – (6), pp. 27-29. (In Russian).
2. The Russian Arctic is on the verge of disaster. (1996). Moscow, Center for Environmental Policy of Russia Publ., 208 p. (In Russian).
3. 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).
4. Gol'dberg, V. M., Zverev, V. P., Arbuzov, A. I., Kazennov, S. M., Kovalevskiy, Yu. V., & Putilina, V. S. (2001). Tehnogennoe zagryaznenie prirodnykh vod uglevodorodami i ego ekologicheskie posledstviya [Anthropogenic Pollution of Natural Waters with Hydrocarbons and Its Ecological Consequences]. Moscow, Nauka Publ., 125 p. (In Russian).
5. Vasiliev, O. F., & Gladyshev, M. T. (1966). On the calculation of discontinuous waves in open channels. Izvestiya AN SSSR. Series: Mechanics of liquid and gas, (6), pp. 184-189. (In Russian).
6. Lyather, V. M., & Militeev, A. N. (1981). Hydraulic investigations by numerical methods. Water resources, (3), pp. 60-79. (In Russian).
7. Lyather, V. M., Militeev, A. N., & Togunova, N. P. (1978). Investigation of the flow plan in the lower reaches of hydraulic structures by numerical methods. Hydrotechnical construction, (6), pp. 27-32. (In Russian).
8. Militeev, A. N. (1979). Numerical studies of the flow plan of open streams. Hydraulics and filtration: collection of scientific papers of the Hydroproject. Moscow, Hydroproject Publ., pp. 3-15. (In Russian).
9. Antipov, V. N., Bogachev, N. P., & Chelombitko, S. I. (1997). Dynamic equations of the process of oil spreading over a natural surface. News of higher educational institutions. Oil and gas. (1), pp. 86-89. (In Russian).

#### **Информация об авторе/ Information about the author**

**Челомбитко Сергей Иванович,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры физики и приборостроения  
Тюменский индустриальный универси-  
тет, г. Тюмень, sjlss@mail.ru

**Sergey I. Chelombitko** Doctor of  
Engineering, Professor at the Department  
of Physics and Instrument Engineering,  
Industrial University of Tyumen,  
sjlss@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21.06.2024; одобрена после рецензирования 04.07.2024; принята к публикации 12.08.2024.

The article was submitted 21.06.2024; approved after reviewing 04.07.2024; accepted for publication 12.08.2024.