

УДК 614.849

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АВАРИЙНЫХ
РАЗЛИВОВ НЕФТИ В ГИС-СИСТЕМЕ МЕТОДАМИ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**DEVELOPMENT OF EMERGENCY OIL SPILLS
FORECASTING ALGORITHM IN A GIS SYSTEM
BY MATHEMATICAL MODELING METHODS**

Д.Ю. Пережогин

**Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация**

Dmitriy Yu. Perezhogin

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

Аннотация. В статье представлены метод прогнозирования распространения нефти в результате аварийного сброса и оценка поверхностного нефтяного разлива, который может быть локализован с помощью соответствующих средств противодействия. Для оценки сценария нефтяного разлива предложен алгоритм прогноза траектории движения и поведения нефти и проведена оценка потенциально чувствительных ресурсов, подверженных рискам от разлива. Разработана блок-схема реализации прогноза аварийного разлива нефти в ГИС-системе. Определено количество опасного вещества, способного участвовать в образовании взрывоопасной смеси. Разработана оценка индивидуального риска на нефтедобывающей платформе.

Abstract. The article presents a method for predicting the oil spread as an emergency discharge result and surface oil spill assessment, which can be localized using appropriate countermeasures. To assess the oil spill scenario, an algorithm is proposed for predicting the oil movement and behavior trajectory and an assessment of potentially sensitive resources subject to risks from a spill. A block diagram of the implementation of the forecast of an emergency oil spill in the GIS system has been developed. The hazardous substance amount capable

of participating in the explosive mixture formation has been determined. An individual risk assessment on an oil production platform has been developed.

Ключевые слова: аварийные разливы нефти, математическое моделирование, ГИС-системы, индивидуальный риск, лагранжево-эйлеровый метод

Key words: emergency oil spills, mathematical modeling, GIS systems, individual risk, Lagrangian-Eulerian method

Прогнозирование аварийного разлива нефти может быть осуществлено с использованием моделей воздействия и законов поражения, являющимися составляющими, из которых с помощью процедур сопряжения на основе ГИС-технологий получают требуемые прогнозы и показатели риска [1]. Предлагаемый метод прогнозирования ориентирован на расчет распространения нефти в результате аварийного сброса и, прежде всего, на оценку поверхностного нефтяного разлива, который может быть локализован с помощью соответствующих средств противодействия. За основу расчетно-аналитического метода приняты подходы, изложенные в методе [2]. Для оценки сценария разлива составляется прогноз траектории движения и поведения нефти и проводится оценка потенциально чувствительных ресурсов, подверженных рискам от разлива. Этот прогноз важен для определения и оценки рисков, связанных со сценарием разлива [3].

С целью определения положения и конфигурации нефтяного разлива использовали лагранжево-эйлеровый метод [4], имитирующий перемещение пятна нефти или его отдельных фрагментов по поверхности моря под действием ветра, течений, волн и турбулентной диффузии. Метод заключается в дискретном представлении среды в виде набора лагранжевых элементов, использовании эйлеровых расчетных сеток для описания полей, расщеплении вычислительного цикла на процессы переноса и изменения состояния среды.

В модели рассматривали фрагменты (i), каждый из которых имеет набор параметров: координаты, площадь, плотность и вязкость нефти, количество ее фракций на поверхности воды, объем испарившейся нефти и

т.д. [5]. Все параметры фрагментов зависят от времени их нахождения на поверхности воды, при этом учитывается влияние пространственно-временной неоднородности гидрометеорологических полей на их перенос и трансформацию. Конфигурацию фрагмента нефтяного разлива в произвольный момент времени и распределение толщины нефти в пятне определяли интегрированием по вертикальной координате уравнений гидродинамики в областях с произвольной геометрией контактных границ. На рисунке 1 представлена предлагаемая блок-схема реализации прогноза развития аварийного разлива нефти в ГИС-системе.

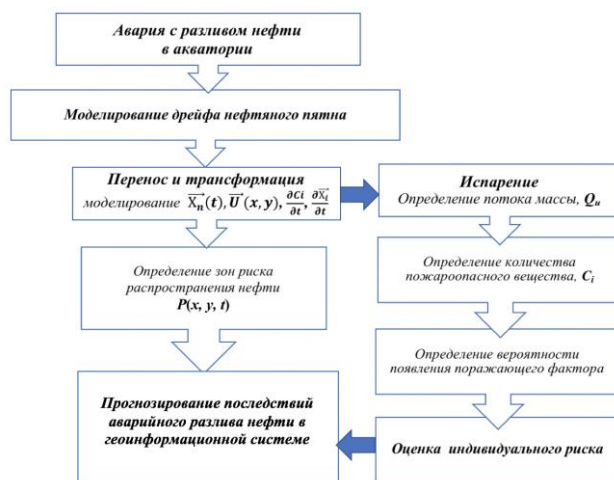


Рисунок 1. Блок-схема реализации прогноза развития аварийного разлива нефти в ГИС

Для сценария аварийного разлива нефти в морской акватории моделирование проводим в три этапа (таблица 1):

- рассчитываем траекторию перемещения по поверхности моря одно-моментных или залповых сбросов нефти в результате совокупного действия ветра и течений в соответствии с уравнениями (1) и (2), пренебрегая эффектами, связанными с движением среды (необходимые характеристики среды известны в эйлеровом представлении);

- задаем параметры выветривания для каждого из элементарных разливов (3)–(5) в соответствии с гидрометеорологическими условиями, определенными по полям метеорологических параметров и траекториям распространения разливов (характеристики среды полностью определены в лагранжевом представлении);

- осуществляем «сборку» сценария/ев распространения продолжительного разлива нефти из ансамбля траекторий перемещений элементарных

разливов с учетом соответствующих изменений физико-химических характеристик углеводородов и определяем новые значения c_{ij} и h_{ij} по уравнениям (6)–(8) (характеристики объекта моделирования переносятся с лагранжевой сетки на Эйлерову).

Таблица 1. Этапы моделирования аварийного разлива углеводородов в акватории МСП

Этап 1 - Подготовка исходных данных	
1. Картографическая и семантическая информация 2. Дата, время, место и динамика разлива 3. Тип углеводорода 4. Метеорологическая ситуация на весь период 5. Навигационно-гидрологические характеристики территории 6. Положение средств локализации аварии	1. Пространственные координаты разлива $\{x_i, y_i\}$ 2. Время t , скорость $\{u_i, v_i\}$, масса $\{m\}$ 3. Объем разлившейся нефти V 4. Фракционный состав $\{c_i\}$, c_i^k - концентрация k -ой фракции, плотность нефти, кинематическая вязкость, температура застывания нефти T_s , температура вспышки $T_{вс}$
Этап 2 - Моделирование конфигурации нефтяного разлива в акватории	
<p style="text-align: center;">ПЕРЕНОС</p> <p>Перенос i-того нефтяного пятна по поверхности</p> $\vec{X}_n(t) = \vec{X}_i + \Delta t \sum_{l=1}^n \vec{U}_l(\vec{X}_i, t_l), \quad t_i = i \cdot \Delta t \quad (1)$ <p>Скорость переноса U нефтяных пятен по поверхности</p> $\vec{U} = \vec{U}_w + \vec{U}_c + \vec{U}_s + \vec{U}_{se}, \quad (2)$ $\partial \vec{X}_i / \partial t = 0,03 \cdot \vec{U}_{0t} + \vec{U}_{ct} + \vec{U}_{st} + \vec{U}_{set}. \quad (3)$ <p>Скорость дрейфа пятна нефти U_w, задаваемая скоростью ветра U_0</p> $U_w = (\rho_a / \rho_w)^{1/2} \cdot U_0 = 0,03 \cdot U_0. \quad (4)$ <p>Скорость волнового дрейфа $U_s = a^2 \cdot k \cdot \omega.$</p> <p>Эмпирическая зависимость скорости волнового дрейфа $\vec{U}_{se} = \vec{U}_s + 0,445 \cdot \zeta \cdot \vec{c}_w.$</p> <p><small>$c_w$ - фазовая скорость волны; a - амплитуда волны; k - волновое число; ω - частота волны</small></p> <p>Средняя скорость переноса нефтяного пятна</p> $\vec{U}(x, y) = a_w \cdot \vec{U}_w(x, y) + a_c \cdot \vec{U}_c(x, y). \quad (5)$	<p style="text-align: center;">ТРАНСФОРМАЦИЯ</p> <p>Траектория движения дискретных лагранжевых частиц \vec{X}_i разлива нефти</p> $\partial \vec{X}_i / \partial t = \vec{U}(X_i, Y_i) + \vec{U}_d(X_i, Y_i). \quad (6)$ <p>Положение i-той лагранжевой частицы в момент времени $t_{n+1} = t_n + \Delta t$</p> $X^{n+1} = X^n + u^{n+1} \cdot \Delta t + r_n \cos \theta, \quad (7)$ $Y^{n+1} = Y^n + v^{n+1} \cdot \Delta t + r_n \sin \theta. \quad (8)$ <p>Полуэмпирическое уравнение переноса \vec{U} и турбулентной диффузии \vec{U}_d (динамика разлива нефти)</p> $\partial C_i / \partial t = -\nabla[(\vec{U} + \vec{U}_d)C_i] + \sum_q F_q(C, k_q) \pm \sum_p n_p, \quad (9)$ <p><small>где F_q - функции, описывающие трансформацию нефтяного пятна, испарение, диспергирование, растворение и т.д.</small></p> $DC_i/Dt = \partial C_i / \partial t + \nabla[(\vec{U} + \vec{U}_d)C_i] = (C_i^{n+1} - C_i^n) / \Delta t. \quad (10)$ <p>Поверхностная концентрация углеводородов C_i^{n+1} в момент времени $t_{n+1} = t_n + \Delta t.$</p> $C_i^{n+1} = C_i^n + [\sum_q F_q(C, k_q) \pm \sum_p n_p] \Delta t \quad (11)$
Этап 3 - Моделирование процессов распространения углеводородов при аварийном разливе	
<p style="text-align: center;">Математическая модель переноса, деструкции и растворения углеводородов</p> <p>Распространение i-того фрагмента фракции нефти с концентрацией C_i под влиянием ветра, течений и турбулентной диффузии с учетом j-той физико-химической реакции R_j</p> $\frac{\partial C_i}{\partial t} + u \frac{\partial C_i}{\partial x} + v \frac{\partial C_i}{\partial y} + w \frac{\partial C_i}{\partial z} - K_x \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} - K_y \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} - K_z \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} + F(C_i, R_j) = 0 \quad (12)$ <p>1. Мгновенный выброс нефти в точке (x_0, y_0, z_0) средней поверхностной плотностью Q_i i-той фракции нефтяного пятна</p> $C_i(x, y, 0) = Q_i \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0)$ <p>2. Поверхностная плотность i-той фракции нефтяного пятна на части водной поверхности S_1</p> $C_i(x, y) = \begin{cases} Q_i, & (x, y) \in S_1 \\ 0, & (x, y) \notin S_1 \end{cases}$ <p>При достижении границы S_1 в зависимости от физико-химических свойств нефти $\left. \frac{\partial C_i}{\partial n} \right _{\Gamma} = pC_i$. Для свободной водной границы $C_i(x, y, z, t)_{S_2} = 0$.</p> $\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} - K_{1x} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - K_{1y} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_D^{(W)} X_i S_i M_i^{(m)} = 0, \quad i = 1, i = 2;$ $\frac{\partial C_i}{\partial t} + u \frac{\partial C_i}{\partial x} + v \frac{\partial C_i}{\partial y} - K_x \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} - K_y \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} = 0, \quad i = 3, \quad C_i _{r=0, (x,y) \in S_0} = C_{i0}, \quad C_i _{r=0, (x,y) \notin S_0} = 0.$ <p><small>где $\frac{K_x X_i P_i}{RT} M_i^{(m)}$ описывает уменьшение нефти только за счет испарения; X_i - молярная доля компонента с номером i, равная $\frac{M_i}{\sum M_i}$; K_x - коэффициент массопереноса.</small></p> <p style="text-align: center;">Геометрические характеристики пятна нефти (толщина h и площадь $S(t)$)</p> $h_{i,j} = \frac{\rho_0}{\gamma \cdot \Delta x \Delta y} \sum_k^{N_{i,j}} m_k, \quad \frac{\partial S}{\partial t} = f_n \cdot S(t)^{1/3} \cdot h_i. \quad (13)$ <p>Характеристики аварийного разлива нефти получают из уравнений (1) и (13) и интегрального баланса массы нефти M в разливе</p> $\frac{dM}{dt} = Q_n + Q_d, \quad \text{где } Q_n - \text{поток массы при испарении, кг/с; } Q_d - \text{поток массы при диспергировании, кг/с.}$	

Результаты расчетов представляем в ГИС-системе на карте района аварии в виде последовательных конфигураций нефтяного пятна и дрейфующего облака в графическом и текстовом видах.

В рамках сценария распространения нефти рассчитываем:

- последовательные положения разлива, обусловленные переносом нефти по поверхности моря;
- количество нефти, испарившейся в атмосферу;
- количество нефти, диспергировавшейся в воду; геометрические параметры (площадь, толщина, линейные размеры);
- изменение физико-химических характеристик нефти (плотность, вязкость) определяем по уравнениям (12) и (13).

При попадании разлива средней толщины выше некоторой заданной величины на участок акватории (в ячейку сетки с индексами i, j) регистрируем время достижения T_{ijk} , (k – номер метеорологического сценария). Поле минимального времени достижения точек акватории, соответствующее контурам областей, за пределы которых разлив не выйдет в заданные промежутки времени после аварии, определяется выражением $T_a(x, y) = \min\{T_{ijk}\}$.

Вероятность воздействия разлива нефти в области акватории с координатами центра $\{x, y\}$ определяем как $P_{xy} = n/N$, где N – число рассмотренных метеорологических сценариев; n – общее число регистрируемых событий в ячейке.

Оценку индивидуального риска на нефтедобывающей платформе определяли как

$$R_e = \frac{H}{N_0} \iint_S \int_0^{2\pi} \int_0^{L_{\max}} P[\Delta P(x, y)] \psi(x, y) f(L) \varphi(V) dL dV dx dy,$$

где H – частота взрывного горения за год; N_0 – количество людей в зоне риска; S – площадь территории, m^2 ; L_{\max} – максимальное расстояние дрейфа облака, м; V – скорость ветра, м/с; $P(x, y)$ – вероятность летального исхода в точке (x, y) ; $\psi(x, y)$ – плотность распределения людей на площадке с координатами (x, y) ; $f(L)$ и $\varphi(V)$ – функции плотности распределения дрейфа облака и повторяемости направлений ветра за год соответственно.

Выводы

Разработаны метод прогнозирования распространения нефти в результате аварийного сброса и оценка поверхностного нефтяного разлива, который может быть локализован с помощью соответствующих средств противодействия. Разработана блок-схема реализации прогноза развития аварийного разлива нефти в ГИС–системе. Определено количество опасного вещества, способного участвовать в образовании взрывоопасной смеси. Разработана оценка индивидуального риска на нефтедобывающей платформе.

Список используемых источников

1. Ларионов В.И., Козлов М.А., Осипов В.И. и др. Комплексная оценка риска от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // 25 лет – от идеи до технологии: Сб. научн. тр. / ВНИИ ГОЧС. М., 2001. С. 70-86.
2. Моделирование аварийных разливов нефти на суше и малых реках с применением ГИС-технологий // Энциклопедия безопасности: строительство, промышленность, экология: в 3 т / В.А. Котляревский, В.И. Ларионов, С.П. Сущев; под ред. В.А. Котляревского. Т. 1. Аварийный риск. Взрывные и ударные воздействия. М.: Наука, 2005. С. 154–190.
3. Зацепя С.Н., Ивченко А.А., Москвичев А.М., Солбаков В.В., Становой В.В. К оценке области возможного обнаружения нефтяного загрязнения при прогнозировании распространения аварийных разливов нефти в море // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 4 (102). С. 61-70.
4. Osipov A.N. Lagrangian Modeling of Dust Admixture in Gas Flows // *Astrophys. Space Sci.* 2000. Vol. 274. P. 377–386.
5. Ткалин А.В. Испарение нефтяных углеводородов из пленок на гладкой поверхности моря // *Океанология.* 1986. Т. 26, Вып. 4. С. 628–630.

References

1. Larionov V.I., Kozlov M.A., Osipov V.I. e.a. Kompleksnaya otsenka riska ot chrezvychainykh situatsii prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera [Complex Risk Assessment of Natural and Technological Emergencies]. Sbornok nauchnykh trudov «25 let – ot idei do tekhnologii», VNII GOChS [Collection

of Scientific Works «25 years – from Idea to Technology», VNIИ GOCHS]. Moscow, 2001. P. 70–86. [in Russian].

2. Kotlyarevskii V.A., Larionov V.I., Sushchev S.P. Modelirovanie avariinykh razlivov nefti na sushe i malykh rekakh s primeneniem GIS-tekhnologii. Entsiklopediya bezopasnosti: stroitel'stvo, promyshlennost', ekologiya: v 3 t. [Modeling of Emergency Oil Spills on Land and Small Rivers Using GIS Technologies. Encyclopedia of Safety: Construction, Industry, Ecology: in 3 vol.]. T. 1. Avariinyi risk. Vzryvnye i udarnye vozdeistviya [Vol. 1. Emergency Risk. Explosive and Shock Effects]. Moscow, Nauka Publ., 2005, pp. 154–190. [in Russian].

3. Zatsepa S.N., Ivchenko A.A., Moskvichev A.M., Solbakov V.V., Stanovoi V.V. K otsenke oblasti vozmozhnogo obnaruzheniya neftyanogo zagryazneniya pri prognozirovanii rasprostraneniya avariinykh razlivov nefti v more [On the Assessment of the Oil Pollution Possible Area Detection in Predicting the Spread of Oil Spills in the Sea]. Problemy Arktiki i Antarktiki – Problems of the Arctic and the Antarctic, 2014, No. 4 (102), pp. 61-70. [in Russian].

4. Osiptsov A.N. Lagrangian Modeling of Dust Admixture in Gas Flows. Astrophys. Space Sci., 2000, Vol. 274, pp. 377–386.

5. Tkalin A.V. Isparenie neftnyanykh uglevodorodov iz plenok na gladkoй poverkhnosti moray [Evaporation of Petroleum Hydrocarbons from Films on the Smooth Surface of the Sea]. Okeanologiya – Oceanology, 1986, Vol. 26, Issue 4, pp. 628–630. [in Russian].

Сведения об авторе

About the author

Пережогин Дмитрий Юрьевич, аспирант кафедры «Пожарная и промышленная безопасность», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Dmitriy Yu. Perezhogin, Post-graduate Student of Fire and Industrial Safety Department USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: pkpb@mail.ru