

Математическая модель для прогнозирования последствий разлива нефти и нефтепродуктов

ISSN 1996-8493

DOI:10.54234/CST.19968493.2023.20.1.75

© Технологии гражданской безопасности, 2023

В.А. Акимов, Е.О. Иванова, А.В. Мишурный

Аннотация

В статье представлено математическое описание основных прогнозных параметров разлива нефти и нефтепродуктов: прогнозируемая площадь разлива; прогнозируемая масса вылившейся нефти; прогнозирование загрязнения водного объекта.

Ключевые слова: разлив нефти и нефтепродуктов; прогнозно-аналитическая модель; основные исходные данные; прогнозируемая площадь разлива; прогнозируемая масса вылившейся нефти; байесовский классификатор.

Mathematical Model for Predicting the Consequences of Oil and Petroleum Products Spill

ISSN 1996-8493

DOI:10.54234/CST.19968493.2023.20.1.75

© Civil Security Technology, 2023

V. Akimov, E. Ivanova, A. Mishurny

Abstract

Article presents mathematical description of the main forecast parameters of the oil and petroleum products spill: projected area of spill; projected mass of spilled oil; prediction of the water body pollution.

Key words: oil and petroleum products spill; predictive and analytical model; basic initial data; projected spill area; projected mass of spilled oil; Bayesian classifier.

03.03.2023

Введение

Ежегодно в России происходят десятки тысяч разливов нефти и нефтепродуктов (РНН), которые наносят колоссальный ущерб окружающей среде, экономике и населению. Нефтяные разливы приводят к нарушению естественных процессов и взаимосвязей, существенно изменяя условия обитания всех видов живых организмов и деформируя структуры биоценозов [1].

В общем случае процесс разработки прогнозно-аналитической модели для прогнозирования последствий РНН включает: сбор исходной информации

и формирование базового обучающего множества; выбор байесовского классификатора; подготовку методов анализа и интерпретации результатов статистической обработки [2].

Основными исходными данными, описывающими характеристики РНН, являются: входные данные, характеризующие основные параметры РНН; входные данные, характеризующие резервуары хранения нефти и нефтепродуктов (НН); входные данные, характеризующие метеорологическую обстановку; входные данные, характеризующие свойства хранимых НН; входные данные, характеризующие участок местности возможного РНН [3].

Основными прогнозными параметрами РНН являются: прогнозируемая площадь РНН через время, соответствующее шагу прогноза; прогнозируемая масса вылившихся НН через время, соответствующее шагу прогноза; прогнозирование загрязнения водного объекта, возникновения пожара, взрыва [4].

1. Прогноз площади разлива нефти и нефтепродуктов

Прогнозируемая площадь РНН определяется с использованием байесовского классификатора с учетом параметров: расчетной массы и расчетной площади разлива НН [5].

Масса нефти, вылившаяся из резервуара (M_p , кг), определяется по формуле:

$$M_p(t) = G_{(t)} \cdot t - \frac{\rho_{нн}^{xp} \cdot g \cdot \mu^2 \cdot A_{hol}^2}{A_R} t^2, \quad (1)$$

где:

$G_{(t)}$ — массовый расход в момент времени, кг/с;
 t — период времени истечения, с.

Массовый расход НН, проходящих через аварийное отверстие ($G_{(t)}$, кг/с) за время t , рассчитывается по следующей зависимости:

$$G_{(t)} = G_0 - \frac{\rho_{нн}^{xp} \cdot g \cdot \mu^2 \cdot A_{hol}^2}{A_R} t, \quad (2)$$

где:

G_0 — массовый расход НН через аварийное отверстие в начальный момент времени, кг/с;
 $\rho_{нн}^{xp}$ — плотность НН при температуре хранения в резервуаре, кг/м³;
 g — ускорение свободного падения, м/с², $g = 9,81$ м/с²;
 μ — коэффициент истечения, $\mu = 0,61$;
 A_{hol} — площадь аварийного отверстия, м²;
 A_R — площадь основания резервуара, м².

Массовый расход НН в начальный момент времени (G_0 , кг/с) следует определять по формуле:

$$G_0 = \mu \cdot \rho_{нн}^{xp} \cdot A_{hol} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_0 - h_{hol})}, \quad (3)$$

где:

h_0 — начальная высота столба жидкости в резервуаре, м;
 h_{hol} — высота расположения аварийного отверстия, м.

Начальная высота столба НН в резервуаре (h_0 , м) рассчитывается по следующей формуле:

$$h_0 = \frac{4 \cdot S_{рнн}}{\pi \cdot d^2}, \quad (4)$$

где d — диаметр резервуара, м.

Полное время истечения ($t_{полн.}$, с) НН через аварийное отверстие резервуара определяется по следующей зависимости:

$$t_{полн.} = \frac{2 \cdot A_R (\sqrt{h_0} - \sqrt{h_{hol}})}{\mu A_{hol} \sqrt{2g}}. \quad (5)$$

2. Прогноз массы вылившейся нефти

Масса НН ($M_{об}$, кг), перелившаяся за пределы обвалования за период времени, рассчитывается по формуле:

$$M_{об} = M_p(t) - V_{обв} \cdot \rho_{нн}^{xp}, \quad (6)$$

где $V_{обв}$ — объем площадки обвалования, м³.

Радиус разлития (пятна) НН на подстилающей поверхности при разгерметизации определяется по формуле:

$$L_p = 0,46 \sqrt[3]{\frac{G_{\tau} \tau}{\rho_{нн}^T}} \cdot \left[\left(\frac{g \frac{G_{\tau} \tau}{\rho_{нн}^T}}{v^2} \right)^{0,08} \cdot \left(\frac{g \tau^2}{\sqrt[3]{\frac{G_{\tau} \tau}{\rho_{нн}^T}}} \right)^{0,06} \right], \quad (7)$$

где:

L_p — радиус разлития (пятна) НН, представленного в виде приведенного круга, м;
 $G_{(t)}$ — массовый расход жидкости через поврежденное отверстие по состоянию на момент времени t после разгерметизации резервуара, кг/с;
 τ — продолжительность истечения, принимается равной шагу прогнозирования, с;
 g — ускорение свободного падения, принимается равным 9,81 м/с²;
 v — кинематическая вязкость жидкости, при температуре грунта за пределами обвалования, м²/с;
 m и n — показатели степени, учитывающие условия растекания нефти ($m = 0,08$, $n = 0,06$);
 $\rho_{нн}^T$ — плотность НН при температуре грунта за пределами обвалования, кг/м³.

При уклоне местности до 1% площадь РНН при разгерметизации резервуара, расположенного на наблюдаемой территории (НТ), рассчитывается по формуле:

$$S_{np} = \pi \cdot L_p^2. \quad (8)$$

При уклоне от 1 до 3% площадь РНН при разгерметизации резервуара, расположенного на НТ, определяется площадью эллипса по формулам:

$$b_{zp} = \sqrt{\frac{K_{ук} \cdot S_{рнн}}{\pi}}, \quad (9)$$

$$a_{zp} = \frac{4 \cdot S_{рнн}}{\pi \cdot b_{zp}}, \quad (10)$$

где:

b_{zp} — большая полуось эллипса;
 a_{zp} — малая полуось эллипса;

$K_{ук}$ — коэффициент, характеризующий уклон местности, принимается равным 8.

При уклоне более 3% площадь РНН при разгерметизации резервуара, расположенного на НТ, определяется по формулам (9) и (10); при этом коэффициент, характеризующий уклон местности, принимается равным $K_{ук} = 16$.

Плотность НН при заданной температуре ($\rho_{ин}^T$, кг/м³) грунта за обвалованием определяется по формуле Д. И. Менделеева:

$$\rho_{ин}^T = \rho_{20} / (1 + \beta_p \cdot (T_{сп} - 20)), \quad (11)$$

где:

ρ_{20} — плотность НН при 200 °С, кг/м³;
 $T_{сп}$ — температура поверхности грунта за обвалованием резервуара, °С;
 β — коэффициент объемного расширения, принимаемый в зависимости от плотности НН при температуре 20 °С, 1/°С.

Кинематическая вязкость НН ($\nu_{ин}^T$, м²/с) при заданной температуре грунта за обвалованием резервуара определяется по формуле Рейнольдса-Филонова:

$$\nu_{ин}^T = \nu_{сп} \cdot e^{-u(T_{сп} - T_{сп})}, \quad (12)$$

где:

$\nu_{сп}$ — кинематическая вязкость при температуре хранения НН в резервуаре $T_{сп}$, м²/с;

u — показатель крутизны вискограммы, 1/К.

Показатель крутизны вискограммы (u , 1/К) рассчитывается по формуле:

$$U = 1 / (T_{сп} - T_{сп}) \cdot \ln \frac{\nu_{сп}}{\nu_{ин}^T}, \quad (13)$$

где $T_{сп}$ — температура хранения НН в резервуаре на момент РНН, К.

Заключение

Таким образом, в статье представлено краткое описание математической модели для прогнозирования последствий разлива нефти и нефтепродуктов с использованием метода Байеса [6].

Другие прогнозные аналитические модели в области техногенных угроз безопасности жизнедеятельности населения рассмотрены в [7, 8], а модель для прогнозирования последствий сброса жидких технологических отходов и модель для прогнозирования последствий выброса опасных химических веществ будут представлены в следующем номере журнала.

Литература

1. Воробьев Ю. Л. Предупреждение и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов / Ю. Л. Воробьев, В. А. Акимов, Ю. И. Соколов. Изд. 2-е, стер. М.: Ин-т риска и безопасности, 2007. 375 с. ISBN978-5-89635-055-2. EDN: QKQRCD.
2. Прогнозно-аналитические решения по природным, техногенным и биолого-социальным угрозам единой системы информационно-аналитического обеспечения безопасности среды жизнедеятельности и общественного порядка «Безопасный город» / В. А. Акимов, А. В. Мишурный, О. В. Якимюк [и др.]. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2022. 315 с. ISBN978-5-93970-278-2. EDN: MGXNYI.
3. Акимов В. А., Иванова Е. О., Мишурный А. В. АПК «Безопасный город»: исходные данные для прогнозирования последствий разлива нефти и нефтепродуктов в гидросферу // Гражданская защита. 2022. № 8 (564). С. 35–36.
4. Предварительный национальный стандарт Российской Федерации ПНСТ 775-2022 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Безопасный город. Прогнозирование последствий разлива нефти и нефтепродуктов. Общие требования» (утвержден приказом Росстандарта от 29 ноября 2022 г. № 126-пнст).
5. Методика прогнозной и аналитической модели «Разлив нефти и нефтепродуктов». М.: ООО НЦИ, 2021. 109 с.
6. Предварительный национальный стандарт Российской Федерации ПНСТ 762-2022 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Безопасный город. Типовая прогнозная аналитическая модель с использованием метода Байеса. Общие требования» (утвержден приказом Росстандарта от 18 ноября 2022 г. № 118-пнст).
7. Акимов В. А. Аварии на системах электроснабжения: определение индекса приоритета восстановления электроснабжения / В. А. Акимов, А. В. Мишурный // Технологии гражданской безопасности. 2022. Т. 19, № 4 (74). С. 44–47. EDN: RWBXUK.
8. Иванова Е. О. Аварии на системах теплоснабжения: вероятностная оценка развития последствий отказов на тепловой сети / Е. О. Иванова, А. В. Мишурный // Технологии гражданской безопасности. 2022. Т. 19, № 4 (74). С. 48–50. EDN: ZYZBAW.

Сведения об авторах

Акимов Валерий Александрович: д. т. н., проф., засл. деятель науки РФ, ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), гл. н. с. института. Москва, Россия. SPIN-код: 8120-3446.

Иванова Екатерина Олеговна: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), с. н. с. науч.-исслед. отдела. Москва, Россия. SPIN-код: 5483-4886.

Мишурный Андрей Викторович: АО «Объединенная приборостроительная корпорация», руковод. проектн. офиса «Безопасный город». Москва, Россия. SPIN-код: 2799-6308.

Information about authors

Akimov Valery A.: ScD (Technical Sc.), Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies, Chief Researcher of the Institute. Moscow, Russia. SPIN-scientific: 8120-3446.

Ivanova Ekaterina O.: All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies, Senior Researcher, Research Department. Moscow, Russia. SPIN-scientific: 5483-4886.

Mishurny Andrey V.: JSC «United Instrument-Making Corporation», Head of the Project Office «Safe City». Moscow, Russia. SPIN-scientific: 2799-6308.