

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.065

doi: 10.30987/2782-5957-2025-2-25-32

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛОКАЛЬНЫХ РАЗЛИВОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРИ ИХ ВЫГРУЗКЕ ИЗ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Олег Сергеевич Кузьмин¹, Андрей Николаевич Луценко², Алексей Викторович
Каменчуков³, Елена Сергеевна Куликова⁴✉

^{1,2} Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия

^{3,4} Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

¹ readheadunit@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5301-9231>

² andyhab@mail.ru

³ 006641@pnu.edu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7997-3195>

⁴ kulikovaes@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2125-8177>

Аннотация

В статье представлена оценка загрязняющего воздействия разливов нефтепродуктов на окружающую среду, возникающего в результате полной, а также частичной разгерметизации в процессе выгрузки железнодорожных цистерн, выполненная с применением геоинформационных систем.

Цель исследования - моделирование аварийных ситуаций, связанных с несанкционированным разливом нефтепродуктов с целью детального оценивания степени загрязняющего воздействия, оказываемого на окружающую среду.

Актуальность и научная новизна работы заключается в расчетном определении вредных и

опасных показателей, применяемые впервые для оценки негативного воздействия в рамках участка выгрузки нефтеналивных грузов.

Практическая значимость настоящей работы заключается в прогнозировании развития аварийной ситуации с привязкой к временным рамкам, результаты которого могут быть в дальнейшем учтены при планировании мероприятий по локализации и ликвидации аварий.

Ключевые слова: моделирование, прогнозирование, эксперимент, разгерметизация, безопасность, нефтепродукты, железнодорожный транспорт, вагон-цистерна.

Ссылка для цитирования:

Кузьмин О.С. Оценка загрязняющего воздействия локальных разливов нефтепродуктов на окружающую среду при их выгрузке из железнодорожного транспорта / О.С. Кузьмин, А.Н. Луценко, А.В. Каменчуков, Е.С. Куликова // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 2. – С. 25-32. doi: 10.30987/2782-5957-2025-2-25-32.

Original article

Open Access Article

ASSESSMENT OF THE POLLUTING EFFECTS OF LOCAL PETROLEUM PRODUCT SPILLS ON THE ENVIRONMENT WHEN UNLOADING OUT OF RAIL TRANSPORT

Oleg Sergeevich Kuzmin¹, Andrey Nikolaevich Lutsenko², Aleksey Viktorovich
Kamenchukov³, Elena Sergeevna Kulikova⁴✉

^{1,2} Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

^{3,4} Pacific National University, Khabarovsk, Russia

¹ readheadunit@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5301-9231>

² andyhab@mail.ru

³ 006641@pnu.edu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7997-3195>

⁴ kulikovaes@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2125-8177>

Abstract

The paper gives an assessment of the polluting effects of petroleum product spills on the environment resulting from full and partial depressurization during unloading of railway tanks, performed using geoinformation systems.

The study objective is to model emergency situations associated with an unauthorized spill of petroleum products in order to assess in detail the degree of polluting effect on the environment.

The relevance and scientific novelty of the work is in calculating harmful and dangerous indicators,

which are used for the first time to assess the negative impact within the petroleum cargo unloading area.

The practical importance of this paper is in predicting the development of an emergency situation with reference to timeframe, and its results can be further taken into account when planning measures to localize and eliminate emergencies.

Keywords: modeling, prediction, experiment, depressurization, safety, petroleum products, railway transport, tank car.

Reference for citing:

Kuzmin OS, Lutsenko AN, Kamenchukov AV, Kulikova ES. Assessment of the polluting effect of local petroleum product spills on the environment when unloading out of railway transport. *Transport Engineering*. 2025;2:25-32. doi: 10.30987/2782-5957-2025-2-25-32.

Введение

Выгрузка нефтеналивных грузов (далее ННГ) из железнодорожных цистерн, осуществляемая на специализированных эстакадах, сопряжена с рисками возникновения аварийных ситуаций, сопровождаемых высоким уровнем загрязняющего воздействия на окружающую среду.

Одной из основных причин негативного воздействия, возникающего в рамках выгрузки ННГ, являются несанкционированные разливы, происходящие в результате полной, либо частичной разгерметизации [1].

Степень загрязняющего воздействия локальных проливов нефтепродукта определяется площадью разлива, глубиной инфильтрации в почву, а также объемом утерянного нефтепродукта в результате его испарения.

Ввиду ужесточенных требований и правил промышленной безопасности, охраны труда и окружающей среды, провести натурные эксперименты на реально

действующих участках отгрузки опасных производственных объектов не представляется возможным.

В связи с этим, для определения степени загрязняющего воздействия локальных разливов нефти необходимо воспользоваться теоретическими методами, основанными на данных математических зависимостей, содержащих максимальное количество значимых переменных.

Кроме того, как отмечается в работе [2] наиболее эффективная оценка и прогнозирование развития инцидента на сегодняшний день достигается исключительно за счет использования инновационных геоинформационных систем (далее ГИС), позволяющих учитывать не только индивидуальные особенности каждой отдельно взятой местности, но и имеющие возможность интеграции расчетных параметров, а также физико-механических свойств рассматриваемых жидкостей.

Основная часть

В настоящее время существует множество подходов по определению степени загрязняющего воздействия разливов нефти и нефтепродуктов на окружающую среду.

Одним из подходов является так называемый примитивный подход, представленный в методиках [3, 4] и реализуемый путем формирования окружностей и эллипсов, размер и форма которых зависит от общего уклона рельефа. Такая грубая

оценка допустима только для объектов, для которых отсутствуют данные о цифровой модели рельефа и окружающей обстановки.

Альтернативой выступает подход, основанный на решении однокоординатных уравнений вдоль известных направлений стока, суть которого заключается в том, что для заданного источника аварии определяется траектория стекания до места локального понижения [5].

При достижении локального понижения анализируется «озеро» скопления до такого порога, при котором либо весь объем остается в локальном понижении, либо происходит дальнейший сток до следующего локального понижения, после чего процедура анализа повторяется.

При этом параллельно с расчетами потоков решается задача фильтрации и испарения эмпирическими методами.

Решение гидродинамической задачи разлива жидкости по свободной поверхности методом конечных разностей описывается через уравнение неразрывности с соответствующими начальными и граничными условиями [6].

В основе работы, используемой ГИС, лежит подход, реализуемый численными методами, который позволяет получить кинетику аварийного разлива в зависимо-

сти от градиентов местности конкретной топографии. Окончательная геометрия зоны растекания при данном подходе фиксируется при достижении нулевых градиентов разлива, т.е. при полном квазистационарном равновесии. При этом на каждом расчетном шаге параллельно рассчитываются потери на фильтрацию и испарение.

Кроме того, стоит отметить, что моделирование показателей аварийного разлива осуществляемое в используемой ГИС системе, реализовано через алгоритмы, работающие на основе интегрированных формул. Используемый алгоритм основан на решении уравнений диффузии и переноса жидкости в заданном направлении для двумерной области. Уравнение диффузии и переноса жидкости в двумерном пространстве классически описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\partial_t h + \partial_x(hu) + \partial_y(hv) &= 0 \\ \partial_x(hu) + \partial_x\left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2\right) + \partial_y(huv) + gh\partial_x z - fhv &= 0 \\ \partial_t(hv) + \partial_t(huv) + \partial_y\left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2\right) + gh\partial_y z + fhv &= 0\end{aligned}\quad (1)$$

где h – высота жидкости, м; u, v – скорость движения (м/с²) в x и y направлениях соответственно; g – ускорение свободного падения, м/с²; z – высота подстилающей поверхности, м); f – параметр Кориолиса.

$$\partial_x(hu) + \partial_x\left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2\right) + gh\partial_x z + \frac{f}{8}u|u| = 0 \quad (2)$$

где f – коэффициент трения, зависящий от шероховатости поверхности.

Для решения системы уравнений используются различные расчетные схемы. В рамках данной работы была использована усовершенствованная схема конечного объема с шахматной сеткой.

Для расчета просачивания нефтепродукта в грунт (\rightarrow_u), использовалась дифференциальная форма закона Дарси:

$$\rightarrow_u = -\frac{K}{\eta} \nabla (\rho g z + P) \quad (3)$$

где P – внешнее давление, Па; ρ – плотность нефтепродукта, кг/м³; η – динамическая вязкость нефтепродукта, Па/сек; g – ускорение свободного падения, м/сек²; z – вертикальная координата; K – коэффициент проницаемости.

При этом в рамках данной работы силы Кориолиса были игнорированы, но учтены эффекты трения по оси x , тогда

В целях учета испарения разлитого нефтепродукта использовались результаты исследований *Mackay, Shen* [7, 8], при котором скорость потери нефти на испарение определяется следующим образом:

$$F_v = \left[\ln P_0 + \ln \left(CK_E t + \frac{1}{P_0} \right) \right] / C \quad (4)$$

где $\ln P_0$ – начальное давление паров, кПа, определяемое по формуле:

$$\ln P_0 = 10,6 \left(1 - \frac{T_0}{T_E} \right) \quad (5)$$

где T_0 – начальная температура кипения, К; T_E – температура воздуха, К.

При этом значения T_0 и C из формул (4), (5) являются константами для светлых нефтепродуктов и имеют следующие значения [9]:

$$C = 1158,9 API^{-1.1435} \quad (6)$$

$$T_0 = 542,6 - 30,275 API + 1,565 API^2 - 0,03439 API^3 + 0,0002604 API^4 \quad (7)$$

где API – показатель плотности нефтепродукта, кг/м³.

Вместе с тем для учета испарения в (4) используется коэффициент испарения K_E , рассчитываемый в свою очередь по формуле:

$$K_E = K_M AV_M / (RTV_0), \quad (8)$$

где K_M – коэффициент массопередачи – $0,0025V_W^{0,78}$; V_W – скорость ветра, м/с²; A – площадь разлива, м²; R – газовая постоянная; T – температура нефтепродукта, °C; V_0 – объем пролитого нефтепродукта, м³.

Работа самого алгоритма представлена на расчетом изменения показателей растекания, испарения и впитывания нефтепродукта попеременно, то есть параметр рассчитывается отдельно в каждой зоне при условии фиксации зависимого параметра после его изменения.

В качестве объекта моделирования выбран участок выгрузки нефтеналивных грузов расположенный в Дальневосточном регионе. Источниками разлива нефтепродукта являются железнодорожные вагоны-

цистерны, размещенные на железнодорожной площадке.

Расположение объекта находится в условиях плотной производственной застройки сторонними производственными предприятиями, а также землями с густой растительностью и водными объектами.

Полотном для моделирования разлива стала цифровая модель рельефа местности, построение которой осуществлялось на основании картографических данных о местности, взятых из открытых источников. Оценка загрязнения от локальных проливов выполнялась по сценариям полной (срыв сливного устройства с патрубка сливного прибора) и частичной разгерметизации (образование зазора в соединении «сливное устройство – сливной прибор»).

Временными рамками, выбранными для оценки объемов загрязняющего воздействия аварийного разлива нефтепродуктов, стал период в 30 минут с сохранением результатов каждые 30 секунд для отслеживания динамики разлива.

Результаты

Динамики изменения габаритных параметров и массовых балансов, рассчитанные по вышеприведенному алгоритму для

сценариев полной и частичной разгерметизации представлены на рис. 1 и 2.

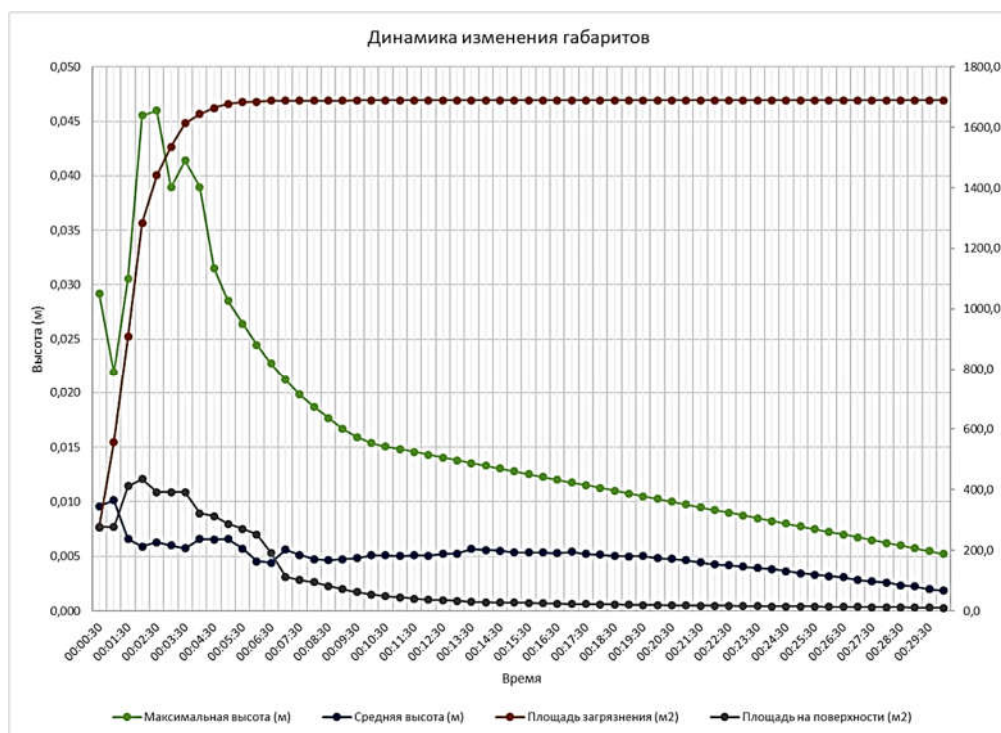


Рис. 1. Динамика изменения габаритов при полной разгерметизации
Fig.1. Dynamics of dimensional changes at full depressurisation

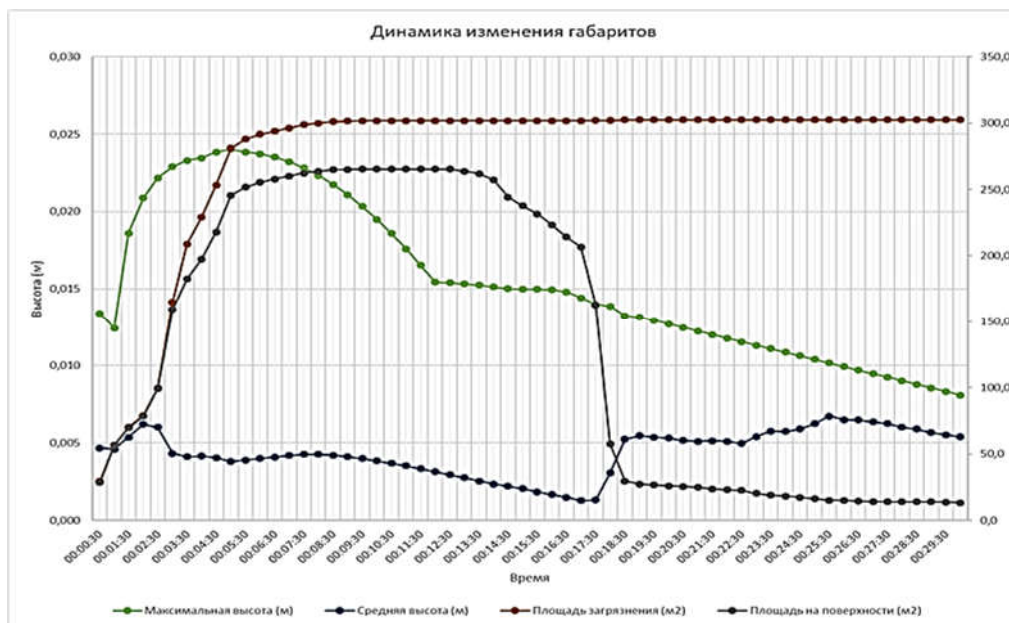


Рис. 2. Динамика изменения габаритов при частичной разгерметизации
Fig.2. Dynamics of dimensional changes at partial depressurization

Динамика массовых балансов впитывания и испарения представлены на рис. 3 и 4. В целях сравнительного анализа и представления наглядных данных максимальные значения, полученные за расчетный период, сведены в таблицу. Согласно полученным результатам исследования, негативная нагрузка по показателям площади загрязнения и массы нефтепродукта

на поверхности преобладает при полной разгерметизации сливного оборудования.

Однако, учитывая временные различия в протекании загрязняющих процессов, разлив нефтепродукта в результате частичной разгерметизации имеет наибольшие значения по впитыванию и испарению, которые выступают важными показателями при оценке загрязнения.

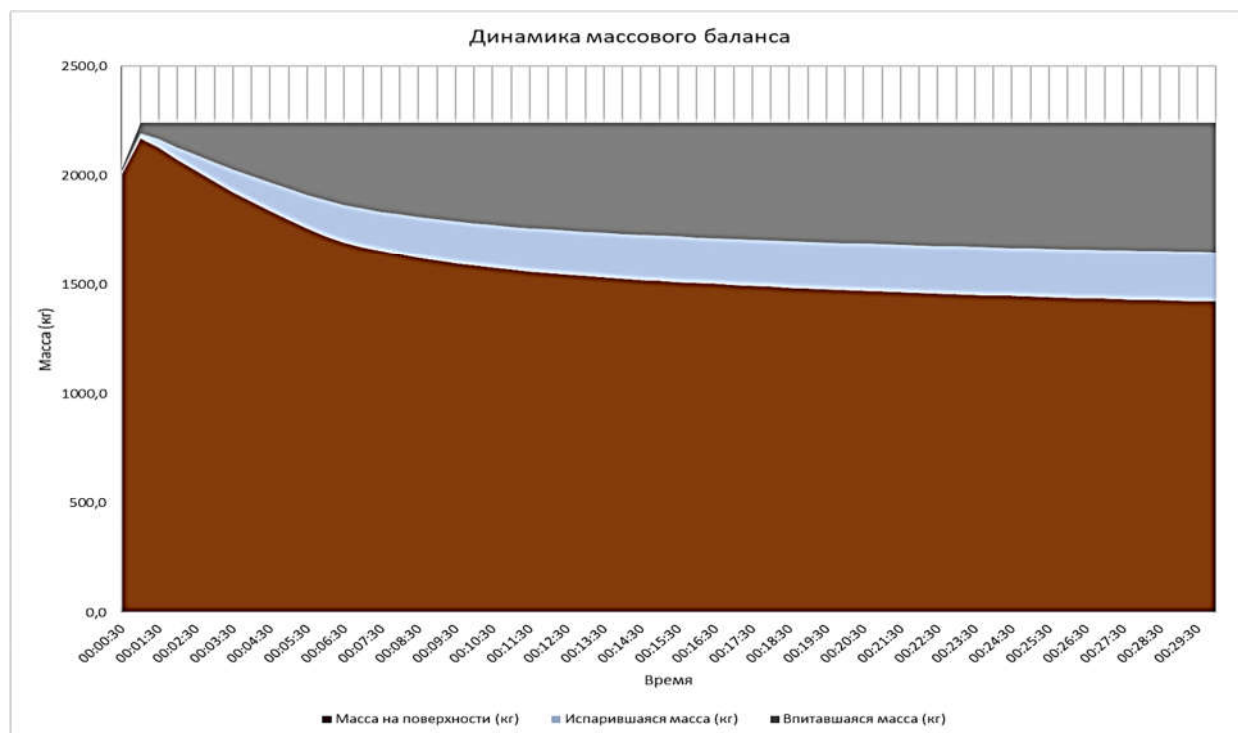


Рис. 3. Динамика массового баланса при полной разгерметизации
Fig.3. Mass balance dynamics at full depressurisation

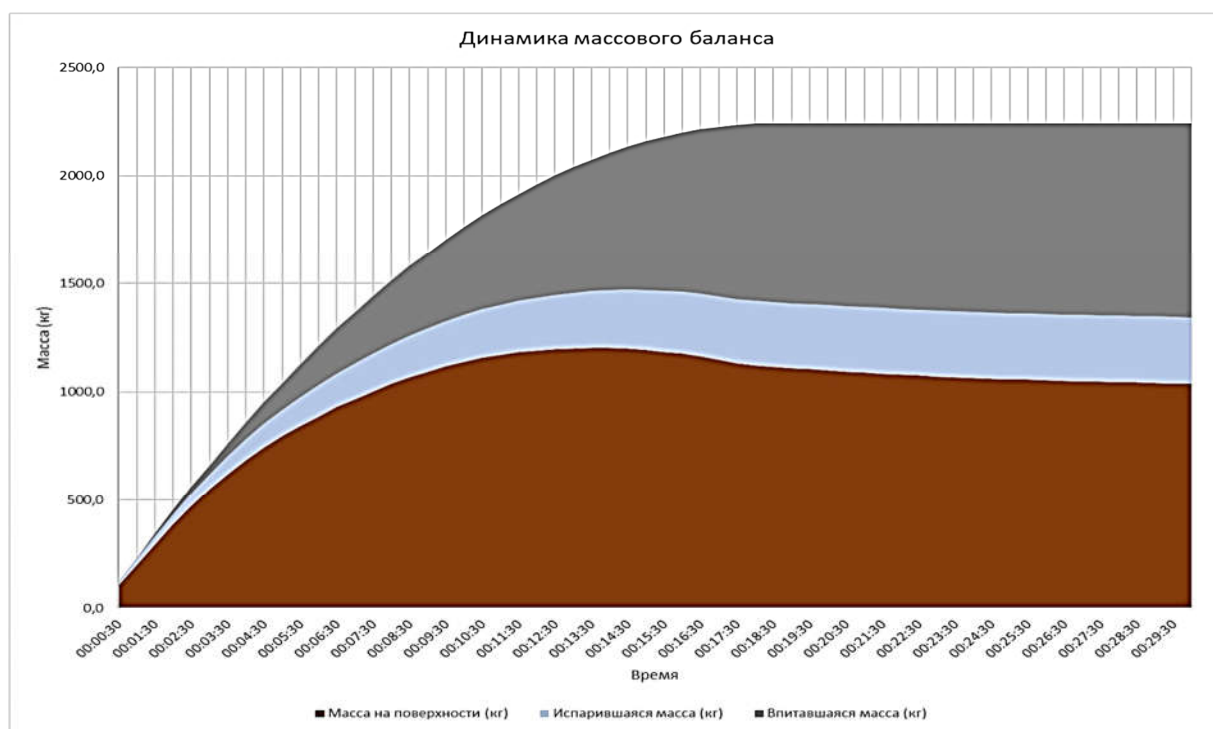


Рис. 4. Динамика массового баланса при частичной разгерметизации
Fig.4. Mass balance dynamics during partial depressurisation

Таблица

Максимальные значения негативных процессов разлива нефтепродукта

Table

Maximum values of negative petroleum product spill processes

Параметр	Полная разгерметизация		Частичная разгерметизация	
	Значение	Время достижения	Значение	Время достижения
Объем разлива, м ³				
Высота, м	0,013	14 мин. 30 сек.	0,023	3 мин. 00 сек.
Площадь загрязнения, м ²	1689	9 мин. 30 сек.	315	16 мин. 30 сек.
Площадь на поверхности, м ²	435,1	2 мин. 00 сек.	246	14 мин. 00 сек.
Масса на поверхности, кг	2023,9	2 мин. 30 сек.	1169,9	13 мин. 30 сек.
Испарившаяся масса, кг	227,4	30 минут	303,6	30 минут
Впитавшаяся масса, кг	591,8	30 минут	911,1	30 минут

Закключение

Аварийный разлив ННГ в процессе их выгрузке не только создает риски для промышленной и пожарной безопасности объекта, но и несет серьезную негативную нагрузку на состояние природной среды, сопряженной с границами производственных объектов.

Результаты моделирования несанкционированного разлива показали, что, даже несмотря на малую продолжительность протекания аварийных сценариев, каждый из них обладает серьезными негативными последствиями.

Под загрязнение попадают как грунт так и атмосфера, что свидетельствует о комплексном негативном влиянии разлива ННГ. При этом достижение пиковых значений каждого из показателей происходит за сравнительно малый промежуток времени.

Учитывая полученные результаты о степени загрязняющего воздействия, а также сроки достижения максимальных показателей, вопрос совершенствования средств организационно-технического состояния защиты этапа выгрузки ННГ на сегодняшний день остается актуальным.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. К вопросу об источниках загрязняющего воздействия отгрузки нефтепродуктов при их перевозке железнодорожным транспортом / О. С. Кузьмин, А. Н. Луценко, Е. С. Куликова, А. З. Ткаченко // Транспортное дело России. 2024. № 2. С. 237-240. – EDN IBUPGB.
2. Развитие методических основ прогнозирования разливов нефтепродуктов при железнодорожных авариях / С. Г. Аксенов, А. Н. Елизарьев, А. А. Никитин, Е. Н. Елизарьева // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2014. Т. 1, № 1(5). С. 79-83. – EDN VMDHPL.
3. РД 13-020.00-KTN-148-11. Руководящий документ. Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах и нефтепродуктопроводах.
4. Методика расчета минимальной оснащенности аварийно-спасательных служб (формирований), предназначенных для локализации и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации, на континентальном шельфе и в исключительной экономической зоне Российской Федерации.
5. Кутуков С. Е., Павлов С. В. Имитационный метод ранжирования участков трубопровода по экологической опасности аварийных разливов // Нефтегазовое дело. 2001. № 2. С. 101–110.
6. Математическое моделирование поверхностного стока и переноса загрязнений / В. Г. Гитис, Е. Н. Петрова, С. А. Пирогов, Е. Ф. Юрков // Информационные процессы. 2007. Т. 7, № 2. С. 168-182.
7. Wang, S. D., Shen, Y. M., and Zheng, Y. H. (2005). Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas. Ocean Eng. 32, 1556–1571. doi: 10.1016/j.oceaneng.2004.12.010.
8. Mackay, D., Paterson, S., Nadeau, S. 'Calculation of the evaporation rate of volatile liquids', Proceedings, National Conference on Control of Hazardous Material Spills, Louisville, Ky., 1980, pp. 364-369.
9. William, J., Odokuma, L., 'Modeling of the Physicochemical Fate of a Simulated oil spill in brackish surface water in the Niger delta, Nigeria', International journal of current research and academic review, 2014, pp. 141-152.

REFERENCES

1. Kuzmin OS, Lutsenko AN, Kulikova ES, Tkachenko AZ. On the issue of polluting effect sources of petroleum products shipment during their transportation by rail. Transport Business of Russia. 2024;2:237-240.
2. Aksekov SG, Elizaryev AN, Nikitin AA, Elizaryeva EN. Development of methodological foundations for predicting oil product spills in railway accidents. Fire Safety. 2014;1(5):79-83.
3. RD 13-020.00-KTN-148-11. Methodological guidelines for assessing the risk of accidents on main oil pipelines and oil product pipelines. Moscow; 2002.
4. Methodology for calculating the minimum strength of emergency services designed to localize and eliminate oil and petroleum product spills on the territory of the Russian Federation, on the continental shelf and in the exclusive economic zone of the Russian Federation.
5. Kutukov SE, Pavlov SV. Simulation method for ranking pipeline sections according to the environmental hazard of emergency spills. Petroleum Engineering. 2001;2:101-110.
6. Gitis VG, Petrova EN, Pirogov SA, Yurkov EF. Mathematical modeling of surface runoff and pollution transfer. Information Processes. 2007;7(2):168-182.
7. Wang SD, Shen YM, Zheng, YH Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas. Ocean Eng. 2005;32:1556–1571. doi: 10.1016/j.oceaneng.2004.12.010.
8. Mackay D, Paterson S, Nadeau S. Calculation of the evaporation rate of volatile liquids. Proceedings of National Conference on Control of Hazardous Material Spills, Louisville. 1980:364-369.
9. William J, Odokuma L. Modeling of the Physicochemical Fate of a Simulated oil spill in brackish surface water in the Niger delta. Nigeria: International journal of current research and academic review. 2014; 141-152.

Информация об авторах:

Кузьмин Олег Сергеевич – аспирант кафедры «Техносферная безопасность» тел. +79963898395, Author ID РИНЦ 1087908.

Луценко Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техносферная безопасность», Author ID РИНЦ 860647.

Каменчуков Алексей Викторович – кандидат технических наук, доцент, руководитель ВШ

«Транспортного строительства, землеустройства и геодезии», тел. + 7 924 301-93-65, SPIN-код 6183-1250, идентификатор Scopus: 57207104736.

Куликова Елена Сергеевна – старший преподаватель ВШ «Транспортного строительства, землеустройства и геодезии», тел. +79625001403, Author ID РИНЦ 222668.

Kuzmin Oleg Sergeevich – Postgraduate Student of the Department of Technosphere Safety; phone: +79963898395, Author ID RSCI 1087908.

Lutsenko Andrey Nikolaevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technosphere Safety; Author ID RSCI 860647.

Kamenchukov Aleksey Viktorovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the

Higher School of Transport Construction, Land Management and Geodesy; phone: + 7 924 301-93-65, SPIN code 6183-1250, Scopus identifier: 57207104736.

Kulikova Elena Sergeevna – Senior Lecturer at the Higher School of Transport Construction, Land Management and Geodesy; phone: +79625001403, Author ID RSCI 222668.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 04.10.2024; одобрена после рецензирования 15.01.2025; принята к публикации 30.01.2025. Рецензент – Нагоркин М.Н., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета.

The article was submitted to the editorial office on 04.10.2024; approved after review on 15.01.2025; accepted for publication on 30.01.2025. The reviewer is Nagorkin M.N., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University.

НОВАЯ СПЕЦИАЛЬНОСТЬ!

***В Брянском государственном техническом университете в 2025 году открыт приём
на новую специальность***

***23.05.03 – Подвижной состав железных дорог,
специализация «Технология производства и ремонта подвижного состава»***

Подготовка предусматривает освоения фундаментальных основ конструкции, технического обслуживания и ремонта подвижного состава железных дорог с применением предиктивной аналитики, систем искусственного интеллекта и работы с большими объемами данных. Обучение организовано в интересах крупнейших предприятий в области обслуживания и ремонта подвижного состава таких, как ООО «Локотех», ОАО «РЖД», ООО «Новая вагоно-ремонтная компания» и другие.

Начиная со второго курса обучения студентам предоставляется возможность оплачиваемой стажировки на структурных подразделениях компаний с целью приобретения практических навыков необходимых для освоения профессий технолога и инженера. В рамках освоения программы значительное внимание уделяется современным методам прогнозирования технического состояния подвижного состава, системам массового обслуживания и ремонта сложных технических систем, прогнозирования фактического состояния ответственных узлов подвижного состава и оценке рисков возникновения аварийных ситуаций.

Приобретённые по программе специалитета компетенции позволят обучающимся стать высококвалифицированными специалистами, которые смогут применить полученные знания и навыки на практике, участвуя в реализации стратегических проектов по развитию железнодорожной инфраструктуры страны.