

Гончарук І.П., Головань А.І.

ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ АВАРІЙНИХ РОЗЛИВІВ НАФТИ НА ВНУТРІШНІ ВОДНІ ШЛЯХИ: СТРАТЕГІЇ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ТА ЛІКВІДАЦІЇ ЗАБРУДНЕНЬ

Аварійні розливи нафти та нафтопродуктів на внутрішніх водних шляхах становлять значну екологічну загрозу через їхній довготривалий вплив на довкілля та складність ліквідації. У статті розглядаються основні причини та наслідки таких аварій, включаючи технічні збої, людський фактор та недостатню оперативність реагування. Проведено аналіз сучасних методів оцінки ступеня забруднення водних об'єктів, впливу фізико-хімічних властивостей нафти на екосистему та особливостей поширення нафтових плям у річкових умовах. Особлива увага приділена сучасним технологіям локалізації та ліквідації забруднень, зокрема використанню інноваційних сорбентів, механічних бар'єрів, біологічних методів та математичних моделей для прогнозування поширення нафти. Запропоновано алгоритм оперативного реагування на аварії, який базується на інтеграції новітніх ІТ-рішень для моніторингу та управління процесами ліквідації. Крім того, досліджено оптимізацію логістичних операцій для швидкого транспортування необхідного обладнання до місця аварії. Результати роботи демонструють ефективність впровадження інноваційних підходів до оцінки і ліквідації наслідків аварійних розливів, спрямованих на мінімізацію екологічної шкоди та підвищення рівня екологічної безпеки. Отримані висновки можуть стати основою для вдосконалення існуючих нормативно-правових документів і стратегій у сфері управління ризиками на внутрішніх водних шляхах. Стаття орієнтована на науковців, екологів, інженерів і спеціалістів у сфері водного транспорту.

Ключові слова: аварійні розливи нафти, внутрішні водні шляхи, екологічна безпека, локалізація забруднень, ліквідація наслідків, математичне моделювання, інноваційні технології, сорбенти, логістика, ІТ-рішення.

Постановка проблеми. Аварійні розливи нафти та нафтопродуктів на внутрішніх водних шляхах є однією з найгостріших екологічних проблем сучасності. Вони призводять до тривалого забруднення водних об'єктів, деградації екосистем, втрати біорізноманіття та значних економічних збитків. Незважаючи на розвиток технологій транспортування нафти, ризик аварій залишається високим через зношеність транспортної інфраструктури, недостатню підготовку персоналу та слабе впровадження сучасних технологій у системи реагування.

Сучасні методи ліквідації наслідків аварійних розливів часто не відповідають актуальним екологічним вимогам, що зумовлено відсутністю комплексного підходу до їх вирішення. Зокрема, існує недостатність у використанні інноваційних матеріалів, математичних моделей для прогнозування поширення забруднень і ефективних логістичних рішень для транспортування необхідного обладнання. Крім того, нормативно-правова база та координація між відповідальними структурами не завжди дозволяють швидко реагувати на екологічні загрози.

В умовах інтенсивного використання внутрішніх водних шляхів для перевезення нафтопродуктів виникає потреба в розробці нових підходів до оцінки, локалізації та ліквідації наслідків таких аварій. Дослідження цієї проблеми спрямоване на підвищення екологічної безпеки, зменшення шкоди довкіллю та забезпечення сталого розвитку водного транспорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Коли розлита нафта потрапляє у водойму, вона може швидко і широко розповсюджуватися. Це створює серйозну загрозу забруднення для

екології та прісних водних ресурсів, тим самим суттєво впливаючи на людей та інші організми. Нещодавно аварія з розливом нафти, що сталася на узбережжі Маврикія, привернула широку увагу. За повідомленнями ЗМІ, з тріснутого судна MV Wakashio, яке 25 липня 2020 року сіло на мілину біля південно-східного узбережжя Маврикія, перевозячи близько 4000 тон нафти, в Індійський океан витекло понад 1000 тон пального, внаслідок чого прилеглі коралові рифи, а також навколишні пляжі та лагуни зазнали значного забруднення. Нафтова пляма перешкоджає газообміну між водними організмами та атмосферою. Як наслідок, порушується баланс циркуляції розчинених газів у воді. Це призводить до асфіксії і загибелі водних організмів через гіпоксію; крім того, ускладнюється проникнення сонячного світла, що призводить до загибелі водних рослин.

Доля розлитої нафти у водоймі визначається складною взаємодією фізичних, хімічних і біологічних процесів, на які впливають динамічні фактори, такі як вітер, хвилі і течії, а також нединамічні фактори навколишнього середовища, такі як властивості нафти. Фізичні процеси в першу чергу включають дифузію, дрейф, випаровування, емульгування, розчинення, диспергування, седиментацію і адсорбцію на березі. Хімічні процеси в першу чергу відносяться до процесу фотоокислення нафтового розливу. Біологічні процеси в першу чергу стосуються процесів біологічного розкладання на пізніх стадіях розливу нафти. Однак для внутрішніх водних шляхів, через відносно вузьку ширину річки і значний вплив швидкості течії, основна увага приділяється впливу нафтових розливів і надзвичайних заходів у короткостроковій перспективі.

Моделювання нафтових розливів має фундаментальне значення для реагування та пом'якшення наслідків фактичних розливів. Прогнозуючи дрейф нафти, модельні інструменти дозволяють більш ефективно використовувати ресурси реагування на надзвичайні ситуації [1]. На сьогодні розроблено різні чисельні моделі для моделювання транспортування та долі нафтових розливів, більшість з яких базуються на морському середовищі, зосереджуючись, насамперед, на таких факторах, як вітер, хвилі та течії. Блоккер (1964) створив модель нафтового розливу на ранній стадії на основі нафти на вільній поверхні і розглянув стадію інерційної дифузії нафтової плями під дією сили тяжіння, нехтуючи впливом поверхневого натягу і в'язкої сили. Тим часом Фей запропонував іншу модель нафти, в якій процес розповсюдження нафтової плями поділяється на три стадії: гравітаційно-інерційну, гравітаційно-в'язку та стадію поверхневого натягу і в'язкої сили. Однак ця модель може бути застосована лише тоді, коли поверхня води спокійна. У 1980-х роках була розроблена модель частинок нафти (JOHANSEN, 1984), в якій дрейф нафтових плям можна розглядати як лагранжевий рух групи частинок під дією турбулентності, що реалізується випадковим рухом частинок нафти. З того часу багато вчених вдосконалювали та оптимізували модель, враховуючи вплив вітру, течії, вивітрювання та інших факторів. Згодом було розроблено багато нових моделей розливу нафти [2]. Ці моделі були застосовані до конкретних регіонів або подій, таких як розлив нафти в Монтарі, що стався в Індонезії восени 2009 року, зіткнення і витік, спричинені нафтовим танкером Sanchi під панамським прапором, що належить Ірану, 6 січня 2018 року [3], а також розлив нафти в Уліссі-Вірджинія, що стався 7 жовтня 2018 року [4].

Хоча аварії, пов'язані з витоком нафти в морському середовищі, більше висвітлюються і розслідуються, розливи нафти частіше трапляються на внутрішніх територіях, ніж у морському середовищі [5]. Однак дослідження, що стосуються розливів нафти у внутрішніх річках, обмежені; це пов'язано з відносно невеликою кількістю витоків нафти порівняно з океанічними нафтовими аваріями. Завдяки нещодавньому будівництву і введенню в експлуатацію низки мега-водосховищ у Китаї, умови судноплавства на внутрішніх водних шляхах значно покращилися. Кількість великотоннажних суден і танкерів значно зросла, що призвело до збільшення ризику аварій з витоком нафти [6]. Тому дослідження щодо поширення і дрейфу нафтових плям у внутрішніх водних шляхах необхідно проводити терміново, щоб ефективно підтримувати запобігання і ліквідацію аварійних розливів нафти. Морфологія та умови течії внутрішніх річок відрізняються

від океанічних. Внутрішні річки характеризуються меншою шириною, відносно односпрямованою течією і значними коливаннями глибини води [7]. Крім того, траєкторія дрейфу нафтових плям у внутрішніх річках в основному контролюється конвекцією потоку і вітром [8]. Точність прогнозування дисперсії розливої нафти суттєво залежить від змодельованих динамічних параметрів річкового середовища. Чжан та ін. (2011) оптимізували гідродинамічну модель за допомогою методу розпаралелювання в поєднанні з моделлю частинок нафти; згодом вони побудували модель, придатну для траєкторій нафти в районі водосховища «Три ущелини» (TGR). Фінгас (2017) представив моделювання нафтових розливів і узагальнив відомі прогнози важливих процесів, таких як випаровування, емульгування води в нафті, природна дисперсія і розчинення. Япа та ін. розробили загальну модельну оболонку ROSS3 для моделювання нафтових розливів у складних річково-озерних системах.

Для перевірки надійності моделей нафтових розливів слід використовувати дані спостережень за розливом нафти [9] тим не менш, дані про аварії, пов'язані з розливами нафти, важко отримати. Крім того, через надзвичайну складність моніторингу нафтових розливів існують невизначеності в інформації про витік, включаючи кількість нафти, що залишилася, швидкість витоку, діаметр тріщини, геометрію та інші параметри, що використовуються в моделі нафтового розливу [10], що може спричинити відхилення в результатах верифікації.

Мета дослідження є розробка та вдосконалення сучасних методів оцінки впливу аварійних розливів нафти на внутрішні водні шляхи, а також створення ефективних технологій локалізації та ліквідації забруднень з використанням інноваційних матеріалів, математичних моделей і оптимізованих логістичних рішень для мінімізації екологічної шкоди та підвищення екологічної безпеки.

Основні результати дослідження. Першим етапом, що визначає всі подальші дії, є збір інформації та оцінка отриманих даних. Збір інформації полягає в одержанні даних, які необхідні для прогнозу подальшого розвитку ситуації за рахунок фізико-математичних моделей, що імітують поведінку шару розливої на водній поверхні нафти та дозволяють прогнозувати його переміщення під дією різних факторів.

На початковому етапі збирання та передачі інформації, контроль за обстановкою аварії здійснює екіпаж судна. Капітан судна повідомляє про масштаб аварії (обсяг нафтопродуктів, що вилилися, розміри пробоїни, площа нафтозабрудненої акваторії, швидкість течії в руслі, кліматичні умови на ділянці річки) і одночасно дає накази членам екіпажу на виконання робіт з локалізації розливу та запобігання можливості виникнення пожежі.

Після отримання всіх необхідних даних проводиться розрахунок, що дозволяє прогнозувати подальше поширення плями нафтопродуктів. Оцінити траєкторію руху нафтової плями з урахуванням всіх чинників допомагають комп'ютерні програми, розроблені з урахуванням математичних моделей.

Згідно з розробленою методикою для проведення оцінки траєкторії руху нафтової плями використовується модель поширення та трансформації нафтового розливу, розроблена Павловим А.А. і попередньо доповнена розширеним рядом характеристик, що спочатку використовуються. Модель доповнена введенням характеристик швидкості та напрямку вітру, а також фактором, що враховує нарощування площі забруднення, що залежить від інтенсивності витіку нафти та нафтопродуктів із пробоїни. Для встановлення впливу швидкості та напрямку вітру використовується векторний вираз. Для визначення інтенсивності витіку нафтопродуктів із пробоїни судна, використовується розроблена методика, що дозволяє більш точно встановити площу забруднення, її збільшення з часом, а також дати більш достовірний розрахунок подальшого поширення плями нафтопродуктів. В якості методики визначення витрати нафтопродукту нафтоналивного судна, що витікає з пробоїни, представлений алгоритм,

розроблений на основі натурних досліджень і лабораторних експериментів, і що складається з п'яти етапів:

1. На першому етапі екіпажем судна визначається форма отриманої пробоїни та вимірюються її розміри (довжина, ширина, площа). Встановлюється поточний рівень нафтопродуктів у танку та рівень положення пробоїни щодо поверхні води. Після збору всієї необхідної інформації дані передаються диспетчеру району водних шляхів і судноплавства.

2. За отриманими даними, встановлюється тип пробоїни: малі $a < 0,1H$; великі $a > 0,1H$, де a – висота отвору в см; H – тиск, при якому відбувається витік.

3. За прийнятим типом пробоїни та здійсненими вимірами, а також відповідно до відношення площі пробоїни до квадрата напору над його центром (ω/H^2) , визначається коефіцієнт μ . Коефіцієнт витрати встановлюється за графіками отриманими в результаті досліджень або залежностями апроксимованими степеневими функціями для великих (Рис. 1, $\mu = 0.110569 \cdot (\omega/H^2)^{-0.303197}$) та малих (Рис. 2, $\mu = 0.466883 \cdot (\omega/H^2)^{-0.122531}$) пробоїн.

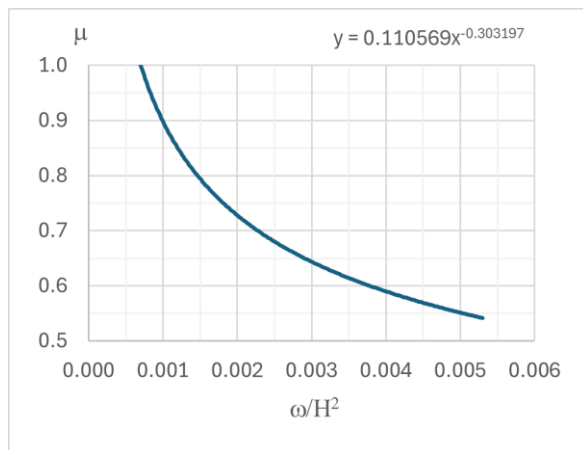


Рисунок 1 – Графік функції $\mu = f(\frac{\omega}{H^2})$ для великих пробоїн

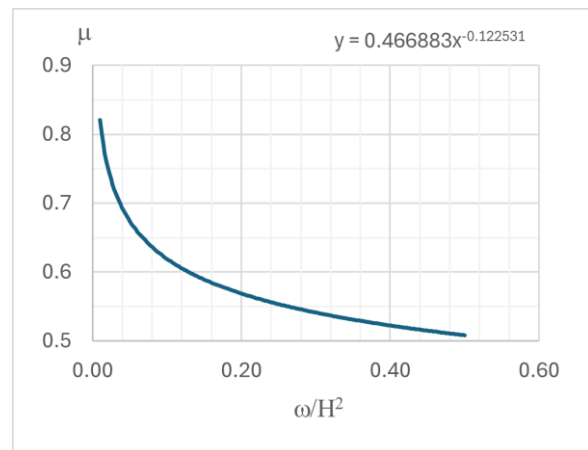


Рисунок 2 – Графік функції $\mu = f(\frac{\omega}{H^2})$ для малих пробоїн

4. Відповідно до марки нафти, що транспортується, або типу нафтопродукту та його в'язкості ρ , визначається поправочний коефіцієнт k . Даний коефіцієнт встановлюється за графіком, отриманим в результаті лабораторних досліджень у галузі вивчення впливу в'язкості нафти або нафтопродукту на швидкість його закінчення з отриманої пробоїни (Рис. 3 $K = 1.014766 \cdot \rho^{-0.195926}$).

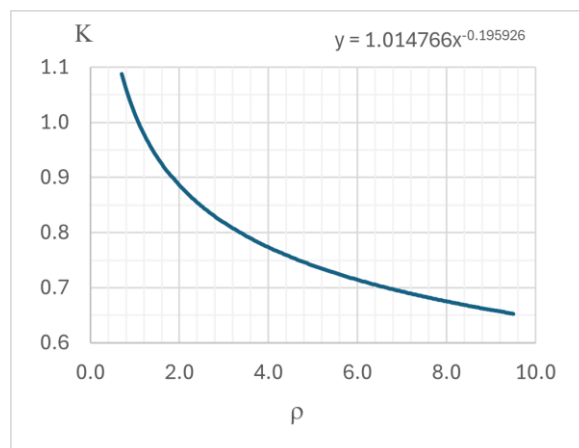


Рисунок – 3. Графік залежності коефіцієнта k від в'язкості ρ , що транспортується нафтопродукту

5. Після того, як всі необхідні коефіцієнти встановлені, проводиться розрахунок витрати нафтопродукту з отриманої пробоїни. Нижче наведені формули, що дозволяють визначити витрату нафтопродукту при незатопленому (1) та затопленому отворі (2):

$$Q = \mu \varpi k \sqrt{2gh_c} \quad (1)$$

де h_c - різниця рівнів нафтопродукту та заборотної води

$$Q = \mu \varpi k \sqrt{2gZ_c} \quad (2)$$

Відповідно до нормативних документів, після збору всієї необхідної інформації та оцінки ситуації, що склалася, проводяться роботи з підготовки оперативного плану, що включає в себе вибір відповідної техніки, методу і тактики застосування розробленої стратегії. Далі після уточнення обстановки на місці аварії, аварійно-рятувальним формуванням, здійснюються роботи з локалізації та ліквідації нафтового розливу.

Локалізація та ліквідація розливів нафти та нафтових продуктів має виконуватися багатофункціональним комплексом завдань з використанням технічних засобів та реалізацією різних методів.

Першочергові заходи прямують на локалізацію нафтових плям, щоб уникнути подальшого поширення та забруднення сусідніх ділянок, захистити природні багатства та ресурси акваторії, а також зменшення забруднених площ. Локалізація являє собою процес, що включає відповідні стадії кожної стратегії реагування, методу або технології.

Після того, як нафту, що розлилася, вдається локалізувати і сконцентрувати, наступним етапом є її ліквідація. Методи ліквідації аварійних розливів нафти дуже різноманітні. Вирішальними чинниками під час виборів найбільш відповідного є час, масштаби екологічної загрози і величина розливу.

Після того, як нафтовий розлив вдалося ліквідувати, проводяться роботи з утилізації нафти або нафтопродукту за умови проведення механічного збору. Одночасно проводяться роботи з очищення берегів, якщо при поширенні плями були забруднені ділянки берегової лінії.

Висновки. У результаті дослідження розроблено комплексну методику оцінки впливу аварійних розливів нафти на внутрішніх водних шляхах, яка включає використання математичних моделей для прогнозування поширення нафтових плям, алгоритмів локалізації та ліквідації забруднень, а також оптимізованих логістичних рішень. Запропонований підхід забезпечує оперативність реагування та мінімізацію екологічних збитків. Особливу увагу приділено інтеграції сучасних технологій, таких як інноваційні сорбенти, механічні бар'єри, біологічні методи та IT-рішення, що підвищує ефективність ліквідації розливів. Отримані результати також сприяють підвищенню координації між відповідальними структурами і вдосконаленню нормативно-правового регулювання у сфері управління ризиками на внутрішніх водних шляхах. Практичне значення дослідження полягає в створенні універсального алгоритму реагування на аварійні ситуації, який може бути адаптований до специфіки різних водних об'єктів. Запропоновані рішення сприятимуть збереженню природних ресурсів, підвищенню рівня екологічної безпеки та скороченню витрат на ліквідацію наслідків розливів. Напрямами подальших досліджень є вдосконалення математичних моделей для прогнозування довготривалих наслідків розливів, розробка нових матеріалів для збору нафти та інтеграція автоматизованих систем моніторингу у комплексну стратегію управління екологічними ризиками. Це дозволить ще більше підвищити ефективність заходів із запобігання та ліквідації аварійних розливів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Al-Majed, A. A., Adebayo, A. R., & Hossain, M. E. (2012). A sustainable approach to controlling oil spills. *Journal of Environmental Management*, 113, 213–227. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.07.034>
2. Alves, T. M., Kokinou, E., Zodiatis, G., Lardner, R., Panagiotakis, C., & Radhakrishnan, H. (2015). Modelling of oil spills in confined maritime basins: The case for early response in the Eastern Mediterranean Sea. *Environmental Pollution*, 206, 390–399. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.07.042>
3. Fingas, M. (2016). Introduction to spill modeling. In Elsevier eBooks (pp. 419–453). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809413-6.00008-4>
4. Liubartseva, S., De Dominicis, M., Oddo, P., Coppini, G., Pinardi, N., & Greggio, N. (2014). Oil spill hazard from dispersal of oil along shipping lanes in the Southern Adriatic and Northern Ionian Seas. *Marine Pollution Bulletin*, 90(1–2), 259–272. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.10.039>
5. Liubartseva, S., Smaoui, M., Coppini, G., Gonzalez, G., Lecci, R., Creti, S., & Federico, I. (2020). Model-based reconstruction of the Ulysse-Virginia oil spill, October–November 2018. *Marine Pollution Bulletin*, 154, 111002. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111002>
6. Nordam, T., Litzler, E., Skancke, J., Singsaas, I., Leirvik, F., & Johansen, Ø. (2020). Modelling of oil thickness in the presence of an ice edge. *Marine Pollution Bulletin*, 156, 111229. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111229>
7. Periañez, R. (2020). A Lagrangian oil spill transport model for the Red Sea. *Ocean Engineering*, 217, 107953. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107953>
8. Qiao, F., Wang, G., Yin, L., Zeng, K., Zhang, Y., Zhang, M., Xiao, B., Jiang, S., Chen, H., & Chen, G. (2019). Modelling oil trajectories and potentially contaminated areas from the Sanchi oil spill. *The Science of the Total Environment*, 685, 856–866. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.255>
9. Rojas-Alva, U., Fritt-Rasmussen, J., & Jomaas, G. (2020). Experimental study of thickening effectiveness of two herders for in-situ burning of crude oils on water. *Cold Regions Science and Technology*, 175, 103083. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103083>
10. Simecek-Beatty, D. (2010). Oil spill trajectory forecasting uncertainty and emergency response. In Elsevier eBooks (pp. 275–299). <https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-943-0.10011-5>

REFERENCES

1. Al-Majed, A. A., Adebayo, A. R., & Hossain, M. E. (2012). A sustainable approach to controlling oil spills. *Journal of Environmental Management*, 113, 213–227. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.07.034>
2. Alves, T. M., Kokinou, E., Zodiatis, G., Lardner, R., Panagiotakis, C., & Radhakrishnan, H. (2015). Modelling of oil spills in confined maritime basins: The case for early response in the Eastern Mediterranean Sea. *Environmental Pollution*, 206, 390–399. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.07.042>
3. Fingas, M. (2016). Introduction to spill modeling. In Elsevier eBooks (pp. 419–453). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809413-6.00008-4>
4. Liubartseva, S., De Dominicis, M., Oddo, P., Coppini, G., Pinardi, N., & Greggio, N. (2014). Oil spill hazard from dispersal of oil along shipping lanes in the Southern Adriatic and Northern Ionian Seas. *Marine Pollution Bulletin*, 90(1–2), 259–272. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.10.039>
5. Liubartseva, S., Smaoui, M., Coppini, G., Gonzalez, G., Lecci, R., Creti, S., & Federico, I. (2020). Model-based reconstruction of the Ulysse-Virginia oil spill, October–November 2018. *Marine Pollution Bulletin*, 154, 111002. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111002>
6. Nordam, T., Litzler, E., Skancke, J., Singsaas, I., Leirvik, F., & Johansen, Ø. (2020). Modelling of oil thickness in the presence of an ice edge. *Marine Pollution Bulletin*, 156, 111229. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111229>
7. Periañez, R. (2020). A Lagrangian oil spill transport model for the Red Sea. *Ocean Engineering*, 217, 107953. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107953>

8. Qiao, F., Wang, G., Yin, L., Zeng, K., Zhang, Y., Zhang, M., Xiao, B., Jiang, S., Chen, H., & Chen, G. (2019). Modelling oil trajectories and potentially contaminated areas from the Sanchi oil spill. *The Science of the Total Environment*, 685, 856–866. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.255>
9. Rojas-Alva, U., Fritt-Rasmussen, J., & Jomaas, G. (2020). Experimental study of thickening effectiveness of two herders for in-situ burning of crude oils on water. *Cold Regions Science and Technology*, 175, 103083. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103083>
10. Simecek-Beatty, D. (2010). Oil spill trajectory forecasting uncertainty and emergency response. In Elsevier eBooks (pp. 275–299). <https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-943-0.10011-5>

I.P. Honcharuk, A.I. Golovan

REDUCING THE IMPACT OF OIL SPILLS ON INLAND WATERWAYS: STRATEGIES FOR LOCALIZATION AND ELIMINATION OF POLLUTION

Accidental spills of oil and oil products on inland waterways pose a significant environmental threat due to their long-term environmental impact and the complexity of their cleanup. The article discusses the main causes and consequences of such accidents, including technical failures, human factors, and insufficient response time. The author analyzes modern methods of assessing the degree of pollution of water bodies, the impact of physical and chemical properties of oil on the ecosystem and the peculiarities of oil slicks spreading in riverine conditions. Particular attention is paid to modern technologies for localization and elimination of pollution, including the use of innovative sorbents, mechanical barriers, biological methods and mathematical models for predicting the spread of oil. An algorithm for rapid response to accidents is proposed, based on the integration of the latest IT solutions for monitoring and managing the liquidation processes. In addition, the optimization of logistics operations for the rapid transportation of the necessary equipment to the accident site was investigated. The results of the study demonstrate the effectiveness of implementing innovative approaches to assessing and eliminating the consequences of emergency spills aimed at minimizing environmental damage and improving environmental safety. The findings can serve as a basis for improving existing regulations and strategies in the field of risk management on inland waterways. The article is aimed at scientists, ecologists, engineers and specialists in the field of water transport.

Keywords: emergency oil spills, inland waterways, environmental safety, pollution localization, consequence management, mathematical modeling, innovative technologies, sorbents, logistics, IT solutions.