



УДК 502.56/.56

МРНТИ 87.15.17

DOI 10.37238/2960-1371.2960-138X.2026.102(2).48

¹Сырлыбеккызы С., ¹Нұрмаганбет Е.Т., ¹Серикбаева А.К., ¹Джумашева К.А.*,
¹Аманкешулы Д., ²Дедова Т.В., ²Искаков Б.А., ²Мерекеев А.

¹НАО «Каспийский университет технологии и инжиниринга им. Ш. Есенова»
Актау, Казахстан

²ТОО «Институт ионосферы», Алматы, Казахстан

*Автор-корреспондент: kamshat.jumasheva@yu.edu.kz

E-mail: samal.syrlybekkyzy@yu.edu.kz, yermek.nurmaganbet@yu.edu.kz,
akmaral.serikbayeva@yu.edu.kz, kamshat.jumasheva@yu.edu.kz,
dastan.amankeshuly@yu.edu.kz, dedova@ionos.kz, berikiskakov@gmail.com,
aibek.merekeyev@ionos.kz

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ЧАСТОТЫ И ОБЪЕМА РАЗЛИВОВ НЕФТЕЙ И ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Аннотация. Произведен анализ частоты разлив нефти и нефтяных отходов на территории Каспийского моря за последние 50-55 лет, с применением спутникового мониторинга. Результаты многочисленных исследований указывают, что причиной разливов нефти является изношенность и коррозия нефтяных трубопроводов. Согласно исследованию, проведенному в статье, в Каспийском море наблюдаются также как антропогенные, так и естественные разливы нефти. В статье указаны потенциально опасные последствия утечек сероводорода (H_2S), в черте Казахстанского сектора Каспийского моря. Подчеркивается, что загрязнение воды и воздуха в результате таких утечек может привести к гибели морских организмов, снижению биоразнообразия и разрушению экосистем. Особое внимание уделяется уязвимости Каспийского моря, экосистема которого и так подвержена давлению из-за промышленной деятельности. Отмечается, что утечки H_2S способны нарушить воспроизводство рыбы, нанести ущерб рыболовству и негативно повлиять на здоровье людей, живущих вблизи месторождений. Присутствует необходимость применения устойчивых инженерных решений и материалов, используемые для обеспечения безопасности и долговечности трубопроводов на месторождении Кашаган, характеризующимся экстремальными условиями эксплуатации (агрессивная среда, высокая концентрация сероводорода и углекислого газа, высокие давления). Ключевым решением является использование биметаллических труб с коррозионностойким внутренним слоем, а также композитных материалов для повышения устойчивости к коррозии. Особое внимание уделяется технологиям сварки, предотвращающим образование микротрещин, и термообработке труб для устранения остаточных напряжений. Подчеркивается применение инновационных методов мониторинга и диагностики состояния инфраструктуры, включая системы дистанционного мониторинга и автоматизированные системы управления, для обеспечения безопасности и минимизации рисков утечек.

Ключевые слова: разливы нефти, спутниковый мониторинг, Каспийское море, антикоррозионные материалы, климатические условия.



Введение

Сбор данных об исторических случаях разливов нефти: исторические данные о разливах, информация о типах разлитой нефти, метеорологические условия в моменты разливов и экологические последствия.

Международная обстановка по разливам нефти в мировых океанах. Международная федерация владельцев танкеров по предотвращению загрязнений (International Tanker Owners Pollution Federation, ITOPF) ведет базу данных по разливам нефти, включая инциденты с танкерами, комбинированными судами и баржами. ITOPF является некоммерческой организацией, оказывающей техническую помощь в ликвидации разливов нефти и химических веществ с судов. В базе содержатся сведения об аварийных разливах углеводородных нефтей с 1970 года (за исключением случаев, вызванных военными действиями), включая данные о местоположении и причине происшествия, типе разлитой нефти, объеме разлива и задействованном судне. Традиционно разливы классифицируются по объему на три категории: менее 7 тонн, от 7 до 700 тонн и более 700 тонн (соответственно, <50 баррелей, 50–5000 баррелей, >5000 баррелей), хотя также указывается точный объем утечки. На сегодняшний день база содержит информацию о более чем 10 000 инцидентах, большая часть которых относится к категории <7 тонн [1].

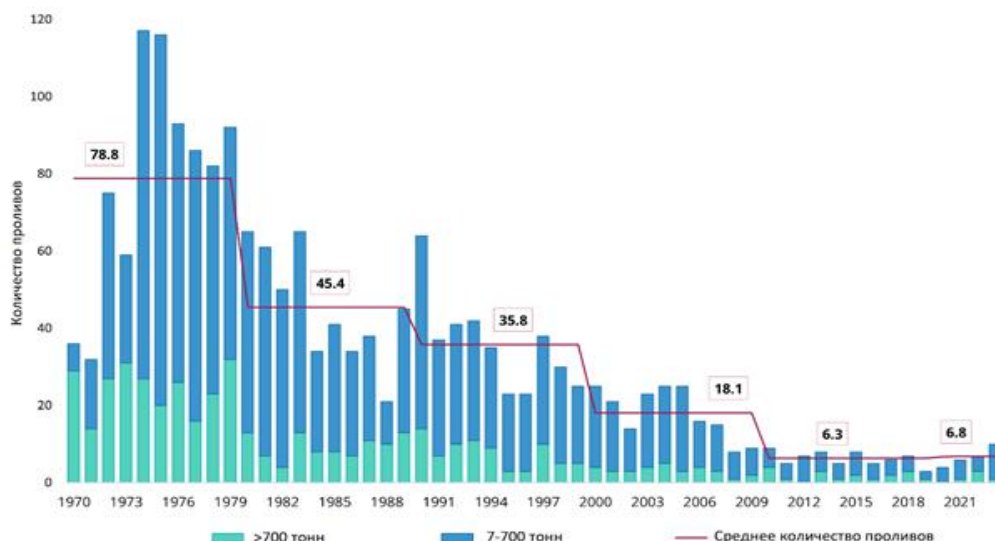


Рисунок 1 - Число средних (7–700 тонн) и крупных (>700 тонн) разливов с танкеров, 1970–2023 гг (взято из <https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/statistics/>) [2]

Данные собираются из публикаций судоходной прессы и других специализированных источников, а также от владельцев судов, их страховщиков и на основании собственного опыта ITOPF при ликвидации инцидентов. Исторически публикации охватывали преимущественно крупные разливы, часто вызванные столкновениями, посадкой на мель, структурными повреждениями, пожарами или взрывами. Однако за последние десятилетия улучшилась отчетность и о малых разливах нефти [3].

Для оценки частоты возникновения разливов нефти в работе [4] дано определение частоты разливов. Где частота разливов нефти, основанная на исторических данных о случаях утечек и объемах добытой и транспортируемой нефти, представлена в виде среднего количества разливов на каждый миллиард баррелей обработанной нефти. Учитываются только крупные разливы объемом от 1000 баррелей, так как более мелкие



утечки могут не сохраняться достаточно долго для моделирования траектории их распространения. Кроме того, крупные разливы чаще всего проще обнаружить и зафиксировать, поэтому данные по ним более полные и достоверные по сравнению с данными о небольших разливах.

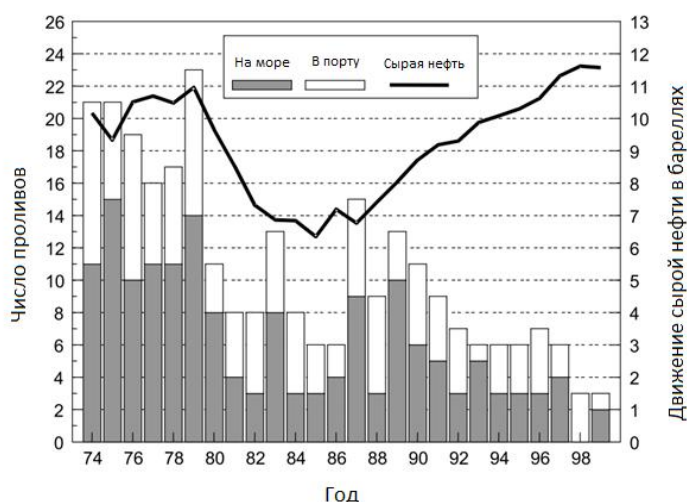


Рисунок 2 - Количество разливов нефти из танкеров по всему миру, превышающее или равное 1000 баррелям, по сравнению с мировым движением сырой нефти в 1974-1999 годах [5]

Экологическая обстановка, связанная с нефтяными разливами на Каспии, представляет серьёзную угрозу для морской среды. Ретроспективный анализ инцидентов свидетельствует о высоком уровне экологической нагрузки, обусловленной нефтедобывающей и транспортной деятельностью в регионе. Особую озабоченность вызывает ситуация в туркменском секторе моря — в районе Туркменбаши, где систематически фиксировались случаи загрязнения акватории нефтепродуктами. Результаты дистанционного зондирования Земли за период с 2003 по 2012 год показали, что ежегодно на поверхности моря обнаруживалось от 43 до 64 нефтяных пятен, источниками которых являлись как устаревшие, так и современные нефтепромысловые объекты, связанные с эксплуатацией нефтепровода Баку–Тбилиси–Джейхан. Помимо этого, существенный вклад в загрязнение вносили морские и сухопутные транспортные коридоры, что в совокупности оказывало деградирующее воздействие на экосистему Каспийского моря [6].

Материалы и методы

Комплексное применение методов спутникового мониторинга и математического моделирования распространения нефтяных загрязнений позволило сформировать обширную базу данных о состоянии Каспийского моря. Анализ полученных материалов свидетельствует о том, что основными источниками загрязнения акватории выступают эксплуатационная деятельность морских добывающих платформ и судоходство, а также природные процессы — сипы углеводородов через тектонические разломы на дне моря. Данные дистанционного зондирования фиксируют устойчивое присутствие нефтяных плёнок на водной поверхности, наиболее выраженное в центральном и южном секторах моря, где интенсивная нефтедобыча в сочетании с гидродинамическим воздействием морских течений и господствующих ветров создаёт условия для широкого распространения углеводородного загрязнения [7].

В исследовании [8] была проведена оценка информативности оптических спутниковых снимков для целей обнаружения нефтяных разливов, а также их



практическое тестирование при составлении карт зон с повышенной частотой загрязнений за годовой период. В качестве полигона исследования был выбран акваториальный район Каспийского моря, прилегающий к Апшеронскому полуострову — одной из наиболее нефтезагрязнённых зон моря, что обусловлено высокой концентрацией нефтедобывающих объектов, в том числе месторождений Посёлок нефтяников, Чилор и остров Пираллахи. Характерной особенностью нефтяных плёнок в данном районе является их визуальная различимость в видимом диапазоне электромагнитного спектра: разливы, как правило, проявляются в виде серебристо-голубоватых плёнок, что свидетельствует об их незначительной толщине. Методическую основу работы составили мультиспектральные снимки спутника Sentinel-2 в сочетании с объектно-ориентированным подходом к сегментации и классификации изображений. По результатам выявления нефтяных пятен на разновременных снимках и последующего ГИС-анализа методом пространственного наложения была сформирована карта зон с высокой повторяемостью нефтяных разливов за 2019 год. На рисунке 2 представлены результаты работы [9], отражающие пространственное распределение частоты нефтяных разливов в указанный период.

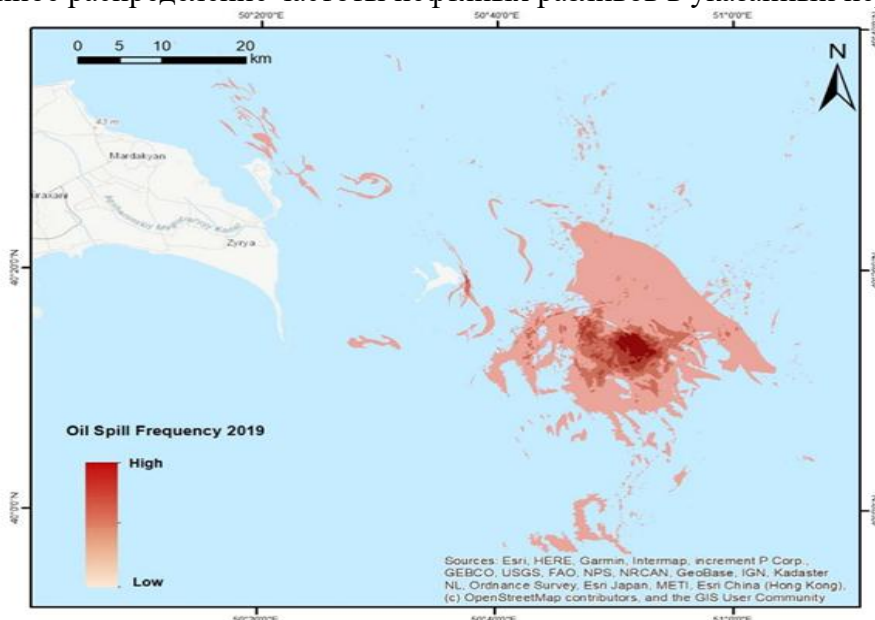


Рисунок 3 - Частота разливов нефти красным (темнее означает чаще) [10]

В рамках рассматриваемого исследования установлено, что нефтяное загрязнение Каспийского моря имеет двойственную природу — как техногенного, так и естественного происхождения. В ходе работы был проведён анализ 411 спутниковых изображений, охватывающих временной интервал с 1996 по 2017 год, по результатам которого определены ключевые очаги нефтяного загрязнения — так называемые «горячие точки». К таковым относятся акватории в районе посёлка Нефтяные Скалы, а также островов Чилор и Пираллахи (Рисунок 3). Данные объекты представляют собой старейшие нефтепромысловые сооружения Каспийского региона и отличаются критически высокой интенсивностью нефтяных утечек, достигающей 1264 м³ в сутки, что свидетельствует о значительной степени износа инфраструктуры и необходимости проведения неотложных природоохранных мероприятий.

Региональная специфика Каспийского бассейна определяет необходимость проведения специализированных исследований, адаптированных к условиям



казахстанского сектора Каспийского моря (КСКМ). Отличительной чертой данного района является сезонное ледообразование в зимний период, которое существенно ограничивает применимость стандартных технологий ликвидации нефтяных разливов. В условиях низких температур скорость испарения нефтепродуктов резко снижается, вследствие чего загрязняющие вещества сохраняются на поверхности акватории значительно дольше либо оказываются инкорпорированными в ледяной покров, что многократно усложняет их локализацию и сбор. Совокупность указанных факторов обуславливает актуальность разработки принципиально новых методов и технологий реагирования на нефтяные разливы в ледовых условиях КСКМ [11].

Анализ производственной деятельности компании «КазМунайГаз» (КМГ) показывает, что преобладающей причиной нефтяных разливов в казахстанском секторе является коррозионное разрушение трубопроводной инфраструктуры. В целях снижения аварийности компания реализует комплекс системных мер, включающих своевременную диагностику и мониторинг технического состояния трубопроводов, проведение реконструкции и замены изношенных участков, оперативную блокировку повреждённых секций и ликвидацию последствий утечек, что в совокупности обеспечивает повышение надёжности и безопасности трубопроводной системы.

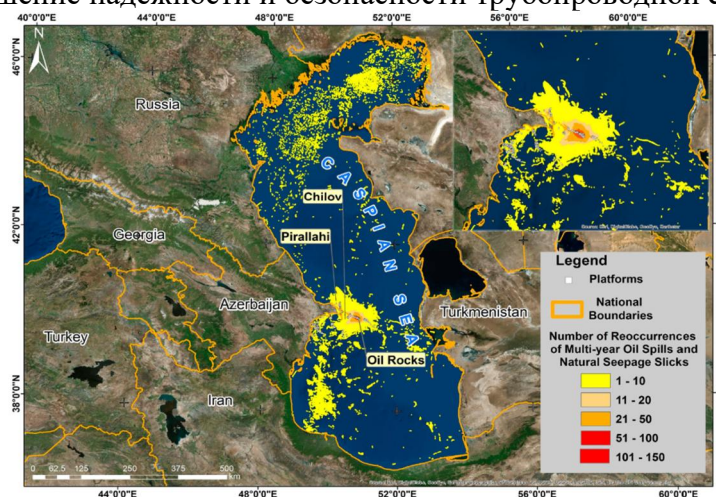


Рисунок 4 - Временная повторяемость (частота) разливов нефти и природных утечек в Каспийском море [12]

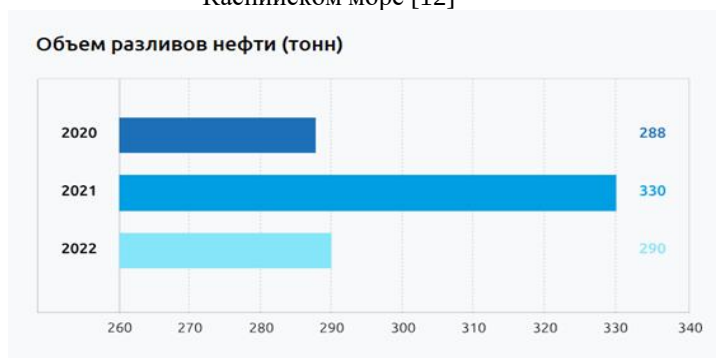


Рисунок 5 - Объем разливов нефти по годам в казахстанском секторе Каспийского моря (взято из <https://www.kmg.kz/>) [13]

Благодаря скоординированному взаимодействию с правоохранительными органами компании «КазТрансОйл» удалось полностью исключить случаи несанкционированных врезок в трубопроводную систему. Если в 2019 году было зафиксировано два подобных инцидента, повлёкших материальный ущерб в размере 6,4



млн тенге, то в период с 2020 по 2022 год факты незаконных врезок не регистрировались, что свидетельствует об эффективности принятых превентивных мер [14].

Технические решения по предотвращению аварий и защите морской среды в условиях эксплуатации нефтегазовой инфраструктуры Каспийского моря представляют собой самостоятельную и актуальную научно-практическую задачу. Агрессивная морская среда Каспия провоцирует интенсивные коррозионные процессы в элементах нефтегазовой инфраструктуры, которые не только повышают вероятность возникновения нефтяных утечек, но и существенно влияют на физико-химические закономерности последующего распространения углеводородов в водной толще. Это обстоятельство подчёркивает необходимость интеграции математических моделей прогнозирования разливов с инженерными решениями превентивного характера.

Каспийский регион характеризуется уникальным сочетанием природно-климатических факторов, формирующих специфические и весьма жёсткие условия эксплуатации промысловой инфраструктуры. Значительные сезонные перепады температур в совокупности с высокой химической агрессивностью морской воды — обусловленной повышенным содержанием растворённых солей и сероводорода — создают существенно повышенные риски деградации подводных трубопроводов и технологического оборудования, что особенно критично для трубопроводных систем, эксплуатируемых на континентальном шельфе.

Транспортировка нефти и природного газа в морских и прибрежных условиях является одной из приоритетных задач современного энергетического сектора, приобретающей особую значимость применительно к Каспийскому региону ввиду значительных разведанных запасов углеводородного сырья и его стратегической роли в системе глобального энергоснабжения. Существенная часть добываемых в прикаспийских государствах нефти и газа экспортируется по разветвлённым системам подводных и прибрежных трубопроводов, что предъявляет повышенные требования к надёжности и технологическому совершенству транспортной инфраструктуры. Последняя должна обеспечивать бесперебойное функционирование в условиях высокой коррозионной агрессивности морской среды, знакопеременных температурных нагрузок, сейсмической активности и иных неблагоприятных факторов, характерных для данного региона.

Месторождение Кашаган, расположенное в казахстанском секторе Каспийского моря, по праву относится к числу крупнейших и наиболее технически сложных нефтегазовых проектов в мировой практике. Открытое в 2000 году, оно приобрело стратегическое значение для глобальной энергетической отрасли, однако его освоение сопряжено с целым рядом серьёзных технических и экологических вызовов. Одной из наиболее острых проблем, выявленных в процессе эксплуатации месторождения, стала интенсивная коррозия трубопроводной системы. Уже вскоре после начала промышленной добычи в 2013 году были зафиксированы утечки газа, причиной которых послужило сульфидное коррозионное растрескивание под напряжением — специфический вид деградации металла, обусловленный экстремально высоким содержанием сероводорода (H_2S) в добываемом флюиде. Агрессивное воздействие H_2S на материал трубопроводов проявлялось наиболее выражено в зонах сварных соединений, где концентрация напряжений в сочетании с коррозионной средой создавала условия для ускоренного разрушения металла. Следствием этого стала необходимость масштабной замены повреждённых участков: в общей сложности было демонтировано и заменено свыше 200 километров труб, не отвечавших требованиям



коррозионной стойкости. Реализация данных работ потребовала нескольких лет и повлекла финансовые затраты, исчисляемые сотнями миллионов долларов.

Коррозионные повреждения трубопроводной системы месторождения Кашаган повлекли за собой серьёзные экологические и экономические последствия для проекта в целом. Вынужденная остановка производства нарушила исполнение международных контрактных обязательств, существенно увеличила операционные издержки и инициировала поиск и внедрение новых технологических решений, способных предотвратить повторение подобных инцидентов. Восстановительные работы потребовали значительных капиталовложений в развитие антикоррозионных технологий, совершенствование контроля качества сварных соединений и модернизацию систем технического мониторинга. Тем не менее, несмотря на реализованный комплекс мер, совокупный экологический и финансовый ущерб оказался весьма значительным, наглядно демонстрируя критическую важность превентивного материаловедческого анализа и тщательного подбора конструкционных материалов для трубопроводов, эксплуатируемых в экстремальных условиях Каспийского региона.

Экологические риски, сопряжённые с коррозией трубопроводов и газовыми утечками на месторождении Кашаган, представляют одну из наиболее острых проблем его эксплуатации. Эмиссия сероводорода (H_2S) в окружающую среду приводит к комплексному загрязнению водной и воздушной сред, создавая реальную угрозу массовой гибели морских организмов, сокращения биологического разнообразия и необратимой деградации экосистемы. Для Каспийского моря, находящегося под значительной антропогенной нагрузкой вследствие многолетней интенсивной промышленной деятельности, подобные инциденты несут особую опасность. Токсичные выбросы способны нанести серьёзный урон воспроизводству рыбных запасов и других биологических ресурсов, что неизбежно отражается на состоянии рыбохозяйственной отрасли и традиционном укладе жизни коренного населения прибрежных территорий. Помимо этого, распространение H_2S на прилегающих территориях создаёт прямую угрозу здоровью как персонала месторождения, так и жителей близлежащих населённых пунктов.

Существенную проблему представляет также риск вторичного загрязнения окружающей среды, возникающего непосредственно в процессе ликвидации последствий аварийных ситуаций. Проведение рекультивационных и очистных работ на загрязнённых территориях, как правило, предполагает применение химических реагентов и специализированных технологий, которые сами по себе способны оказывать негативное воздействие на экосистему, формируя дополнительный экологический след. Восстановление утраченных биологических ресурсов представляет собой длительный и ресурсоёмкий процесс, требующий значительных временных и финансовых затрат, а в ряде случаев — кардинального изменения сложившихся природных условий, что фактически означает необратимую трансформацию экосистемы.

В долгосрочной перспективе систематические газовые утечки и сопряжённые с ними экологические нарушения способны привести к прогрессирующей деградации экосистемы Каспийского моря и существенному снижению её регенерационного потенциала. Изложенное в совокупности обуславливает настоятельную необходимость введения жёсткого режима контроля технического состояния трубопроводной инфраструктуры и последовательного внедрения экологически безопасных технологий на всех стадиях жизненного цикла объектов нефтегазового комплекса — от проектирования и строительства



до эксплуатации и вывода из эксплуатации. На рисунке представлено распределение затрат и структура последствий коррозионных повреждений на месторождении Кашаган.

Структура совокупных затрат, обусловленных коррозионными проблемами на месторождении Кашаган, наглядно демонстрирует масштаб как прямых, так и косвенных финансовых потерь. Наибольшую долю расходов составляют работы по замене трубопроводов — 40%, за которыми следуют затраты на восстановление экосистемы — 25%, мероприятия по ликвидации газовых утечек — 20%, а также производственные потери, вызванные вынужденными простоями, — 15%. Подобное распределение затрат убедительно иллюстрирует комплексный характер проблемы коррозии, последствия которой выходят далеко за рамки сугубо технических и охватывают экологическую и экономическую сферы.

Сульфидное коррозионное растрескивание под напряжением (СКРН) относится к числу наиболее опасных и трудно предотвращаемых форм коррозионного разрушения металлических конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах с повышенным содержанием сероводорода (H_2S). Механизм данного вида деградации материала определяется синергетическим взаимодействием двух групп факторов: внешних — коррозионного воздействия агрессивной среды, и внутренних — механических напряжений, формирующихся как в результате технологических нагрузок в процессе изготовления и монтажа, так и под воздействием эксплуатационных нагрузок в ходе работы оборудования. Сочетание указанных факторов инициирует зарождение и прогрессирующее развитие трещин в металле, что в конечном счёте приводит к хрупкому разрушению конструктивных элементов даже при относительно невысоких уровнях механических напряжений.

Механизм развития СКРН основан на электрохимической реакции сероводорода с железом на поверхности металла, сопровождающейся выделением атомарного водорода. Проникая в кристаллическую решётку металла, атомы водорода вызывают локальное ослабление межатомных связей и формирование концентраторов напряжений на границах зёрен. Наиболее интенсивно данные процессы протекают в зонах структурных несовершенств и микродефектов, где создаются благоприятные условия для зарождения и последующего распространения трещин.

Одним из определяющих факторов, существенно повышающих вероятность развития СКРН, является высокое содержание H_2S в транспортируемом флюиде, что типично для ряда крупных месторождений, в том числе Кашаган. Повышенное парциальное давление сероводорода создаёт условия для ускоренной деградации металла, особенно в случае недостаточной коррозионной стойкости применяемых материалов. При этом определяющую роль в кинетике трещинообразования играют состояние поверхностного слоя металла, геометрия и качество исполнения сварных соединений, а также остаточные напряжения, формирующиеся в результате механической обработки или термического воздействия в процессе сварки. Совокупность перечисленных факторов обуславливает необходимость комплексного подхода к выбору материалов и технологий при проектировании трубопроводных систем для месторождений с высоким содержанием H_2S .

Развитие СКРН дополнительно усугубляется воздействием внешних механических нагрузок, неизбежно возникающих при эксплуатации трубопроводов в условиях высокого рабочего давления и значительных температурных перепадов. Указанные нагрузки существенно ускоряют распространение трещин, особенно в материалах с пониженными показателями пластичности или выраженными



структурными неоднородностями, которые выступают дополнительными концентраторами напряжений и очагами преимущественного трещинообразования.

Химический состав трубопроводной стали является одним из ключевых параметров, определяющих её устойчивость к СКРН. Введение в состав сплава легирующих элементов — в частности, никеля и хрома — способствует формированию на поверхности металла защитных пассивирующих слоёв, существенно повышающих коррозионную стойкость материала в агрессивных сероводородсодержащих средах. Напротив, применение низколегированных сталей без дополнительных защитных мер сопряжено с высоким риском ускоренного коррозионного разрушения под воздействием H_2S , что особенно критично в условиях длительной эксплуатации при повышенных давлениях и температурах, характерных для глубоководных и шельфовых месторождений Каспийского региона.

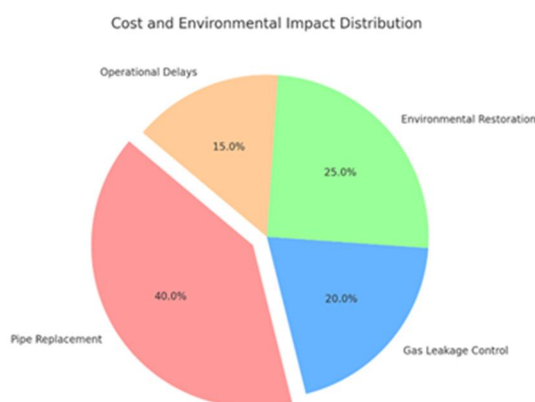


Рисунок 6 - Распределение затрат и экологических последствий

Результаты и обсуждения

К числу наиболее эффективных мер противодействия СКРН относятся: целенаправленный подбор конструкционных материалов с высокой стойкостью к водородному охрупчиванию, снижение уровня остаточных напряжений посредством термической обработки сварных соединений и готовых конструкций, а также нанесение защитных внутренних покрытий и применение ингибиторов коррозии. В качестве дополнительного средства защиты широко используется катодная поляризация, обеспечивающая снижение электрохимического потенциала металлической поверхности и тем самым замедляющая скорость протекания коррозионных процессов. Комплексное применение перечисленных методов позволяет существенно продлить срок службы трубопроводной инфраструктуры и снизить вероятность аварийных ситуаций.

Технические решения, реализованные на месторождении Кашаган, охватывают широкий спектр инновационных разработок, направленных одновременно на повышение эффективности добычи углеводородов и минимизацию экологических рисков. Исключительная сложность инженерных задач, решаемых в рамках данного проекта, обусловлена совокупностью неблагоприятных эксплуатационных факторов: агрессивным воздействием морской среды, экстремальными термобарическими условиями в продуктивных горизонтах, а также аномально высоким содержанием сероводорода в добываемом флюиде. Взаимодействие указанных факторов предъявляет принципиально повышенные требования к применяемым материалам,



конструктивным решениям и технологиям мониторинга на всех этапах реализации проекта.

Одним из ключевых инновационных решений, внедрённых на месторождении Кашаган, стало применение передовых материалов и технологий антикоррозионной защиты, направленных на противодействие сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением. Необходимость данных мер продиктована аномально высоким содержанием сероводорода в составе добываемого флюида, что исключает возможность использования стандартных трубопроводных решений без специализированной защиты.

Конструкция и материальное исполнение трубопроводных систем месторождения Кашаган разрабатывались с учётом совокупности экстремальных эксплуатационных условий. Агрессивная химическая среда, характеризующаяся высокими концентрациями сероводорода (H_2S) и углекислого газа (CO_2), в сочетании с повышенными рабочими давлениями обусловила необходимость применения принципиально новых инженерных и материаловедческих подходов.

Согласно данным компании BUTTING, одним из наиболее эффективных конструктивных решений стало использование биметаллических труб с двухслойной структурой. Наружный слой, выполненный из углеродистой стали, обеспечивает необходимую механическую прочность и несущую способность конструкции, тогда как внутренний слой из коррозионностойких материалов — нержавеющей стали или никелевых сплавов — выполняет защитную функцию, надёжно изолируя основной металл трубы от непосредственного контакта с агрессивной средой транспортируемого флюида. Подобное конструктивное решение обеспечивает значительное увеличение ресурса трубопровода и позволяет существенно снизить эксплуатационные затраты на его техническое обслуживание и ремонт.

В целях дополнительного повышения коррозионной стойкости трубопроводных систем на месторождении применяются композитные материалы с многослойной структурой, включающей полимерные компоненты. Отличительными характеристиками данных материалов являются сочетание малого удельного веса, высоких прочностных показателей и выраженной устойчивости к агрессивным химическим воздействиям, что делает их оптимальным решением для участков трубопроводов, эксплуатируемых в наиболее жёстких условиях.

По данным издания World Pipelines, критически важным элементом конструктивного обеспечения надёжности трубопроводных систем является технология сварки. Сварные соединения представляют собой зоны повышенной уязвимости вследствие термического воздействия на структуру металла в процессе их выполнения, что создаёт предпосылки для возникновения микротрещин. В целях минимизации данного риска применяются высокоточные сварочные технологии — в частности, лазерная и аргонодуговая сварка, обеспечивающие минимальную зону термического влияния и сохранение исходных структурных характеристик основного металла. Контроль качества сварных соединений осуществляется по строгим регламентам с применением неразрушающих методов диагностики, включая ультразвуковое исследование, что позволяет своевременно выявлять и устранять потенциальные дефекты на ранних стадиях их формирования.

Неотъемлемым элементом технологического цикла изготовления трубопроводов является термическая обработка. После выполнения сварочных работ и формовки трубные секции подвергаются процессу термической стабилизации, в ходе которого



происходит релаксация остаточных напряжений в металле и улучшение его механических характеристик. Помимо этого, термообработка оказывает благоприятное воздействие на микроструктуру металла, способствуя формированию более однородной зеренной структуры и тем самым снижая предрасположенность материала к коррозионному растрескиванию под напряжением.

Важнейшим направлением обеспечения эксплуатационной надёжности инфраструктуры месторождения Кашаган является внедрение инновационных систем мониторинга и технической диагностики. Применяемые системы дистанционного контроля обеспечивают непрерывное отслеживание технического состояния оборудования и трубопроводных систем в режиме реального времени. Интеграция автоматизированных систем управления с современными инструментами анализа данных позволяет существенно повысить общий уровень промышленной безопасности, снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций и минимизировать риски несанкционированных выбросов углеводородов. Функциональные возможности применяемых диагностических комплексов охватывают непрерывный контроль рабочего давления и температуры, оценку интенсивности коррозионных процессов, а также мониторинг технического состояния сварных соединений и трубопроводной арматуры, что в совокупности формирует многоуровневую систему раннего предупреждения потенциальных отказов.

Существенной составляющей инновационной стратегии освоения месторождения Кашаган является развитие и совершенствование методов добычи углеводородов и повышения коэффициента их извлечения. Необходимость данного направления обусловлена уникальными геологическими характеристиками месторождения, в частности сложным строением продуктивных резервуаров, высокой вязкостью нефти и значительным содержанием растворённого газа. Применение передовых технологий геологоразведки и разработки месторождений, включая сейсморазведку высокого разрешения и трёхмерное геологическое моделирование, обеспечивает существенное повышение точности оценки ресурсного потенциала залежей и позволяет оптимизировать схемы их эксплуатации.

Не менее приоритетным направлением является последовательный переход к экологически ориентированным технологиям добычи. Принимая во внимание высокий уровень экологических рисков, связанных с возможными утечками нефти и газа в акваторию моря, на месторождении активно внедряется комплекс природоохранных технологических решений. В их числе — системы улавливания и утилизации углекислого газа, технологии ликвидации нефтяных разливов в морской среде, а также развёртывание флота специализированных аварийно-спасательных судов, обеспечивающих оперативное реагирование на чрезвычайные ситуации. Для восстановления качества загрязнённой воды применяются инновационные методы на основе наноматериалов и биотехнологических решений, что в совокупности формирует многоуровневую систему экологической защиты морской среды в зоне производственной деятельности месторождения.

Казахстанский сектор Каспийского моря отличается специфическим комплексом метеорологических условий, включающим характерные температурный и осадочный режимы, а также особенности ветровой деятельности и ледообразования. В зимний период на севере Каспия формируется устойчивый ледяной покров, наиболее выраженный именно в казахстанской части акватории, где температурный режим способствует интенсивному обледенению поверхности моря. В летние месяцы регион



характеризуется высокой испаряемостью и повышенным температурным фоном, что оказывает существенное влияние на водный баланс и динамику уровня режима моря.

Температурный режим водной толщи казахстанского сектора Каспийского моря отличается значительной сезонной изменчивостью. Согласно данным РГП «Казгидромет» за 2023 год, среднегодовая температура воды варьировала в диапазоне от 10,4 до 15,6 °С, при этом максимальные значения достигали 22,3–32,5 °С, а минимальные опускались до -2,3–1,8 °С. Выраженная сезонная цикличность проявляется в том, что годовые минимумы температуры фиксируются в январе–феврале, тогда как максимумы приходятся на июль–август. Абсолютный зимний минимум был зарегистрирован на уровне 2,3 °С в феврале на станции Кулалы, тогда как абсолютный летний максимум составил 36,4 °С в июле на станции Курык. В сезонном разрезе максимальные значения температуры воды составили: зимой — 13,1 °С, весной — 28,5 °С, летом — 36,4 °С, осенью — 28,6 °С. Минимальные сезонные значения зафиксированы на следующих уровнях: зимой — -3,4 °С (январь, станция Фетисово), весной — -1,1 °С, летом — 6,9 °С, осенью — 1,7 °С.

Ветровой режим над акваторией Каспийского моря формируется под совокупным воздействием крупномасштабных процессов общей циркуляции атмосферы, а также локальных барических градиентов и термических контрастов между сушей и морем. Выраженная сезонная изменчивость ветрового режима проявляется в смене господствующих направлений переноса воздушных масс в течение года. В летне-осенний период на прибрежных метеорологических станциях Пешной, Актау и Фетисово фиксировалось преобладание западных и северо-западных ветров, тогда как на станциях Кулалы и Форт-Шевченко доминировал северный перенос, а на станциях Песчаное и Курык — северо-западный. В зимний период на всех без исключения станциях наблюдалась смена направления господствующих ветров на восточное и юго-восточное, что обусловлено усилением континентального антициклона и его влиянием на ветровые условия региона. Максимальные скорости ветра варьировали в диапазоне от 7 до 21 м/с, при этом порывы достигали 27 м/с, что свидетельствует о значительном штормовом потенциале акватории. В целом преобладающими направлениями ветра в годовом выражении являлись юго-восточное и северо-западное, определяющие основные закономерности ветрового воздействия на поверхность моря и, как следствие, характер распространения нефтяных загрязнений при аварийных разливах.

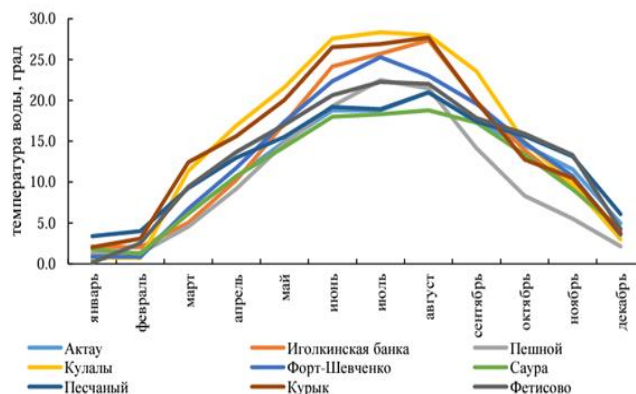


Рисунок 6 – График внутригодового хода температуры воды в казахстанском секторе Каспийского моря за 2023 год (источник <https://www.kazhydromet.kz/>) [15]



В зимний период максимальные скорости ветра наблюдались при юго-восточном, восточном, северо-восточном и северо-западном направлениях, весной — при северо-западных, юго-восточных и восточных, летом и осенью — при северо-западных и юго-восточных направлениях (рисунок 7)

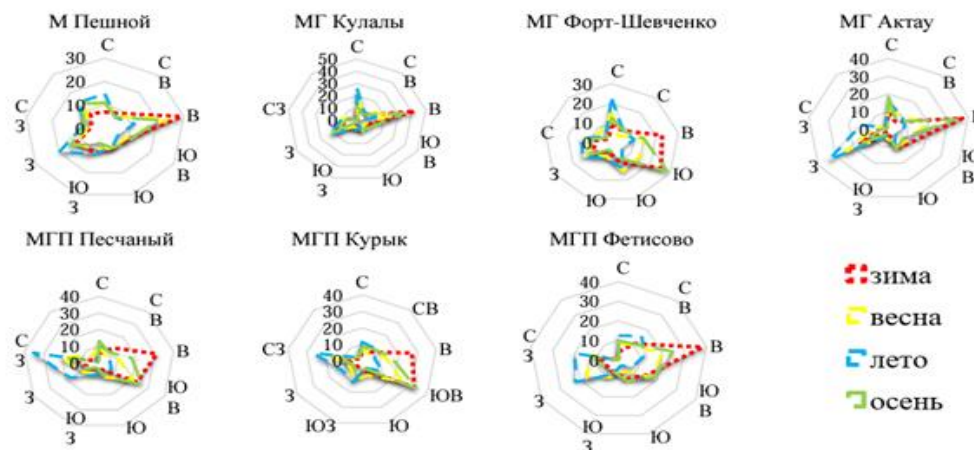


Рисунок 7 - Повторяемость направление ветра по сезонам за 2023 год (%)

Мониторинговая деятельность РГП «Казгидромет» охватывает комплексное изучение гидрологических и метеорологических параметров Каспийского моря, включая температурный режим водной толщи, колебания уровня моря и распределение солёности, а также прогнозирование штормовых явлений и исследование сгонно-нагонных процессов, способных вызывать резкие кратковременные изменения уровня воды и представляющих реальную угрозу для прибрежных территорий. Результаты наблюдений и детализированные гидрометеорологические данные систематически публикуются в тематических бюллетенях, находящихся в открытом доступе на официальном сайте организации [16].

Нефтяные разливы в морской среде влекут за собой серьёзные экологические последствия, охватывающие все трофические уровни морской экосистемы и проявляющиеся как в форме немедленного острого воздействия, так и в виде долгосрочных хронических эффектов. Нефтяная плёнка, формирующаяся на поверхности воды, блокирует газообмен между атмосферой и водной толщей, что приводит к дефициту растворённого кислорода и массовой гибели планктонных организмов и рыб. Нарушение газообменных процессов, жизненно необходимых для функционирования морской биоты, способно вызывать глубокую и длительную дестабилизацию экосистемных процессов на протяжении многих лет после инцидента.

Несмотря на то что нефтяные разливы на Каспийском море зачастую не получают широкого освещения в средствах массовой информации, их негативное экологическое воздействие признаётся научным сообществом весьма значительным. Систематически фиксируемые малые и средние разливы, нередко остающиеся вне поля зрения общественности, тем не менее оказывают существенное кумулятивное воздействие на качество воды, состояние морской флоры и фауны, постепенно деградируя экосистему Каспия [17].

Химический состав каспийской нефти существенно варьируется в зависимости от конкретного месторождения, однако в целом характеризуется присутствием как лёгких, так и тяжёлых углеводородных фракций. Исследования процессов трансформации нефти при разливах показали, что лёгкие фракции подвергаются быстрому испарению,



тогда как остающиеся тяжёлые компоненты склонны к эмульгированию с образованием устойчивых вязких эмульсий характерного коричневого цвета — так называемых «шоколадных» эмульсий. Формирование подобных эмульсий существенно осложняет проведение операций по сбору нефти и значительно усиливает экологические последствия разлива. Физические свойства нефти, прежде всего её вязкость, проявляют выраженную зависимость от температурных условий и географического положения в акватории моря.

Климатические и гидродинамические особенности Каспийского моря оказывают определяющее влияние на закономерности распространения и деструкции нефтяных загрязнений. В северной части моря низкие температуры воды обуславливают повышение вязкости нефти, что существенно замедляет её естественное разложение и пролонгирует негативное воздействие на экосистему. В южных районах акватории более высокий температурный фон ускоряет процессы испарения и биодеструкции углеводородов, однако одновременно способствует формированию устойчивых эмульсий, способных распространяться на значительные площади. Совокупность данных факторов существенно осложняет ликвидацию разливов и усиливает их экологические последствия.

Деструкция нефти в акватории Каспийского моря осуществляется посредством ряда взаимосвязанных процессов, включающих фотохимическое окисление, микробиологическое разложение и механическое диспергирование под воздействием волнового перемешивания. Фотоокисление нефтяных компонентов сопровождается образованием высокотоксичных производных, в частности полициклических ароматических углеводородов, оказывающих длительное канцерогенное и мутагенное воздействие на морскую биоту. Микробиологическая деструкция, несмотря на относительно невысокую скорость протекания, играет существенную роль в долгосрочном самоочищении морской среды: отдельные штаммы бактерий, обнаруженные в водах Каспия, способны утилизировать углеводороды в качестве источника углерода, обеспечивая тем самым естественную биоремедиацию загрязнённых акваторий. Вместе с тем полная минерализация нефтяных загрязнений может растягиваться на месяцы и годы, что свидетельствует о высокой персистентности углеводородных загрязнений в экосистеме и определяет масштаб долгосрочных экологических последствий нефтяных разливов [18].

Интенсивная нефтедобыча повлекла за собой значительное сокращение биологического разнообразия Каспийского моря, наиболее остро проявившееся в отношении осетровых рыб. Хроническое углеводородное загрязнение обусловило возникновение у данных видов генетических мутаций, патологий роста и нарушений репродуктивной функции. По имеющимся данным, признаки миопатии и десорбции икры выявлялись у 60% обследованных особей осетровых, что напрямую связывается с воздействием нефтяных загрязнителей. Совокупное действие нефтяных разливов и браконьерского промысла привело к катастрофическому сокращению численности популяций осетровых, доведя их до критически низкого уровня. Поступление углеводородов в водную среду спровоцировало развитие эвтрофикации, повлёкшей за собой гипоксию придонных водных масс и глубокую дестабилизацию структуры экосистемы [19].

Особую опасность нефтяное загрязнение представляет для птиц и морских млекопитающих. Пропитывание перьевого покрова и меха нефтяной эмульсией приводит к утрате теплоизоляционных свойств и гидрофобности, вследствие чего



птицы и такие животные, как выдры, подвергаются высокому риску переохлаждения и гибели. У крупных морских млекопитающих — дельфинов и китов — интенсивное нефтяное загрязнение вызывает поражения органов дыхания и иммуносупрессию. Заглатывание нефтепродуктов сопровождается развитием системных токсических эффектов, включая нарушение функций печени и сердечно-сосудистой системы [20–21].

Восприимчивость к нефтяному загрязнению существенно варьирует у различных представителей морской фауны. У ряда видов рыб фиксируются онтогенетические нарушения и снижение репродуктивного потенциала, неизбежно ведущие к депрессии популяций. Восстановление морских экосистем после значительных нефтяных разливов представляет собой длительный процесс, измеряемый десятилетиями, а в ряде случаев полная реабилитация отдельных биотопов оказывается практически недостижимой. Изложенное убедительно свидетельствует о том, что своевременное и эффективное реагирование на нефтяные разливы в сочетании с системным управлением экологическими рисками является неперенным условием минимизации ущерба и обеспечения долгосрочной сохранности морской среды Каспия [22].

В исследовании [23] для комплексного картирования экологической чувствительности береговой линии и морских экосистем Каспийского моря был применён Индекс экологической чувствительности (ESI — Environmental Sensitivity Index). Данный инструмент обеспечивает интегральную оценку уязвимости прибрежных экосистем на основе многофакторного анализа географических, климатических, экологических и биологических параметров, классифицируя береговые линии по десяти основным категориям с соответствующими подкатегориями. Каждая из выделенных категорий отражает определённый уровень чувствительности к нефтяному загрязнению, определяемый совокупностью следующих критериев: степенью экспонированности берега волновому воздействию, способностью субстрата к поглощению и удержанию нефтепродуктов, продолжительностью естественного сохранения нефти на береговой поверхности, а также биологической продуктивностью прибрежных сообществ. Система ESI охватывает широкий спектр типов береговых линий — от скальных обнажений до заболоченных и поросших растительностью участков, каждому из которых присваивается соответствующее числовое значение индекса. Так, скалистые берега с высокой гидродинамической активностью и минимальной нефтеудерживающей способностью характеризуются низкими значениями ESI, свидетельствующими об относительно невысокой экологической уязвимости. Напротив, заболоченные территории и мангровые экосистемы получают максимальные значения индекса ввиду их высокой экологической ранимости и исключительной сложности проведения восстановительных и очистных работ в подобных биотопах.

Заключение

Таким образом, в ходе проведённого исследования были собраны и систематизированы сведения об исторических случаях нефтяных разливов, включая характеристики разлитых углеводородов, метеорологические условия в момент инцидентов и экологические последствия загрязнений. В рамках обзора передовых технических решений изучены перспективные конструкционные материалы и инженерные подходы — в частности, применение биметаллических труб и композитных материалов, обеспечивающих высокую долговечность и устойчивость оборудования к экстремальным эксплуатационным условиям. Детально исследованы



ключевые факторы, определяющие коррозионную стойкость трубопроводных систем в морской среде, с акцентом на методологию предотвращения сульфидного коррозионного растрескивания под напряжением.

Проведённый анализ позволяет констатировать, что исторические данные о нефтяных разливах свидетельствуют о значительных экологических рисках как в глобальном масштабе, так и применительно к Каспийскому морю. В казахстанском секторе Каспия наиболее уязвимыми являются районы активной нефтедобычи, где систематические утечки углеводородов оказывают прогрессирующее деградирующее воздействие на состояние морской экосистемы. Специфические метеорологические условия региона — ледовый покров в зимний период и высокие температуры в летние месяцы — существенно осложняют проведение операций по ликвидации загрязнений и снижают эффективность применяемых технологий реагирования. Экологические последствия нефтяных разливов носят комплексный и долгосрочный характер, проявляясь в деградации качества водной среды, сокращении биологического разнообразия и устойчивом негативном воздействии на морскую флору и фауну, что обуславливает необходимость разработки и внедрения комплексных систем экологического мониторинга и оперативного реагирования на чрезвычайные ситуации.

Благодарности

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства Науки и Высшего образования Республики Казахстан. Программно-целевое финансирование научных и (или) научнотехнических проектов на 2024-2026 годы со сроком реализации 36 месяцев. Тема проекта: «Разработка интегрированных энергосберегающих технологий для развития экологической устойчивости и эффективности морских операций в Казахстанском секторе Каспийского моря». Проект ИРН BR24992964.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Воздушное наблюдение за разливами нефти в море технический информационный документ №. 1/р 1-42/ 2024

[2] ИТОРФ. Последствия нефтяного загрязнения для рыболовства и марикультуры. <https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/statistics/>. Р. 1-12. 2024

[3] Маккей, Д.; Буист, И.А.; Маскареньяс, Р.; Патерсон, С. Процессы и модели разливов нефти: Рукописный отчет № 8; Окружающая среда Канады: Оттава, Онтарио, Канада., 1980. <https://publications.gc.ca/site/eng/9.890490/publication.html>

[4] Маккей, Д.; Буист, И.А.; Маскареньяс, Р.; Патерсон, С. Процессы и модели разливов нефти: Рукописный отчет № 8; Окружающая среда Канады: Оттава, Онтарио, Канада., 1980. <https://publications.gc.ca/site/eng/9.890490/publication.html>

[5] Маккей Д. Математическая модель поведения разливов нефти на воде при естественном и химическом рассеивании; Environment Canada: Оттава, Онтарио, Канада, 1977. <https://publications.gc.ca/site/eng/9.869275/publication.html>

[6] Дельвинь, Г.А.Л.; Суини, К.Э. Естественная дисперсия нефти. Химия нефти. Загрязнения окружающей среды. 1988, 4, С.- 281–310. [https://doi.org/10.1016/S0269-8579\(88\)80003-0](https://doi.org/10.1016/S0269-8579(88)80003-0)

[7] Дельвинь Г.А. Естественное рассеивание нефти различными источниками турбулентности. В материалах Международной конференции по разливам нефти,



Тампа, Флорида, США, 29 марта – 1 апреля 1993 г.; С.- 415–419.
<https://doi.org/10.7901/2169-3358-1993-1-415>

[8] Ткалич П.; Чан Е.С. Вертикальное перемешивание капель нефти набегающими волнами. Март. Загрязнение окружающей среды. Бык. 2002, 44, С.- 1219–1229.
[https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00178-9](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00178-9)

[9] Виссер А.В. Использование моделей случайного блуждания для моделирования вертикального распределения частиц в турбулентном водяном столбе. Март. Экология. Продолжение сер.1997, 158, С.- 275–281
<https://doi.org/10.3354/meps158275>

[10] Конкаве. Информация о судовом топливе // Доступно at: https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/2017/01/marine_factsheet_web.pdf (2017, accessed 22 November 2023).

[11] Стивенс У.; Маккей Д. Скорость испарения при разливах углеводородов и нефтяных смесей. Наука об окружающей среде. Технология. 1984, 18, 834–840.
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es00129a006>

[12] Хора Т.С., Агарвал А.К. Влияние изменения степени сжатия на сгорание, производительность и выбросы в атмосферу двигателя, работающего на сжатом природном газе, обогащенном водородом // Журнал науки и техники о природном газе. – 2016. – V.31. – P.819–828.

[13] <https://www.kmg.kz/>

[14] Маккей, Д.; Патерсон, С.; Трудель, К. Математическая модель поведения при разливе нефти. Отчет в отдел исследований и разработок, Отдел по чрезвычайным экологическим ситуациям, Управление по контролю воздействия на окружающую среду; Окружающая среда Канады: Оттава, Онтарио, Канада., 1980.

[15] <https://www.kazhydromet.kz/>

[16] Колпак, Р.; Плутчак, Н.; Стернс, Р. Судьба нефти в водной среде – фаза II, динамическая модель баланса массы выброшенной нефти; Университет Южной Калифорнии: Вашингтон, округ Колумбия, США., 1977.

[17] Хелифа, А.; Хилл, П. С.; Ли, К. Комплексный численный подход к прогнозированию образования нефтегазоминеральных агрегатов (ома) после разливов нефти в водной среде. Междунар. Конференция по разливам нефти. Proc. 2005, 873–877. <https://doi.org/10.7901/2169-3358-2005-1-873>

[18] ИТОПФ, “Статистика разливов нефти на танкерах за 2023 год”
<https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/statistics/>.

[19] К. М. Андерсон и Р. П. Лабелль, “Обновленные данные о сравнительных показателях аварийности при разливах нефти на шельфе”, Наука о разливах. Технология. Булл., том 6, №5–6, С.- 303–321, Oct. 2000, doi: 10.1016/S1353-2561(01)00049-4.

[20] Дэвид Триллинг, “Туркменистан: Спутники фиксируют разливы нефти в Каспийском море”, <https://eurasianet.org/turkmenistan-satellites-expose-oil-spills-on-caspian-sea>.

[21] А. Ю. Иванов, “Обнаружение и анализ утечек нефти с помощью дистанционного зондирования в Каспийском и Баренцевом морях”, J. Oceanol. Отв. ред., том. 47, №. 5, С.-52–64, 2019, doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(5).4.

[22] З. Ша, К. В., К. А., С. Нуракинов и У. М., “Картографирование частоты разливов нефти в Каспийском море с использованием оптических изображений



sentinel-2”, Физико-математический журнал, том 3, С.- 183–190, 2020, doi: 10.32014/2020.2518-1726.52.

[23] Э. Байрамов, М. Када и М. Бухройтнер, “Мониторинг горячих точек разливов нефти, моделирование вероятности загрязнения и оценка воздействия на побережье Каспийского моря с использованием спутниковых датчиков Sentinel-1, Landsat-8, Radarsat, Envisat и ERS”, Дж. Опер. Океанограф., 11, № 1, С.- 27–43, 2018, doi: 10.1080/1755876X.2018.1438343.

REFERENCES

- [1] Aerial surveillance of marine oil spills technical information paper No. 1/p 1-42/ 2024
- [2] ITORF. Effects of oil pollution on fisheries and mariculture. <https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/statistics/>. P. 1-12. 2024
- [3] Mackay, D.; Buist, I.A.; Mascarenhas, R.; Paterson, S. Oil Spill Processes and Models: Environment Canada Manuscript Report No 8; Environment Canada: Ottawa, ON, Canada, 1980. <https://publications.gc.ca/site/eng/9.890490/publication.html>
- [4] Mackay, D.; Buist, I.A.; Mascarenhas, R.; Paterson, S. Oil Spill Processes and Models: Environment Canada Manuscript Report No 8; Environment Canada: Ottawa, ON, Canada, 1980. <https://publications.gc.ca/site/eng/9.890490/publication.html>
- [5] Mackay, D. Mathematical Model of the Behavior of Oil Spills on Water with Natural and Chemical Dispersion; Environment Canada: Ottawa, ON, Canada, 1977. <https://publications.gc.ca/site/eng/9.869275/publication.html>
- [6] Delvigne, G.A.L.; Sweeney, C.E. Natural dispersion of oil. Oil Chem. Pollut. 1988, 4, 281–310. [https://doi.org/10.1016/S0269-8579\(88\)80003-0](https://doi.org/10.1016/S0269-8579(88)80003-0)
- [7] Delvigne, G.A. Natural dispersion of oil by different sources of turbulence. In Proceedings of the International Oil Spill Conference, Tampa, FL, USA, 29 March–1 April 1993; pp. 415–419. <https://doi.org/10.7901/2169-3358-1993-1-415>
- [8] Tkalic, P.; Chan, E.S. Vertical mixing of oil droplets by breaking waves. Mar. Pollut. Bull. 2002, 44, 1219–1229. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00178-9](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00178-9)
- [9] Visser, A.W. Using random walk models to simulate the vertical distribution of particles in a turbulent water column. Mar. Ecol. Prog. Ser. 1997, 158, 275–281 <https://doi.org/10.3354/meps158275>
- [10] Conca. Marine fuel facts // Available at: https://www.conca.eu/wp-content/uploads/2017/01/marine_factsheet_web.pdf (2017, accessed 22 November 2023).
- [11] Stiver, W.; Mackay, D. Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures. Environ. Sci. Technol. 1984, 18, 834–840. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es00129a006>
- [12] Hora T.S., Agarwal A.K. Effect of varying compression ratio on combustion, performance, and emissions of a hydrogen enriched compressed natural gas fueled engine // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2016. – V.31. – P.819–828.
- [13] <https://www.kmg.kz/>
- [14] Mackay, D.; Paterson, S.; Trudel, K. A Mathematical Model of Oil Spill Behaviour. Report to Research and Development Division, Environment Emergency Branch, Environmental Impact Control Directorate; Environment Canada: Ottawa, ON, Canada, 1980.
- [15] <https://www.kazhydromet.kz/>
- [16] Kolpack, R.; Plutchak, N.; Stearns, R. Fate of Oil in Water Environment – Phase II, a Dynamic Model of the Mass Balance for Released Oil; University of Southern California: Washington, DC, USA, 1977.



[17] Khelifa, A.; Hill, P.S.; Lee, K. A comprehensive numerical approach to predict oil-mineral aggregate (oma) formation following oil spills in aquatic environments. *Int. Oil Spill Conf. Proc.* 2005, 2005, 873–877. <https://doi.org/10.7901/2169-3358-2005-1-873>

[18] ITOPF, “Oil Tanker Spill Statistics 2023” <https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/statistics/>.

[19] C. M. Anderson and R. P. LaBelle, “Update of Comparative Occurrence Rates for Offshore Oil Spills,” *Spill Sci. Technol. Bull.*, vol. 6, no. 5–6, pp. 303–321, Oct. 2000, doi: 10.1016/S1353-2561(01)00049-4.

[20] David Trilling, “Turkmenistan: Satellites Expose Oil Spills on Caspian Sea” <https://eurasianet.org/turkmenistan-satellites-expose-oil-spills-on-caspian-sea>.

[21] A. Y. Ivanov, “Remote sensing detection and analysis of oil seeps in the Caspian sea and the barents sea” *J. Oceanol. Res.*, vol. 47, no. 5, pp. 52–64, Dec. 2019, doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(5).4.

[22] Z. Sha, C. V., K. A, S. Nurakynov, and U. M., “Mapping frequency of oil spills in the Caspian sea using sentinel-2 optical images” *Physico-mathematical Ser.*, vol. 3, pp. 183–190, Jun. 2020, doi: 10.32014/2020.2518-1726.52.

[23] E. Bayramov, M. Kada, and M. Buchroithner, “Monitoring oil spill hotspots, contamination probability modelling and assessment of coastal impacts in the Caspian Sea using Sentinel-1, Landsat-8, Radarsat, Envisat and ERS satellite sensors” *J. Oper. Oceanogr.*, vol. 11, no. 1, pp. 27–43, Jan. 2018, doi: 10.1080/1755876X.2018.1438343.

**Сырлыбеккызы С., Нұрмаганбет Е.Т., Серикбаева А.К., Джумашева К.А.,
Аманкешулы Д., Дедова Т.В., Искаков Б.А., Мерекеев А.
МҰНАЙ ТӨГІЛУІНІҢ ЖӘНЕ ҚОРШАҒАН ОРТАНЫҢ ЛАСТАНУЫНЫҢ
ЖИІЛІГІ МЕН КӨЛЕМІНІҢ МОДЕЛІН ҚҰРУ**

Аңдатпа. Спутниктік мониторингті қолдана отырып, соңғы 50-55 жыл ішінде Каспий теңізі аумағында мұнай мен мұнай қалдықтарының төгілу жиілігіне талдау жүргізілді. Көпмүшелік зерттеулердің нәтижелері мұнайдың төгілуінің себебі мұнай құбырларының тозуы мен коррозиясы екенін көрсетеді. Мақалада жүргізілген зерттеуге сәйкес, Каспий теңізінде антропогендік және табиғи мұнайдың төгілуі де байқалады. Мақалада Каспий теңізінің Қазақстандық секторы шегінде күкіртті сутектің (H_2S) ағып кетуінің ықтимал қауіпті салдары көрсетілген. Мұндай ағып кету нәтижесінде су мен ауаның ластануы теңіз ағзаларының өліміне, биоәртүрліліктің төмендеуіне және экожүйелердің бұзылуына әкелуі мүмкін екендігі атап өтілді. Каспий теңізінің осалдығына ерекше назар аударылады, оның экожүйесі өнеркәсіптік қызметке байланысты қысымға ұшырайды. H_2S ағып кетуі балықтың көбеюін бұзуы, балық аулауға зиян келтіруі және кен орындарына жақын жерде тұратын адамдардың денсаулығына теріс әсер етуі мүмкін екендігі атап өтілді. Қашаған кен орнында құбырлардың қауіпсіздігі мен ұзақ мерзімділігін қамтамасыз ету үшін пайдаланылатын, пайдаланудың экстремалды жағдайларымен (агрессивті орта, күкіртсутегі мен көміркышқыл газының жоғары концентрациясы, жоғары қысым) сипатталатын тұрақты инженерлік шешімдер мен материалдарды қолдану қажеттілігі бар. Негізгі шешім-коррозияға төзімді ішкі қабаты бар биметалды құбырларды, сондай-ақ коррозияға төзімділікті арттыру үшін композициялық материалдарды пайдалану. Микрокректердің пайда болуын болдырмайтын дәнекерлеу технологияларына және қалдық кернеулерді жою үшін құбырларды термиялық өңдеуге ерекше назар аударылады. Қауіпсіздікті қамтамасыз ету және ағып кету қаупін азайту үшін қашықтықтан бақылау жүйелері мен автоматтандырылған басқару жүйелерін қоса алғанда, инфрақұрылымның жай-күйін бақылау мен диагностикалаудың инновациялық әдістерін қолдануға баса назар аударылады.

Кілт сөздер: мұнайдың төгілуі, спутниктік мониторинг, Каспий теңізі, коррозияға қарсы материалдар, климаттық жағдайлар.



Syrlybekkyzy S., Nurmaganbet E.T., Serikbayeva A.K., Jumasheva K.A., Amankeshuly D., Dedova T.V., Iskakov B.A., Merekeev A.

BUILDING A MODEL OF THE FREQUENCY AND VOLUME OF OIL SPILLS AND ENVIRONMENTAL POLLUTION

Annotation. The frequency of oil spills and oil waste in the Caspian Sea over the past 50-55 years has been analyzed using satellite monitoring. The results of multiple studies indicate that the cause of oil spills is the deterioration and corrosion of oil pipelines. According to the research conducted in the article, both anthropogenic and natural oil spills are also observed in the Caspian Sea. The article indicates the potentially dangerous consequences of hydrogen sulfide (HS) leaks in the Kazakh sector of the Caspian Sea. It is emphasized that water and air pollution as a result of such leaks can lead to the death of marine organisms, decrease in biodiversity and destruction of ecosystems. Particular attention is paid to the vulnerability of the Caspian Sea, whose ecosystem is already under pressure due to industrial activity. It is noted that HS leaks can disrupt fish reproduction, damage fisheries and negatively affect the health of people living near deposits. There is a need to use sustainable engineering solutions and materials used to ensure the safety and durability of pipelines at the Kashagan field, characterized by extreme operating conditions (aggressive environment, high concentrations of hydrogen sulfide and carbon dioxide, high pressures). The key solution is to use bimetallic pipes with a corrosion-resistant inner layer, as well as composite materials to increase corrosion resistance. Special attention is paid to welding technologies that prevent the formation of microcracks and heat treatment of pipes to eliminate residual stresses. The use of innovative methods for monitoring and diagnosing the state of the infrastructure, including remote monitoring systems and automated control systems, is emphasized to ensure safety and minimize the risks of leaks.

Keywords: oil spills, satellite monitoring, Caspian Sea, anticorrosive materials, climatic conditions.