

БЕЗОПАСНОСТЬ МОРСКИХ НЕФТЕГАЗОВЫХ СООРУЖЕНИЙ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ



АНАТОЛИЙ МИХАЙЛОВИЧ ЛЕПИХИН, Д.Т.Н., НТЦ «НЕФТЕГАЗДИАГНОСТИКА», ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНФОРМАЦИОННЫХ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕКРЕТАРЬ МЭС

Инженерной базой нефтегазодобычи на континентальном шельфе являются морские нефтегазовые сооружения (МНГС). МНГС – это сооружения, которые осуществляют процессы, связанные с добычей, транспортировкой, хранением и обработкой нефти и газа с месторождений, расположенных на акваториях морей и связанных с ними водоемов. К ним относятся: стационарные и плавучие сооружения, называемые «платформами и буровыми судами»; подводные трубопроводы, предназначенные для транспортировки нефти и газа от платформ к сооружениям, на которых осуществляется сбор и хранение или накопление перекачиваемого продукта для загрузки его в танкеры; хранилища (накопители) нефти и газа, располагаемые в акватории моря или на платформах, а также на прибрежной территории; объекты, предназначенные для швартовки нефтеналивных судов или

газоводов; подводные нефтегазовые сооружения, предназначенные для первичной обработки нефти и газа, а также сепарации составных частей добываемого продукта; причальные береговые стенки и выносные эстакады для причаливания танкеров и различных вспомогательных судов, а также ограждающие сооружения. В зависимости от конструктивных признаков МНГС классифицируются на линейные, моноопорные, многоопорные, плавучие, подводные.

МНГС подвергаются сложному комплексу нагрузок и воздействий, включающих нагрузки внешней среды (ветер, волны, течения, сейсмические воздействия), эксплуатационные нагрузки, гравитационные нагрузки, температурные воздействия, воздействия морской воды и пр. Величины и комбинации нагрузок и воздействий существенно различа-

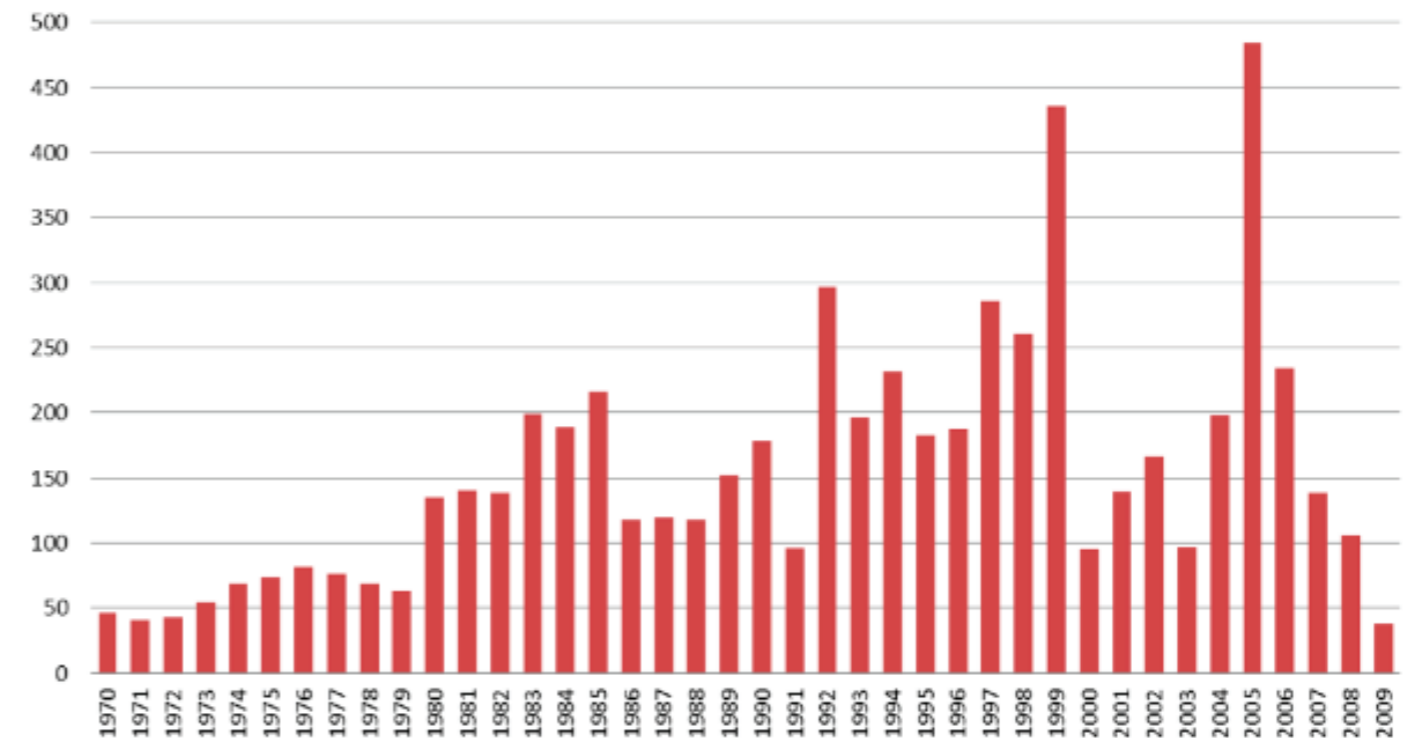


Рисунок 1 – Динамика числа аварий трубопроводов

№ п/п	Объект	Год и место аварии	Число жертв, чел.
1	Буровая баржа «CP Baker Drilling Barge»	1964, Мексиканский залив	21
2	Платформа «Vochai 2»	1079, Китай	72
3	Платформа «Alexander Kielland»	1980, Норвежское море	123
4	Платформа «Ocean Ranger»	1982, Канада	84
5	Буровое судно «Glomar Java Sea»	1983, Южно-Китайское море	81
6	Платформа «Enchova»	1984, Бразилия	42
7	Платформа Piper Alpha	1988, Северное море	167
8	Буровое судно «Seacrest»	1989, Южно-Китайское море	91
9	Платформа P-56 Petrobras	2001, Бразилия	10
10	Платформа «Mumbai High North»	2005, Аравийское море	22
11	Платформа «Deerwater Horizon»	2010, Мексиканский залив	11
12	Платформа «Кольская»	2011, Охотское море	53
13	Платформа Black Elk Energy	2012, Мексиканский залив	4
14	Платформа «Гюнешли»	2015, Каспийское море	30
15	Платформа Petrobras	2015, Бразилия	5

Таблица 1 – Крупнейшие аварии морских буровых платформ и буровых судов

ются для конкретных местоположений МНГС, сезона и условий эксплуатации. Под действием нагрузок в элементах конструкций МНГС возникают сложные поля напряжений и деформаций, формируются и развиваются дефекты и повреждения металла и элементов. Для установления безопасных пределов нагрузок, воздействий и допустимых уровней дефектов и повреждений проводятся проектные расчеты прочности и ресурса МНГС. В нормах проектирования закладываются статистически обоснованные уровни и комбинации нагрузок, которые охватывают наиболее критические ситуации в процессе эксплуатации. При этом учитываются комбинации и взаимодействия осевых, изгибающих, сдвиговых сил; постоянных и временных статических и циклических нагрузок. Расчеты прочности проводятся по методам допускаемых напряжений, заложенных в нормах НД №2-020201-026, НД №2-020201-027, НД №2-020301-007, API RP 2A-LFRD и предельных нагрузок, представленных в нормах API RP 2A-LRFD, DNV OS-F101, ГОСТ Р 54382-2011. Указанные расчеты в целом обеспечивают высокий уровень надежности и безопасности МНГС [1, 2]. Тем не менее, аварии МНГС являются нередкими событиями, порождающими тяжелые последствия для экономики предприятий, экологии, отрасли нефтегазодобычи и отдельных стран.

С начала 60-х годов XX века, когда началось бурное строительство МНГС и по настоящее время произошло более 15 тяжелых аварий морских буровых платформ и буровых судов (таблица 1).

Экономические ущербы от аварий платформ измеряются сотнями миллионов и многими миллиардами долларов. Анализ аварийности по опыту эксплуатации 640 платформ в Мексиканском заливе показал следующие средние суммы ущербов от аварий:

- Стоимость проекта – 28-53 млн. \$;
- Стоимость строительства – 1.0-2.0 млрд. \$;
- Стоимость ремонта конструкций – 34.6 млн. \$;

- Замена поврежденного оборудования – 157 млн. \$;
- Ущерб жизни и здоровью – 1.17 млн. \$;
- Экологические потери – 1.5 млн. \$;
- Стоимость недополученной продукции – 9948 млн. \$;
- Время простоя – 27 месяцев;
- Общий средний ущерб – 10142.27 млн. \$.

При этом общий ущерб аварии платформы «Piper Alpha» составил 3.4 млрд. \$. Общий ущерб аварии платформы «Deerwater Horizon» достиг 110 млрд. \$ (потери от загрязнений – 23 млрд. \$; штрафы – 7.8 млрд. \$; иски частных лиц – 56 млрд. \$; компенсации 5 штатам – 20.8 млрд. \$).

Статистические оценки интенсивностей аварий морских буровых платформ измеряются следующими величинами:

- Высокая неопределенность исходных данных: 2×10^{-5} – 5.2×10^{-5} 1/год;
- Низкая неопределенность исходных данных: 1.7×10^{-5} – 2.5×10^{-5} 1/год.

Оценки рисков аварий, как произведения вероятностей событий и ущербов составляют:

- Высокая неопределенность: 0.20 – 5.27 млрд. \$/год;
- Низкая неопределенность: 0.14 – 2.5 млрд. \$/год.

Не менее впечатляющая картина наблюдается и с аварийностью морских подводных трубопроводов. Ежегодно в мире происходит от нескольких десятков до нескольких сотен аварий трубопроводов (рис. 1). Ущерб измеряется десятками и сотнями миллионов долларов.

Статистические оценки вероятностей аварий морских подводных трубопроводов по данным баз PARLOC, DOT, CONCAWE находятся в широких пределах: 10^{-5} – 10^{-3} 1/км*год (таблица 1). Средние ущербы от аварий на подводных газопроводах составляют 10^5 – 10^6 долл., при максимальных ущербах 10^9 долл. На подводных нефтепроводах

средние ущербы составляют $10^4 - 10^5$ долл., при максимальных ущербах до 10^8 долл. При этом потери газа при авариях достигают 10^6 MCF (Milia Cubic Feet), а потери нефти до 10^5 BBL (barrel). На основании этих данных средние расчетные значения риска аварий составляют $(0.16 - 4.38) \times 10^2$ долл./км×год, при максимальных величинах до 1.89×10^4 долл./км×год (таблица 2).

Если принять эту статистику за основу для оценки рисков транспортировки углеводородов на Российском шельфе, то величина риска в рублевом эквиваленте может достигать 2×10^6 руб./км×год. Для примера, на Каспийском шельфе протяженность подводных трубопроводов составляет почти 600 км. С учетом этого, годовой риск здесь может достигать величины 1.2×10^9 руб. [3].

Помимо аварий в последнее время возник новый источник опасности для МНГС – целенаправленные несанкционированные действия как отдельных групп людей и организаций, так и государств. Такие действия могут проводиться: в территориальных водах, в эксклюзивной экономической зоне, на континентальном шельфе. Объектами действий являются: танкерный флот, морские платформы, трубопроводы. Формы воздействий на объекты достаточно многообразны: диверсии, пиратство, мятеж, гражданский протест, военные действия, вандализм, внутренний саботаж, хакерские атаки. В настоящее время известен ряд целенаправленных атак на МНГС, в частности: МБУ «Brent Spar» (1981), «Bulford Dolphin», «Trident III», «Aban VII» (2007), «Bonga FPSO» (2008), «Stena Don» (2010), буровое судно «Ocean Rig Poseidon» (2011), «Приразломная» (2012), нефтегазодочное судно компании Shell (2012), буровые платформы месторождения «Одесское» (2022, 2024), «Северные потоки» (2022). Особо следует выделить предотвращенный теракт на супертанкере-накопителе «Трейдер» (2006 г) в России. Ущерб от указанных целенаправленных действий оцениваются суммами от сотен млн. долларов до десятков миллиардов долларов. Статистические оценки рисков от несанкционированных действий крайне затруднительны в силу уникальности событий по формам, проявлениям и последствиям.

Указанные выше угрозы аварий и несанкционированных действий приводят к многоаспектной проблеме безопасности жизненного цикла МНГС. Эта проблема решается на законодательно-нормативном, технологическом и организационно-техническом уровнях. В России вопросам промышленной и экологической безопасности МНГС неизменно уделяется большое внимание, как при их проектировании, так и при вводе в эксплуатацию, который осуществляется только с разрешения государственных надзорных органов. Весь технологический цикл нефтегазодобычи и его отдельные звенья, от скважины до потребителя, постоянно находятся под непрерывным контролем надзорных организаций и соответствующих служб промышленной и экологической безопасности. Тем не менее, остаются законодательные и нормативные пробелы решения проблемы безопасности МНГС.

Основополагающими для решения указанной проблемы являются нормативные барьеры безопасности в виде стандартов и норм проектирования, строительства, эксплуатации, контроля качества, менеджмента и т.п. Зарубежные системы стандартов (API, BS, DNV, ASME) насчитывают многие десятки и сотни взаимосвязанных и взаимосогласованных нормативных документов, комплексно решающих проблему надежности и безопасности МНГС. Отечественная нормативная база представлена небольшим объемом нормативных документов государственного уровня. Основными документами являются:

- НД №2-020201-026 Правила классификации и постройки плавучих буровых установок;
- НД №2-020201-027 Правила классификации и постройки морских стационарных платформ;
- НД №2-020301-007 Правила классификации и постройки морских подводных трубопроводов;
- НД №2-090601-003 Правила классификации и постройки подводных добычных комплексов;
- ГОСТ Р 54382-2011 Нефтяная и газовая промышленность. Подводные трубопроводные системы. Общие технические требования (перевод DNV-OS-F101);
- СП 369.1325800.2017 Платформы морские стационарные. Правила проектирования;
- СП 378.1325800.2017 Морские трубопроводы. Правила проектирования и строительства.

Недостаточность регламентаций государственных норм восполняется сотнями внутренних нормативных документов ПАО «Газпром», ПАО «ЛУКОЙЛ», НК «Роснефть» и других компаний, решающих частные задачи обеспечения прочности и ресурса МНГС. Однако указанные документы не рассматривают задачи обоснования безопасности по критериям рисков в соответствии с современными требованиями [4, 5].

По нашему мнению, решению этих задач и проблемы безопасности в целом существенно мешает отсутствие единого взгляда на МНГС, как важнейшие объекты нефтегазодобычи. По действующему законодательству МНГС рассматриваются одновременно как строительные сооружения и как опасные производственные объекты. Однако для них устанавливаются разные требования безопасности. Проектные декларации безопасности МНГС не содержат достаточно полных обоснований безопасности. Учитывая масштабы ущербов и значимость МНГС для нефтегазодобывающей отрасли России их следует законодательно отнести к классам критически и стратегически важных объектов. Согласно 68-ФЗ от 21.12.1994 с дополнениями 38-ФЗ от 08.03.2015 критически важный объект (КВО) – это объект, нарушение или прекращение функционирования которого приведет к потере управления экономикой РФ или административно-территориальной единицы субъекта РФ, ее негативному изменению или снижению безопасности жизнедеятельности. Определение

Риск долл./км×год	Наземные трубопроводы		Морские трубопроводы	
	Нефтепроводы	Газопроводы	Нефтепроводы	Газопроводы
Средний	$(0.12-1.30) \times 10^2$	$(0.19-2.15) \times 10^2$	$(0.23-4.38) \times 10^2$	$(0.16-2.14) \times 10^2$
Максимальный	1.26×10^5	2.05×10^5	3.30×10^5	1.89×10^4

Таблица 2 – Расчетные оценки риска аварий трубопроводов [3]

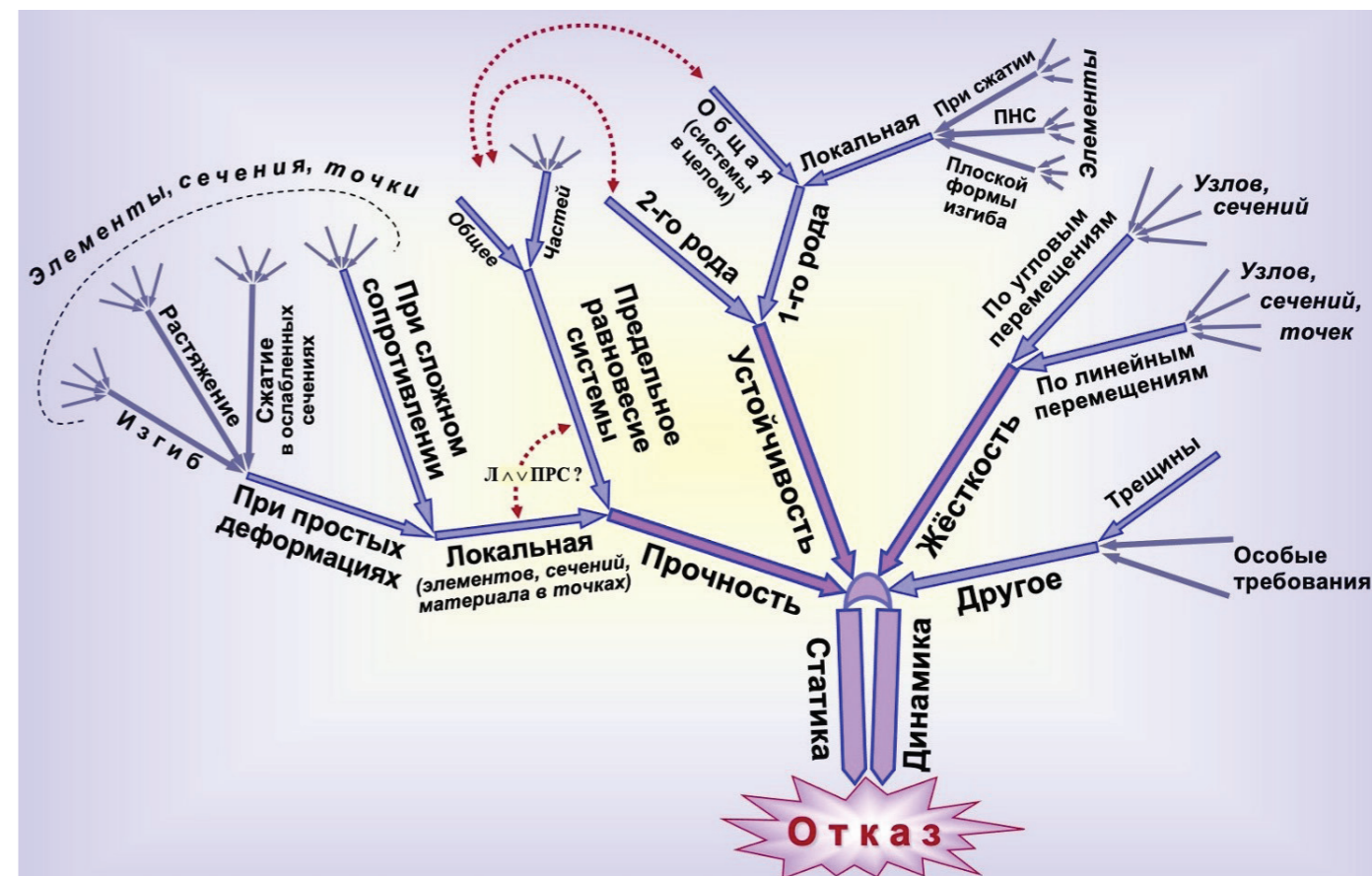


Рисунок 2 – Схема дерева событий для анализа риска аварий МНГС

для стратегически важных объектов (СВО) законодательно не закреплено. В рамках данного обсуждения стратегически важными объектами можно считать объекты, используемые для достижения стратегических экономических, социальных или военно-политических целей страны. Отнесение МНГС к классам КВО и СВО позволит использовать для обоснования их безопасности риск-ориентированный подход, заложенный в Стратегии развития Российской Федерации, как основы устойчивого развития. Некоторые методические вопросы этого подхода представлены в работах [5, 6].

Выделение МНГС как КВО и СВО потребует масштабной и глубокой доработки существующей нормативной базы. Необходимо разработать серию стандартов по обоснованию безопасности МНГС, охватывающих все аспекты проблемы:

- Термины и определения;
- Характеристики механических свойств;
- Методы определения характеристик механических свойств;
- Методы определения характеристик трещиностойкости металла;
- Проектный расчет по выбору основных размеров;
- Поверочные расчеты прочности и ресурса;
- Порядок обоснования объемов и периодичности неразрушающего контроля;
- Порядок обоснования безопасности по критериям риска.

По ряду указанных аспектов имеются ряд соответствующих стандартов. По некоторым работы только начинаются или не ведутся вовсе.

Рассмотрим некоторые аспекты обоснования безопасности по критериям риска. Классические оценки безопасности по уровню риска учитывают потери от аварий в виде произведения вероятностей аварии P_F на величину ущерба C_F :

$$R = P_F \times C_F < [R] \quad (1)$$

В соответствии с (1) возникают три задачи: определение вероятностей аварий P_F ; определение ущербов от аварий C_F ; обоснование допустимых уровней риска $[R]$. Решение первой задачи требует глубокого анализа возможных механизмов аварий, с построением дерева событий, приводящих к отказам конструкций МНГС (рис. 2). Здесь следует заметить, что независимо от природы угроз (техногенные, антропогенные, природные) авария МНГС происходит вследствие достижения предельных состояний элементов с последующим разрушением всей конструкции. Поэтому построение дерева событий позволяет охватить все возможные сценарии аварий.

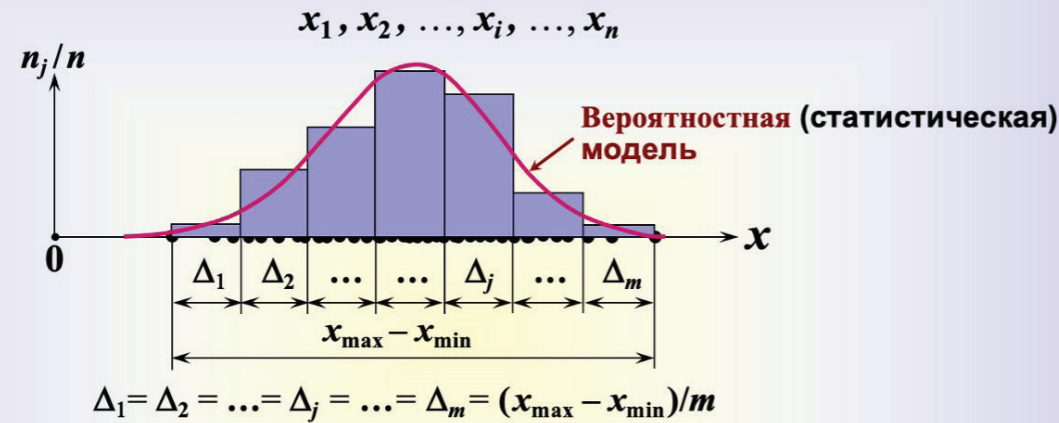
Следующая часть задачи заключается в получении и обработке статистической информации о параметрах и характеристиках событий и процессов, включенных в дерево событий. Это нетривиальная задача, требующая использования методов математической статистики и теории вероятностей. Ее решением является получение плотностей распределения вероятностей всех рассматриваемых переменных (рис. 3).

Далее по полученным вероятностным функциям необходимо вычислить риск аварий:

$$R = \sum_{i=1}^n q_i \sum_{j=1}^m (p_{ij} \times C_{ij}) \quad (2)$$

Построение вероятностной модели с.в. по статистической информации

Исходная статистическая выборка значений с.в. X объемом n :



$$\Delta_1 = \Delta_2 = \dots = \Delta_j = \dots = \Delta_m = (x_{\max} - x_{\min})/m$$

Ранг по критериям χ^2 Колмогорова-Смирнова

Poisson 1 / -

Normal 2 / 2

Erlang 4 / 4

Gamma 5 / 3

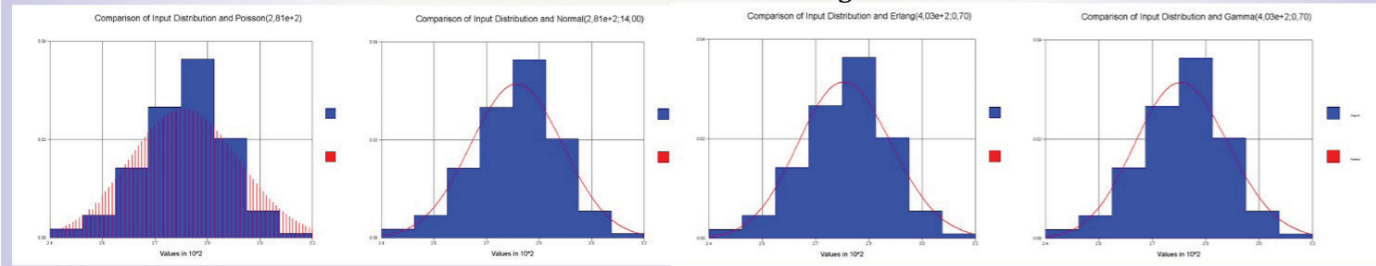


Рисунок 3 – Схема построения вероятностных моделей случайных величин

где q_i – вероятность воздействия i -той угрозы; p_{ij} – вероятность нахождения элемента МНГС в состоянии j при i -той угрозе; C_{ij} – негативные последствия состояния j при i -той угрозе.

Вероятности q_i и p_{ij} можно определить по заданным плотностям распределений вероятностей значений рискообразующих факторов угроз $f(r)$ и поврежденных элементов МНГС при воздействии этих факторов $f(D|r)$:

$$q_i = \int_r f(r) dr, \quad p_{ij} = \iint_{D,r} f(D|r) f(r) dr dD \quad (3)$$

В настоящее время, в связи с большой вариативностью условий эксплуатации МНГС в разных морях и регионах, нет возможностей получения однозначных оценок вероятностей q_i , p_{ij} и последствий C_{ij} для решения задачи (2). В этих условиях одним из возможных решений является интервальная оценка указанных переменных в виде [7]:

$$q_i = [q_i^-, q_i^+], p_{ij} = [p_{ij}^-, p_{ij}^+], C_{ij} = [C_{ij}^-, C_{ij}^+] \quad (4)$$

где $q_i^-, p_{ij}^-, C_{ij}^-$ – нижние (минимальные) значения; $q_i^+, p_{ij}^+, C_{ij}^+$ – верхние (максимальные) значения.

С учетом (4) можно получить интервальные оценки риска (2):

$$R = [R^-, R^+]$$

$$R^- = \sum_{i=1}^n q_i^- \sum_{j=1}^m (p_{ij}^- \times C_{ij}^-), \quad R^+ = \sum_{i=1}^n q_i^+ \sum_{j=1}^m (p_{ij}^+ \times C_{ij}^+) \quad (5)$$

Оценка ущербов от аварий МНГС обычно проводится методами экономического и экологического анализа. Данная задача находится за рамками этой статьи. Величина допустимого риска $[R]$ в настоящее время нормируется регулирующими органами с учетом уровня научных обоснований, отечественного и мирового опыта. Научное обоснование величин приемлемых рисков для процедуры их нормирования состоит в разработке методологии определения критических рисков и определении запасов по этим рискам [4].

Современный подход к решению проблемы безопасности МНГС рассматривает безопасность с учетом стоимости жизненного цикла (C_Σ), включающего начальные затраты на проектирование (C_0) и затраты на всех других стадиях (C_i), включая потери от аварий [6]:

$$C_\Sigma = \min_t \min_\beta \{C_0(\beta)\} + \sum_{i=1}^n C_i(\beta, t) \quad (6)$$

где β – индекс риска, величина определяющая вероятность аварии в заданных условиях.

Цель управления жизненным циклом заключается в минимизация его стоимости, с учетом вероятностей повреждений и аварий. На рис. 4 представлена оценка стоимости жизненного цикла буровой платформы, в зависимости от индекса риска. Как видно из рисунка, на первом этапе при снижении вероятности аварий происходит снижение стоимости жизненного цикла. Однако, после некоторого оптимального значения величины β начинается увеличение стоимости жизненного цикла из-за роста затрат на повышение безопасности при проектировании и эксплуатации. Анало-

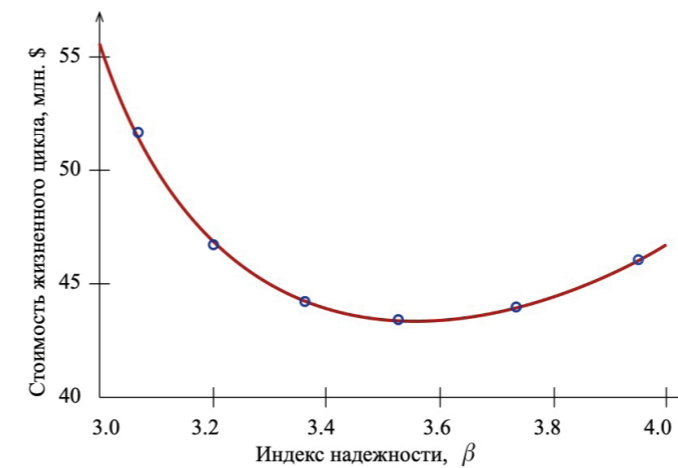


Рисунок 4 – Изменение стоимости жизненного цикла морской буровой платформы

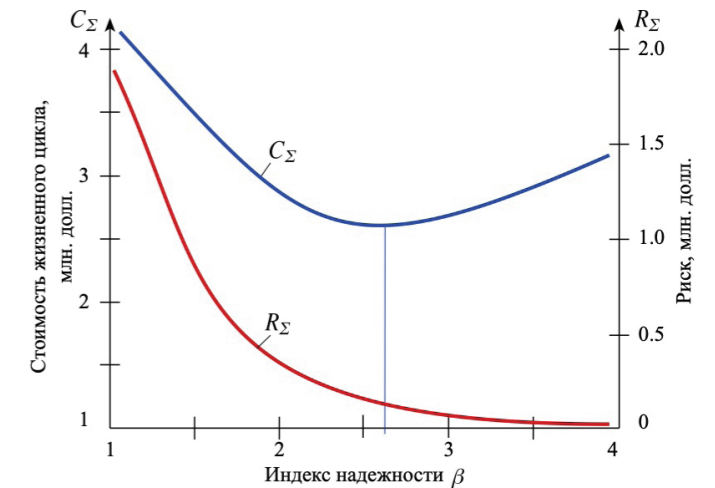


Рисунок 5 – Изменение стоимости жизненного цикла и риска морского подводного трубопровода

гичное можно наблюдать и для морских подводных трубопроводов (рис. 5). Следует отметить, что после оптимального значения индекса риска β начинается расхождение тенденций изменений риска и стоимости жизненного цикла. Поэтому оптимальное решение должно сочетать и уровень риска, и стоимость жизненного цикла трубопроводов.

Одним из действенных механизмов повышения безопасности является применение методов технического диагностирования МНГС, с выявлением дефектов и повреждений, влияющих на уровень безопасности. Устранение указанных дефектов позволяет продлить ресурс и повысить уровень безопасности МНГС. В части противодействия повреждениям от целенаправленных несанкционированных действия в последнее время активно развиваются технологии мониторинга с использованием необитаемых автономных подводных аппаратов, оснащенных целым рядом устройств и систем для контроля окружающего пространства. При этом следует учитывать следующие обстоятельства:

- Программы технического диагностирования и мониторинга технического состояния МНГС должны быть риск-ориентированными и риск-основанными;
- Разработка систем технического диагностирования, мониторинга безопасности и ограничения доступа должна проводиться с учетом критериев риска;
- В технических заданиях на разработку систем должны указываться требования по риску – как и в какой форме эти системы будут контролироваться, локализовывать или снижать факторы риска;
- Должна проводиться оценка эффективности систем диагностирования и мониторинга по критерию стоимости жизненного цикла МНГС.

В заключении следует отметить следующее. Проблема обоснования безопасности МНГС, как критически и стратегически важных объектов, с учетом природных, техногенных и антропогенных угроз, имеет первостепенное значение для развития нефтегазодобычи на континентальном шельфе России. Для решения данной проблемы необходимо:

- Законодательно отнести МНГС к классам критически и стратегически важных объектов экономики России;

- Создать современную суверенную отечественную нормативную базу обоснования безопасности МНГС. В основе создаваемых норм и стандартов должен лежать риск-ориентированный подход и обоснование безопасности по критериям риска;
- Разработать технологическую базу обеспечения безопасности при эксплуатации МНГС, включая контроль и мониторинг рисков.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Comparative Risk Analysis for Deepwater Production Systems. Final Project Report / Robert B. Gilbert Texas A&M University. January 2001. 368 p.
2. Шмаль Г.И., Тимашев С.А. Первоочередные безотлагательные задачи создания норм проектирования и эксплуатации безопасных морских трубопроводов // Морская наука и техника. 2024, №12, с. 14-18.
3. Лепихин А.М., Махутов Н.А., Лещенко В.В., Шмаль Г.И. Проблемы безопасности морских подводных трубопроводов // Морская наука и техника. 2022, №5, с. 30-35.
4. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Юдина О.Н. Научный анализ рисков в жизнеобеспечении человека, общества, государства // Проблемы анализа риска, 2016, Т.16, №2, с. 70-86.
5. Махутов Н.А. Научные основы и прикладные разработки проблем безопасности и защищенности морских трубопроводов и сооружений // Морская наука и техника. 2023, №7, с. 18-27.
6. Махутов Н.А., Лепихин А.М. Обоснование безопасности морских подводных трубопроводов на основе риск-ориентированного подхода // Морская наука и техника. 2024, №12, с. 36-39.
7. Шокин Ю.И., Лепихин А.М. Математическое моделирование в задачах риск-анализа технических систем // Вычислительные технологии. 2003. Т. 8. Спец. выпуск, с. 14-21.