

# МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ СЦЕНАРИЕВ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА МОРСКИХ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ РОССИИ



Святослав Анатольевич Тимашев – научный руководитель, г.н.с. НИЦ «Надежность и ресурс больших систем и машин» УРО РАН, доктор технических наук, профессор.  
 Анна Викторовна Бушинская – и.о. директора НИЦ «Надежность и ресурс больших систем и машин» УРО РАН, кандидат технических наук.

## Аннотация.

Статья является логическим продолжением и развитием статьи [1]. В ней рассматривается ключевой вопрос риск-ориентированного проектирования и эксплуатации морских подводных трубопроводов (МПТ) на основе применения суверенных Российских норм обеспечения их безопасности. Инструментом оценки риска является отечественная методика компьютерного моделирования полного стохастического жизненного цикла Российского морского трубопровода как стратегической инфраструктуры, базирующаяся на отечественной технологии диагностики, мониторинга и мейнтенанса МПТ, которая включает в себя полную группу метрик точности используемых диагностических инструментов, позволяющих получать: 1) состоятельные оценки вероятности наступления нежелательного события на каждой фазе их жизненного цикла; 2) остаточный риск после каждого вмешательства в функционирование объекта; и 3) величину риска принятия каждого управленческого решения, связанного с проектированием и эксплуатацией МПТ.

**Ключевые слова:** морские подводные трубопроводы, жизненный цикл, риск, безопасность, суверенные нормы проектирования и эксплуатации.

Состоятельная оценка риска эксплуатации МПТ невозможна без рассмотрения всего комплекса параметров, описывающих их состояние и поведение в течение всего срока их существования, «от колыбели до могилы». Для целей нормирования и управления риском эксплуатации уникальных МПТ необходимо решить задачу построения полной группы сценариев их жизненных циклов (ЖЦ) [2]. Фактически необходимо многократно прогнозировать поведение конкретного МПТ под действием природных, технологических, а также управляющих воздействий в течение всего ЖЦ. Основным инструментом для решения данной задачи является цифровая модель- (квази) двойник рассматриваемого МПТ.

Базой для построения такого двойника является проект МПТ, выполненный по всем современным канонам проектирования таких объектов. Для действующих МПТ к этому документу добавляются оцифрованные данные о результатах всех манипуляций, проведенных над МПТ (пуско-наладочные работы, проверка несущей способности, стартовая и плановая диагностика, ремонт, восстановление и др.) с момента его пуска в эксплуатацию. Если рассматрива-

емый трубопровод находится на стадии проектирования или запуска в эксплуатацию, то следует иметь необходимый и достаточный набор данных о дефектах и особенностях аналогичных существующих трубопроводах.

В самом общем случае задача определения риска, трактуемого как произведение вероятности отказа на его последствия, выраженное в монетарной форме, решается как задача оптимизации целевой функции управления рисками эксплуатации МПТ, которая здесь сводится к общей стоимости владения МПТ на его полном ЖЦ [1].

Для количественной оценки риска эксплуатации МПТ как функции времени, необходимо:

1. Запроектировать продолжительность его жизненного цикла (ЖЦ);
2. Определить его исходную (нормативную) надежность;
3. Иметь робастные количественные модели его деградации;
4. Выбрать формализованные стратегии, технологии и методы;

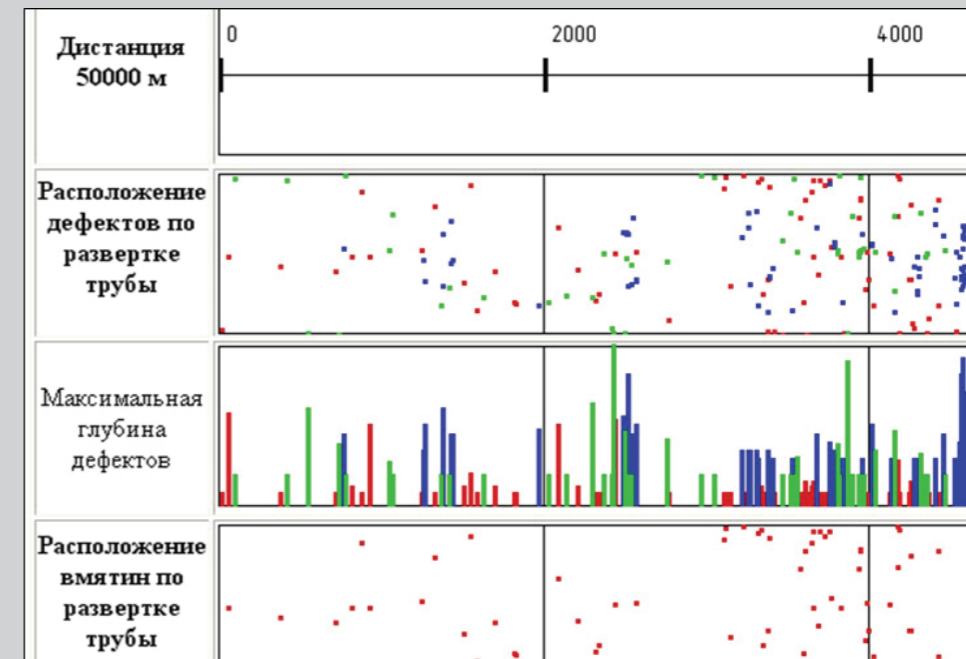


Рис. 1. Реализация поля фактических дефектов трубопровода при его инспекции с помощью прибора-дефектоскопа

- инструментальной диагностики [3], [4];
- мониторинга;
- мейнтенанса (технического обслуживания, ремонта и восстановления МПТ);

5. Определиться со способом оценки и дисконтирования всех затрат и ущербов, распределенных случайным образом на интервале ЖЦ объекта.

Наличие этих стратегий позволяет построить методом Монте-Карло квазиполную группу сценариев эксплуатации МПТ, имитирующих реальные условия его нагружения, деградации и поддержания в работоспособном состоянии, и, как следствие, получить состоятельные оценки вероятности отказа (по каждому виду воздействия на трубопровод) до и после каждого вмешательства. Из сказанного вытекает, что результаты моделирования будут непосредственно зависеть от точности используемых моделей деградации материала и конструкции МПТ, нагрузок на них, а также, что императивно важно, характеристик точности применяемых диагностических технологий.

Для нового, запускаемого в эксплуатацию МПТ необходимо смоделировать инициацию некоторого представительного множества дефектов, характерных для аналогичных трубопроводов, которые уже эксплуатируются. Поскольку частота ВТД отечественных трубопроводов регламентирована, необходимо спрогнозировать размеры всех инициированных дефектов к моменту первой инспекции, с учетом латентного периода, когда дефекты еще невидимы. Создание такого множества дефектов

на цифровом двойнике МПТ возможно только методом Монте-Карло с марковскими цепями при использовании случайных процессов. При этом надо учесть те нагрузки и воздействия, которые фактически испытывает реальный трубопровод на рассматриваемом участке океанического или морского шельфа России.

При наличии описанных выше данных, общий алгоритм построения функции риска, проектируемого или запускаемого в эксплуатацию МПТ на отрезке времени, равном длине его ЖЦ, вербально выглядит следующим образом.

**Этап 1.** Производится моделирование эксплуатации нового МПТ с момента его пуска до момента первой диагностики. Для этого используются модели деградации защитных слоёв, материала и конструкции самой трубы, адекватно описывающие рост всех типов дефектов. Здесь (и далее везде) возникают нетривиальные вопросы: *Сколько дефектов, какого типа, числа и размеров необходимо смоделировать для всего трубопровода и каждого его участка? И где их расположить топографически?*

Поскольку для расчётных целей разбиение МПТ на участки производится по критерию однородности основания, нагрузок/воздействий, и материала трубы, для практических целей необходимо моделировать деградацию каждого участка трубопровода отдельно. Необходимо моделировать все типы дефектов, которые наблюдаются на других действующих МПТ, аналогичных рассматриваемому. Количество смоделированных дефектов на каждом участке должно быть сопоставимо с фактически наблюдаемым числом дефектом на аналогичных участках МПТ,

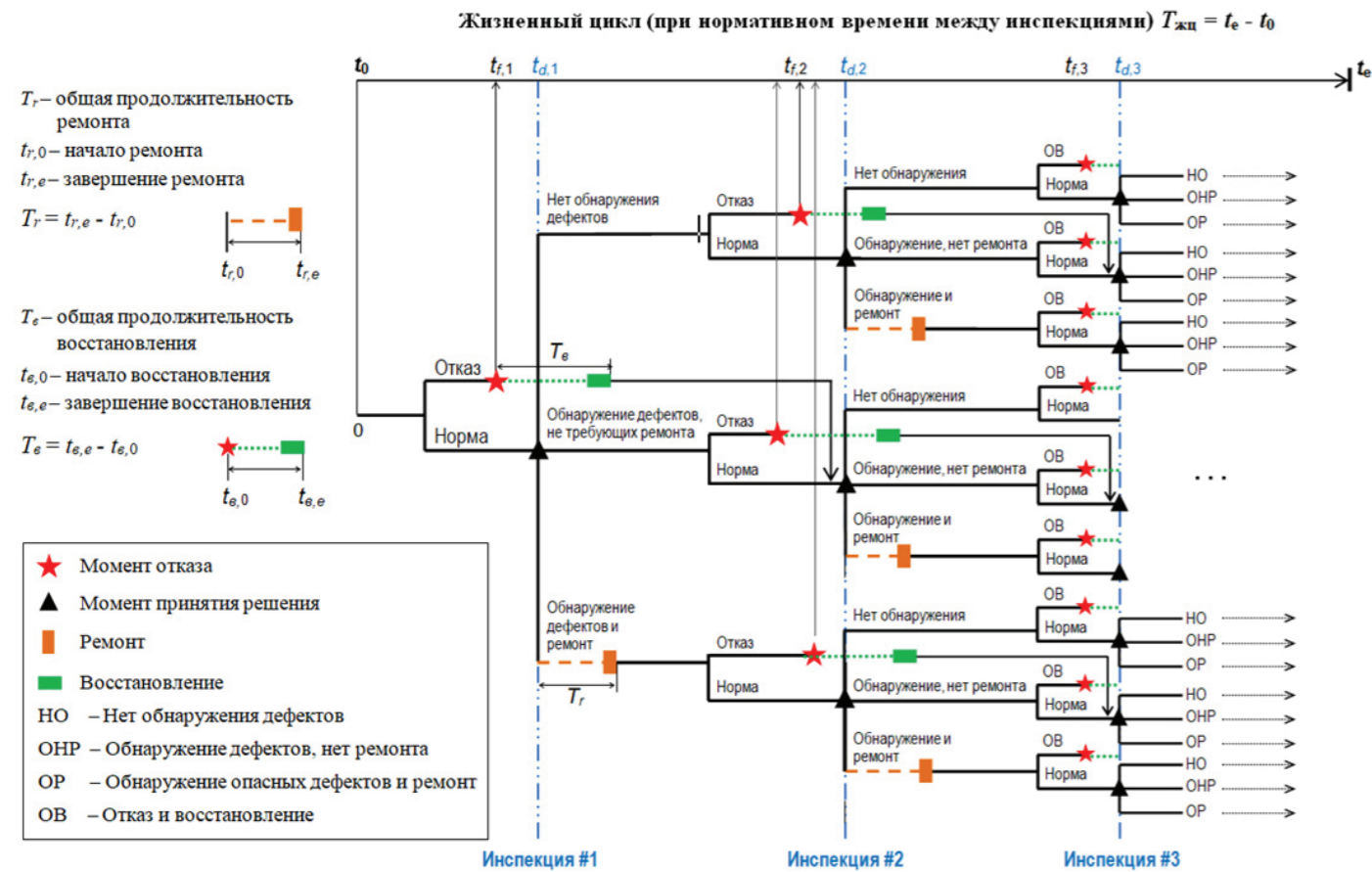


Рис.2. Стохастическое дерево событий и решений «событие–решение–событие–решение–...» построенное на жизненном цикле МПТ

эксплуатируемых в аналогичных условиях. Это позволит получать одинаковую мощность и состоятельность статистик, относящихся к параметрам моделируемых дефектов.

Целесообразно моделировать каждый представительный ансамбль однотипных дефектов как Пуассоновское поле точек, каждая из которых является трехмерным дефектом (глубиной  $d$ , длиной  $l$ , шириной  $b$ ). Мощность множества дефектов должна позволять получить состоятельную статистику распределения их размеров (Рис. 1).

Смоделированная топография поля фактических дефектов при необходимости может быть скорректирована с учетом локальных особенностей коррозии (например, когда нижняя часть оболочки трубы более подвержена коррозии чем верхняя). Для определения расчетного местонахождения пропущенного при дефектоскопии опасного дефекта рекомендуется применение подхода, впервые предложенного в [5].

Неразрушающие методы, используемые для диагностики МПТ подвержены различным ошибкам, поскольку они построены на косвенной форме измерения. Это может привести к семи различным типам ошибок измерения, на основе которых определяются метрики качества (точности) каждого инструмента [3,4]:

- а) Ошибки обнаружения: инструмент диагностики не обнаруживает какие-то дефекты или обнаруживает несуществующие дефекты.
- б) Ошибки определения размера: инструмент диагно-

стики неправильно определяет размеры дефектов.

с) Ошибки идентификации: инструмент диагностики неправильно идентифицирует обнаруженные дефекты согласно классификации, принятой в индустрии внутритрубной диагностики (ВТД);

д) Ошибки определения местоположения: инструмент диагностики неправильно определяет координаты (дистанцию и угловое положение) обнаруженных дефектов.

Обнаруженные дефекты составляют лишь часть общей совокупности фактических дефектов. По сути, инструмент диагностики действует как фильтр, который делит совокупность множества реальных дефектов на две группы: обнаруженных и необнаруженных. На определение точности контроля, как правило, влияют два фактора: вероятность обнаружения/ложного необнаружения дефектов и ошибки (погрешности) их измерений.

**Этап 2.** После получения представительного ансамбля всех типов дефектов к моменту первой диагностики, его надо проинспектировать с помощью виртуальных внутритрубных инструментов (ВТИ) с метриками их качества (точности), которыми обладают реальные снаряды, применяемые той или иной отечественной трубопроводной организацией. При этом оценивается стоимость данной диагностики на момент ее проведения.

Результатом данной инспекции может быть: 1) отсутствие дефектов равных или больших разрешающей способности ВТИ; 2) наличие группы из некоторого числа дефектов и аномалий. Эта группа анализируется на предмет содержит ли она критичные и/или опасные дефекты,

и надо ли проводить ремонт или восстановление трубы, сразу или по истечении некоторого времени.

**Этап 3.** После этой инспекции оценивается вероятность пропуска опасного дефекта, могущего привести к аварии (течь, разрыв) и стоимость восстановления целостности участка МПТ при реализации такого отказа, то есть, остаточный риск проведенной диагностики. Для этого необходимо знание вероятности ложного необнаружения опасного дефекта, характерной для использованного ВТИ. Для определения расчетного местонахождения пропущенного при дефектоскопии опасного дефекта рекомендуется применение подхода, предложенного в [5].

**Этап 4.** Результатом этого шага станет одно из двух решений: ждать, когда наступит время второй инспекции (с риском, вычисленным на этапе 3), или провести ремонт трубы с целью удаления недопустимых дефектов, немедленно [если дефект(ы) критичен(ны)], или через некоторый промежуток времени, необходимый для выполнения подготовительных работ, в течение которого риск по п.3 будет продолжать расти.

**Этап 5.** Если анализ результатов первой диагностики не привел к решению провести какие-либо ремонтные работы, моделируется развитие всех начальных дефектов за время между первой и второй инспекцией, а также появление группы новых дефектов за этот же промежуток времени.

**Этап 6.** Этот новый, увеличенный массив дефектов, снова подвергается виртуальной диагностике, согласно алгоритмам этапа 2.

**Этап 7.** Результаты второй диагностики подвергаются анализу на предмет какое решение по эксплуатации МПТ следует предпринять, с учетом государственных нормативов и правил, действующих внутри трубопроводной компании.

**Этап 8.** После этого возможно, используя метрики качества отечественных ВТИ, опять оценить остаточный риск, учитывая тот факт, что существует вероятность пропуска опасного дефекта при диагностике МПТ. Этот риск вычисляется опять с помощью алгоритмов этапа 3.

**Этап 9.** Если принимается решение о проведении ремонта по факту установления наличия опасных дефектов, то оценивается объемы спрогнозированного ремонта, а также его продолжительность и стоимость. Для этой цели используются нормативы и правила, действующие в организациях-операторах рассматриваемого МПТ.

**Этап 10.** На следующем шаге оценивается наиболее вероятное состояние отремонтированного МПТ на момент завершения ремонта.

**Этап 11.** При моделировании реализации ЖЦ возможен случай, когда при росте дефектов на одной из фаз эксплуатации МПТ один или несколько дефектов достигнут предельных размеров, при которых неизбежно происходит либо течь, либо разрыв трубы. Время достижения предельного размера первым дефектом (инициирующий отказ) суть начало аварии на трубопроводе. Материальный ущерб от этой аварии вычисляется на основе прошлого отечественного опыта, с учетом дисконтирования. Время и стоимость восстановления целостности трубопровода оценивается при этом с учетом финансовых и технологических возможностей владельца/оператора рассматриваемого МПТ.

Дерево событий и управляющих решений жизненного цикла МПТ описанных выше состоит из случайных отрезков времени, в течение которых происходит соответствен-

*Для нового, запускаемого в эксплуатацию МПТ необходимо смоделировать инициацию некоторого представительного множества дефектов, характерных для аналогичных трубопроводов, которые уже эксплуатируются. Поскольку частота ВТД отечественных трубопроводов регламентирована, необходимо спрогнозировать размеры всех инициированных дефектов к моменту первой инспекции, с учетом латентного периода, когда дефекты еще невидимы.*

но: эксплуатация → диагностика → ремонт → эксплуатация → авария → восстановление → эксплуатация → ... (где фазы диагностика, ремонт и авария включают в себя элемент принятия решения). Дерево строится до тех пор, пока не будет выбран по времени весь ЖЦ МПТ и представлено на Рис.2.

Для учета влияния нагрузки типа «Король-дракон» (КД), момент(ы) её воздействия на систему разыгрываются методом Монте Карло. При таком моделировании возможен также учет нагрузки/воздействия типа «Чёрный лебедь» (ЧЛ). Несмотря на то, что событие типа ЧЛ принципиально непредсказуемо, в контексте данной задачи (используя только сам фактор знания того, что ЧЛ может проявиться) его можно смоделировать также, как и воздействие КД. При этом параметры гипотетического ЧЛ оцениваются одним из методов мозгового штурма группой лиц, обладающих определёнными специфическими когнитивными способностями, а время его реализации разыгрывается как СВ равномерно распределенная на длине ЖЦ.

Авария трубопровода вблизи морских обитаемых платформ со смертельным(и) исходом(ами) и травмами (время наступления события, его вероятность и неэкономический масштаб ущерба) на его ЖЦ также моделируется методом МК. При этом, в целевую функцию управления рисками эксплуатации МПТ включается стоимость восстановления здоровья и компенсации за возможные увечья и потерю лет человеческих жизней, определяемая по методике, описанной в [12].

В результате моделирования реализации ЖЦ МПТ в общем случае возникают случайные число и времена проведения диагностических работ, возникновения аварийных ситуаций и принятия управленческих решений по восстановлению целостности и работоспособности МПТ. В эти моменты времени скачком меняются риски эксплуатации МПТ, которые можно оценить количественно.

Построенный полный жизненный цикл целесообразно использовать как платформу для оценки чувствительности искомых параметров (риск, врожденная надежность,

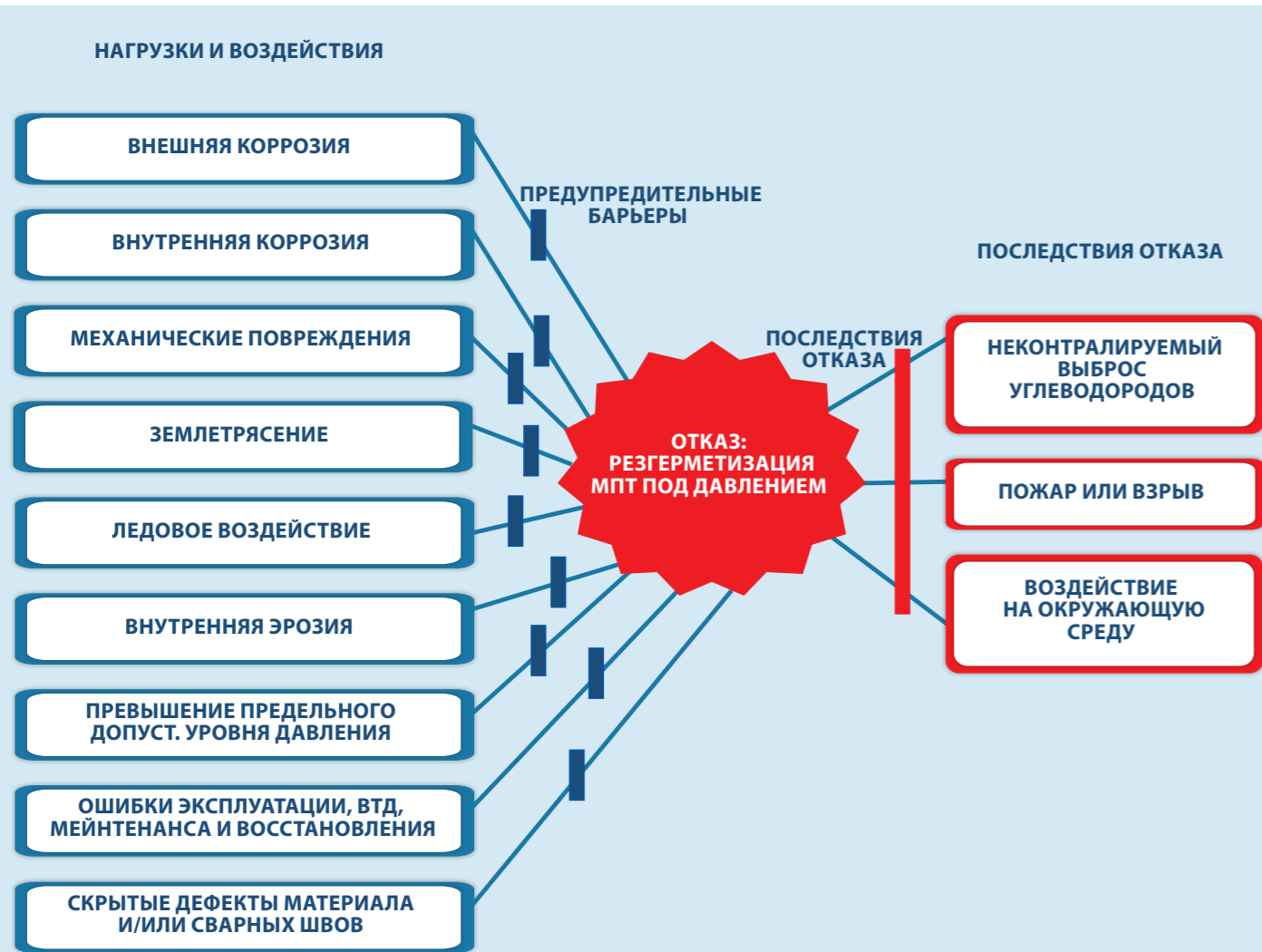


Рис.3. Обобщенная динамическая диаграмма «галстук-бабочка» для морских подводных трубопроводов.

живучесть, частота и качество инспекций, время, объем и стоимость ремонтов и др.) к любому параметру входа или их комбинаций.

Знание моментов времени плановых вмешательств в нормальное функционирование МПТ, а также моментов возникновения внештатных ситуаций и аварий, позволяет построить временной график дисконтированных расходов на эксплуатацию и потерь от отказов МПТ, а также рост и спад вероятности его отказа. Усреднение этих графиков по ансамблю реализаций ЖЦ дает оценку средних значений составляющих риска, и сам риск как функцию времени.

Для наиболее полного обоснования каждого решения перед его принятием целесообразно использовать диаграмму «галстук-бабочка» (ДГБ), которая, как известно, является синтезом дерева событий и дерева отказов для рассматриваемого объекта [6]. Использование ДГБ для каждой комбинации нагрузок и воздействий повышает точность оценки риска реального трубопровода, обладающего, как правило, пассивной и активной подсистемой защиты от запроектных нагрузок и воздействий в виде

предупредительных барьеров, которые снижают вероятность отказа-разгерметизации и парирующих барьеров, которые минимизируют последствия такого отказа [7] (Рис. 3). Этот подход позволяет также минимизировать углеродный след ЖЦ МПТ на фазе его активной эксплуатации [8]. Представляется, что метод ДГБ в контексте построения ЖЦ МПТ целесообразно использовать не однократно, а каждый раз при принятии соответствующих управляющих решений, причем для каждой комбинации нагрузок и воздействий отдельно. В результате ДГБ становится динамической, поскольку она трансформируется по ходу эксплуатации объекта, после каждого вмешательства в его функционирование.

Синтезом рассмотренных подходов является алгоритм оптимизации риска МПТ, блок-схема одного из вариантов которого представлена на рисунке 4.

В проблеме использования методологии риск-анализа для проектирования и эксплуатации отечественных МПТ существенную негативную роль играет человеческий фактор. Социологи-специалисты в области риск-анализа отмечают, что в советском обществе, где царил табу на сам

термин риск, за десятилетия жесткой детерминированной плановой экономики глубоко укоренилось предубеждение о том, что вероятностные подходы мало пригодны для практики, поскольку все вероятностные расчеты сложны для понимания, трудно верифицируемые, а прогнозы отказов не точны. Поэтому все расчетные риски не заслуживают серьезного рассмотрения, и, вообще, могут быть проигнорированы. Эта психология и установка передавалась из поколения в поколение и до сих пор существует в российском обществе.

Для нигилистов, отрицающих важность оценки риска (и ориентирующихся на «авось»), существует присказка, которая в переводе на русский звучит следующим образом:

«Если вы считаете, что риск – фальшивка, липа, ложь, подделка, иль обман. Он нагрянет к вам внезапно и ограбит ваш карман/посадит вас в зиндан/оденет вас в саван».

Впечатляющим примером справедливости этой присказки явилась экологическая катастрофа, которая произошла 29 мая 2020 года в районе Кайеркан г. Норильска на ТЭЦ-3 АО «НТЭК», где, из-за недоброкачественного ремонта, произошла разгерметизация резервуара хранения дизельного топлива, в результате которой 21,2 тыс. т. топлива вытекли из резервуара, вышли за пределы обвалования, попали в котлован, на прилегающую территорию и в ручей Безымянный. Площадь разлива достигла 180 тыс. кв. м. (18 га).

Оценочная стоимость качественного ремонта злопо-

лучного топливного резервуара, основанная на RBI и риск-анализе равна, в ценах 2020 года, 10 млн руб. По данным компании [11] финансовые последствия аварии выглядят следующим образом: 1) общие затраты на ликвидацию последствий аварии – приблизительно 12 млрд руб.; 2) дополнительные инвестиции в повышение промышленной безопасности энергетической инфраструктуры в 2020–2024 гг. – 100 млрд руб. Росприроднадзор оценил размер экологического ущерба водным объектам и почве в 148 млрд руб., а экологический ущерб в 21,4 млрд руб. (это без оценки ущерба рыбным запасам и биологическим ресурсам). Соотношение (величина совокупного ущерба) / (стоимость RBI и ремонта резервуара) при этом = 28000.

Совершенно другое, серьезное отношение к риску усматривается в методе мейнтенанса, основанном на коэффициенте возврата инвестиций ROI, который используется, в частности, при техническом обслуживании гражданских самолетов и сложного медицинского оборудования [9], и вычисляется следующим образом:

$$ROI = (\text{предотвращенные затраты/инвестиции}) - 1. \quad (1)$$

В приложении к МПТ в уравнении (1) предотвращенные затраты (ПЗ) – это экономическая выгода, равная разнице между общей стоимостью жизненного цикла МПТ, находящегося на внеплановом обслуживании, и общей стоимостью жизненного цикла МПТ при использовании

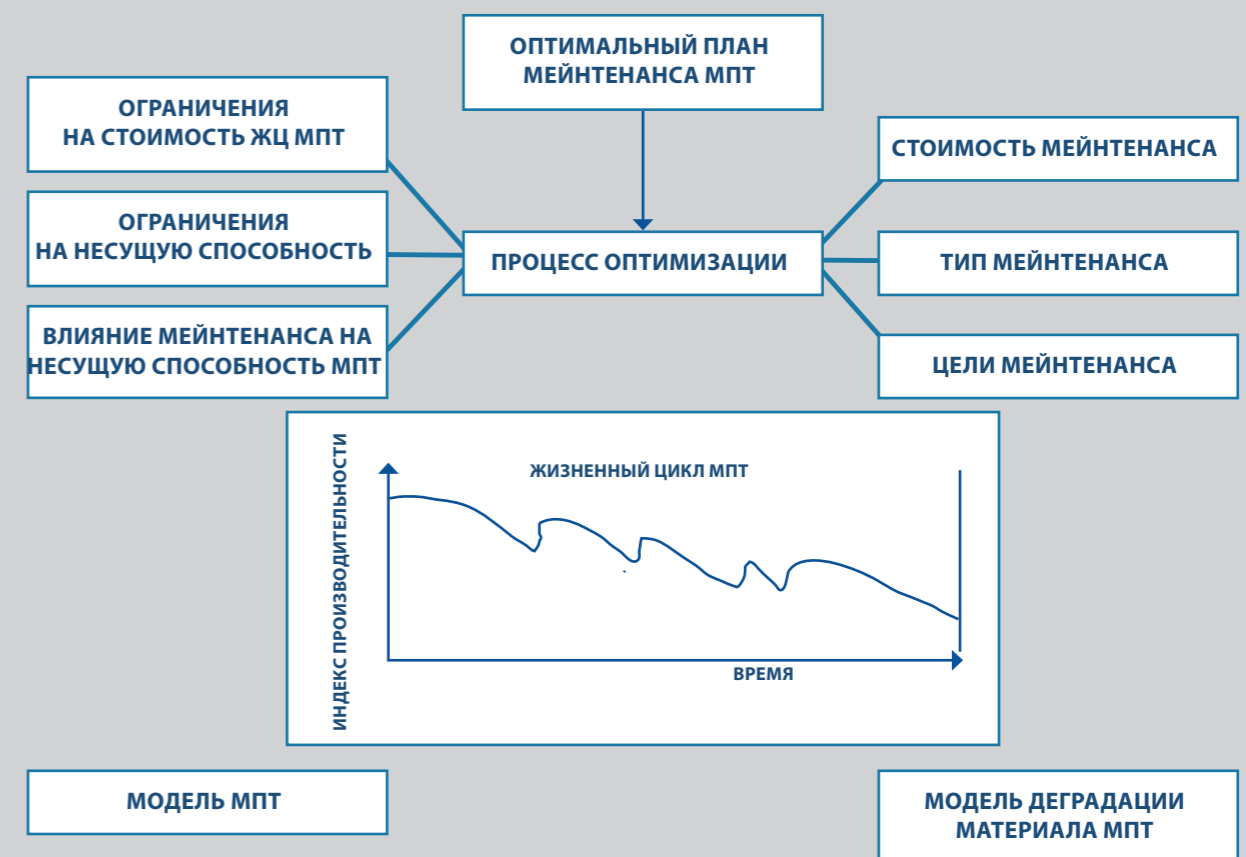


Рис. 4. Обобщенная процедура риск-ориентированной оптимизации мейнтенанса МПТ.

*Чем важнее объект, тем больше данных необходимо для получения состоятельной оценки риска его эксплуатации. Чем точнее диагностика, тем точнее оценка риска. Чем меньше мы знаем о свойствах случайных или неопределенных параметров стратегически важных объектов, тем грубее оценки риска, основанные на таких данных, и тем менее полезны они для лиц, принимающих решения. При грубой диагностике возможность реализации риск-ориентированной диагностики и технического обслуживания стратегических инфраструктур близка к нулю.*

конкретного, в частности, риск-ориентированного мейнтенанса. Тогда:

$$ПЗ = Сожц - (C_{ром} - I_{ром}), \quad (2)$$

Где Сожц – общая стоимость ЖЦ трубопровода, находящегося на внеплановом обслуживании,  $C_{ром}$  – общая стоимость ЖЦ МПТ при использовании риск-ориентированного мейнтенанса,  $I_{ром}$  – стоимость инвестиций, связанных с имплементацией этого мейнтенанса.

Подставляя выражение (2) в формулу (1), имеем:

$$ROI = Сожц - (C_{ром} - I_{ром}) / I_{ром} - 1. \quad (3)$$

Если  $ROI \leq 0$ , то риск-ориентированный мейнтенанс невыгоден. Если  $ROI > 0$ , то риск-ориентированный мейнтенанс целесообразен.

Для применения данного подхода ЛПР должно доверять тем величинам, которые закладываются в формулы (1)–(3). А для этого необходимо иметь продвинутое научно-обоснованную суверенную технологию диагностики и мейнтенанса МПТ.

В завершение статьи приведем некоторые дополнительные соображения относительно риск-анализа МПТ.

Анализ риска подразумевает возможность измерения риска с необходимой точностью. Несмотря на то, что риск нельзя измерить непосредственно, его можно оценить опосредованно, через физически измеримые параметры, исходя из общей теории измерений, которая основана на том, что точность измерений всегда относительна. Базой является проведение независимых измерений другим,

более точным инструментом. Инструментом наивысшей точности при этом является мера, хранящаяся в Государственной/Международной Палате мер и весов. Все остальные измерительные инструменты (технологии) калибруются относительно инструмента/меры Палаты мер и весов. Техногенный риск МПТ вычисляется через вероятностные характеристики параметров их дефектов и аномалий, выявляемых с помощью продвинутой диагностики и парируемый с помощью современного мейнтенанса.

В рискологии нет установившейся методики верификации результатов того или иного риск-анализа. Если исходная статистика достаточно богата, верификацию можно провести исходя из следующих соображений [10]. Можно один и тот же исходный материал описать разными независимыми, но эквивалентными вероятностными способами: разными ФПВ, или разными случайными функциями. При этом необходимо различать алеаторные и эпистемные случайные величины, а также величины, которые оставаясь неопределенными, не подпадают под категорию вероятностных величин или функций. Если получаемые при этом конечные результаты близки, можно считать, что верификация состоялась.

Качество и количество исходных данных, предназначенных для оценки риска МПТ, однозначно диктуют выбор метода проведения риск-анализа. Отсутствие статистических данных, вынуждает проводить риск-анализ используя интервальные оценки, нечёткую логику или теорию очевидностей (свидетельств) Демпстера–Шафера, основанную на субъективных мнениях экспертов и профессионалов.

При скудной информации возможность эквивалентной двоякой трактовки исходного материала сильно сокращается или становится невозможной. Единственным критерием истины становится практика, когда ЛПР принимает решение и рискует своей «шкурой», основываясь на единственном грубом количественном риск-анализе и собственной, неизбежно субъективной, оценкой ситуации.

Анализ доступных авторам отчетов о проведении внутритрубной дефектоскопии отечественных трубопроводов показывает, что они выполняются на сравнительно низком технологическом уровне. В отчетах: 1) отсутствуют оценки погрешностей измерений присущих конкретно данному ВТИ при его использовании в данном диагностическом прогоне; 2) отсутствуют вероятности пропуска опасных дефектов; 3) число верифицированных измерений обнаруженных дефектов статистически незначимо (не превышает 10, а должно быть не менее 30, лучше 50 измерений ДДК).

Как следствие, содержание этих отчетов не позволяет дать объективную вероятностную оценку степени повреждения трубопровода и величины его остаточного ресурса по несущей способности. Скудость представленных в отчетах данных не позволяет отечественным трубопроводным фирмам перейти на риск-ориентированные диагностику, мейнтенанс и ЖЦ. При нынешнем состоянии дел, об этом не может быть и речи.

Чем важнее объект, тем больше данных необходимо для получения состоятельной оценки риска его эксплуатации. Чем точнее диагностика, тем точнее оценка риска. Чем меньше мы знаем о свойствах случайных или неопределенных параметров стратегически важных объектов, тем грубее оценки риска, основанные на таких данных, и тем менее полезны они для лиц, принимающих решения. При грубой диагностике возможность реализации риск-ориентированной диагностики и технического обслуживания стратегических инфраструктур близка к нулю.



## ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

- Исходя из постулата, что суверенные нормы обеспечения безопасности МПТ должны основываться исключительно на отечественных технологиях, можно утверждать, что это однозначно требует отказа от применения иностранных технологий ВТД.
- Разработка суверенных риск-ориентированных норм проектирования и эксплуатации Российских МПТ должна сопровождаться, причем, с опережением, созданием отечественной технологии их диагностики, мониторинга, и мейнтенанса (технического обслуживания, ремонта и восстановления после аварии или инцидента), которая способна, по уровню своей разработки, снабжать ЛПР всеми данными, необходимыми для объективной оценки эксплуатационного риска МПТ.
- Целесообразно прочесть курс лекций по современным методам внутритрубной диагностики и риск-ориентированным методам проектирования и эксплуатации морских подводных трубопроводов для всех сотрудников отечественных фирм, имеющих дело с проектированием и эксплуатацией МПТ.
- Необходимо определиться с финансированием разработки технологий, которые обеспечивают применение риск-ориентированного подхода к проектированию и эксплуатации МПТ.
- Целесообразно инициировать пилотный проект по калибровке программ расчета риска отечественных МПТ.
- Оптимальный подход к решению рассматриваемой проблемы в условиях экзистенциальных угроз усматривается в синергетической кооперации владельцев/операторов Российских МПТ, исполнительных и законодательных органов федерального уровня, Союза нефтегазопромышленников России и академической науки.
- Это позволит привести эксплуатацию отечественных МПТ в полное соответствие с федеральным законом ФЗ от 21.07.1997 N 116-ФЗ (ред. от 08.08.2024) "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" (с изменениями и дополнениями, вступившими в силу с 01.09.2024).

## ЛИТЕРАТУРА:

- Шмаль Г.И., Тимашев С.А. Первоочередные безотлагательные задачи создания норм проектирования и эксплуатации безопасных морских подводных трубопроводов России. // Морская наука и техника, специальный выпуск № 12, май 2024 г.
- Лепихин А.М., Лещенко В.В., Махутов Н.А. Проблемы и возможности развития концепции риска технических систем. Вычислительные технологии, 2023, том 28, № 4, с. 22–34, 2023. DOI:10.25743/ICT.2023.28.4.003
- Timashev S.A., Holistic Approach to Full Statistical Analysis of ILI Results. Proceedings of International Pipeline Conference IPC 2005, #72.
- Timashev S.A., Bushinskaya A.V., Diagnostics and Reliability of Pipeline Systems. Springer, 2015.
- Timashev S.A., Kuzmin A.B. A powerful tool for assessing locations of defects missed-out by ILI. // Proceedings of International Pipeline Conference IPC 2004.–Calgary, Alberta, October 4-8, 2004, #98
- Сивоконь И.С. Риски: структура и анализ. Москва-Волгда, Инфо-Инженерия, 2024.
- Самусева Е.А. Анализ опасности морских трубопроводов для количественной оценки риска аварий. – М.: ЗАО «НТЦ Исследований промышленной безопасности», 2011.
- Тимашев С.А., Ковальчук Т.Г., Бушинская А.В., Шмаль Г.И. Углеродный след морских подводных трубопроводов. Морская наука и техника, № , 2024.
- Zio E. Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures. Reliability Engineering and System Safety. 2016; (152):137–150.
- Тимашев С.А., Надежность больших механических систем. М., Наука 1982.
- <https://www.nornickel.ru/sustainability/chpp-3/>
- Бушинская А.В., Тимашев С.А. Оптимальное надежное проектирование строительных конструкций по критерию индекса качества жизни: препринт. Екатеринбург: Уральский рабочий, 2023. – 116 с. ISBN 978-5-85383-950-2.