

ВОЗМОЖНОСТИ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ МОРСКИХ НЕФТЕГАЗОВЫХ СООРУЖЕНИЙ



А.М. Лепихин, д.т.н., главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск, НТЦ «Нефтегаздиагностика», г. Москва

Одним из основных приоритетов Морской доктрины Российской Федерации является обеспечение безопасного функционирования морских трубопроводных систем по транспортировке углеводородного сырья, имеющих стратегическое значение для обеспечения внутреннего потребления и развития внешнеэкономической деятельности. В число приоритетов также входят опережающее развитие российской научно-технической базы и предотвращение антропогенных и техногенных аварий и катастроф на морских объектах. Указанные приоритеты тесно связаны с решением комплексной проблемы обоснования и обеспечения безопасности морских нефтегазовых сооружений. Различные аспекты этой проблемы неоднократно обсуждались на совещаниях Межведомственного экспертного совета по безопасности морских подводных трубопроводов и объектов [1-3]. В зарубежной литературе эта проблема также получает должное отражение [4-7]. С учетом этих публикаций остановимся на некоторых вопросах обоснования безопасности морских нефтегазовых сооружений.

Требования безопасности объектов различного назначения, в том числе морских нефтегазовых сооружений, традиционно выводятся на основе анализа статистических данных о расследованиях аварий. Эти требования не являются оптимальными, поскольку формулируются на основе малого объема данных. К тому же прецедентный подход нельзя признать рациональным, поскольку он дает оценки «пост-фактум». Более предпочтительным является подход обоснования безопасности до ввода объектов в эксплуатацию и до возникновения аварий.

В соответствии с действующими нормами, для создания объектов различного назначения, в том числе морских нефтегазовых сооружений, проводится комплекс исследований и расчетов, включающий [8]:

- лабораторные испытания материалов;
- расчетно-экспериментальные исследования поведения материалов в заданных условиях эксплуатации;
- исследования повреждающих факторов и механизмов разрушения;
- натурные испытания;
- проектные расчеты прочности и ресурса;
- поверочные расчеты трещиностойкости и живучести конструкций;
- неразрушающий контроль и диагностирование технического состояния конструкций;

- анализ надежности;
- анализ риска.

На основе этого комплекса проводится оценка соответствия конструкции требованиям безопасной эксплуатации. Следует отметить, что в настоящее время нет единого показателя безопасной эксплуатации. При оценке соответствия используется синтез различных показателей и критериев.

Первый уровень обоснования безопасности заключается в использовании в проектных расчетах нормативно установленных коэффициентов запаса (безопасности) по материалам, нагрузкам, надежности и ответственности конструкций. Этот уровень оценки безопасности проводится всегда и для любых типов конструкций морских нефтегазовых сооружений. Условие обеспечения безопасности на этом уровне расчетов определяется выполнением ограничений следующих видов:

$$\sigma \leq [\sigma] = \min[R_{0.2}/n_{0.2}, R_m/n_m] \quad (1)$$

$$F \leq [F] = F_L/n_F \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n F_i \gamma_{Fi} \leq R_n A \gamma_c / \gamma_m \gamma_n \quad (3)$$

где $R_{0.2}$, R_m – нормативные характеристики условного предела текучести и временного сопротивления разрушению; F_L – разрушающая нагрузка; F_i – эксплуатационные нагрузки; R_n – расчетное нормативное сопротивление металла разрушению; A – площадь сечения элемента конструкции; $n_{0.2}$, n_m , n_F , γ_{Fi} , γ_c , γ_m , γ_n – коэффициенты запаса.

Второй уровень заключается в расчетах надежности с определением безопасного среднего ресурса t_{cp} или вероятностей безотказной работы $P(t)$. Как правило, эти расчеты проводятся в рамках поверочных расчетов для наиболее ответственных объектов, эксплуатирующихся в условиях высоких уровней нагрузок и воздействий. Условие обеспечения безопасности формулируются в виде ограничений по ресурсу и вероятности безотказной работы:

$$t_{cp} \geq [t], \quad P(t) \geq [P] \quad (4)$$

Третий уровень, основанный на анализе риска $R(t)$, проводится крайне редко в силу недостаточности существующей теоретической и нормативно-методической базы. Условие обеспечения безопасности по критерию

риска в общем случае формулируются в виде следующего ограничения:

$$R(t) = P_f(t) \times C_f(t) \leq [R] = [P_f] \times [C_f] \quad (5)$$

где P_f – вероятность аварии с ущербом C_f ; $[P_f]$ и $[C_f]$ – допустимые уровни вероятностей аварий и ущербов.

При обосновании безопасности на основе неравенства (5) возникает две нетривиальные задачи. Первая задача заключается в определении риска аварий $R(t)$ для конкретного объекта в заданных условиях эксплуатации. Вторая задача состоит в определении допустимого или приемлемого уровня риска.

Анализ риска аварий технических объектов проводится с использованием ряда специфических методов, таких как [9, 10]:

- анализ видов и последствий отказов (Failure Mode Effect Analysis, FMEA);
- анализ характера и критичности отказов (Failure Mode Effect and Critically Analysis, FMECA);
- анализ опасностей и работоспособности (Hazard and Operability Analysis, HAZOP);
- анализ надежности персонала (Human Reliability Analysis, HRA);
- анализ дерева неисправностей (Fault Tree Analysis, FTA) и анализ дерева событий (Event Tree Analysis, ETA);
- вероятностный анализ риска (Probabilistic Risk Assessment, PRA).

Анализ видов и последствий отказов (FMEA) является первой систематической технологией анализа отказов технических систем, включая технологические системы, механические системы и электронные системы. FMEA в основном используется для идентификации, описания и контроля потенциальных видов отказов, причин отказов и анализа их последствий в рассматриваемой системе или процессе. Метод анализа видов, последствий и критичности отказов (FMECA) является развитием технологии FMEA. Он состоит из двух частей: анализа видов и последствий отказов (FMEA) и анализ их критичности (CA). Это один из широко используемых самых эффективных и самых важных аналитических методов в современной технике анализа надежности и риска сложных

систем. На основе FMECA проводится приоритизация видов и последствий отказов и оценка критичности рисков. Анализ опасностей и работоспособности (HAZOP) используется для выявления и устранения потенциальных опасностей в системах или процессах до того, как произойдет инцидент, который может повлиять на безопасность. Исследования HAZOP обычно проводятся при проектировании и строительстве новых объектов, при добавлении новых процессов или при их изменении. Анализ надежности персонала (HRA) фокусируется на выявлении человеческих ошибок в системе «человек-машина-среда» и их влиянии на безопасность объекта. В настоящее время этот анализ включается свыше 10 различных методов и модификаций и активно развивается. Указанные методы дают качественные представления о возможных рисках аварий, которые, с использованием различных систем ранжирования, могут приводиться к некоторым количественным классам риска.

Для морских подводных объектов более предпочтительными можно считать методы непосредственной количественной оценки риска. К ним относятся анализ деревьев неисправностей (FTA) и событий (ETA) и вероятностный анализ риска (PRA). Метод FTA и ETA широко используется для количественного анализа риска аварий сложных технических систем. Первая часть этого анализа заключается в определении вероятностей аварий объектов по вероятностям отказов отдельных компонент, процессов или отдельных внешних событий. Вторая часть направлена на анализ исходов событий после возникновения аварии. В обоих случаях определяются количественные оценки вероятностей. Основным недостатком этого подхода заключается в необходимости наличия статистической информации по отказам оборудования и исходам событий. При этом необходимо хорошее понимание структурной взаимосвязи элементов объекта.

Вероятностный анализ риска (PRA) является наиболее эффективным методом, основанным на синтезе новейших достижений теории надежности, конструкционной прочности, механики разрушений, вычислительной механики. Рассмотрим некоторые ключевые аспекты этого подхода. Обычно PRA основывается на статистических данных об интенсивностях отказов λ , с оценкой удельного риска в виде:

Класс безопасности	Вероятность аварии, 1/год	Ущерб, руб.	Длительность остановки объекта
Класс 1	$\leq 10^{-6}$	$10^9 - 10^{10}$	Свыше 1 года
Класс 2	$10^{-5} - 10^{-6}$	$10^7 - 10^9$	6-12 мес.
Класс 3	$10^{-4} - 10^{-5}$	$10^5 - 10^7$	2-3 мес.
Класс 4	$10^{-3} - 10^{-4}$	$10^4 - 10^5$	до 1 мес.

Таблица – Классы безопасности морских нефтегазовых сооружений



$$R(t) = \lambda_i(t) \times C_i(t) \quad (6)$$

Как отмечалось выше, такие оценки могут применяться для массовых однотипных объектов, находящихся в однородных условиях эксплуатации длительное время. В определенной мере это применимо к морским трубопроводным системам. Для уникальных объектов, например, таких как морские платформы, такие оценки крайне затруднительны или вовсе неприменимы. В таких случаях для количественных оценок риска (5) проводятся расчеты вероятностей аварий по условиям достижения предельных состояний конструкций:

$$P_f(X) = P\{L(X) \leq 0\} = \int_{L(X) \leq 0} f(X) dX, f(X) = \prod_{i=1}^n f(x_i) \quad (7)$$

Основой расчетов вероятностей (7) являются методы теории надежности и математической статистики. Для определения вероятностей (7) необходимо задать

уравнение предельного состояния $L(X)=0$, обосновать модель отказов и модели, определяющие совместную функцию плотности распределения вероятностей $f(X)$ вектора случайных переменных $X = \{x_i, i = 1, n\}$. Сложности расчетов вероятностей (7) связаны с необходимостью анализа многопараметрических механизмов повреждений конструкций, приводящих к предельным состояниям, и определении функций плотностей распределений вероятностей $f(x_i)$ для учитываемых случайных переменных x_i . Описание возможностей и методов таких расчетов выходит за рамки данной статьи. Следует отметить, что оценки риска в форме (5), с учетом (7), основаны на вероятностных интерпретациях условий (1) – (3), что принципиально отличает их от известных статистических и экспертных оценок риска аварий.

Остановимся теперь на правой части выражения (5). Приемлемость рассчитываемого риска в настоящее вре-

мя оценивается с использованием четырех подходов [9, 11]:

- сравнением с аналогами;
- оценкой соответствия хорошо зарекомендовавшим себя правилам, практике и функциям;
- на основе принципа ALARP;
- на основе принципа ALARA.

Первый подход предполагает наличие аналогов, безопасность которых хорошо изучена и не вызывает вопросов. В силу уникальности морских подводных сооружений метод сравнения с аналогами трудно реализуем, поскольку сложно найти изделия или объекты, совпадающие по конструктивным формам и условиям эксплуатации. Для трубопроводных систем иногда используются аналоги из атомной промышленности, с некоторым понижением допустимых уровней риска.

Второй подход, на основе оценки соответствия правилам, практике и функциям, является традиционным направлениям отечественной и зарубежной системы обеспечения безопасности. Основным недостаток этого направления заключается в том, что соответствие нормам и требованиям не имеет количественных измерителей. Поэтому, не смотря на выполнение норм и требований и длительную безаварийную эксплуатацию объекта уровень его безопасности остается неизвестным.

Количественные оценки допустимого уровня безопасности формулируются на основе принципов ALARP и ALARA. Принцип ALARP определяет допустимый риск как настолько низкий, насколько это практически осуществимо. Фактически в это принцип закладывает разумный компромисс между безопасностью и затратами на повышение безопасности. Этот компромисс может задаваться в виде матрицы рисков в координатах «вероятность события – масштаб ущерба» или диапазоном вероятностей аварий. В ряде зарубежных стандартов для морских сооружений допустимый интервал вероятностей аварий составляет $10^{-3} - 10^{-6}$ 1/год.

Принцип ALARA определяет допустимый риск настолько низким, насколько это достижимо при существующей научно-методической и технической базе. Это направление обеспечения безопасности оказывается более затратным, по сравнению с подходом на основе принципа ALARP, поскольку требует самых совершенных научных и технических достижений. В последнее время для критически важных объектов инфраструктуры предпринимаются попытки объединения обоих принципов в форме исключения нижней границы в ALARP. В частности, такой подход закладывается в голландской и бельгийской системе приемлемости риска, в радиационной безопасности и в ядерной промышленности как особый тип принципа предосторожности.

Анализ статистики аварийности морских подводных трубопроводов показывает, что вероятности аварий находятся в интервалах $10^{-3} - 10^{-5}$ 1/год. Интервал ущербов составляет $10^4 - 10^7$ \$/год. Для морских платформ вероятности аварий измеряются величинами $10^{-4} - 10^{-5}$ 1/год, а ущербы могут достигать 10^9 \$. Если исходить из этих данных, то для морских нефтегазовых сооружений можно предложить следующие классы безопасности (табл.).

Резюмируя изложенное выше, можно отметить следующее. Методология обоснования безопасности морских подводных сооружений находится в стадии формирования моделей, методов и критериев. Большинство традиционных подходов и методов здесь оказывается

недостаточно эффективными или вовсе неприемлемыми. Наиболее перспективным направлением можно считать обоснование безопасности по критериям риска. Практическая реализация этого направления требует создания ряда нормативно-методических документов, определяющих:

- общую концепцию обоснования безопасности по критериям риска;
- методы количественной оценки риска аварий;
- методы оценки допустимого риска аварий;
- требования к исходной информации и методам ее получения;
- требования к представлению результатов оценки риска и обоснования безопасности.

Основное внимание должно уделяться учету особенностей морских подводных сооружений как стратегически важных объектов для экономики Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. 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.
2. Махутов Н.А. Прочность, ресурс, живучесть и безопасность морских подводных трубопроводов и объектов: обоснование и нормирование // *Морская наука и техника*, 2024. - №16, с. 4-11.
3. Лепихин А.М. Безопасность морских нефтегазовых сооружений: проблемы и решения // *Морская наука и техника*, 2024. - №16, с. 22-27.
4. Comparative risk analysis for deepwater production systems. Final project report / R.B. Gilbert. Texas A&M University, 2001. 368 p.
5. Vinnem J.E. Offshore risk assessment principles, modelling and applications of QRA Studies. Springer. 2007. – 573 p.
6. Marhavalas P.K., Koulouriotis D., Gemeni V. Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009 // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 24 (2011) 477-523.
7. Marhavalas P.K., Koulouriotis D.E. Risk-acceptance criteria in occupational health and safety risk-assessment – the state-of-the-art through a systematic literature review // *Safety* 2021, 7, 77. <https://doi.org/10.3390/safety7040077>.
8. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: в 2 ч. Новосибирск: Наука, 2005. – Ч.1: Критерии прочности и ресурса – 494 с. – Ч.2: Обоснование ресурса и безопасности. – 610 с.
9. Tang Y., Yao J., Wang G., Zhang Z., He Y., Jing J. Risk Identification and Quantitative Evaluation Method for Asset Integrity Management of Offshore Platform Equipment and Facilities // *Mathematical Problems in Engineering* Volume 2019, Article ID 1915842, 14 pages <https://doi.org/10.1155/2019/1915842>
10. Trbojevic V.M., Bellamy L.J., Brabazon P.G., Gudmestad T., Rettedal W.K. Methodology for the analysis of risks during the construction and installation phases of an offshore platform // *J. Loss Prev. Process Ind.*, 1994, Vol. 7, N4, p. 350-359.
11. Guidance notes on Risk assessment application for marine and offshore industries. American Bureau of Shipping. 2020. – 73 p.