

DOI: 10.17122/ntj-oil-2018-4-60-66
УДК 622.691.4-049.5

А.М. Сайфутдинов, Г.Е. Коробков (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация)

АНАЛИЗ СЦЕНАРИЕВ КАСКАДНОГО РАЗВИТИЯ ИНЦИДЕНТОВ ПРИ МОРСКОЙ ТРАНСПОРТИРОВКЕ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Artur M. Saifutdinov, Gennadiy E. Korobkov (Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation)

ANALYSIS OF CASCADE INCIDENTS SCENARIOS AT LIQUID NATURAL GAS MARINE TRANSPORTATION

Введение

Цель оценки рисков - выявить наиболее уязвимые места промышленной безопасности объекта, чтобы свести к минимуму или предотвратить отдельно встречающиеся случаи нарушения технологических процессов на этапе проектирования и эксплуатации. В настоящее время отсутствует теория оценки и качественных и количественных показателей риска при эксплуатации систем морской транспортировки сжиженного природного газа.

Цели и задачи

Разработка методик качественного и количественного анализов событий и оценки рисков в процессе морской транспортировки сжиженного природного газа при разгерметизации танкеров или хранилищ.

Результаты

Предложены общие сценарии каскадного развития событий при инцидентах. На примере инцидента «Столкновение» показаны качественный и количественный анализы события для последующей оценки риска.

Background

The purpose of risk assessment is to identify the most vulnerable places of industrial safety of the facility in order to minimize or prevent separately occurring cases of technological process violation during the design and operation phase. At present, there is no theory of assessment and qualitative and quantitative indicators of risk in the operation of marine transportation systems for liquefied natural gas.

Aims and Objectives

Development of methods for qualitative and quantitative analyses of events and risk assessment in the process of liquefied natural gas marine transportation in the event of depressurization of tankers or storage facilities.

Results

General scenarios of the cascade development of events in the incidents are proposed. The example of the incident «Collision» shows qualitative and quantitative analyses of the event for subsequent risk assessment.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, инцидент, каскадное развитие событий, столкновение, танкер, риск

Key words: liquefied natural gas, incident, cascading events, collision, tanker, risk

Анализ рисков в промышленности - это определение потенциально возможных потерь. Управление рисками является первоочередной необходимостью в менеджменте предприятия. Количественный анализ рисков (КолАР) - это процедура системы менеджмента, заключающаяся в определении сценариев развития событий и количественной характеристики величин вероятных потерь.

Ввиду отсутствия достаточного отечественного опыта эксплуатации систем морской транспортировки сжиженного природного газа (СПГ) для формирования качественных и количественных показателей риска в данной отрасли следует обратиться к зарубежным экспертным мнениям и оценкам. Последние и наиболее полные данные сосредоточены в отчете сессии экспертов в области морской транспортировке СПГ под названием HAZID, результаты которой опубликованы в [1]. Одним из значимых результатов данной сессии является разработка перечня (регистра) рисков, характерных для современных танкеров СПГ. Данный перечень содержит 120 видов опасностей при различных технологических операциях. На основе данного ранжирования опасностей в отчете HAZID был сформирован перечень сценариев для дальнейшего анализа риска по каждому из них (таблица 1). Сценарий «Столкновение» для танкеров СПГ характеризуется высокой частотой инцидентов. Далее проведем качественную и количественную оценку выбранного сценария развития событий.

*Качественный анализ сценария
«Столкновение»*

Принимаем как факт, что столкновение произошло: метановоз протаранен другим судном либо сам нанес удар. Если танкер выступает в качестве «атакующего», то в

данном случае развитие события для него будет более благоприятным, так как удар будет воспринят носовой частью судна. Кроме того, в момент столкновения танкер может быть загружен либо выполняет балластный переход, от этого также зависят развитие событий и последствия.

В случае если танкер подвергается удару со стороны, то у него могут оказаться пробитыми как внешняя стенка, так и внутренняя. В случае пробоя внутренней оболочки возникнет истечение СПГ. Как следствие возможно каскадное развитие событий - образование «бассейна» СПГ, быстрый фазовый переход, возгорание, дрейф облака газозооной смеси, взрыв. Кроме того, воздействие низкой температуры жидкости на внешнюю часть корпуса вызовет разрушение, потерю остойчивости и возможное затопление танкера. Если проявились указанные опасности, то ошибки во время эвакуации экипажа могут привести к гибели людей. Таким образом, при оценке риска для сценария «Столкновение» было получено дерево событий следующего вида (рисунок 1).

*Количественный анализ сценария
«Столкновение»*

Ранее представленная модель сценария «Столкновения» предполагает определение частоты события из расчета на 1 год эксплуатации судна в рамках суммарной нагрузки флота танкеров СПГ. Для этого использовалась известная статистика инцидентов с метановозами, на основании которой была получена величина $6,7 \times 10^{-3}$. Данная величина включает в себя события, в которых танкеры СПГ выступали в качестве таранящего объекта, и события, в которых танкеры были подвержены удару со стороны других судов.

Таблица 1. Перечень сценариев событий и их основные причины

№ п/п	Сценарий события	Основные причины
1	Столкновение	Ошибка навигации, человеческий фактор, нарушение регламентов, отказ силовой установки, повреждение рулевого управления, сложные погодные условия
2	Посадка на мель	Ошибка навигации, человеческий фактор, нарушение регламентов, отказ силовой установки, повреждение рулевого управления, сложные погодные условия
3	Пожар на борту	Отказ системы противопожарной защиты, отказ системы ПАЗ, нарушение техники безопасности, нарушение регламентов
4	Нарушение остойчивости судна	Сбои в процессе загрузки/баллаستировки судна, аномальное волнение морской поверхности
5	Утечка газа	Нарушение целостности грузовых танков, отказ предохранительных клапанов, повреждение трубопроводов, ошибки при технологических переключениях, перегруз
6	Разливы СПГ при погрузочно-разгрузочных операциях	Нарушение регламентов, отказ оборудования, превышение скорости погрузки/разгрузки, повреждение швартовочных тросов, повреждение/дефект балластировочной системы, нарушение стабильности, ролловер, человеческий фактор, контакт с проходящим судном
7	Повреждения о грузовой причал	Нарушение регламентов, отказ силовой установки, нарушение/дефект швартовочных тросов, человеческий фактор



Рисунок 1. Дерево событий для определения риска при сценарии «Столкновение»

Далее принимаем, что вероятность последнего события составляет 50 %, т.е. 0,5. При этом, в случае когда судно является атакующим, вероятность повреждения грузовых систем и утечки СПГ пренебрежимо мала, так как удар приходится в носовую часть корпуса. Ввиду того, что вероятность утечки мала (или равна нулю), соответственно величина риска тоже равна нулю.

При нахождении танкера в пути половина рейсов совершается в загруженном состоянии, половина - балластные переходы. Принимаем величину для условия загрузки судна 0,5.

Модель повреждения судна разобьем на два этапа.

Первый - судно получает удар в зоны, в которых отсутствует СПГ. Для типового мембранного танкера в носовой части судна это в пропорции 2/15, и 1/5 - с кормовой стороны судна. Вероятность получения повреждения в данные зоны определим, используя статистику по другим судам, представленную в [2]. Согласно данному документу, значения вероятностей следующие: $P(2/15) = 0,2$, $P(1/5) = 0,15$. Таким образом, суммарная вероятность получения повреждения вне грузовых зон составляет 0,35.

На втором этапе определяем критичность полученных повреждений для сохранения или потери плавучести судна. Рассматриваем два варианта. Первый - повреждение внешнего корпуса. Большинство столкновений происходят на малой скорости и, как правило, не приводят к сквозному повреждению внешней стенки. Кроме того, многие незначительные столкновения происходят с буксирами. Отметим, что в отношении танкеров СПГ доля столкновений с буксирами составляет 1/3. Таким образом, принимаем, что 1/3 столкновений с буксирами не приводят к пробоям внешней стенки. Следовательно, данный вид столкновений не является критичным, так как не приводит к проникновению воды и потери остойчивости судна. Для определения вероятности пробоя стенки используем значения, которые были установлены для других видов судов, таких как пассажирские лайнеры $P = 0,38$ [3] и балкеры $P = 0,35$ [4]. Выше было обозначено, что 1/3

столкновений без пробоя, следовательно, 2/3 столкновений предполагают гипотетическое проникновение воды в межстенное пространство.

Вероятность проникновения воды в межстенное пространство танкера рассчитаем как среднее арифметическое:

$$P = (2/3 \cdot (0,38 + 0,35)) / 2 = 0,24.$$

В случае, когда произошел пробой стенки, это не всегда гарантирует потерю остойчивости или затопление судна. В соответствии с документом IGS Code для газовозов [5], размер пробоины должен составлять $1/3 \cdot L^{2/3}$, где L - длина судна, или не менее 14,5 м. Размер пробоины в поперечном направлении должен составлять 1/5 ширины судна (B/5), или не менее 11,5 м. При данных размерах повреждений газовоз теряет остойчивость, и возможно его затопление. В соответствии со статистическими данными [6], вероятность получения критических повреждений составляет $P(L) = 0,6$ в продольном направлении и $P(B) = 0,35$ в поперечном направлении.

Вероятно, что в случае получения одновременного повреждения внешней и внутренней стенок судно потеряет аварийную остойчивость при движении с грузом, поэтому все повреждения двойной стенки считаем критическими. Для типового метановоза расстояние между внутренними стенками составляет 2,3 м. Кроме того, толщина теплоизоляции составляет ещё 0,5 м. Суммарное расстояние составляет порядка 1/15 от ширины судна (B/15). Повреждение глубиной более B/15 рассматриваем как критическое. В соответствии с документом [6], вероятность получения таких повреждений составляет 0,6 при рейсе судна с грузом. Также вероятность получения критических повреждений при балластном переходе составляет 0,36.

Таким образом, определим *вероятности получения критических повреждений для танкера СПГ*:

- *вероятность критического повреждения вне грузовой зоны*

$$P = 0,24 \cdot 0,6 \cdot 0,35 = 0,050;$$

- *вероятность критического повреждения в грузовой зоне*

$P = 0,24 \cdot 0,60 = 0,144$ во время рейса с грузом;
 $P = 0,24 \cdot 0,36 = 0,086$ при балластном переходе.

Модель определения частоты утечки СПГ представим следующим образом. Для того чтобы утечка произошла, должны выполняться три условия:

- а) столкновение происходит в загруженном состоянии;
- б) повреждение происходит в грузовой зоне корпуса судна;
- в) полученное повреждение является критическим.

Частота возникновения утечки рассчитывается в соответствии с моделью повреждения и принимает значение 0 или 1. Предположение, что утечка невозможна при балластном переходе, в некоторой степени идеализировано, так как всегда сохраняется остаток от 5 % до 15 % общего объема. Но, тем не менее, принимаем, что при порожнем рейсе вероятность утечки равна 0.

В случае, когда утечка происходит, далее каскадом следует развитие опасностей, связанных с СПГ. В общем расчете риска это прогнозируется отдельной моделью. Асфиксия или криогенный ожог возможны при условии, если в момент столкновения члены экипажа находятся в грузовой зоне, что представляется маловероятным, и, соответственно, вероятность возникновения пренебрежимо мала.

При утечке СПГ принимаем возникновение таких опасностей как криогенный «шок» контактирующих с СПГ материалов судна и быстрый фазовый переход (БФП). Вероятность их материализации 1 в случае утечки. При этом оговариваем, что БФП сам по себе критических повреждений судну не наносит.

При каскадном развитии событий после БФП возможны три сценария развития событий:

- 1) формирование и рассеивание облака газозадышной смеси без воспламенения;

2) воспламенение облака над поверхностью «бассейна» СПГ от искры в результате повреждения металла корпуса, пожар «бассейна» СПГ;

3) позднее возгорание дрейфующего облака с распространением пламени к источнику СПГ, пожар пролива.

По мнению экспертов сессии HAZID, вероятность первого сценария 0,8, второго и третьего - 0,1.

Таким образом, значения вероятности проявления опасностей СПГ следующие:

- при криогенном «шоке» материалов - 1;
- при возгорании дрейфующего облака - 0,1;
- при пожаре «бассейна» СПГ от возгорания дрейфующего облака - 1;
- при воспламенении «бассейна» СПГ - 0,1.

Вероятность затопления судна в результате столкновения будет зависеть от полученных повреждений, рассмотренных выше, наличия утечки, нарушения прочности корпуса в результате контакта с СПГ.

Предположим, что вероятность затопления судна в результате получения критического повреждения 1, а также принимаем, что утечка СПГ при столкновении приводит к криогенному «шоку» материалов и, в конечном счете, к затоплению судна.

Вероятность сохранения судна на поверхности при отсутствии критических повреждений равна 1.

Модель эвакуации определяет вероятность фатальных исходов среди экипажа судна и количество возможных смертей. Оба показателя зависят от того, какие опасности проявились в результате аварии.

Принимаем, что фатальный исход возможен в результате действия тепловой радиации на людей и при ошибках во время эвакуации.

Поскольку в настоящее время отсутствуют статистические данные по каскадным сценариям развития событий со смертельными исходами при морской транспортировке СПГ, будем использовать значения экспертных оценок по танкерному флоту в целом, опубликованных в [7]:

- вероятность фатального исхода при пожаре - 0,525;

- вероятность фатального исхода при затоплении - 0,978;
- ожидаемое число смертей при пожаре - 3,11 чел.;
- ожидаемое число смертей при затоплении - 12,9;
- вероятность фатального исхода при пожаре и затоплении - 0,989;
- ожидаемое число смертей при пожаре и затоплении - 16 чел.

Подобный анализ проведен для остальных сценариев и определена общая величина риска для экипажа танкера. Разделив её на число членов экипажа, получаем значение индивидуального риска.

Список литературы

1. HAZID for LNG Tankers // SAFEDOR D.4.3.1. 2005.
2. Laubenstein L., Mains C., Jost A., Tagg R., Bjerneboe N.K. Updated Probabilistic Extents of Damage Based on Actual Collision Data // Proceedings of the 2nd International Conference on Collision and Grounding of Ships (ICCGS 2001). Copenhagen, Denmark, 2001.
3. Olufsen O., Spouge J., Hovem L. The Formal Safety Assessment Methodology Applied to the Survival Capability of Passenger Ships // Proceedings of RINA Passenger Ship Safety Conference. London, UK, 2003.
4. Vanem E., Skjong R. Damage Stability Evaluation in Collision of Bulk Carriers // Proceedings of the 3rd International Conference on Collision and Grounding of Ships (ICCGS 2004). Izu, Japan, 2004.
5. International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk - IGC // Code 1993 Edition. International Maritime Organization, 1993. ISBN: 92-801-1277-5.
6. Laubenstein L., Mains C., Jost A., Tagg R., Bjerneboe N.K. Updated Probabilistic Extents of Damage Based on Actual Collision Data // Proceedings of the 2nd International Conference on Collision and Grounding of Ships (ICCGS 2001). Copenhagen, Denmark, 2001.
7. Skjong R., Wentworth B.H. Expert Judgment and Risk Perception // Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE-2001). Stavanger, Norway, 2001. Vol. IV. P. 537-544.

Вывод

Предложены общие сценарии каскадного развития событий при инцидентах.

На примере инцидента «Столкновение» показаны качественный и количественный анализы события для последующей оценки риска.

Выполненные качественный и количественный анализы событий и оценка рисков в процессе морской транспортировки сжиженного природного газа могут быть использованы при разработке нормативных документов, регламентирующих определение рисков при транспортировке и отгрузке СПГ на территории Российской Федерации.

References

1. HAZID for LNG Tankers. *SAFEDOR D.4.3.1*. 2005.
2. Laubenstein L., Mains C., Jost A., Tagg R., Bjerneboe N.K. Updated Probabilistic Extents of Damage Based on Actual Collision Data. *Proceedings of the 2nd International Conference on Collision and Grounding of Ships (ICCGS 2001)*. Copenhagen, Denmark, 2001.
3. Olufsen O., Spouge J., Hovem L. The Formal Safety Assessment Methodology Applied to the Survival Capability of Passenger Ships. *Proceedings of RINA Passenger Ship Safety Conference*. London, UK, 2003.
4. Vanem E., Skjong R. Damage Stability Evaluation in Collision of Bulk Carriers. *Proceedings of the 3rd International Conference on Collision and Grounding of Ships (ICCGS 2004)*. Izu, Japan, 2004.
5. International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk - IGC. *Code 1993 Edition, International Maritime Organization*, 1993. ISBN: 92-801-1277-5.
6. Laubenstein L., Mains C., Jost A., Tagg R., Bjerneboe N.K. Updated Probabilistic Extents of Damage Based on Actual Collision Data. *Proceedings of the 2nd International Conference on Collision and Grounding of Ships (ICCGS 2001)*. Copenhagen, Denmark, 2001.
7. Skjong R., Wentworth B.H. Expert Judgment and Risk Perception. *Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE-2001)*. Stavanger, Norway, 2001. Vol. IV. P. 537-544.

Авторы

• Сайфутдинов Артур Маратович
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Аспирант кафедры «Пожарная и промышленная
безопасность»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1

• Коробков Геннадий Евгеньевич, доктор
технических наук, профессор
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Профессор кафедры «Транспорт и хранение
нефти и газа»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
e-mail: korobkov45@mail.ru

The Authors

• Sayfutdinov Artur M.
Ufa State Petroleum Technological University
Post-graduate Student of Fire and Industrial Safety
Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,
Russian Federation

• Korobkov Gennadiy E., Doctor of Engineering
Sciences, Professor
Ufa State Petroleum Technological University
Professor of Transport and Storage of Oil and Gas
Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,
Russian Federation
e-mail: korobkov45@mail.ru