

**БЫСТРЫЙ ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД КАК ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ УГРОЗА
ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ СПГ**

**RAPID PHASE TRANSITION AS POTENTIAL HAZARD DURING LNG
TRANSPORTATION**

В. Н. Пермяков, В. С. Швец

V. N. Permyakov, V. S. Shvets

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень.

*Ключевые слова: сжиженный природный газ; быстрый фазовый переход;
транспортировка СПГ; утечения СПГ; техносферная безопасность*

*Key words: liquid natural gas; rapid phase transition; LNG transportation; LNG releases;
technosphere safety*

Обеспечение безопасности критически важных объектов имеет принципиальное значение для любого государства. Учитывая потенциальные последствия демографического, экономического, экологического характера аварийных ситуаций на объектах топливно-энергетического комплекса, к объектам КВО были отнесены, в том числе и нефте-, газоперерабатывающие предприятия, хранилища сжиженного природного газа (СПГ), а также морские наливные терминалы и др.

Критически важный объект (КВО) инфраструктуры Российской Федерации (далее — критически важный объект) — объект, нарушение (или прекращение) функционирования которого приводит к потере управления, разрушению инфраструктуры, необратимому негативному изменению (или разрушению) экономики страны, субъекта Российской Федерации, либо административно-территориальной единицы или существенному ухудшению безопасности жизнедеятельности населения, проживающего на этих территориях, на длительный срок [2].

Перечень возможных угроз объектам топливно-энергетического комплекса довольно широк, аварийные ситуации могут быть вызваны как неким стохастическим процессом, так и преднамеренной террористической атакой. Уровень последствий данных угроз зависит от химических и физических свойств рабочих веществ, их количества, участвующего в инциденте, условий окружающей среды и пр.

Экспорт СПГ является относительно новой сферой российской экономики. Несмотря на более чем полувековой опыт промышленного производства сжиженного природного газа за рубежом, в России первый завод открылся только в 2009 году на Сахалине. Российская Федерация не является крупным экспортером СПГ, однако форсированными темпами развивает эту отрасль. В стадии строительства находится завод по производству СПГ на Ямале («Ямал СПГ»), также в ближайшее время планируется построить ряд заводов для переработки и сжижения газа, в том

числе и с шельфовых месторождений (завод СПГ в Мурманской области, «Балтийский СПГ» в Ленинградской области, «Владивосток СПГ» на полуострове Ломоносова).

Как правило, конечный потребитель СПГ находится на достаточно удаленном расстоянии от мест добычи газа, поэтому, помимо очистки и сжижения газ необходимо транспортировать. Транспортировка сжиженного газа является потенциально опасной и включает в себя стадии погрузки-разгрузки в наливных терминалах и непосредственно перевозку специализированными морскими танкерами для СПГ (газовозами).

С 1944 по 2006 гг. с танкерами, перевозящими СПГ, было зафиксировано 52 инцидента. В 22 случаях имел место разлив криожидкости.

История эксплуатации танкеров СПГ демонстрирует широкий спектр возможных аварийных ситуаций. К примеру, в 1985 году при погрузочно-разгрузочных работах танкера «Изабелла», водоизмещением 36 тыс. м³, из-за переполнения резервуара СПГ криогенная жидкость пролилась на палубу судна. В результате чего в ней образовались трещины, однако авария была локализована силами команды танкера, пострадавших не зафиксировано. Еще один случай произошел в 1989 году с танкером «Тельер», водоизмещением более 200 тыс. м³. Во время заправки танкера от сильного порыва ветра были оборваны заправочные шланги. Несмотря на то что подача СПГ была сразу же прекращена, небольшое количество криогенной жидкости все же попало в море.

Большинство аварий связаны с человеческим фактором: столкновения с другими судами, аварии при швартовке, посадки на мель и др. Погодные условия также являются причинами аварийных ситуаций: внезапные порывы ветра, штормы, молнии. Еще одну группу образует технические сбои и неисправности: отказ клапанов, разгерметизация соединений, неисправные сальники и др. Не стоит исключать и возможность проведения террористической атаки на газовозы и наливные терминалы. Все вышеперечисленные аварийные ситуации могут привести к довольно серьезным последствиям, среди которых: взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости (BLEVE), воспламенение разлитой жидкости или газозоудушного облака и др. Среди прочих угроз явление быстрого фазового перехода слабо изучено и недооценено.

Быстрый фазовый переход (RPT LNG) — это мгновенное (взрывное) испарение сжиженного газа при смешении с водой, сопровождающееся увеличением объема (примерно в 600 раз) и возникновением разрушающего фронта сверхдавления. Быстрый фазовый переход (БФП) является исключительно физическим явлением и не сопровождается химической реакцией или горением. Впервые это явление наблюдалось в 1960-х гг. в США. Позднее для его изучения был проведен ряд различных экспериментальных исследований, в основном лабораторного характера, однако были и довольно масштабные, такие как серия экспериментов BURRO, COYOTE, FALCONE и др., спонсированные правительством США и крупными газовыми компаниями [4].

Быстрый фазовый переход происходит при попадании СПГ в воду. Таким образом, наибольшая вероятность возникновения аварийных ситуаций с БФП существует на этапе загрузочно-разгрузочных работ в наливных терминалах и при транспортировке непосредственно на газовозах.

В ходе многолетних исследований явления быстрого фазового перехода специалистам удалось прийти к выводу, что оно является результатом перегрева СПГ при отсутствии свободного места для образования пузырьков газа. Процесс возникновения БФП был разделен на 4 последовательных этапа.

1. Предварительное смешивание. Как только две жидкости вступают в контакт, стабильная паровая пленка не позволяет смешиваться большим объемам

жидкостей, из-за разницы в плотности и скорости. Паровая пленка снижает уровень теплопередачи между двумя жидкостями.

2. Фаза активации. Некое событие приводит к дестабилизации паровой пленки, не позволяющей жидкостям контактировать, тем самым улучшая теплообмен между ними и повышая давление.

3. Фаза распространения. Некоторая часть СПГ быстро перегревается, в ней повышается давление, в результате чего происходит термальная фрагментация, окружающая горячая жидкость пронизывается охлаждающей, создавая большую поверхность контакта двух жидкостей.

4. Фаза расширения. В итоге смесь с высоким давлением расширяется вслед за продвижением фронта, созданного на стадии распространения, противодействуя силам инерции окружающей жидкости. Ущерб потенциально зависит от того, насколько быстро будет происходить расширение.

Однако, если природа возникновения быстрого фазового перехода определена и не вызывает сомнений, то об условиях возникновения данного явления до сих пор ведутся споры. Кроме того, сила ударной волны и радиус ее продвижения, необходимые для прогнозирования возможных повреждений, не так легко предсказуемы поскольку зависят от большого количества факторов. Существует различные мнения о доминирующем факторе, влияющим на возможность возникновения БФП и мощность создаваемой волны сверхдавления. К таким факторам относят, например, температуру воды, контактирующей с СПГ, состав газа, его количество и др.

При крупномасштабных испытаниях появление БФП предполагалось коррелировать с температурой воды и с глубиной проникновения СПГ в воду. Действительно, БФП происходил только при температуре воды выше 290 К (17 °С), в испытаниях с пластиной, регулирующей глубину проникновения СПГ. Удаление пластины позволяет сжиженному газу более глубоко проникать в воду, в результате чего БФП наблюдался при температуре воды 285 К (12 °С). Корреляция между температурой воды и температурой перегрева (TSH) СПГ, необходимой для возникновения БФП обычно выражается как $TSH < T_{\text{воды}} < 1,1 TSH$, где TSH метана — 168 К, этана — 269 К, пропана — 326 К, бутана — 376 К, а температура перегрева углеводородной смеси примерно равна средневзвешенной сумме температур перегрева ее компонентов.

Некоторые исследователи сравнивают эффект БФП с паровым взрывом. Подобные и очень разрушительные взрывы испаряющихся жидкостей происходят, когда расплавленный металл или шлак непреднамеренно выливают в сосуд с водой, что вызывает взрыв пара. Существует множество примеров паровых взрывов на металлургических и сталелитейных производствах. Технологии теплопередачи могут быть перенесены из модели парового взрыва к модели взрыва БФП для вычисления энергии взрыва. Температурный напор для расплавленного металла или шлака около 1500 °С и воды около 10 °С намного больше чем между водой 10 °С и СПГ –160 °С.

В связи с этим в работе [6] авторы анализируют открытую литературу о паровых взрывах и утверждают, что максимальный выход энергии БФП ограничивается энергией перегрева холодной жидкости и что только небольшая часть энергии перегрева трансформируется в ударную волну. Таким образом, с точки зрения получения энергии БФП являются менее эффективными, чем детонация взрывчатых веществ.

Также остается неизученным процесс возникновения подводного БФП. В источнике [3] проанализированы последствия воздействия БФП СПГ, выяснилось, что подводное истечение очень сильно влияет на возможность появления БФП. В работе сообщается о вычислении эквивалентных масс СПГ для взрыва на глубине. Для 30 см под водой эквивалентная масса взрывчатого вещества составляет от 0,01 до 0,001. Авторы [7] также проанализировали влияние подводных утечек, которые приводят к уменьшениям давления взрывной волны на поверхности воды.

В большинстве экспериментов явление быстрого фазового перехода регистрировалось после падения струи криогенной жидкости на поверхность воды с заданной высоты. Изменением высоты падения струи варьировалась глубина проникновения сжиженного газа в воду, а также его диспергирование и смешение с окружающей водой. Лишь несколькими исследователями были проведены подводные разливы СПГ, однако приборы, регистрирующие величину возникающего избыточного давления, находились на поверхности воды, и авторы интересовались лишь уменьшением мощности волны сверхдавления, действующей на надводные объекты.

Несмотря на недостаточную изученность явления, в отчете Национальной Лаборатории Сандия в 2004 году, а затем и в более поздних работах по изучению БФП, однозначно говорится о возможности создания волны сверхдавления достаточной силы для повреждения корпуса резервуара СПГ или газовоза. Разрушительное воздействие взрывной волны сильно локализовано, и при удалении от эпицентра взрыва сила волны резко падает, поэтому масштабные разрушения возможны только в небольшом радиусе, около 500 м при разливе СПГ 300 м³/мин [5]. Несмотря на небольшой радиус, БФП может вызвать каскадные разрушения, а также спровоцировать возникновение других угроз. В условиях компактного расположения резервуаров СПГ и других объектов на газовозе или в СПГ терминале существует серьезная опасность для жизни персонала.

Для транспортировки сжиженного газа с шельфовых залежей Крайнего Севера рассматривается возможность применения атомных подводных газовозов. Такие корабли могут передвигаться под водой, и, следовательно, транспортировка сжиженного газа не будет зависеть от ледовой обстановки [1]. Однако наличие атомной энергетической установки переводит вопрос обеспечения безопасности на качественно новый уровень.

Таким образом, для обеспечения безопасности критически важных объектов, связанных с производством и транспортировкой сжиженного природного газа, крайне необходимо всестороннее исследование явления быстрого фазового перехода, с последующей разработкой математической модели. Моделирование позволит произвести расчет мощности и радиуса продвижения взрывной волны, а также спрогнозировать возможные разрушения. В настоящее время идет работа над созданием программного продукта для расчета подводного взрыва БФП. Изучение газогидродинамических процессов в штатных и аварийных ситуациях, их влияние на механику, физику, химию аварий и катастроф проводится в ТИУ совместно с учеными РАН.

Список литературы

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Тематический блок «Национальная безопасность». Обоснование прочности и безопасности объектов континентального шельфа / Научн. рук. Н. А. Махутов. – М.: МГОФ «Знание», 2015. – 664 с.
2. Основные направления государственной политики в области обеспечения безопасности автоматизированных систем управления производственными и технологическими процессами критически важных объектов инфраструктуры Российской Федерации. Утв. Президентом РФ 03.02.2012 N 803.
3. Atallah S., 1997. Rapid Phase Transitions, Topical Report GRI-92/0533, Gas Research Institute.
4. Ernesto Salzano. Blast Waves Produced by Rapid Phase Transition of LNG on Water. 8-th Topical Conference on Natural Gas Utilization, AIChE Spring Meeting, 2008. – P. 303–313.

5. SANDIA report. Guidance on Risk Analysis and Safety Implications of a Large Liquefied Natural Gas (LNG) Spill Over Water, SAND2004-6258, 2004. P. 119–124 p.
6. Schubach S. A., Bagster D. F., 1996. Some aspects of modelling steam explosions. Journal of Loss Prevention in the Process Industry 9, P. 193–197.
7. Shaw S., Baik J., Pitblado R., 2005. Consequences of Underwater Releases of LNG. Process Safety Progress 24, 3.

Сведения об авторах

Пермяков Владимир Николаевич, д. т. н., профессор кафедры «Техносферная безопасность», Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)390343, e-mail: v.n.permyakov@mail.ru.

Швец Валерий Сергеевич, аспирант кафедры «Техносферная безопасность», Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)390343, e-mail: ShvetsVS91@gmail.com.

Information about the authors

Permyakov V. N., Doctor of Engineering, Professor at the Department of Technosphere Safety, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)390343, e-mail: v.n.permyakov@mail.ru.

Shvets V. S., Postgraduate at the Department of Technosphere Safety, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)390343, e-mail: ShvetsVS91@gmail.com.

УДК 331.461

ОЦЕНКА ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ РИСКОВ ПРИ СПУСКО-ПОДЪЕМНЫХ ОПЕРАЦИЯХ В БУРЕНИИ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН

EVALUATION OF OCCUPATIONAL RISKS IN ROUND-TRIP OPERATIONS WHEN DRILLING OIL AND GAS WELLS

Р. Р. Шангареев

R. R. Shangareyev

*Филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета,
г. Октябрьский*

*Ключевые слова: бурение; скважина; охрана труда; профессиональный риск;
спуско-подъемные операции; буровая труба; машинные ключи; элеватор*
*Key words: drilling; well; health and safety; occupational risk; round-trip operations;
drill pipe; power tongs; elevator*

Оценка профессиональных рисков при выполнении основных технологических операций в бурении нефтяных и газовых скважин является сегодня важной научно-практической задачей в области охраны труда. Умение идентифицировать опасности на любой стадии технологического процесса производства, определять их характеристики, устанавливать интенсивность и продолжительность воздействия, причину возникновения и возможный результат негативного воздействия, имеет сегодня большое значение для обеспечения охраны труда персонала, работающего на буровой.

ОСТ 39–022–85 обуславливает проявление вредных и опасных производственных факторов в нефтяной промышленности в зависимости от организационных, технологических, сезонных, региональных причин их возникновения [1]. ГОСТ 12.0.003–74 подразделяет опасные и вредные производственные факторы на физические, химические, биологические и психофизиологические и применяется для идентификации и анализа источников опасностей в рабочей зоне [2].

Уровень профессиональных рисков оценивают в баллах, применяя количественный метод, по формуле

$$R = V \cdot P, \quad (1)$$

где V — степень риска (вероятности) опасного события; P — степень тяжести (серьезности) последствий [3].

Вероятность воздействия опасности V с учетом того, что точная статистика по количеству случаев на определенную операцию СПО в год (годы) работы может отсутствовать, определяется по таблице 1.