Сведения об авторах

Казанцева Людмила Анатольевна, к. г.-м. н., доцент кафедры техносферной безопасности, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 89129289752, e-mail: kazantsevala@tyuiu.ru

Игнатенко Вадим Николаевич, магистрант кафедры техносферной безопасности, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 89821743694, e-mail: kazantsevala@tyuiu.ru

Information about the authors

Kazantseva L. A., Candidate of Geology and Mineralogy, Associate Professor at the Department of Technosphere Safety, Industrial University of Tyumen, phone: 89129289752, e-mail: kazantsevala@tyuiu.ru

Ignatenko V. N., Master's Student at the Department of Technosphere Safety, Industrial University of Tyumen, phone: 89821743694, e-mail: kazantsevala@tyuiu.ru

УДК 614.83:661.91-404

**ПОСЛЕДСТВИЯ ПРОЛИВА СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА:
МОДЕЛИРОВАНИЕ БЫСТРОГО ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА
CONSEQUENCES OF LIQUEFIED NATURAL GAS RELEASE:
MODELING RAPID PHASE TRANSITION**

В. С. Швец
V. S. Shvets

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

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

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

На мировом рынке сжиженного природного газа (СПГ) установилась тенденция к устойчивому развитию. На фоне увеличения спроса на СПГ в России, на острове Сахалин, в 2009 году вводится в эксплуатацию первый завод по его производству. Несмотря на более чем полувековой опыт промышленного производства СПГ за рубежом, Российская Федерация только начинает свой путь в качестве экспортера СПГ. Для ликвидации отставания от крупнейших игроков мирового экспорта СПГ в нашей стране в ближайшие годы планируется построить ряд заводов по производству СПГ, используя в том числе и газ с шельфовых месторождений: на стадии строительства находится «Ямал СПГ», расположенный на Ямале на базе Южно-Тамбейского месторождения, в планах — проект «Владивосток СПГ» на полуострове Ломоносова, проект «Балтийский СПГ» в Ленинградской области, также планируется строительство завода по производству СПГ в Мурманской области для переработки природного газа со Штокмановского месторождения.

Для транспортировки СПГ используются специализированные суда — СПГ танкеры или газовозы. Для проекта «Ямал СПГ» спроектированы и находятся в стадии строительства танкеры класса Arc7, которые позволят осуществлять навигацию без использования ледокольного флота по западному маршруту Северного морского пути круглый год, а по восточному маршруту — в летнее время.

Также для транспортировки сжиженного газа с шельфовых месторождений Крайнего Севера рассматривается возможность применения атомных подводных газовозов [1]. Данные корабли передвигаются под водой, следовательно, транспортировка сжиженного газа не будет зависеть от ледовой обстановки. Однако для начала применения данных технологий требуется провести комплексный технико-экономический анализ.

Учитывая потенциальные последствия возникновения аварийных ситуаций, обеспечение стабильной, безаварийной транспортировки жидких углеводородов имеет принципиальное значение. Помимо стохастических процессов природного и антропогенного характера, угрозу поставкам СПГ могут представлять и террористические атаки. В работе [2] приводится статистика аварий танкеров, перевозящих СПГ, которая показывает, что более 40 % аварийных ситуаций сопровождаются разлитием криожидкости на палубу или водную поверхность.

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.

Причины аварий СПГ танкеров можно условно разделить на 3 категории:

- аварии, вызванные человеческим фактором (столкновения во время движения, аварии при швартовке и т. д.);
- аварии, вызванные погодными условиями (порывы шквального ветра, молнии, штормы и др.);
- технические сбои и неисправности (нарушение герметичности соединений, отказ электроники и пр.).

Все вышеперечисленные аварийные ситуации могут привести к довольно серьезным последствиям: взрыву расширяющихся паров вскипающей жидкости (BLEVE), воспламенению разлитой жидкости или газо-воздушного облака и др. Среди прочих угроз явление быстрого фазового перехода слабо изучено и недооценено.

Быстрый фазовый переход (БФП) — rapid phase transition liquefied natural gas (RPT LNG) — это мгновенное (взрывное) испарение сжиженного газа при смешении с водой, сопровождающееся увеличением объема (примерно в 600 раз) и возникновением разрушающего фронта сверхдавления. БФП является исключительно физическим явлением и не сопровождается химической реакцией или горением. Впервые это явление наблюдалось в 1960-х гг. в США, и позднее для его изучения был проведен ряд различных экспериментальных исследований. Большинство проведенных экспериментов были лабораторного характера, однако были и довольно масштабные, такие как серия экспериментов BURRO, COYOTE, FALCONE и др., спонсированные правительством США и крупными газовыми компаниями [3]. Пример расстановки регистрационного оборудования во время крупномасштабного исследования COYOTE представлен на рисунке.

Рисунок. Расположение измерительной аппаратуры в серии испытаний COYOTE

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

В ходе продолжительных исследований ученые пришли к единому мнению о природе БФП. Волна сверхдавления является результатом перегрева сжиженного газа при отсутствии свободного места для образования пузырьков газа. Однако, если относительно природы явления удалось достигнуть общего мнения, то об условиях, влияющих на возможность возникновения и силу волны сверхдавления, споры ведутся до сих пор. Кроме того, сила ударной волны и радиус ее продвижения, необходимые для прогнозирования возможных повреждений, не так легко предсказуемы, так как зависят от большого количества факторов. В связи с этим существует множество мнений относительно доминирующего фактора (температуры воды, контактирующей с СПГ; состава газа, его количества и др.).

Процесс возникновения подводного БФП также остается неизученным. В источнике [4] проанализированы последствия воздействия БФП СПГ. Было выяснено, что подводное истечение очень сильно влияет на возможность появления БФП. 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. В работе [5] проанализировано влияние подводных утечек, которые приводят к уменьшениям давления взрывной волны на поверхности воды.

Целью наших научных изысканий является создание модели объектов производства, хранения и транспортировки СПГ. Данная модель позволит, учитывая факторы риска и некоторые стохастические процессы, прогнозировать развитие аварийных ситуаций, в том числе имеющих каскадный эффект. Изучение процесса быстрого фазового перехода имеет принципиальное значение для целостного понимания процесса возникновения аварий, связанных с утечками СПГ.

В большинстве экспериментов явление БФП 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. Но их интересовало лишь уменьшение мощности волны сверхдавления, действующей на надводные объекты.

Существует ряд моделей для численного моделирования взрыва БФП и расчета радиуса продвижения волны сверхдавления. Для подводного взрыва была рассмотрена возможность использования модели акустической аналогии, предложенной Ernesto Salzano в работе [3].

Метод основан на акустическом приближении, который рассчитывает пик избыточного давления P (в барах) на расстоянии r от точки источника звука.

Если ρ — плотность, t — время, u — скорость, то φ — потенциал волны определяется как

$$\vec{u} = \text{grad} \varphi = \nabla \varphi.$$

Тогда уравнение сохранения массы и импульса можно записать как

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} + \nabla \rho \nabla \varphi &= 0, \\ \frac{d}{dt} (\rho \nabla \varphi) + \nabla P &= 0. \end{aligned}$$

Ввиду изэнтропических и акустических предположений, уравнения сохранения можно записать в виде

$$\frac{dp}{dt} + \nabla \rho \bar{u} = \frac{1}{c_0^2} \frac{dP}{dt} + \nabla \rho \bar{u} = 0,$$

$$\nabla P = -\frac{d}{dt}(\rho \bar{u}) = -\frac{d}{dt}(\rho \nabla \varphi).$$

Предполагая сферическую симметрию, это уравнение можно записать в виде

$$\frac{d^2 P}{dr^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{d^2}{dt^2} rP, \quad \begin{array}{l} \text{уравнение} \\ \text{акустической волны} \end{array}$$

$$\frac{d^2 \varphi}{dr^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{d^2}{dt^2} r\varphi, \quad \begin{array}{l} \text{уравнение} \\ \text{потенциальной волны} \end{array}$$

где r — расстояние от источника звука. В случае сферической симметрии решение скалярного уравнения потенциальной волны имеет вид

$$\varphi = \frac{f(t)}{r},$$

где f — произвольная функция для волны, фактор $(1/r)$ определяет амплитуду и $t = (t^* - r/c_0)$, t^* — фактическое время, r/c_0 — временной лаг для продвижения. Рассматривая теперь расширяющуюся сферу с центром в начале координат, получаем уравнение его поверхности

$$r = a(t) = a_0 + a_1(t),$$

скорость жидкости на поверхности сферы

$$\bar{u} = \frac{dr}{dt} = \dot{a}(t) = \frac{d\varphi}{dr}.$$

Объемный расход через поверхность расширяющейся сферы радиуса r можно записать как

$$V'(t) = 4\pi r^2 \frac{dr}{dt}.$$

Тогда

$$\frac{d\varphi}{dr} = \frac{dr}{dt} = \frac{V'(t)}{4\pi r^2}.$$

Интегрируя по r ,

$$\varphi = \frac{V'(t)}{4\pi r}.$$

В любой точке (приемник), расположенной на расстоянии (радиус) r от источника, давление наблюдается как волна с формой f , испускаемая во времени t . Тогда

$$\int_r \nabla P = \Delta P = -\int_r \frac{d}{dt} \rho \nabla \varphi = -\rho \frac{d\varphi}{dt}.$$

В итоге

$$\Delta P = \rho \frac{d}{dt} \left[\frac{V'(t)}{4\pi r} \right] = \rho \frac{V''(t)}{4\pi r}.$$

Или, если взять массовый расход за $q'(t)$, то

$$q'(t) = \rho V'(t)$$

$$\Delta P = \frac{q''(t)}{4\pi r}.$$

Это уравнение говорит, что на расстоянии r от источника звука расширяющейся сферы, с объемом V , давление равняется P . Слагаемое q часто определяется как сила акустического источника. Наконец, из уравнения звука

$$P_0 = \frac{\rho_0 c_0^2}{\gamma}.$$

Следовательно,

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{\gamma V'''(t)}{c_0^2 4\pi r} = \frac{\gamma q''(t)}{\rho_0 c_0^2 4\pi r}.$$

Модель была адаптирована на расчет амплитуды волны сверхдавления при подводном взрыве БФП. Для оценки применимости модели используются открытые данные отчетов о проведении серии крупномасштабных экспериментов BURRO, COYOTE и др. Однако однозначных выводов по имеющимся данным сделать нельзя. Несмотря на достаточно хорошую сходимость рассчитанных и фактических данных, необходимо провести серию экспериментов для изучения непосредственно подводного взрыва БФП.

Таким образом, для обеспечения безопасной транспортировки СПГ крайне необходимо всестороннее исследование явления подводного быстрого фазового перехода, с последующей проверкой физико-математической модели. Моделирование позволит произвести расчет мощности и радиуса продвижения взрывной волны, а также прогнозировать возможные разрушения.

Библиографический список

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Тематический блок «Национальная безопасность». Обоснование прочности и безопасности объектов континентального шельфа. 6 т. – Т. 1. – М.: МГОФ «Знание», 2015. – 664 с.
2. Пермяков В. Н., Швец В. С. Быстрый фазовый переход как потенциальная угроза при транспортировке СПГ // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2017. – № 2. – С. 111–115.
3. Salzano E. Blast Waves Produced by Rapid Phase Transition of LNG on Water // 8th Topical Conference on Natural Gas Utilization, AIChE Spring Meeting, 2008. – P. 303–313.
4. Atallah S. Rapid Phase Transitions. – Topical Report GRI-92/0533. – Gas Research Institute, 1997.
5. Shaw S., Baik J., Pitblado R. Consequences of Underwater Releases of LNG // Process Safety Progress. – 2005. – Vol. 24, Issue 3. – P. 175–180.

Сведения об авторе

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

Information about the author

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

Машины, оборудование и обустройство промыслов

УДК 658.588:622.691.4.052.012

ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ПО ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ

DIAGNOSTICS OF TECHNICAL CONDITION OF GAS-TURBINE UNITS ON PARAMETRIC DATA

С. И. Перевощиков

S. I. Perevoschikov

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Ключевые слова: газоперекачивающие агрегаты; газотурбинные установки;
параметрическая диагностика

Key words: gas-pumping units; gas-turbine units; parametric diagnostics