Рахимов, Вадим Олегович. Особенности термодинамических процессов при хранении сжиженного природного газа : диссертация ... кандидата технических наук : 25.00.19 / Рахимов Вадим Олегович; [Место защиты: Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т].- Уфа, 2013.- 136 с.: ил. РГБ ОД, 61 14-5/438

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ

УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

0«0H5157Z

Рахимов Вадим Олегович

**ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ХРАНЕНИИ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА**

Специальность 25.00.19 - «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов,

баз и хранилищ»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель доктор технических наук, профессор Коробков Г.Е.

Уфа 2013

**СОДЕРЖАНИЕ**

Введение

1. Особенности работы систем хранения и транспорта сжиженного

природного газа в экстремальных условиях 9

* 1. Анализ нормативной базы в области хранения и транспорта

сжиженного природного газа 9

* 1. Особенности расчёта тепловых режимов резервуаров для хранения

СПГ 15

* 1. Анализ термодинамических особенностей поведения СПГ при

попадании на водную поверхность при его хранении на морских терминалах 17

* 1. Анализ опыта международных операции с сжиженным природным

газом 21

* + 1. Общие сведения о системах хранения СПГ 21
    2. Нарушения технологических процессов на береговых комплексах

СПГ 24

* + 1. Нарушения технологических процессов при морских операциях с

СПГ 30

1. Термодинамические особенности хранения сжиженного природного

газа в изотермических резервуарах 34

* 1. [Явление «ролловер» в хранилищах сжиженного природного газа.... 35](#bookmark6)
  2. Физические особенности процесса «ролловера» при хранении СПГ.... 38
  3. [Расчёт теплопереноса в стратифицированной жидкости 45](#bookmark12)
  4. Разработка метода расчёта термодинамического режима наземного

изотермического резервуара со стратифицированным на два слоя СПГ 47

* 1. Расчета плотности сжиженного природного газа для типовых условий

хранения в резервуаре 64

2.6 Расчёт времени наступления «ролловера» 68

1. Теплогидравлические особенности при хранении сжиженного

природного газа на морских терминалах 71

* 1. Характеристика физической картины явления попадания сжиженного

природного газа на водную поверхность 71

* 1. [Образование «бассейна» СПГ на водной поверхности 75](#bookmark40)
  2. Анализ результатов экспериментов и моделирования процесса

кипения СПГ на водной поверхности 76

* 1. [Анализ работ по изучению быстрого фазового перехода СПГ 80](#bookmark43)
  2. Исследование быстрых фазовых переходов СПГ при разгерметизации

ёмкости для хранения 83

* + 1. Сценарии БФП при хранении СПГ в морских ёмкостях 84
    2. Прогнозирование потенциальной опасности БФП 88
    3. Прогнозирование БФП при крупных проливах СПГ 92

1. Разработка методики расчёта тепловых процессов при

разгерметизации хранилищ сжиженного природного газа 97

* 1. Плёночное кипение СПГ на горизонтальной поверхности 97
  2. Разработка метода определение радиуса аварийного разлива

сжиженного природного газа на водной поверхности 108

* 1. [Тепловое излучение при горении «бассейна» СПГ 116](#bookmark53)

[ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ 120](#bookmark57)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 121](#bookmark58)

ПРИЛОЖЕНИЯ 134

Приложение 1. Справка о внедрении результатов работы в ФГБОУ

ВПОУГНТУ 134

Приложение 2. Справка о внедрении результатов работы в ОАО

«Ямал СПГ» 135

Приложение 3. Справка о внедрении результатов работы в ООО «СГ- Авто» 136

**Введение**

Задача производства сжиженного природного газа (СПГ) приобретает всё большую значимость для России как перспективное направление переработки и транспортирования природного газа. Наиболее масштабное производство СПГ рассматривается для разработки шельфовых газовых и нефтяных месторождений Крайнего Севера и Дальнего Востока. При утилизации попутного нефтяного газа на промыслах, значительно удалённых от газотранспортной системы, или при ограничении доступа к ней также рассматривается возможность производства СПГ. Газификация значительной части малых населённых пунктов с использованием СПГ в некоторых случаях оценивается как экономически более выгодная по сравнению с газопроводным способом транспортировки газа [27]. Кроме того, в течение многих лет продолжаются программы по использованию СПГ в качестве моторного топлива на транспорте.

Сегодня в мире производство СПГ осуществляется на 27-ми крупнотоннажных заводах в 15 странах. В стадии строительства находятся ещё 6 заводов и более 20-ти проектируются. Для приёма СПГ и его регазификации построено 68 терминалов; ведётся строительство 21 терминала, а ещё 40 — проектируются.

Перевозка СПГ осуществляется в основном морским путём. Доля морского транспорта СПГ составляет около 23% от общего объёма поставок газа в мировой торговле и продолжает расти. Обеспечивается это флотом танкеров-метановозов. На сегодняшний день мировой флот таких танкеров насчитывает более 350 судов общей вместимостью порядка 50 млн. м3 [3]. Такие же суда используются и для непосредственного хранения, регазификации и резервирования СПГ.

В общем случае комплекс СПГ включает в себя следующие объекты:

резервуарный парк хранения СПГ, систему трубопроводов и

специализированные причалы с установленным оборудованием для отгрузки

сжиженного природного газа. При этом стоимость резервуарного парка

4

составляет до 50 % стоимости всего комплекса. Соответственно, к этим сооружениям должны предъявляться особые требования как при строительстве, так и при эксплуатации [7].

Отметим, что в нашей стране вопросами проектирования и эксплуатации резервуаров для хранения СПГ занимались такие учёные как Рачевский Б.С., Сафонов B.C., Одишария Г.Э., Иванцов О.М., Двойрис А.Д., Поповский Б.В., Майлер А.З., Дешёвых Ю.И., за рубежом: Гермелес А., Мидер Д., Хистенд Д., Ши Дж., Бедус К., Мориссон Д., Бэйтс С. Но большинство работ было выполнено в 1970-80-е годы и в них отсутствует комплексный анализ теплогидравлического режима резервуара для СПГ. Вопросы создания морских терминалов СПГ и их безопасного функционирования рассмотрены в работах таких зарубежных учёных как Шо П., Бриско Ф., Фай Дж, Лукета- Ханлин А., Хайтауэр М., Питбладо Р. и др., а в России такие работы отсутствуют.

Согласно документа [22] при проектировании терминалов СПГ необходимо рассматривать ситуацию, когда происходит нарушение герметичности одного танка танкера-метановоза с проливом содержимого на воду и с дальнейшим либо мгновенным воспламенением испаряющегося газа (пожар разлития), либо испарением пролитого на воду СПГ с формированием тяжелого взрывоопасного облака; при этом условная вероятность мгновенного воспламенения принимается равной 0,6, а условная вероятность формирования тяжелого облака - 0,4. Это важно для определении безопасных расстояний между объектами и для определения возможных теплогидравлических режимов береговых резервуаров для хранения СПГ. Для этого определяются поражающие факторы, такие как величина теплового излучения и давления в ударной волне при дефлаграционном или детонационном сгорании газовоздушной смеси. Эти факторы определяются исходя из радиуса разлива по нормативным документам [9,4,20]. При этом отсутствуют рекомендации по определению такого радиуса, за исключением случая разлива в обвалование резервуара

5

(здесь максимальным радиусом разлива будет размер обвалования). **Но** в случае истечения СПГ из танкера жидкость распространяется на неограниченной водной поверхности, образуя плавучий «бассейн». При его горении выделяющееся тепло влияет на теплогидравлический режим хранилищ СПГ, в том числе при наличии в них стратифицированной по плотности криогенной жидкости, что может привести к «ролловеру», который представляет собой резкое смешение находящихся в ёмкости слоев, сопровождаемое сильным парообразованием, превышающим номинальное. Отметим, что в нашей стране отсутствуют не только нормативные документы, по которым можно было бы оценивать вышеуказанные специфические для отрасли СПГ процессы, но и вообще какая-либо систематизированная нормативно-техническая база для безопасного обращения с СПГ. Ввиду этого создание научно-теоретических основ расчёта процессов хранения и транспорта СПГ является **актуальной проблемой в России.**

**Целью данной работы** является разработка научно-обоснованных теоретических принципов расчёта термодинамических процессов в экстремальных условиях хранения СПГ.

Для достижения поставленной цели в диссертации ставятся и решаются следующие задачи:

1. изучение и анализ зарубежного и отечественного опыта создания систем СПГ для его адаптации к применению при проектировании и эксплуатации современных хранилищ СПГ в России;
2. разработка метода расчёта термодинамического режима резервуара для СПГ, позволяющего характеризовать процесс «ролловер» в хранилище;
3. оценка термодинамических особенностей поведения «бассейна» СПГ на водной поверхности и установление физической картины явления быстрого фазового перехода СПГ;
4. разработка метода определения характеристик растекания сжиженного природного газа на водной поверхности и установление

зависимости термодинамического режима резервуара СПГ от воздействия экстремальных факторов.

**Методы исследований:** системный подход при разработке методов расчёта термодинамических характеристик «бассейна» СПГ на водной поверхности и теплового режима резервуара для СПГ, математическое моделирование, численные методы. Решения задач основаны на положениях гидравлики, термодинамики и теплотехники.

**Научная новизна работы** заключается в том, что:

1. доказано, что неполная загрузка резервуара СПГ приводит к увеличению скорости испарения жидкости в ёмкости выше номинального значения 0,05 % об./сут;
2. установлено, что при наличии источника внешнего теплового воздействия вблизи морского терминала СПГ изменяется термодинамический режим резервуаров для хранения СПГ, и сокращается время до момента начала развития процесса «ролловера» от нескольких суток до нескольких часов (например, для резервуара объёмом 100000 м3, от 13 суток до 19 часов);
3. определены научно-обоснованные теоретические принципы, по которым установлены допустимые расстояния для типовых терминалов СПГ не менее 800 м, ограничивающие внешнее тепловое воздействие на береговые объекты от морских хранилищ СПГ при их разгерметизации.

**Практическая ценность.**

Результаты исследований были использованы в ОАО «Ямал СПГ» при проектировании терминалов сжиженного природного газа морского базирования и определении теплогидравлических режимов резервуаров для хранения сжиженного природного газа и в ООО «СГ-Авто» при проектировании стационарных хранилищ сжиженного газа на автомобильных газозаправочных станциях.

Результаты научной работы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВПО УГНТУ, включены в программу дисциплины «Транспорт и хранение сжиженных газов» при подготовке бакалавров и магистров по направлению 131000 «Нефтегазовое дело».

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63 научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых учёных УГНТУ (Уфа, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012); V, VI, VII Международных учебно­научно практических конференциях «Трубопроводный транспорт» (Уфа, 2009, 2010, 2011); II, III, IV Межрегиональных семинарах «Рассохинские чтения» (Ухта, 2010, 2011, 2012); II Международной конференции молодых учёных «Актуальные проблемы науки и техники-2010» (Уфа, 2010); Научно- практической конференции VIII-го Международного молодёжного нефтегазового форума (Алматы, 2011); VII-ой Международной научно- технической конференции «Современные проблемы холодильной техники и технологий» (Одесса, 2011); Консультационно-методическом семинаре «Обеспечение промышленной безопасности при эксплуатации резервуаров и резервуарных парков» (Салават, 2011); ХН-ой Международной научной конференции «Современные проблемы истории естествознания в области химии, химической технологии и нефтяного дела» (Уфа, 2012).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 30 печатных работ, в том числе 6 статей в журналах, рекомендуемых ВАК Министерства образования и науки РФ.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, основных выводов, изложена на 136 страницах машинописного текста и содержит 36 рисунков, 7 таблиц, список литературы из 152 наименований и приложение.

**ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. На основе результатов анализа зарубежного и отечественного опыта были выявлены первоочередные научно-методические направления решения практических задач создания отечественной отрасли хранения СПГ.
2. Определено, что снижение уровня взлива в типовом резервуаре для СПГ объёмом 100000 м3 приводит к увеличению количества испаряющейся жидкости больше номинального значения 0,05 % об./сут.
3. Разработан метод расчёта теплового режима резервуара для СПГ и метод расчёта процесса «ролловера» в резервуаре для СПГ, позволяющий оценить время до начала его развития. Установлено, что увеличение внешнего теплового потока сокращает время до начала процесса «ролловера» с нескольких суток до нескольких часов (например, для резервуара объёмом 100000 м3 от 13 суток до 19 часов).
4. Установлена физическая картина явления быстрого фазового перехода СПГ при попадании в водную среду. Определено, что в экстремальной ситуации разгерметизации морского хранилища волна давления на расстоянии большем длины типового пирса 800 м не превышает величину 0,99 кПа. Поэтому при проектировании морских терминалов СПГ действием волны давления от быстрого фазового перехода на береговые объекты при растекании СПГ по воде можно пренебречь, ввиду локальности образующейся волны давления.
5. Разработан метод определения параметров растекания сжиженного природного газа на водной поверхности, позволяющий учесть нестационарность истечения СПГ из хранилища и испарение или горение СПГ на воде; аналитическим путём установлено, что скорость испарения СПГ с водной поверхности при 20 °С составит 0,07 кг/(м2 с). Доказана возможность использования полученного значения при проектировании морского терминала СПГ для определения расстояний от морских ёмкостей до береговых объектов.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Анфимов, Н.Н. Успехи теплопередачи: пер. с англ. / Н.Н. Анфимов. - М.: Мир, 1971.-576 с.
2. Бесчастнов, В.М. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение / В.М. Бесчастнов. - М.: Химия, 1991. - 432 с.
3. Воробьёв, А.М. Мировой флот танкеров СПГ в условиях современного рынка природного газа / А.М. Воробьев // Газовая промышленность. - 2011. - №8. - С.41-43.
4. ГОСТ Р 12.3.047-98 ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля - Введ. 2000-01-01. - М.: Изд-во стандартов, 2000. - 93 с.
5. Дешевых, Ю. И. Пожарная безопасность объектов изотермического хранения сжиженного природного газа : дис... канд. техн. наук : 05.26.03 / Ю.И. Дешевых.

* Москва, 2001. - 211 с. - РГБ ОД, 61Ю2-5/1747-0.

1. Иванцов, О.М. Низкотемпературные газопроводы / О.М. Иванцов, А,Д. Двойрис.

* М.: Недра, 1980,- 303 с.

1. LNGas.ru. Сжиженный природный газ: Интернет-сайт. - <http://lngas.ru/life-safety-> lng/problemy-termodinamika-spg.html.
2. Маршалл, В. Основные опасности химических производств / В. Маршалл. - М.: Мир, 1989. - 671с.
3. НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по

взрывопожарной и пожарной опасности. - Взамен НПБ 105-95, 105-97. - Введ. 2003-08-01. - М.: МЧС РФ, 2003. - 28 с.

1. Одишария, Г.Э. Использование методов математического моделирования для анализа и расчёта тепловых процессов в низкотемпературных хранилищах СПГ / Г.Э. Одишария, B.C. Сафонов, В.А. Тарабрин // Криогеника-80: тр. междунар. конф. - Прага, 1980. - С. 110-114.
2. Одишария, Г.Э. Тепловые процессы в низкотемпературных изотермических хранилищах сжиженных газов / Г.Э.Одишария, B.C. Сафонов, В.А. Тарабрин // Газовая промышленность. - 1982. - №11. - С. 43-46.
3. Поповский, Б.В. Строительство изотермических резервуаров / Б.В. Поповский, А,3. Майлер. - М.: Недра, 1988,- 120 с.
4. Провести исследования и разработать методы и средства пожаротушения, взрывопредупреждения, а также обеспечения безопасности личного состава и пожарной техники при проливах топлив, в том числе криогенных. Требования пожарной безопасности: Отчёт / ВНИИПО МВД РФ; Научн. руковод. темы Макеев В.И. -1994.
5. Р Газпром 5.11-2010. Методика расчёта коэффициента сжимаемости и плотности сжиженного природного газа / ОАО Газпром. - М., 2011. - 18 с.
6. Рачевский, Б.С. Сжиженные углеводородные газы / Б.С. Рачевский. - М.: Нефть и газ, 2009. - 640 с.