

Яковлева Е.В.

Студент

3 курс, кафедра «Транспорт углеводородных ресурсов»

Институт транспорта, Тюменский индустриальный университет

Россия, г. Тюмень

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОСТАВА СПГ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОЦЕССА ЕГО ХРАНЕНИЯ

***Аннотация:** сжиженный природный газ (СПГ) транспортируется с судов по наземным изолированным технологическим трубопроводам и хранится в резервуарах. Сверхнизкие температуры продукта создают проблемы безопасности при передаче и хранении СПГ. Вследствие теплопередачи от окружающего воздуха к технологическим трубопроводам и резервуарам часть СПГ может испаряться, что приводит к чрезмерному образованию отходящего газа (Boil Off Gas – BOG) и повышению давления в резервуаре. Испарение приводит к изменению качества и состава СПГ в процессе хранения.*

При неблагоприятных условиях изменения в составе СПГ могут вызвать явление перемешивания («ролл-овер») и угрозу безопасности процесса хранения. Влияние изменчивости состава сжиженного природного газа на безопасность процесса его хранения в различных условиях и анализ изменения основных параметров в резервуаре представлены в данной статье.

***Ключевые слова:** сжиженный природный газ, СПГ, ролл-овер.*

***Abstract:** Liquefied natural gas (LNG) is transported from the ships by above-ground insulated unloading pipelines and stored in tanks. The cryogenic temperature associated with LNG processing creates safety issues for LNG transfer and storage. Due to heat transfer from ambient air to unloading pipelines and*

storage tanks a part of the LNG can evaporate resulting in excessive Boil Off Gas (BOG) generation and pressure build up in the storage tank. Boil off gas in the LNG supply chain is one of the most important factors for LNG storage terminal safety or technical and economic assessment of unloading process.

Under unfavourable conditions changes in the composition of LNG may cause roll-over phenomenon and threatening the safety of the storage process. Influence of variability of liquefied natural gas composition on safety of its storage process in different conditions and analysis of basic parameters changes in storage tank are shown in this paper.

Keywords: *Liquefied Natural Gas, LNG, LNG storage, Roll-over.*

Диверсификация источников поставок СПГ является результатом роста числа производств по сжижению газа в мире. Как показывают прогнозы, в ближайшие годы участие СПГ на мировом рынке природного газа будет расти. Большее количество источников СПГ потенциально означает большую изменчивость его состава. Приемные терминалы должны быть готовы к широкому спектру качественно разнообразных поставок СПГ из различных источников. СПГ из различных источников потенциально может иметь различный состав и, следовательно, различные термодинамические свойства. Несмотря на различный состав, сжиженный природный газ в основном состоит из метана, этана, пропана и небольшого количества бутанов и азота. Хранящийся сжиженный природный газ может отличаться по составу от нового поступления СПГ, также могут отличаться температуры нового поступления и уже хранящегося СПГ. Это может привести к расслоению хранимой жидкости в резервуаре и, как следствие, к явлению перемешивания («ролл-овера»). Это связано с быстрым испарением жидкости, вызванным неблагоприятным профилем плотности. В этом случае верхний слой жидкости имеет более высокую плотность, чем нижний. Внезапное испарение вызывает быстрое повышение давления в резервуаре и может привести к опасной

ситуации. Данная работа посвящена анализу аспектов безопасности процессов хранения СПГ, связанных с изменчивостью состава. Также показаны отдельные аспекты моделирования поведения сжиженного природного газа различного состава в резервуаре для хранения.

Физические свойства определяют сжиженный природный газ как нестабильную жидкость. Температурные изменения оказывают наиболее существенное влияние на его свойства и косвенно могут влиять на стабильность процесса хранения.

Прямыми причинами нестабильности процесса хранения являются: а) длительное хранение СПГ, которое может вызвать процесс "выветривания" или "старения" СПГ, заключающийся в изменении основных параметров СПГ вследствие процесса испарения; б) циклические процессы опорожнения и заполнения резервуара СПГ; в) высокая молярная доля азота в СПГ, которая вызывает понижение температуры точки пузырька и временное ускорение изменения его плотности.

Каждый из этих факторов может привести к расслоению СПГ в резервуаре хранения и, как следствие, к явлению ролл-овера. Аспекты безопасности процессов хранения связаны с изменчивостью состава СПГ.

Особенно опасные ситуации могут возникнуть, во-первых, при заполнении резервуара хранения СПГ с разным составом и, соответственно, разными свойствами, если в резервуаре до закачки хранился старый, выветрившийся СПГ, а во-вторых, если хранящийся СПГ имеет высокое содержание азота. Риск перевертывания резко возрастает, когда происходит расслоение жидкости в резервуаре. В такой ситуации в резервуаре-хранилище имеются два отдельных слоя с разной плотностью. Верхний слой становится плотнее из-за испарения, а нижний слой становится легче из-за невозможности испарения.

Нижний слой начинает циркулировать, и температура СПГ в этом слое повышается. Это может привести к достижению температуры точки пузырька

в нижнем слое и вызвать его быстрое испарение, в результате чего плотность обоих слоев может стать одинаковой. Тепло, захваченное в нижнем слое, высвобождается во время внезапного и быстрого процесса смешивания, образуя огромное количество пара, которое может превысить возможности вентиляции резервуара хранения. Это может привести к повышению давления и возникновению опасной ситуации в резервуаре.

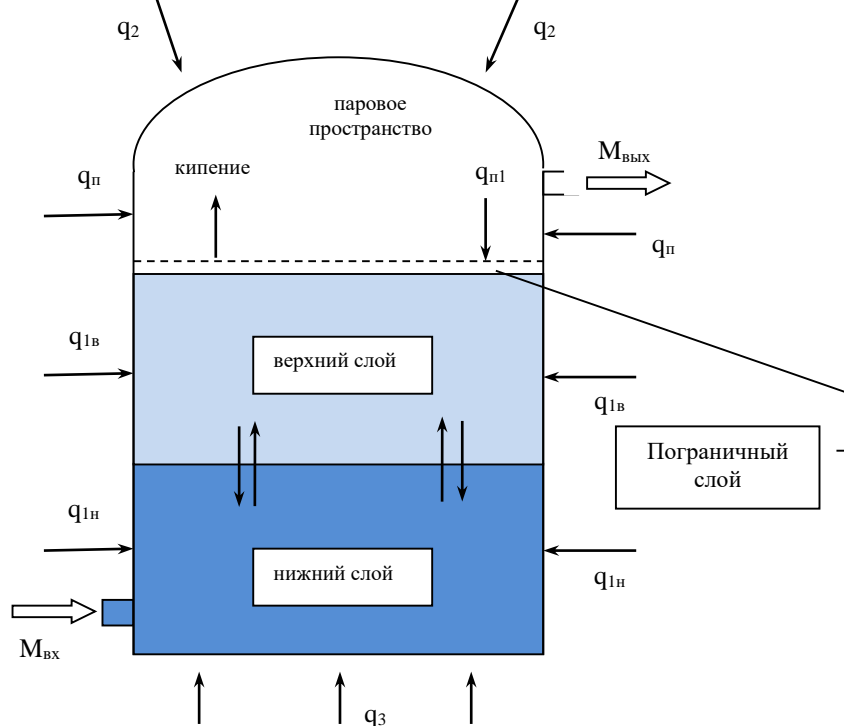


Рис. 1. Стратификация слоев при закачке продукта в резервуар

$q_{1н}$ – тепловой поток через стенку к нижнему слою; $q_{1в}$ – тепловой поток через стенку к верхнему слою; q_2 – тепловой поток через покрытие к парогазовой фазе; q_3 – тепловой поток через днище; q_n – тепловой поток через стенку к парогазовой фазе; q_{n1} – тепловой поток от парогазовой фазы к жидкости; $M_{вх}$ – скорость закачки продукта, кг/с; $M_{вых}$ – скорость отбора паров СПГ из резервуара, кг/с

Из-за теплопередачи в резервуар для хранения часть СПГ испаряется. По мере испарения СПГ молярная доля легких или летучих компонентов, таких как метан или азот, уменьшается. Азот и метан испаряются в первую очередь из-за более низкой температуры точки пузырька. Оставшийся СПГ становится тяжелее за счет более тяжелых компонентов, таких как этан или пропан, которые испаряются при более высоких температурах. Процесс длительного хранения СПГ приводит к изменению термодинамических свойств, например, температуры точки кипения, скрытой теплоты парообразования или теплотворной способности. Этот процесс известен в индустрии СПГ как "процесс выветривания" и вызван утечкой тепла в резервуар. Прогнозирование этого процесса является одной из наиболее важных задач в индустрии СПГ. Расчетный подход процесса выветривания для представленных составов СПГ и предположений о резервуарах для хранения основан на простой динамической модели, в которой изменения основных параметров СПГ представлены как функция времени хранения.

В большинстве случаев плотность хранимого СПГ увеличивается с началом процесса испарения метана. Исключением является высокая молярная доля азота. Азот, имеющий более низкую температуру точки кипения, испаряется первым. Азот также тяжелее метана, поэтому плотность хранящегося СПГ временно снижается из-за испарения азота. Высокая молярная доля азота приводит к временному увеличению скорости выкипания СПГ.

Опасен процесс "выветривания" СПГ, когда верхний слой СПГ испаряется и становится более плотным, что может привести к эффекту перемешивания – «ролл-оверу».

Если СПГ содержит значительное количество азота, может произойти автостратификация, что может привести к "переворачиванию, вызванному азотом". Азот с более низкой температурой кипения и более высокой молярной массой выкипает при более низкой температуре. Поэтому по мере

выкипания азота плотность оставшегося СПГ будет уменьшаться, в отличие от СПГ без азота, плотность которого будет увеличиваться по мере выветривания. Высокая молярная доля азота в СПГ (более 1%) может привести к образованию слоя жидкости низкой плотности, который может возникнуть на поверхности. Этот легкий слой может вызвать расслоение и смешивание с нижним слоем, что приведет к опрокидыванию.

Хранение СПГ различного состава представляет собой сложную проблему. Процессы, происходящие при хранении СПГ, приводят к изменению его параметров. Изменчивость параметров хранимого СПГ может привести к возникновению опасных ситуаций в процессе хранения. Существует три основные причины возникновения опасных ситуаций, связанных с изменчивостью состава СПГ: выветривание СПГ, заполнение резервуара новой партией СПГ или высокая молярная доля азота в хранимом СПГ. Все эти причины могут привести к расслоению СПГ в резервуаре и, как следствие, к неустойчивости при опрокидывании. Предотвращение этих явлений должно основываться на постоянном мониторинге профиля плотности в резервуаре, состава, хранимого СПГ, давления в резервуаре и мониторинге скорости выкипания.

Список литературы:

1. Ebenezer Adom, Sheikh Zahidul Islam, Xianda Ji: Modelling of Boil-Off Gas in LNG Tanks: A Case Study, International Journal of Engineering and Technology Vol.2 (4), pp. 292-296, 2010.
2. Haroum, M.A., and Housner, W.G., 1981, Seismic design of liquid storage tanks, ASCE, Proceedings J. of Technical Councils, Vol. 107, No TC1, 191-345.
3. Łaciak M.: Liquefied natural gas storage of variable composition, Archives of Mining Sciences, Poland, vol. 60, is. 1, pp. 225–238, 2015.

4. Migliore C., Tubilleja C., Vesovic V.: Weathering prediction model of stored Liquefied Natural Gas (LNG). Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 26, pp. 570-580, 2015.