

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНОГО РАСХОДА СПГ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО БЕЗОПАСНУЮ ЭКСПЛУАТАЦИЮ КРИОГЕННОГО РЕЗЕРВУАРА

Р. Р. МУХАМЕТШИН¹, Ф. Г. БАКИРОВ², Е. Ю. ЕРЕМЕЕВА³

¹Robert.ri@mail.ru, ²fgbakirov@bk.ru, ³Elizaveta.eremeeva87@gmail.com

ФГБОУ ВО Уфимский государственный авиационный технический университет

Аннотация. Рассматривается возможность безопасной эксплуатации криорезервуара при отказе штатных систем безопасности за счет поддержания минимального расхода сжиженного природного газа.

Ключевые слова: криорезервуар; сжиженный природный газ; метан; тепловой поток; расход топлива.

Природный газ становится одним из важнейших источников энергии, так как запасы его огромны, и он является экологически чистым топливом по сравнению с нефтепродуктами. Кроме того, выбор его как топлива помогает решать две проблемы окружающей среды: загрязнение атмосферы и парниковый эффект.

Однако, из-за его достаточно низкой плотности возникают проблемы с транспортировкой. Сегодня самым распространенным способом перемещения природного газа «из пункта А в пункт Б» является использование трубопроводного транспорта. Поскольку данный вид транспорта требует больших работ по предварительной подготовке, то популярность набирает перевозка СПГ в сжиженном состоянии.

Из всего добываемого в мире природного газа более 26 % сжижается и транспортируется в жидком виде в специальных танкерах из стран добычи в страны потребителей газа [2].

По оценкам специалистов ВНИИпромгаза, около 50 % населенных пунктов, нуждающихся в газификации, экономически целесообразно обеспечивать газовым топливом в виде привозного СПГ [2].

Первые шаги по использованию сжиженного природного газа для энергосбережения в промышленности и

коммунальном хозяйстве были осуществлены в Санкт-Петербурге и Ленинградской области. Здесь были введены в действие две опытно-промышленные установки по производству СПГ, кроме того, несколько удаленных котельных в области работают на привозном сжиженном природном газе. При этом были использованы все преимущества СПГ как топлива [1].

Использование СПГ в качестве топлива требует создания резервуаров, способных хранить сжиженный природный газ (СПГ) при низких температурах не только при транспортировке, но и непосредственно у производителя и потребителя. При строительстве терминалов сжиженного природного газа с большими объемами хранения (50–160 тыс. м³) применяется сталь, в составе которой содержится 9 % никеля. Это обусловлено высокой прочностью и устойчивостью такого материала к охрупчиванию при сверхнизких температурах, при которых хранится СПГ [1].

Поскольку полностью исключить теплообмен между СПГ и окружающей средой нельзя, то это будет приводить к испарению хранящегося в баке топлива. Испарившийся газ отводится из резервуаров с целью поддержания постоянного давления и используется в качестве топлива [1].

Неконтролируемый рост давления газа может привести к разрушению

криохранилища. Поэтому в них предусмотрены системы защиты.

Ключевым элементом системы безопасности завода является факельная установка. Сжигание на факеле представляет собой процесс, с помощью которого избыточный газ быстро и безопасно подается от завода через вертикальную трубу высотой 125 м (факельный ствол) для незамедлительного воспламенения с помощью «пилотной горелки» — постоянного источника открытого огня [1].

Факел является «предохранительным клапаном» завода. Пилотная горелка на вершине факельного стояка постоянно горит – это свидетельствует о нормальной работе. Пилотная горелка обеспечивает постоянное воспламенение газа на верхушке факельного ствола, если есть необходимость в сбросе избыточного газа с технологических установок завода. Основная причина сжигания газа состоит в том, что при этом процессе на окружающую среду оказывается меньшее воздействие, по сравнению с выбросами невоспламененного углеводородного газа [1].

Однако, непрерывное использование СПГ из емкости также может позволить безопасно эксплуатировать хранилище (например, при отказе штатных систем безопасности).

В мировой практике применяются различные виды резервуаров хранения СПГ. Различия обусловлены их объемом, а также геологическими и природоохранными факторами. Благодаря новым конструкторским разработкам, в последние годы стало возможным строительство крупных надземных резервуаров объемом до 200 тыс. м³.

Многие фирмы, применявшие одностенные резервуары, в настоящее время предпочитают сооружать двустенные конструкции. Это объясняется тем, что относительно высокая первоначальная стоимость двустенных резервуаров окупается значительной экономией эксплуатационных расходов [1].

Резервуары для хранения сжиженного природного газа выполняются с двойными

стенками: внешняя стенка предназначена для задержки паров СПГ, а вокруг внутренней стенки имеется система изоляции, содержащая криогенную жидкость. Резервуары выполняются из металлов или сплавов с низким коэффициентом теплового расширения, которые не охрупчиваются при соприкосновении с криогенными текучими средами (то есть из алюминия или стали с девятипроцентным содержанием никеля). Вокруг современных резервуаров устраиваются насыпи, бермы, дамбы или обвалования, рассчитанные на прием утечек любого объема, а именно до 110 % от объема соответствующего резервуара [1].

Для определения минимального расхода, недопускающего разрушения емкости с СПГ $G_{\text{крит}}$, сделаем несколько допущений:

1. Емкость имеет цилиндрическую форму.

2. Вся теплота, поступающая в емкость, тратится на нагрев и испарение СПГ.

3. Температура окружающей среды по всей высоте резервуара считается одинаковой.

4. Пренебрегаем влиянием испарившейся жидкости на уменьшение объема, занимаемого неиспарившейся жидкостью.

Схематическое изображение конструкции резервуара показано на рис. 1 [1].

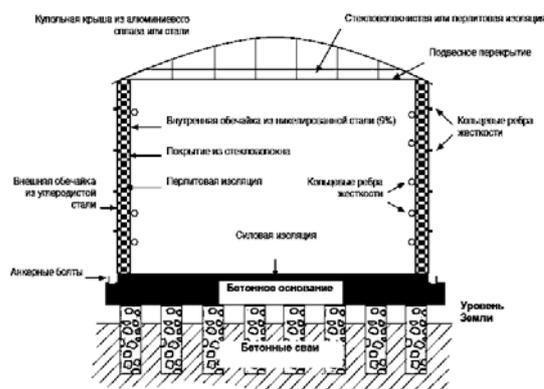


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции резервуара

В общем случае, суммарный тепловой поток через стенку (изоляция) определяется по формуле:

$$Q = q \cdot S_m = \frac{\bar{\lambda}}{\delta_{из}} \cdot (T_{окр} - T_{кр.пр.}) \cdot S_m, \quad (1)$$

где $\bar{\lambda}$ – кажущийся коэффициент теплопроводности; $\delta_{из}$ – толщина материала изоляции; $T_{окр}$ – температура окружающей среды; $T_{кр.пр.}$ – температура криопродукта; S_m – среднегеометрическая площадь поверхности изоляции; для цилиндрической емкости определяется по формуле:

$$S_m = (S_{кожуха} - S_{сосуда}) \cdot \ln \frac{S_{кожуха}}{S_{сосуда}}. \quad (2)$$

Поскольку в резервуаре природный газ находится и газообразном (при температуре кипения $T_{кип}$) и в жидком состоянии, то суммарный тепловой поток равен:

$$Q = q \cdot S_m = \frac{\bar{\lambda}}{\delta_{из}} \cdot (T_{окр} - T_{кип}) \cdot S_{mгаз} + \frac{\bar{\lambda}}{\delta_{из}} \cdot (T_{окр} - T_{хр.СПГ}) \cdot S_{mСПГ} = \frac{\bar{\lambda}}{\delta_{из}} \cdot \left((T_{окр} - T_{кип}) \cdot S_{mгаз} + (T_{окр} - T_{хр.СПГ}) \cdot S_{mСПГ} \right), \quad (3)$$

где $T_{хр.СПГ}$ – температура, при которой хранится СПГ, $S_{mгаз}$, $S_{mСПГ}$ – среднегеометрические площади поверхности изоляции, приходящиеся на объем, занимаемый газом и жидкостью соответственно.

Для определения $S_{mгаз}$, $S_{mСПГ}$ необходимо знать высоту резервуара, приходящуюся на объем, занимаемый газом и жидкостью соответственно:

$$h_{СПГ} = \frac{4 \cdot (M - G)}{\pi \cdot D_{сосуда}^2 \cdot \rho_{СПГ}}, \quad (4)$$

где M – первоначальная масса СПГ, G – отведенная (к потребителю) масса за время, прошедшее с момента заправки, $D_{сосуда}$ –

диаметр основания сосуда, $\rho_{СПГ}$ – плотность СПГ.

Соответственно, $h_{СПГ} = h_{резервуара} - h_{СПГ}$.

Воспользуемся формулой для определения площади поверхности кожуха и сосуда (резервуара):

$$S_{кожуха i} = \frac{\pi \cdot D_{кожуха}^2}{4} + \pi \cdot D_{кожуха} \cdot h_i; \quad (5)$$

$$S_{сосуда i} = \frac{\pi \cdot D_{сосуда}^2}{4} + \pi \cdot D_{сосуда} \cdot h_i,$$

где индекс i – газ/жидкость.

По формуле (2) определяем среднегеометрическую площадь поверхности изоляции, а затем по формуле (3) – суммарный тепловой поток через стенку (изоляцию).

Согласно второго допущения, масса испаряющейся жидкости равна:

$$m_{исп} = \frac{Q}{r_{исп} + c \cdot \Delta T}, \quad (6)$$

где $r_{исп}$ – теплота газообразования природного газа; $\Delta T = T_{хр.СПГ} - T_{кип}$.

Поскольку криогенные резервуары проектируются на определенные критические давления хранящихся веществ $P_{крит}$, то объем, необходимый для безопасного хранения $m_{исп}$, будет равен (считаем, что образовавшийся природный подчиняется уравнению состояния идеального газа):

$$V_{крит} = \frac{m_{исп} \cdot R \cdot T_{кип}}{P_{крит} \cdot M}, \quad (7)$$

где R – универсальная газовая постоянная, M – молярная масса природного газа (преимущественно метана).

Весь необходимый объем $V_{крит}$ освобождается за счет отвода СПГ к потребителю. Тогда $G_{крит}$ равен:

$$G_{крит} = V_{крит} \cdot \rho_{СПГ}. \quad (8)$$

ВЫВОДЫ

Рассмотренная методика позволяет определить минимальный расход СПГ, позволяющий безопасно эксплуатировать криогенные резервуары при отказе штатных систем безопасности. Также анализ формулы (3) показывает, что значение $G_{\text{крит}}$ уменьшается с уменьшением объема сжиженного природного газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Энергоустановка** на базе ГТЭ-10/95 с использованием СПГ в качестве топлива. Выпускная квалификационная работа Низамовой А. А., Уфа, УГАТУ, 2012 г. [Power plant based on GTE-10/95 using LNG as fuel. Final qualifying work of A. A. Nizamova, 2012].

2. **Иньков А. П., Скородумов Б. А. и др.** Сжиженный природный газ как основа теплоснабжения отдаленных регионов. Интернет-газета «Холодильщик», №1 (49), 2009. URL: http://www.holodilshchik.ru/index_holodilshchik_best_article_issue_1_2009.htm [A. P. Inkov, B. A. Skorodumov and others. Liquefied natural gas as the basis for heat supply in remote regions. Internet-newspaper «Kholodilshchik», No. 1 (49), 2009. URL: http://www.holodilshchik.ru/index_holodilshchik_best_article_issue_1_2009.htm].

ОБ АВТОРАХ

МУХАМЕТШИН Роберт Римович, асп. каф. АТиТ. Дипл. инженера по специальности 16034 «Авиационная и ракетно-космическая теплотехника» (УГАТУ, 2015).

БАКИРОВ Фёдор Гайфуллович, зав. каф. АТиТ, д-р техн. наук, профессор.

ЕРЕМЕЕВА Елизавета Юрьевна, магистрант каф. АТиТ.

METADATA

Title: Determination of the minimum LNG flow rate ensuring the safe operation of the cryogenic reservoir

Authors: R. R. Mukhametshin¹, F. G. Bakirov², E. Yu. Eremeeva³.

Affiliation: Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹Robert.ri@mail.ru, ²fgbakirov@bk.ru, ³Elizaveta.eremeeva87@gmail.com.

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 2 (21), pp. 92-95, 2019. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: in this work, we consider the possibility of safe operation of a cryoreservice in case of failure of standard safety systems by maintaining the minimum consumption of liquefied natural gas.

Key words: cryoreservoir, liquefied natural gas, methane, heat flow, fuel consumption.

About authors:

MUKHAMETSHIN, Robert Rimovich, postgraduate of faculty ATiT. Diploma engineer in the specialty 16034 "Aviation and Rocket and Space Heat Engineering" (USATU, 2015).

BAKIROV, Fedor Gaifullovich, head of faculty ATiT, doctor of technical sciences, professor.

YEREMEEVA, Elizaveta Yuryevna, undergraduate, faculty ATiT.