

УДК 621.59

Хранилища – накопители заводов сжиженного природного газа

Д-р техн. наук **Баранов А.Ю.** krion.spb@rambler.ru

Березин Н.А. Nikita.berezn@gmail.com

Андреев А.М. Tolia.andreev@gmail.com

Тихонов К.А. k_tihonov@mail.ru

Хитров Н.А. Nikohitr@gmail.com

Университет ИТМО

191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Диверсификация способов поставки энергоносителей является основой экономической безопасности России. Перевод части экспортных поставок природного газа в формат СПГ расширяет конкурентные возможности экспортеров. В РФ планируется строительство нескольких заводов СПГ. Хранилища накопители готовой продукции являются важным технологическим элементом такого завода. Стоимость хранилищ оказывает определяющее влияние на стоимость всего завода СПГ. Анализ научно-технической литературы о конструкции изотермических резервуаров (ИР) для жидкого метана позволяет обосновать выбор наиболее перспективного направления конструирования таких хранилищ. Показано, что криогенные хранилища мембранного типа изготавливаются с меньшими затратами конструкционных материалов и рабочего времени. Значительная часть комплектующих мембранного резервуара (МР) может изготавливаться в заводских условиях. Рекомендовано сосредоточить научные исследования на данном типе ИР.
Ключевые слова: диверсификация, СПГ, изотермическое хранилище, мембранный резервуар.

DOI:10.17586/2310-1148-2016-9-3-21-25

Storages – stores of the plants of liquefied natural gas

D.Sc. **Baranov A.Y.** krion.spb@rambler.ru

Berezin N.A. Nikita.berezn@gmail.com

Andreev A.M. Tolia.andreev@gmail.com

Tihonov K.A. k_tihonov@mail.ru

Khitrov N.A. Nikohitr@gmail.com

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

Diversification of modes of energy resources supply is the foundation of Russia's economic stability. Conversion in LNG some part of natural gas export delivery increases competitive opportunities of exporters. It is scheduled construction of several LNG plants in Russian Federation. The storage tank of finished products is an important engineering element of this plant. The cost of storage tank has a determining influence on the value of all LNG plant. The analysis of scientific literature on the construction of insulated tank (IT) for liquid methane allows prove the choice of the most upcoming trend of the construction of such storages. It is shown, that the membrane type cryogenic storage are made with less cost of structural materials and working time. The best part of the membrane tank (MT) components can be produced in the factory environment. It is recommended to focus the research on this type of IT.
Key words: diversification, LNG, insulated tank, membrane tank.

Производство сжиженного природного газа (СПГ) – непрерывный процесс, поэтому неотъемлемой частью завода по производству СПГ является система изотермических резервуаров (ИР). В них происходит накопление и хранение продукции дозагрузки в специализированные суда-газовозы.

Обычно суммарная ёмкость парка ИР принимается равной двум загрузкам кораблей [1]. Накопление такого запаса СПГ позволяет учесть различные непредвиденные обстоятельства, например, простой одной из линий ожижения. Танкеры для СПГ со сферическими резервуарами вмещают 140–150 тысяч м³. Танкеры с мембранными резервуарами типа Q-Flex и Q-Max, перевозят 216 и 266 тысяч м³, соответственно [2]. Исходя из грузоподъёмности СПГ-танкеров, можно оценить объём ИР завода по производству СПГ, который составит 300–500 тыс. м³.

ИР возводят не только в странах экспортерах, но и в странах, потребляющих импортный СПГ. Для быстрой разгрузки СПГ-танкеров на суше необходимо иметь аналогичные по объёму хранилища, из которых продукт

будет расходоваться в период между поставками. По этим причинам мировой парк крупнотоннажных ИР для хранения СПГ постоянно растёт. Представление об оснащённости отдельных стран и регионов мира хранилищами СПГ можно составить по материалам табл. 1.

Таблица 1

Суммарная ёмкость наземных хранилищ СПГ различных стран и регионов мира [3]

Страна	Ёмкость хранилищ, м ³
Европа	
Испания	2 337 000
Великобритания	800 000
Турция	535 000
Франция	510 000
Бельгия	380 000
Португалия	240 000
Греция	130 000
Италия	100 000
Итого по региону	5 032 000
Северная Америка	
США	879 000
Доминиканская Республика	160 000
Пуэрто-Рико	160 000
Итого по региону	1 199 000
Азиатско-Тихоокеанский регион	
Япония	14 130 300
Республика Корея	2 300 000
Тайвань	430 000
Итого по региону	16 860 300
ВСЕГО	23 091 300

Из данных табл. 1 видно, что наибольший объём хранилищ СПГ создан в странах Азиатско-Тихоокеанского региона, которые являются импортерами энергоносителей. Суммарный объём парка ИР Южной Кореи и Испании больше, чем объём всех хранилищ Северной Америки, а объём хранилищ Японии больше, чем объём ИР всех остальных стран мира.

Лидеры по обеспеченности ИР для хранения СПГ являются безусловными импортерами энергоносителей, что иллюстрирует важность строительства хранилищ для обеспечения энергобезопасности страны. Потребность в проектировании низкотемпературного хранилища СПГ возникла в связи с началом производства сжиженного природного газа. Первый изолированный резервуар (ИР) вместимостью 54,9 м³ был изготовлен в 1939 году из легированной стали с 2 %-м содержанием никеля в штате Виргиния (США). В качестве тепловой изоляции использовались пробковые плиты толщиной 750 мм [4]. В России крупнотоннажные ИР для СПГ смонтированы только на ожигательных заводах Ямала и Сахалина, причем изготовлением резервуаров в обоих случаях руководили представители иностранных компаний. В ближайшее время только в Ленинградской области планируется строительство двух заводов СПГ с производительностью 1 и 10 млн. тн. в год. Учитывая то, что стоимость ИР составляет до 30 % общих затрат на строительство всего завода, полезно изучить зарубежный опыт и оценить возможность постепенного перехода на изготовление ИР российскими предприятиями. Ниже приводятся результаты анализа иностранной литературы.

По современной классификации [5] ИР для хранения СПГ делятся на следующие типы:

- Одинарный резервуар (Singlecontainmenttank), включает внутреннюю низкотемпературную ёмкость и наружный кожух;
- Двойной резервуар (Doublecontainmenttank), имеет аналогичную конструкцию, но обе оболочки изготовлены из материала устойчивого к низким температурам;
- Резервуар с полной герметизацией (Fullcontainmenttank), развивает конструкцию двойного резервуара, так как обеспечивает возможность вентилировать пространство между оболочками инертным газом и контролировать концентрацию паров природного газа[6].
- Резервуары мембранного типа отличаются тем, что их металлическая низкотемпературная ёмкость собирается из тонких гофрированных пластин [6].

Наиболее распространены хранилища с полной герметизацией и мембранного типа. Оба типа хранилищ могут монтироваться на разных уровнях над земной поверхностью. Существуют надземные, частично погружённые

ные и подземные хранилища СПГ. Подземные хранилища лучше всего переносят сейсмические колебания, но их сооружение требует больших материальных затрат, особенно в прибрежной зоне.

Разновидностями подземных резервуаров являются заглубленные, подпочвенные и полостные резервуары. Если как крыша заглубленного резервуара расположена над землей, то подземные резервуары полностью скрыты под землей. Подземные полостные резервуары имеют двойную металлическую оболочку с внутренним и внешним резервуаром. Внутренний резервуар изготавливается из металла, стойкого к воздействию низких температур. Пространство между внутренним и внешним резервуаром заполняется теплоизоляционным материалом и вентилируется сухим азотом [7]. Изолированные резервуары различаются по конструктивному исполнению их крыши. Известны три основных типа кровельных систем, которые используются при сооружении хранилищ. Металлическая кровля может крепиться к внешнему и внутреннему резервуару. Крыша ИР может опираться на внешний бетонный кожух, в этом случае над внутренним резервуаром располагается изолированная подвесная платформа. В некоторых случаях в конструкцию крыши ИР включается несущий железобетонный слой толщиной до метра [8]. В кровлях первого типа на внутреннюю поверхность воздействует давление паров СПГ, которое компенсирует воздействие окружающей среды.

Кровля второго типа, герметично соединена с внешним резервуаром, теплоизолированная подвесная платформа направляет пары СПГ в кольцевое пространство между внутренним и внешним резервуарами. Пары исполняют роль сухого продувочного газа, давление паров передается на прочный бетонный кожух. Упрощается изготовление и обслуживание крепления кровли. Однако, в районах повышенной сейсмичности жидкость из внутреннего резервуара может попадать в кольцевое пространство между резервуарами и вызывать термические повреждения внешней оболочки [8].

Третий тип кровли ИР обеспечивает наилучшую защиту от внешних механических воздействий, что достигается за счет прочности бетонной конструкции [8].

Для выбора оптимального направления конструирования ИР для заводов СПГ и газораспределительных терминалов надо описать конструктивные и эксплуатационные особенности каждого типа хранилищ отдельно.

Резервуары с полной герметизацией (РПГ)

Внутренняя ёмкость РПГ изготавливается из легированной стали, с содержанием 9% никеля, а внешняя – из обычного и предварительно напряжённого железобетона. Легированная сталь этого типа сохраняет удовлетворительные механические свойства при температурах ниже -160°C [9]. Внешний бетонный резервуар является несущей конструкцией хранилища, которая выдерживает все внутренние и внешние нагрузки, включая напряжения, вызванные сейсмической активностью. Тепловая изоляция ИР размещается в пространстве между внутренним и внешним сосудами [10]. Бетонный кожух ИР этого типа герметичен для паров СПГ, благодаря нанесению на его внешнюю поверхность слоя углеродистой стали. Герметичность конструкции для жидкости обеспечивается полиуретановой пеной, которая наносится на внутреннюю поверхность бетонной стены ИР. Промерзание и вспучивание грунта под днищем резервуара предупреждает система подогрева дна [10].

Крышу ИР собирают и сваривают на дне внутреннего резервуара, затем готовую конструкцию переводят в верхнее положение при помощи пневматической системы [10, 11].

Мембранные резервуары (МР)

Внутренняя ёмкость МР собирается из относительно небольших по размеру и весу, стандартных элементов, которые соединяются на месте монтажа посредством сварки. Внедрение аппаратуры для автоматической сварки стандартных элементов, обеспечило конкурентоспособность ИР мембранного типа.

Конструкция МР обладает большим потенциалом развития, что подтверждается её растущим использованием не только в стационарных ИР, но и при строительстве современных СПГ-танкеров.

Учитывая востребованность мембранных конструкций, следует рассмотреть их подробнее.

Прежде всего, принцип действия мембранной технологии основан на чётком разделении главных функций между конструктивными элементами:

- Внутренняя ёмкость обеспечивает герметичность резервуара;
- Внешний кожух обеспечивает устойчивость резервуара;
- Изоляционная система передаёт гидростатическое давление на внутреннюю ёмкость к внешнему кожуху, а также снижает испаряемость продукта.

Внутренняя оболочка (первичная мембрана) изготовлена из гофрированных листов нержавеющей стали. В верхней части хранилища объём внутренней оболочки замыкает куполообразная крыша из углеродистой стали, которая сваривается с первичной мембраной. Внутренняя оболочка МР собирается из гофрированных стальных элементов толщиной 1,2 мм. Ортогональное гофрирование элементов позволяет мембране сжиматься и расширяться в обоих направлениях. Благодаря этому конструкция МР устойчива к температурным напряжениям, загрязнению и деформации несущей конструкции. Стандартные сборные элементы свариваются друг с другом внахлест и привариваются к изоляционным панелям [12]. Основную часть внутренней поверхности резервуара, стены и 80 % поверхности днища хранилища, собирают из прямоугольных элементов размером 3x1 м. Для формирования оставшихся 20 % днища используются треугольные соединительные элементы. Специальные детали обеспечивают прерывание гофры в углах и на изгибах оболочки.

Пространство за основной мембраной называется первичным изоляционным пространством. В нём искусственно поддерживается нейтральная (азотная) атмосфера, что позволяет постоянно контролировать надёжность внутренней оболочки с помощью газового анализа.

Сборные изоляционные панели (СИП) защищают днище и внутренние стены бетонного резервуара от негативного воздействия низких температур. Панели монтируются на бетонный каркас сразу после нанесения гидроизолирующей мастики и завершения гидроиспытаний. СИП изготовлены по технологии «сэндвич-панели», т.к. состоят из слоя прочного пенополиуретана, расположенного между двумя слоями фанеры [12]. Фанерные листы перераспределяют механическое напряжение по всей плоскости СИП и защищают пенополиуретан от разрушения, вызванного возможными концентраторами напряжений. СИП изготавливаются в трёх конструктивных исполнениях: плоские панели, угловые панели или трёхгранные панели.

СИП крепятся к внутренней поверхности бетонного кожуха клеевой мастикой и удерживаются от сдвига металлическими шпильками. Плотность пенополиуретана выбирают в соответствии с расчетной нагрузкой от гидростатического давления СПГ, которую СИП переносят на бетонный каркас.

Второй изоляционный слой (вторичная мембрана) – это композитный материал, состоящий из алюминиевой фольги, уложенной между двух слоёв стеклоткани. Этот слой монтируется в СИП при их заводской сборке. Герметичность соединений прилегающих панелей обеспечивается установкой над стыком перемычек из эластичного материала [12]. В случае протечек СПГ сквозь первую мембрану, герметичность хранилища обеспечивает вторичная мембрана. Это защищает бетонный каркас хранилища от негативного воздействия низких температур и позволяет безопасно вывести хранилище из эксплуатации.

Гидроизолирующий слой – это полимерный компонент, состоящий из эпоксидного материала и стекловолокна. Гидроизолирующий слой, нанесённый на внутреннюю поверхность бетонной конструкции, предотвращает проникновение атмосферной влаги в слой пенополиуретана. Гидроизолирующий слой перекрывает микротрещины в бетоне. Его толщина составляет около 3 мм [12]. К выше сказанному следует добавить, что мембранные резервуары лучше переносят сейсмические нагрузки, чем резервуары с полной герметизацией. Связано это с тем, что давление, вызванное движением жидкости, передаётся непосредственно к внешнему бетонному каркасу. Внутренняя ёмкость резервуаров с полной герметизацией во время землетрясения испытывает горизонтальные и вертикальные напряжения. Поэтому, чтобы не допустить отрыв дна внутреннего резервуара при сейсмических волнениях, внутренняя оболочка из легированной стали крепится к бетонной плите. Но установка креплений наносит повреждения системе тепловой защиты, что повышает её хрупкость [12]. Разделение главных технологических функций по отдельным элементам позволяет оптимизировать конструкцию, проводить специальные и общие тесты, избегать одновременных нарушений нескольких функций. Это позволяет наращивать надёжность и эффективность мембранных систем.

Для сравнения ИР этих двух видов, воспользуемся табл. 2, в которой приведены данные о затратах материалов на сооружение хранилищ. Ёмкость является одинаковой для обоих видов и составляет 190 000 м³ [13].

Таблица 2

Затраты конструкционных материалов на сооружение ИР емкостью 190 000 м³ [13]

Элемент конструкции	Материалы	Ед. изм.	Тип материала	Тип резервуара	
				РПГ	МР
Внешний резервуар	Бетон	м ³		16 575	15 313
	Арматура	тн		2 900	2 800
Внутренний резервуар	Металл	тн	Углеродистая сталь	1 452	645
			Легированная сталь	1 952	–
			Нержавеющая сталь	103	344
			Алюминий	105	109
	Изоляция	тн	Перлит	628	–
			Стекловолокно	110	110
			Пеностекло	412	–
			Пенополиуретан	–	747
			Гидроизоляция	–	70

При сооружении хранилища мембранного типа затрачивается меньше металлических изделий, а расходы железной арматуры и изоляционных материалов примерно равны. Независимо от вместимости резервуара, трудозатраты на сооружение мембранного резервуара на 50 % меньше, чем при изготовлении резервуаров с полной герметизацией [12].

Конструкция и методы сборки мембранных резервуаров позволяют одновременно выполнять различные монтажные операции. Благодаря этому, монтаж проходив среднем на 3 месяца быстрее [12]. Стоимость хранилища полной герметизации вместимостью 160 000 м³ составляет 55-75 миллиона долларов, мембранное хранилище обойдется на 25 % дешевле [14]. Учитывая изложенные выше соображения, можно сделать однозначный вывод о том, что мембранная технология изготовления ИР для хранения СПГ обладает рядом очевидных преимуществ, поэтому именно это тип хранилищ подлежит всестороннему изучению для последующей организации производства на территории РФ. Немаловажен и тот факт, что мембранная технология используется при сооружении криогенных танков на судах метановозах. Отработка методологии проектирования и изготовления стационарных хранилищ, позволит сформировать базу для использования мембранных технологий в отечественном кораблестроении. Учитывая крайне незначительный объем технической информации о МР и отсутствие у российских производителей опыта сооружения подобных объектов, научную работу в этом направлении следует начинать с создания математической модели ИР.

Литература

1. Нефть и море. Т.2. – Москва: Недра, 1968. – 320 с.
2. [Электронный ресурс]www.neftegaz.ru
3. [Электронный ресурс]www.studopedia.ru
4. Сорокин А.Р. Сжиженный метан зарубежом [Текст]/ А.Р.Сорокин, Л.М.Черняк.– Москва:Недра, 1965. – 135 с.
5. Руководство по безопасности для складов сжиженных углеводородных газов и легковоспламеняющихся жидкостей под давлением. Серия 09. Выпуск 34. - М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2012. - 56 с.
6. Recommendations for the Design and Construction of Refrigerated Liquefied Gas Storage Tanks (1986). FEMUA.
7. Sheila Crisologo, LNG Facilities. - January 2010. - Dräger Safety AG & Co. KGaA".
8. B.A. Fecht, T.E. Gates, K.O. Nelson, G.D. Marr, Comparative Safety Analysis of LNG Storage Tanks. – July 1982. - Battelle
9. Nishizaki, T., Largest aboveground PC LNG Storage Tank in the World, incorporating the latest technology-construction cost reduction and shortening of work period by employing new construction methods.
10. Young-myung Yang, Development of the world's largest above-ground full containment LNG storage tank.
11. Поповский Б.В.Строительство изотермических резервуаров[Текст]/Б.В.Поповский, А.З.Майлер.–Москва: Недра, 1988. – 120 с.
12. Pascale Grieve, GST, a new generation of LNG membrane-type land storage tank.
13. Jerome Thiercault, Cryogenic above ground storage tanks: full containment and membrane comparison of technologies.
14. [Электронный ресурс]www.mcilvaine.com.

References

1. Oil and sea. T.2. – Moscow: Subsoil, 1968. – 320 p.
2. [Electronic resource] www.neftegaz.ru
3. [Electronic resource] www.studopedia.ru
4. Sorokina R. Szhizhenny metan zarubezhom [Text] / A.R.Sorokin, L. M. Chernyak. – Moskva: nedra, 1965. – 135 p.
5. The guide to safety for warehouses of the liquefied hydrocarbonic gases and flammable liquids under pressure. Series 09. Release 34. - M.: "Scientific and Technological Center of Researches of Problems of Industrial Safety" closed joint stock company, 2012. - 56 p.
6. Recommendations for the Design and Construction of Refrigerated Liquefied Gas Storage Tanks (1986). FEMUA.
7. Sheila Crisologo, LNG Facilities. - January 2010. - Dräger Safety AG & Co. KGaA".
8. B.A. Fecht, T.E. Gates, K.O. Nelson, G.D. Marr, Comparative Safety Analysis of LNG Storage Tanks. – July 1982. - Battelle
9. Nishizaki, T., Largest aboveground PC LNG Storage Tank in the World, incorporating the latest technology-construction cost reduction and shortening of work period by employing new construction methods.
10. Young-myung Yang, Development of the world's largest above-ground full containment LNG storage tank.
11. Popovsky B. V. Stroitelstvo izotermicheskikh rezervuarov [Text]/B. V. Popovsky, A.Z.Mayler. – Moscow: Subsoil, 1988. – 120 p.
12. Pascale Grieve, GST, a new generation of LNG membrane-type land storage tank.
13. Jerome Thiercault, Cryogenic above ground storage tanks: full containment and membrane comparison of technologies.
14. [Electronic resource] www.mcilvaine.com.

Статья поступила в редакцию 06.09.2016 г.