

Вацлав Хрз*, Ири Криван, Петр Заруба, Зденек Мрkvичка
«Chart Ferox, a.s.», Ustecka, 30, Decin 5, Czech Republic, 40530
*e-mail: vaclav.chrz@chart-ind.com

ХРАНИТЬ ЛИ СПГ В РЕЗЕРВУАРАХ С ПЛОСКИМ ДНИЩЕМ ИЛИ В ВАКУУМНО-ИЗОЛИРОВАННЫХ ЁМКОСТЯХ?

Ёмкости с плоским днищем широко используются в системах хранения среднего объема таких криогенных продуктов, как кислород, азот или сжиженный природный газ (СПГ). Прогресс в технологиях изготовления вакуумно-изолированных емкостей открывает новые возможности для их применения при объемах ёмкостей от 500 до 1000 м³ и более. При использовании в проекте нескольких вакуумно-изолированных емкостей обеспечиваются более низкие затраты и проявляются другие преимущества. Дополнительная экономия энергии возникает при использовании вакуумно-изолированных резервуаров в качестве хранилища СПГ под давлением вблизи СПГ-ожижителя.

Ключевые слова: Криогенная техника. Сжиженный природный газ (СПГ). СПГ-ожижитель. Вакуумно-изолированный резервуар. Резервуар с плоским днищем. Безопасность. Стоимость. Экономия энергии.

Vaclav Chrz, Jiri Krivan, Petr Zaruba, Zdenek Mrkvicka

WHETHER TO STORE LNG IN TANKS WITH FLAT BOTTOMS OR VACUUM INSULATED CONTAINERS?

Flat bottom tanks have been widely used for medium size storage of cryogenic gases like oxygen, nitrogen and liquefied natural gas (LNG). Progress in design of vacuum insulated tanks opens new opportunities of their application for sizes 500 to 1000 m³ and more per tank. Use of several vacuum insulated tanks at the same plant can still result in lower project costs and other advantages, analysis of which is subject of this paper. Special energy saving effects has been achieved due to pressure storage of LNG at liquefaction plants.

Keywords: Cryogenic engineering. Liquefied natural gas (LNG). LNG liquefier. Vacuum insulated tank. Flat bottom tank. Safety. Cost. Energy savings.

1. ВВЕДЕНИЕ

К системам хранения среднего объема в данной статье будем относить хранилища с общим содержанием жидкого криопродукта в пределах одного объекта в диапазоне 1000...15000 м³. Такие объемы газов обычно хранятся на заводах по производству криогенных жидкостей, в основном, одновременно с газообразными продуктами. В последствии осуществляются поставки жидких продуктов разделения воздуха автотранспортом на сотни километров вокруг.

Другой пример хранилища среднего объема — спутниковая станция хранения и регазификации СПГ. СПГ может храниться рядом с ожижителем для последующих его поставок. При больших объемах потребления, например, для газификации города или большого завода, хранилища среднего объема применимы с обеих сторон системы дистрибуции (для отгрузки и приемки продукта). Число проектов с системами хранения СПГ среднего объема особенно уве-

личиваются в последние годы, так как газовые компании осваивают новые рыночные сегменты.

Традиционно для хранилищ среднего объема использовались ёмкости с плоским днищем. Однако возможна альтернатива. Сейчас крайне важно рассмотреть показатели больших вакуумно-изолированных ёмкостей с учётом всех капитальных и операционных затрат, а также аспекты безопасной и удобной эксплуатации. На основе этих данных сравним конструкции ёмкостей обоих типов [1,3].

2. КОНСТРУКЦИИ ЁМКОСТЕЙ С ПЛОСКИМ ДНИЩЕМ

Каждое хранилище с плоским днищем состоит из двух концентрических сосудов, сооружаемых на месте (рис. 1). Во внутреннем сосуде хранится криогенная жидкость, а внешний сосуд, окружающий внутренний с просветом в 1-1,5 м, на месте заполняется перлитовой изоляцией.

Диаметр внутреннего сосуда обычно составляет 10...30 м, высота варьируется в том же диапазоне, соотношение диаметр/высота уменьшается у больших емкостей. Оба сосуда имеют горизонтальное днище, и их крыша — форму конуса или сферы.

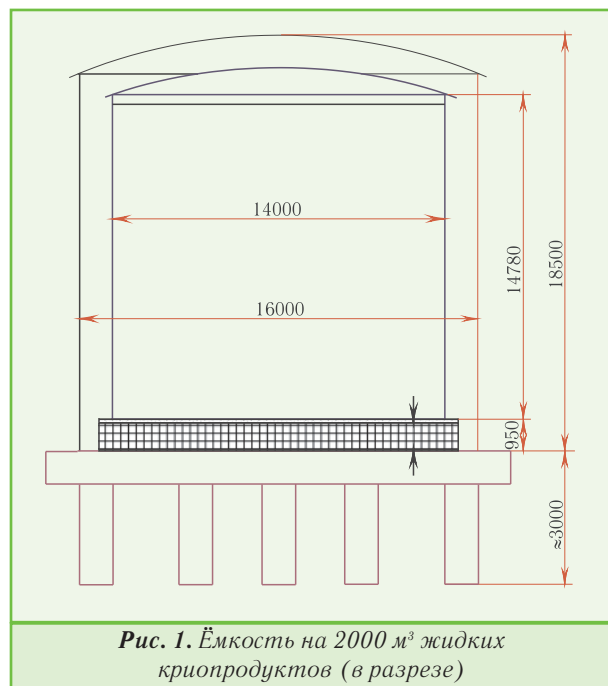


Рис. 1. Ёмкость на 2000 м³ жидких криопродуктов (в разрезе)

Стенки ёмкости должны быть укреплены кольцами жесткости, так как при полном опорожнении ёмкости стенки внутреннего сосуда подвергаются внешнему давлению перлитовой изоляции, которое может значительно увеличиваться, когда ёмкость проходит через два или более тепловых цикла нагревания и охлаждения («дыхания»).

Днище ёмкости должно быть хорошо изолировано от земли. Первым уровнем изоляции (около 1 м), — между днищами внешнего и внутреннего сосудов, — может быть слой вспененных стеклоблоков, которые стали востребованными из-за их устойчивости к влажности и относительно хорошей несущей способности.

Ёмкость должна быть прочно закреплена на фундаменте. Так, под внешним сосудом располагают бетонный фундамент (толщиной около 1 м и с диаметром большим, чем ёмкость), который должен воспринимать всю массу цистерны и ее содержимого.

Как было подтверждено, даже теплоизоляция основания не способна предотвратить замораживание земли. Это может привести к разрушению ёмкости. Для её предотвращения ёмкость устанавливают на ряд колонн, которые настолько высоки, что позволяют проходить под ёмкостью для проверки состояния основания или для размещения аксессуаров, как, например, насосы (см. рис. 1). Для строительства ёмкости и её окраски нужно сооружать леса (фото 2). Технологическое оборудование находится на крыше; для его обслуживания строится, как видно на фото 3, специальная лестница.



Фото 2. Резервуары с плоским днищем компании «Chart Ferox» для жидкого кислорода с объёмом 1800 м³ и азота — 2200 м³ в строительных лесах во время их окраски после сборки на месте



Фото 3. Вид эксплуатирующихся резервуаров

3. КОНСТРУКЦИИ ВАКУУМНО-ИЗОЛИРОВАННЫХ ЁМКостей

Вакуумно-изолированная ёмкость также состоит из внутреннего и внешнего сосудов. Но отношение длина/диаметр — обычно от 4 до 6. Оба сосуда имеют штампованные днища, что делает их классическими ёмкостями для работы под давлением. Горизонтальные резервуары проверяются на стабильность для заданной массы жидкости при низком давлении. Внутренний сосуд легко может быть спроектирован также для высокого давления в десятки бар.

Вакуумно-перлитная изоляция гарантирует низкий уровень испаряемости при толщине изоляционного пространства в 200-300 мм. Ёмкости целиком изготавливаются на заводе и оснащаются всей необходимой обвязкой (трубопроводы, фланцы, КИП), после чего они транспортируются на место по дорогам или водным путем (фото 4).

Вакуумно-изолированные ёмкости могут быть горизонтальными и вертикальными. Каждый из вариантов имеет свои преимущества, которые отмечались авторами в [1]. Указывалось, что вертикальные ёмкости несколько дешевле горизонтальных. В этой статье преимущественно будем заниматься анализом горизонтальных ёмкостей.



Фото 4. Горизонтальная вакуумно-изолированная ёмкость для СПГ объёмом 500 м³ при её доставке по автодороге

4. РАЗМЕЩЕНИЕ И УСТАНОВКА

Горизонтальные вакуумно-изолированные ёмкости устанавливаются на двух фундаментах под седлами на внешнем сосуде. Вертикальные резервуары размещаются на специальном фундаменте, немного большем, чем диаметр ёмкости, и их так называемая «юбка» закрепляется анкерными болтами.

И горизонтальные, и вертикальные резервуары располагаются на определенной площадке — бассейне, способном вместить весь объём резервуара. При установке нескольких ёмкостей на одной площадке его объём может отвечать одной ёмкости.

Если сравнивать площадь, необходимую для установки резервуара с плоским дном, то для вертикальных ёмкостей потребуется только немного большая площадь, но для горизонтальных ёмкостей она будет в несколько раз выше. Однако многоуровневая структура фундамента ёмкостей с плоским дном более трудоемка, чем индивидуальные фундаменты для вакуумно-изолированных ёмкостей (фото 5).



Фото 5. Установка вакуумно-изолированной ёмкости объёмом 500 м³

Вакуумно-изолированные ёмкости поставляются полностью готовыми, протестированными и окрашенными. Установка такой ёмкости на фундамент — дело нескольких часов (фото 5). Система целиком может быть смонтирована в течение нескольких дней. Проект полностью (с учётом системы трубопроводов, измерительной аппаратуры и электроснабжения) может быть реализован в течение одного-двух месяцев. В этом случае работы на площадке минимальны.

С другой стороны, ёмкости с плоским дном практически изготавливаются на площадке из обработанных и заваляцованных листов. Сборка, контроль сварных соединений, изоляция, окраска и тест давле-

нием зависят от погоды. Их выполнение может занять несколько месяцев, а также привлечения множества квалифицированных сварщиков и других специалистов, участвующих в строительстве на площадке. И только после этого собираются трубопроводы и системы контроля. Соединительные трубопроводы в ёмкостях с плоским дном довольно просты, но это в действительности только очень малая часть проекта.

5. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ

Как указывалось выше, ёмкости с плоским дном сконструированы для очень низкого избыточного давления (около 5 кПа), что фактически представляет собой разность между абсолютным давлением во внутреннем сосуде и абсолютным атмосферным давлением (103+5 кПа). Изменения атмосферного давления, происходящие иногда в течение нескольких часов, могут потребовать контроля за давлением внутри сосуда. Падение атмосферного давления может вызвать повышение внутреннего давления сверх максимально допустимого, что должно быть компенсировано сбросом давления в атмосферу. Возможна и рециркуляция хранимой жидкости, что должно привести к конденсации паров над уровнем жидкости (так же, как при заполнении ёмкости свежей холодной жидкостью). Повышение атмосферного давления приводит к росту внешнего давления, что должно быть компенсировано работой испарителя наддува для повышения давления во внутреннем сосуде. Хотя нужно отметить, что испаряющийся сжиженный газ не может аккумулироваться в газовой полости, поскольку избыточное давление низкое. Это требует установки нагнетательных компрессоров или малого ожижителя испаряемого газа, особенно в случае с СПГ, выбросы которого неэкономичны, неприемлемы для экологии и опасны.

Другая особенность связана с обратной стратификацией жидкости. В то время, как верхние слои жидкости находятся при давлении около атмосферного, что сохраняет их температуру близкой к нормальной точке кипения, нижние слои подвергаются давлению на один бар выше. Длительное хранение без существенного отбора жидкости может привести к нагреванию нижних слоёв теплопритоками, приближающимися СПГ к более высокой точке кипения при увеличении давления. Вследствие нагревания плотность нижних слоёв становится ниже, и жидкость делается легче, чем в верхних слоях. В течение определенного времени жидкость в резервуаре может оставаться в состоянии неустойчивого равновесия, поддерживаемого инерцией, которое может завершиться спонтанным падением вниз верхних слоёв, обменом объёмами и смешиванием. В результате более тёплая жидкость перейдёт в верхние слои. Имеющееся там более низкое давление вызовет внезапное частичное испарение довольно больших объёмов жидкости, которое может быть в 10-30 раз больше стандартного уровня испаряемости. Это явление называется эффектом

Сравнение ёмкостей с плоским дном и вакуумно-изолированных ёмкостей по различным показателям

Тип ёмкости	С плоским дном	Вакуумно-изолированная
Способ изготовления	На месте	На заводе
Количество ёмкостей	Одна	Несколько
Время монтажа на площадке	Несколько месяцев	Несколько дней
Стандартное макс. давление, бар	0,05	8
Возможность поэтапного строительства, например, в 2 или 3 этапа	Нет	Есть
Требуемый фундамент	Для полного объёма хранения	Для одной ёмкости
Требуемая площадь	Сравнительно небольшая	Для вертикальных — небольшая; для горизонтальных — большая
Конструкции фундаментов и площадки	Дорогая	Малобюджетная
Необходимость в жидкостном насосе	Есть	Нет
Уровень испаряемости вследствие теплопритоков	0,1...0,2 %/сутки	0,06...0,08 %/сутки
Опасность эффекта опрокидывания (спонтанного перемешивания жидкости с риском испарения и роста давления)	Есть	Нет
Макс. образование паров при опрокидывании	0,04...0,24 %/ч	—
Необходимость в компрессорах (boil-off compressors)	Есть	Нет
Потребность в непрерывном контроле температуры и концентрации	Есть	Нет
Защита от землетрясений (потребность в контроле)	Сложно	Просто
Катастрофы: война, терроризм, самолет	Риск полного разрушения	Риск единичных разрушений
Возможность частичной эксплуатации после несчастных случаев	Нет	Есть
Доступность для обзоров и инспекций	Сложно (всё на крыше)	Просто (на уровне глаз)
Простота перемещения в случае изменений в проекте	Нет	Есть

опрокидывания (roll-over effect), которое исследовалось Gogieu и Uznanski [2].

Это особенно важно для ёмкостей СПГ, на кото-

рый влияет не только температура, но и наличие в нём, наряду с метаном, и других веществ. Ёмкость может быть последовательно заполнена слоями с более или менее низкими концентрациями более тяжёлых компонентов, чем метан (этан, пропан). Это делает изменения плотности ещё менее предсказуемыми. Именно поэтому норма EN1473: 2007 [3] для резервуаров с плоским дном для СПГ предусматривает специальные движущиеся вверх-вниз датчики температуры и концентрации во внутреннем сосуде.

Устранение возникающих различий в давлении и концентрации требует перекачки всего содержимого ёмкости.

При этом из нижней части резервуара жидкость забирается насосом, который дожимает её до необходимого давления. После этого она испаряется атмосферным или подогреваемым испарителем и поставляется как газ.

В вакуумно-изолированных ёмкостях жидкость обычно хранится при повышенном давлении (от 5 до 30 бар). Когда требуется хранение при давлении близком к атмосферному (например, в случае хранения возле СПГ-ожижителя для заправки транспортных ёмкостей низкого давления), то достаточно легко возможно изготовление резервуаров на давление в несколько бар, принимая во внимание доступную толщину материалов сосуда. Это практически снимает проблему с образованием паров из-за различных температур жидкости, потому что все возможные тепловые эффекты компенсируются незначительным увеличением давления.

Поскольку жидкость может храниться при повышенном давлении, многие технологические процессы могут обеспечиваться газом только через испаритель, без использования жидкостного насоса.

Все это делает эксплуатацию вакуумно-изолированных резервуаров намного более простой и надёжной по сравнению с резервуарами с плоским дном (см. таблицу).

В случае катастроф (землетрясение, крушение самолёта, военные действия или атаки террористов) преимущества вакуумно-изолированных ёмкостей не только в их лучшей механической защите, но, также, в меньшей вероятности разрушения всей системы хранения, в связи с использованием нескольких резервуаров.

6. СРАВНЕНИЕ СТОИМОСТИ

Известно, что затраты на установку ёмкости с плоским дном растут с коэффициентом 0,6 к объёму резервуара, в то время как затраты на установку нескольких вакуумно-изолированных емкостей растут линейно к количеству резервуаров с небольшим снижением цены за один резервуар при увеличении их числа.

Используя информацию о реализованных проектах и детальные коммерческие данные о структуре затрат, можно прийти к выводу, что при общем объёме хранения в 2000 м³ вакуумно-изолированные ёмкости были на 40 % экономичнее, чем ёмкости с плоским дном. В то же время, при общем объёме хранения в 12000 м³ затраты уже сопоставимы. Сравниваются же они в точке с объёмом 13400 м³ (см. рис. 6.).

На границах рис. 6 показаны диапазоны неточности данных в 15 % или влияния специфических условий проекта, которые могут оказать влияние на результат выбора оптимального варианта. Этим способом установлены области предпочтения для ВИ или ПД, а также переходная между ними область. Гарантированный уровень преимущества вакуумно-изолированных ёмкостей — 4500 м³. Случаи, когда объёмы больше 15000 м³, сложно исследовать ввиду отсутствия чётких данных о проектах. К похожим заключениям на базе опыта проектирования пришли Simpenes и Neslein [4].

Указанный вывод относится только к технологическому оборудованию, не включая затраты на строительство. Косвенный анализ показывает, что эти затраты для ёмкостей с плоским дном выше. К тому же, такое преимущество, как сокращение времени работ на площадке, делает использование вакуумно-изолированных ёмкостей более привлекательным.

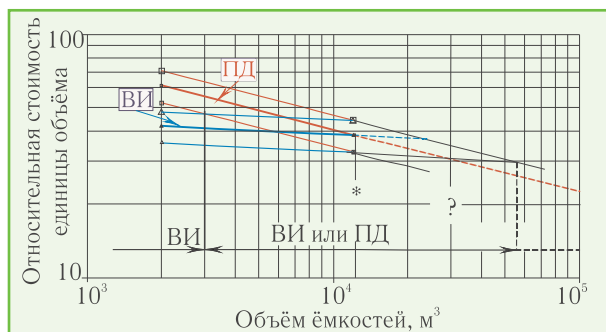


Рис. 6. Сравнения стоимости систем хранения с вакуумно-изолированными ёмкостями (ВИ) и ёмкостью с плоским дном, содержащей насос для подачи газа под давлением (ПД)

Проведённый анализ, конечно, не учитывает все аспекты, влияющие на стоимость оборудования. Так, результаты, представленные на рис. 6, могут быть откорректированы с учётом стоимости земли, что более выгодно в случае ПД. Строительные работы могут быть более дорогими при сооружении ПД, но показать это можно при использовании большого объёма данных. Также следует учитывать вопросы безопас-

ности ёмкостей ВИ.

Различия в ценах производителей или специфические местные условия могут сдвинуть найденный предел (12000 м³) в ту или другую сторону. Однако самое важное, что получено в выполненном сравнении — практика применения вакуумно-изолированных ёмкостей в системах хранения большого объёма получает все большее признание. И этот подход применяется, конечно, не только для СПГ, но также и для других криогенных технических газов.



Фото 7. Три горизонтальные вакуумно-изолированные ёмкости HT500/8 (500 м³/8 бар) для спутниковой станции СПГ 1500 м³ в Сундальсоре, Норвегия (поставка 2003 года)

7. ПРОГРЕСС В ПРОИЗВОДСТВЕ РЕЗЕРВУАРОВ БОЛЬШИХ ОБЪЁМОВ

На основе требований инвесторов компания «Chart Ferox» разрабатывает новые конструкции и ведёт поставку больших вакуумно-изолированных резервуаров HT500/8 (500 м³/8 бар) (фото 7), HT683/8 (683 м³/8 бар) и HT1000/8 (1000 м³/8 бар). Большие резервуары характеризуются меньшей стоимостью единицы объёма (рис. 8) и уменьшенными затратами на комплектацию всей установки (трубопроводы; системы измерения, управления и обслуживания установки). Кроме того, время бездренажного хранения повышается с ростом объёма резервуара. Этот параметр имеет значение только в случае хранения СПГ как запасного источника газа без выдачи продукта в нормальных условиях. В случае использования таких больших резервуаров время бездренажного хранения составляет несколько месяцев.

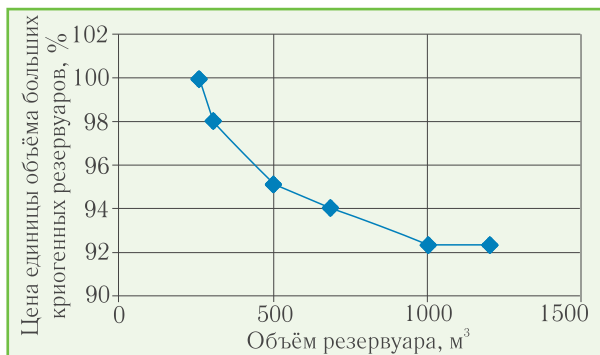


Рис. 8. Стоимость единицы объёма крупных криогенных резервуаров в зависимости от их вместимости



Фото 9. Вид резервуара НТ1000/8, подготовленного для перевозки по автомобильным дорогам

Во многих случаях применение больших резервуаров ограничено возможностями транспорта вблизи сооружаемого объекта, например, в районах Сибирской магистрали, где единственным средством транспорта является железная дорога. Но доставка резервуаров в европейскую часть России и Украины оказывается возможной по сплавным рекам и автомобильным дорогам (фото 9). Этот тип резервуаров может оказаться выгодным для северного побережья России, где строительный период короче на два месяца в год. Поэтому подвоз готовых резервуаров судном на место стройки и инсталляция всей установки в течение нескольких недель может оказаться оптимальным решением, как это подтвердило создание в Норвегии спутниковых станций на основе самых больших в мире вакуумно-изолированных резервуаров, поставленных компанией «Chart Ferroх» (фото 10 и 11).



Фото 10. Спутниковая станция Mosjoen в северной Норвегии (поставка 2007 года) с общим объемом хранения 3415 м³ (5 × НТ683)



Рис. 11. Комплекс для промежуточного хранения, дистрибуции и заправки судов СПГ (Oera, Норвегия) с общим объемом 6400 м³, состоящий из резервуаров: 2×НТ1000, 5×НТ683, 2×НТ500 (поставка 2011 года)

8. ЭФФЕКТ СНИЖЕНИЯ ПОТРЕБНОСТИ В ЭНЕРГИИ

Этот эффект наблюдается в случае использования ВИ-резервуаров в качестве хранилища СПГ вблизи ожижителей. В случае резервуаров с плоским дном надо производить СПГ с точкой кипения при атмосферном давлении (−162 °С). Вакуумно-изолированные резервуары дадут возможность вырабатывать СПГ с точкой кипения при повышенном давлении, например, при 2-ух барах (−147 °С), что будет способствовать снижению затрат энергии на ожижение.

Анализ был проведен в [5] для различных давлений в диапазоне до 4 бар избыточного давления для случая использования цикла охлаждения со смешанным хладагентом. Например, при давлении кипения 2 бара снижение потребления энергии составляет около 10 %. Этот показатель должен включаться в общую экономическую оценку установки. Экономия энергии в 10 % за пять лет использования ожижительного завода будет представлять собой сумму, равную стоимости целого хранилища СПГ. Если вычесть экономию энергии из цены ВИ-резервуаров, то рис. 6 модифицируется в рис. 12.

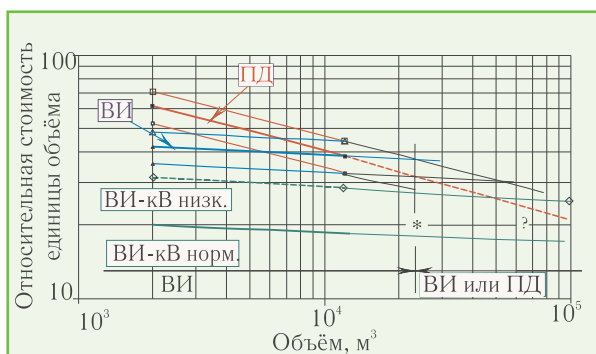


Рис. 12. Снижение стоимости сооружения системы хранения СПГ, использующей резервуары НТ500, за счёт экономии энергии открывает возможность использования ВИ до очень больших объёмов порядка десятка тысяч м³: ВИ-кВ низк. (0,04 Евро/кВтч); ВИ-кВ норм. (0,1 Евро/кВтч)

На фото 13 показана система хранения СПГ вблизи ожижителя с ВИ-резервуарами.



Фото 13. Ожижитель компании Gasum в Финляндии с тремя резервуарами «Chart Ferroх» с объёмами по 683 м³ каждый

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вакуумно-изолированные ёмкости — удачная альтернатива хранилищам СПГ с плоским дном среднего объёма (до 15 000 м³ или больше в случае хранения СПГ как продукта, производимого в ожижителе). Анализ показал, что большое количество ёмкостей может иметь лучшую общую экономику и надёжность.

Новые типы больших вакуумно-изолированных резервуаров способствуют внедрению технологий сухопутной дистрибуции СПГ. Поэтому варианты применения вакуумно-изолированных ёмкостей следует рассматривать в каждом из проектов хранения СПГ в объёмах порядка тысяч и десятков тысяч кубометров жидкости.

ЛИТЕРАТУРА

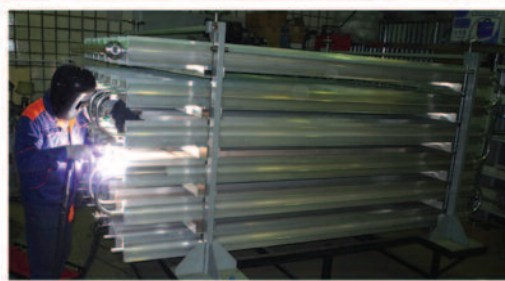
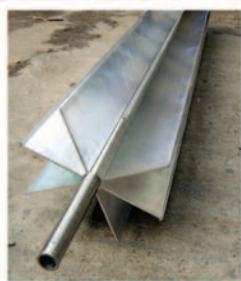
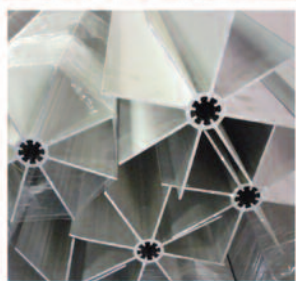
1. Chrz V., Krivan J., Kouba M., Storage Tanks — Horizontal or Vertical?// Proc. 5th Int. Conf «Cryogenics 1998», — P. 137-141.
2. Gorieu O., Uznanski D. How to operate LNG terminals with flexibility/safety despite the diversification of unloaded LNG quantities?// Proc. 14th Int. Conf. on LNG (LNG14). PO-26.1-26.10.
3. EN 1473:2007, Installation and equipment for liquefied natural gas — Design of onshore installations, CEN.
4. Simmenes T., Neslein E. G. Choice of storage technology// Proc. 4th Inter. Conf./ Small Scale LNG. — 2011. — P. 9.
5. Chrz V., Boshers A. Liquefaction Energy Savings Using Elevated Downstream LNG Pressure// Proc. 3rd Int. Conf./ Small Scale LNG. — 2009. P. 8.



ООО «НПО Мониторинг»

*Высокоэффективные атмосферные испарители
криогенных продуктов*

Компания ООО «НПО Мониторинг» выпускает стандартные навесные и отдельностоящие, производственные и наддувные атмосферные испарители на базе алюминиевой или биметаллической оребренной трубы



- Атмосферные испарители среднего давления (4,0 МПа) для газификации продуктов разделения воздуха, диоксида углерода и СПГ
- Атмосферные испарители высокого давления (25,0 МПа) для использования в составе баллонных наполнительных станций и АГНКС
- Электрические испарители • Системы хранения и газификации криопродуктов, наполнительные станции «под ключ»
- Нестандартное криогенное оборудование • Газоразрядные и наполнительные рамы • Баллонные сборки

ООО «НПО Мониторинг»
105484, г. Москва, ул. 16-я Парковая, дом 26
105523, г. Москва, Щелковское шоссе, дом 100

Телефоны: +7 (495) 468-7503, +7 (499) 781-8875, +7 (495) 506-6802
Факс: +7 (495) 468-7503
e-mail: mail@monitoring-npo.ru
www.monitoring-npo.ru