

УДК 621.59 (075.8)

**А.Б. Ленский, В.П. Кряковкин, Т.И. Клеблеев**

ЗАО НПП «Криосервис», Пушкинская ул., 7, стр.1, г.Балашиха Московской области, РФ, 143903

e-mail: cryoservice@list.ru

## ОПЫТ СОЗДАНИЯ ПЛОСКОДОННЫХ КРИОГЕННЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

*Появление крупнотоннажных воздуходелительных установок позволяет накапливать часть продуктов в жидком виде в криогенных хранилищах. В России такого вида хранилища не сооружались отечественными предприятиями. Впервые разработкой, изготовлением и монтажом их занялась российская компания. Были созданы методики расчёта и конструирования крупных плоскодонных резервуаров, разработана современная технология их монтажа на территории заказчика. Компания создала отечественный нормативный документ — технические условия на проектирование, изготовление, монтаж и эксплуатацию криогенных резервуаров. Первый резервуар с объёмом 500 м<sup>3</sup> смонтирован специалистами компании на площадке Таганрогского металлургического комбината.*

**Ключевые слова:** Воздухоразделительная установка. Плоскодонный резервуар. Криогенная жидкость. Теплоизоляция. Кожух. Внутренний сосуд. Трубопроводы. Монтаж.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

История создания стальных плоскодонных резервуаров для криогенных жидкостей берет свое начало с 1944 г., когда в Кливленде (штат Огайо, США) в составе хранилища сжиженного природного газа был сооружен резервуар с внутренним сосудом диаметром 21,3 м [1]. Резервуар цилиндрической формы был выполнен двухстенным с зазором между стенками около 1 м. В состав системы хранения входили также три сферических резервуара с внутренними сосудами диаметром 17,3 м и с таким же, как у плоскодонного резервуара, межстенным зазором. В сферических резервуарах в качестве теплоизоляционного материала использовалась формованная и гранулированная пробка, а в плоскодонном резервуаре, ввиду дефицитности пробки, — горный лен. Внутренний сосуд выполнялся из листовой легированной стали с содержанием углерода не более 0,9 % и никеля не более 3,5 %. Как показали дальнейшие события, это оказалось ошибкой: такое содержание никеля было недостаточным. Вскоре после начала эксплуатации резервуара произошла авария, приведшая к его разрушению. Предположительной причиной явилось образование трещины в сосуде из-за сейсмических толчков и низкотемпературного охрупчивания малоуглеродистой стали с недостаточным содержанием никеля.

Этот случай в некоторой степени затормозил строительство резервуаров подобного типа для криогенных жидкостей. Но строительство крупных установок по сжижению природного газа в пятидесятых годах потребовало создания крупнотоннажных хранилищ. Задача сооружения плоскодонных резервуаров как подземного, так и наземного типов вновь стала актуальной и получила стимул к дальнейшему разви-

тию [2, 3]. Но теперь уже для внутренних сосудов использовались легированные стали с 9 %-ным содержанием никеля.

Развитие воздуходелительной техники, которая, в свою очередь, развивалась вслед за металлургией и химической промышленностью, привело к необходимости накопления жидких продуктов разделения воздуха в хранилищах сначала на основе сравнительно небольших резервуаров вместимостью не более 250 м<sup>3</sup>. Ограничение размеров отдельных резервуаров диктовалось возможностями транспортировки их по железным и автомобильным дорогам. В дальнейшем пришла пора создания крупнотоннажных криогенных хранилищ. На предприятиях стали строить хранилища на базе плоскодонных резервуаров для жидкого кислорода, а затем азота и аргона.

В настоящее время для хранилищ общим объёмом более 2 000 м<sup>3</sup> это — обычная практика. Такие резервуары создаются в непосредственной близости от крупных воздуходелительных установок (ВРУ) и в основном предназначаются для создания аварийного запаса криогенных продуктов в случае остановки ВРУ по какой-либо причине. Это получается намного дешевле, чем строительство дополнительной установки для этих целей. Количество таких резервуаров в мире сегодня измеряется сотнями штук и продолжает увеличиваться, несмотря на некоторые сравнительные оценки затрат при строительстве хранилищ на базе плоскодонных резервуаров с системами хранения, включающими вакуумно-изолированные емкости, которые указывают, что плоскодонные хранилища становятся конкурентоспособными при общем объеме 12 000 м<sup>3</sup> и более [4]. По нашим приблизительным оценкам сопоставимость затрат наблюдается уже при объёмах от 1 500 м<sup>3</sup>.

Тем не менее, несмотря на распространенность и востребованность плоскодонных резервуаров для хранения жидких продуктов разделения воздуха, до настоящего времени на территории России не было изготовлено ни одного резервуара российского производства. Все плоскодонные резервуары, ныне эксплуатируемые на территории России и стран СНГ, спроектированы и изготовлены в США, Западной Европе или Китае.

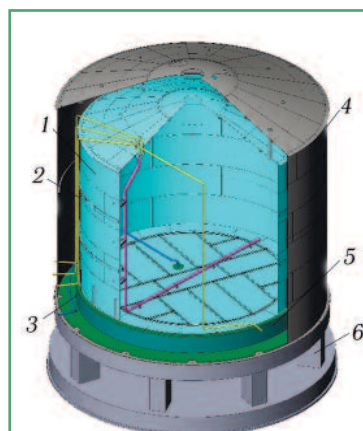
Возможно, этим обусловлено отсутствие российских действующих Правил по проектированию, изготовлению и монтажу плоскодонных резервуаров для хранения криогенных продуктов. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением (ПБ 03-576-03), не распространяются на плоскодонные резервуары в связи с низким рабочим давлением в газовой подушке сосуда (до 0,1 кгс/см<sup>2</sup>), равно как и все нормативные документы, касающиеся резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов, из-за различия в свойствах хранимых продуктов.

## 2. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ПЛОСКОДОННОГО РЕЗЕРВУАРА

ЗАО «НПП Криосервис» (г. Москва) в 2008 г. приступило к разработке конструкции плоскодонных криогенных резервуаров. К 2010 г. работы над конструкцией были практически завершены и был разработан нормативный документ СТУ 3642-005-47416966-2010 «Резервуары вертикальные плоскодонные типа РВК объёмом до 6000 м<sup>3</sup>. Специальные технические условия на проектирование, изготовление, монтаж и эксплуатацию». При его разработке был учтен мировой опыт создания технологических криогенных резервуаров, в частности стандарт<sup>1)</sup>, применяющийся в качестве национального стандарта США и используемый во многих странах, а также отечественные нормативные документы, касающиеся хранилищ для нефти и нефтепродуктов<sup>2), 3)</sup>. Резервуары типа РВК предназначены для хранения жидких продуктов разделения воздуха — кислорода, азота и аргона.

Конструктивно резервуар состоит из двух сосудов (рис. 1). Во внутреннем сосуде, выполненном из легированной стали аустенитного класса, хранится криогенная жидкость. Внешний сосуд (кожух), изготовленный из углеродистой стали, выполняет функцию защитного кожуха. Внутренний сосуд и кожух крепятся к фундаменту с помощью анкеров, связанных с арматурной сеткой фундамента.

Межстенное пространство — теплоизоляционная полость (ТИП) между внутренним сосудом и кожухом заполнено теплоизолирующим материалом



**Рис. 1.** Общий вид вертикального плоскодонного резервуара: 1 — внутренний сосуд; 2, 3 — трубопроводы, соответственно, заправки и выдачи; 4 — кожух; 5 — пеностекло; 6 — фундамент

— перлитовым вспученным песком по ГОСТ 10832-2009, который традиционно используется для изоляции криогенного оборудования. Теплоизоляция между днищами внутреннего сосуда и кожуха выполнена из пеностекла Foamglas® необходимой прочности и теплопроводности.

С целью предотвращения попадания атмосферной влаги в теплоизоляцию организован поддув ТИП газо-

образным азотом из коллектора, расположенного в донной части кожуха резервуара.

Резервуар оснащен люками различного назначения:

- один люк-лаз на крыше резервуара для доступа во внутренний сосуд;
- от двух до восьми люков (в зависимости от вместимости резервуара) на крыше резервуара для доступа в ТИП и засыпки перлита;
- один люк-лаз в обечайке кожуха для доступа в ТИП.

Для обслуживания люков, запорной арматуры и предохранительных устройств на крыше кожуха имеются площадки с ограждением. Доступ на площадки обеспечивается при помощи либо винтовой лестницы на боковой стенке кожуха, либо шахтной лестницы, устанавливаемой рядом с резервуаром на отдельном фундаменте.

В зоне люка-лаза на крыше резервуара устанавливается специальная портативная тренога с лебедкой и страховым блокирующимся устройством. Приспособление предназначено для спуска во внутренний сосуд людей и их последующего подъема. Применяется оно как в процессе монтажа резервуара, так и при его эксплуатации в случае плановых осмотров и ремонтно-восстановительных работ. По окончании монтажа тренога передается эксплуатирующей организации в составе комплекта ЗИП. Обычно для доступа во внутренний сосуд предусматривается установка стационарной лестницы, изготовленной из алюминия или нержавеющей стали. Однако при проведении монтажных работ выяснилось, что

<sup>1)</sup> Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks //API Standart 620 — American Petroleum Institute// Tenth Edition, February 2002.

<sup>2)</sup> ГОСТ 52910-2008. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия.

<sup>3)</sup> СТО-СА-03-002-2009. Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. Стандарт организации. — М.: Ростехэкспертиза, 2009. — 204 с.

такое решение может создать проблемы в случае необходимости аварийной эвакуации пострадавших.

Резервуар оснащен технологическими трубопроводами, запорной и предохранительной арматурой, а также контрольно-измерительными приборами. Основная запорная арматура (в том числе пневмоуправляемая) — производства фирмы «Herose» (Германия), хорошо зарекомендовавшая себя на российском рынке криогенной техники. Предохранительная арматура, установленная на сосуде и кожухе, — произведена «Whessoe» (Великобритания), одной из немногих компаний, занимающихся изготовлением предохранительных устройств с большими диаметрами для криогенных резервуаров.

Для удобства эксплуатации шкаф с необходимыми контрольно-измерительными приборами установлен под бетонной плитой основания, где, как правило, располагаются и криогенные насосы, и их щиты управления.

Жидкий криопродукт в резервуар подается из ВРУ по криогенному трубопроводу или от заправщика. Жидкость поступает по трубопроводу заправки в верхнюю часть внутреннего сосуда в воронку распределительного коллектора и из его нижней перфорированной части попадает в сосуд. Выдача жидкого продукта из резервуара осуществляется через нижний трубопровод выдачи продукта потребителю. Трубопровод выдачи продукта создаёт газовый затвор при хранении продукта, что обеспечивает минимальные теплопритоки к трубопроводу выдачи и практически исключает образование пузырей продукта в этом трубопроводе.

Рабочее давление во внутреннем сосуде автоматически поддерживается на заданном уровне с помощью контура наддува, включающего в себя испаритель наддува под резервуаром, датчики давления и управляемую пневмоарматуру. Поддув ТИП резервуара газообразным азотом осуществляется от внешнего источника азота, а для резервуаров-хранилищ жидкого азота предусмотрен вариант подачи азота из газосброса резервуара. Поддержание избыточного давления в ТИП обеспечивается автоматическим открытием клапана подачи азота при понижении давления в ТИП.

### 3. РАЗРАБОТКА РЕЗЕРВУАРОВ

При проектировании резервуаров был проведен комплекс прочностных расчётов, в том числе:

- расчёт внутреннего сосуда и наружного кожуха на прочность и устойчивость, определение минимально необходимых толщин стенок сосуда и кожуха без учета и с учётом сейсмического воздействия различной интенсивности;
- расчёт количества шпангоутов на стенках сосуда и кожуха, их формы и размеров, а также мест расположения;
- определение толщины днищ сосуда и кожуха;
- расчёт крыш сосуда и кожуха, выполненных в виде конической оболочки, подкрепленной кольцами

жесткости — шпангоутами; определение необходимой толщины крыши, количества колец жесткости и радиусов их расположения;

- определение диаметров и толщин листов укрепления отверстий на стенках и крышах сосуда и кожуха;
- расчёт на сейсмическое воздействие;
- расчёт тепловых потерь [5-8];
- прочностные расчёты трубопроводов обвязки резервуара с учётом температурных деформаций.

При проведении расчётов учитывалось, что конструкция резервуаров выполнена по схеме двухстенного резервуара, где внутренний резервуар (сосуд) используется для хранения криопродукта, наружный — выполняет функцию защитного кожуха. Межстенное пространство между сосудом и кожухом заполнено теплоизолирующим материалом — вспученным перлитовым песком [9].

Для обеспечения большей надежности и контроля прочностных расчетов и расчетов на сейсмическое воздействие двухстенных изотермических резервуаров, заполненных жидкостью, они проводились с использованием упоминавшихся ранее методик<sup>1,3</sup>. За результаты расчётов (толщины стенки, крыши и др.) приняты максимальные значения из полученных по двум методикам величин. В основном, результаты расчетов оказались близкими. Различия в гидродинамическом давлении и, соответственно, толщине стенки сосуда по двум методикам не превышают 5 %.

Расчёт крыш сосуда и кожуха в виде конических оболочек постоянной толщины с кольцевыми ребрами жесткости без радиальных ребер проводился путем решения задач прочности и устойчивости осесимметричных оболочечных конструкций методом ортогональной прогонки при помощи дифференциальных уравнений теории оболочек. Расчётным усилием для крыши сосуда является собственный вес металлоконструкций, включая вес оборудования, вес перлита на крыше, расчётное разрежение внутри сосуда при давлении в межстенном пространстве. Для крыши кожуха расчётным усилием является собственный вес металлоконструкций, вес оборудования, снеговая нагрузка, расчетное разрежение в межстенном пространстве.

Расчёт на сейсмическое воздействие включал:

- расчёт ускорений твердых масс и конвективной массы жидкости;
- расчёт гидродинамического давления от волны, возникающей при сейсмическом воздействии;
- расчёт толщины стенки сосуда для сдерживания гидродинамического давления;
- вычисление опрокидывающего момента сосуда и кожуха;
- определение сил, удерживающих сосуд и кожух от опрокидывания;
- расчёт анкерных креплений сосуда и кожуха;
- проверка устойчивости (несминаемости) нижнего пояса стенки сосуда и кожуха при действии опрокидывающего момента;
- определение минимальной ширины окраечного кольца;
- определение максимального уровня налива сосуда с учётом высоты волны жидкости при землетрясении;

- определение нагрузок на фундамент.

Коэффициент повреждаемости сооружения при расчетах на сейсмическое воздействие принимался равным единице, т. е. предполагалось, что повреждение в основных конструкциях не допускаются.

Для определения потерь криопродукта был выполнен расчёт на основе теплового баланса, который включал в себя учёт тепловых потоков через днище сосуда и его цилиндрическую часть, теплового потока излучения от неомываемой криопродуктом цилиндрической части сосуда и крыши и теплового потока, уносимого газом через дыхательные клапаны. Результатом проведенных расчётов явилось определение суточных потерь криопродукта за счёт испарения для ряда резервуаров РВК. В качестве примера ниже приведены расчётные суточные потери для резервуаров вместимостью от 500 до 1500 м<sup>3</sup> при хранении в них жидких кислорода и азота.

**Таблица.** Суточные потери продуктов в результате их испарения

Криопродукт	Расчётные потери криопродукта, % сут., при вместимости резервуара, м <sup>3</sup>			
	500	800	1000	1500
Кислород	0,194	0,161	0,144	0,129
Азот	0,302	0,249	0,223	0,200

Прочностные расчёты трубопроводов, расположенных в ТИП резервуара, были выполнены с использованием программной системы «СТАРТ» разработки НТП «Трубопровод» (г. Москва). Программа предназначена для расчёта прочности и жесткости трубопроводов различного назначения. Результатом расчётов стало определение оптимальной геометрии трубопроводов обвязки резервуара, обеспечивающей наилучшую компенсацию температурных деформаций и, как следствие, минимизацию напряжений в трубопроводах и заделках (в местах их ввода во внутренний сосуд), а также в тепловых мостах на выходе из кожуха резервуара.

#### 4. СООРУЖЕНИЕ РЕЗЕРВУАРА

После разработки проектной и конструкторской документации ЗАО «НПП Криосервис» в 2012-2013 гг. приступило к комплектному изготовлению и монтажу изотермических плоскодонных резервуаров. Первый резервуар объёмом 500 м<sup>3</sup> был смонтирован на площадке Таганрогского металлургического комбината (заказчик — ОАО «Криогенмаш»).

Для плоскодонных резервуаров операция монтажа является основной сборочной операцией, выполняемой не в заводском цехе, а на месте последующей эксплуатации. На заводах-изготовителях производятся лишь элементы резервуара, которые могут укрупняться до разрешенных к перевозке габаритов. Спор о том, до каких объёмов нужно изготавливать криогенные резервуары на заводах-изготовителях (что,

конечно, выгоднее) [4], по сути, сводится к проблеме местонахождения объекта и возможностей транспортных и грузоподъемных средств, а не возможностей размещения крупногабаритных резервуаров в цехах завода-изготовителя. Но даже, если завод находится на берегу реки, а объект — на острове, транспортные габариты резервуаров будут диктовать их объёмы. Отсутствие транспортных коммуникаций для перевозки крупногабаритных грузов решает проблему выбора в пользу резервуаров, собираемых из элементов на месте эксплуатации, при этом резервуары могут быть практически любых размеров.

Резервуары должны сооружаться бригадой специалистов, имеющих опыт монтажа листовых бескаркасных металлоконструкций. До их начала монтажная организация обязана разработать проект производства работ в соответствии с требованиями проектной и конструкторской документации. Монтаж резервуара начинается с проверки качества фундаментной плиты, выполняемой строительной организацией, и проверкой исполнительной документации, а также динамометрическим нагружением некоторых элементов фундамента.

Требование к качеству сварки внутреннего нержавеющей сосуда и кожуха из углеродистой стали — главное требование технологии монтажа. Постоянное присутствие на монтажной площадке инженера по сварке, который контролирует сварочный процесс, — обязательное требование инструкции по монтажу резервуаров. Все сварщики должны быть аттестованы в соответствии с действующими нормами и правилами на право выполнения сварки во всех положениях, которые требуются при монтаже резервуара. До начала работ каждый сварщик должен выполнить сварку контрольных образцов, которые подвергаются разрушающему контролю в аттестованных лабораториях. Для разных частей резервуара инструкцией по монтажу предусмотрены различные виды неразрушающего контроля: радиографический, капиллярный, вакуумно-пузырьковый и т. п. Операциям неразрушающего контроля уделяется особое внимание. Достаточно сказать, что объём контроля составляет более 10 % стоимости всех монтажных работ, включая используемую технику.

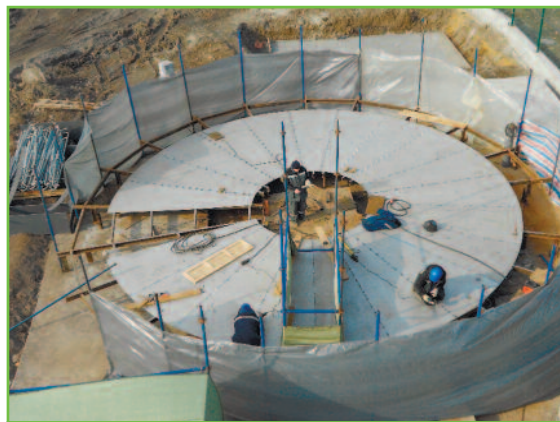
Сварка обечайек кожуха и внутреннего сосуда производится с двух сторон — изнутри и снаружи, причем сварка стыковых швов внутреннего сосуда предпочтительно выполняется методом «тандема» — одновременной сваркой с двух сторон. На рис. 2 представлены специальные конструкции для проведения сварочных работ на обечайке кожуха резервуара.

На днище кожуха укладываются блоки пеностекла, являющиеся тепловым барьером и основанием для установки внутреннего сосуда (рис. 3)

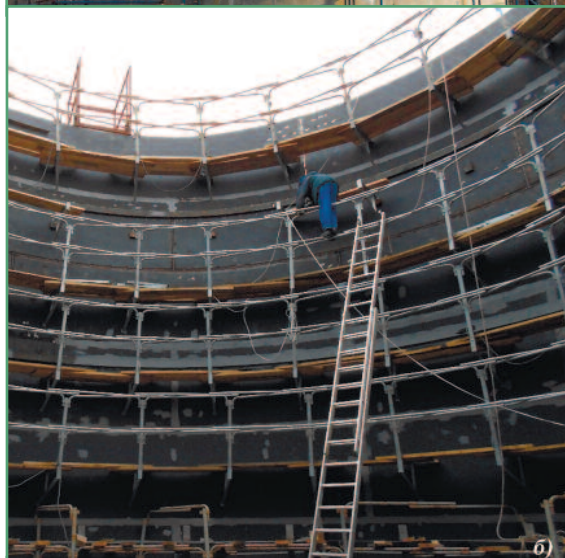
Крыши собираются отдельно, и процедура их подъема и установки на обечайки является наиболее ответственной операцией (рисунки 4 и 5).

Монтаж завершается проведением приемочных испытаний, включающих испытания на прочность и плотность (пневмогидравлические испытания внут-

ренного сосуда и пневматические испытания кожуха и трубопроводов), контроль осадки фундамента и пено-стекла под нагрузкой, испытания на герметичность сварных швов дна внутреннего сосуда вакуумно-пузырьковым методом и испытания капиллярным методом уторного шва (шва между обечайкой и дном) сосуда. Кстати, уторный шов как наиболее ответственная часть конструкции в процессе монтажа подвергается капиллярным испытаниям трижды изнутри и снаружи: сначала проводится испытание корня шва, затем шва в целом, а потом — после нагружения (гидравлического испытания). Контроль осадки пеностекла для 500-кубового резервуара показал, что она не превышает 4 мм.



**Фото 4.** Сборка крыши



**Фото 2.** Монтаж кожуха:  
а — вид снаружи и б — изнутри



**Фото 5.** Подъём и установка крыши

Окончательными этапами являются внешняя отделка и комплексное опробование, в процессе которого резервуар частично заполняется криопродуктом и выдерживается до достижения максимального захлаживания внутреннего сосуда. (рисунки 6 и 7). После комплексного опробования резервуар полностью готов к эксплуатации.



**Фото 3.** Укладка пеностекла



**Фото 6.** Комплексное опробование



Фото 7. Внешний вид резервуара

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние годы в связи с появлением новых крупномонтажных ВРУ с производством части продуктов в жидком виде возникла потребность в криогенных хранилищах. В них накапливаются большие объемы криопродуктов, с целью, во-первых, обеспечения технологических процессов на предприятиях при временном росте потребности в газах, во-вторых, для создания запаса продуктов на случай остановки ВРУ по каким-либо причинам.

До настоящего времени в России не было сооружено отечественными компаниями ни одного плоскостенного криогенного резервуара. Опыт проектирования, изготовления и монтажа резервуаров накапливала компания ЗАО НПП «Криосервис». Первый резервуар с объемом 500 м<sup>3</sup> был смонтирован специалистами компании на площадке Таганрогского металлургического комбината.

Ожидается повышенный спрос крупных потребителей продуктов разделения воздуха на подобные хранилища.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Сорокин А.В., Черняк Л.М.** Сжиженный метан за рубежом. — М.: Недра, 1965. — 135 с.
2. **Лавренченко Г.К., Копытин А.В.** Криогенные комплексы производства и отгрузки СПГ, его приёма, хранения и регазификации в системе международной торговли// Технические газы. — 2010. — № 3. — С. 2-19.
3. **Бармин И.В., Кунис И.Д.** Сжиженный природный газ вчера, сегодня, завтра / Под ред. **А.М. Архарова**. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2009. — 256 с.
4. Хранить ли СПГ в резервуарах с плоским днищем или в вакуумно-изолированных ёмкостях?/ **В.Хрз, И. Криван, П. Заруба** и др.// Технические газы. — 2012. — № 5. — С. 14-20.
5. **Khemis O., Boumaza M., Ait Ali M.** et al. Experimental analysis of heat transfers in a cryogenic tank without lateral insulation// Applied thermal engineering. — 2003. — V. 23. — No. 16. — P. 2107-2117.
6. **Kyoung-Hoom Kima, Hyung-Jong Koa, Kyoungin Kima** et al. Analysis of heat transfer and frost layer formation on a cryogenic tank wall exposed to the humid atmospheric air// Applied Thermal Engineering. — 2009. — V. 29. — No. 10. — P. 2072-2079.
7. **Aitken W. H., Hanish P. H.** Design of inner containment tanks for liquid oxygen and liquid nitrogen //Cryogenics. — 1988. — V. 28. — No. 12. — P. 805-809.
8. **Zhang X. C., Cai Y. Q.** Thermal Analysis on the Shell Stiffeners of Double Steel Wall LNG Storage Tank //Applied Mechanics and Materials. — 2012. — V. 105. — P. 403-407.
9. **Zhu M., Ding C., Wang R.S.** Experimental Investigation of Thermal Response on High-Vacuum-Multilayer-Insulation (HVMLI) Cryogenic Tank after Sudden, Catastrophic Loss of Insulation Vacuum (SCLIV)// Heat Transfer Research. — 2011. — V. 42. — No. 6. — P. 523 - 538.

**A.B. Lenskiy; V.P. Kryakovkin; T.I. Klebleev**

ZAO NPP «Krioservis», Pushkinskaya str., 7, bilding1, t. Balashiha Moskow Region, Russia, 143903

e-mail: cryoservice@list.ru

## THE EXPERIENCE OF CREATION OF FLAT BOTTOM CRYOGENIC TANKS

*Due to the fact that the large-capacity air-separating installations became available a part of products in the liquid state could be accumulated in cryogenic storehouses. In Russia such kind of storehouses were not constructed by the domestic enterprises. For the first time designing, manufacturing and assembling of the installation was carried out by a Russian company. A calculation procedure and designing of large flat bottom tanks, the modern technology of their assembling in the territory of the customer have been developed. The company has developed the domestic normative document — the specifications on designing, manufacturing, assembling and operation of cryogenic tanks. The first tank with the volume of 500 m<sup>3</sup> was mounted by the experts of the company on the platform of the Taganrog Metallurgical Works.*

**Keywords:** Air-separating installation. Flat bottom tank. Cryogenic liquid. Thermal insulation. Casing. Inner vessel. Pipelines. Assemblage.

## REFERENCES

1. Sorokin A.V., Chernyak L.M. (1965). Liquefied methane abroad. — Moskow.: Nedra, — 135 p. (Rus.)
2. Lavrenchenko G.K., Kopyitin A.V. (2010). Cryogenic complexes of LNG production and uploading, its acceptance, storage and regasification in the international trade system// Zhurnal Tehnicheskie gazy. [Journal of Industrial gases]. — № 3. — pp. 2-19. (Rus.)
3. Barmin I.V., Kunis I.D. (2009). Liquefied natural gas yesterday, today and tomorrow/ Edited by A.M. Arharova. — Moskow.: Izd-vo MGTU im. N.E.Baumana. — 256 p. (Rus.)
4. Hrz V., Krivan I., Zaruba P. et al. (2012). Whether to store LNG in tanks with flat bottoms or vacuum insulated containers?// Zhurnal Tehnicheskie gazy. [Journal of Industrial gases]. — № 5. — pp. 14-20. (Rus.)
5. Khemis O., M. Boumaza, M. Ait Ali et al. (2003). Experimental analysis of heat transfers in a cryogenic tank without lateral insulation// Applied thermal engineering. — V. 23. — No. 16. — pp. 2107-2117.
6. Kyoung-Hoom Kima, Hyung-Jong Koa, Kyoungjin Kima et al. (2009). Analysis of heat transfer and frost layer formation on a cryogenic tank wall exposed to the humid atmospheric air// Applied Thermal Engineering. — V. 29. — No. 10. — pp. 2072-2079.
7. Aitken W.H., Hanish P.H. (1988). Design of inner containment tanks for liquid oxygen and liquid nitrogen //Cryogenics. — V. 28. — No. 12. — pp. 805-809.
8. Zhang X.C., Cai Y.Q. (2012). Thermal Analysis on the Shell Stiffeners of Double Steel Wall LNG Storage Tank //Applied Mechanics and Materials. — V. 105. — pp. 403-407.
9. Zhu M., Ding C., Wang R. S. (2011). Experimental Investigation of Thermal Response on High-Vacuum-Multilayer-Insulation (HVMLI) Cryogenic Tank after Sudden, Catastrophic Loss of Insulation Vacuum (SCLIV)// Heat Transfer Research. — V. 42. — No. 6. — P. 523 - 538.