

¹А.Б. Ленский, ²В.П. Кряковкин, канд. техн. наук, ³Т.И. Клеблеев

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

e-mail: ¹amlensky@yandex.ru, ²kryakovkin@mail.ru, ³klebleev@cryoservice.ruORCID: ¹<http://orcid.org/0000-0001-7422-614X>, ²<http://orcid.org/0000-0001-9180-6437>,³<http://orcid.org/0000-0001-7393-374X>

КРИОГЕННЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ: ОТ РАЗРАБОТКИ ДО ВВОДА В ЭКСПЛУАТАЦИЮ

Область применения криогенных трубопроводов — транспортирование криогенных жидкостей от мест производства до хранилищ или от хранилищ до мест потребления. Рассматриваются разные виды теплоизоляции, применяемой в конструкциях криогенных трубопроводов. Изложены основные принципы конструирования криогенных трубопроводов. Обобщен опыт проектирования и освоения производства криогенных трубопроводов с экранно-вакуумной изоляцией компанией НПП «Криосервис».

Ключевые слова: Криогенный трубопровод. Теплопередача. Вакуумная изоляция. Эффективность изоляции. Технические условия.

1. ВВЕДЕНИЕ

Криогенный трубопровод — один из основных элементов систем транспортирования жидких криогенных продуктов от производителя к потребителю.

В настоящее время накоплен большой опыт создания трубопроводов, обеспечивающих транспортирование всего спектра криогенных жидкостей и отвечающих различным специфическим требованиям их эксплуатации. [1]. Но при этом найдется относительно немного фирм, которые освоили весь комплекс работ по созданию указанных трубопроводов, включающий разработку технического задания, проектирование собственно трубопровода, его отдельных элементов и опорных металлоконструкций, комплектацию, разработку монтажной и эксплуатационной документации, изготовление и монтаж трубопровода с проведением полного объема производственных и комплексных испытаний, включая холодные опрессовки и сдачу в эксплуатацию. Научно-производственное предприятие «Криосервис» — одна из таких организаций, которая в состоянии выполнять весь комплекс перечисленных работ.

В настоящей статье общих чертах представлен опыт, накопленный при разработке и изготовлении криогенных трубопроводов преимущественно для транспортирования криогенных продуктов разделения воздуха (азота, кислорода, аргона).

2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ КРИОГЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Стадия проектирования подразумевает решение всех основных задач, возникающих при разработке конкретного трубопровода, который должен полностью удовлетворять требованиям технического задания. Если не рассматривать отдельные специфиче-

ческие требования, то в круг основных задач входят:

- трассировка трубопровода;
- выбор типа теплоизоляции и связанные с ним особенности конструкции;
- компенсация температурных деформаций;
- расположение и организация опорных конструкций;
- установка средств, обеспечивающих безопасность эксплуатации.

Часть этих задач носит традиционный характер для любых трубопроводов, работающих под давлением. Для криогенных же трубопроводов наиболее специфичными являются задачи, касающиеся теплоизоляции и компенсации температурных деформаций.

Роль теплоизоляции хотя и очевидна, но, тем не менее, требует некоторого пояснения. Как известно, теплота парообразования различных криогенных жидкостей, отнесенная к единице объема, тем меньше, чем ниже температуры их кипения [2]. Следовательно, небольшое количество тепла может вызывать испарение сравнительно большого количества сжиженного газа с низкой температурой кипения. Проблемой при транспортировании жидкостей по криогенным трубопроводам является появление двухфазного потока вследствие испарения части жидкости от теплопритока из окружающей среды. Наличие двухфазного потока приводит к уменьшению пропускной способности трубопровода, а также создает и иные проблемы, например, затруднение при пуске криогенных центробежных насосов, устанавливаемых на магистрали.

Если классифицировать теплоизоляцию криогенных трубопроводов, то можно выделить два её основных типа: невакуумная и вакуумная.

Невакуумная теплоизоляция или теплоизоляция, находящаяся под атмосферным давлением, является наиболее простым и дешевым способом изоляции и

выполняется на основе высокопористых материалов, таких как минеральная вата, стекловолокно, перлит, аэрогель, пеностекло, вспененные каучуки, пенополиуретан и пр. Изоляция этого типа предотвращает отсутствие конвекции и частично защищает криопродукт от лучистого переноса энергии. Теплоизоляционные материалы обладают относительно небольшой теплопроводностью вследствие малой теплопроводности газа, заполняющего поры, и низкой теплопроводности структурного материала. Важно также создание надежного парового барьера, защищающего изоляцию от конденсата, так как присутствие в структуре изоляции капельной влаги или льда существенно интенсифицируют процесс теплопереноса. Наибольшее применение этот тип теплоизоляции находит в воздухоразделительных установках и крупногабаритных плоскостных хранилищах криогенных продуктов. Для изолирования трубопроводов невакуумная теплоизоляция используется нечасто, в основном на температурном уровне выше криогенного, поскольку при теплопроводности $0,035...0,055 \text{ Вт/(мК)}$ реальный теплоприток, например, к трубопроводу жидкого азота с условным проходом Ду32 составляет не менее 10 Вт на погонный метр, что может быть приемлемым в крайне редких случаях.

Вакуумная теплоизоляция используется в создании конструкции трубопровода в виде «труба в трубе», где внутренний трубопровод является основным, а в пространстве между ним и охватывающим его кожухом (теплоизоляционной полостью) размещается теплоизоляция и создается разрежение. При этом теплоизоляция такого типа подразделяется на вакуумно-порошковую, вакуумно-волоконную и вакуумно-многослойную (экранно-вакуумную) [3, 4]. В своих разработках «Криосервис» использует экранно-вакуумную теплоизоляцию как наиболее эффективную и технологичную, хотя и требующую более тщательного к себе отношения, например, при обеспечении необходимого уровня остаточного давления в теплоизоляционной полости.

При разработке конструкции трубопровода следует учитывать основные параметры, влияющие на теплоприток из окружающей среды к криогенной жидкости, который включает в себя три составляющие: кондуктивную теплопроводность по так называемым тепловым мостам, радиационный теплообмен и теплопередачу по остаточному газу в теплоизоляционной полости. Рассмотрим каждую из составляющих отдельно с точки зрения минимизации теплопередачи.

На рис. 1 представлены основные конструктивные элементы криогенного трубопровода. Элементами, способствующими снижению кондуктивной теплопроводности, являются опоры и конусные элементы между внутренним трубопроводом и кожухом. Естественное решение задачи по снижению теплопритока состоит в уменьшении толщины и увеличении длины конусов, а также применении неметаллических материалов с низкой теплопроводностью для внутренних опор.

Максимальное снижение радиационного тепло-

обмена между кожухом и внутренним трубопроводом достигается размещением набора теплоотражающих экранов из металлизированной полимерной пленки с волокнистым прокладочным материалом между отдельными экранами. Металлизированная пленка обладает высокой отражательной способностью в инфракрасной области спектра излучения (до 0,98), а прокладочный материал выполняет двойную функцию. С одной стороны, будучи высокопористым, он обеспечивает дополнительное тепловое сопротивление, а с другой — его хорошая газопроницаемость, облегчает процесс удаления остаточного газа из пространства между экранами. В зависимости от требований технического задания по допустимым теплопритокам количество экранов варьируется от 10 до 20, при этом основное требование к качеству нанесения теплоизоляции — плотность ее намотки, которая обеспечивается на уровне $15...20 \text{ см}^{-1}$.

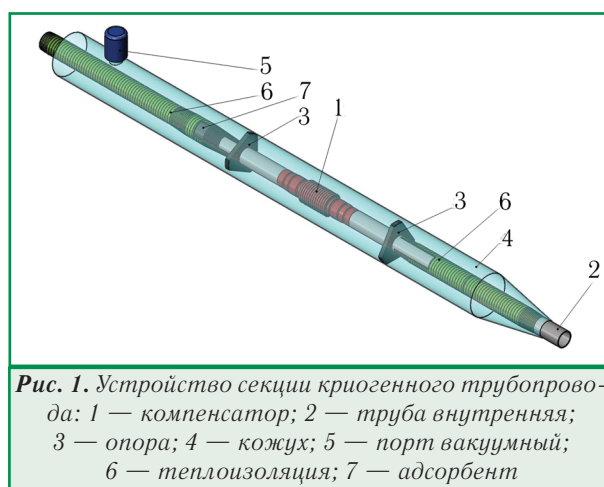


Рис. 1. Устройство секции криогенного трубопровода: 1 — компенсатор; 2 — труба внутренняя; 3 — опора; 4 — кожух; 5 — порт вакуумный; 6 — теплоизоляция; 7 — адсорбент

Теплопередача через газовые полости зависит от остаточного давления в теплоизоляционной полости и тесно связана с длиной свободного пробега молекул [5]. При характерных размерах теплоизоляционных полостей трубопроводов не более 50 мм и давлении менее 10 Па количество переносимого молекулами тепла пропорционально давлению. Поэтому в теплоизоляционной полости располагаются специальные поглотительные устройства.

Исторически совершенствование конструкций криогенных трубопроводов шло не только в направлении поиска и использования наиболее эффективных теплоизоляционных материалов, но и по пути разработки конструкций адсорбционных устройств, обеспечивающих в рабочем режиме поддержание остаточного давления на уровне $0,01...0,02 \text{ Па}$. И если в 60-х годах прошлого века использовались матерчатые мешочки с цеолитом, закрепленные на внутреннем трубопроводе, то с 70-х годов начали внедрять уже адсорбционные устройства, надежно обеспечивающие требуемые вакуумные параметры [6, 7]. Появление криосорбирующей угольной ткани позволило упростить их конструкции без ущерба достигаемому результату.

На сегодняшний день «Криосервис» использует

два основных подхода к конструированию криогенных трубопроводов. Первый вариант трубопровода представляет собой конструкцию, собранную из предварительно изготовленных секций, которые образуют единую теплоизоляционную полость протяженностью до 50 м. Каждая такая полость по краям снабжается коническими тепловыми мостами. Как правило, по длине трубопровода устраиваются несколько теплоизоляционных полостей. Конические тепловые мосты также выполняют функцию отделения одной полости от другой. Для компенсации температурных деформаций на внутреннем трубопроводе устанавливаются сильфонные компенсаторы, количество которых определяется их характеристиками, а при наличии угловых элементов учитывается влияние самокомпенсации за счёт изгиба внутреннего трубопровода. При установке в секции двух и более компенсаторов последние оснащаются ограничителями хода.

Второй вариант предусматривает сборку трубопровода из отдельных секций, называемых «ампульного» типа, полной заводской готовности. При монтаже отдельные секции лишь стыкуются посредством сварных соединений, и места стыков дополнительно изолируются. Длина таких секций ограничена габаритными размерами транспортных средств и не превышает 12 м. В каждой секции индивидуально предусмотрена компенсация температурных деформаций. В прямых секциях всегда устанавливаются сильфонные компенсаторы. Угловые секции, как правило, рассчитываются на самокомпенсацию.

Вариант трубопроводов «ампульного» типа, вакуумируемых непосредственно в производственных условиях, является более предпочтительным и удобным. Хотя, при небольших расходах криогенного продукта через трубопроводы большой протяженности целесообразным оказывается первый вариант из-за меньшего количества тепловых мостов между внутренней трубой и кожухом. В конечном итоге, выбор того или иного варианта изготовления трубопроводов всегда индивидуален и зависит от технологических особенностей проектируемой криогенной магистрали и требований заказчика.

На кожухе каждой теплоизоляционной полости трубопровода независимо от того, является она «ампульной» или единой, устанавливается вакуумное предохранительное устройство оригинальной конструкции, которое предназначено для вакуумирования теплоизоляционной полости, а также для защиты её в процессе эксплуатации от роста давления более атмосферного при аварийной разгерметизации внутренней трубы. Данное устройство прошло всестороннюю проверку на режимы срабатывания в различных условиях вплоть до имитации низких температур окружающей среды (до минус 30 °C). Порог срабатывания не превышает 0,7 ати.

3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И МОНТАЖ

Технология производства криогенного трубопровода независимо от того, к первому или второму варианту

он относится, включает одни и те же операции. Отличия заключаются лишь в том, что в случае трубопровода «ампульного» типа практически все операции по сборке, испытаниям и финишному вакуумированию осуществляются в производственных условиях, а в случае трубопровода первого варианта часть операций выполняется на монтажной площадке. К этим операциям относятся, например, установка компенсаторов, которые, как правило, располагаются между секциями, сборка адсорбционных устройств, а также весь комплекс вакуумных испытаний теплоизоляционных полостей, включая финишное вакуумирование и обеспечение заданных параметров полости по суммарному натеканию. Эти операции приводят к большому объёму вакуумных работ на месте монтажа, что сопряжено с необходимостью перебазирования специального дорогостоящего оборудования и выполнения работ только в тёплое время года. Проведение этих работ на производстве является предпочтительным, что свидетельствует в пользу трубопроводов «ампульного» типа.

Вообще вакуумные работы занимают значительное время при изготовлении криогенного трубопровода и подготовке ввода его в эксплуатацию. В первую очередь, это — комплекс вакуумных испытаний, направленных на обеспечение герметичности теплоизоляционной полости. Поскольку работа криогенного трубопровода осуществляется при остаточном давлении полости на уровне 0,01...0,02 Па в течение длительного срока, требования к её герметичности предъявляются очень жесткие. Основной метод контроля герметичности — масс-спектрометрический, в качестве контрольного газа в котором используется гелий, легко проникающий в микротечи и содержащийся в атмосферном воздухе в очень незначительном количестве ($5 \cdot 10^{-4} \%$), что минимизирует влияние на результат испытаний атмосферного фона. В процессе применяются гелиевые течеискатели и различные способы контроля. Испытаниям подвергаются сварные швы внутреннего трубопровода после проведения радиографического контроля и до нанесения на них теплоизоляции. Сварные швы кожуха испытываются способами «обдува» и «гелиевой камеры» при вакуумировании теплоизоляционной полости. Заключительное масс-спектрометрическое испытание — контроль герметичности внутреннего трубопровода способом «вакуумной камеры». Все испытания проводятся при пороге чувствительности течеискателя $1 \cdot 10^{-8}$... $1 \cdot 10^{-9}$ мбар·л/с. В завершение вакуумных работ проводится финишное вакуумирование теплоизоляционной полости с целью обезгаживания материалов, поверхности которых обращены в полость, а также регенерации адсорбента. Добиваясь минимального уровня газовыделения, тем самым создаются условия для долгосрочной работы адсорбента по поддержанию требуемого уровня остаточного давления в теплоизоляционной полости.

Особенность монтажа трубопроводов «ампульного» типа состоит в теплоизоляции монтажных стыков. Обычно используются два способа теплоизоляции:

1. Закрытие стыка экранной изоляцией, установка

кожуха с вакуумным предохранительным устройством и вакуумирование полости.

2. При менее жестких требованиях по теплопритокам к криогенному трубопроводу на места стыков на монтажной площадке наносится волокнистая, вспученная или иная невакуумная теплоизоляция, которая герметично закрывается со стороны атмосферы. В последнем случае теплоприток к криогенному трубопроводу может увеличиваться на 15...20 %, но нами применяется решение с использованием комбинированных конусных мостов (рис. 2), которое обеспечивает увеличение теплопритока не более, чем на 10 %.

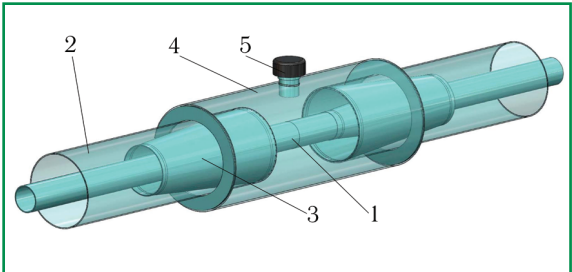


Рис. 2. Вакуумная теплоизоляция сварного соединения двух секций: 1 — внутренняя труба; 2 — кожух секции; 3 — тепловой мост; 4 — кожух межсекционного соединения; 5 — вакуумный порт

Параллельно с изготовлением секций выпускается комплект монтажных чертежей, один из которых в качестве примера представлен на рис. 3, и эксплуатационная документация. На каждую секцию криогенного трубопровода разрабатывается паспорт, который позд-



Рис. 4. Подготовленные к отправке секции криогенного трубопровода, изготовленного в 2014 г.

нее вместе с готовой секцией передается заказчику.

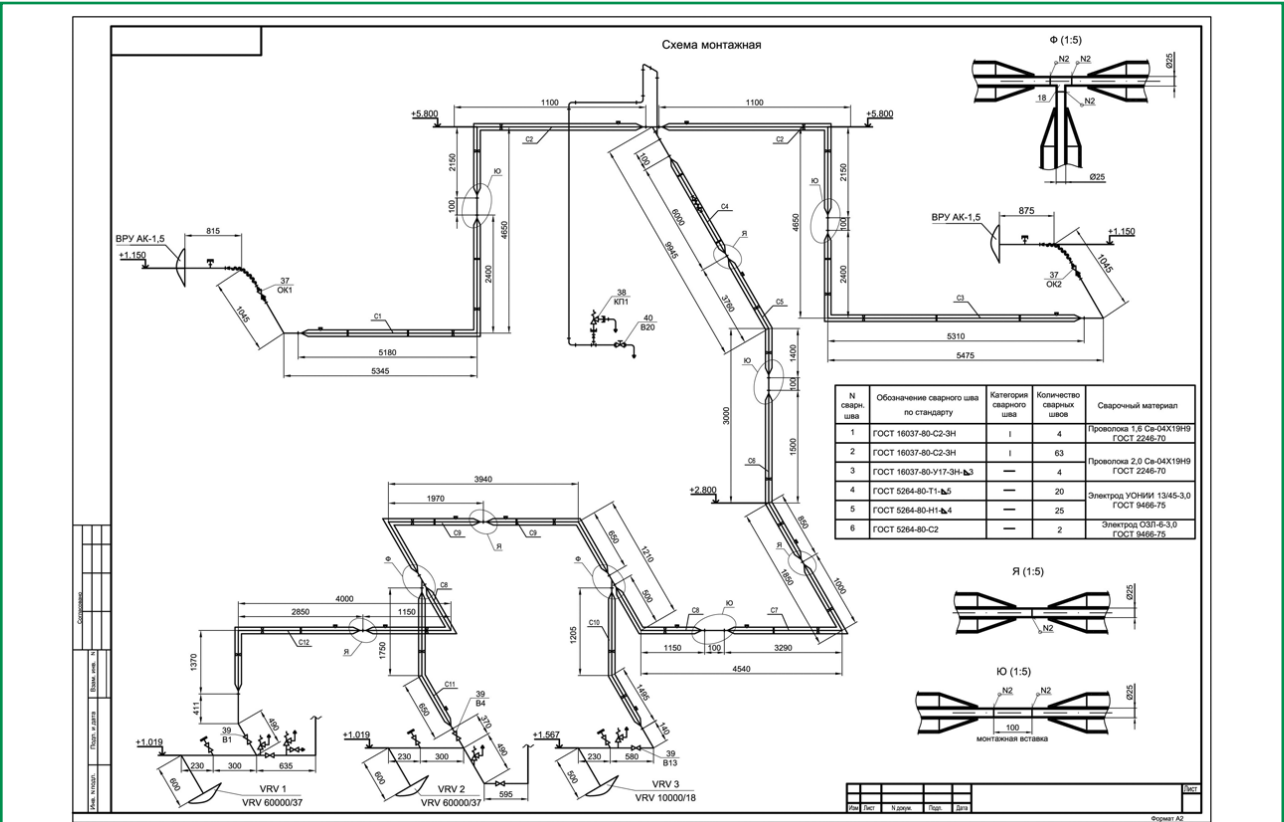


Рис. 3. Монтажная схема криогенного трубопровода

Готовые секции после завершения испытаний маркируются, укладываются на ложементы (рис. 4) и отправляются заказчику автомобильным или железнодорожным транспортом, как правило, в закрытых контейнерах.

Монтажные работы проводятся на площадке заказчика с выполнением всех требований, которые изложены в документации по испытаниям.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

НПП «Криосервис» имеет опыт разработки, изготовления и монтажа криогенных трубопроводов, которые выполняются в соответствии с техническими условиями ТУ 3642-007-47416966-2010, разработанными и утвержденными в установленном в Российской Федерации порядке. Для каждого трубопровода подготавливается Руководство по эксплуатации и, по согласованию с заказчиком, комплект запасных частей и принадлежностей.

НПП «Криосервис» имеет всю необходимую разрешительную документацию для собственного изготовления и последующего применения криогенных трубопроводов на опасных производственных объектах, (рис. 5) к которым относятся производства продуктов разделения воздуха с системами хранения жидких кислорода, азота, аргона.

Условное обозначение трубопровода	Размеры внутренней трубы из стали 12X18H10T	Размеры кожуха из стали AISI304	Величина теплопритока на погонный метр, Вт/м. пог.
Ду(20/65)	Ø25×2	Ø76,1×2	0,43
Ду(25/100)	Ø28×2	Ø 104×2	0,52
Ду(32/100)	Ø36×2	Ø 104×2	0,70
Ду(50/150)	Ø56×2	Ø 154×2	0,95
Ду(65/150)	Ø70×2	Ø 154×2	1,25



Рис. 5. Криогенный трубопровод на производстве «Арселор Миттал», (г. Темиртау, Казахстан), сданный в эксплуатацию в 2012 г.



Рис. 6. Криогенный трубопровод на производстве «Арселор Миттал», (г. Темиртау, Казахстан), сданный в эксплуатацию в 2012 г.

Предприятие готово предложить потенциальным заказчикам трубопроводы следующих типоразмеров:

ЛИТЕРАТУРА

1. Архаров А.М., Кунис И.Д. Криогенные заправочные комплексы стартовых ракетно-космических комплексов/ Под ред. И.В. Бармина. — М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2006. — 197 с.

2. Каганер М.Г. Тепломассообмен в низкотемпературных теплоизоляционных конструкциях. — М.: Энергия, 1979. — 256 с.

3. Малков М.П., Данилов И.Б., Зельдович А.Г., Фрадков А.Б. Справочник по физико-техническим основам криогеники/ Под ред. проф. М.П. Малкова. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 432 с.

4. Жунь Г.Г. Оптимизация многоэлементных теплозащитных конструкций криососудов// Технические газы. — 2008. — № 1. — С. 23-33.

5. Демихов К.Е., Панфилов Ю.В., Никулин Н.К. и др. Вакуумная техника: справочник/ Под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. — М.: Машиностроение, 2009. — 590 с.

6. Беляков В.П. Криогенная техника и технология. — М.: Энергоиздат, 1982. — 272 с.

7. Кряковкин В.П., Грачев Ю.В. Адсорбционные средства вакуумирования теплоизоляционных полостей криогенных трубопроводов// Вакуумная наука и техника. Материалы 10-й юбилейной Научно-технической конференции. Том 1. — М.: МГИЭМ, 2003. — С. 175-179.