

**От редакции**

В ноябре 2016 года в Москве состоялся Международный Форум Valve Industry Forum & Expo '2016 «Оборудование для критических условий эксплуатации», посвященный вопросам проектирования криогенной трубопроводной арматуры и проблемам её внедрения на объектах потребителей (см. «АС» № 6 (105) 2016). В этом номере мы публикуем материалы Форума.

# Особенности и актуальные вопросы проектирования и изготовления КРИОГЕННОЙ АРМАТУРЫ

С.А. Федин, технический директор ЗАО «Саратовэнергомашкомплект»

» Вопросам проектирования криогенной арматуры на сегодняшний день посвящено достаточно много статей, обычно это публикации в зарубежных изданиях, часть из которых публикуются в наших журналах уже переведенные на русский язык.<sup>1</sup> Имеется большое количество особенностей и проблем, связанных с проектированием и испытанием криогенной арматуры, данная тема очень обширна. Целью данной статьи является освещение только некоторых особенностей, связанных с криогенной арматурой, с которыми приходится сталкиваться при практической реализации.

<sup>1</sup> см., например, «АС» № 2 (101) 2016; №5 (74) 2011 и № 5 (37) 2005 (прим. ред.)

## Что такое криогенная арматура?

С высокими температурами человечество знакомо с древнейших времен, получить высокую температуру достаточно просто, это делали еще первобытные люди – они плавил олово и железо. Работа с низкими температурами, появление криогенной техники и технологий началось недавно, чуть более 100 лет назад, только в конце XIX века. Поэтому криогеника – наука еще достаточно молодая, и очень много открытых и не совсем понятных вопросов в ней пока еще остается. В первую очередь потому, что получить +1 градус тепла значительно проще и дешевле, чем получить –1 градус, именно этим фактором в первую очередь и ограничена экспериментальная база, и, как следствие, глубина изучения данной темы. А значит, здесь мы по сей день можем увидеть много нового.

- Первый холодильник механической конструкции был изготовлен в 1873 году.
- Жидкий воздух (–192 °С) впервые получен в лабораторных условиях в 1877 году.

Что такое криогенная арматура? На какой температурный диапазон распространяются это определение и соответствующие технические требования?

По ГОСТ 21957-76 **криогенная арматура – это арматура, конструкция которой обеспечивает ее работоспособность при криогенных температурах**. Этот же самый ГОСТ дает определение криогенной температуры от 0 К до 120 К, т. е. от –273 °С до –153 °С. В других стандартах (см. **табл. 1**) указаны другие диапазоны температур, считающиеся криогенными. Подобные разночтения в определении криогенной температуры в некоторой степени усложняют проектирование арматуры для низких температур.

Кроме того, как видно из той же таблицы, согласно многим источникам, криогенными уже считаются температуры, начиная от –50 °С, что соответствует климатическим условиям нашего Крайнего Севера. А значит, и работающая в этих условиях арматура исполнения ХЛ по этим определениям тоже может быть отнесена к криогенной.

**Таблица 1.** Диапазон температур, принимаемых криогенными в различных стандартах

Стандарт	Криогенная температура
ГОСТ 21957	–273 °С ... –153 °С (0 К – 120 К)
ОСТ 26-04-280	–270 °С ... –50 °С
BS 6364	–196 °С ... –50 °С
MSS SP 134	–255 °С ... –100 °С
ISO 28921-1	–196 °С ... –50 °С
ISO 21011	Ниже –40 °С
EN 16204	Ниже –10 °С

## Нормативная база

В **табл. 2** приведен перечень стандартов на криогенную арматуру. В большинстве своем эти стандарты схожи между собой, но если внимательно их изучить, можно увидеть и значительные отличия в методике испытаний, в методике оценки результатов испытаний и даже в конструкции арматуры, отличия незначительны, но они есть. Такое многообразие стандартов тоже осложняет работу по проектированию криогенной арматуры.

Поэтому, чтобы четко понимать технические требования к арматуре, прежде всего, крайне необходимо на стадии проектирования получить от заказчика ссылку на необходимый стандарт и конкретные требования к арматуре, иначе, при таком многообразии нормативной базы, совершенно невозможно будет что-то внятно и четко спроектировать и добиться соответствия.

В **табл. 2** указаны два китайских стандарта. В Китае достаточно быстро и удачно откомпилировали всю имеющуюся мировую практику по проектированию и изготовлению криогенной арматуры, адаптировали требования к собственным условиям и выпустили собственный стандарт, которым и руководствуются.

К сожалению, в этом перечне отсутствует действующий российский стандарт, который сейчас крайне необходим. Такой стандарт сейчас находится в разработке и должен выйти в скором времени. Данный документ будет очень востребован и значительно облегчит работу конструкторов.

## Процессы в криогенной среде

Теперь в общих чертах коснемся происходящих в криогенной арматуре процессов, вызванных воздействием низких температур, которые необходимо учитывать при ее проектировании.

На **рис. 1** схематически изображен шаровой кран. Попадающая внутрь арматуры криогенная среда, следуя термодинамическим законам, начинает интенсивно поглощать тепло из внешней среды, стремясь выровнять с ней свою температуру. Вызванное этой теплопередачей охлаждение арматуры воздействует на нее, и такое воздействие можно условно разделить на три составляющие:

- воздействие на сальниковое уплотнение,
- воздействие на конструкционный материал арматуры,

- воздействие на полимерные уплотнительные элементы.

## Воздействие на сальниковое уплотнение

Прямое попадание криопродукта на сальник вызовет его моментальное замерзание, что сразу повлечет потерю герметичности относительно внешней среды, поэтому сальниковое уплотнение должно быть изолировано от воздействия низких температур. Основной конструкционной особенностью криогенной арматуры является удлиненная крышка, увеличивающая расстояние от оси трубопровода до сальника. За счёт этого, во-первых, сальник отдалается от криопродукта, а во-вторых жидкий продукт испаряется в тёплой зоне и создаёт газовый тепловой барьер, газовую колонну, которая своей низкой теплопроводностью и изолирует сальниковое уплотнение от воздействия низкой температуры (**рис. 1**). Обычно при захолаживании арматуры без теплоизоляции граница между жидким криопродуктом и газовой колонной выражается четкой границей обмерзания на стойке и видна визуально. Сальник при этом охлаждается незначительно, его температура остается положительной.

**Таблица 2.** Стандарты на криогенную арматуру

<b>OCT 26-04-280</b>	Арматура трубопроводная изделий криогенной техники. Общие технические условия (недействующий)
<b>СТП 2082-658</b>	Стандарт предприятия. Оборудование криогенное. Арматура трубопроводная. Общие технические условия
<b>СТ ЦКБА 006</b>	Арматура криогенная. Общие технические условия
<b>BS 6364</b>	Specification for valves for cryogenic service
<b>BS EN 1626</b>	Cryogenic vessels – Valves for cryogenic service
<b>MSS SP-134</b>	Valves for Cryogenic Service Including Requirements for Body-Bonnet Extensions
<b>ISO 21011</b>	Cryogenic vessels – Valves for cryogenic service
<b>ISO 21013-1</b>	Cryogenic vessels – Pressure-relief accessories for cryogenic service – Part 1: Reclosable pressure-relief valves
<b>ISO 21013-2</b>	Cryogenic vessels – Pressure-relief accessories for cryogenic service – Part 2: Non-reclosable pressure-relief devices
<b>ISO 21013-3</b>	Cryogenic vessels – Pressure-relief accessories for cryogenic service – Part 3: Sizing and capacity determination
<b>ISO 21013-4</b>	Cryogenic vessels – Pilot operated relief devices – Part 4: Pressure-relief accessories for cryogenic service
<b>ISO 28921-1</b>	Industrial valves – Isolating valves for low-temperature applications – Part 1: Design, manufacturing and production testing
<b>ISO 28921-2</b>	Industrial valves – Isolating valves for low-temperature applications – Part 2: Type testing
<b>EN 1626</b>	Cryogenic vessels – Valves for cryogenic service
<b>EN 12567</b>	Industrial valves – Isolating valves for LNG – Specification for suitability and appropriate verification tests.
<b>EN 13648-1</b>	Cryogenic vessels – Safety devices for protection against excessive pressure – Part 1. Safety valves for cryogenic service
<b>MESC SPE 77/200</b>	Cryogenic and Ultra Cryogenic Valve
<b>JB/T 7749</b>	Cryogenic Valve Technical Condition
<b>GB/T 24925</b>	Cryogenic valve technical specifications

Наибольшую важность имеет не только длина этого теплового моста, но и величина зазора между штоком или шпинделем и стенкой. При большом зазоре степень изоляции будет значительно менее эффективна, при малом зазоре происходит эффективное испарение, образующее газовый столб, и возникает надежная защита сальника. При полном захлаживании арматуры температура сальника близка к температуре внешней среды, что дальше будет проиллюстрировано.

Отсюда появляется важное ограничение, накладываемое на всю криогенную арматуру, – это её установочное положение, а именно – вертикальное с отклонением не более 30–45 градусов, чем предотвращается затекание криопродукта к сальниковому узлу и его захлаживание.

### Воздействие криогенных температур на металлы

Любое термическое воздействие на металл оказывает на него существенное влияние, но характер происходящих в металле процессов при нагревании и при воздействии криогенных температур различен. Далее будет рассмотрено воздействие на стали – именно они наиболее часто применяются в качестве

конструкционного материала в криогенной технике.

Первое – это термическая усадка металла, вызванная его охлаждением. Усадка деталей арматуры вследствие различия материалов может носить неравномерный характер, детали начинают сжиматься, при сжатии происходит их деформация, создающая в них повышенные напряжения. В совокупности эти факторы значительно усложняют работу арматуры при криогенных температурах, причем характер воздействия криогенной температуры на арматуру коренным образом отличается от воздействия повышенной.

Когда мы заводим арматуру в область высоких температур, расширение и деформация металла совмещаются с частичной потерей его механических характеристик: металл вследствие нагрева становится более мягким и пластичным, и это частично смягчает ситуацию и облегчает условия работы арматуры. При криогенных температурах происходит совершенно другой, противоположный процесс – низкая температура приводит к увеличению прочности и жесткости металла, поэтому усадка и деформация металла приводят к состоянию более напряженному и сложному, чем при нагревании. Кроме того, при охлаждении металла

происходит его охрупчивание, совершенно несовместимое с повышенными напряжениями, возникающими при захлаживании.

Следующий фактор воздействия – это фазовые преобразования в металле. Если вспомнить всем нам знакомую диаграмму «Железо – углерод», описывающую фазовое состояние стали при изменении температуры, то видно, что она рассматривает диапазон температур выше 0 °С, а того, что происходит в стали при низких температурах, диаграмма не отражает. В металловедении вообще принято рассматривать только область повышенных температур, а между тем при охлаждении в сталях тоже происходят фазовые преобразования. В применяемых в криогенной технике аустенитных сталях при глубоком охлаждении происходит мартенситное превращение, сопровождаемое сменой кристаллической решетки, которая становится менее плотной и занимает больший объем, это, опять же, приводит к расширению детали и ее деформации. Причем, такие деформации могут носить необратимый характер.

К сожалению, происходящие в металле при низких температурах процессы мало описаны в учебниках и в справочной литературе, и такое

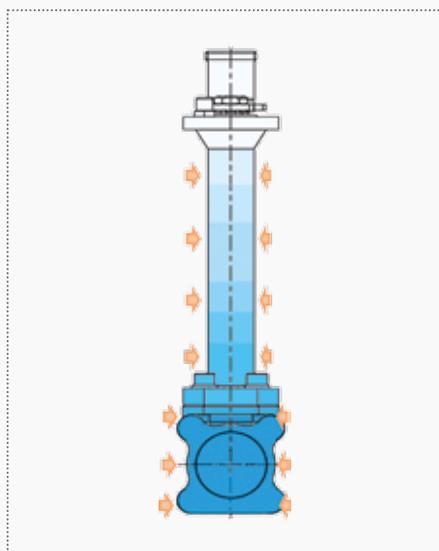


Рис. 1. Образование теплового столба и распределение температуры

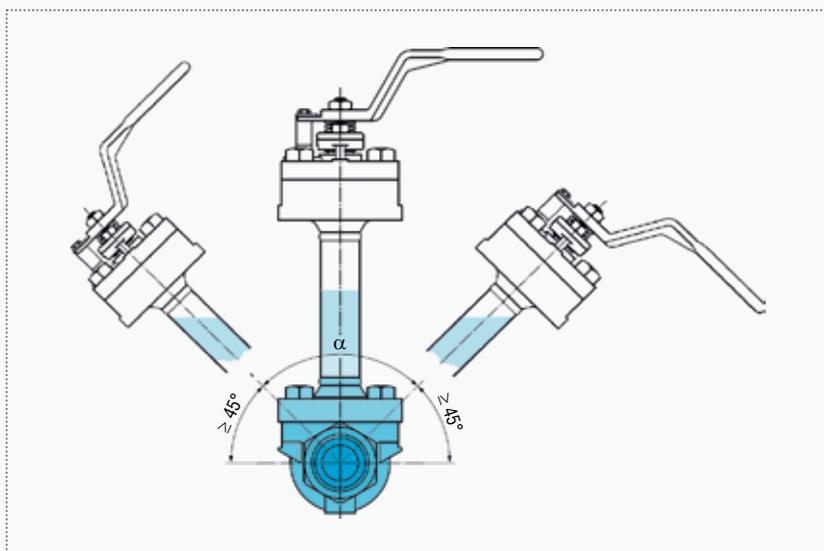


Рис. 2. Установочное положение криогенной арматуры

Полимеры для криогенного применения:

- Зарубежные: NRG, TFM-1600 (Dyneon), PCTFE (Kel-F), Fluoroloy, CF PTFE.
- Отечественные: Ф-4 (Ф4К20, Ф4УВ15), Ф-3.

отсутствие информации осложняет полное понимание происходящих процессов.

Третий параметр – изменение жесткости при воздействии низких температур. Практика изготовления и использования криогенной арматуры показала, что при охлаждении динамика изменения жесткости значительно выше, чем при нагреве. Поэтому когда вопрос касается упругих элементов (например, пружин), то фактор термического воздействия носит очень значительный характер, и это необходимо учитывать.

Основным требованием, предъявляемым к криогенным сталям, является снижение порога хладноломкости стали, что обеспечит гарантированный запас пластичности и вязкости разрушения металла при рабочих температурах. Основным методом решения этих задач может быть использование в качестве конструкционного материала аустенитных сталей. Но общепринятые марки этих сталей при большом количестве своих положительных качеств имеют два существенных недостатка – это очень низкие механические характеристики (прочность и предел текучести) и практическая невозможность управления этими характеристиками термической обработкой в пределах одной марки стали.

Поэтому для успешного проектирования арматуры необходимо использовать более широкий спектр аустенитных сталей с различными свойствами. Этим сталям в нашей и в мировой нормативной базе имеется большое количество, есть даже специальный класс сталей – криогенные стали. Очень большие перспективы в применении азотистых криогенных сталей, имеющих значительно более высокую по сравнению с тра-

диционными аустенитными сталями прочность, и их применение очень выгодно для нагруженных деталей.

Если посмотреть зарубежный опыт, то в пределах одного конструктивного исполнения используются несколько марок сталей. Но в наших условиях практическая возможность приобретения таких сталей отечественного изготовления очень ограничена: кроме нескольких общеизвестных марок в продаже практически ничего нет, хотя сами эти стали общеизвестны и описаны в ГОСТ.

### Воздействие криогенных температур на полимеры

Уплотнительные элементы из полимеров – самые маленькие и легкие детали в арматуре, но они для нее имеют крайне важное, стратегическое значение. От свойств этого полимера помимо надежности, герметичности и других качеств зависит и герметизирующее усилие, а далее – крутящий момент, диаметры штоков и шпинделей, конструктивная прочность, величина привода и т. д., и тянется эта цепочка очень-очень далеко. Поэтому именно эта маленькая деталь и её свойства – это стратегическая деталь во всей арматуре, от неё зависит очень многое.

Если сальник мы каким-либо образом можем защитить от воздействия криогенных температур, то уплотнительный элемент затвора арматуры подвергается непосредственному воздействию криогенной среды, этого не избежать.

Первый негативный фактор воздействия – это **термическая усадка**, которая очень значительна для многих полимеров, причем при практической работе выясняется, что величина этой усадки очень велика, даже можно сказать – неожиданно велика. И это необходимо учитывать при проектировании. Далее происходит **изменение механических свойств**, что тоже значительно сказывается и на крутящем моменте, и на ресурсе, и на надежности арматуры. Третий фактор – это **стеклование**. При низкой температуре мягкие в нормальных условиях полимеры становятся подобными стеклу: твердыми, жесткими и хрупкими. Такое резкое изменение их свойств немедленно сказывается на герметичности арматуры и крутящем моменте.

Здесь сразу хотелось бы отметить, что зарубежный подход к подбору и применению этих полимеров очень серьезный. У зарубежных компаний существует широчайший спектр полимеров, подобранный практически на все условия эксплуатации. Для криогенных применений в основном это фторполимеры различных модификаций, с различными наполнителями и модификаторами.

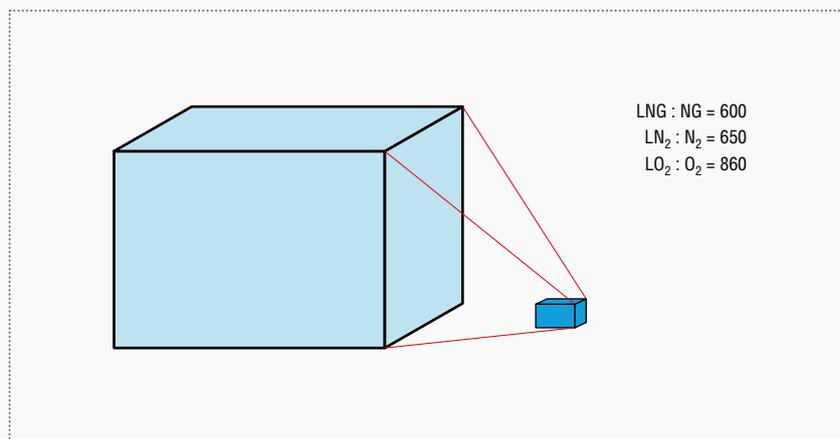


Рис. 3. Коэффициенты расширения

Отечественная химическая промышленность поставляет более скромное количество марок фторполимеров. Это и известный фторопласт Ф-4 и его модификации, обладающие более высокой прочностью и износостойкостью – Ф4К20, Ф4УВ15 и другие, эти полимеры успешно работают в криогенных условиях. Но наиболее интересный и удобный для применения фторполимер – это Фторопласт-3, он имеет значительно более низкую температуру стеклования и показывает себя в работе в криогенных условиях значительно лучше, чем традиционный Ф-4. Именно на его основе изготавливаются практически все зарубежные уплотнительные элементы для криогенных применений. Материал этот общеизвестный и стандартный, ранее производился массово, но приобрести его сейчас у отечественного изготовителя невозможно, и это очень плохо.

Из вопросов, которые возникают при проектировании криогенной арматуры, необходимо отметить ограниченность справочных материалов по применению пластмасс. Если, к примеру, по технологии металлов существуют подробные учебники и справочники, к которым, при необходимости, можно обратиться и найти ответ, то с полимерными материалами все значительно сложнее. У нас в стране, к сожалению, даже нет аналогичного металловедческим специальным институту по полимерам, что осложняет поиск необходимой справочной информации.

Причем здесь мы сталкиваемся все с той же проблемой – поставщики уплотнительных полимеров подробно изучают и описывают их характеристики только для области высоких температур: как себя ведут полимеры при повышении температуры, когда и как начинают менять свойства и разлагаться. Если спросить любого производителя пластмасс, а что будет при захлаживании до криогенных температур, то четкого ответа получить не удастся. Очевидно,

что эти вопросы следует адресовать нашим химикам, производителям пластмасс, которые этим темам могли бы в дальнейшем уделять больше внимания.

### Испарение криопродукта

Тут нет никакого открытия – это известная проблема, но хотелось бы отметить, что влияние этого фактора значительно более серьезное, чем может показаться на первый взгляд. В частности – при практической реализации и изготовлении криогенной арматуры это сказывается очень сильно.

При нагреве захлаженной арматуры происходит испарение жидкого продукта и переход его в газообразную фазу (рис. 3) с резким увеличением занимаемого объема. Так сжиженный природный газ (СПГ) газ при переходе из жидкой фазы в газообразную расширяется в 600 раз, азот – в 650, кислород – в 860. Пропорционально этому вырастет и давление в закрытых полостях арматуры, откуда газ не имеет свободного выхода: где была 1 атмосфера, там мы для сжиженного газа получим 600 атмосфер. Это, конечно, необратимо приведет к разрушению арматуры или ее элементов.

У клапанов закрытых полостей нет, и эта проблема свойственна только кранам и задвижкам. Причем для крана эта проблема менее актуальна – там закрытые полости,

как видно на рис. 4, имеют значительно меньший объем. У задвижек же этот объем очень большой, а значит, этот фактор имеет для них гораздо большее значение. Но для задвижки эта проблема свойственна только в закрытом состоянии, а для крана эта проблема существует как в закрытом, так и в открытом положении. Поэтому, важная особенность криогенной арматуры – то, что при ее проектировании необходимо дополнительно учитывать и этот фактор. А именно – необходимо предусмотреть механизм предотвращения повреждения арматуры вследствие теплового расширения среды из-за испарения жидкого продукта.

Механизмы эти достаточно просты и описаны в стандартах: это разгрузочные отверстия, которые сообщают закрытую внутреннюю полость с открытыми внутренними полостями. В задвижке, которая показана на рис. 4, это отверстие, которое производит разгрузку полости и сбрасывает давление в сторону подачи потока. Шаровые краны имеют для этих целей специальное отверстие в пробке, разгружающее полость в закрытом и в открытом положениях. Отсюда получается, что любая криогенная арматура, в которой предусмотрено решение этой проблемы, становится односторонней, допускающей поток среды только в одном направлении, что нужно будет учитывать при ее конструировании и монтаже.

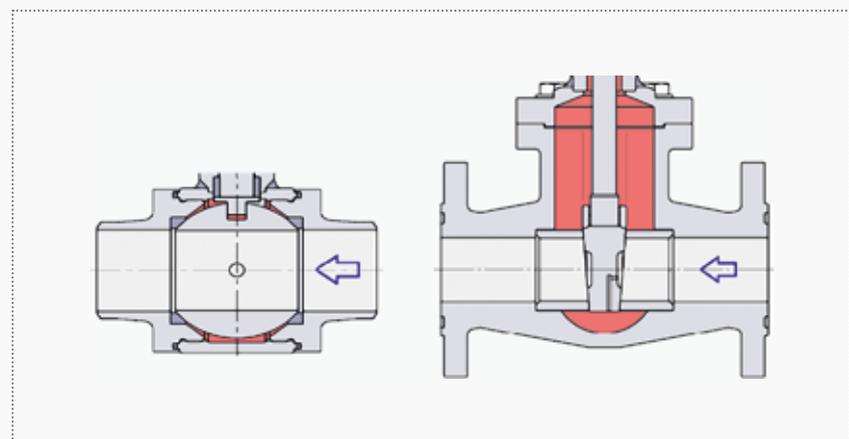


Рис. 4. Испарение криопродукта

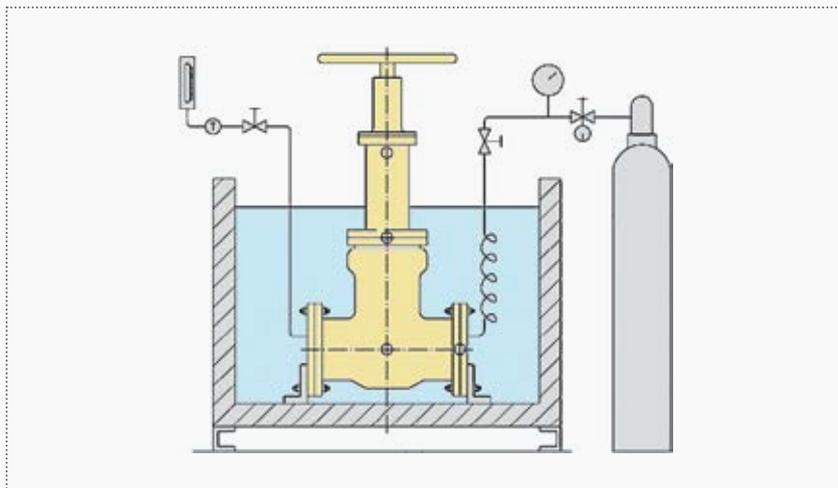


Рис. 5. Типовая схема испытаний

### Криогенные испытания

На рис. 5 представлена типовая схема криогенных испытаний, которая примерно одинакова во всех стандартах на криогенную арматуру. Арматура опускается в криованну, заливается жидким азотом, захлаживается (рис. 6) и, при стабилизации температуры, которая наступает при  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  (температуре, при которой происходит кипение жидкой фазы азота), проводятся испытания. В процессе испытаний контролируются температура элементов арматуры, герметичность и крутящий момент.

Герметичность арматуры проверяется гелием, потому что любой другой газ при этой температуре тоже переходит в жидкую фазу и уже не сможет обеспечить правильность контроля. Допустимые протечки по затвору описаны в стандартах, но в разных

стандартах эти нормы отличаются. Поэтому информация, каким же, собственно, нормативам герметичности необходимо следовать при испытаниях, должна опять же исходить от заказчика криогенной арматуры. Традиционная формулировка «герметичность по классу А» в данном случае неприемлема.

Параллельно в определенных точках производится контроль температуры для определения величины температурного градиента от захлаженной части до маховика, необходимо убедиться, что возможно комфортное обслуживание самой арматуры. Это естественно – если мы имеем  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  в трубопроводе, но на маховике должна быть положительная температура, чтобы оператор мог с ним работать.

Еще одним важным элементом криогенной арматуры является ка-

плезашитный воротник (рис. 7), который, увеличивает теплоотдачу и способствует формированию тепловой колонны, чем предотвращает попадание холода снизу к маховику. Кроме того, он предотвращает падение (стекание) конденсата вниз. При отсутствии этого воротника, собравшийся конденсат стечет вниз и попадет либо на сам трубопровод, либо на изолирующую часть. Но в любом случае это будет неприятно.

Исходя из практического опыта проведения криогенных испытаний, хочется особенно подчеркнуть такой момент – перед испытаниями необходима очень тщательная просушка и продувка арматуры, это очень важно. Когда начинаешь работать с криогенными температурами, приходит четкое понимание: то, чем мы дышим, – это не воздух, это раствор воды в воздухе. Поэтому перед испытаниями необходимо позаботиться о полном удалении влаги из арматуры, иначе внутри она покроется льдом, заморзнет, и результаты испытаний не будут корректными.

К сожалению, в стандартах нет никаких упоминаний о методике испытаний обратной и сильфонной арматуры. Такие испытания на первый взгляд могут показаться простыми и понятными, но при внимательном рассмотрении выясняется, что вопросы там всё же есть, и приходится искать их решение собственными методами.



Рис. 6. Захлаживание арматуры при испытаниях



Рис. 7. Криоиспытания

## Натурные испытания

Этот вид испытаний наиболее корректный и носит наиболее достоверный характер, поскольку создаются реальные рабочие условия, в отличие от стендовых испытаний, где эти условия только моделируются. В данном случае (рис. 8) показано испытание запорного клапана на среде сжиженного природного газа (СПГ) при температуре  $-143\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Здесь по характеру намерзания льда на штоке видно, как температура постепенно повышается от криогенной до температуры внешней среды, на маховике намерзания нет, и с ним можно нормально работать.

На многих образцах арматуры после испытаний видна горизонтальная граница – это уровень затекания криогенной среды (рис. 8). Криогенная среда присутствует

в жидкой фазе только до этой отметки, выше она находится в газообразном состоянии, образуя газовую колонну, защищающую от охлаждения сальниковый узел.

## Заключение

Для применения в криогенных условиях требуется специфическая арматура, поэтому необходим особый подход к её конструированию, выбору материалов и проведению испытаний. При проведении всех этих работ необходимо учитывать множество особенностей, свойственных именно данному классу арматуры.

Для ухода от зависимости от импортной и изготовления полностью отечественной криогенной арматуры актуальными являются вопросы доступности необходимых сталей и полимеров, без которых изготов-



Рис. 8. Натурные испытания

ление качественной арматуры невозможно. Требуется единый российский стандарт на криогенную арматуру и решение актуальных вопросов, связанных с информационным обеспечением и с получением необходимой справочной информации.

## Комплекс по производству, хранению и отгрузке сжиженного природного газа построят в Выборге

Технологический инжиниринговый холдинг «ПЕТОН» (г. Уфа) и ПАО «Газпром» построят в городе Выборг комплекс по производству, хранению и отгрузке сжиженного природного газа. Стоимость проекта – 126 млрд рублей. Соответствующее соглашение стороны подписали в конце октября 2016 года.

Предполагается, что производственная мощность комплекса составит 1,5 млн тонн СПГ в год. Новый комплекс будет представлять собой завод по производству сжиженного природного газа, криогенный газопровод и вспомогательные объекты. Сжиженный газ, как считают эксперты, будет использоваться для газификации Калининградской области.

Это уже не первый проект компании, реализуемый совместно с «Газпромом». Среди крупных проектов холдинга – Амурский газоперерабатывающий завод (ГПЗ), Сургутский ЗСК, Карачаганакское и Оренбургское НГКМ (Оренбургский ГПЗ), Южно-Кириновское ГКМ, Астраханский ГПЗ, Омский НПЗ.

Криогенные технологии обработки сжиженного природного газа являются одним из приоритетных направлений уфимского холдинга «ПЕТОН». Например, в рамках реализации проекта Амурского ГПЗ компания совместно с Linde AG осуществляет импортозамещение технологии по подготовке сырья для криогенной части. Уфимская компания отвечает за актуализацию лицензионной криогенной технологии этого предприятия.

На новом заводе в Выборге также будут использоваться локализованные криогенные технологии в рамках программы импортозамещения. В этой сфере холдинг активно сотрудничает с промышленной группой КОНАР. Это предприятие производит локализацию производства криогенной трубопроводной арматуры. Криогенные технологии КОНАР используются специалистами «ПЕТОН» в ряде крупных проектов.

*По материалам Ежедневной общероссийской газеты «Новые известия» и сайта peton.ru*

