

The original article was published in Valve World, Volume 16, Issue 4, May 2011, p. 29. The translation of the original English article was revised by T. Sklyarova, Zavod «Znamya Truda», JSC, St. Petersburg.

Под приварку или фланцевая? Сравнение вариантов присоединения арматуры для объектов СПГ

Терминал загрузки СПГ

J. Fouque, V. Olivry, KSB SAS

Когда заходит речь о присоединении арматуры к трубопроводу, перед владельцами заводов СПГ и инжиниринговыми компаниями неизбежно встает вопрос, чему отдать предпочтение – арматуре фланцевой или с концами под приварку. В статье рассматриваются основные черты и особенности каждого из соединений с целью определить, какое из них более подходит для СПГ.

На заводах по производству сжиженного природного газа места соединений арматуры и трубопроводов подвержены большим нагрузкам. При охлаждении до криогенной температуры труб, пролегающих на протяженном участке от резервуаров до терминалов загрузки СПГ, происходит их существенное температурное сжатие. Будь такой трубопровод прямым, он должен был бы при охлаждении стать на несколько метров короче, что неминуемо означало бы для него летальный исход. Дабы избавиться от этой проблемы, на большинстве криогенных трубопроводов делают петли, что позволяет компенсировать температурное сжатие за счет «сглаживания» формы петель (см. рис. 1).

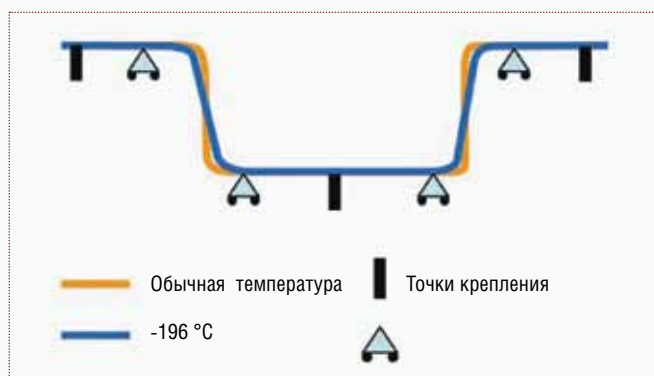


Рис. 1.

Об авторах



Jerome Fouque — закончил университет в Бордо по специальности инженер-механик, д.т.н. в области вычислительной гидродинамики. На протяжении четырнадцати лет занимался расчетами с использованием методов конечных элементов. В настоящее время — главный инженер в фирме KSB AMRI — подразделение Дисковых затворов (Gradignan), возглавляет департамент расчетов, технической поддержки и обучения. Он также является профессором кафедры Динамики и Вибрации университета в Бордо (CNAM). Он досконально изучил все требования нормативных документов, относящихся к расчетам (EN, ASME, RCCM, KTA и др.), и занимается техническими исследованиями, включающими вопросы применения арматуры, материалов для арматуры, утечек.



Vincent Olivry — инженер-механик, специалист в области маркетинга из CNAM, Париж. Работал в небольшой консалтинговой фирме, принимал участие в коммерческой оценке различных проектов и технологий. В 1991 г. перешел на работу в отделение KSB AMRI, где отвечал за стратегический маркетинг. Затем несколько лет проработал в отделе Вентиляция, отопление и кондиционирование подразделения насосов этой фирмы. В 2000 г. он вернулся в подразделение Дисковых затворов как специалист по затворам с эксцентриситетом, а совсем недавно стал специалистом AMRI по развитию бизнеса на рынке СПГ с задачей продвижения продукции компании.

Возникающие при этом изгибающие моменты и напряжения куда в большей степени «совместимы с жизнью» трубопровода. Тем не менее, они весьма высоки, и им подвержены любые соединения арматуры и трубопровода, которые должны эти нагрузки выдерживать.

Проектируя криогенный трубопровод, всякий инженер встает перед непростым вопросом: какую арматуру ему использовать, фланцевую или под приварку встык? Дабы помочь ему сделать верный выбор, мы рассмотрим в этой статье основные аспекты данного вопроса. Будет показано, как ведут себя соединения среднего (16") и большого (36") размеров. Поскольку СПГ, как правило, транспортируется при относительно низком давлении, вопрос будет изучаться на примере класса давления 150. Рассматриваемые аспекты таковы: способность выдерживать внешние нагрузки, действующие на соединение, выносливость к длительным (циклическим) нагрузкам, затраты на техническое обслуживание арматуры.

Стойкость к внешним нагрузкам

Обычно соединения трубопроводной арматуры рассчитываются на сопротивление трем основным нагрузкам:

А. Сжатие под действием давления (см. табл. 1).

Когда арматура находится в закрытом положении, действующее на нее давление стремится оторвать ее от неподвижного трубопровода, и ей следует быть стойкой к этому стремлению. Во фланцевой арматуре давление приложено к площади, ограниченной кольцевой прокладкой. В арматуре под приварку встык площадь приложения давления – само сечение трубопровода.

В. Усилие сжатия прокладки (см. табл. 2)

Данное усилие характерно только для фланцевой арматуры. Прокладка зажимается между фланцами контактным давлением, обеспечивающим герметичность соединения.

С. Нагрузки, действующие от трубопроводов (см. табл. 4, 5 и 6)

Криогенные трубопроводы – это всегда высокие нагрузки. Чтобы разобраться с действующими в них напряжениями, необходимо иметь информацию из предпроектных изысканий (FEED¹). Следует постараться выявить максимально допустимые чистые нагрузки (чистое растяжение и чистый изгиб), которые сможет выдержать то или иное соединение. Приведенные в таблицах значения чистых нагрузок в известной степени условны, поскольку в реальности действуют различные сочетания этих нагрузок: как растяжений, так и изгибающих моментов.

В контексте рассматриваемого вопроса «соединение» – это именно то, что держит нагрузки. Для фланцевой арматуры это сечение болтов. Для арматуры под приварку – кольцевое сечение трубы как таковой. Пользуясь более сложными расчетными методами, можно оценить поправки к нагрузкам на растяжение, которые испытывает присоединение того или иного рода, находясь одновременно под действием изгибающих моментов.² Существует методика расчета максимальной нагрузки, которую соединение арматуры и трубопровода способно выдержать без повреждения уплотнения и появления утечек для фланцевых соединений, либо без превышения предела упругой деформации для соединений под приварку. Методика основана на стандартах EN 2516-2 и КТА 3211-2.

Из расчетов ясно, что соединение под приварку может принять на себя как минимум вдвое большие внешние нагрузки, чем фланцевое соединение, прежде чем будет превышен предел упругой деформации материала трубопровода. Для развития трещины сварного шва может понадобиться напряженность в два, а то и в три раза выше. Также показано, что когда арматура большого размера находится под давлением, соответствующем классу ANSI VI 6.47 кат. В, фланцы использовать не следует, поскольку они не смогут воспринять никаких внешних нагрузок со стороны трубопровода.

¹ – Front End Engineering Development.

² – то есть, свести изгиб к растяжению, вычислив одно эффективное напряжение вместо двух (прим. ред.)

Таблица 1. Действие давления на соединение клапан-трубопровод

	Фланцевое соединение		Соединение под приварку встык	
	Диаметр области приложения нагрузки, мм	Сила давления, кН	Диаметр области приложения нагрузки, мм	Сила давления, кН
DN 16" B16.5	443	308	397	247
DN 36" B16.47, таблица А	948	1 411	895	1 258
DN 36" B16.47, таблица В	943	1 397		

Таблица 2. Усилие сжатия прокладки

Фланцевое соединение	Средний диаметр прокладки, мм	Ширина прокладки, мм	Минимальное контактное давление, МПа	Минимальное усилие, прилагаемое к прокладке, кН
DN 16" B16.5	443	20,5	0,4	114
DN 36" B16.47, таблица А	948	20,7	0,4	246
DN 36" B16.47, таблица В	943	15,9	0,4	188

Таблица 3. Рабочее сечение фланцевого соединения

Фланцевое соединение	Размер болта	Сечение одного болта, см ²	Количество болтов	Суммарное сечение болтов, см ²
DN 16" B16.5	1" (UNC1)	3,65	16	58,47
DN 36" B16.47, таблица А	1"1/2 (8-UN)	9,22	32	295,07
DN 36" B16.47, таблица В	7/8" (UNC)	2,78	44	122,35

Таблица 4. Сечение, подвергающееся нагрузкам в соединении под приварку

Размер трубопровода (NPS2)	Внешний диаметр, мм	Толщина, мм	Общее (кольцевое) сечение, см ²
16" B36.19M Sch IOS	406,4	4,78	60,31
36" B36.10M Sch STD	914,	9,53	270,79

Таблица 5. Допустимая чистая нагрузка на растяжение

DN	NPS	Класс давления 150	Напряжение, кН		% отношение соединения под приварку / фланцевое
		Стандарт	Фланцевая арматура	Арматура под приварку	
400	16"	B16.5	416	1411	3,4x
900	36"	B16.47, таблица А	2771	6251	2,3x
900	36"	B16.47, таблица В	50		> 100

Таблица 6. Допустимый чистый изгибающий момент

DN	NPS	Класс давления 150	Изгибающий момент, м·кН		% отношение соединения под приварку / фланцевое
		Стандарт	Фланцевая арматура	Арматура под приварку	
400	16"	B16.5	56	142	2,5x
900	36"	B16.47, таблица А	752	1405	1,9x
900	36"	B16.47, таблица В	13		> 100

Выносливость

Даже если операторам удастся избежать слишком частых циклов нагрева или охлаждения криогенного трубопровода, они все же имеют место на любом заводе по производству СПГ. Во время таких нагревов/охлаждений соединение трубопровод-арматура подвергается циклическим нагрузкам. После некоторого количества циклов большой амплитуды всегда есть возможность того, что фланцевое соединение с сжимаемой прокладкой трубопровод-арматура даст утекчу. Фланцевые соединения должны постоянно – каждые три или пять лет – проверяться и контролироваться, а через двадцать-тридцать лет необходимо менять прокладки. Это может потребовать немалых затрат, так как, прежде чем заниматься заменой прокладок, необходимо изолировать нужный участок, а после замены вновь подключить его к работе. Очевидно, что эти доводы говорят в пользу арматуры под приварку, когда соединение трубопровод-арматура остается постоянно герметичным, не требует периодических проверок и техобслуживания.

Расходы на монтаж (капитальные затраты)

В большинстве случаев установки по переработке СПГ сооружаются Генподрядчиками. И поскольку все

же есть разница в цене между арматурой под приварку и фланцевой, отдельные покупатели предпочитают покупать ту, что подешевле, ну и потом наблюдать за мучениями своих коллег, закупающих болты и фланцы. Ведь, в сравнении с арматурой под приварку, при установке фланцевой арматуры необходимо дополнительно приобрести комплект из двух ответных фланцев с патрубками под приварку, двух прокладок и крепежа. Более того, для условий криогенных температур эти детали должны быть изготовлены из дорогостоящей нержавеющей стали. В ходе монтажа количество операций для обоих видов соединения практически одинаково: два стыковых шва, проверка их качества неразрушающими методами контроля, установка арматуры на трубопровод с требуемым уровнем точности. В случае фланцевой арматуры точность нужна при приварке ответных фланцев к трубопроводу и установке арматуры между ними. В случае арматуры под приварку необходимо точно расположить относительно трубопровода самую тяжелую и громоздкую арматуру. Можно считать, что обе операции занимают практически одинаковое время, необходим один и тот же персонал и подъемные механизмы. Но если арматуру под приварку можно считать после этого окончательно установленной, то для установки фланцевой арматуры необходимо будет еще затянуть болты фланцев.

Таблица 7. Отношение капитальных расходов на фланцевую арматуру и арматуру под приварку

	DN 16" B16.5	DN 36" B16.47, таб. А
Фланцевая арматура	100%	100%
Патрубки под приварку	30%	19%
Крепеж	8%	8%
Прокладка	2%	4%
Затяжка	3%	2%
Совокупные затраты на фланцевую арматуру	143%	133%
Совокупные затраты на арматуру под приварку	137%	129%
Разница (%) под приварку / фланцевая	-4%	-3%

В **таблице 7** приведены затраты, приведенные к стоимости фланцевой арматуры. Результат очевиден: если беспристрастно все взвесить, то совокупные затраты на арматуру под приварку меньше, чем на фланцевую арматуру.

Техническое обслуживание

Затраты времени на разборку и сборку

При вводе арматуры в эксплуатацию часть седел обычно оказываются повреждены инородными частицами, оставшимися после промывки трубопровода. Требуется проверка работоспособности арматуры, после которой некоторые седла потребуют замены. В этом случае преимущества на стороне арматуры под приварку. Ведь, чтобы добраться до подлежащего замене седла, фланцевую арматуру необходимо полностью демонтировать с трубопровода, перевезти в цех или мастерскую за пределы завода. В то время как для замены седла в арматуре под приварку необходимо лишь снять крышку и заменить седло непосредственно на месте эксплуатации.

Более того, прежде чем снять фланцевую арматуру с трубопровода, необходимо отключить ее привод от системы управления, т.е. отсоединить конечные выключатели, а также, возможно, электромагнитный клапан, электропитание, пневмо- или гидросистему. Если это происходит во взрывоопасной зоне, то необходимо вмешательство специалистов — электрика, механика и инженера, отвечающего за демонтаж арматуры. В **таблице 8** приведен вес, который

Таблица 8. Масса груза, подлежащего перемещению при техническом обслуживании и ремонте

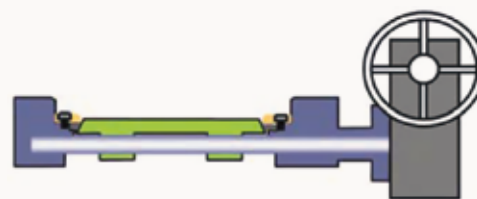
DN	NPS	Вес, кг		% отношение соединения под приварку / фланцевое
		Фланцевая арматура	Арматура под приварку	
400	20"	218	28	13%
900	36"	1736	164	9%

Таблица 9. Сравнение времени, затрачиваемого на затяжку крепежа фланцевой арматуры и арматуры под приварку

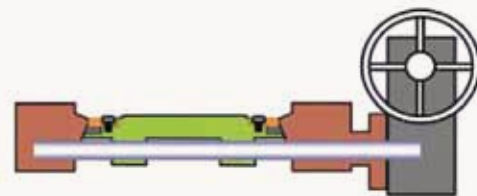
DN	NPS	Фланцевая арматура			Арматура под приварку		% отношение соединения под приварку / фланцевое
		Стандарт на фланцы	Количество болтов на фланцах	Размер болтов	Количество болтов на крышке	Размер болтов	
400	20"	ANSI B16.5	32	M27	30	M16	56%
900	36"	ANSI B16.47, таблица А	64	M40	60	M20	47%

предстоит поднять в обоих случаях. Для арматуры под приварку даже очень большого размера будет достаточно простого подъемного устройства (возможно, ручного). Но, увы, к фланцевой арматуре это не относится.

Количество и размер болтов, которые необходимо затянуть. Из **таблицы 9** видно, что количество болтов в арматуре под приварку такое же или несколько меньше, чем у фланцевой арматуры, причем все они расположены на плоской верхней поверхности арматуры, что делает их более доступными. Из таблицы также следует, что затяжка болтов фланцевой арматуры занимает приблизительно в два раза больше времени, чем затяжка гаек крышки арматуры под приварку.



Фланцевая арматура с седлом на корпусе



Фланцевая арматура с седлом на диске

Вариант А. Фланцевая арматура

Седло на корпусе

При такой конфигурации оператор должен положить арматуру, в которой следует заменить седло, на стенд горизонтально, снять удерживающий его фланец, заменить седло и вновь зафиксировать фланцем.

Седло на диске

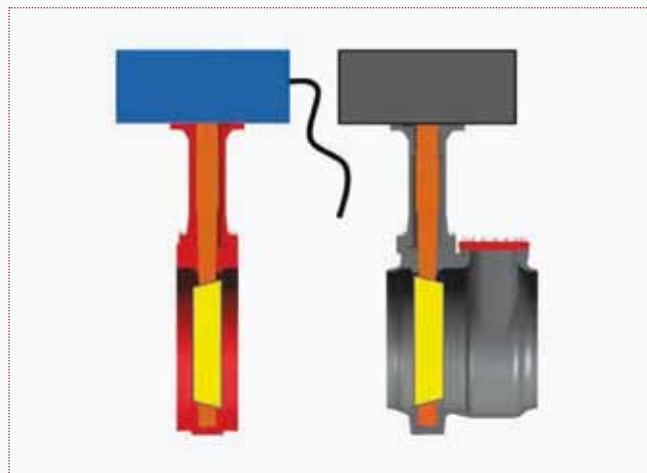
Седло не доступно при закрытом положении арматуры. Для замены седла оператор неминуемо должен привести диск в положение открыто, чтобы снять удерживающий фланец и заменить старое седло. Во многих случаях, особенно что касается арматуры больших размеров, или если детали не обладают достаточной жесткостью для сохранения своей формы в вертикальном положении, оператор должен держать арматуру вертикально, чтобы повернуть вал на 180° из закрытого положения (что потребует снятия привода), а уже затем он снимет фланец, удерживающий многослойное седло, в горизонтальном положении арматуры. После замены седла ему вновь придется поднять арматуру вертикально, прежде чем повернуть вал назад на 180° в закрытое положение, вновь установить привод и затянуть фланец.

Проще говоря, седло арматуры под приварку просто заменяется — и всё, а чтобы заменить седло фланцевой арматуры, прежде надо разобрать саму арматуру. Кроме того, если говорить о фланцевой арматуре, то привод и конечные выключатели подлежат перенастройке (искусная операция, которую может выполнять только грамотный специалист, не нарушающий герметичность арматуры). С арматуры под приварку привод не снимается, т.о., нет необходимости в перенастройке, т.е. замена седла в данном случае более безопасная и быстрая.

Как сказывается расположение седла?

(подробнее см. варианты А и В на рисунках).

В завершении упомянем о влиянии местоположения уплотнительных элементов. Время на техническое обслуживание будет зависеть от того, где в арматуре раз-



Управляемый объем показан красным цветом

мещено седло — на корпусе или на диске.³ Как правило, меньше времени уходит на техническое обслуживание седел, расположенных на корпусе, независимо от того, фланцевая это арматура или под приварку.

Еще несколько слов об арматуре под приварку

Имея дело с арматурой под приварку, необходимо обратить пристальное внимание на герметичность соединений корпус-крышка. Два аспекта, которые необходимо учитывать:

- материал прокладки, который должен сохранять герметичность при термоциклировании. Металлическая прокладка более надежна, нежели графитовая.
- шпильки, крепящие крышку, принимая на себя сжимающее прокладку давление, прилагаемое к крышке, как правило, работают близко к пределу упругости материала. Они ни в коем случае не должны подвергаться тангенциальному напряжению (работать на срез). Давление в трубопроводе действует и на стенки отверстия, сделанного в корпусе арматуры для того, чтобы иметь доступ к седлу. Давление стремится его открыть. Чтобы противодействовать этому, производитель должен усилить крепеж отверстия, чтобы предохранить шпильки крышки от воздействия касательного напряжения⁴. Чтобы убедиться, что этого не произойдет, производители часто просчитывают данный узел с помощью МКЭ. Проблема становится всё острее с ростом рабочего давления. Чем толще диск, тем толще и шире должна быть крышка, чтобы выдержать давление. Толщина крышки не может быть больше 80 мм, таким образом, использование поворотных дисковых затворов под приварку ограничено, и при более высоких давлениях единственным решением становится применение фланцевой арматуры.

Редакция благодарит Александра Мышонкова (ОАО «Пензтяжпромарматура») за содействие при техническом редактировании статьи.



Арматура под приварку с седлом в корпусе

Арматура под приварку с седлом на диске

Вариант В. Арматура под приварку

Седло в корпусе

Коль скоро крышка открыта, точно так же, как и для варианта фланцевой арматуры, оператор может снять удерживающий фланец, заменить седло, установить удерживающий фланец на старое место и затянуть крышку болтами.

Седло на диске

В грамотно сконструированной арматуре предполагается наличие съемного седла.

Читатель должен понимать, что по сравнению с арматурой с седлом в корпусе данная конструкция предполагает наличие дополнительной прокладки, расположенной на корпусе. Когда давление действует сзади диска, усилия (возможно, достигающие несколько сотен тонн) отчасти передаются и на уплотнение корпуса.

Поскольку данное уплотнение удерживается болтами, последние будут подвержены растяжению под действием создаваемой давлением нагрузки. В свою очередь, это снизит давление, прижимающее прокладку к корпусу. При таком условии производителю следует учитывать риск возникновения утечки.

Кроме того, по сравнению с арматурой, имеющей седла в корпусе, следует учесть, что время, затрачиваемое на замену седла, увеличивается практически вдвое. Причина в том, что необходимо затянуть множество болтов (один ряд — для затяжки седла, второй — уплотнения корпуса), усугубляет ситуацию и то, что они труднодоступны.

³ Речь о дисковых затворах. Можно предположить (хотя в оригинале это нигде явно не указано), что и вся статья касается лишь этого типа арматуры (прим. ред.).

⁴ Из статьи не вытекает четкого понимания, откуда берется касательное напряжение на крепеже крышки. Можно предположить, что, поскольку отверстие имеет прямоугольную форму, давление стремится «округлить» ее. Такая «растаскивающая» нагрузка в первую очередь вызовет напряжения в самом корпусе, но отчасти скажется и на шпильках, крепящих крышку (прим. техн. ред.).