

От редакции

Оригинальная статья была опубликована в журнале Valve World, November 2016, p. 131 (www.valve-world.net). Перевод Т.С. Склярской.

Статья посвящена описанию новой конструкции уплотнения седла шарового крана. Автор использует термины, «эффект одностороннего и двустороннего действия поршня», редко встречающиеся в отечественных публикациях. Эти термины применяются для описания действия перепада давления на седла, увеличивающего контактные давления в уплотнениях затвора. В первом случае – это седло, создающее усилие уплотнения по шаровой пробке при односторонней подаче среды, во втором случае – это седло, создающее усилие уплотнения по шаровой пробке при двусторонней подаче среды. Автор также описывает взаимодействие пружин, устанавливаемых в шевронные полимерные манжеты, с крыльями этих манжет. Использование приводимых автором размеров пружин относится именно к этим пружинам. Новизна технического решения описываемой конструкции заключается в применении для уплотнения подвижного седла дополнительной манжеты, устанавливаемой между седлом и обечайкой, закрепляемой в корпусе крана.



Новая конструкция уплотнения седла с эффектом одностороннего действия поршня для криогенной арматуры

Francis Lebeau

Существующие конструкции седел, уплотняемых за счет эффекта одностороннего (SPE¹) и двустороннего действия (DPE²) поршня, применяемые как в прошлом, так и в настоящее время в корпусах криогенных шаровых кранов с пробкой в опорах, уже не отвечают требованиям сегодняшних реалий. Такие уплотнения вкпе с седлами решают судьбу класса герметичности, т. е. соответствия заданным требованиям (1,5 мл/мин на мм проходного сечения при испытании гелием при температуре –196 °С). Задача решалась применением подпружиненных уплотнений разнообразных конфигураций и размеров из ПТФЭ, как правило, называемых манжетными уплотнениями. До температуры –75 °С (или даже немного ниже) такие стандартные конструкции вполне могут справиться с обеспечением заданной герметичности. При более низких температурах задача становится все более и более трудновыполнимой, если не сказать, что просто нерешаемой. В статье представлена и описана предлагаемая новая конструкция седла, уплотняемого за счет эффекта поршня одностороннего действия, его применение помогает устранить основные причины, вызывающие сложности с обеспечением герметичности в затворе кранов. Это особенно актуально в последнее время, когда все большую популярность приобретает сжиженный природный газ (СПГ) как наиболее чистое топливо. Решение проблем герметичности при его транспортировке позволит избежать утечек метана и решит проблему защиты окружающей среды, поскольку СПГ легко воспламеним и поэтому очень опасен.

¹ Single piston effect seal.

² Double piston effect seal.

Об авторе

Francis Lebeau – специалист по уплотнениям для тяжелых условий эксплуатации, в настоящее время консультирующий компанию Fluorten, разрабатывающую и изготавливающую полимерные уплотнения с высокими эксплуатационными характеристиками. Francis работает на рынке уплотнений уже более 30 лет, специализируясь на конструкции подпружиненных уплотнений из ПТФЭ, участвует в разработке полимерных и металлических уплотнений для криогенных систем и арматуры европейской тяжелой ракеты-носителя «Ариан-5». Автор трех патентов.

Общие параметры уплотнений

Факторы, влияющие на уплотняющую способность, следующие: конструкция и материал уплотнения; конфигурации расточек под уплотнения, сборка седла и уплотнения; конструкция арматуры; давление; среда и температура.

От конструкции уплотнения, расточки под него и конструкции арматуры будет зависеть, сможет ли уплотнение сохранить герметичность для данных давления, среды и температуры. Это, конечно же, не единственное, от чего может зависеть герметичность.

Для обеспечения максимальной возможной герметичности необходимо иметь плотный контакт уплотнения с сопрягаемой поверхностью. При высокой температуре материал манжетного уплотнения распределяется легче и равномер-

нее, как бы копируя сопрягаемые поверхности и образуя надежное уплотнение. При криогенных температурах на это надеяться не стоит.

Кроме того, при нормальной и высокой температурах имеющегося усилия, создаваемого пружиной, как правило, вполне достаточно для прижатия манжетного уплотнения к сопрягаемой поверхности.

Какое же контактное давление будет достаточным?

Величина требуемого контактного давления будет определяться точностью обработки поверхности, рабочей средой и заданной степенью герметичности. Для газообразных сред при качественной обработке поверхности прикладываемое контактное давление будет приближаться к величине предела текучести материала корпуса и седла. При нор-

мальной температуре – это примерно 5 МПа.

Для стандартного уплотнения со спиральной пружиной должно создаваться окружное усилие (нагрузка), равное 5 Н/мм. В зависимости от конфигурации манжеты эта удельная нагрузка будет обозначать среднее усилие сжатия, не превышающее 5 МПа. Каждый раз при повышении давления сжатия на 10 бар напряжение сжатия будет увеличиваться только на 1 МПа.

Подтверждений тому, что манжетные уплотнения надежно работают при нормальной и повышенной температурах в различных отраслях промышленности, множество. Заданной герметичности по воде можно достичь путем надлежащей обработки поверхности седла и уплотнения. В **табл. 1** можно видеть результаты испытаний уплотнений с отполированной поверхностью и уплотнения с грубой шероховатой

Таблица 1.

Образец 1 Ra ~ 0,8 (утечки в мл/мин.)								
МПа	0,6	2,2	5,7	11,3	16,9	28,2	0,6	38,5
Rt*	0,15	0,45	0,45	0,00	0,00	0,00	0,18	0,24
150 °C	0,30	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,20
Rt	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00
-50 °C	0,30	1 0,30	1,08	2,85	2,82	0,51	0,23	0,45
Rt	0,00	0,15	0,18	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00
Образец с отчетливо видимыми следами механической обработки (утечки в мл/мин.)								
МПа	0,6	2,2	5,7	11,3	16,9	28,2	0,6	38,5
Rt	1,24	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00
150 °C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rt	0,90	1,40	2,00	0,30	0,15	0,00	3,20	0,00
-50 °C	7,00	50,00	45,00	26,00	36,00	33,00	25,00	0,00
Rt	10,00	54,00	1,50	0,15	0,00	0,00	20,00	0,00

* Rt – средняя арифметическая высота неровности профиля.

При значении Rt и температуре 150 °C утечка отсутствует, начиная с усилия 5 МПа. Снижение температуры до -50 °C приводит к увеличению утечки в силу недостаточного контактного давления.

У образца с грубой обработкой поверхности даже при более высоких усилиях при температуре -50 °C наблюдались значительные величины утечек. При повышении температуры величина утечки уменьшается практически до нуля.

обработкой, и то, как мехобработка влияет на усилие сжатия. В обоих случаях применялась малонагруженная V-образная подпружиненная манжета. Шероховатость поверхности канавки под уплотнение $Ra=0,4^3$.

Очевидно, что, прилагая усилие сжатия 5 МПа, можно достичь требуемой герметичности (по газу). Кроме того, показано, что при более низкой температуре потребуются приложить уже гораздо большее усилие.

Что же мешает уплотнению сохранять свои эксплуатационные качества при криогенных температурах?

При охлаждении полимеры, применяемые в качестве оболочки манжеты, установленной в седло, будут сжиматься в 10 раз больше, чем материал канавки, в которой они уложены, более того, уплотнение будет становиться тверже и тверже. Эти два фактора не способствуют решению проблем герметичности в криогенике. При температуре LN2⁴ предел текучести и модуль упругости (Юнга) обычного или модифицированного ПТФЭ увеличиваются десятикратно, и, как следствие, десятикратно увеличивается твердость. Кроме того, внешнее крыло (диаметр) манжеты может ужаться приблизительно на 2%, если, конечно, пружина позволит. Такие радикальные изменения характеристик материалов отрицательно скажутся на работоспособности уплотнения.

Усилие усадки внешнего крыла манжеты противостоит усилию пружины, снижая усилие прижатия и уплотняющую способность. И наоборот, из-за наличия усилия усадки, усилие сжатия внутреннего крыла (диаметра) манжеты повышается.

Усадка в условиях криогенной температуры – причина возникновения еще одной проблемы. В силу того, что невозможно изготовить

спиральную пружину с нулевым зазором по внешнему диаметру, деформированный полимер будет усаживаться именно в зазоры между витками пружины и снижать усилие затяжки. Есть вариант попробовать уменьшить зазоры насколько только это возможно, изготовив узел «манжета – пружина» с нулевым зазором. Как бы мы ни старались, в расточке под пружину в уплотнительной манжете в собранном уплотнении в любом случае будет иметь место зазор. Любые попытки исправить положение применением пружины с перекрытием принесет больше вреда, чем пользы. В области перекрытия образуется полость в виде треугольника. Усадка полимера в этом месте становится минимальной, а возникшие нагрузки распределяются в форме волны.

Характеристики криогенных уплотнений

Тогда как при нормальной и повышенной температуре вполне достаточно и относительно невысокого окружного усилия пружины (от 1 до 5 Н/мм), при пониженной и криогенной температуре его будет не хватать.

Повышенная твердость полимерной оболочки манжеты требует более сильного поджатия пружины по сравнению с усилием при высокой температуре. При температуре LN2 твердость чаще всего применяемых полимеров сравнима с твердостью меди при нормальной температуре. А при такой твердости пружине будет не под силу пластически деформировать полимерную оболочку манжеты. И с этим никто ничего поделать не сможет. Во-первых, тугая пружина с течением времени будет противодействовать усадке внешнего крыла уплотнительной манжеты в большей степени, нежели слабая пружина, но никогда не сможет преодолеть жесткость полимерной оболочки при температуре LN2 или темпера-

туре СПГ. Нужно отметить, что чем выше жесткость пружины, тем ниже эластичность. Кроме того, размер канавки под уплотнение ограничивает увеличение нагрузки и упругости пружины. Более того, туго сжатая пружина также препятствует перемещению подвижных уплотнительных колец седла. Во-вторых, туго сжатая пружина будет отчасти деформировать уплотнительную манжету, снижая тем самым столь необходимую эластичность, а также фактическое усилие.

Выводы

Усадка полимера снижает нагрузку на внешнее крыло (диаметр) уплотнительной манжеты. Усадка полимера в зазоры между витками пружины снижает окружную нагрузку. Увеличение твердости полимера при криогенной температуре – сложная и трудно решаемая задача. Допуски размеров арматуры и/или деформация ее элементов отражаются на равномерности распределения усилий. Механическая обработка деталей арматуры, общие допуски и внешние нагрузки в большинстве своем отрицательно сказываются на характеристиках уплотняющей способности. Представим, что мы имеем совершенную конструкцию уплотнения седла с туго сжатой пружиной, с нулевым зазором, превосходной упругостью и отполированной поверхностью, уплотнение идеально собранно в чистой и отполированной канавке, откуда в этом случае можно ждать отрицательного влияния на уплотняющие способности радикального уплотнения седла?

Для достижения максимальных характеристик по заданным условиям, необходимо, чтобы пружина была равномерно сжата по всей окружности. Это значит, что корпус арматуры и подвижные уплотнительные кольца должны быть идеально цилиндрическими, а в собранном состоянии не долж-

³ Ra – средняя арифметическая шероховатость поверхности.

⁴ Жидкий азот.

но быть эксцентриситета. Только в этом случае размер радиальной канавки будет одинаковым по всей окружности и таким же будет усилие сжатия. Нужно четко представлять, что любое даже незначительное отклонение от вышесказанного приведет к неравномерному сжатию пружины, а по существу к неравномерности распределения усилия (нагрузки) по окружности уплотнения. При эксплуатации вышеприведенное идеальное с точки зрения уплотняющей способности положение может измениться в худшую сторону в силу возникновения деформаций, вызванных криогенной температурой, давлением в системе и нагрузками от трубопроводов. В абсолютных значениях эти деформации могут быть невелики, но их влияние на уплотнение будет гигантским. Например, пружина радиального уплотнения $\frac{1}{4}$ " имеет поперечное сечение диаметром 5 мм. Предположив, что сжатие пружины на 20% дает 100% усилие сжатия, получим, что снижение деформации пружины на 0,2 мм приводит к снижению усилия сжатия на 23%, а снижение на 0,4 мм будет равно снижению усилия сжатия на 43% от начального. Эти данные справедливы для высококачественных пружин. Показатели для пружин невысокого качества (с высоким гистерезисом) будут, конечно же, еще хуже.

Заключение

Усадка полимера снижает нагрузку на внешнее крыло уплотнительной манжеты. Усадка полимера между витками пружины снижает нагрузки в месте усадки. Увеличение твердости полимера при криогенной температуре – сложная, трудно решаемая задача. Допуски размеров соответствующих элементов арматуры и/или деформация отражаются на равномерности распределения усилий. К радиальному уплотнению с односторонней герметичностью

нужно относиться критически в части обеспечения герметичности из-за усадки полимера, отличий в усадке полимера и материала элементов арматуры, качества механической обработки арматуры и последнее, но не менее важное, – из-за повышающейся твердости полимерного материала.

Стандартное уплотнение с эффектом одностороннего действия

Найден способ решения проблем, причина которых кроется во внешних крыльях манжет радиальных уплотнений, с которыми приходится сталкиваться при использовании классических конструкций. Неравномерная усадка материалов, повышение твердости и отсутствие вследствие этого достаточного и равномерного усилия прижатия – причины проблем с герметичностью манжет. При эксплуатации арматуры внутренняя полость корпуса и другие детали контактируют с криогенной средой, и, прежде всего, это касается уплотнений в затворе. А значит, усадка уплотнения и подвижного седла будет происходить несколько быстрее, чем массивного корпуса. Это приводит

к повышенным нагрузкам и усилиям на внутренний диаметр уплотнения манжеты. В области внешней части манжеты контактное давление уменьшается, а при равномерном распределении нагрузки (усилия сжатия) и вовсе сходит на нет. Как только температура выравнивается, контактное давление в области внешнего диаметра манжеты перестанет сколь-нибудь заметно увеличиваться. Зная эти недостатки, основными предъявляемыми требованиями должны быть полирование до зеркального блеска внутренней и внешней поверхностей седла под манжету. Пружина должна быть достаточно нагружена и соответствовать усилию от усадки уплотнительной манжеты. Но, в то же время, нагрузка от пружины ограничена определенным заданным уровнем, предотвращая тем самым слишком высокую пластическую деформацию при высокой температуре и трение о подвижное седло.

Таким образом, если не все, то большую часть проблем, связанных с использованием классического уплотнения, можно решить путем разделения задач обеспечения герметичности по диаметру, в области подвижного седла и уплотнений корпуса.

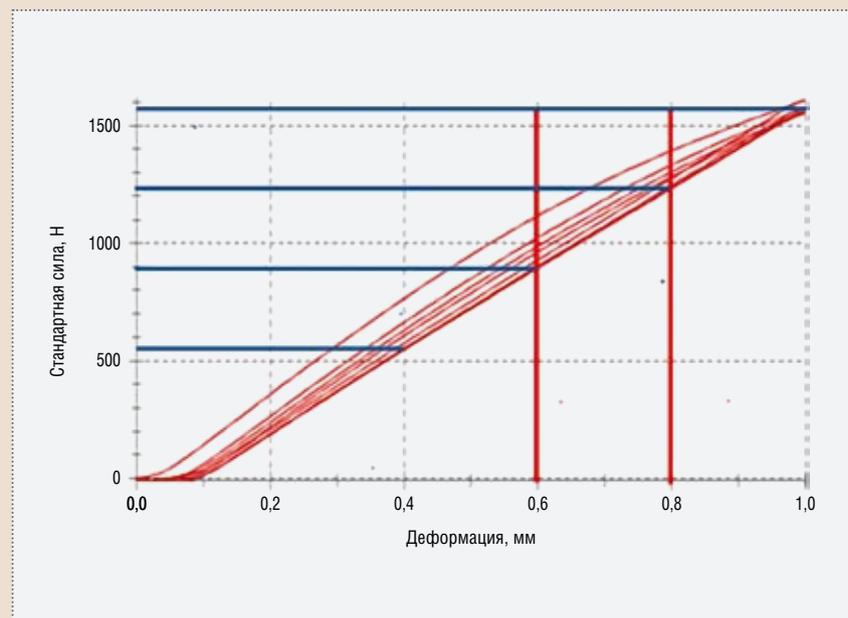


Рис. 1. Кривые сжатия и снижения сжимающей нагрузки винтовой пружины размером 5 мм

Новая конструкция уплотнения с эффектом одностороннего действия

На **рис. 3** показан вариант встроенного радиально-осевого уплотнения. Обечайка уплотнения и само уплотнение могут подвергаться механической обработке как одно целое или как взаимосвязанные радиальное и торцовое уплотнения. Крышка, удерживающая уплотнение, устанавливается в корпусе арматуры, она должна быть достаточно прочной, чтобы выдерживать рабочее давление.

Преимущества

- Абсолютно не важна величина нагрузки на внешнюю часть радиального манжетного уплотнения, т. к. манжета не выполняет уплотняющей функции.

- Величину нагрузки на внутреннюю часть манжеты можно рассчитать, чтобы минимизировать силу трения от перемещения подвижного седла, позволяя пружинам, поджимающим седла, передавать максимальные усилия.
- Уплотнение корпуса решено применением осевого уплотнения, как части интегрированного уплотнения.
- Усилие пружины на торцовое уплотнение может быть настолько высоким, насколько необходимо для обеспечения максимального уплотняющего усилия.
- Эксцентриситет подвижного седла относительно корпуса не столь важен.
- Нет необходимости в сложной и тщательной механической обработке или полировании внешнего диаметра под манжету.

Результаты испытаний, проводимых независимым испытательным центром (Bureau Veritas)

При испытании сборки, приведенной на **рис. 4**, стандартное уплотнение и разработанная радиально-осевая конструкция уплотнения, на которую подана заявка на изобретение, испытываются при абсолютно одинаковых условиях. Давление подается на оба уплотнения через канал P1. Канал Z позволяет измерить утечки по внешнему диаметру уплотнения, а порт 4 – по внутреннему диаметру. Утечки по стандартному радиальному уплотнению измеряются с помощью канала Z. Датчик температуры (не показан) расположен в 1 мм от радиального внешнего диаметра уплотнения новой конструкции.

Испытываемая сборка была помещена в камеру холода с температурой –100 °С и –170 °С, создаваемой исключительно за счет испарения жидкого азота, на время, достаточное для полного охлаждения.

Испытывалось уплотнение с размером внутреннего диаметра 228 мм, поперечным сечением 3/16", испытательная среда – газообразный гелий. До проведения криогенных испытаний уплотнение прошло испытание на герметичность гелием.

В **табл. 2** приводятся результаты испытаний новой конструкции уплот-

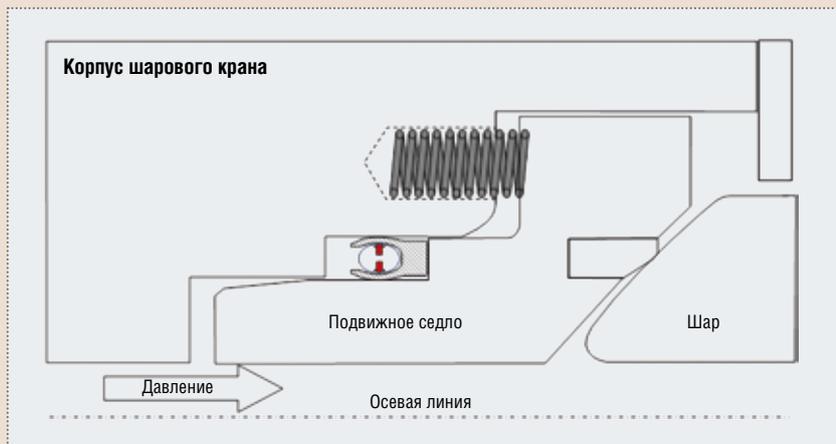


Рис. 2.

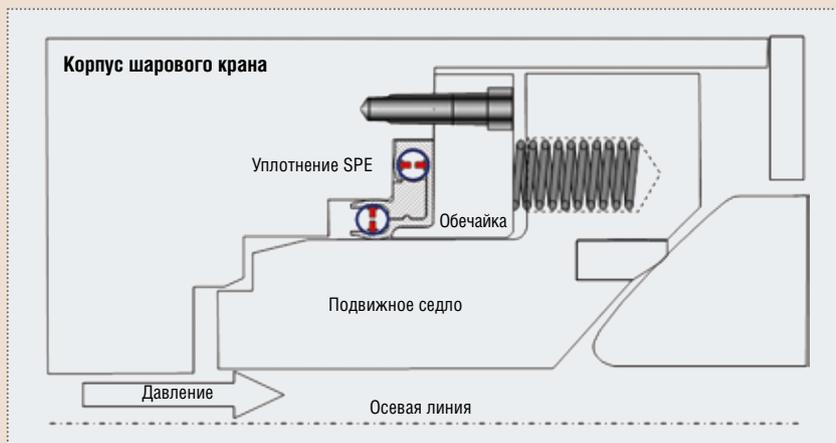


Рис. 3.

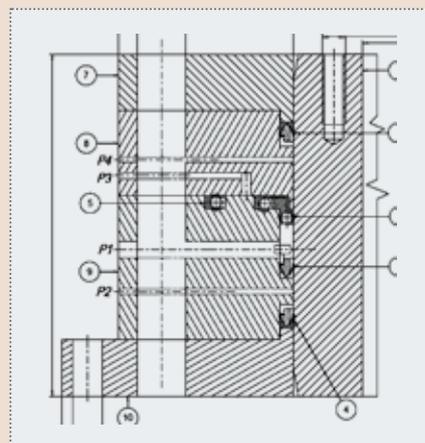


Рис. 4.

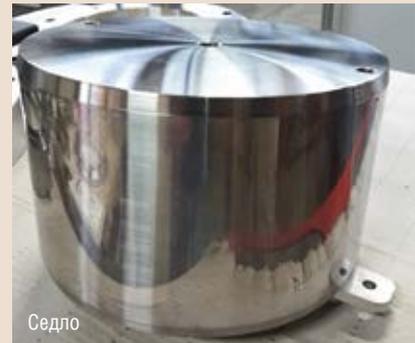


Таблица 2.

Давление (бар)	Температура	Утечки в новом уплотнении			Утечки в стандартном уплотнении	Единицы измерения
		Внутренний диаметр	Наружный диаметр	Сумма		
1	Rt	5,00E-06	5,60E-06		5,60E-06	мбар.л/с
10	Rt	8,00E-06	6,00E-06		1,00E-05	мбар.л/с
25	Rt	8,00E-06	1,00E-05		2,00E-05	мбар.л/с
1	-100 °С	0	0	0	0	мл/мин.
5	-100 °С	0	0	0	4	мл/мин.
10	-100 °С	0	0	0	10	мл/мин.
25	-100 °С	0	0	0	27	мл/мин.
50	-100 °С	0	0	0	30	мл/мин.
100	-100 °С	0	0	0	32	мл/мин.
1	-170 °С	0	0	0	4	мл/мин.
5	-170 °С	0	0	0	38	мл/мин.
10	-170 °С	0	0	0	50	мл/мин.
25	-170 °С	0	0	0	69	мл/мин.
50	-170 °С	3	3	6	99	мл/мин.
100	-170 °С	16	8	24	390	мл/мин.
1	-196 °С	0	0	0	13	мл/мин.
5	-196 °С	2	0	0	55	мл/мин.
10	-196 °С	3,2	0	0	57	мл/мин.
25	-196 °С	6	0	0	85	мл/мин.
50	-196 °С	9	3,2	12,2	99	мл/мин.
100	-196 °С	25	10	35	400	мл/мин.

нения и стандартного модифицированного уплотнения V-образной конфигурации.

В общей сложности испытывались три комплекта уплотнений. Во всех случаях без исключения герметичность новой конструкции уплотнения оказалась выше. Одним из стандартных уплотнений было уплотнение размером 3/16", подпружиненное винтовой пружиной; другим – V-образной пружиной. Оба эти уплотнения при температуре –196 °С и давлении 100 бар имели утечки,

превышающие 1000 мл/мин. (максимально допустимые значения расходомера).

Выводы

- 1) При использовании в арматуре для сжиженного природного газа новая конструкция уплотнения обеспечивает практически полную герметичность.
- 2) Применительно к арматуре понадобится дополнительная деталь (обечайка).

3) Увеличенная стоимость уплотнения компенсируется упрощенной и недорогостоящей обработкой поверхности в области проходного сечения и упрощенными приемочными испытаниями.

- 4) Чем выше уровень обработки уплотнения и ответной детали, тем лучше уплотняющие характеристики.
- 5) Конструкция уплотнения, тщательное изготовление (в чистом и обеспыленном помещении) и сборка – ключ к успеху.

Редакция выражает благодарность О.Н. Шпакову, техническому эксперту НПАО; Ю.К. Кузьмину, заместителю главного конструктора АО «НПФ «ЦКБА»; С.А. Федину, техническому директору ЗАО «Саратовэнергомашкомплект» за техническое редактирование статьи.