

О некоторых аспектах, определяющих ГЕРМЕТИЧНОСТЬ ШАРОВЫХ КРАНОВ

К.Ю. Зершиков, ООО «Константа-2», г. Волгоград

» Шаровые краны так же, как и другие виды запорной арматуры, имеют основным своим назначением обеспечение герметичности, то есть, согласно [1], «способность арматуры и отдельных ее элементов и соединений препятствовать газовому или жидкостному обмену между разделенными полостями». Таким образом, в общем виде герметичность шарового крана понимается как отсутствие утечек, то есть «проникновения среды из герметизированного изделия под действием перепада давления» [1] через уплотнительное устройство, составляющее его неотъемлемую часть. Согласно имеющимся нормативным документам, герметичность измеряется в единицах объема утечек и, следовательно, оптимальной величиной является нулевая утечка, иначе класс А по ГОСТ Р 54808-2011. Лучшие характеристики герметичности, как и отмечено в ГОСТ, обеспечиваются при использовании «мягких» уплотнений, изготовленных из полимерных материалов или композитов, тогда как в контакте металл по металлу наилучшим является класс В – наличие минимальных утечек, что обозначает невозможность обеспечить такой контакт поверхностей, при котором полностью отсутствуют каналы, через которые среда преодолевает контактную площадку. В дальнейшем будут рассматриваться только уплотнения из полимерных материалов и условия для достижения нулевых утечек.

Заметим, что важно не только разработать конструкцию с нулевыми утечками, но и получить ее с минимальной сложностью конструктивных решений и действующих на уплотнение усилий, при которых достигается заданная герметичность уплотнительного узла. Если исходить из известного конструктивного решения, что имеет место при рассмотрении узла уплотнения пробки шаровых кранов, то эффективность работы уплотнения можно оценить, в частности, величиной усилия, «создающего в сопряжении деталей зону замкнутого непрерывного

контакта по периметру уплотняемых поверхностей» [4] и обеспечивающего нулевую величину утечки в течение всего срока эксплуатации. Чем меньше это усилие, тем эффективнее уплотнительное устройство в целом или уплотнение как его часть, поскольку снижаются ползучесть материала под нагрузкой и другие негативные явления, приводящие к деградации уплотнительного материала и потере уплотнением служебных свойств. Кроме того, уменьшаются усилия, затрачиваемые на управление краном. В результате повышается надежность и долговечность узла. Чтобы разрабатывать уплотнительные узлы, обладающие такими качествами, необходимо установить основные факторы, обуславливающие эффективное использование уплотнения для создания герметичного соединения.

Исследование условий, в которых работает уплотнение в шаровом кране (ШК), и оценку влияния разных факторов на герметичность проводили на установке, изображенной на **рис. 1**. Согласно схеме, на уплотнение действует усилие прессы, которое прижимает его к шару, задавая начальное контактное давление в уплотнении, что наряду с материалом, из которого оно изготовлено, и определяет герметичность соединения. Уплотнение устанавливается в канавку по легкопрессовой посадке, чтобы по возможности исключить пропуск среды между ним и корпусом. После этого подается воздух при минимальном давлении 1 атм, чтобы оценить наличие утечек. Если соединение герметично, то давление ступенчато увеличивается на 1 атм до достижения регламентируемой ГОСТом величины 6 атм. Если в процессе испытания обнаруживается негерметичность, увеличивают усилие прижатия прессы и проверяют герметичность при том же давлении. Таким образом, определяют, при каком усилии или контактном давлении перекрываются каналы утечек в результате пластической деформации материала уплотнения. Помимо оценки герметичности, с помощью

динамометрического ключа определяли момент вращения пробки при различных усилиях. В экспериментах использовалась шар-пробка от серийных ШК из стали 08Х18Н10Т после полировки с шероховатостью (сравнение с эталоном) Ra 0,63 и уплотнения из материалов линейки «Констафтор» различной твердости от 90 по Шор А до 80 ед. по Шор Д.

Чтобы создать зону непрерывного контакта, преодолеть которую среда не может, необходимо устранить каналы утечек, для чего создать напряжения, пластически деформирующие и сминающие неровности сопрягаемых поверхностей. Величиной, которая определяет эти напряжения, является развиваемое в соединении контактное давление, то есть усилие, действующее в контакте, деленное на площадь контакта. Во всех экспериментах при увеличении усилия сжатия уплотнения, растет контактное давление, поскольку площадь контакта неизменна, и интенсивность утечек воздуха снижается вплоть до полного прекращения. Это свидетельствует в пользу утверждения о перекрытии каналов за счет пластической деформации неровностей с ростом контактного давления. Для перекрытия каналов, очевидно, требуется тем большее контактное напряжение, чем прочнее и жестче материал уплотнения. Это подтверждают данные табл. 1, из которой видно, что запирающее напряжение, то есть контактное давление, при котором достигается герметичность, увеличивается с ростом твердости материала уплотнения. В [2] это объясняется тем, что контактное давление должно превысить твердость по Бринеллю $p_c > HB$ – только в этом случае наступает пластическая деформация микронеровностей и они заполняются материалом. То есть рост твердости и прочности приводит к необходимости увеличивать напряжения для смятия неровностей поверхности и перекрытия каналов.

Если уплотнения изготовлены из композиционных материалов, не менее важной причиной снижения уплотняющей способности с ростом твердости могут быть сами частицы наполнителя, которые, являясь дефектами структуры, могут быть источниками образования дополнительных каналов утечек, а как твердые, не деформируемые частицы препятствовать деформации и перекрытию каналов утечек. В наших экспериментах по исследованию герметичности пластиковых ШК показано, что в системе шар из 08Х18Н10Т и уплотнение из фторопласта герметичность при изготовлении седел из Ф-4 достигается при меньших контактных давлениях, чем из Ф-4 со

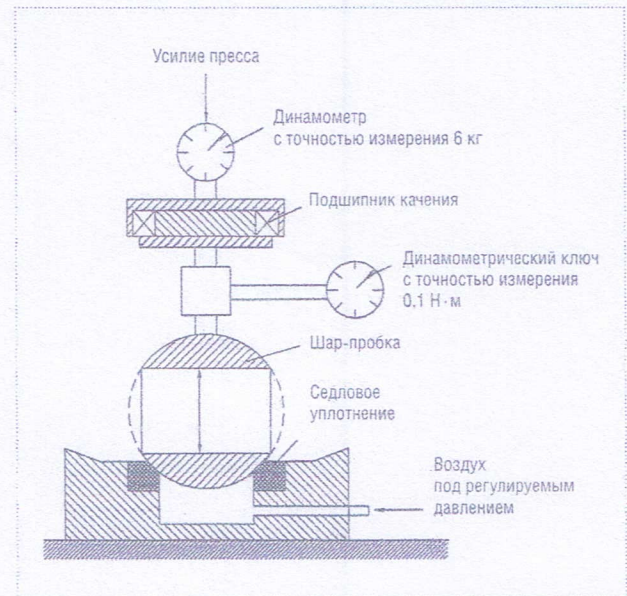


Рис. 1. Схема испытаний уплотнений на герметичность

стекловолокнистым наполнителем. Исследование поверхности уплотнений при увеличении $\times 32$ показало, что до контакта видна бугристая неровная поверхность со следами механической обработки с перепадом примерно 25 мкм, а после нагружения поверхность сглаженная и следы механической обработки практически затерлись или раздавлены. То есть прямыми наблюдениями подтверждается, что причиной протечек является присутствие шероховатости поверхности, и достижение герметичности происходит за счет смятия неровностей и перекрытия каналов, образованных выступами на поверхности.

В [2] показано, что при герметизации стыка уплотнением из эластомеров в канавке на уплотняемых поверхностях создается давление, которое можно описать соотношением $p_c = p_{c0} + sp$, где: p_c – контактное давление, p_{c0} – начальное контактное давление, p – давление среды, s – коэффициент передачи давления на уплотняемые поверхности, для эластомеров $s = 0,98 - 0,99$, поскольку они имеют невысокую твердость. Таким образом, с ростом давления среды растет и контактное давление, а значит достигаются более благоприятные условия для герметизации, то есть реализуется эффект самоуплотнения под действием внешнего давления. Проведенные эксперименты показывают, что с ростом давления испытательной среды – воздуха увеличивается регистрируемое усилие сжатия уплотнения, то есть величина контактного давления, действующего в сопря-

Таблица 1. Влияние твердости на герметичность уплотнений

Материал	Констафтор 300С – композит на основе фторопласта 4 со стекловолокном	Констафтор Пл Д – композит на основе фторопласта Ф-40 со стекловолокном	Констафтор 1000 – композит на основе РЕЕК со стекловолокном
Твердость Шор Д	55	70	80
Запирающее напряжение, МПа	3	6	12

жении (рис. 2). Поскольку седловое уплотнение фактически также находится в канавке, ограниченной поверхностями посадочного места и шара, воздействующее на уплотнение давление приводит к самоуплотнению. В проводимых экспериментах аналогом начального контактного давления служит усилие прижима шара-пробки к седловому уплотнению, деленное на площадь контакта. При приложении внешнего давления p к уплотнению оно ведет себя подобно очень вязкой жидкости, передавая давление кольца на стенки и запирающий орган (в данном случае шар-пробку), определяемое по формуле $\Delta P = kpS$, где: ΔP – прирост усилия, p – давление среды, S – площадь поверхности уплотнения, на которую действует давление, k – коэффициент передачи давления на боковые стенки, который можно положить для пластмасс $k = \mu$, где μ – коэффициент Пуассона, $\mu = 0,35-0,4$, а для резин, как было показано, $k = 0,98-0,99$. Если привести к давлениям, получим формулу, аналогичную приведенной выше для эластомерных уплотнений в канавке, что свидетельствует о реализации эффекта самоуплотнения в уплотнительном узле ШК.

При отсутствии усилия предварительного поджатия уплотнение пропускает воздух, и усилие, передаваемое на шар и, соответственно, на динамометр от давления воздуха, равно произведению давления на площадь, ограниченную диаметром, по которому происходит протечка: либо D_1 , если пропуск между шаром и уплотнением, либо D (рис. 5), если пропуск между уплотнением и корпусом, то есть действует классическая схема расчета усилия, действующего на уплотнение. Причем если при небольших давлениях пропуск наблюдается в основном между уплотнением и корпусом, то с ростом давления воздуха утечка происходит между шаром и уплотнением. Если же к пробке приложено внешнее усилие (аналогом его является усилие предварительного поджатия седла и пробки от пружин), величина которого такова, что протечки в уплотнении полностью исчезают либо очень малы, усилие от давления воздуха на уплотнение, фиксируемое динамометром, вызывает прирост усилия на величину, рассчитываемую по приведенным выше формулам.

На рис. 3 схематично изображены контактирующие с шаром площадки уплотнения с разными углами наклона уплотняющей поверхности к горизонтали и соответствующие углы наклона касательных шара на гранях контакта. Видно, что ширина контакта зависит от соотношения угла наклона уплотняющей поверхности седла и угла наклона касательной шара-пробки – при их несовпадении не достигается вся ширина контакта и присутствует изгиб сечения с соответствующим ростом необходимого для достижения

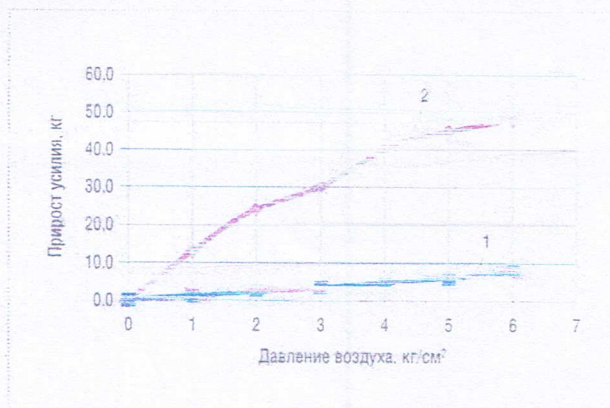


Рис. 2. Изменение усилия сжатия уплотнений из материалов с различной твердостью при увеличении давления: 1 – композит фторопласта с стекловолокном Констанфтор 300С, твердость 55 ед. по Шор Д; 2 – полиуретан твердостью 90 ед. по Шор А

герметичности погонного усилия или контактного давления. Соответственно и герметичность узла достигается при разных усилиях сжатия. Из данных, представленных в табл. 2, видно, что необходимое для обеспечения герметичности усилие тем меньше, чем ближе значения углов седлового уплотнения и шара. При этом после эксперимента на уплотнительной поверхности при увеличении $\times 32$ виден след от вращения шара, ширина которого тем меньше, чем больше различие в углах уплотнения и касательной шара-пробки. Это означает, что фактическое контактное давление выше номинального при увеличении разницы в углах уплотнения и шара, но это не приводит к повышению герметичности стыка, напротив, она снижается. Кроме того, это приводит к отклонению расчетного и фактического напряжения в седловом уплотнении, что может привести к преждевременному выходу его из строя в результате разрушения или пластического течения. Эта схема показывает, что для получения максимальной ширины, а, следовательно, и площади контакта, необходимо правильно подбирать соотноше-

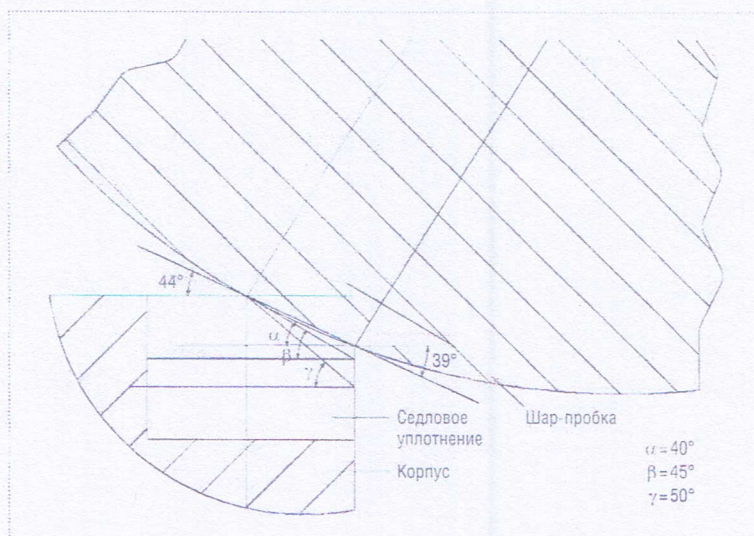


Рис. 3. Схема контакта шара-пробки и седлового уплотнения с разными углами

Таблица 2.

Влияние угла наклона образующей на герметичность шара-пробки и седлового уплотнения из Констафтора 300С, имеющего твердость 55 ед. по Шор Д

Угол наклона образующей уплотнения, град	40	45	50
Усредненный угол наклона касательной шара на границах контакта с седлом, град	39 – 44 / 41,5		
Усилие, при котором соединение герметично, кг	330	490	380

ние диаметра шара и угла наклона образующей уплотнения. Таким образом, для достижения максимального контакта шара с уплотнением необходима согласованность углов наклона контактирующих поверхностей.

Полученные данные показывают, что ширина контактной поверхности неоднозначно влияет на достижение герметичности. С одной стороны, как отмечалось в [2], герметичность растет с ростом ширины уплотняющей поверхности, так как растет путь, который необходимо преодолеть среде через контакт. С другой стороны, контактное давление снижается с ростом ширины при неизменном усилии поджатия, что приводит к снижению герметичности. Необходимо также учитывать, что снижение ширины ниже определенного значения может привести к потере несущей способности уплотнения под нагрузкой с соответствующей потерей герметичности. Таким образом, существует область оптимальных значений ширины контакта, и задача заключается в определении параметров, задающих границы этой области. На рис. 4 показаны зависимости контактного давления герметичности при испытании воздухом от ширины, полученные для седловых уплотнений с различной твердостью. Как и ожидали, увеличение твердости материала уплотнения приводит к необходимости повышать контактное давление для получения герметичности в контакте. Эти данные подтверждают, что увеличение ширины уплотнения позволяет достичь нулевой утечки при меньшем контактном давлении. Тем не менее, определяющим является контактное давление, создаваемое на поверхности шар – седло и чем оно выше, тем выше уплотняющая способность, то есть способность сохранять герметичность при повышенных рабочих характеристиках. Но необходимость повышать контактное давление для увеличения герметичности наталкивается на отмеченное ранее ограничение прочности материала уплотнения, так как возможна текучесть материала под нагрузкой, поэтому выбор материала с большей прочностью позволяет снизить

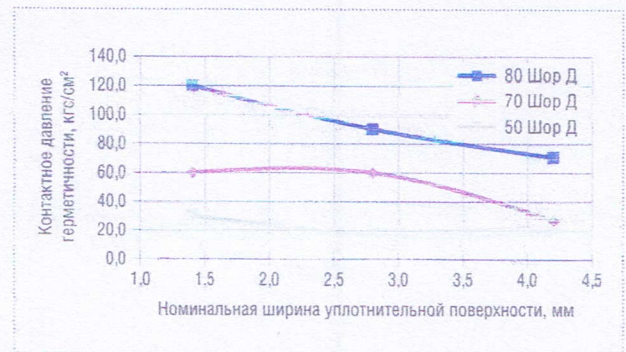


Рис. 4. Зависимость контактного давления, при котором уплотнение герметично от ширины уплотнения и твердости материала

ширину уплотнения, увеличить контактное давление и соответственно поднять рабочие характеристики.

Оптимальной для создания непрерывного контакта является согласованная с формой запорного органа поверхность уплотнения, то есть для контакта с шаром-пробкой уплотнение должно иметь сферическую форму в области контакта. Однако практически уплотнения из фторопласта имеют либо плоскую, либо выпуклую контактную поверхность. Это объясняется тем, что согласно формуле Герца, уже при минимальном давлении происходит переход от контакта по линии к контакту по плоскости. Если предел текучести материала не велик и материал обладает запасом пластичности, то сферическая контактная площадка достаточной для обеспечения герметичности ширины образуется шаром под действием силы, развиваемой давлением среды. Фактически сферическая поверхность образуется штампованием шаром-пробкой соответствующей кривизны. Эта возможность существует для материалов с невысоким пределом текучести, таких как фторопласт, тогда как при эксплуатации уплотнений с высокой твердостью невозможно, при достижимых в процессе эксплуатации давлениях, получить напряжения, достаточные для формования сферы

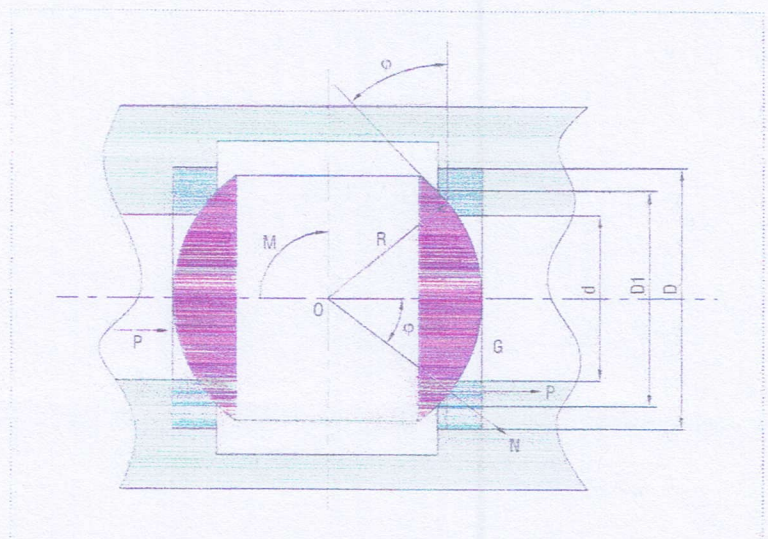


Рис. 5. Схема сил, действующих в шаровом кране

на контактной площадке, поэтому ее получают механической обработкой, а для особо твердых материалов последующей притиркой поверхностей контртел.

Герметичность ШК при небольших давлениях среды обеспечивается, как правило, за счет создания с помощью тех или иных приемов начального контактного давления на сопрягаемых поверхностях. Однако при дальнейшем повышении давления среды контакт может раскрыться и герметичность нарушится. Чтобы этого не произошло, либо начальное контактное давление должно предотвращать раскрытие стыка, либо давление среды должно создавать в контакте дополнительное давление, препятствующее раскрытию, то есть чтобы реализовывался эффект самоуплотнения. Определим условия для реализации эффекта самоуплотнения от внешнего давления, действующего в седловом уплотнении шарового крана с плавающей пробкой.

Предполагая контактную площадку уплотнения плоской (не сферичной) и угол наклона равным φ (рис. 5), определим ее площадь: $S_k = \pi (D_1 + d) / 2 \times (D_1 - d) / 2 \cos \varphi = \pi (D_1^2 - d^2) / 4 \cos \varphi$. Усилие, с которым шар давит на уплотнение – $P = p \pi D_1^2 / 4$, где p – давление среды. Нормальное усилие, действующее в седловом уплотнении, – $N = P \cos \varphi$. Аналогично, касательные напряжения, действующие в уплотнении $G = P \sin \varphi$. Контактное давление на площадке от давления среды – $p_k = N / S_k = p \cos^2 \varphi / (1 - k^2)$, где $k = d / D_1$. Из этого соотношения очевидно следует, что контактное давление тем выше, чем меньше разница между D_1 и d и что прирост контактного давления прямо пропорционален внешнему давлению, а также зависит от угла контакта шара и седла.

Для реализации эффекта самоуплотнения необходимо выполнение условия: $p_k / p > 1$, то есть $\cos^2 \varphi / (1 - k^2) > 1$, то есть $\cos^2 \varphi / (1 - k^2) - 1 > 0$ или $(\cos^2 \varphi + k^2 - 1) / (1 - k^2) > 0$. Это верно, когда $\cos^2 \varphi + k^2 - 1 > 0$ и $1 - k^2 > 0$ или $\cos^2 \varphi + k^2 - 1 < 0$ и $1 - k^2 < 0$. Поскольку $k = d / D_1$, то невозможно, чтобы $k^2 > 1$, следовательно, остается одна система неравенств $k^2 > 1 - \cos^2 \varphi$ и $k^2 < 1$, что равносильно соотношению $(1 - \cos^2 \varphi)^{1/2} < k < 1$.

Следовательно, $p_k / p > 1$ при условии $\sin \varphi < d / D_1 < 1$. Если положить, что $\varphi = 45^\circ$, как чаще всего бывает, то должно выполняться $0,71 D_1 < d < D_1$.

Можно вышеобозначенное условие сформулировать иначе $d < D_1 < d / \sin \varphi$ и для угла $\varphi = 45^\circ$ $d < D_1 < 1,41 d$. Если опираться на чаще задаваемый диаметр условного прохода DN, который, как правило, равен d : DN = d , то чтобы достичь эффекта самоуплотнения, например, для шарового крана DN 50 наружный диаметр уплотнения не должен быть более 70 мм. При изменении угла от $\varphi_{\min} = 40^\circ$ до $\varphi_{\max} = 50^\circ$ условие самоуплотнения будет изменяться от $d < D_1 < 1,56 d$ до $d < D_1 < 1,31 d$, то есть увеличение угла наклона образующей уплотнения позволяет

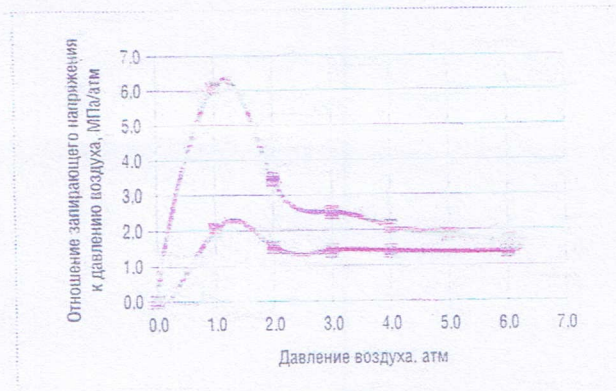


Рис. 6. Зависимость запирающего напряжения, приходящегося на единицу внешнего давления, от давления

уменьшать внешний диаметр уплотнения, что снижает его габариты и приводит к увеличению контактного давления. При этом нельзя забывать, что и шар в месте контактирования с уплотнением должен иметь сопоставимые углы наклона касательных.

Условие прочности материала седла под действием давления среды выражается в сравнении номинального контактного давления с допустимым напряжением при сжатии: $p_k = p \cos^2 \varphi / (1 - k^2) < [\sigma]$. Если принять максимально возможное для достижения самоуплотнения значение $k = 0,7$, то условие прочности при $\varphi = 45^\circ$ запишется в виде $p < [\sigma]$ или с учетом того, что $[\sigma] = \sigma_{сж} / 1,5$ – согласно [3], $p < \sigma_{сж} / 1,5$, где $[\sigma]$ – допустимое напряжение при сжатии, $\sigma_{сж}$ – предел прочности или текучести при сжатии. В общем виде условие сохранения несущей способности седлового уплотнения определяется из соотношения: $p \cos^2 \varphi / [\sigma] < (1 - k^2)$.

На рис. 6 представлена зависимость удельного контактного давления от давления воздуха в системе стальная шар-пробка – уплотнение из Констафтора 300С. Представленная кривая показывает, что запирающее напряжение, отнесенное к давлению, выше при наборе давления воздуха от 1 до 6 атм, чем при снижении давления от 6 до 1 атм, что обозначили как «гистерезис герметичности». Чтобы достичь герметичности уплотнения при 1 атм, надо создать усилие прижатия уплотнения P_1 , которое создает на уплотнительной поверхности шириной b и длиной l контактное давление $\Phi_1 = P_1 / (b \times l)$, затем при увеличении давления среды до 6 атм усилие P_1 и контактное давление Φ_1 остаются практически неизменным. Если не изменяя давления воздуха снижать усилие прижатия, обнаружим, что усилие, при котором сохраняется герметичность $P_2 < P_1$ и, соответственно, контактное давление герметичности при 6 атм $\Phi_2 < \Phi_1$. При дальнейшем снижении давления воздуха до 1 атм снижается и необходимое для обеспечения герметичности усилие P и контактное давление Φ . Но они по-прежнему ниже, чем соответствующие значения, полученные при наборе давления. Тогда как абсолютная величина контактного давления

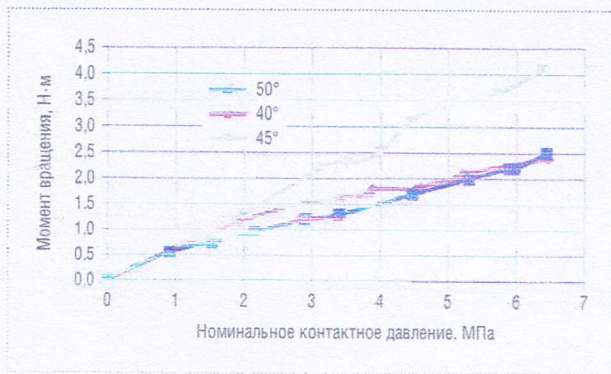


Рис. 7. Зависимость момента вращения пробки от номинального контактного давления для сопряжения пробка 12X18H10T – уплотнение Констафтор 300С при различных соотношениях сопрягаемых углов шара и уплотнения (рис. 3)

практически не меняется с ростом давления воздуха, удельное давление, как видно, снижается с ростом давления воздуха, что свидетельствует об уменьшении энергозатрат для поддержания герметичности в расчете на единицу внешнего давления. Это можно объяснить тем, что при наборе усилия и, значит, контактного давления постепенно перекрываются каналы, по которым идет пропуск среды и после того, как они перекрыты при максимальном давлении, снижение контактного давления уже не приводит к пропуску при этом давлении. Пропуск при данном давлении воздуха начинается уже при меньшем контактном давлении, когда его не хватает, чтобы препятствовать раскрытию каналов давлением воздуха. Это подтверждается и данными о повторном испытании уплотнений. При повторном испытании контактное давление герметичности снижается по отношению к первому испытанию именно в силу смятия неровностей при первом испытании и закупоривания многих каналов.

Наравне с величиной запирающего усилия важным параметром, определяющим добротность уплотнительного узла шарового крана, является момент вращения шпинделя. Как и следовало ожидать, момент растет с увеличением контактного давления и зависит от угла контакта уплотнения с шаром (рис. 7). Это еще раз подтверждает необходимость достижения минимума запирающего напряжения в уплотнительном узле.

Сжатие «мягкого» уплотнения сопровождается последующей релаксацией напряжений. Поэтому важно понимать, снижается ли герметичность и появляются ли пропуски со временем из-за падения усилия или контактного давления в результате релаксации напряжений

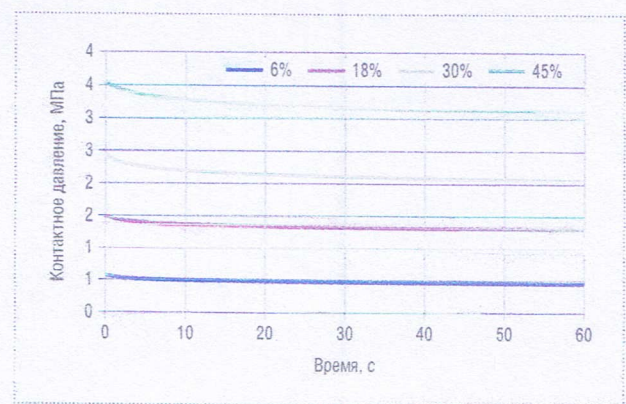


Рис. 8. Релаксация контактного давления в седлах из фторопласта при различной начальной деформации

в уплотнении. На (рис. 8) показаны кривые релаксации напряжения сжатия в уплотнении из «Констафтора 300С» при различных начальных напряжениях. Как видно, закономерность этого явления аналогична релаксации напряжений в полимерных материалах, то есть наличие контактного взаимодействия не меняет протекание процесса. Поскольку утечки вызваны наличием выступов и впадин сопрягаемых поверхностей, которые образуют каналы утечек и которые могут быть перекрыты только посредством их пластического деформирования на определенную величину, то, задав необходимую деформацию, мы обеспечим герметичность и релаксация напряжений, которая сопутствует этой деформации, не должна привести к появлению утечек, что и наблюдается в эксперименте. Важна именно деформация при сжатии сопрягаемых поверхностей, то есть величина сближения поверхностей, которая, безусловно, связана с нагрузкой, поэтому последующая релаксация напряжений не приводит к разгерметизации. Несмотря на то, что величина релаксации напряжений растет с увеличением деформации уплотнения и напряжения в нём, это не приводит к появлению утечек, если соединение герметично или же они постепенно снижаются и прекращаются.

В статье были рассмотрены некоторые из факторов, влияющих на герметичность уплотнений шаровых кранов, и намечены направления для ее повышения. Эти знания позволят с помощью простых технологических и конструктивных приемов создавать работоспособную и надежную конструкцию, что было реализовано при проектировании и изготовлении шаровых кранов из композиционных материалов.

☛ Литература:

1. ГОСТ 33257-2015 Арматура трубопроводная. Методы контроля и испытаний.
2. Голубев А.И., Кондаков Л.А., Гордеев В.В. и др. Уплотнения и уплотнительная техника, Справочник, М.: Машиностроение, 1994.
3. Материалы серии «Констафтор» для уплотнений шаровых кранов. Зерщиков К.Ю., Семенов Ю.В., Кузахметова Е.К. // Арматуростроение, 2014, №4/91. С. 52–56.
4. Макаров Г.В. Уплотнительные устройства, Л.: Машиностроение, 1973. 232 с.