

Шаровые краны для тяжелых условий эксплуатации

Рафаэль Ангелини, Cesare Bonetti SpA, Italy

В статье автор предлагает оригинальный элемент конструкции шарового крана, позволяющий расширить применение последнего для тяжелых условий эксплуатации. Седло крана изготавливается из чередующихся слоев нержавеющей стали и расширенного, а затем спрессованного графита, что позволяет оптимизировать характеристики потока среды в наиболее «износоопасный» момент работы крана: при начале его открытия и при окончании закрытия. Дано теоретическое обоснование соотношению давление/скорость потока в таком кране.

Современное арматуростроение основано на проверенных теориях и получивших широкое распространение экспериментальных данных. Но бывает так, что эксплуатационные требования превосходят возможности типовых конструкций арматуры, и тогда мы можем столкнуться с определенными трудностями. Причем часто проблемы возникают не какие-то специфические, а самые обычные и очевидные: например, в клапане — утечки через затвор либо наружу. Клапан может и не давать таких утечек, находясь в открытом или закрытом состоянии, но в тот момент, когда он заканчивает закрываться, или в самом начале процесса открытия — они возникают. Конечно, такое может произойти лишь в случае тяжелых условий эксплуатации: там, где есть большой перепад давлений, высокие или чересчур низкие температуры и трудности в управлении потоками среды.

◆ Расширить сферу применения

С точки зрения пропускной способности и простоты эксплуатации шаровые краны идеально подходят для самых разных условий. Но принципиально сфера их применения могла бы быть еще шире. Существуют такие условия эксплуатации, при которых применение шаровых кранов теоретически допустимо, но на сегодняшний день ограничено из-за невозможности обеспечения необходимого уровня безопасности. Например, даже когда давления находятся в разрешенном для данного крана диапазоне, большой их перепад в момент открытия крана и/или критические температуры могут вызывать эрозию седла, что приводит к его быстрому разрушению. Подобные условия

характерны для различных рабочих сред в производственных системах — например, для пара в пищевой промышленности, особенно в сыроварении, или для насыщенного пара при производстве резин.

Если бы существовал шаровой кран, способный соответствовать таким рабочим условиям, во многих случаях применять его было бы куда удобнее других типов арматуры. Однако, когда речь идет о тяжелых условиях эксплуатации, арматурщики с подозрением относятся к идее перекрытия потока опасной среды простым поворотом штока на 90 градусов, больше доверяя нескольким поворотам маховика или выходного вала привода. И не без оснований. Следует понимать, что в шаровом кране распределение напряжений/деформаций при его открытии и закрытии оказывает прямое воздействие на затвор, что при предельных нагрузках может вызвать эрозию седла, а тогда, как ни жми рукоятку, как ее ни крути, шаровой кран останется закрытым, но будет негерметичным.

Чтобы преодолеть этот недостаток, требуется конструкция крана, которая обеспечивала бы постоянную и полную герметичность в затворе и относительно внешней среды не только тогда, когда кран длительное время находится в открытом или закрытом состоянии, но и после нескольких циклов открытия-закрытия как при высоких, так и при низких температурах, а главное — после функционирования в условиях длительного дросселирования при большом перепаде давления.

◆ Прокладки и седла

В том аспекте вышеуказанной проблемы, который касается прокладок и седел для шаровых кранов, решение существует. Несколько лет назад была разработана технология, оказавшаяся очень эффективной. Суть ее — в конструкции уплотнительных колец, содержащих чередующиеся слои нержавеющей стали и расширенного (а затем слегка спрессованного) графита. (Нечто аналогичное, видимо, можно применить и для других типов арматуры, работающих в аналогичных условиях).

Проанализируем эту конструкцию.

Перед нами типичный шаровой кран, предназначенный для высоких температур, который имеет два нововведения. Прежде всего: ко-

личество главных элементов конструкции снижено с двух до одного (седло с прокладкой становится единым целым), тогда как вторым новшеством является само седло, представляющее собой структуру, состоящую из чередующихся слоев расширенного графита и нержавеющей стали (см. Рис. 1-4).

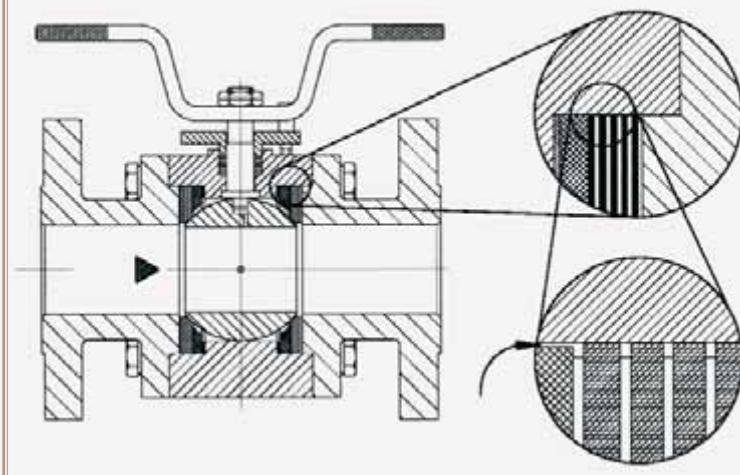
Рассмотрим наиболее предсказуемый аспект нашего анализа – герметичность. Относительно цилиндрической стенки корпуса крана герметичность достигается посредством микрометрического выступа слоев графита над металлическими кольцами (Рис. 1). Стандартный допуск при механообработке корпуса и прокладки в любом случае значительно меньше, чем упругая деформация графита, что обеспечивает его постоянный контакт с пробкой и корпусом арматуры по всей поверхности кольца. И, наконец, присоединительные патрубки (фланцы или другие) не воздействуют на прокладки, так как последние установлены прямо в корпусе. Таким образом, герметичность относительно внешней среды не зависит от степени нагрузки и напряжения от трубопровода и практически независима от колебаний давления и температуры. Сама по себе эта черта не является исключительной, но имеет значение для безопасности, о чем упоминалось выше. Кроме того, особенностью конструкции является уплотнительное кольцо седла арматуры, гарантирующее герметичность.

◆ Давление и скорость

На рис. 2 показано положение пробки шарового крана, при котором в проточной части возникают критические режимы протекания потока, обусловленные возможностью возникновения парообразования жидкости в узком сечении и кавитационного разрушения проточной части.

Рассмотрим конфигурацию потока жидкости, протекающего через «щель» между седлом

Рис. 1. Шаровой кран с многослойными седлами



и пробкой крана (Рис. 3), его движение внутри крана и выход через вторую щель.

Изменение давления и скорости потока по длине проточной части примерно таково:

- небольшое сжатие во входном патрубке;
- возрастание скорости и снижение давления перед входом в отверстие пробки;
- рост давления и снижение скорости потока в сечении между пробкой и седлом;
- увеличение скорости вместе с понижением давления на выходе из отверстия пробки.

Эти явления характерны для центральной части потока среды, но поведение периферийных слоев отличается от характеристик основного потока из-за контакта с элементами седла (см. Рис. 4).

Чередующиеся слои металла и графита оказывают локальное воздействие на поток, заставляя его многократно сжиматься и расширяться, образуя почти неподвижный пограничный слой. Этот феномен особенно важен. Получая возможность расширяться, проходя через входное сечение, или сжиматься на выходе, поток испытывает пульсацию давления, следуя мимо металла и графита. Процесс аналогичен происходящему в многоступенчатом редук-

Рис. 2. Проблемные области шарового крана в тяжелых условиях эксплуатации

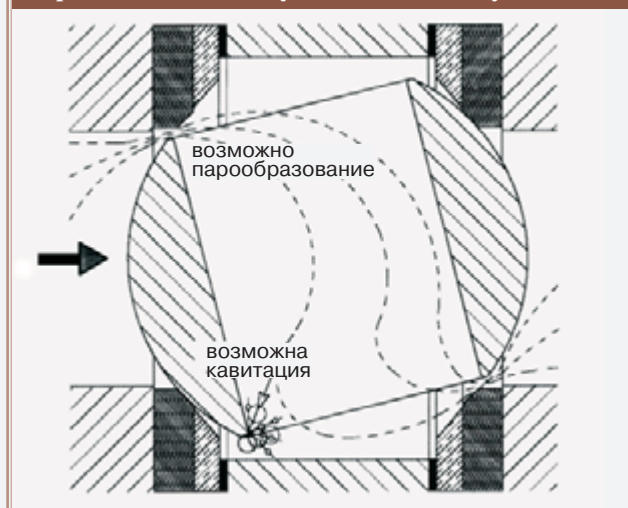


Рис. 3. Протекание среды через щели между седлами и пробкой крана

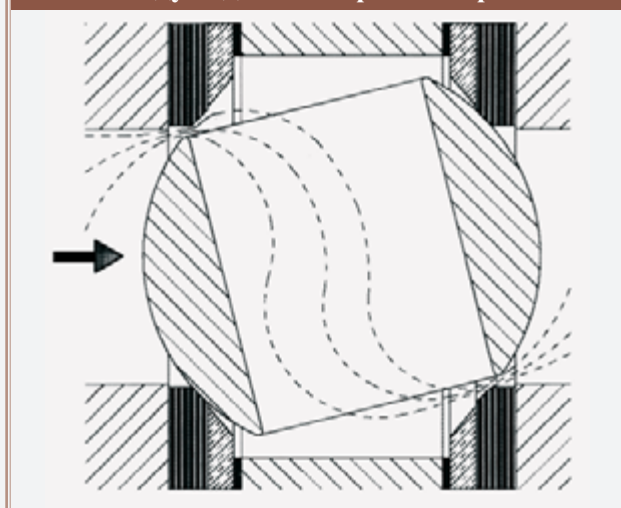
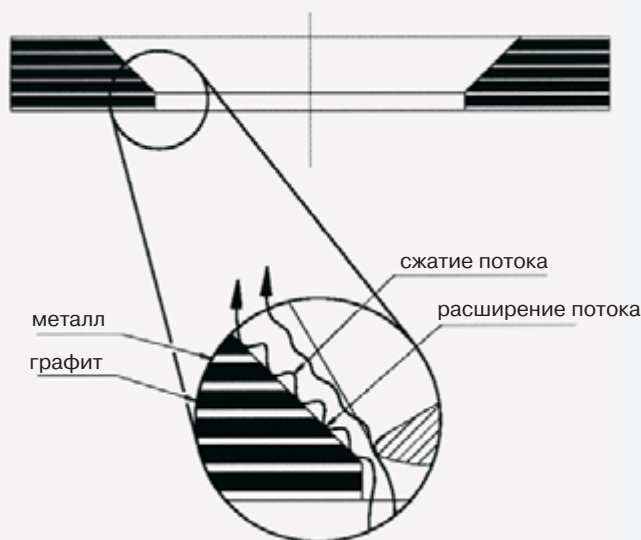


Рис. 4. Взаимодействие потока среды с уплотнительным кольцом



ционном клапане, в нашем случае каждый слой графита воспринимает лишь часть общего перепада давления.

Стоит проанализировать более детально проточную часть. Так как мы имеем дело с эрозией, герметичностью и возможной кавитацией, то полученное по итогам анализа понимание поведения потока несжимаемой жидкости имеет практическое значение. Рассмотрим степень открытия, составляющую один-два процента от общего хода пробки крана, где имеет место сложный процесс протекания рабочей среды, при котором в узком сечении возникает перепад давления больший, чем кавитационный перепад для данной жидкости.

Сравнивая рис. 2 и 3 и обратив внимание на внутренние полости стандартного шарового крана, предназначенного для высоких температур, следует отметить, что обычная траектория слоев жидкости имеет S-образную форму, обусловленную действием центробежных сил и влиянием стенок, формирующих проточную часть. Можно определить область, где может произойти кавитация, задавая конкретные условия для параметров входного потока. На рис. 4 показаны чередующиеся слои графита и металла в седле, которые обладают большей стойкостью к нарушению плавности потока, а центробежная сила практически снижена и сбалансирована. Общий коэффициент восстановления давления также снижен, и существует постепенное изменение перепада давления вдоль стенок прохода шара. S-образный изгиб не очень напряжен, так как высокое давление существует не только внутри, но и снаружи кривой, с наименьшим из возможных давлений кавитации. Это означает, что вероятность кавитации мала (в пределах PN 100 она почти невозможна).

Чтобы понять, как в рассматриваемом кране происходит процесс протекания жидкости, мы

можем проиллюстрировать примерными математическими выкладками основные зависимости между его параметрами.

◆ **Расчет потока жидкости***

Представим себе поток жидкости так, как показано на рис. 5. Тогда мы можем рассчитать каналы в последовательных секциях, имеющих линзообразную форму, ограниченных:

- с одной стороны – поверхностью, образованной внутренней стенкой кольца, затем корпусом крана и полый пробкой шара, вплоть до выходного отверстия;
- с другой стороны – струей жидкости вдоль граничной линии L центрального потока.

Второй канал жидкости может быть расположен следующим образом:

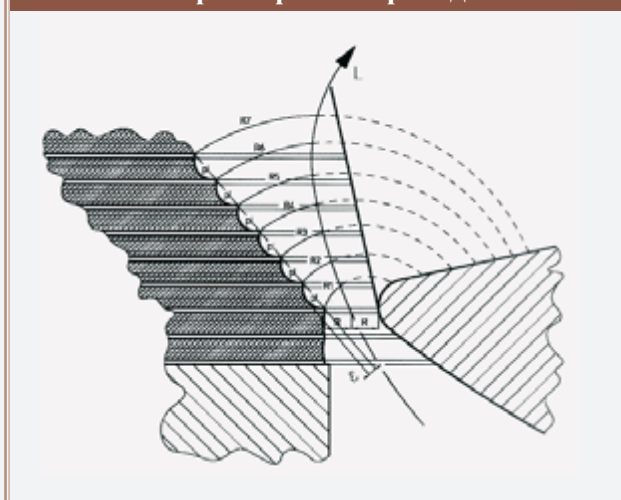
- одна сторона ограничена слоями жидкости граничной линии;
- другая сторона – внутренней стенкой отверстия шара, противоположной предыдущей, затем стенкой корпуса и внешней стенкой другого кольца.

Струи из двух каналов смешиваются в зоне около выхода, повышая турбулентность и усредняя (гомогенизируя) условия во всей секции. Протяженность обоих каналов и их смешение в данной зоне аналогично описанному во входной зоне.

Теперь мы можем рассчитать изменение скорости и давления относительно выходного сечения, рассматривая половину входного отверстия (щели).

Проанализируем кривую давления вблизи внутренней стенки уплотнительного седла корпуса. Если мы возьмем слой металла, который в отличие от графита не деформируется, и предположим, что для графита значения напряжений соответствуют половине предела его

Рис. 5. Процесс течения среды в приоткрытом проходе



* Приведенные далее математические выкладки имеют иллюстративный характер. Полученные в итоге формулы правильно показывают функциональные зависимости, но не могут быть использованы для численных расчетов. Корректный вывод приводит к другому виду формул (Прим. науч. ред.)

текучести, то для струи жидкости получим один большой участок расширения (с последующим сжатием), то есть «треугольник» с вершиной на входе в щель.

Назовем R_i «ширину» слоя, измеренную от периферии до оси потока, в сечениях, определяемых размерами z (толщина пакета, содержащего по одной металлической и графитовой прокладке), R – половина расстояния от прокладки до кромки шара на входе в слой, f – показатель, учитывающий кривизну отклонения оси потока от прямолинейной траектории на начальном отрезке движения. Таким образом, образуется криволинейный треугольник, основанием которого является размер R_i , рассчитываемый по формуле:

$$R_i = (R + fiz)$$

Давление P_i на участках движения потока, соответствующих границам уплотнительных пакетов, без учета упругой деформации графита может быть вычислено так:

$$P_i = \frac{P_1(R_0 + fiz)^2}{R_0^2} \approx \frac{P_1(R_0 + 2fiz)}{R_0} \quad (1)$$

Теперь следует оценить степень местного расширения потока жидкости с учетом глубины деформации графита ε . Из уравнения сплошности, с учетом упомянутой аппроксимации, учитывающей только радиальное расширение потока, взяв скорость w_i жидкости в зоне расположения металлического кольца и скорость ω_i в зоне, соответствующей участкам деформированного графита, мы имеем:

$$\omega_i = w_i \left(\frac{R_i}{R_i + \varepsilon} \right) \approx w_i \frac{R_i - \varepsilon}{R_i};$$

$$\omega_i^2 = w_i^2 - \frac{2w_i^2\varepsilon}{R_i} + \frac{w_i^2\varepsilon^2}{R_i^2}.$$

Считая величину $\frac{\varepsilon}{R_i}$ малой, получаем:

$$w_i^2 - \omega_i^2 = \frac{2\omega_i^2\varepsilon}{R_i}.$$

В соответствии с теоремой Бернулли для идеальной жидкости мы можем написать:

$$\frac{p_i + \omega_i^2 \rho}{2} = P_i + \frac{\omega_i^2 \rho}{2},$$

где p_i – давление в зоне напряженного графита,

ρ – плотность жидкости.

Восстановление давления на участке расширения потока равно:

$$p_i = P_i + \frac{w_i^2 \varepsilon \rho}{R_i}. \quad (2)$$

Поскольку площадь сечения трубопровода намного больше площади входного отверстия, можно допустить, что скорость потока в трубопроводе равна нулю, а соотношение между скоростью потока во входном отверстии w_1 и давлением P_1 описывается выражением:

$$w_1^2 = \frac{P_0 - P_1}{\rho \zeta}.$$

где ζ – коэффициент больше единицы, типичный для участка трубы или фитинга, который принимается в расчетах потери напора по теореме Бернулли.

Внутри криволинейного треугольника скорость будет равна:

$$w_i^2 = \frac{P_0 - P_1}{\rho \zeta (1 + fiz)}. \quad (3)$$

Из выражений (1), (2) и (3) получаем:

$$p_i = P_1 \frac{R_0 + 2fiz}{R_0} \times \left[1 + \frac{\varepsilon (P_0 - P_1)}{P_1 R_0} \right].$$

Отсюда следует, что:

- Восстановление давления внутри прохода не только пропорционально площади сечения проточной части после резкого сужения «щели» (коэффициент

$$\frac{R_0 + 2fiz}{R_0}),$$

когда перепад давления ($P_0 - P_1$) во входном сечении преобразуется в кинетическую энергию, но зависит также от величины

$$\left[1 + \frac{\varepsilon (P_0 - P_1)}{P_1 R_0} \right],$$

которая определяется уровнем деформации графита, и имеет существенное значение в области входного сечения. Причем данная величина растет при росте значения ($P_0 - P_1$) в связи с уменьшением степени открытия.

- Скорость потока вблизи металлических слоев уплотнений снижается по мере их эрозии.

◆ На выходе

При уменьшении сечения проточной части в области выходного отверстия согласно теореме Бернулли увеличивается скорость. Это является причиной постепенного снижения давления. И снова зависимость между снижением давления и увеличением скорости характеризуется частичным восстановлением давления, вызванным расширением площади сечения потока в зоне расположения деформированного графита. Происходящее подобно тому, что было рассчитано выше, но с противоположной тенденцией по мере движения потока. При этом резкие скачки давления ($P_0 - P_1$) и увеличение скорости на выходе из прохода уменьшаются в сравнении с тем, что происходит в седле стандартного шарового крана.

При совместном рассмотрении процессов, происходящих в обоих сечениях, понятно, что если мы поделим пополам значения перепада давления в приведенных формулах, то, поскольку мы имеем дело с жидкостями, также узнаем и скорость на выходе.

Кроме всего прочего, сразу после входа потока в проход шара стабилизируется давление, снижаются скорость и расход жидкости в обоих сечениях на входе и выходе вдоль слоев графита/металла на внутренней стенке седла. Создается некий слой вдоль поверхности металла и графита. Он защищает поверхности от эрозии и обеспечивает продолжительный срок службы седел модернизированного шарового крана, в особенности после длительной эксплуатации.

Следует упомянуть также, что предлагаемая конструкция позволяет снизить требуемый для управления краном крутящий момент, необходимый при очень высоких температурах рабочей среды. Ведь в таких условиях при закрытии крана температура резко меняется, вызывая деформацию металла в конструкции седла. В этом плане применение графита благоприятно из-за его геометрических, химических и механических свойств, т.к. мягкий компонент способен компенсировать напряжения в металлических частях, гарантируя полную герметичность при различных условиях эксплуатации.

◆ Выводы

Итак, мы оценили влияние неблагоприятных факторов в области опорных колец седла на

проблемных периодах открытия и закрытия крана. Явления, которые при этом возникают, могут сделать кран бесполезным даже до возникновения каких либо признаков эрозии. По сравнению с любыми другими шаровыми кранами описанная конструкция для высоких температур имеет ряд преимуществ. Чередующиеся металлические и графитовые кольца содействуют самоочистке, в результате которой окалина практически исчезает с седла. Обеспечивается уровень чистоты, который не может быть достигнут на обычном металлическом седле.

Конкретный пример – применение шаровых кранов на геотермальных паропроводах. Термодинамические внутренние трансформации пара внутри арматуры приводят к образованию твердого осадка, который остается на поверхности седел. Поэтому открытие/закрытие происходят ненадлежащим образом. До применения описанного шарового крана производилась периодическая (каждый месяц) замена арматуры. После установки данный кран отработал более года без техобслуживания.

*Сокращенный перевод с английского Е.П. Михайловой.
Научная редакция – О.Н. Шпаков
при участии Р.А. Азарашвили, Е.Г. Пинаевой.*