

## Исследование диапазона применения «мягких» уплотнений седел шаровых кранов

© А.А. Рязанов<sup>1</sup>, С.К. Королев<sup>2</sup>, А.В. Чернышев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ООО «Инженерная компания Энерпред-Ярдос», Москва, 124527, Россия

<sup>2</sup> СКБ Турбокомпрессорных машин, ПАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе»,  
г. Сумы, 40004, Украина

<sup>3</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*В данной статье приведены результаты исследований диапазона применения уплотнений седел шаровых кранов, выполненных из полимеров, эластомеров и терморезистивных полимеров. Представлены результаты экспериментальных исследований на износостойкость различных материалов уплотнений и их работоспособность в зависимости от давления и температуры рабочей среды, а также конструкции седел (стандартных, итальянской фирмы Gasket и предприятия ООО «ИК Энерпред-Ярдос»). На основе экспериментальных исследований приведены рекомендации по выбору материалов для изготовления уплотнений седел шаровых кранов. Особое внимание уделено вопросам повышения стойкости уплотнений к «взрывной декомпрессии». Для анализа и понимания результатов экспериментальных исследований проведены гидродинамические расчеты течения рабочей среды в проточной полости шарового крана. В основе статьи лежит материал, накопленный авторами на протяжении многолетнего опыта в области расчетно-теоретических исследований, конструирования, производства и эксплуатации запорно-регулирующей арматуры, в том числе шаровых кранов.*

**Ключевые слова:** шаровой кран, уплотнение, полимер, эластомер, седло, износостойкость, работоспособность, экспериментальное исследование, гидродинамический расчет.

«Мягкие» уплотнения получили самое широкое распространение в арматуростроении. Это обусловлено целым рядом преимуществ, среди которых — малая чувствительность этих материалов к перекосам и несоосностям конструкции кранов за счет низкого модуля упругости материалов. Кроме того, «мягкие» уплотнения имеют низкий коэффициент трения.

Вместе с тем уплотнения седел шаровых кранов работают в крайне тяжелых условиях. На уплотнение оказывает воздействие скоростной поток рабочей среды с механическими примесями определенного химического состава и температуры. Уплотнения испытывают напряжения сжатия в закрытом положении крана и изгибные напряжения при открытии крана.

Помимо этого, при повороте пробки шарового крана происходит ее скольжение по уплотнению. Условия скольжения ограничены показателем  $pv$  (произведение удельной нагрузки на скорость скольжения), при превышении которого происходит разрушение материала уплотнения.

Сложным техническим препятствием является адгезия (прилипание) материала уплотнения к пробке шарового крана, особенно при длительном нахождении в том или ином положении (закрытом или открытом), при повышенных температурах и высоких удельных давлениях. Существует много способов решения данной проблемы, но наиболее распространенным является «отрыв», заключающийся в периодическом принудительном переводе пробки шарового крана из одного рабочего положения в другое. Усилие характеризуется удельной работой, необходимой для разделения, или удельной силой разрушения связей — сдвигом, при котором происходит ускоренный износ уплотнений.

Исходя из сказанного, при выборе материала уплотнения шарового крана необходимо учитывать такие физико-механические и химические свойства, как:

- модуль упругости;
- предел прочности при сжатии;
- предел прочности на изгиб;
- предел прочности на сдвиг;
- коэффициент трения покоя и движения по стали;
- адгезионные свойства;
- износостойкость;
- температурный диапазон применения;
- химическая стойкость к рабочим средам.

В большинстве случаев «мягкие» уплотнения шаровых кранов изготавливаются из полимеров. Полимеры (от греч. polymers — состоящий из многих частей) — это высокомолекулярные соединения, содержащие в молекуле большое число чередующихся мономерных звеньев, которые соединены между собой в результате процесса синтеза. Синтез полимеров осуществляется двумя способами: полимеризацией и поликонденсацией. В результате реакции полимеризации получают термопластичные полимеры и эластомеры, а при поликонденсации образуются полиамиды или термореактивные полимеры.

Основные отличия термопластичных полимеров — низкий модуль упругости. Снижение механических характеристик при нагревании, аморфность при определенной температуре. Термореактивные полимеры при нагревании (в рабочем диапазоне температур) не теряют своих свойств, обладают высокими прочностью и теплостойкостью. Обобщенные физико-механические свойства полимеров приведены в табл. 1.

## Обобщенные физико-механические свойства полимеров

Материалы	Предел прочности, кгс/см <sup>2</sup>		Предельная рабочая температура, °С	Предельное значение параметра $pV$ , кгс/см <sup>2</sup> · м/с	Коэффициент трения по стали
	при сжатии	при растяжении			
Термопластичные	110...400	120...400	80...200	0,05...0,1	0,04...0,1
Терморезистивные	900...1500	500...1200	250...300	2...5	0,1...0,4

Наиболее широкое распространение в отечественной шаровой арматуре нашли полимеры, марки и свойства которых приведены в табл. 2; данные по химической стойкости полимеров приведены в табл. 3.

Для выработки рекомендаций по применению материалов уплотнений седел шаровых кранов, работающих в различных условиях, был проведен комплекс экспериментальных и расчетно-теоретических исследований, включающий испытания на износостойкость и работоспособность при разных температурах и давлениях рабочей среды и гидродинамический расчет течения рабочей среды в проточной полости шарового крана.

Экспериментальные исследования проводились на стенде ресурсных испытаний шаровых кранов предприятия ООО «ИК Энерпред-Ярдос». В качестве объекта для экспериментальных исследований был выбран кран шаровой DN 100, PN 160 полнопроходной, седла реверсивные, пробка из стали 40X с покрытием ХТВ 60 твердостью 50 HRC.

**Экспериментальное исследование износостойкости.** При исследовании материала уплотнений на износостойкость для поворота пробки шарового крана был применен пневматический привод VALBIA 140 (Италия). В качестве рабочей среды использована водопесчаная абразивная взвесь. Функцию абразива выполнял кварцевый песок с размером песчинок 2 мм. Содержание песка в рабочей среде — 200 мл на 100 л воды или 0,2% объема системы. Температура рабочей среды  $18 \pm 2$  °С.

Испытания проводились следующим образом. Центробежный насос перегоняет по кругу через шаровой кран водопесчаную взвесь. С помощью пневматического привода пробка шарового крана совершает непрерывные циклы перехода из открытого положения в закрытое и обратно с частотой 0,1 Гц, срабатывания через каждые 100 циклов на полном перепаде при давлении 6,3 МПа; последующий контроль герметичности воздухом осуществляется при давлении воздуха 0,8 МПа. Исследование проводилось до потери герметичности уплотнения седла шарового крана. Критерием потери герметичности является выделение пузырьков воздуха в водяной ванне на выходном патрубке крана (несоответствие герметичности по классу А согласно ГОСТ 54808). Результаты сравнительных исследований различных материалов уплотнений на износостойкость приведены в табл. 4.

Таблица 2

## Марки и механические свойства полимеров

Материал	Рабочая температура эксплуатации, °С	Водопоглощение за 24 ч, %	Коэффициент трения по стали	[ $\sigma$ ] <sub>р</sub> , МПа	[ $\sigma$ ] <sub>сж</sub> , МПа	[ $\sigma$ ] <sub>изг</sub> , МПа	$\rho$ , МПа м/с	Твердость, НВ
Термопласты								
Фторопласт Ф4	-200...+120	0	min 0,04	16...35	11,8	12...18	0,05	2,0
Ф4К20	-60...+200	0,03	0,1...0,3	11,8...14,6	20,8...21,0	13,7...15,7	0,07	4,0
Флубон Ф4УВ15	-60...+270	0,02	0,24	15,5...18	28...32	27...30	0,6	50...60
Флувис 20	-120...+260	0	0,16	20...23	35	—	—	58...68
Ваттens 201, 304, 502	-200...+220	0	0,24...0,30	15,7...24,0	20,8...28,0	21,0...26,0	3,5	45...55
Эластомеры								
Полиуретаны: СКУ-7Л СКУ-ПФЛ-100 Адипрен-Л 167	-20...+80 -40...+80 -60...+107	0	0,1...0,4	23...40	Дю 100	Не разрушается	—	Шор А 95±2 Шор D 48±3
Термореактивные полимеры								
Полиамид 6 Капролон В	-40...+100	Набухание 5%	0,35	70...83	96	105	0,08	Шор D 84
Полиамид 6 маслонеполненный	-40...+110	0	0,19	75	95	95	—	Шор D 83
Маслянит АМСК-112	-40...+100	Набухание до 4%	0,08...0,12	50	150	—	—	12
РЕЕК	-40...+250	0,5	0,11...0,30	97	118	160	—	HRM 94
Полиимид Р1	-40...+300	1,08	0,8	116	—	—	—	—



Таблица 4

**Результаты испытаний уплотнительных материалов  
на износостойкость**

Материал	Количество циклов срабатывания до потери герметичности
Фторопласт Ф4	300
Ф4К20	400
Маслянит	500
Капролон В	700
РЕЕК	800
Полиуретан	35 200

**Экспериментальное исследование на работоспособность.** Для проведения исследований работоспособности использовался электропривод АУМА погт 07.1 (Германия).

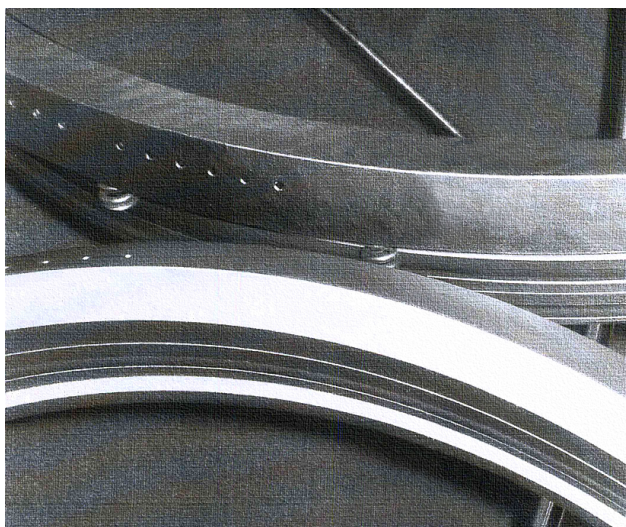
Уплотнения были изготовлены из таких материалов, как фторопласт Ф4, Ф4К20, флубон Ф4УВ15, капролон, флувис 20, полиуретан СКУ-ПФЛ-100. Рабочая среда — вода температурой  $18 \pm 2^\circ\text{C}$  и  $75 \pm 5^\circ\text{C}$  без механических примесей. Испытания проводились следующим образом. Кран открывался на полном перепаде давления по 10 раз с проверкой герметичности на каждом значении давления рабочей среды последовательно при температуре  $18 \pm 2^\circ\text{C}$  и  $75 \pm 5^\circ\text{C}$ . Давление рабочей среды повышалось, начиная с 1,6 мПа дискретно согласно типовому ряду номинальных давлений, т. е. 1,6, 2,5, 4,0, 6,3, 10,0, 16,0, 20,0, 25,0, 32,0. Исследования для каждого материала уплотнений заканчивались при потере герметичности шарового крана и результаты фиксировались (см. рис. 1). Методика проверки герметичности и критерий потери герметичности шарового крана те же, что и при исследовании износостойкости.

Графики строились по двум точкам: при 20 и 75 °С. При температуре ниже 20 °С механические характеристики полимеров ухудшиться не могут, поэтому принимаем, что они не изменятся. При температуре, близкой к 0 °С и ниже, испытания проводились без рабочей среды. Эксплуатация шаровых кранов предполагает, что температура окружающей среды, а следовательно, и температура элементов конструкции крана, может достигать  $-60^\circ\text{C}$ . С увеличением температуры прочностные характеристики материала ухудшаются. Принимаем, что в данном диапазоне температур это падение носит линейный характер.

Исследования проводились на трех типах конструкций седел.

1. Седло подвижное, прямое, стандартное. Уплотнения запрессовывались методом охлаждения — сплошная линия (см. рис. 1). Физика разрушения описана в работе [7].

2. Седло конструкции фирмы Gasket. Для повышения диапазона применения «мягких» уплотнений и повышения стойкости к «взрывной декомпрессии» итальянская фирма Gasket предложила конструкцию седла, предотвращающую данное явление (рис. 2). В боковой поверхности седла сверлят отверстия почти в основании паза в седле под уплотнение. При сборке крана седло ориентируют так, чтобы отверстия в седле располагались в зоне открытия в горизонтальной плоскости.



**Рис. 2.** Конструкция седла шарового крана производства фирмы Gasket

Принцип действия данной конструкции следующий. При открытии крана высвобождается сегмент уплотнения, который под действием силы, создаваемой перепадом давления рабочей среды, начинает изгибаться. И как только открываются боковые отверстия в седле, рабочая среда сбрасывается из под уплотнения и изгиб прекращается. Далее сферической пробкой уплотнение возвращается на место.

Проведенный комплекс испытаний показал увеличение диапазона применения уплотнений по сравнению со стандартным седлом на 10...15 %.

3. Разъемная конструкция седла. Для кардинального решения вопроса, т.е. исключения явления «взрывной декомпрессии», предлагается применять разъемное седло, в котором уплотнение сжимается, предотвращая тем самым попадание среды под уплотнение. Проведенные испытания показали правильность предположений — диапазон применения уплотнений увеличился, по сравнению со стандартным седлом, в 2–3 раза (см. рис. 1, пунктирные линии). Тем не менее, происходит потеря герметичности из-за «размазывания» материала уплотнения по седлу в диапазоне угла открывания  $\sim 20^\circ$ ; тем самым разрушается линия контакта со сферической поверхностью пробки.

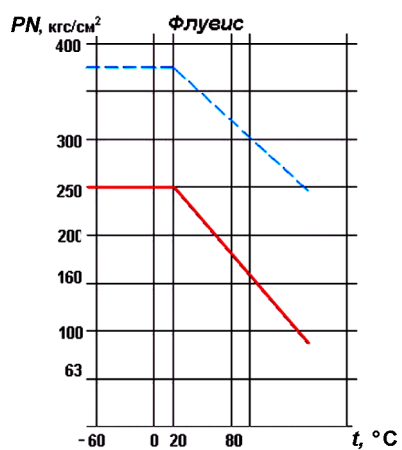
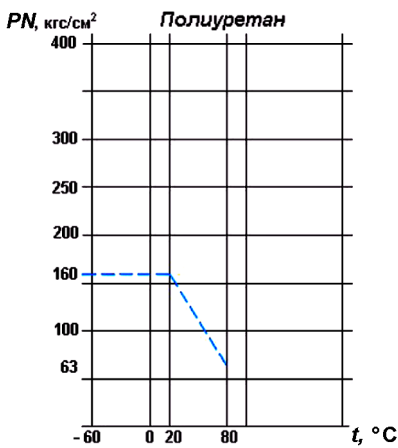
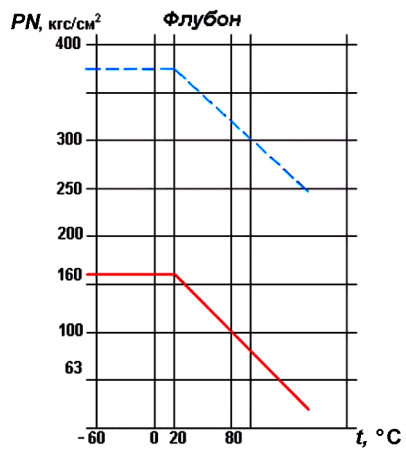
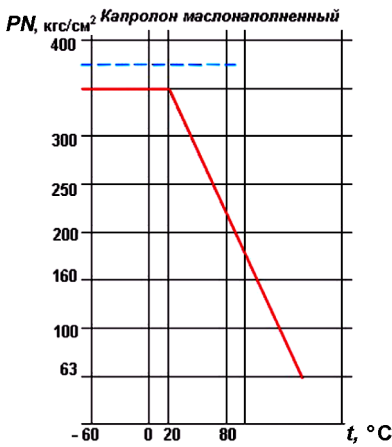
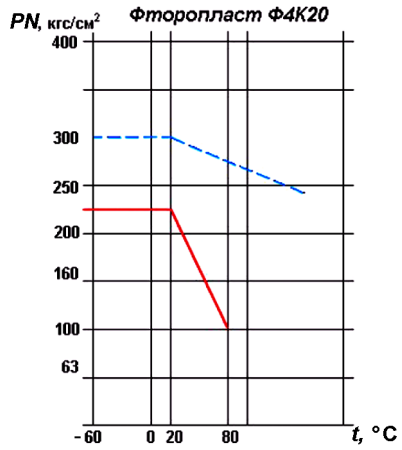
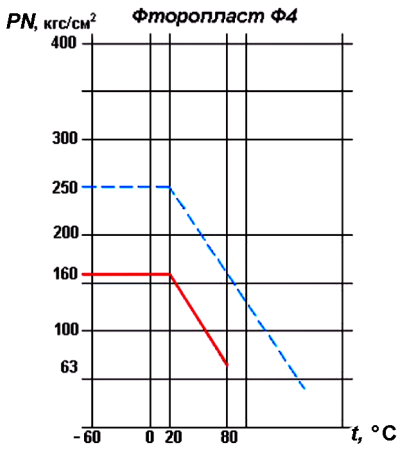


Рис. 1. Результаты испытаний различных материалов уплотнений



Для понимания этого явления и установления предела применимости «мягких» уплотнений проведены расчетно-теоретические исследования течения среды через проточную полость шарового крана.

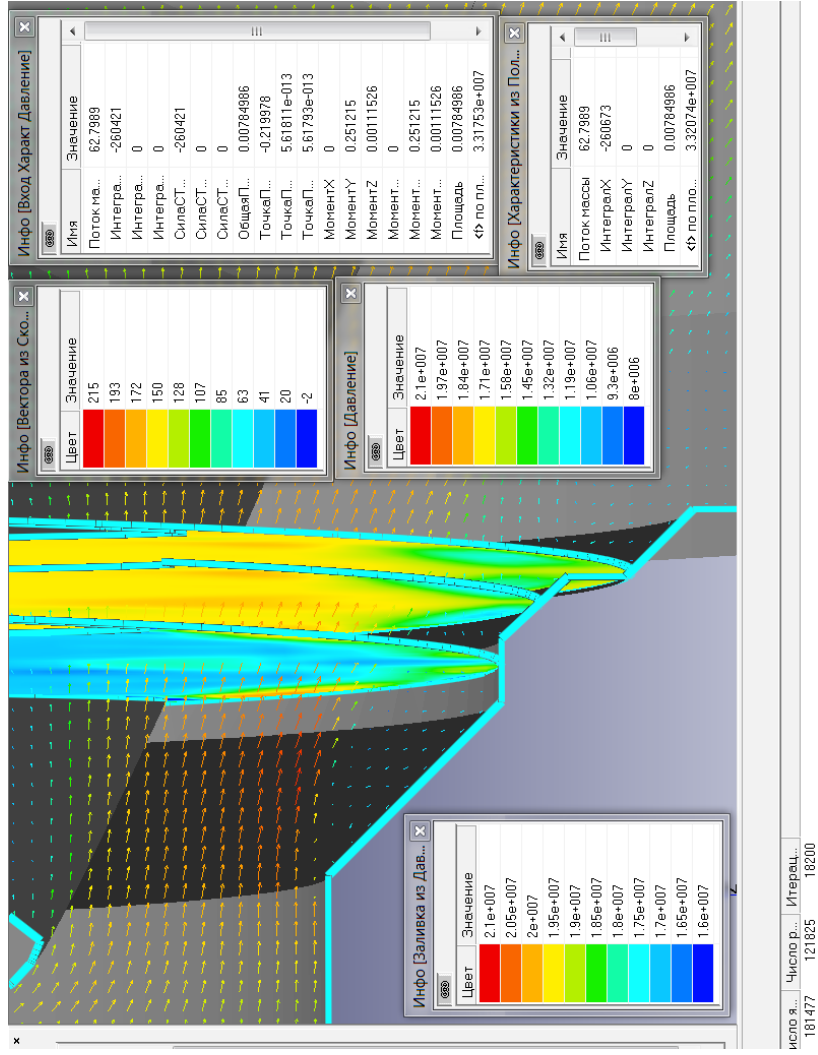
**Расчетно-теоретические исследования.** Разработана математическая модель течения рабочей среды в проточной полости шарового крана и проведены расчеты с помощью программного продукта Flow Vision (FV).

Проводились численные исследования течения рабочей среды в проточной полости крана при угле открытия пробки  $23^\circ$ . Задача решалась в трехмерной нестационарной постановке. Математическая модель строилась при допущении, что рабочей средой является несжимаемая жидкость с использованием модели  $k-\varepsilon$  турбулентности. Задавался постоянный шаг по времени: на этапах разгона решения — 0,01 с, а при уточнении решения шаг последовательно уменьшался до 0,0025 с. Граничные условия: «вход» — нормальная скорость; «выход» — свободный выход, нулевое давление. Опорные величины: давление — 1 013 235 Па (нормальное); температура — 273,15 К. В расчете использовали (задаются и выводятся) избыточные величины давления по отношению к опорному.

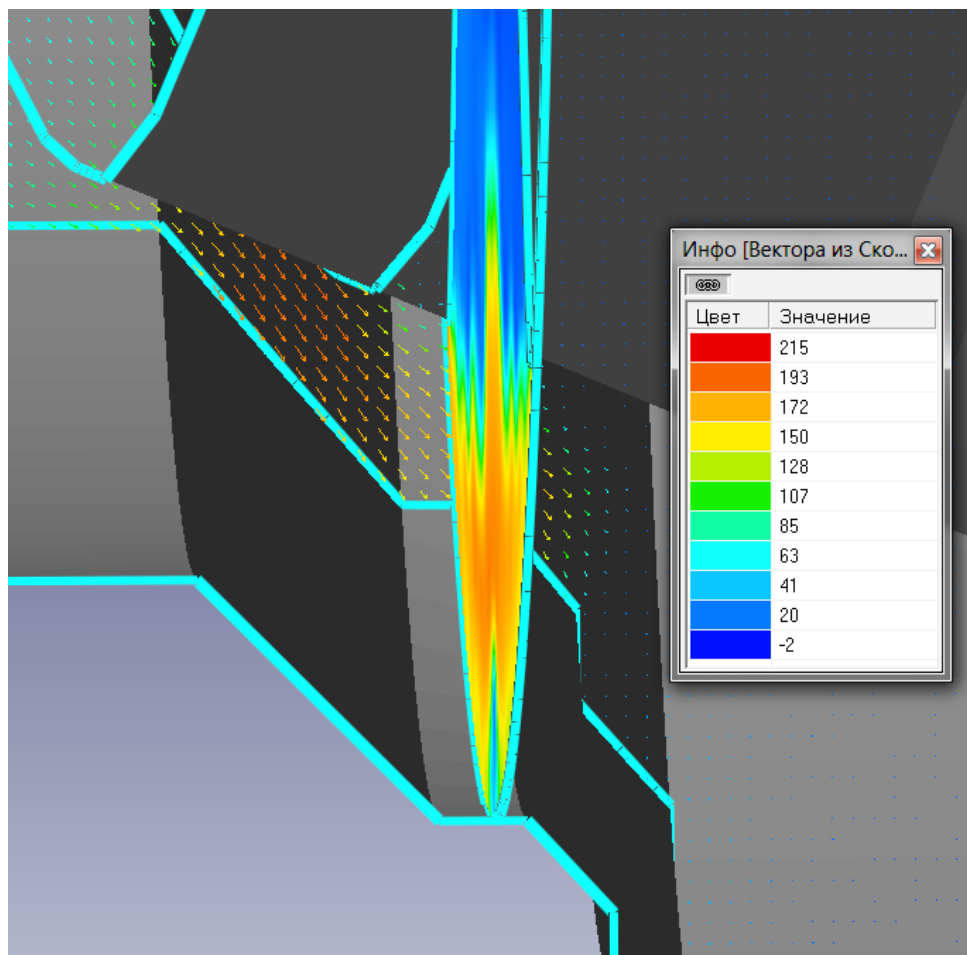
С целью более детального и точного исследования воздействия потока на переднее уплотнение проведены уточняющие расчеты с разрешением течения в зоне уплотнения путем адаптации (сгущением) сетки до четвертого уровня в области уплотнения. При этом шаг по времени уменьшался до 0,001 с.

На рис. 3 показаны результаты расчета в виде векторов скорости в продольной срединной плоскости и заливок давления в сечениях по переднему уплотнению, там же отображены информационные окна с интегральными характеристиками давления и полного давления на входе. Сечения по уплотнению проходят через поверхности, выступающие из заделки части уплотнения: фронтальную, рабочую и тыльную (см. рис. 3). Это позволяет оценить воздействие потока на каждую из них в виде распределения скорости и давления. В результате расчета при скорости на входе 8 м/с получены величины статического давления и полного давления на входе  $\sim 33,18$  и  $\sim 33,21$  мПа соответственно при расходе рабочей среды 62,8 кг/с.

В итоге расчетно-теоретических исследований установлено, что в срединной зоне поток не стабилен. Периодически происходит то его отрыв, и он отходит от уплотнения, как это показано на рис. 3, то его прижатие к уплотнению. В зоне краев дуги уплотнения поток стабильный и непосредственно воздействует на уплотнение скоростным напором (рис. 4). При этом давление на уплотнение в этих местах из-за торможения потока достигает 19 мПа, а скорость на рабочей поверхности — 190 м/с. За тыльной стороной уплотнения наблюдается зона отрыва.



**Рис. 3.** Векторы скорости в продольной срединной плоскости и заливка давления в сечениях по переднему уплотнению

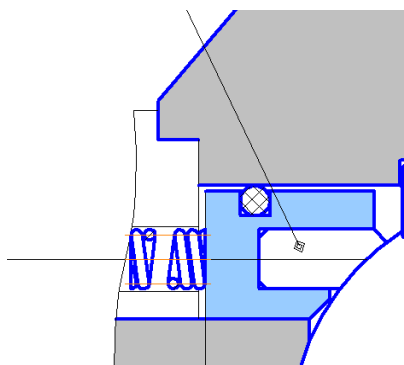


**Рис. 4.** Векторы скорости в плоскости, смещенной к краю дуги уплотнения, и заливка скорости по сечению уплотнения

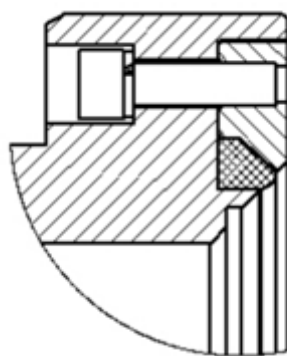
Непосредственно на рабочей поверхности уплотнения давление местами падает до 9 мПа, а скорость достигает 200 м/с. Если рассматривать только тонкий слой, контактирующий с уплотнением, то здесь скорость ниже — 165 м/с. Такая величина скорости обуславливает высокую вероятность гидромеханического износа рабочей поверхности уплотнения, что является причиной «размазывания» «мягкого» уплотнения.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

При использовании конструкции стандартного седла (рис. 5) диапазон применения полимеров показан на рис. 1 сплошными линиями. Размеры уплотнений для конкретных условий эксплуатации DN, PN и температуру рабочей среды можно определить по методике, изложенной в работе [7]. Эластомеры в стандартных седлах не должны



**Рис. 5.** Шаровой кран со стандартным седлом



**Рис.6.** Шаровой кран с разъемным седлом

применяться. При использовании конструкции разъемного седла (рис. 6) диапазон применения полимеров расширяется в 2–3 раза (показан на рис. 1 пунктирными линиями). Дальнейшее расширение диапазона применения полимеров ограничено гидроаэродинамическими явлениями, разрушающими полимерные уплотнения. Термопласты превосходят другие полимеры по химической стойкости и коэффициенту трения, но чувствительны к механическим примесям. Эластомеры на порядок превосходят другие полимеры по износостойкости, но проигрывают по температурному диапазону применения и коэффициенту трения. Терморреактивные полимеры обладают наиболее высокими эксплуатационными свойствами при высоких давлениях и температурах рабочей среды.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Башта Т.М. *Машиностроительная гидравлика*. Москва, Машиностроение, 1971, 672 с.
- [2] Болтон У. *Конструкционные материалы: металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты: Карманный справочник*. Москва, Издательский дом «Додека-XXI», 2004, 320 с.
- [3] Кацнельсон М.Ю., Балаев Г.А. *Полимерные материалы. Справочник*. Ленинград, Химия, 1982, 317 с.
- [4] Кауш Г. *Разрушение полимеров*. Москва, Мир, 1981, 440 с.
- [5] Логинов Б.А. *Удивительный мир фторполимеров*. 2-е изд., доп. Москва, ООО «Девятый элемент», 2008, 168 с.
- [6] Продан В.Д. и др. *Разъемные соединения в фторопластовыми уплотнениями. Справочник*. Продан В.Д., ред. Москва, Тривола, 1995, 180 с.
- [7] Рязанов А.А. Исследование явления «взрывной декомпрессии» в шаровых кранах. Москва, *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение»*. 2012.
- [8] *Уплотнение и уплотнительная техника: Справочник*. Голубев А.И., Кондаков Л.А., ред. Москва, Машиностроение, 1986, 464 с.

- [9] Уорд И. *Механические свойства твердых полимеров*. Москва, Химия, 1975, 350 с.
- [10] Чичинадзе А.В. и др. *Полимеры в узлах трения машин и приборов*. Справочник. Чичинадзе. А.В., ред. 2-ое изд., перераб. и доп. Москва, Машиностроение, 1988, 328 с.
- [11] Шпаков О.Н. *Трубопроводная арматура. Справочник специалиста*. Санкт-Петербург—Москва, ООО «Информационно-издательский центр КХТ», 2007, 464 с.
- [12] *Gasket International. Components for floating ball valves. Production program.*
- [13] Norsok M710. *Qualification of non-metallic sealing materials and manufacturers.*

Статья поступила в редакцию 31.05.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Рязанов А.А., Королев С.К., Чернышев А.В. Исследование диапазона применения «мягких» уплотнений седел шаровых кранов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 5. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/758.html>

**Рязанов Александр Александрович** окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, главный конструктор ООО «Инженерная компания Энерпред-Ярдос». Автор более 40 печатных работ. Область научных интересов: расчет и исследование рабочих процессов в запорно-регулирующей арматуре, проектирование и производство трубопроводной арматуры.

**Королёв Сергей Константинович** родился в 1949 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1977 г. по специальности «Летательные аппараты». Старший научный сотрудник в СКБ Турбокомпрессорных машин (СКБ ТКМ) ПАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе» (Украина, г. Сумы). Область научных интересов: исследования турбомашин и запорно-регулирующей арматуры с использованием программных сред вычислительной гидроаэродинамики.

**Чернышев Андрей Владимирович** родился в 1952 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1975 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области математического моделирования и исследования рабочих процессов, разработки и проектирования вакуумного и элек-тропневматического оборудования различного назначения. e-mail: [av-chernyshev@yandex.ru](mailto:av-chernyshev@yandex.ru)