

# Повышение ресурса сильфонов

## для обеспечения безопасности трубопроводной арматуры атомных электростанций и атомного флота

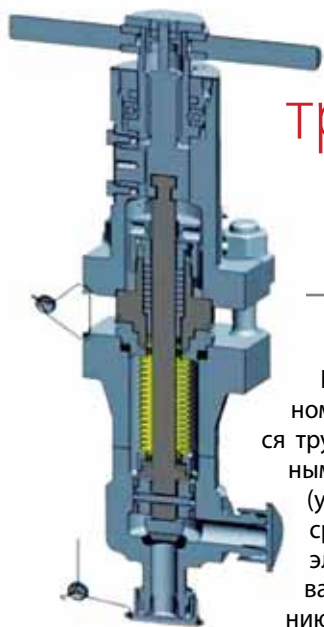


Рис. 1. Судовой запорный сильфонный клапан

На атомных электростанциях и атомном флоте России широко используется трубопроводная арматура с сильфонным уплотнением подвижных деталей (узлов) относительно окружающей среды (рис. 1). Одним из основных элементов этой арматуры, обеспечивающим ее герметичность по отношению к внешней среде, является сильфон.

Основное назначение сильфона — обеспечить герметичность арматуры относительно внешней среды по шпинделю (штоку), не препятствуя осевому перемещению ходовой части клапана при совершении хода.

Номенклатура многослойных сильфонов приведена в ГОСТ 21744–83 «Сильфоны многослойные металлические. Общие технические условия» [1]. Этот стандарт распространяется на многослойные металлические сильфоны, предназначенные для работы в качестве разделителей сред, уплотнительных элементов, а также элементов силового узла в средах, не вызывающих коррозии материалов, из которых изготовлен сильфон, при рабочем давлении ( $P_{\text{раб}}$ ) до 30,0 МПа, температуре от минус 260 °С до плюс 550 °С.

В применяемых конструкциях сильфонной арматуры на наружную поверхность сильфонов воздействует рабочая среда — радиоактивная вода первого контура. В качестве рабочей среды используется также жидко-металлический теплоноситель (Na).

В настоящее время в документации на сильфонную арматуру оговорен назначенный ресурс ( $N_{\text{наз}}$ ), равный 3000 циклов. Под циклом понимается сжатие-растяжение сильфона в процессе совершения хода клапаном при его открытии-закрытии. За отказ сильфона принимается потеря герметичности многослойной оболочки по отношению к внешней среде, т. е. полное разрушение всех слоев сильфона.

Для решения проблемы обеспечения требуемого ресурса необходимо иметь представление о механизме разрушения сильфона.

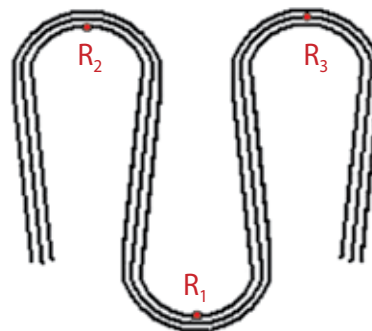
Проиллюстрируем возможные механизмы разрушения на трехслойном сильфоне. Известны следующие модели разрушения сильфонов:

### Модель разрушения 1 (типовая)

Известно, что разрушение гофрированной оболочки сильфона в процессе его эксплуатации происходит в местах наибольших концентраций напряжений. Для рассматриваемой нами схемы нагружения — одновременного воздействия

■ Ю. И. Тарасьев, В. В. Ширяев, ЗАО «НПФ «ЦКБА», Санкт-Петербург

на многослойную оболочку осевого перемещения (сжатия-растяжения) и наружного давления при превалировании напряжений от осевого перемещения — местами наибольших концентраций напряжений являются зоны гофров с наименьшими радиусами (рис. 2). Из рисунка 2 видно, что наименьшие радиусы имеют впадина первого наружного слоя и выступ третьего внутреннего слоя. Очевидно, что второй промежуточный слой находится в более благоприятных условиях по напряженному состоянию, связанному с его геометрией. По имеющемуся опыту, прежде всего, следует ожидать разрушение первого наружного слоя, находящегося со стороны воздействия рабочего давления. После этого рабочая среда проникнет через образовавшуюся трещину в первом наружном слое в пространство между первым и вторым слоями, и сильфон будет работать как двухслойный. Следующим разрушается третий внутренний слой. При этом сильфон будет по-прежнему работать как двухслойный, поскольку разрушение третьего внутреннего слоя никоим образом не отразится на работе сильфона. Второй внутренний слой, сохраняя свою сплошность и, значит, герметичность сильфона в целом, будет функционировать, опираясь на третий внутренний. Ресурс сильфона будет определяться моментом первичного разрушения второго промежуточного слоя в независимости от того, какое количество разрушений претерпели к этому моменту остальные два слоя. Практика показывает, что при такой модели разрушения сильфон вырабатывает максимальный ресурс, а его выход из строя (разгерметизация) будет носить плавный характер: течь через сильфон будет



$R_1, R_2, R_3$  — наименьшие радиусы  
x — места наиболее вероятного разрушения сильфона при заданной схеме его нагружения

Рис. 2. Модель разрушения 1 (типовая)

минимальной, увеличивающейся по мере дальнейшей наработки циклов и, связанным с нею, возникновением новых мест разрушения всех трех слоев сильфона.

### Модель разрушения 2

Эта модель встречается намного реже и сводится к тому, что первоначально разрушаются в любой последовательности первый наружный и второй промежуточный слои. Как правило, это связано с наличием производственных дефектов в указанных слоях. В этом случае, после разрушения двух слоев, под воздействием рабочего давления окажется единственный оставшийся сплошным третий внутренний слой. Поскольку один этот слой не рассчитан на воздействие полного давления, то схема его нагружения будет характеризоваться превалированием напряжений от этого давления. Разрушение третьего внутреннего слоя, в этом случае, следует ожидать не по выступу гофра, как это происходит при первой модели, а по впадине гофра. При этом разрушение будет мгновенным, оно будет характеризоваться разрывом оболочки и сопровождаться залповым выбросом большого количества рабочей среды (рис. 3 и 4).

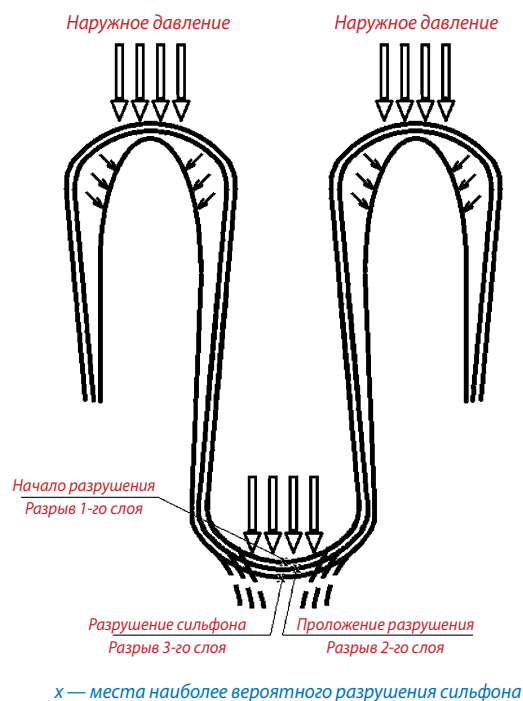


Рис. 3. Модель разрушения 2 (нетиповая)



Рис. 4. Сильфон, разрушенный по модели 2 (нетиповая)

При такой модели разрушения ресурс сильфона будет определяться моментом разрушения второго промежуточного и третьего внутреннего слоев, и, как правило, будет существенно ниже, чем при первой модели разрушения. Долговечность третьего внутреннего слоя, как и в первой модели разрушения, практически не определяет ресурса сильфона. Описанная модель характерна для раннего разрушения сильфона.

Многослойный сильфон считается работоспособным, если остается не разрушенным хотя бы один из его слоев, поскольку, согласно [1], под отказом сильфона понимают разгерметизацию наружной полости сильфона относительно внутренней.

Крайне важной представляется проблема обеспечения надежной работы сильфона в условиях гидравлических испытаний пробным давлением. В настоящее время допускается проведение в течение назначенного ресурса 20 опрессовок давлением до 1,5Р<sub>раб.</sub> (для арматуры атомных электростанций) и 40 опрессовок (для ряда объектов атомного флота).

Исследование характера послойного разрушения многослойной оболочки сильфона, с учетом проводимых гидроопрессовок, является одним из важных направлений повышения надежности многослойных сильфонов. Результаты исследования позволяют выяснить роль каждого из слоев в общей долговечности сильфона и, особенно, наружного слоя, как контактирующего с рабочей средой.

Сопоставление нагрузок, действующих на сильфон при цикловом воздействии (сжатии-растяжении сильфона при рабочем давлении) и при гидроиспытаниях, показало, что, при условии целостности всех нагружаемых слоев сильфона, напряжения, возникающие при наработке ресурса, на порядок превышают напряжения при гидроопрессовках. Зависимость ресурса сильфона до полного разрушения от числа опрессовок сильфона с не разрушенными слоями (до начала наработки ресурса) представлена на рис. 5.

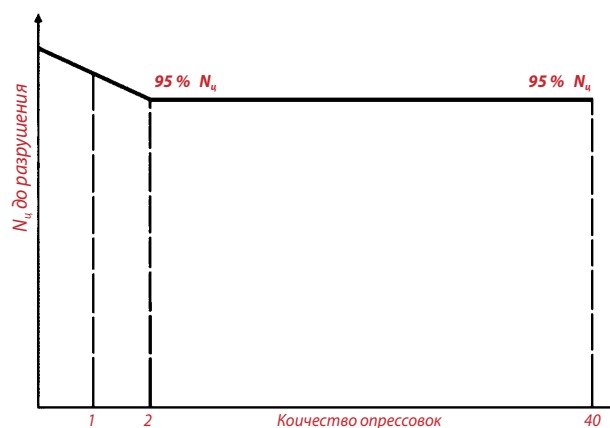


Рис. 5. Влияние ГИ на сильфон с неразрушенными слоями (до начала испытаний на ресурс)

Из этой зависимости следует, что при условии целостности всех слоев сильфона и достаточных прочностных свойствах, при совершении 40 гидроиспытаний — имеет место малоцикловая нагрузка на сильфон, не выводящая его за пределы упругих деформаций и не оказывающая существенного влияния на его ресурс до полного разрушения. Ход сильфона, давление и температура рабочей среды при цикловом нагружении совместно оказывают значительно большее влияние на ресурс сильфона, чем количество гидроиспытаний.

Рассмотрим более подробно, на примере шестислойного сиффона, связь между началом разрушения сиффона и его наработкой до полного разрушения.

ЗАО «НПФ «ЦКБА» были проведены исследования по возможности проведения 40 гидроопрессовок шестислойных сиффонов за полные назначенный ресурс арматуры. В результате исследований установлено, что при наработке ресурса сиффоном разрушение первого наружного слоя сиффона наиболее вероятно в пределах 35 % от полного ресурса и второго слоя, следующего за первым наружным, — в пределах 50 % от полного ресурса (рис. 6).

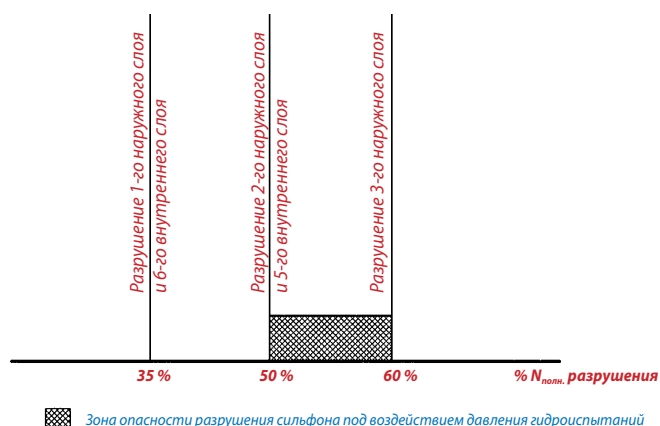


Рис. 6. Последовательность разрушения слоев сиффона в процессе наработки ресурса

После разрушения первого слоя шестислойный сиффон становится как бы пятислойным, обладающим прочностными свойствами, отличающимися от свойств шестислойного сиффона. Гидроиспытания давлением, выбранным для шестислойного сиффона, будут воздействовать на пять слоев сиффона. Если разрушено два и более слоя, следующих за первым наружным слоем, то даже одна гидроопрессовка, в независимости от ее порядкового номера, может вызвать полное разрушение сиффона. При этом если оставшиеся слои в момент разрушения наружных слоев, сохранили свою целостность, то разрушение сиффона произойдет по второй модели, и будет сопровождаться залповым выбросом рабочей среды.

Таким образом, существует реальная опасность разрушения сиффона под воздействием гидроопрессовок в пределах назначенного ресурса (3000 циклов), в случае если полный ресурс сиффона не будет превышать назначенный в два раза и более.

Отметим, что такой вид разрушения возможен и под воздействием рабочего давления, но принимая во внимание, что это давление, примерно в 1,5 раза ниже давления гидроопрессовки, для «залпового» разрушения сиффона потребуется разрушение большего количества слоев, следующих за первым наружным слоем, при сохранении целостности внутренних слоев. Как правило, к моменту разрушения 1—3-го слоев уже имеет место разрушение 5—6-го слоев, и мы имеем дело с первой моделью разрушения сиффона.

На рис. 7 представлена связь интенсивности (частоты) наработок сиффонов до полного разрушения —  $\lambda$  (вероятности наработки —  $\alpha$ ) и величин этих наработок. Зависимость характеризуется нормальным законом распределения. Величина назначенного ресурса определяется как минимальное значение на-

работки до полного разрушения с заданной интенсивностью (вероятностью).

В настоящее время нормативными документами (НП-068 «Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования» [2]) предусматривается при приемосдаточных испытаниях на предприятии-изготовителе проведение 20 (40) гидроопрессовок на сиффонах случайной выборки из предъявляемой партии в количестве 3 % от партии, но не менее 2 и не более 5 сиффонов. Гидроопрессовку проводят до проведения ресурсных испытаний, т. е. на сиффонах с цельными слоями, после чего подвергают сиффоны выборки испытаниям на ресурс. Годной признается партия, у которой сиффоны случайной выборки не разрушились при наработке не менее назначенного ресурса (3000 циклов). Такой порядок испытаний не отвечает на вопрос, чему равен ресурс сиффонов до полного разрушения, с учетом будущих гидроопрессовок в процессе наработки циклов, и тем самым годными признаются сиффоны, полный ресурс которых может составить величину менее 3500—6000 циклов. В этом случае можно ожидать разрушение первых двух слоев сиффона в пределах 1500—3000 циклов со всеми вытекающими последствиями.

Для обеспечения надежной работы сиффона в условиях гидроопрессовок представляется необходимым существенным образом изменить порядок приемосдаточных испытаний, в т. ч. установить сдаточный параметр наработки без полного разрушения (в 2,0—2,5 раза больше назначенного ресурса), что обеспечит целостность слоев сиффона в пределах назначенного ресурса.

Полученные результаты исследований позволили сделать вывод, что гидравлические испытания сиффона пробным давлением, при условии целостности всех его слоев, не влияют на его ресурс по сравнению с параметрами многоциклового нагружения. В то же время в случае начала послойного разрушения сиффона, гидравлические испытания становятся опасным фактором, приводящим к критическому отказу арматуры — потере герметичности по отношению к внешней среде (рис. 6, 7).

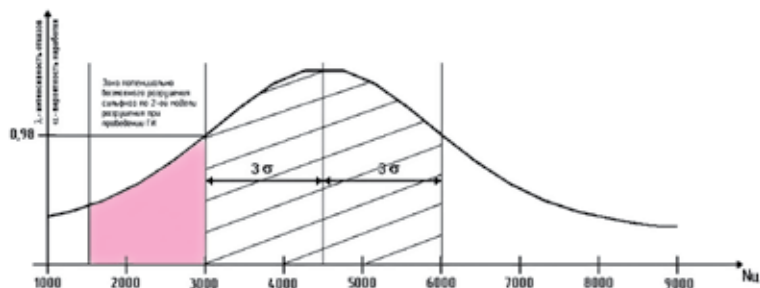


Рис. 7. Распределение наработок до полного разрушения 6-слойных сиффонов, изготовленных по ГОСТ 21744-83



Рис. 7. Распределение наработок до полного разрушения 6-слойных сиффонов, изготовленных по ГОСТ Р 55019-2012, удовлетворяющее требованию 40 опрессовок

Таким образом, задача обеспечения надежной работы сиффона сводится к повышению его ресурса до полного разрушения, с таким расчетом, чтобы начало разрушения первых слоев было за пределами назначенного ресурса. При величине назначенного ресурса сиффонов по [1] равной 3000 циклов, величина ресурса до полного разрушения должна была составить 6500—7500 циклов (рис. 8).

Проведенные совместно с ЗАО «Сплав Спецтехнология» — предприятием-изготовителем сиффонов — опытно-конструкторские работы показали принципиальную возможность решения этой проблемы путем изменения конструкции сиффонов и совершенствования технологического процесса их изготовления. Это позволило внести соответствующие изменения в разработанный ЗАО «НПФ «ЦКБА» и вводимый в действие с 1 мая 2013 года ГОСТ Р 55019-2012 «Сиффоны многослойные металлические. Общие технические условия» [3].

Повышение ресурса сиффонов более чем в два раза снимает вопрос об ограничении числа гидроиспытаний в процессе эксплуатации арматуры в пределах назначенного ресурса, существенно увеличивает ее надежность и безопасность.

Анализируя полученные результаты можно сделать следующие выводы:

1. Количество опрессовок практически не влияет на ресурс сиффонов до момента начала разрушения первых наружных слоев.

2. Степень влияния опрессовок на ресурс сиффонов существенно зависит не от их числа, а от момента их проведения, связываемого с разрушением первых наружных слоев при наработке ресурса. Это позволяет, в случае необходимости, увеличить число опрессовок без снижения ресурсных характеристик сиффонов.

3. Необходимо пересмотреть предусмотренный в [2] порядок проведения приемо-сдаточных испытаний сиффонов, доведя сдаточный параметр наработки без отказа до 6000—7500 циклов, делая опрессовки на различных стадиях наработки сиффонов. Например: проводить 0,2  $n$  опрессовок до начала наработки назначенного ресурса, где  $n$  — число опрессовок в соответствии с требованиями конструкторской документации, а остальные 0,8  $n$  — после наработки сиффоном 1,2  $N_{наз}$ , с последующей наработкой до полного разрушения. При этом эта наработка должна составить не менее 2  $N_{наз}$ . Такой порядок при приемо-сдаточных испытаниях на заводах-изготовителях сиффонов предусмотрен в [3].

4. Для подтверждения предлагаемого порядка приемо-сдаточных испытаний сиффонов совместно с заводами-изготовителями сиффонов проводится НИОКР по определению ресурса до полного разрушения сиффонов, применяемых в арматуре атомных электростанций и атомного флота, с доведением его, в случае необходимости, до требуемых значений (6000—7500 циклов), обеспечивающих начало разрушения сиффона за пределами назначенного ресурса 3000 циклов.

#### Литература

1. ГОСТ 21744–83 «Сиффоны многослойные металлические. Общие технические условия». М., Издательство стандартов 1990, С. 72.
2. НП-068 «Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования». М. 2005, НТЦ ЯРБ, С. 97.
3. ГОСТ Р 55019-2012 «Сиффоны многослойные металлические. Общие технические условия». М., Издательство стандартов 2012.

Санкт-Петербург, ноябрь 2012 года

## МИР ТПА VALVE World

НОВОСТИ СТАНДАРТИЗАЦИИ

### Предложения в проект программы разработки межгосударственных стандартов по трубопроводной арматуре на 2013—2014 годы

В 2013 году вводится в действие технический регламент Таможенного союза «О безопасности машин и оборудования», а с 2014 года планируется введение технического регламента Таможенного союза «О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением» (в настоящее время этот регламент находится на внутригосударственном согласовании). В связи с этим ускоренными темпами будут обновляться межгосударственные стандарты, которые должны стать доказательной базой выполнения требований этих технических регламентов:

1. ГОСТ «Арматура трубопроводная. Термины и определения».

2. ГОСТ «Арматура трубопроводная. Общие требования безопасности».

3. ГОСТ «Арматура трубопроводная. Разъемные бугельные соединения. Расчет на прочность и герметичность». (Разработчик — ОАО «ИркутскНИИхиммаш»).

4. ГОСТ «Арматура трубопроводная. Наплавка и контроль качества наплавленных поверхностей. Технические требования».

5. ГОСТ «Арматура трубопроводная. Требования к маркировке и отличительной окраске».

6. ГОСТ «Компенсаторы и уплотнения сиффонные металлические. Общие технические требования». (Разработчик — ОАО «НПП «Компенсатор»).

Заказать утвержденные стандарты ЦКБА и получить проекты новых нормативных документов можно по факсу (812) 458-72-04, 458-72-36 или по электронной почте [standard@ckba.ru](mailto:standard@ckba.ru). Информация ТК 259 и проекты межгосударственных и национальных стандартов также размещены на сайте ЦКБА [www.ckba.ru](http://www.ckba.ru). Информация подготовлена С. Н. Дунаевским (ЗАО «НПФ «ЦКБА», ТК 259).