

# Новый стандарт ЦКБА по периодическим испытаниям сильфонов

Ю.И. Тарасьев, Н.К. Зеновская, В.Т. Доможиров, ЗАО «НПФ «ЦКБА»

**З**АО «НПФ «ЦКБА» разработан стандарт [1], посвященный порядку проведения и обработки результатов периодических испытаний сильфонов, содержащий ряд принципиальных отличий от действующих в настоящее время методов. В настоящей статье мы ставим задачу технически обосновать принятые в стандарте решения.

Периодические испытания сильфонов (ПИ) проводятся предприятием-изготовителем (поставщиком) для периодической проверки качества сильфонов и стабильности технологического процесса с целью подтверждения возможности продолжения их изготовления и приемки по действующей нормативной и технологической документации.

ПИ проводятся в соответствии с требованиями ГОСТ 21744 [2] и предусматривают подтверждение вероятности безотказной работы (ВБР) сильфонов в течение назначенного ресурса –  $P(T_{p.n.})$ . При этом положения стандарта предусматривают два подхода к подтверждению нормированных значений ВБР.

Первый из них опирается на экспоненциальный закон распределения и предполагает испытание на полный назначенный ресурс ( $T_{pn}$ ) определенного числа сильфонов в зависимости от установленного значения ВБР ([2], п. 3.4.3, табл.7). При испытаниях не должно быть ни одного отказа сильфонов. Под отказом понимается разгерметизация наружной полости сильфона относительно внутренней при наработке менее нормированного по [2] назначенного ресурса в циклах.

Второй подход – допускает определение ВБР в течение назначенного ресурса –  $P(T_{p.n.})$  по результатам испытаний 8 сильфонов с последующей обработкой результатов по нормальному закону распределения с учетом средней наработки до отказа испытываемых сильфонов и дисперсии ([2], пп. 3.4.4, 4.8).

Такой же метод подтверждения ВБР по результатам ресурсных испытаний восьми штук сильфонов до разрушения с последующей обработкой результатов по нормальному закону распределения регламентирован НП–068–05 [3].

Рассмотрим более подробно оба предлагаемых метода оценки ВБР сильфона в пределах назначенного ресурса, или, иными словами, подтверждение вероятности, что сильфоны, оцениваемые при периодических испытаниях, не откажут в пределах  $T_{pn}$ . Принимая во внимание, что периодическим испытаниям подвергаются серийно выпускаемые сильфоны, мы вправе принять, что конструкция сильфона и технологический процесс их изготовления отработаны и обеспечивают требуемые значения  $T_{pn}$ , т.е. конструктивные отказы и отказы, связанные с несовершенством технологического процесса изготов-

ления сильфонов, маловероятны. В таком случае, основной причиной наступления отказа сильфона в пределах назначенного ресурса следует считать нарушения технологического процесса изготовления сильфонов и ошибки в системе пооперационного контроля качества. Этот вид отказа, в соответствии с [4], относится к **производственным отказам**. Вероятность возникновения такого отказа ( $P_{def}$ ) зависит от совпадения двух независимых факторов – вероятности нарушения технологического процесса, приводящего к производственному отказу, и вероятности ошибки при пооперационном контроле, приводящей к необнаружению допущенного нарушения и может быть представлена уравнением:

$$P_{def} = (1 - P_n)(1 - P_k) \quad (1),$$

где  $P_n$  – вероятность того, что в процессе изготовления проверяемой партии сильфонов до проведения соответствующих операций неразрушающего пооперационного контроля не будет сильфонов с наработкой до отказа ниже  $T_{pn}$ ;

$P_k$  – вероятность обнаружения нарушений технологического процесса, приводящих к появлению сильфонов с наработкой до отказа ниже  $T_{pn}$  при неразрушающем пооперационном контроле (эффективность контроля).

В этом случае вероятность безотказной работы в пределах назначенного ресурса  $P(T_{p.n.})$  будет равна:

$$P(T_{p.n.}) = 1 - (1 - P_n)(1 - P_k) \quad (2)$$

Что касается отказов сильфонов за пределами  $T_{pn}$ , то, в соответствии с [4], они могут быть отнесены к **деградационным**, поскольку причиной их не являются недостатки в конструкции, нарушения технологического процесса изготовления сильфонов, или ошибки при пооперационном контроле. Среднее значение наработки до деградационного отказа и величина дисперсии для испытываемой партии сильфонов зависят только от конструктивного исполнения сильфонов (чем лучше конструкция – тем выше средняя наработка), от разброса допустимых технологическим процессом отклонений (чем меньше фактический диапазон отклонений – тем меньше дисперсия) и не зависят, в отличие от производственных отказов, от пооперационного контроля. Из сказанного следует, что для отработанных конструкции и технологии изготовления сильфона, при установившейся системе производственного контроля средняя наработка до отказа  $N_{cp}$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma(N_{cp})$  для данной случайной выборки **не зависят от пооперационного контроля** при условии, что в выборке нет ни одного сильфона с наработкой меньше  $T_{pn}$ . Это означает, что положительные результаты испытаний случайной выборки (все 8 результатов превышают

$T_{рн}$  – все отказы деградационные) не являются представительными и не могут быть использованы для оценки вероятности возникновения производственного отказа. Последнее обстоятельство делает технически необоснованным применение метода оценки ВБР, оговоренного в [2] (пп. 3.4.4, 4.8) и [3]. Более того, расчеты показывают, что при использовании оговоренного выше порядка, риск потребителя (вероятность того, что на опасный производственный объект попадет бракованный сильфон) при заданной вероятности безотказной работы, равной 0,95, составит 0,6, что **недопустимо**.

Таким образом, основным для оценки ВБР в течение  $T_{рн}$  по результатам периодических испытаний должен являться метод, опирающийся на экспоненциальный закон распределения производственных отказов, при котором важным являются не значения наработок сильфонов до отказа за пределами  $T_{рн}$  (деградационные отказы), а отказы в пределах  $T_{рн}$  (производственные отказы).

Следуя рекомендациям [5] (табл. 4), для экспоненциального закона распределения определяются план испытаний и исходные данные для планирования эксперимента. Сильфон – объект неремонтируемый, рекомендуемый показатель надежности – вероятность безотказной работы; план испытаний – *NUT*.

Ресурсные испытания выборки из восьми штук сильфонов до разрушения считаются положительными, если сильфоны выборки выдержали ресурс более  $k \cdot T_{рн}$ , где  $k$  – коэффициент запаса, оговоренный в программе периодических испытаний, либо не разрушились при наработке до  $5T_{рн}$ .

Расчет вероятности безотказной работы в течение назначенного ресурса (срока службы) за контролируемый период ( $P(T_{рн})_{исп}$ ) проводится по результатам ресурсных испытаний сильфонов в соответствии с методическими указаниями [5] по формуле:

$$P(T_{рн})_{исп} = e^{-\lambda \cdot T_{рн}}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказов;

$T_{рн}$  – назначенный ресурс сильфона.

В расчет принимаются только отказы, произошедшие до достижения  $T_{рн}$ , по которым не принимались меры технологического характера по их недопущению либо меры по ужесточению пооперационного контроля.

При наличии отказов сильфонов интенсивность отказов определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{d}{(n-d) \cdot T_{рн} \cdot \sum_{i=1}^d T_i}, \quad (4)$$

где  $d$  – число отказов (количество отказавших сильфонов);

$n$  – количество испытанных сильфонов;

$T_i$  – наработка  $i$ -того сильфона до отказа;

$i$  – номер (индекс) отказавшего сильфона  $i = 1 \div d$ .

Интенсивность отказов при числе отказов  $d = 0$  определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{r_0}{n \cdot T_{рн}}, \quad (5)$$

По [5] (табл. 28) определяется количество сильфонов, необходимых для подтверждения  $P(T_{рн})$  при допустимом числе отказов  $d = 0$  по формуле:

$$N = \ln \frac{1-q}{\ln P(T_{рн})}, \quad (6)$$

где  $N$  – количество сильфонов, необходимых для подтверждения  $P(T_{рн})$ ;

$q$  – доверительная вероятность.

Количество сильфонов, необходимое для подтверждения вероятности безотказной работы в течение назначенного ресурса по результатам ресурсных испытаний при  $d = 0$  и  $q = 0,95$ , рассчитанное в соответствии с требованиями методических указаний, приведено в *таблице 1*.

Таблица 1.

Вероятность безотказной работы $P(T_{рн})$	Количество сильфонов (N), необходимое для подтверждения $P(T_{рн})_{исп}$
0,9	29
0,95	59
0,96	74
0,98	149
0,99	299
0,999	2999
0,9999	29998

Из приведенной таблицы следует, что подтверждение высоких значений показателей безотказности требует проведения испытаний значительного количества сильфонов.

Этим, во многом, объясняется тот факт, что, исходя из соображений экономической целесообразности, предприятия-изготовители в настоящее время отдают предпочтение второму подходу, не смотря на его некорректность, поскольку применение этого метода обработки результатов испытаний допускается [2] и регламентировано [3].

В то же время, анализ действующих технологических процессов изготовления сильфонов и систем пооперационного контроля на предприятиях-изготовителях позволяет существенно изменить подход к получению исходных данных по результатам испытаний сильфонов для оценки их ВБР в течение назначенного ресурса по экспоненциальному закону распределения.

В качестве априорной информации, как это предусмотрено [2] (п. 3.4.4), могут быть использованы результаты приемо-сдаточных испытаний аналогичных сильфонов, за весь период действия технологического процесса их изготовления. Такое решение возможно, поскольку параметры приемо-сдаточных и периодических испытаний (давление, температура и ход) идентичны. Тот факт, что сильфоны при проведении приемо-сдаточных испытаний испытываются не до разрушения (фиксируется их отказ только в случае разрушения в пределах  $T_{рн}$ ), значения не имеет, т.к. нас интересуют, как было показано выше, только эти (производственные) отказы. Количество априорной информации по результатам приемо-сдаточных испытаний может быть еще увеличено за счет объединения сильфонов в группы по признаку единого технологического процесса их изготовления и одной и той же системы пооперационного контроля. Действительно, проведен-

ный анализ причин возможного преждевременного отказа сильфонов показывает, что эти причины практически одни и те же для сильфонов различных типоразмеров (по наружному диаметру, числу и толщине слоев, числу гофров). Группу составляют сильфоны, изготавливаемые по одному и тому же технологическому процессу, из одних и тех же марок материалов, в одних и тех же производственных подразделениях, на оборудовании класса точности, предусмотренного ТП, персоналом требуемой квалификации. Результаты приемосдаточных и приемочных испытаний распространяются на всю группу.

Приведенные выше положения и легли в основу стандарта ЗАО «НПФ «ЦКБА», регламентирующего порядок проведения периодических испытаний сильфонов [1].

СТ предусматривает следующий порядок проведения ПИ:

- испытания проводятся на выборке из восьми штук сильфонов, одной группы, изготовленных в контролируемом периоде и выдержавших ПСИ;
- ресурсные испытания считаются положительными, если сильфоны выборки выдержали ресурс до разрушения более  $k \cdot T_{p.n.}$ , где  $k$  – коэффициент запаса, оговоренный в программе ПИ, либо не разрушились при наработке до  $5T_{p.n.}$ ;
- значения средней наработки сильфонов до отказа и среднего квадратичного отклонения определяются исходя из нормального закона распределения по уравнениям (1) и (2);
- полученные результаты сравнивают с соответствующими значениями средней наработки и среднего квадратичного отклонения предыдущих ПИ. В случае выявления устойчивого снижения (тренда) величины средней наработки до отказа или изменения в большую сторону среднего квадратичного отклонения (что свидетельствует о наличии отклонений в реализации технологического процесса) должны быть приняты меры к выявлению причин этих отклонений и их устранению. Оценки значений средней наработки сильфона до отказа и среднего квадратичного отклонения являются факультативными и не влияют на решение о положительных результатах ПИ при условии, что наработка всех испытанных сильфонов превышает  $k \cdot T_{p.n.}$ ;
- расчет вероятности безотказной работы в течение назначенного ресурса (срока службы) за контролируемый период ( $P(T_{p.n.})_{исп}$ ) проводится по результатам всех ресурсных испытаний сильфонов одной группы (ПСИ и ПИ) за весь период времени, в течение которого проводились эти испытания, в соответствии с методическими указаниями [1] с использованием формул (3), (4), (5) либо *таблицы 1*, в случае отсутствия отказов;
- $P(T_{p.n.})_{исп}$ , рассчитанная по результатам обработки данных ПСИ и ПИ за контролируемый период при положительных результатах (отсутствии отказов в пределах  $k \cdot T_{p.n.}$ ), но недостаточном количестве результатов испытаний, необходимых для подтверждения  $P(T_{p.n.})_{нд}$ , является величиной факультативной, не влияющей на принятие решения о положительных результатах ПИ.

В этом случае вступает в силу положение, являющееся важной особенностью рассматриваемого стандарта, предо-

ставляющее возможность предприятию-изготовителю дополнять оценку вероятности безотказной работы сильфонов по результатам их приемосдаточных и периодических испытаний результатами оценки действующих на предприятии технологических процессов и системы качества, в части обеспечения ими требуемой безотказности сильфонов.

Методология такой оценки, сводящаяся к оценке по результатам принятого на предприятии-изготовителе технологического процесса величины  $P_n$  и эффективности пооперационного контроля –  $P_k$ , используя уравнения (1) и (2), подробно изложена в [6], [7] и СТ ЦКБА 049 [8].

Указанный метод может быть использован на ранних стадиях производства, когда отсутствует достаточное количество данных по результатам приемосдаточных испытаний, или при возобновлении производства конкретных типоразмеров сильфонов после длительного перерыва в их изготовлении, а также в случае, если подтверждение испытаниями высоких значений вероятности безотказной работы в течение назначенного ресурса ( $\geq 0,99$ ) практически невозможно (экономически и технически нецелесообразно из-за большого числа сильфонов, которые необходимо подвергнуть ресурсным испытаниям на рабочих параметрах).

Оценка ТП осуществляется изготовителем или, по согласованию с ним, представителями заказчика, экспертной организацией или разработчиком сильфона, имеющими необходимую квалификацию, опыт работы, знающими конструкцию сильфона, нормативную документацию на сильфон, технологический процесс его изготовления.

Результат оценки ТП изготовления сильфонов считается положительным, если  $P(T_{p.n.})_{mn} \geq P(T_{p.n.})_{нд}$  и отрицательным, если  $P(T_{p.n.})_{mn} < P(T_{p.n.})_{нд}$ .

При отрицательном результате оценки ТП изготовления сильфонов проводится анализ ТП с целью его доработки.

Существенным нововведением в СТ является также разрешение переноса на один год (но не более двух лет подряд) плановых ПИ с продлением срока действия результатов предыдущих испытаний на четвертый (пятый) год при следующих условиях:

- положительных результатах ПСИ за контролируемый период, подтверждающих назначенный ресурс серийно выпускавшихся сильфонов одной группы;
- подтвержденной стабильности технологического процесса изготовления сильфонов (отсутствие рекламаций, возвратов ОТК, существенных изменений технологических процессов, не подтвержденных испытаниями, положительные результаты проверок оборудования, технологической оснастки и средств контроля, подтверждение требуемой квалификации персонала).

Положения стандарта, связанные с подтверждением высоких значений ВБР в течение  $T_{p.n.}$ , были апробированы в ЗАО «Сплав-Спецтехнология» (Великий Новгород) при изготовлении партии многослойных сильфонов 125-12-0,30x8 ГОСТ 21744 для комплектации задвижек DN 300, PN 15, t 505° С на жидкий натрий для Белоярской АЭС. В соответствии с техническими требованиями было необходимо обеспечить вероятность безотказной работы сильфонной сборки, состоящей из шести сильфонов, за назначенный ресурс 25 циклов, равную 0,964

и, соответственно, вероятность безотказной работы каждого сильфона, входящего в сильфонную сборку – 0,994.

В соответствии с [8] был проведен анализ технологического процесса изготовления сильфонов, в том числе:

- выявлены технологические операции изготовления и контроля, ошибки в которых могут привести к дефектам, вызывающим критический отказ (нарушение герметичности) сильфона;
- разработан перечень основных технологических причин, которые могут привести к нарушению герметичности сильфона;
- собраны исходные данные для оценки надежности, обеспечиваемой технологическим процессом.

Произведен расчет вероятности безотказной работы сильфона, обеспечиваемой технологическим процессом изготовления и операциями контроля.

По результатам проведенного анализа установлено, что вероятность безотказной работы сильфонов в течение назначенного ресурса, обеспечиваемая действующим на предприятии планом качества, близка к единице.

Также был проведен расчет вероятности безотказной работы по более 1700 результатам ПСИ и ПИ сильфонов одной группы с сильфонами 125-12-0,30x8 ГОСТ 21744, позволивший с большой точностью подтвердить требуемые показатели безотказности сильфонных сборок и входящих в них сильфонов.

В заключение скажем, что введение стандарта потребует пересмотра принятого в настоящее время порядка подтверждения показателей безотказности по результатам периодических (и не только периодических) испытаний и не только сильфонов, но и арматуры.

Нам видится, что основные положения стандарта отражают, с одной стороны, необходимость предоставления изготовителям большей свободы в выборе методов подтверждения и контроля безотказности при периодических испытаниях, и, с другой, допускают подтверждение высоких значений показателей безотказности путем оценки вероятности безотказной работы изделий, обеспечиваемой технологическим процессом их изготовления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СТ ЦКБА 039-2010 «Арматура трубопроводная. Периодические испытания сильфонов. Общие требования» // ЗАО «НПФ «ЦКБА», СПб, 2010, 28 с.
2. ГОСТ 21744-83 «Сильфоны многослойные металлические. Общие технические условия» // Государственный комитет СССР по управлению качеством и стандартам, М., 1984, 71 с.
3. НП-068-05 «Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования» // Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, М., 2005, 96 с.
4. ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия и определения» // М. Издательство стандартов, 1990, 38 с.
5. РД 50-690-89 «Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным» // Государственный комитет СССР по управлению качеством и стандартам, М., 1990, 132 с.
6. Тарасьев Ю.И., Трофимова Л.П. «Оценка надежности промышленных изделий с учетом эффективности технологического процесса производства» // Химическое и нефтяное машиностроение № 7, 1971, с. 32-33.
7. Тарасьев Ю.И., Токмаков О.А. «Пути обеспечения безопасности арматуры». «Арматуростроение» // №3/60/09, 2009, с. 16-22.
8. СТ ЦКБА 049-2009 «Арматура трубопроводная. Обеспечение безотказности при изготовлении» // ЗАО «НПФ «ЦКБА», СПб, 2009, 28 с.