

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.4

## Методология учета пространственной неоднородности свойств материала при расчете сопротивления хрупкому разрушению корпусов реакторов ВВЭР-1000. Сообщение 2. Экспериментальные исследования

Б. З. Марголин<sup>а</sup>, В. Н. Фоменко<sup>а</sup>, А. И. Минкин<sup>а</sup>, А. А. Вакуленко<sup>б</sup>,  
А. А. Чернобаева<sup>в</sup>

<sup>а</sup> ЦНИИ КМ “Прометей”, Санкт-Петербург, Россия

<sup>б</sup> ИПМАШ РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>в</sup> НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*По экспериментальным данным определены стандартные отклонения распределений критической температуры хрупкости  $T_K$  в основном металле (в обечайках) и металле сварного шва для корпусов реакторов ВВЭР-1000. На основании данных по стандартным отклонениям  $T_K$ , плотности дефектов и их распределения по размерам, размерам постулируемого дефекта, а также данных по нагружению корпуса реактора в процессе аварийного расхолаживания определены величины запасов на пространственную неоднородность в терминах  $T_K$ ,  $T_0$  и  $\Omega$ .*

**Ключевые слова:** корпус реактора, вязкость разрушения, пространственная неоднородность.

**Введение.** Ранее [1] была предложена методология определения запаса на пространственную неоднородность материалов корпусов реакторов (КР). Согласно этой методологии для определения численных значений запасов  $\delta T_{NH}$  для основного металла (ОМ) и металла шва (МШ) необходимо найти стандартное отклонение критической температуры хрупкости  $T_K$  в указанных материалах. Кроме того, для определения величины запаса  $\delta T_{NH}$  следует задать уровень доверительной вероятности  $\bar{P}_\Delta$ , при котором выполняется условие  $T_K^{3Д} < T_K^{OC} + \delta T_{NH}$ , где  $T_K^{3Д}$  – значение  $T_K$  для зоны локализации дефекта;  $T_K^{OC}$  – значение  $T_K$ , определенное по результатам испытаний образцов-свидетелей (ОС). Величина  $\bar{P}_\Delta$  может быть получена на основании расчетов КР на сопротивление хрупкому разрушению (СХР) в детерминистической и вероятностной подстановках.

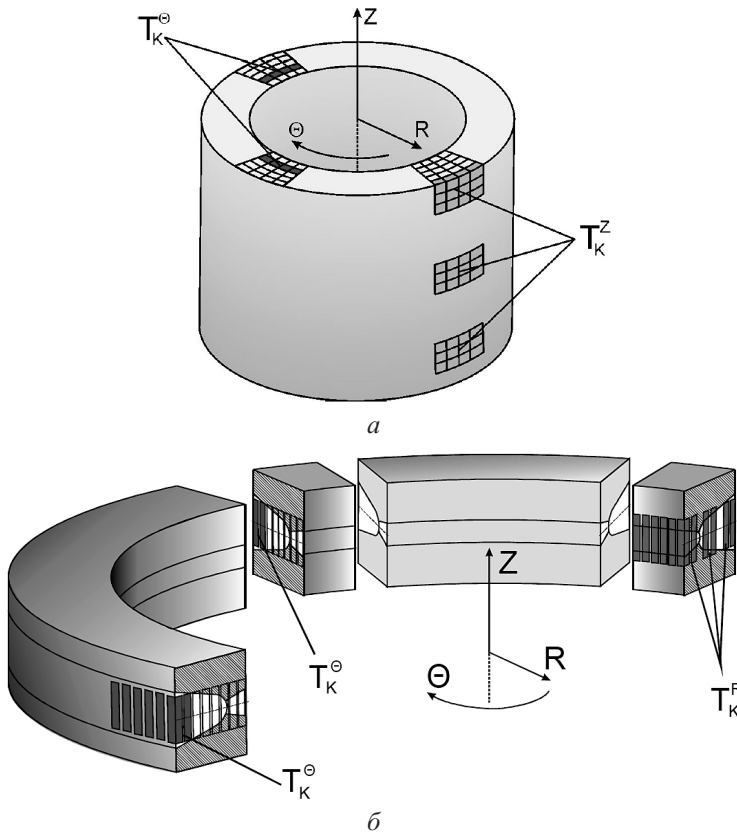
Цель настоящего сообщения – на основании экспериментально-расчетных работ определить стандартное отклонение  $T_K$  и уровень доверительной вероятности  $\bar{P}_\Delta$ , а также рассчитать величину запасов на пространственную неоднородность в терминах  $T_K$  [2],  $T_0$  [3, 4] и  $\Omega$  [5, 6] применительно к КР ВВЭР-1000.

### 1. Определение стандартного отклонения $T_K$ для ОМ и МШ КР ВВЭР-1000.

1.1. **Процедура оценки стандартного отклонения  $T_K$ .** Данная процедура использует допущение [1], согласно которому стандартное отклонение  $T_K$  для различных обечайек одного и разных КР одно и то же, если эти обечайки изготовлены по одной технологии из одной и той же марки стали. В этом случае частные выборки

$T_K$  для различных обечаек могут быть использованы для оценки стандартного отклонения генеральной совокупности значений  $T_K$  по всем обечайкам. Очевидно, что при одной и той же технологии сварки стандартное отклонение  $T_K$  для различных швов одного или разных КР также можно принять одинаковым.

Ранее [1] было показано, что при оценке запаса на пространственную неоднородность ОМ необходимо учитывать случайное распределение  $T_K^{\Theta Z}$  (распределение  $T_K$  по сечению  $\Theta$ – $Z$  при  $R = \text{const}$ , рисунок), а вклад распределения  $T_K^R$  (распределение  $T_K$  по координате  $R$  при фиксированных координатах  $\Theta$  и  $Z$ , рисунок) можно не учитывать. При оценке запаса на пространственную неоднородность МШ следует учитывать случайное распределение  $T_K^{R\Theta Z}$  (распределение  $T_K$  по всему объему шва, рисунок).



Схемы вырезки образцов из основного металла (а) и металла сварного шва (б).

Переобозначим для простоты дальнейшего анализа значение  $T_K$  по выбранному направлению (например, для основного металла это  $T_K^{\Theta Z}$ ) как  $x_j$ .

Для  $i$ -й выборки выборочная дисперсия рассчитывается по формуле [7]

$$s_i^2 = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{j=1}^{n_i} (x_j - \bar{x}_i)^2, \quad (1)$$

где  $\bar{x}_i$  – выборочное среднее;  $n_i$  – количество данных в  $i$ -й выборке.

Стандартное отклонение для  $i$ -й выборки рассчитывается по формуле

$$s_i = \sqrt{s_i^2}. \quad (2)$$

Генеральная дисперсия по  $m$  выборкам оценивается по формуле [7]

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)s_i^2}{\sum_{i=1}^m n_i - m}. \quad (3)$$

В формуле (3) учитываются только те выборки, которые имеют равные дисперсии генеральных совокупностей. Для проверки гипотезы о том, что все  $m$  генеральных совокупностей, из которых взяты частные выборки, имеют равные дисперсии генеральных совокупностей, воспользуемся критерием Бартлетта. Характерная величина  $\chi^2$  в данном критерии согласно [7, 8] рассчитывается по формуле

$$\chi^2 = \frac{2,3026 \left[ \left( \sum_{i=1}^m n_i - m \right) \lg(s^2) - \sum_{i=1}^m (n_i - 1) \ln(s_i^2) \right]}{1 + \frac{1}{3(m-1)} \left( \sum_{i=1}^m \frac{1}{n_i - 1} - \left( \sum_{i=1}^m n_i - m \right)^{-1} \right)}, \quad (4)$$

где  $s_i^2$ ,  $s^2$  вычисляются по формулам (1) и (3) соответственно.

Полученное значение  $\chi^2$  сравнивается с табличным для выбранного уровня значимости  $\alpha$  и числа степеней свободы  $(m - 1)$ . Если выполняется условие

$$\chi^2 \leq \chi_{\alpha}^2, \quad (5)$$

то гипотезу о равенстве дисперсий генеральных совокупностей, из которых взяты частные выборки, не отвергают.

Доверительный интервал для генеральной дисперсии  $\sigma^2$  с доверительной вероятностью  $P = 1 - \alpha$  определяется на основе обобщения формулы для доверительного интервала генеральной дисперсии [7] на случай нескольких выборок:

$$\frac{s^2 \left( \sum_{i=1}^m n_i - m \right)}{\chi_{P_1, k}^2} < \sigma^2 < \frac{s^2 \left( \sum_{i=1}^m n_i - m \right)}{\chi_{P_2, k}^2}, \quad (6)$$

где  $\chi_{P_1, k}^2$  и  $\chi_{P_2, k}^2$  определяются для доверительных вероятностей  $P_1 = \alpha/2$  и  $P_2 = 1 - \alpha/2$  соответственно и числа степеней свободы  $k = \sum_{i=1}^m n_i - m$ ;  $\sigma$  – стандартное отклонение для генеральной совокупности значений  $T_K$ .

Для случая одностороннего доверительного интервала имеем

$$\sigma^2 < \frac{s^2 \left( \sum_{i=1}^m n_i - m \right)}{\chi_{P,k}^2}, \quad (7)$$

где  $\chi_{P,k}^2$  определяется для доверительной вероятности  $P = 1 - \alpha$  и числа степеней свободы  $k$ .

В качестве оценки стандартного отклонения для генеральной совокупности  $\sigma$  используется верхняя граница доверительного интервала, полученная по формуле (7) при  $P = 0,95$ .

Следует отметить, что в ряде экспериментов получены выборки, состоящие всего из двух значений  $T_K$  для одного слоя материала (при  $R = \text{const}$ ). Рассчитать дисперсию, а также стандартное отклонение для выборки из двух значений не представляется возможным. В этом случае целесообразно рассмотреть разности между значениями  $(T_K)_1$  и  $(T_K)_2$ . Введем обозначения:

$$\Delta T_K = (T_K)_2 - (T_K)_1, \quad (8)$$

где  $(T_K)_1$  и  $(T_K)_2$  – значения  $T_K$  для одного слоя.

Ранее [1] было показано, если случайные величины  $(T_K)_1$  и  $(T_K)_2$  принадлежат одной генеральной совокупности, которая описывается нормальным законом с математическим ожиданием  $M$  и стандартным отклонением  $\sigma$ , то их разность  $\Delta T_K$  описывается нормальным законом с математическим ожиданием  $M_\Delta = 0$  и стандартным отклонением  $\sigma_\Delta = \sqrt{2}\sigma$ . В этом случае величина дисперсии  $\sigma^2$  может быть получена по формуле

$$\sigma^2 = \frac{(\sigma_\Delta)^2}{2}. \quad (9)$$

Принимая, что соотношение (9) для дисперсий генеральных совокупностей справедливо также для средних выборочных дисперсий, запишем

$$s^2 = \frac{(s_\Delta)^2}{2}, \quad (10)$$

где  $s^2$ ,  $(s_\Delta)^2$  – средние выборочные дисперсии величин  $T_K$  и  $\Delta T_K$  соответственно;  $(s_\Delta)^2$  рассчитывается по формуле (1), в которой под  $x_i$  понимаются элементы массива  $\Delta T_K$ .

Для всех слоев, для которых получено всего два значения  $T_K$ , формируется массив значений, содержащий значения  $\Delta T_K$  и  $-\Delta T_K$ . Для этого массива по формуле (1) определяется выборочная дисперсия величины  $\Delta T_K$  и по (10) – выборочная дисперсия величины  $T_K$ . Таким образом, при расчете по формуле (3) учитывается дополнительная выборка, для которой под  $(s_i)^2$  понимается величина  $(s_\Delta)^2/2$ , а в качестве  $n_i$  используется количество выборок, для которых объем выборок в заданном направлении состоит всего из двух значений.

Отметим, что использование в качестве случайной величины  $\Delta T_K$  вместо  $T_K$  имеет смысл только в случае если для одной обечайки существует не более двух значений  $T_K$  при  $R = \text{const}$ . Ясно, что если при  $R = \text{const}$  имеется три и более значений  $T_K$ , то можно использовать формулы (1)–(7) напрямую.

1.2. **Результаты обработки экспериментальных данных.** Для анализа пространственной неоднородности ОМ использовались данные для металла обечаек из стали 15Х2НМФА-А, изготовленных по штатной технологии для КР ВВЭР-1000. Для анализа пространственной неоднородности МШ использовались производственные сварные соединения, также изготовленные по штатной технологии для КР ВВЭР-1000. При определении критической температуры хрупкости использовалось не менее 12 образцов.

Для исследования неоднородности ОМ в направлении  $\Theta Z$  (рисунок, а) из основного металла образцы вырезались компактными группами в один или два слоя по  $R$ . Имелись наборы образцов с разными координатами по  $\Theta$ , но с близкими координатами по  $R$  и  $Z$ , с разными координатами по  $Z$ , но с близкими координатами по  $R$  и  $\Theta$  (рисунок, а), а также наборы образцов с близкими координатами по  $R$ , но с разными координатами как по  $Z$ , так и по  $\Theta$ .

Согласно представленной в подразд. 1.1 процедуре на основе  $T_K$ , полученных для указанных наборов образцов, рассчитывалось стандартное отклонение значений  $T_K$  для обечайки. Затем по данным для всех обечаек оценивалась верхняя граница доверительного интервала стандартного отклонения  $T_K$ .

Для оценки неоднородности МШ для каждого сварного соединения определялось  $T_K$  для образцов, вырезанных компактными группами из разных частей шва (рисунок, б). На основе этих  $T_K$  по процедуре, представленной в подразд. 1.1, рассчитывалось стандартное отклонение для каждого шва, и для всех сварных швов оценивалась верхняя граница доверительного интервала стандартного отклонения  $T_K$ .

Для анализа пространственной неоднородности  $T_K$  в материалах КР использовались два массива данных. В массиве № 1 [9–14] приведены результаты испытаний стандартных образцов Шарпи, полученные согласно РД ЭО 0598-2004. Методика определения критической температуры хрупкости материалов корпусов реакторов по результатам испытаний малоразмерных образцов на ударный изгиб. В массиве № 2 представлены заводские данные, обработанные согласно ПНАЭ Г 7-002-86 [2], а также данные по трещиностойкости, обработанные согласно [3].

Суть этих процедур состоит в следующем. Согласно РД ЭО 0598-2004 температурная зависимость работы разрушения аппроксимируются зависимостью вида

$$f(T) = A + B \operatorname{th}[(T - D)/C], \quad (11)$$

где  $T$  – температура испытаний;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  – подгоночные параметры. Критическая температура хрупкости  $T_K$  определяется как максимальное из двух значений  $T_K^{E_1}$  и  $T_K^{E_2} - 30^\circ\text{C}$ , где  $T_K^{E_1}$  и  $T_K^{E_2}$  – значения температуры испытаний, которые находятся из зависимости (11) и соответствуют уровням работы разрушения  $E_1$  и  $E_2$  ( $E_1 = 1,5E_2$ ). Для стандартных образцов Шарпи размером  $10 \times 10 \times 55$  мм имеем  $E_1 = 47$  Дж для материалов с пределом текучести до 687 МПа. Кроме того, в РД ЭО 0598-2004 представлены процедуры определения верхней и нижней асимптот зависимости (11).

Согласно ПНАЭ Г 7-002-86 [2] температурный интервал испытаний должен быть таким, чтобы в него входили точки  $T_K$ ,  $T_K \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $T_K + 20^\circ\text{C}$ ,  $T_K + 30^\circ\text{C}$ ,  $T_K + 40^\circ\text{C}$ . При каждой температуре испытывают не менее трех образцов. Для каждого образца определяют ударную вязкость и процент вязкой составляющей в изломе. При температуре  $T_K$  среднее значение ударной вязкости должно быть не ниже  $E_1 = 47$  Дж ( $59$  Дж/см<sup>2</sup>) для материалов с пределом текучести до 687 МПа, а минимальное – не ниже  $0,7E_1$ . При температуре  $T_K + 30^\circ\text{C}$  среднее значение ударной вязкости должно быть не ниже  $1,5E_1$ , а минимальное – не ниже  $1,05E_1$ . Кроме того, при температуре  $T_K + 30^\circ\text{C}$  минимальное значение вязкой составляющей в изломе должно составлять не менее 50%.

В связи с некоторым различием в процедурах определения  $T_K$  согласно ПНАЭ Г 7-002-86 [2] и РД ЭО 0598-2004, а также наличием данных по трещиностойкости, обработанных согласно [3] в массиве № 2, было принято решение рассматривать данные массивов № 1 и 2 совместно и массива № 1 отдельно.

Количество значений в частной выборке  $n$ , средние значения  $T_K - T_{K(ср)}$ , расчетные значения дисперсии  $s^2$  и стандартного отклонения  $s$  для частных выборок представлены в табл. 1–3. В табл. 1 и 2 приведены результаты обработки значений  $T_K$ , в табл. 3 – разностей  $\Delta T_K$ .

Поскольку для представленных в табл. 1–3 данных условие (5) выполняется, они могут использоваться при определении  $s^2$  по формуле (3).

Т а б л и ц а 1

**Результаты обработки экспериментальных данных по  $T_K$  для МШ**

| № выборки | Обозначение шва | $s^2$ ,<br>(°C) <sup>2</sup> | $n$ | $s$ ,<br>°C | $T_{K(ср)}$ ,<br>°C | № массива данных |
|-----------|-----------------|------------------------------|-----|-------------|---------------------|------------------|
| 1         | МШ-1            | 64,33                        | 4   | 8,02        | -48,5               | 1                |
| 2         | МШ-2            | 24,33                        | 4   | 4,93        | -21,5               |                  |
| 3         | МШ-3            | 6,57                         | 7   | 2,56        | -73,7               |                  |
| 4         | МШ-5            | 129,86                       | 14  | 11,40       | -37,2               |                  |
| 5         | МШ-260          | 87,63                        | 16  | 9,36        | -72,4               |                  |
| 6         | МШ-340          | 171,90                       | 7   | 13,11       | -32,3               |                  |
| 7         | МШ-350          | 86,10                        | 23  | 9,28        | -42,6               |                  |
| 8         | ПКСС-1          | 44,25                        | 4   | 6,65        | -23,3               | 2                |
| 9         | ПКСС-2          | 12,33                        | 3   | 3,51        | -24,7               |                  |
| 10        | ПКСС-3          | 145,33                       | 3   | 12,06       | -19,3               |                  |
| 11        | МШ-530-32       | 58,57                        | 7   | 7,65        | -36,7               |                  |
| 12        | ПКСС № 1 Рос-2  | 41,66                        | 5   | 6,45        | -62,1               |                  |

Т а б л и ц а 2

**Результаты обработки экспериментальных данных по  $T_K$  для ОМ**

| № выборки | № поковки | Направление                          | $s^2$ ,<br>(°C) <sup>2</sup> | $n$ | $s$ ,<br>°C | $T_{K(ср)}$ ,<br>°C | № массива данных |
|-----------|-----------|--------------------------------------|------------------------------|-----|-------------|---------------------|------------------|
| 1         | 448530    | Θ (по окружности обечайки)           | 26,33                        | 3   | 5,13        | -72,7               | 1                |
| 2         | 441229    |                                      | 14,33                        | 3   | 3,79        | -34,3               | 2                |
| 3         | 441229    |                                      | 91,00                        | 3   | 9,54        | -35,0               |                  |
| 4         | 707072    | ΘZ (по высоте и окружности обечайки) | 54,92                        | 4   | 7,41        | -70,8               |                  |

Т а б л и ц а 3

Результаты обработки экспериментальных данных по разностям  $\Delta T_K$  для ОМ

| № выборки | № поковки  | Направление   | $s^2$ ,<br>(°C) <sup>2</sup> | $n$ | $s$ ,<br>°C | № массива данных |
|-----------|--|---|------------------------------|-----|-------------|------------------|
| 5         | 445152, 901773, 901775,<br>901761, 902195, 902206,<br>902212, 902319, 902320,<br>902374, 902587, 902960,<br>449278, 441229 | По $\Theta$ или $Z$<br>(по высоте или<br>по окружности<br>обечайки) | 50,83                        | 32  | 7,13        | 1, 2             |
| 6         | 445152, 901773, 901775,<br>901761, 902195, 902206,<br>902212, 902319, 902320,<br>902374, 902587, 902960,<br>449278         | По $\Theta$ или $Z$<br>(по высоте или<br>по окружности<br>обечайки) | 54,16                        | 29  | 7,36        | 1                |

В результате расчета по формуле (7) получим:  
для ОМ при учете данных массивов № 1 и 2

$$\sigma[T_K^{\Theta Z}] = 10,41^\circ \text{C}$$

для ОМ при учете только данных массива № 1

$$\sigma[T_K^{\Theta Z}] = 9,21^\circ \text{C}$$

для МШ при учете данных массивов № 1 и 2

$$\sigma[T_K^{R\Theta Z}] = 10,54^\circ \text{C}$$

для МШ при учете только данных массива № 1

$$\sigma[T_K^{R\Theta Z}] = 11,16^\circ \text{C}$$

Для дальнейших расчетов будут использоваться максимальные из полученных значений: для ОМ  $\sigma[T_K^{\Theta Z}] = 10,41^\circ \text{C}$ , для МШ  $\sigma[T_K^{R\Theta Z}] = 11,16^\circ \text{C}$ .

## 2. Определение запаса $\delta T_{NH}$ .

2.1. **Базовая информация для расчета.** Методология определения  $\delta T_{NH}$  изложена ранее [1]. Для выполнения расчетов по данной методологии были приняты следующие исходные данные.

Согласно стандарту ОАО “Концерн Росэнергоатом” (РД ЭО 1.1.3.99.0871-2012. Методика расчета на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов АЭС с ВВЭР-1000 при продлении срока эксплуатации до 60 лет) в качестве постулируемого дефекта при детерминистическом расчете КР в условиях его аварийного расхолаживания принималась поднаплавочная полуэллиптическая трещина глубиной  $a = 14$  мм и протяженностью  $2c = 6a = 84$  мм. Максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений  $K_I^{\max}$  с учетом коэффициента запаса 1,1 при аварийном расхолаживании для указанного постулируемого дефекта принималось равным  $100 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ .

При вероятностном расчете СХР КР для обеспечения консервативности расчетов были приняты следующие допущения.

1. Плотность дефектов в МШ принималась равной плотности дефектов, обнаруженных при заводском радиографическом контроле сварных швов КР, выполненных автоматической дуговой сваркой. Используемые в расчете значения плотности дефектов отвечают данным до ремонта дефектов (до выборки и последующей заварки дефектных зон). Поэтому оценка  $\rho^{\text{МШ}}$  является консервативной. Согласно [15] имеем  $\rho^{\text{МШ}} = 0,05$  шт/метр шва.

2. Распределение дефектов по размерам в ОМ принимается идентичным распределению дефектов в МШ. Уравнение, описывающее указанное распределение, приведено ранее [1].

3. Плотность дефектов в ОМ принимается идентичной плотности дефектов в МШ.

Количество дефектов в ОМ оценивается по следующей методике. Определяется площадь продольного сечения обечаек  $S_{\text{ОМ}}$ , проходящего через ось  $Z$  и образующую обечаек (рисунок), подвергаемых нейтронному облучению. Далее определяется количество эквивалентных швов  $N_{\text{экр}}$ , длина каждого из которых равна длине кольцевого сварного шва  $L_{\text{ш}}$ :

$$N_{\text{экр}} = \frac{S_{\text{ОМ}}}{S_{\text{ш}}}, \quad (12)$$

где  $S_{\text{ОМ}} = Ht$ ;  $H$  – суммарная высота обечаек, подвергаемых нейтронному облучению;  $t$  – толщина обечаек;  $S_{\text{ш}}$  – площадь поперечного сечения шва.

Тогда количество дефектов в основном металле  $n_{\text{ОМ}}$  может быть оценено по формуле

$$n_{\text{ОМ}} = N_{\text{экр}} L_{\text{ш}} \rho^{\text{МШ}}. \quad (13)$$

Количество дефектов в шве рассчитывается по формуле

$$n_{\text{МШ}} = N_{\text{ш}} L_{\text{ш}} \rho^{\text{МШ}}, \quad (14)$$

где  $N_{\text{ш}}$  – количество кольцевых сварных швов, подвергаемых нейтронному облучению.

Учитывая, что  $\rho^{\text{МШ}} = 0,05$  шт/метр шва,  $t = 190$  мм,  $L_{\text{ш}} = 13600$  мм,  $H = 3703$  мм, для КР ВВЭР-1000 получим  $N_{\text{экр}} = \frac{190 \cdot 3703}{190 \cdot 40} \approx 92,6$  шва; расчетные значения  $n_{\text{ОМ}} = 92,6 \cdot 13,6 \cdot 0,05 \approx 63$  и  $n_{\text{МШ}} = 2 \cdot 13,6 \cdot 0,05 \approx 1,4$ . Примем консервативные оценки числа дефектов  $n_{\text{ОМ}} = 63$  и  $n_{\text{МШ}} = 2$ .

В [1] изложена процедура расчета вероятности разрушения корпуса реактора  $P_f^{\text{КР}}$ . Как следует из разработанной процедуры, при заданных значениях  $\sigma_{\text{ОМ}}^{\Delta}$  и  $\sigma_{\text{МШ}}^{\Delta}$

с увеличением  $\delta T_{\text{NH}}$ , т.е. с ростом  $\bar{P}_{\Delta}$ ,  $P_f^{\text{КР}}$  уменьшается. Следовательно, варьируя  $\bar{P}_{\Delta}$ , можно удовлетворить условие, соответствующее вероятностному обоснованию прочности КР:

$$P_f^{\text{КР}} < [P_f^{\text{КР}}]. \quad (15)$$

Допускаемое значение вероятности разрушения КР  $[P_f^{\text{КР}}]$  (точнее – частота разрушений КР) согласно данным работ [16, 17] равно  $10^{-7}$  и  $10^{-6}$  разрушений в год соответственно. Консервативно принимаем  $[P_f^{\text{КР}}] = 10^{-7}$  разрушений в год.



Выполненные расчеты показали, что для  $\bar{P}_\Delta = 0,9$  имеем  $P_f^{KP} = 0,82 \cdot 10^{-7}$  разрушений в год. При этом  $\delta T_{NH}^{OM} = 1,282\sigma_{OM}^\Delta = 18,9^\circ\text{C}$ ,  $\delta T_{NH}^{MШ} = 1,282\sigma_{MШ}^\Delta = 20,2^\circ\text{C}$ .

При  $\bar{P}_\Delta = 0,95$  и  $\delta T_{NH}^{OM} = 1,645\sigma_{OM}^\Delta = 24,2^\circ\text{C}$ ,  $\delta T_{NH}^{MШ} = 1,645\sigma_{MШ}^\Delta = 26,0^\circ\text{C}$  получим  $P_f^{KP} < 0,27 \cdot 10^{-7}$  разрушений в год.

Учитывая, что ранее в РД ЭО 1.1.2.09.0789-2009. “Методика определения вязкости разрушения по результатам испытаний образцов-свидетелей для расчета прочности и ресурса корпусов реакторов ВВЭР-1000” принято  $\delta T_{NH}^{OM} = 27^\circ\text{C}$  для ОМ и  $\delta T_{NH}^{MШ} = 23^\circ\text{C}$  для МШ, для сохранения преемственности было решено принять  $\bar{P}_\Delta = 0,95$ , при котором  $\delta T_{NH}^{OM} = 24,2^\circ\text{C}$ ,  $\delta T_{NH}^{MШ} = 1,645\sigma_{MШ}^\Delta = 26^\circ\text{C}$ . Кроме того, поскольку значения  $\delta T_{NH}^{OM}$  и  $\delta T_{NH}^{MШ}$  примерно одинаковы, целесообразно принять единый запас как для основного металла, так и для металла шва:  $\delta T_{NH} = 26^\circ\text{C}$ .

Согласно [1] имеем  $\delta T_0 = \delta T_{NH}$ . Поэтому в терминах  $T_0$  запас  $\delta T_0 = \delta T_{NH} = 26^\circ\text{C}$ .

Как показано в [1], в терминах  $\Omega$  коэффициент запаса на пространственную неоднородность может быть рассчитан по формуле

$$\eta = \frac{\Omega_\eta - \Omega_{\min}}{\Omega - \Omega_{\min}} = \exp\left(-\frac{2}{105^\circ\text{C}}\delta T_{NH}\right), \quad (16)$$

где  $\Omega_\eta$  – расчетная величина  $\Omega$  с учетом запаса на пространственную неоднородность;  $\Omega$  может быть определен на основании испытаний ОС;  $\Omega_{\min} = 37 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ .

Подставляя  $\delta T_{NH} = 26^\circ\text{C}$  в (16), получаем  $\eta = 0,61$ .

Таким образом, при использовании метода “Базовой кривой” [18] зависимость  $K_{0,05}^{150}(T)$  для  $P_f = 0,05$  и  $B = 150 \text{ мм}$  с учетом запаса на пространственную неоднородность представляется в виде

$$K_{0,05}^{150} = 23 + 48\exp[0,019(T - T_K - \delta T_{NH})], \quad \text{МПа}\sqrt{\text{м}}. \quad (17)$$

При использовании методов “Master Curve” [3, 4] и “Unified Curve” [5, 6] зависимость  $K_{0,5}^{25}(T)$  для  $P_f = 0,5$  и  $B_N = 25 \text{ мм}$  с учетом запаса на пространственную неоднородность соответственно имеет вид

$$K_{0,5}^{25} = 30 + 70\exp[0,019(T - T_0 - \delta T_{NH})], \quad \text{МПа}\sqrt{\text{м}}; \quad (18)$$

$$K_{0,5}^{25}(T) = K_{Jc}^{shelf} + \Omega_\eta \left(1 + \text{th}\left(\frac{T - 130}{105}\right)\right), \quad \text{МПа}\sqrt{\text{м}}, \quad (19)$$

где  $\Omega_\eta = \eta(\Omega - \Omega_{\min}) + \Omega_{\min}$ ;  $\Omega_{\min} = 37 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ;  $K_{Jc}^{shelf} = 26 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ .

В (17)–(19) значения  $T_K$ ,  $T_0$  и  $\Omega$  определяются по результатам испытаний образцов-свидетелей;  $T$  – температура,  $^\circ\text{C}$ .

Следует отметить, что в рамках работ по проекту ВВЭР-1200 была разработана новая программа ОС, предусматривающая вырезку ОС из различных зон по азимуту и высоте обечайки. Практическая реализация этой программы позволит индивидуализировать оценки  $\delta T_{NH}$  для конкретного КР и, возможно, снизить консервативность оценки  $\delta T_{NH}$ , сделанной в настоящей работе.

## Выводы

1. На основании экспериментальных данных определены стандартные отклонения распределений  $T_K$  для корпусов ВВЭР-1000 в основном металле и в металле шва соответственно:  $\sigma(T_K^{OM}) = 10,4$ ;  $\sigma(T_K^{МШ}) = 11,16$ .

2. На основании разработанной в сообщении 1 методологии определены запасы на пространственную неоднородность для основного металла и для металла шва соответственно:  $\delta T_{NH}^{OM} = 24,2$ ;  $\delta T_{NH}^{МШ} = 26,0$ .

При таких запасах вероятность разрушения КР (точнее – частота разрушений КР)  $P_f^{KP} = 0,27 \cdot 10^{-7}$  разрушений в год, что меньше допускаемой величины  $[P_f^{KP}] = 1 \cdot 10^{-7}$  разрушений в год.

3. Для инженерных оценок как для основного металла, так и для металла шва принята единая консервативная величина запаса  $\delta T_{NH} = 26^\circ\text{C}$ . В терминах  $T_0$  величина запаса  $\delta T_0 = \delta T_{NH}$ .

4. Оценена величина запаса при использовании параметра  $\Omega$ . Коэффициент, учитывающий запас на пространственную неоднородность,  $\eta = 0,61$ .

5. Полученные коэффициенты запаса на пространственную неоднородность включены в нормативные документы “Концерн Росэнергоатом” (РД ЭО 1.1.2.09.0789-2009. Методика определения вязкости разрушения по результатам испытаний образцов-свидетелей для расчета прочности и ресурса корпусов реакторов ВВЭР-1000) и МАГАТЭ (Guidelines for Integrity and Lifetime Assessment of Components and Piping in WWER NPPs during Operation (VERLIFE)).

Авторы выражают благодарность профессорам НИУ “Высшая школа экономики” А. А. Пересецкому и П. К. Катышеву за неоднократные консультации по статистической обработке данных.

## Резюме

За результатами експериментів визначено стандартні відхилення розподілу критичної температури крихкості  $T_K$  в основному металі (в обичайках) і в металі зварного шва для корпусів реакторів ВВЕР-1000. На основі даних стандартних відхилень  $T_K$ , щільності дефектів і їх розподілу за розмірами, за розмірами постульованого дефекту та даних по навантаженню корпуса реактора у процесі аварійного розхолодження визначено величини запасів на просторову неоднорідність у термінах  $T_K$ ,  $T_0$  і  $\Omega$ .

1. Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Вакуленко А. А. и др. Методология учета пространственной неоднородности свойств материала при расчете сопротивления хрупкому разрушению корпусов реакторов ВВЭР-1000. Сообщ. 1. Теоретический анализ // Пробл. прочности. – 2015. – № 3. – С. 16–31.
2. ПНАЭ Г 7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
3. ASTM E 1921-02. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range // Annual Book of ASTM Standards. – Vol. 03.01. – Philadelphia, 2002. – P. 1068–1084.
4. Merkle J. G., Wallin K., and McCabe D. E. Technical Basis for an ASTM Standard on Determining the Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range // NUREG/CR-5504, ORNL/TM-13631, 1999.
5. Margolin B. Z., Gulenko A. G., Nikolaev V. A., and Ryadkov L. N. A new engineering method for prediction of the fracture toughness temperature dependence for RPV steels // Int. J. Press. Vess. Piping. – 2003. – 80. – P. 817–829.

6. *Margolin B., Gurovich V., Fomenko V., et al.* Fracture toughness prediction for highly irradiated RPV materials: From test results to RPV integrity assessment // *J. Nucl. Mater.* – 2013. – **432**. – P. 313–322.
7. *Степнов М. Н.* Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
8. *Bartlett M. S.* Properties of sufficiency of statistical tests // *Proc. Roy. Soc. A.* – 1937. **160**. – P. 268–282.
9. *Acosta B., Debarberis L., Pirfo S., et al.* WWER-1000 base metal reference steel and its characterisation // *Nucl. Eng. Design.* – 2005. – **235**. – P. 1951–1959.
10. *Chernobaeva A. A., Shulgan N. A., Shtrombakh Ya. I., et al.* Mechanical properties distribution in welds and forgings of VVER-1000 // *Proc. of PVP2009 (ASME Pressure Vessels and Piping Division Conf., July 26–30, 2009, Prague, Czech Republic).* – PVP2009-77236.
11. *Скундин М. А., Чернобаева А. А., Журко Д. А. и др.* Исследование распределения свойств в обечайках корпуса реактора АЭС в необлученном состоянии // *Деформация и разрушение материалов.* – 2011. – № 10. – С. 41–44.
12. *Чернобаева А. А., Николаев Ю. А., Скундин М. А. и др.* Анализ причин разброса данных температурных образцов-свидетелей основного металла ВВЭР-1000 // *Атом. энергия.* – 2012. – **113**, Вып. 6. – С. 337–343.
13. *Чернобаева А. А., Штромбах Я. И., Титова Т. И. и др.* Исследование металла корпуса реактора ВВЭР-1000 // *Тр. конф. ЦНИИ КМ “Прометей”.* – Санкт-Петербург, 2008.
14. *Журко Д. А., Скундин М. А., Чернобаева А. А. и др.* Исследование распределения механических свойств в обечайке зоны патрубков // *Тр. конф. молодых специалистов в ОАО ОКБ “Гидропресс” (16–17 марта 2011 г., Подольск).*
15. *Варовин А. Я.* Определение допускаемых дефектов в сварных элементах сосудов высокого давления и разработка концепции эксплуатационного неразрушающего контроля корпусов реакторов ВВЭР-1000: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – СПб., 2004. – 24 с.
16. *ПНАЭ Г-01-011-97.* Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. – М., 1998. – 55 с.
17. *Guidelines for Integrity and Lifetime Assessment of Components and Piping in WWER NPPs during Operation (VERLIFE).* – Version 2011.
18. *Марголин Б. З., Гуленко А. Г.* Концепция “Базовой кривой” // *Машиностроение. Энциклопедия.* – Том II-1: Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов / Под общ. ред. Е. И. Мамаевой. – М.: Машиностроение, 2010. – 852 с.

Поступила 30. 12. 2014