

**Девятая международная научно-техническая конференция
«БЕЗОПАСНОСТЬ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭКОНОМИКА
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ»**

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000 ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДО 60 ЛЕТ

**Штромбах Я.И., Гурович Б.А., Ерак Д.Ю., Журко Д.А.,
Кулешова Е.А., Чернобаева А.А., Забусов О.О., Ходан А.Н.**

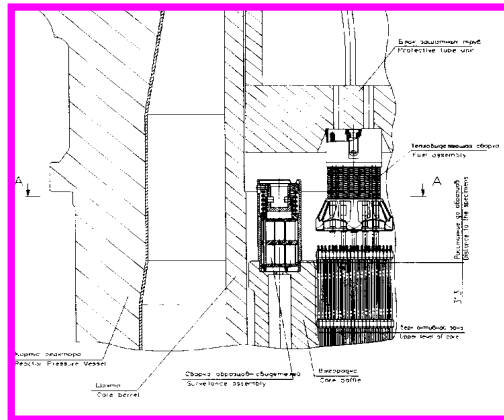


**НИЦ "КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ"
ИНСТИТУТ РЕАКТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ**

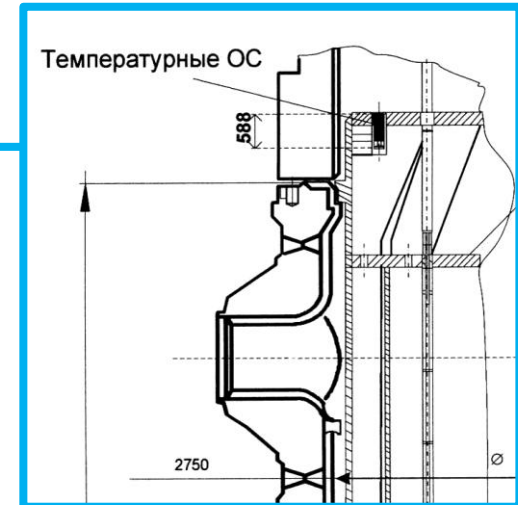
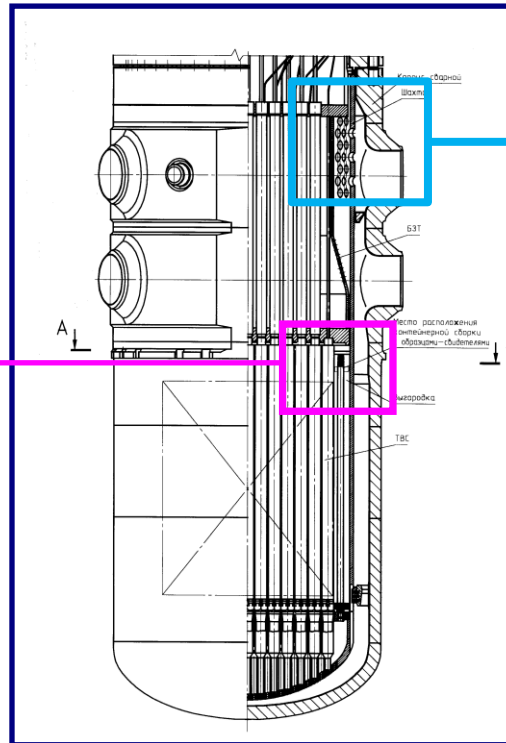
Москва, Россия 21-23 мая 2014

Корпус реактора ВВЭР-1000

Радиационное охрупчивание (РО) и температурное старение (ТС) металла



фактор опережения
 $K=0,5 - 3,0$
 $F < 5,5 \cdot 10^{23}$ нейтрон/м²



Время выдержки при
 $T=310-320^{\circ}\text{C}$
26 000-200 000 ч
 ≈ 23 ГОДА

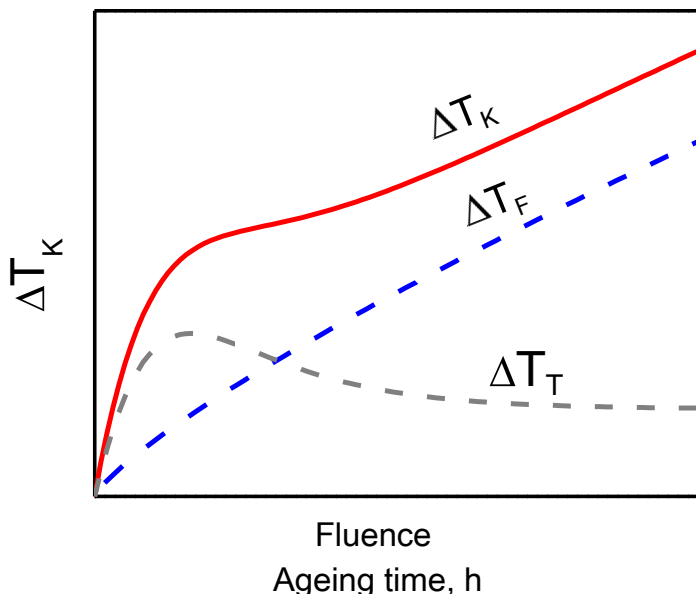
**Наиболее представительные данные по изменению свойств КР –
результаты испытания образцов-свидетелей (ОС)**



Нормативная зависимость для оценок эффектов РО и ТС

$$\Delta T_K(F, t) = \Delta T_F(F) + \Delta T_t(t) \quad \text{В соответствии с РД ЭО 1.1.2.09.0789-2012}$$

$$\Delta T_F = A_F \cdot \left(\frac{F}{F_0} \right)^{0,8} \quad \Delta T_T(t) = \left(T_{\text{inf}} + b_t \cdot \exp\left(\frac{24600 - t}{19800} \right) \right) \cdot th\left(\frac{t}{19800} \right)$$



НЕ ПОДТВЕРЖДЕНА ГИПОТЕЗА, ПРИНЯТА ПРИ РАЗРАБОТКЕ НОРМАТИВНОЙ ЗАВИСИМОСТИ (ИССЛЕДОВАНИЯ НИЦ КИ)*:

- Упрочнение в процессе температурного старения не подтверждается данными ОС
- Изменение плотности и размеров карбидов при исследовании температурных ОС не установлено. Дополнительные выделения каких-либо фаз в α -железе, отличных от карбидных не обнаружены

*Б.А. Гурович, Е.А.Кулешова, Д.А.Мальцев, С.В.Федотова, А.С. Фролов, О.О.Забусов, М.А.Салтыков., Структурные исследования стали 15Х2НМФАА и ее сварных соединений после длительных термических выдержек и облучения при рабочей температуре корпуса реактора авторов. Известия вузов. Ядерная энергетика. №4 2012, с 110-121.



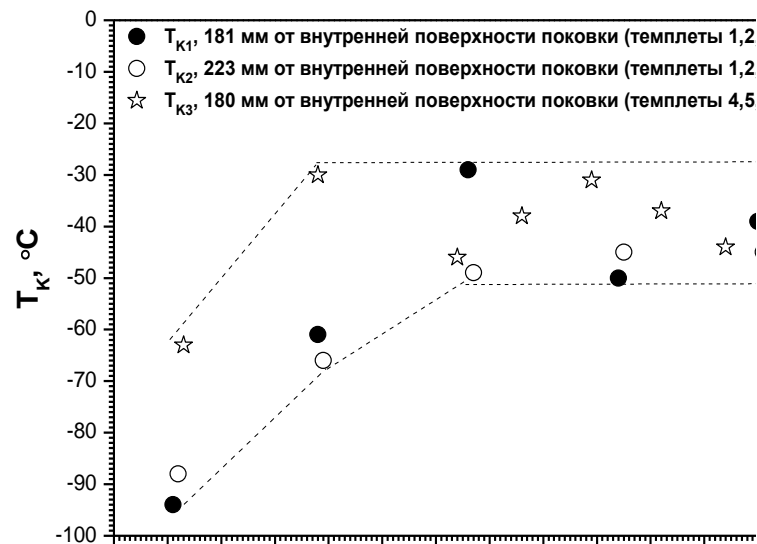
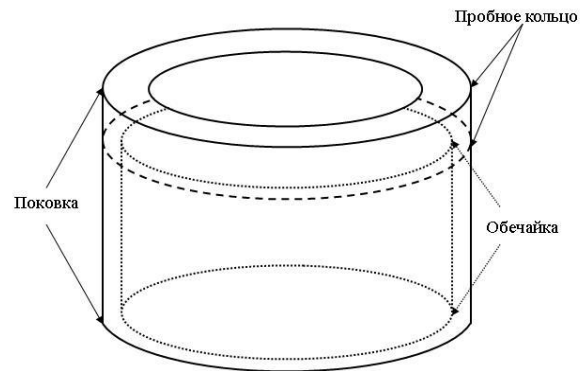
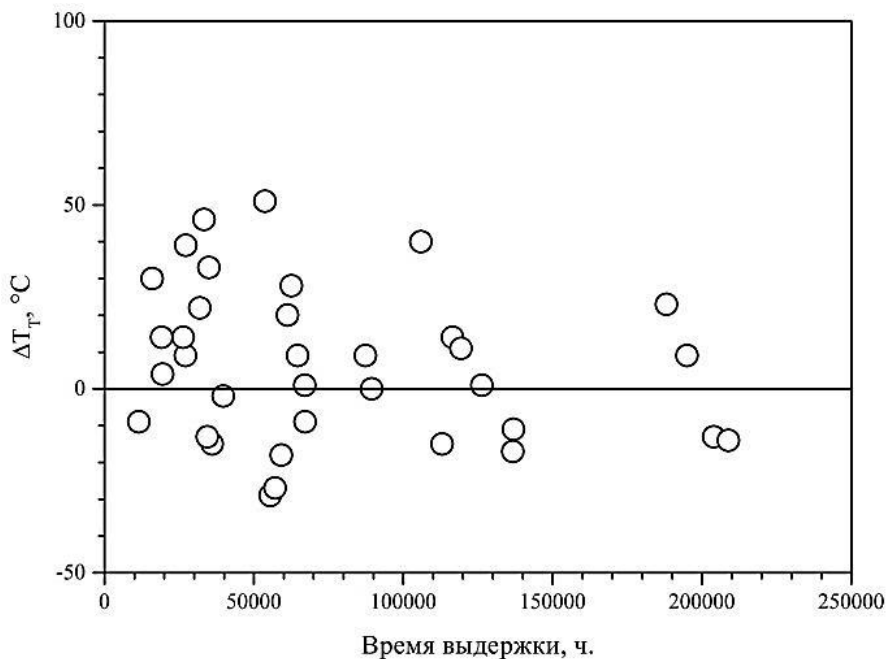
Механизмы охрупчивания материалов КР ВВЭР-1000



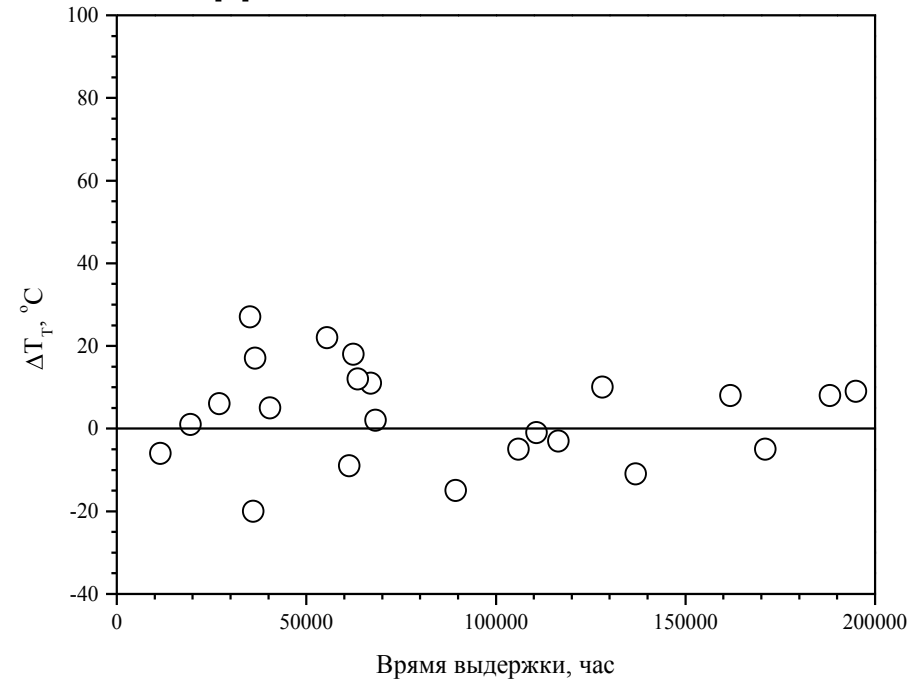
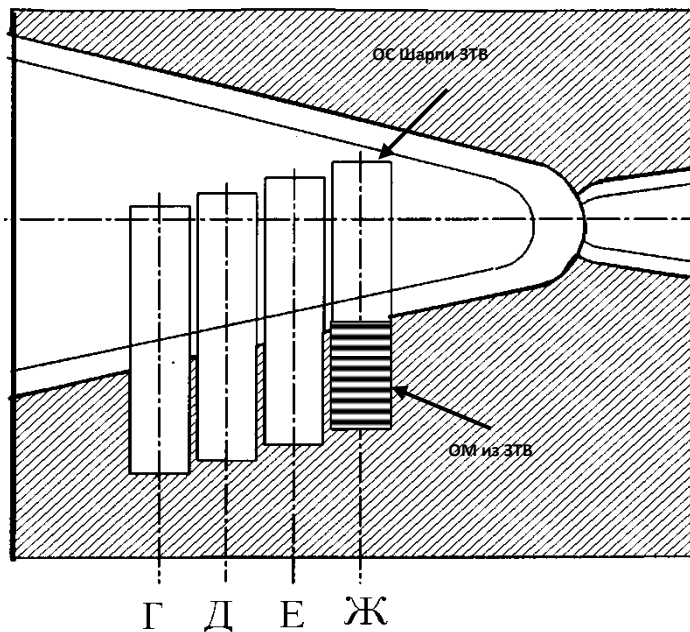
Температурное старение ОМ

1

База данных ОС ОМ



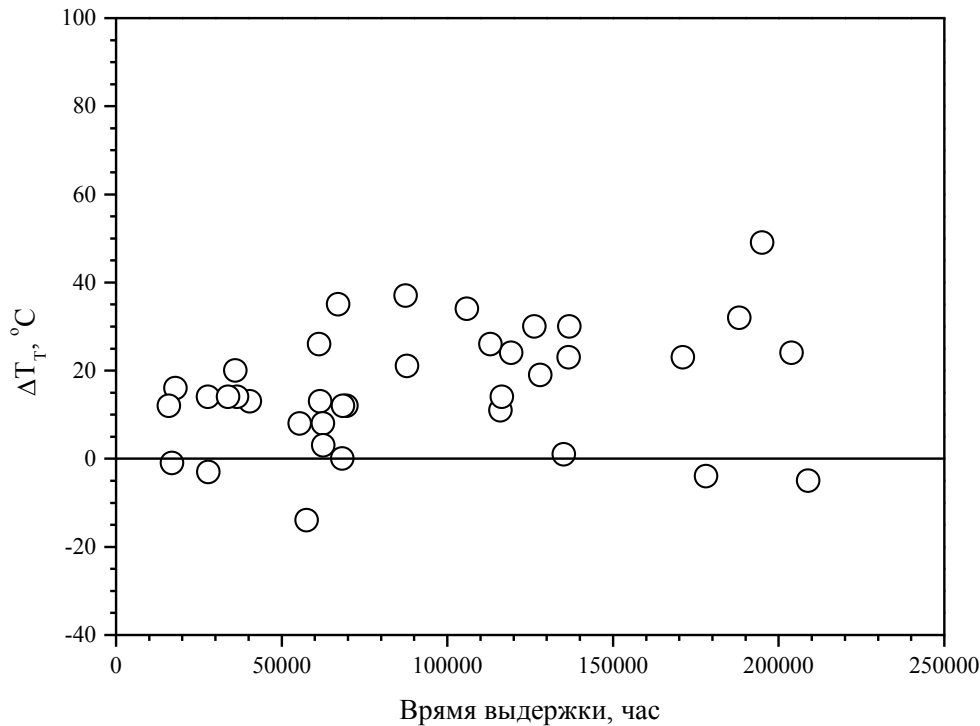
Получение новой базы данных



Существенного изменения критической температуры хрупкости в исследованном диапазоне времен не установлено.

$\Delta T_{кр}$ для основного металла равно 0

База данных ОС МШ



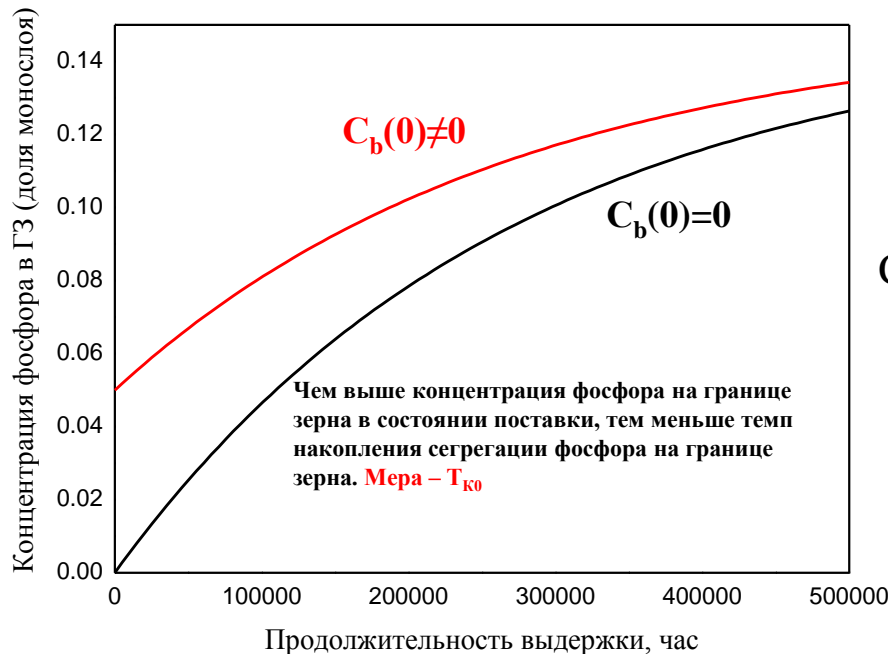
Изменение T_T зависит :

- от времени t
- от содержание никеля C_{Ni}
- от характеристики исходного состояния $T_{к0}$.

Изменение T_T обусловлено образованием сегрегаций по границам зерен



Кинетика термически-стимулированного накопления фосфора



$$\Delta C_{\Gamma}^P(t) = B + (C - B) \cdot (1 - \exp(-F_T t))$$

$B = \Delta C_{\Gamma}^P(0)$ – концентрация фосфора на границах зерен в момент времени $t = 0$;

$C = \Delta C_{\Gamma}^P(\infty)$ – равновесная концентрация фосфора на границе зерен для $t \rightarrow \infty$

F_T – коэффициент зависящий от диффузии фосфора в границе зерна;

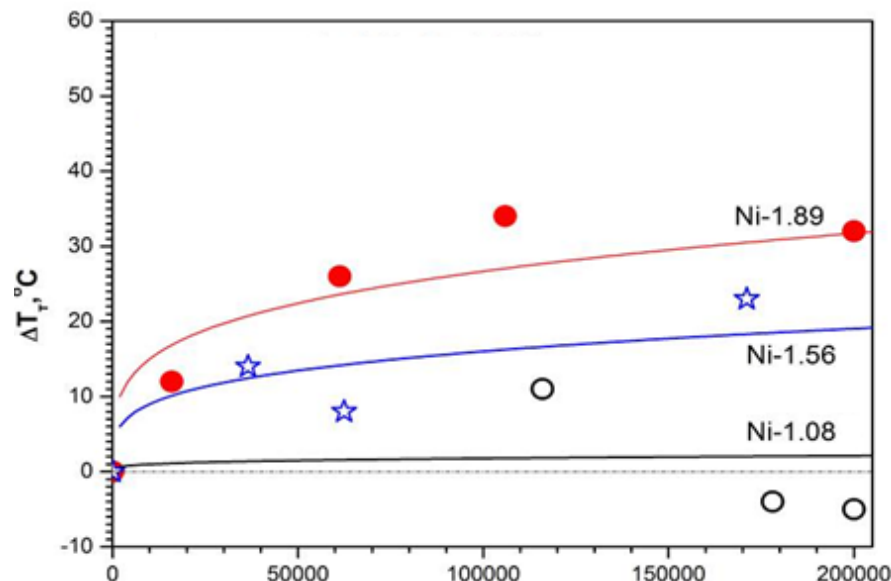
Температурное старение МШ

3

$$\Delta T_T(t) = A \cdot f(C_{Ni}, T_{к0}) \cdot (1 - \exp(-F_T t))^n$$

на базе данных **температурных ОС МШ**,
где F_T определено по данным оже - электронной спектроскопии

$$\Delta T_T = 1,3 \cdot C_{Ni}^4 \cdot \exp(-0,02 \cdot T_{к0}) \cdot (1 - \exp(-1,1 \cdot 10^{-5} \cdot t))^{0,6}$$



Модель применима только при наличии экспериментально определенного на ОС значения $T_{к0}$



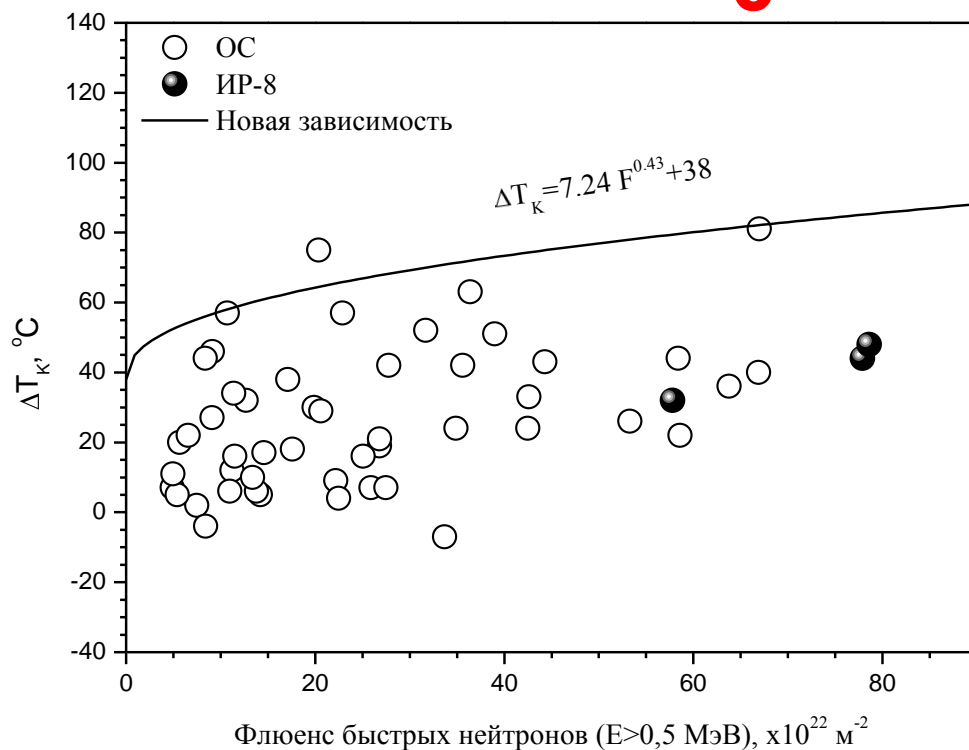
Радиационное охрупчивание ОМ

$$\Delta T_K (F, t) = \Delta T_{упр} (F) + \Delta T_{неупр} (t) \rightarrow 0$$

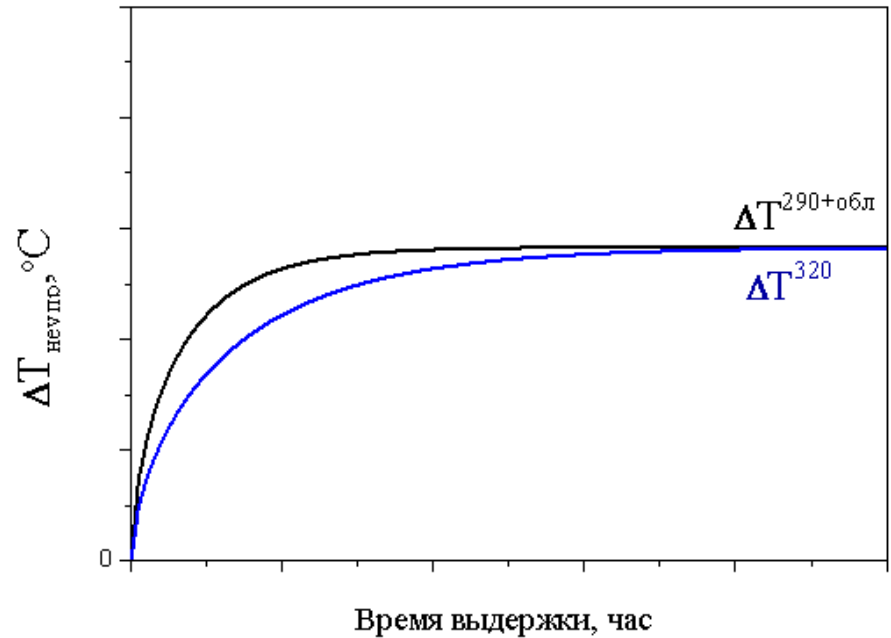
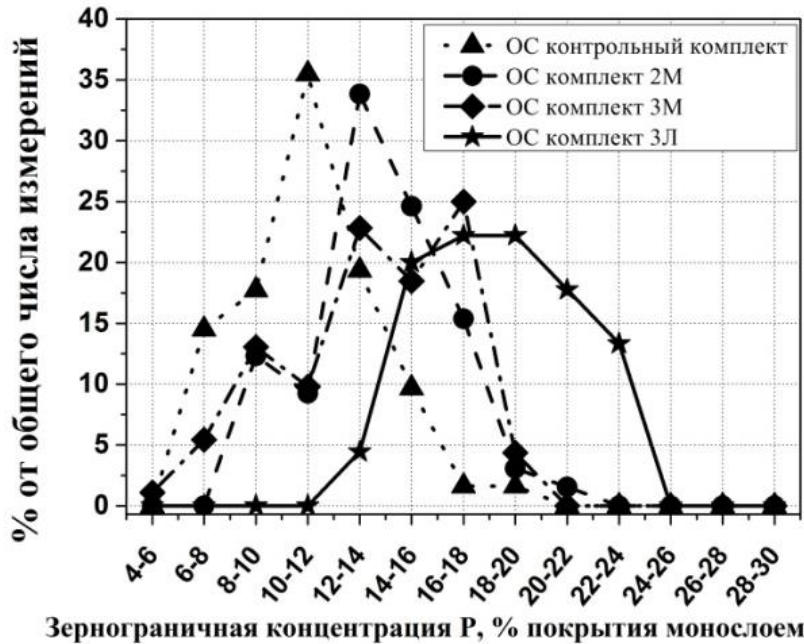
Обработка базы данных
облучаемых ОС:

$$\Delta T_K = 7,24 \cdot F^{0,43} + 38 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Отсутствует необходимость учета
влияния плотности потока на
радиационное охрупчивание ОМ ВВЭР-
1000 после ускоренных облучений



Радиационное охрупчивание МШ неупрочняющий вклад



НА БАЗЕ ДАННЫХ ЛУЧЕВЫХ ОС:

Оже - электронная спектроскопия: $F_{\text{неупр}} \approx 2 \cdot F_T$

$$\Delta T_{\text{неупр}} = 1,3 \cdot C_{\text{Ni}}^4 \cdot \exp(-0,02 \cdot T_{\text{к0}}) \cdot (1 - \exp(-2,2 \cdot 10^{-5} \cdot t))^{0,6}$$



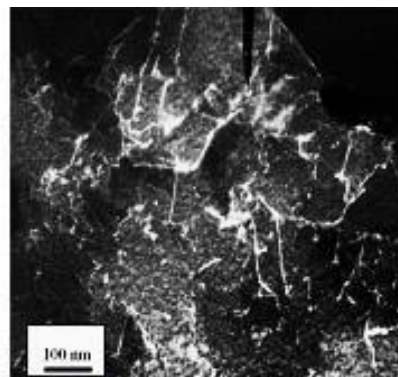
Радиационное охрупчивание МШ упрочняющий вклад

1

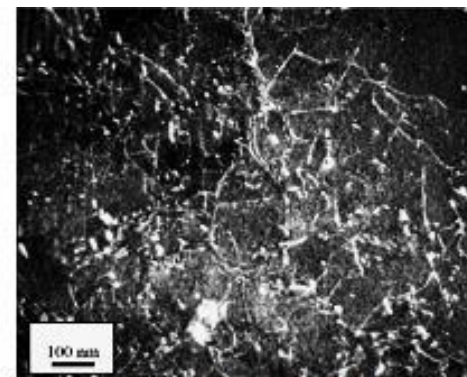
Изменение
плотности
дислокационных
петель от флюенса



$$\Phi = 3,1 \times 10^{23} \text{ н/м}^2$$
$$N = 5-6 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$$

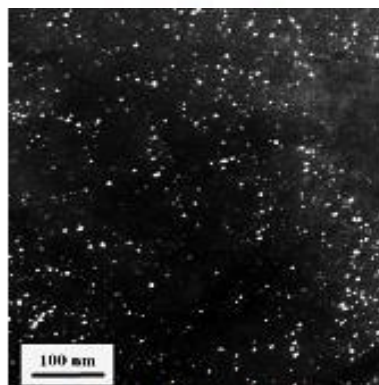


$$\Phi = 6,5 \times 10^{23} \text{ н/м}^2$$
$$N = 10-20 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$$

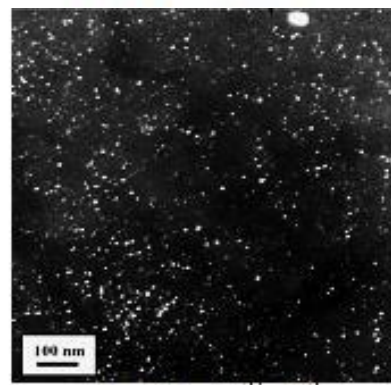


$$\Phi = 11,6 \times 10^{23} \text{ н/м}^2$$
$$N = 400-600 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$$

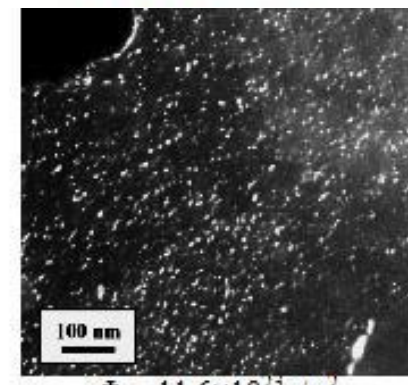
Изменение
плотности
радиационно-
индуцированные
преципитатов от
флюенса



$$\Phi = 3,1 \times 10^{23} \text{ н/м}^2$$
$$N = 70-90 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$$



$$\Phi = 6,5 \times 10^{23} \text{ н/м}^2$$
$$N = 300-500 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$$



$$\Phi = 11,6 \times 10^{23} \text{ н/м}^2$$
$$N = 700-800 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$$



Радиационное охрупчивание МШ упрочняющий вклад

2

$$\Delta T_{\text{унр}} = A_F \cdot \left(\frac{F}{F_0} \right)^n$$

$$A_F(C_{\text{Ni}}, C_{\text{Mn}})$$

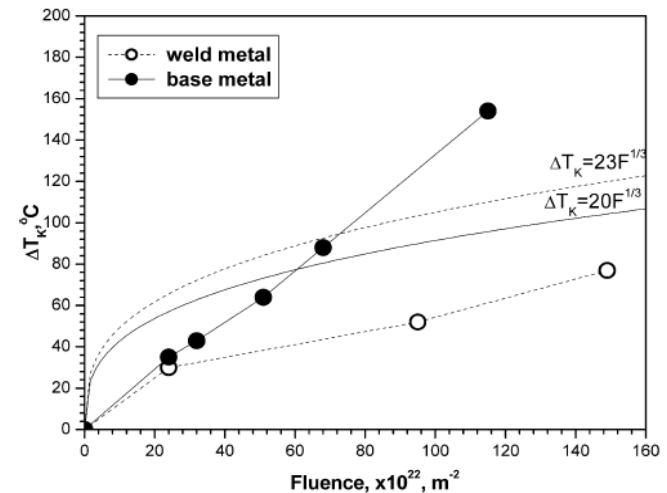
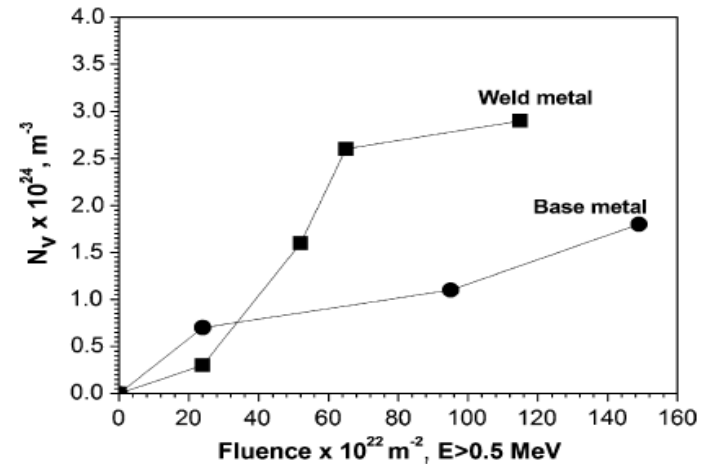
$$n=0.8$$

$$\Delta T_{\text{унр}}(F) = \Delta T_K(F, t) - \Delta F_{\text{неунр}}(t)$$

$$\Delta T_{\text{унр}}(F) = A \cdot C_{\text{Ni}} \cdot C_{\text{Mn}} \cdot \left(\frac{F}{F_0} \right)^{0.8}$$

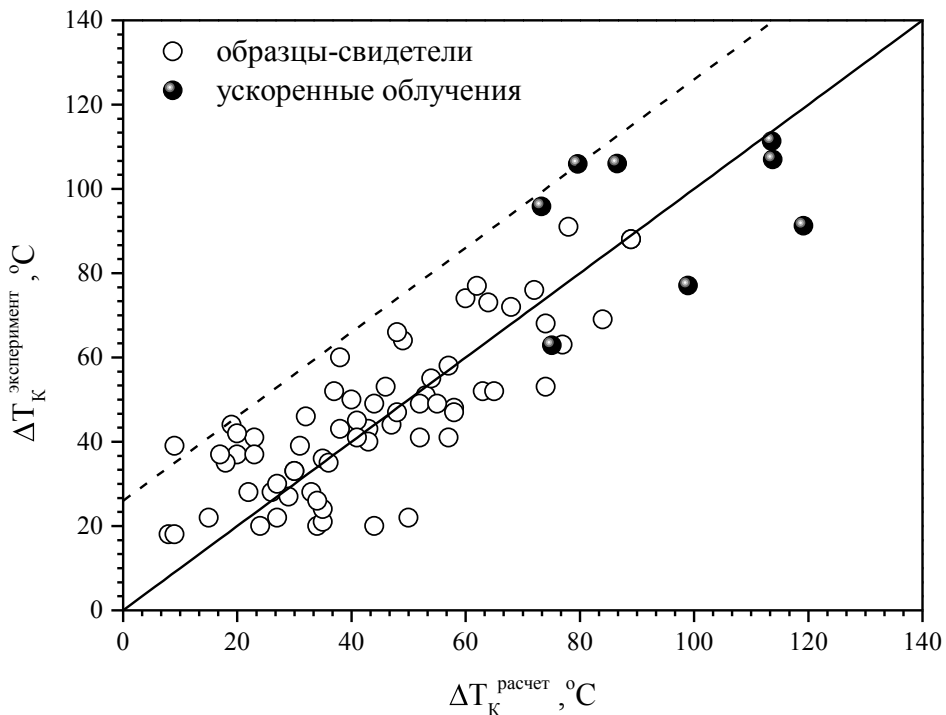
$$\Delta T_{\text{унр}}(F) = 1.48 \cdot C_{\text{Ni}} \cdot C_{\text{Mn}} \cdot \left(\frac{F}{F_0} \right)^{0.8}$$

Зависимость разработана на БД ОС,
ограниченной $F < 5,5 \cdot 10^{23}$ нейтрон/м²



Зависимость изменения T_K при одновременном воздействии температуры и облучения для МШ КР ВВЭР-1000

$$\Delta T_K(F, t) = 1,48 \cdot C_{Ni} \cdot C_{Mn} \cdot F^{0.8} + 1,3 \cdot C_{Ni}^4 \cdot \exp(-0,02 \cdot T_{K0}) \times (1 - \exp(-2,2 \cdot 10^{-5} \cdot t))^{0,6} + 25$$



Для расширения зоны действия до флюенса, соответствующего 60 годам ($F \approx 8 \cdot 10^{23}$ нейтрон/м²) потребовалось проведение **опережающего облучения**

$$\Delta T_K^{OC}(F, t) = \beta \cdot \Delta T_K^{Ускор}(F) + \Delta T_K^{Неупроч.}(t)$$

где $\beta=1,04$ - поправочный коэффициент, учитывающий недооценку «упрочняющей» части сдвига критической температуры хрупкости, полученной при ускоренном облучении



1. Анализ полученной новой базы данных для основного металла показал, что в исследованном диапазоне выдержек (до ~ 200 000 ч) в интервале температур от 310 до 320°C не происходит повышение предела текучести стали 15X2НМФА-А. Существенного изменения критической температуры хрупкости в исследованном диапазоне времен не установлено.

Для ОМ ΔT_T принято равным 0.

2. Анализ базы данных для металла сварного шва позволил построить зависимость сдвига T_T от времени в виде.

$$\Delta T_T = 1,3 \cdot Ni^4 \times \exp(-0,02 \cdot T_{к0}) \times (1 - \exp(-1,1 \cdot 10^{-5} \cdot t))^{0,6}$$

где $1.08\% \leq Ni \leq 1.89\%$

Данная формула применима при наличии экспериментально определенного на образцах-свидетелях значения $T_{к0}$ в исходном состоянии.



3. Разработаны физически обоснованные зависимости для консервативной оценки МШ и ОМ КР ВВЭР-1000, учитывающие деградацию металла КР по упрочняющим и неупрочняющим механизмам под воздействием эксплуатационных факторов:

3.1. Консервативная оценка изменения критической температуры хрупкости сварных соединений стали 15X2НМФА(А) вследствие одновременного воздействия нейтронного облучения до флюенса быстрых нейтронов $8,0 \times 10^{23}$ нейтрон/м² и температуры $290 \pm 10^\circ\text{C}$ описывается зависимостью:

$$\Delta T_{\text{к}} = 1,48 \cdot C_{\text{Ni}} C_{\text{Mn}} F^{0,8} + 1,3 \cdot C_{\text{Ni}}^4 \cdot \exp(-0,02 \cdot T_{\text{к}0}) \times (1 - \exp(-2,2 \times 10^{-5} \cdot t))^{0,6} + 25 \text{ (}^\circ\text{C)},$$

где $1,00\% \leq C_{\text{Ni}} \leq 1,90\%$, $0,40\% \leq C_{\text{Mn}} \leq 1,10\%$, $C_{\text{P}} \leq 0,012\%$.

3.2. Консервативная оценка изменения критической температуры хрупкости стали 15X2НМФА(А) вследствие одновременного воздействия нейтронного облучения до флюенса быстрых нейтронов $8,0 \times 10^{23}$ нейтрон/м² и температуры $290 \pm 10^\circ\text{C}$ описывается зависимостью: $\Delta T_{\text{к}} = 7,24 \cdot F^{0,43} + 38 \text{ (}^\circ\text{C)}.$

