

**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**

---

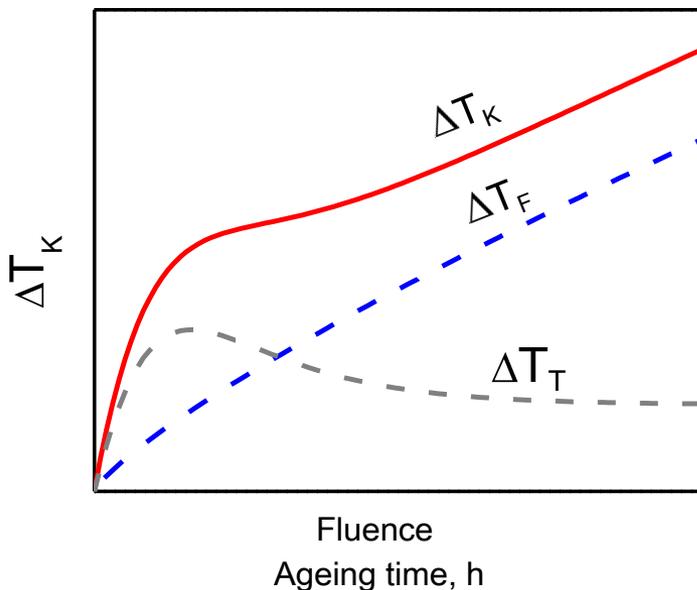
**Москва, Россия 21-23 мая 2014**



# 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  $\alpha$ -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

РАДИАЦИОННОЕ ОХРУПЧИВАНИЕ

ТЕМПЕРАТУРНОЕ  
СТАРЕНИЕ

УПРОЧНЯЮЩИЕ

НЕ УПРОЧНЯЮЩИЕ  
*(при длительном времени  
и/или высоких дозах  
облучения)*

НЕ УПРОЧНЯЮЩИЕ

ОБРАЗОВАНИЕ  
РАДИАЦИОННО  
СТИМУЛИРОВАННЫХ  
ВЫДЕЛЕНИЙ

ОБРАЗОВАНИЕ  
РАДИАЦИОННЫХ  
ДЕФЕКТОВ

РОСТ ЗЕРНОГРАНИЧНЫХ  
СЕГРЕГАЦИЙ ФОСФОРА

РОСТ ЗЕРНОГРАНИЧНЫХ  
СЕГРЕГАЦИЙ ФОСФОРА

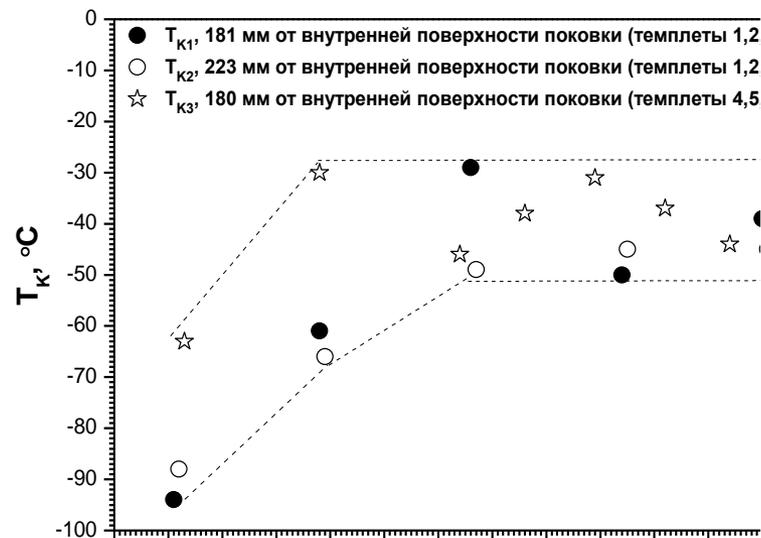
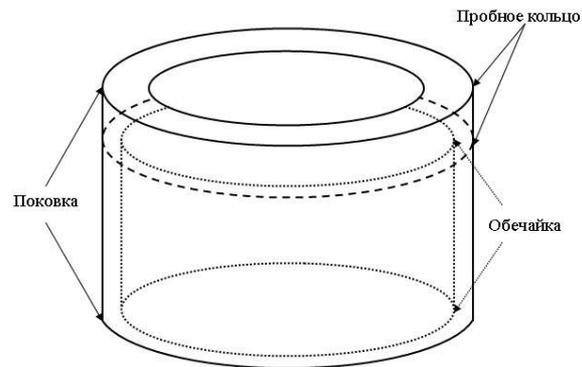
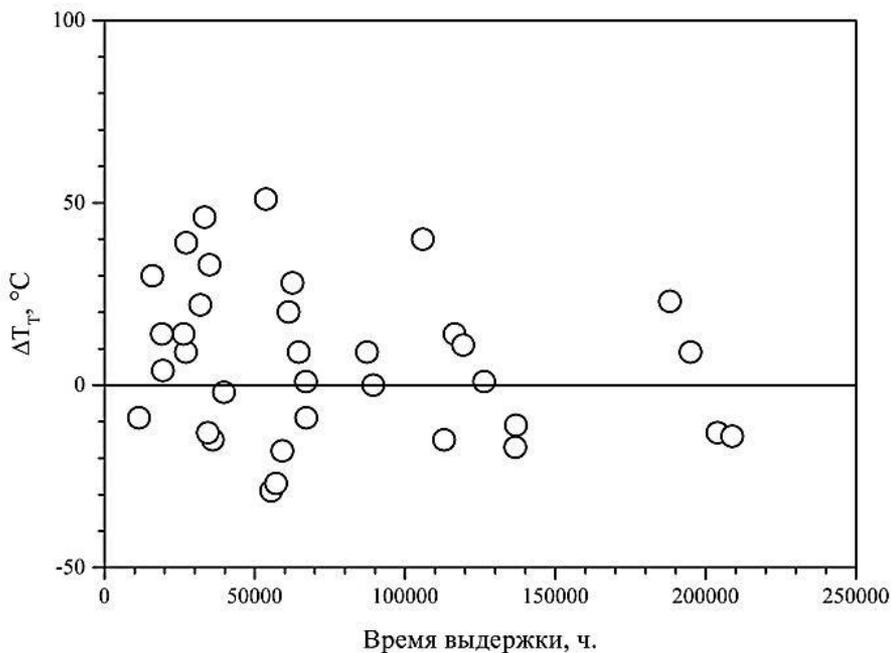
$$\Delta T_K(F, t) = \Delta T_{УПР}(F) + \Delta T_{НЕУПР}(F, t)$$



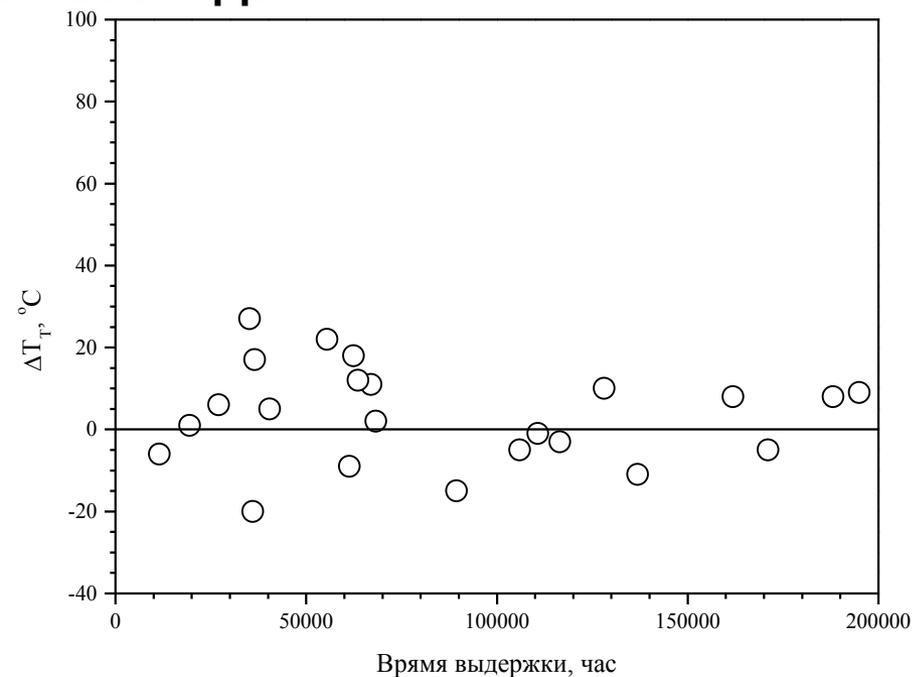
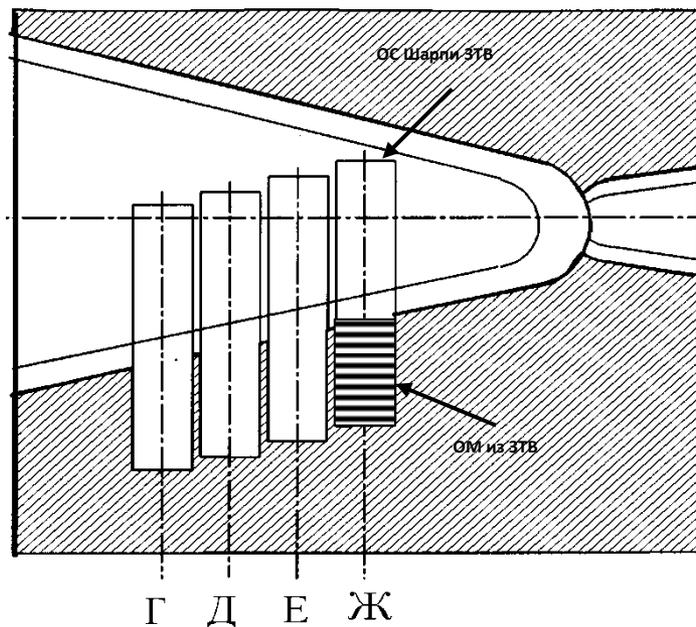
# Температурное старение ОМ

1

## База данных ОС ОМ



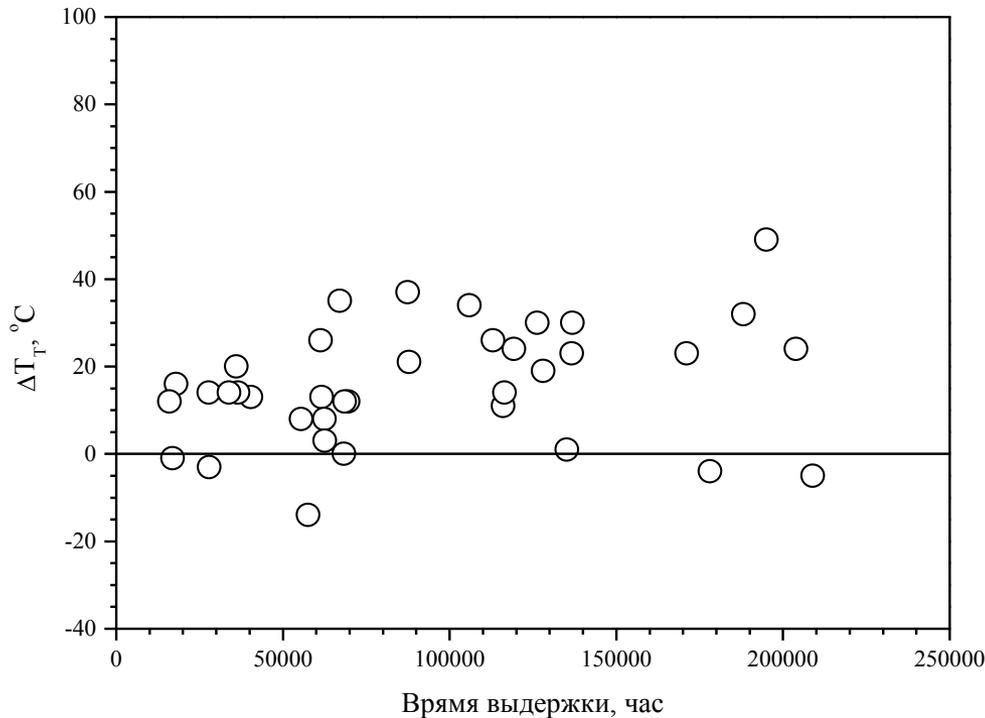
## Получение новой базы данных



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

**$\Delta T_r$  для основного металла равно 0**

## База данных ОС МШ

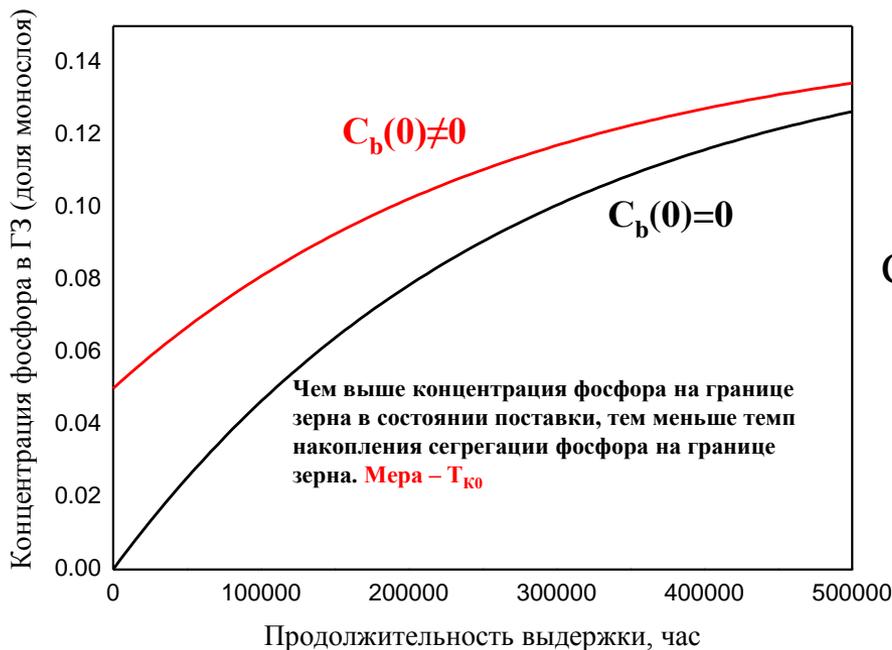


- Изменение  $T_T$  зависит :**
- от времени  $t$
  - от содержание никеля  $C_{Ni}$
  - от характеристики исходного состояния  $T_{к0}$ .

**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;

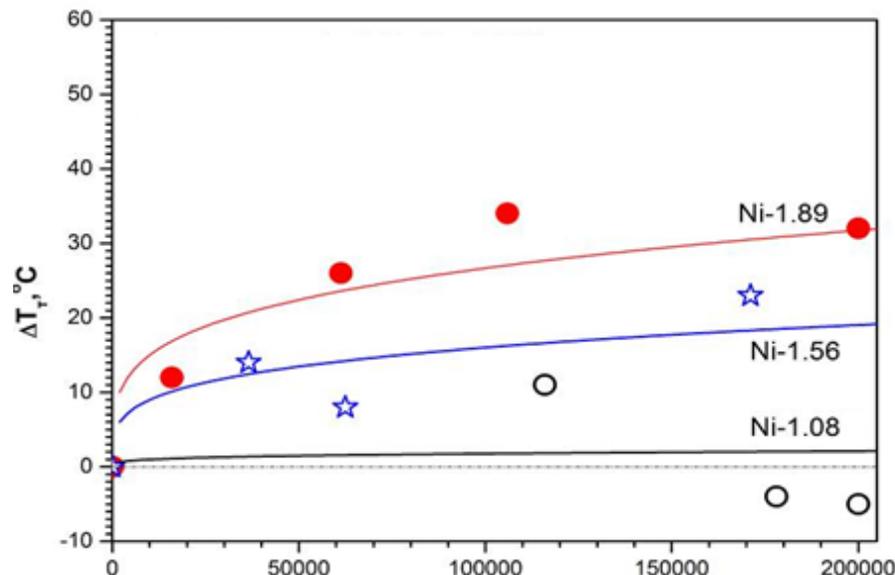
# Температурное старение МШ

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

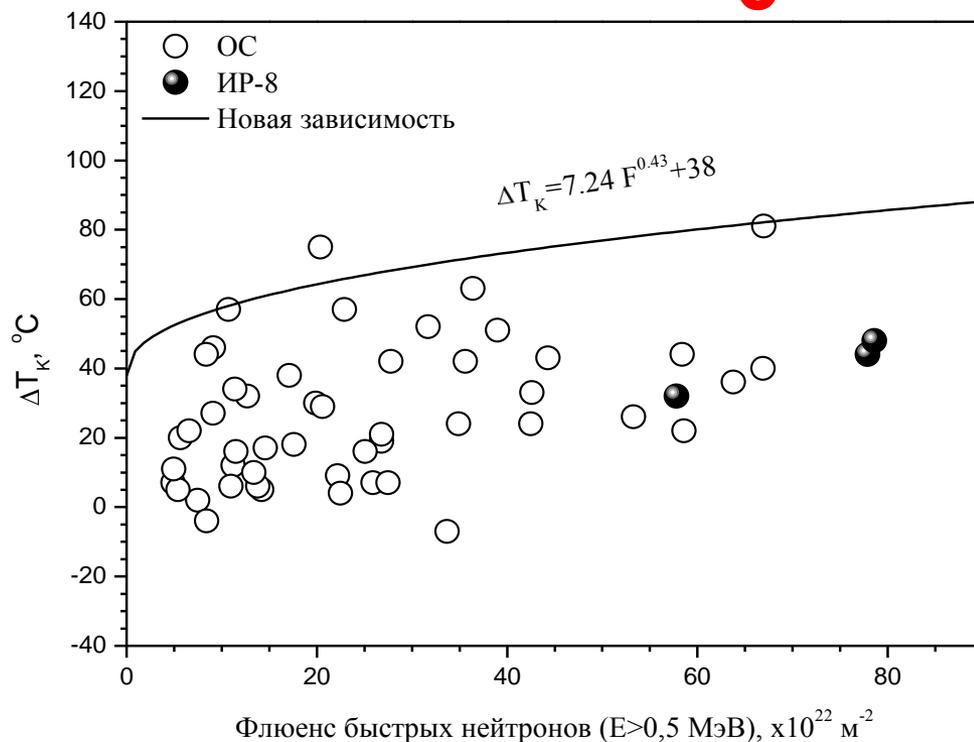
$$\Delta T_K (F, t) = \Delta T_{упр} (F) + \Delta T_{неупр} (t)$$

→ 0

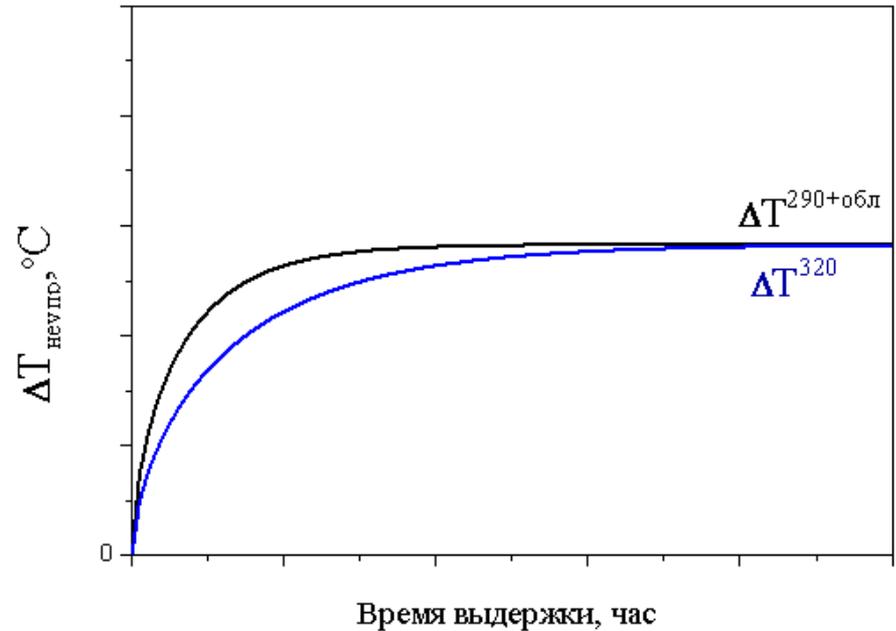
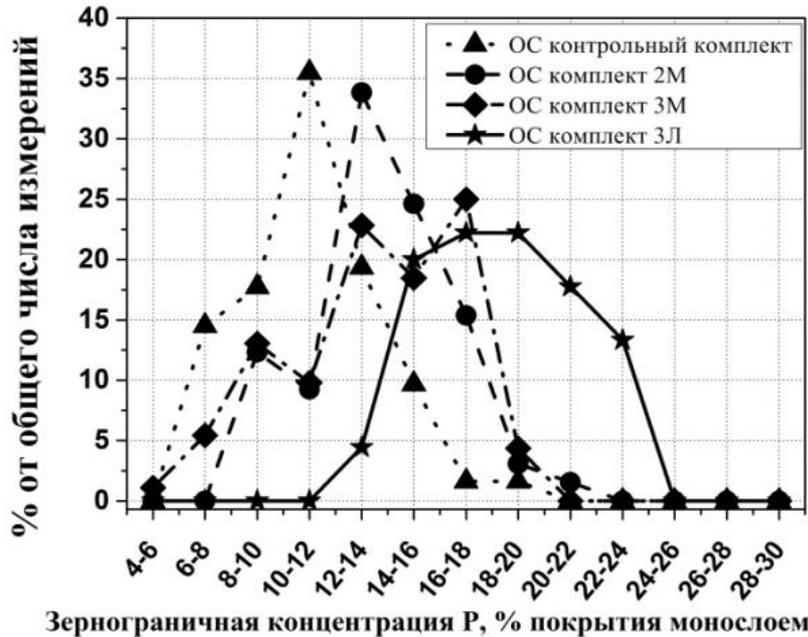
Обработка базы данных  
облучаемых ОС:

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

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:  $F_{неупр} \approx 2 \cdot F_T$

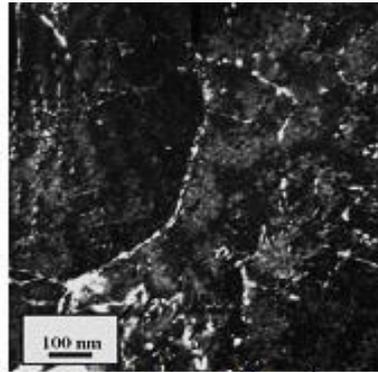
$$\Delta T_{неупр} = 1,3 \cdot C_{Ni}^4 \cdot \exp(-0,02 \cdot T_{к0}) \cdot (1 - \exp(-2,2 \cdot 10^{-5} \cdot t))^{0,6}$$



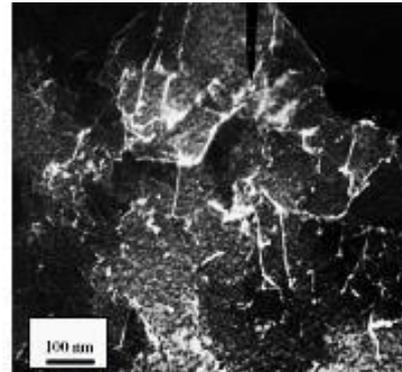
# Радиационное охрупчивание МШ упрочняющий вклад

1

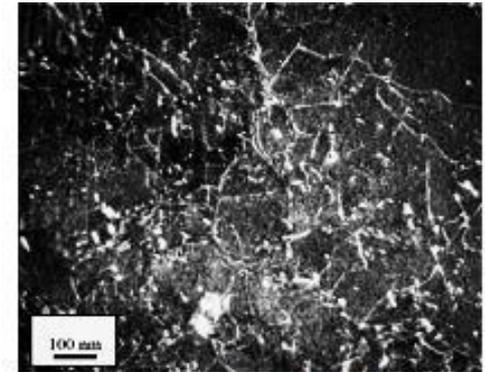
Изменение  
плотности  
дислокационных  
петель от флюенса



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

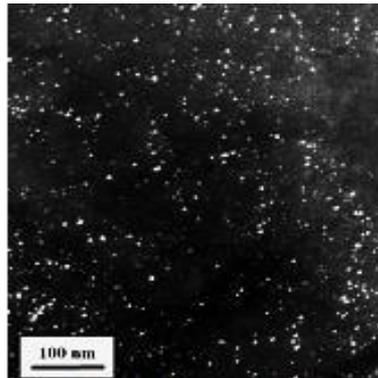


$$\Phi = 6,5 \times 10^{23} \text{ н/м}^2$$
$$N = 10-20 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$$

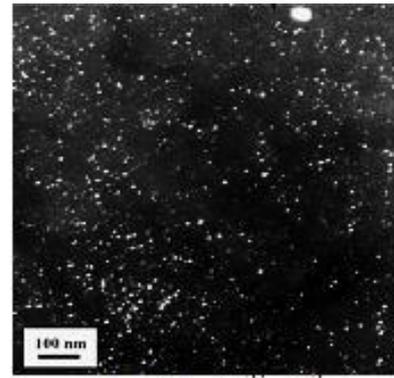


$$\Phi = 11,6 \times 10^{23} \text{ н/м}^2$$
$$N = 400-600 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$$

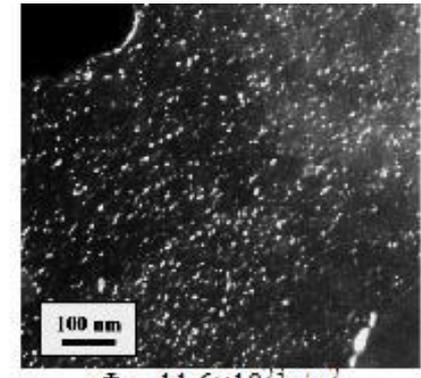
Изменение  
плотности  
радиационно-  
индуцированные  
преципитатов от  
флюенса



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



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



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



# Радиационное охрупчивание МШ

## упрочняющий вклад

2

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

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

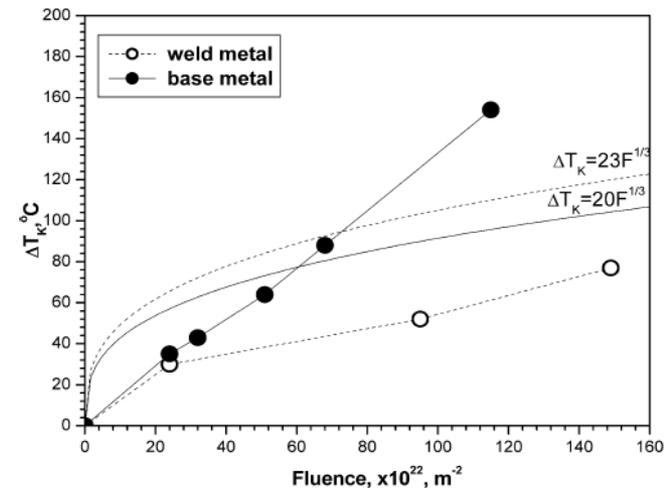
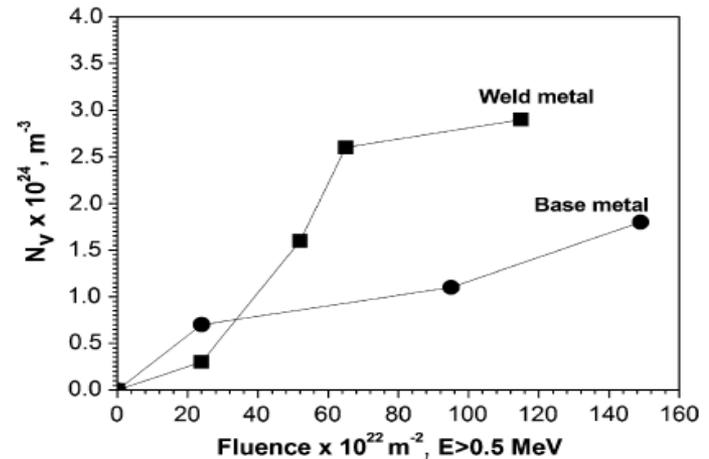
$$n=0.8$$

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

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

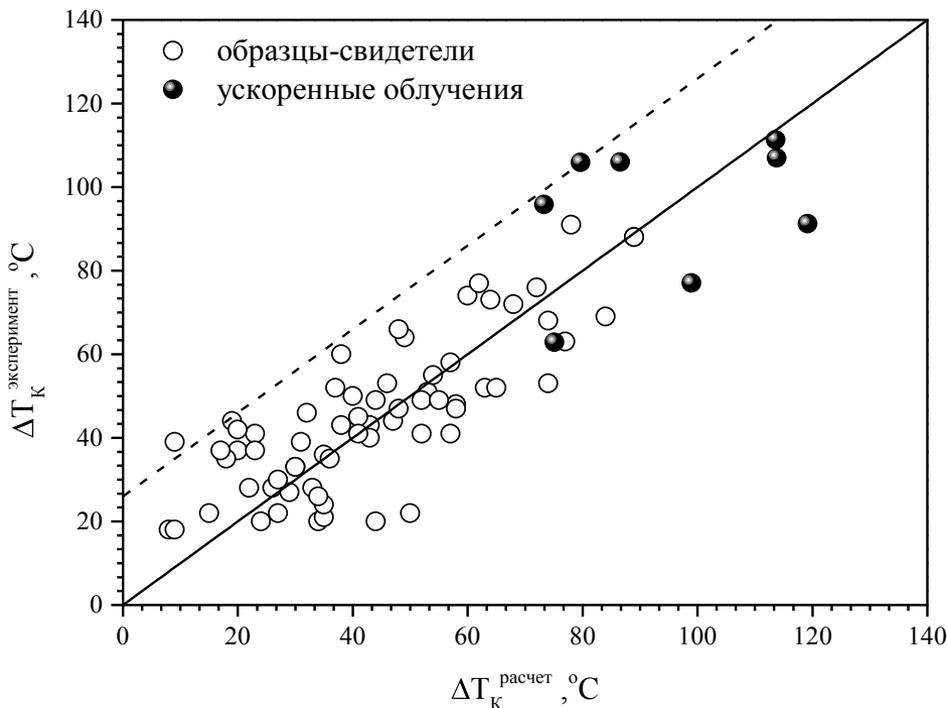
$$\Delta T_{\text{унр}}(F) = 1.48 \cdot C_{\text{Ni}} \cdot C_{\text{Mn}} \cdot \left( \frac{F}{F_0} \right)^{0.8}$$

Зависимость разработана на БД ОС,  
ограниченной  $F < 5,5 \cdot 10^{23}$  нейтрон/м<sup>2</sup>



# 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/м<sup>2</sup>) 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 15Х2НМФА-А. Существенного изменения критической температуры хрупкости в исследованном диапазоне времен не установлено.

**Для ОМ  $\Delta T_T$  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/м<sup>2</sup> 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/м<sup>2</sup> и температуры  $290 \pm 10^\circ\text{C}$  описывается зависимостью:  $\Delta T_{\text{к}} = 7,24 \cdot F^{0,43} + 38 \text{ (}^\circ\text{C)}.$

