



Девятая международная научно-техническая конференция
«Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики»

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ВНУТРИКОРПУСНЫХ УСТРОЙСТВ ВВЭР-1000 ПРИ ПРОДЛЕНИИ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ ДО 60 ЛЕТ

Б.З. Марголин, В.А. Федорова, А.А. Сорокин, А.И. Минкин
ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург

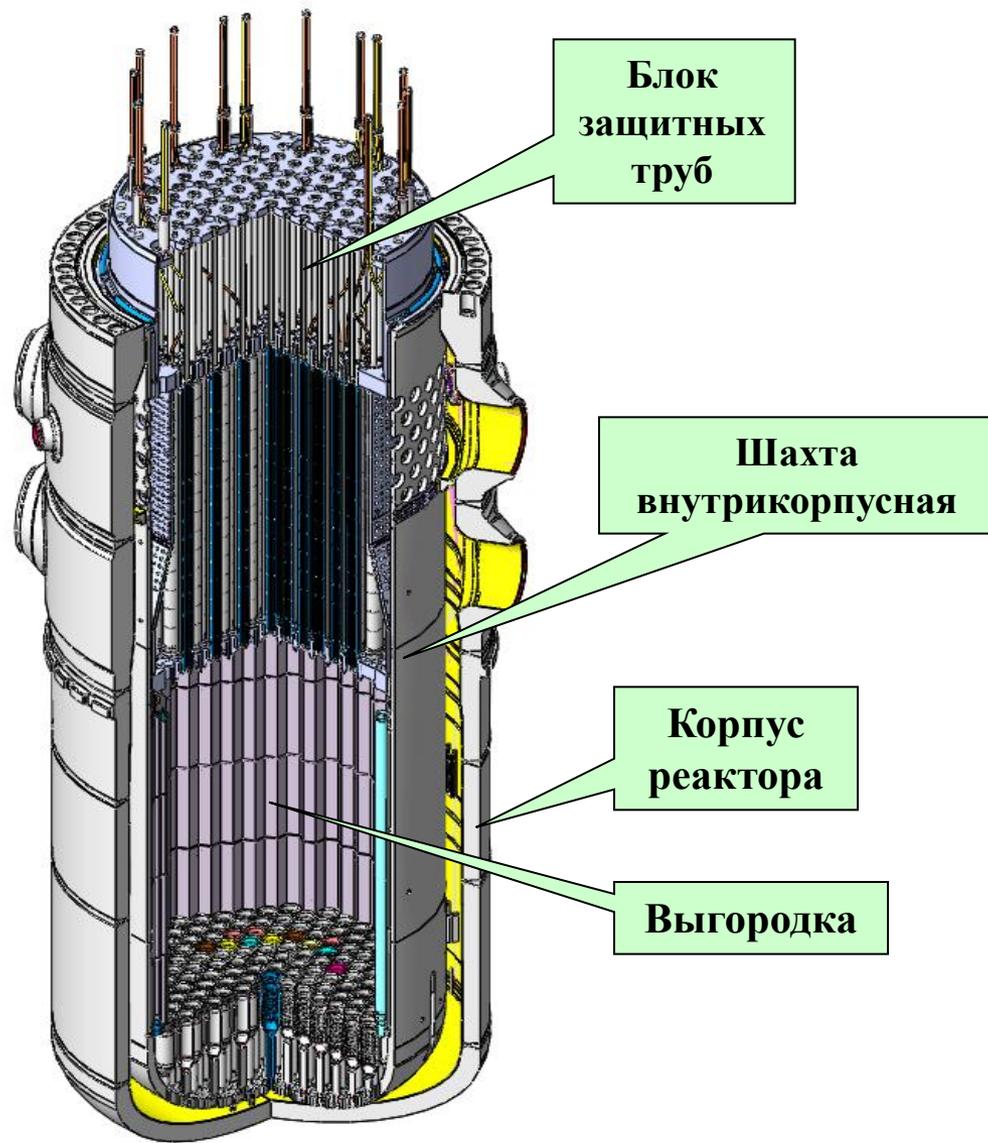
В.А. Пиминов, В.В. Евдокименко
ОАО «ОКБ ГИДРОПРЕСС», Подольск

В.Г. Васильев
ОАО «Концерн «Росэнергоатом», Москва

Докладчик: Б.З. Марголин

21-23 мая, 2014
г. Москва

ВНУТРИКОРПУСНЫЕ УСТРОЙСТВА РЕАКТОРА ВВЭР-1000



Материал:

аустенитная сталь 08Х18Н10Т

Шахта внутрикорпусная:

Обеспечивает проектное размещение и ориентирование хвостовиков ТВС в фиксированных ячейках днища, распределение теплоносителя на входе в активную зону и на выходе из реактора.

Выгорodka:

Обеспечивает железобетонную защиту корпуса реактора от потока нейтронов

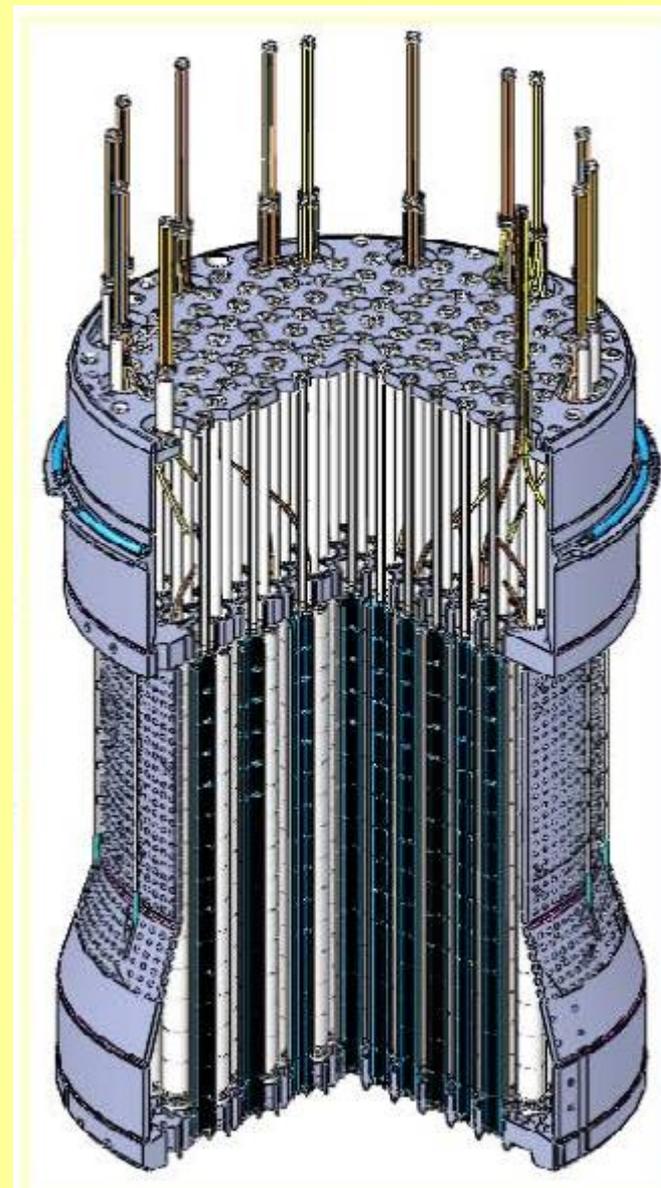
Блок защитных труб (БЗТ):

Обеспечивает размещение и защиту от динамического воздействия потока теплоносителя органов регулирования и сборок внутриреакторных детекторов.



БЛОК ЗАЩИТНЫХ ТРУБ

Блок защитных труб
обеспечивает размещение и
защиту от динамического
воздействия потока
теплоносителя органов
регулирования и сборок
внутриреакторных детекторов.





ШАХТА ВНУТРИКОРПУСНАЯ

Шахта внутрикорпусная обеспечивает:
проектное размещение и ориентирование
хвостовиков ТВС в фиксированных
ячейках днища, распределение
теплоносителя на входе в активную зону и
на выходе из реактора

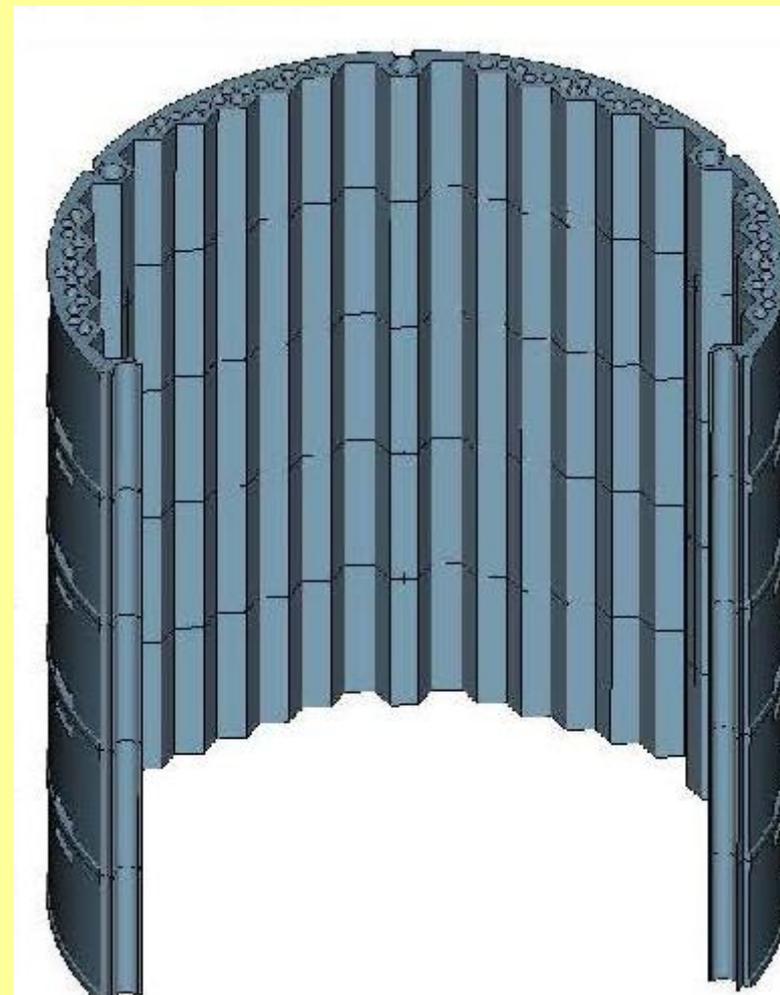


ВЫГОРОДКА РЕАКТОРА ТИПА ВВЭР-1000

Выгородка:

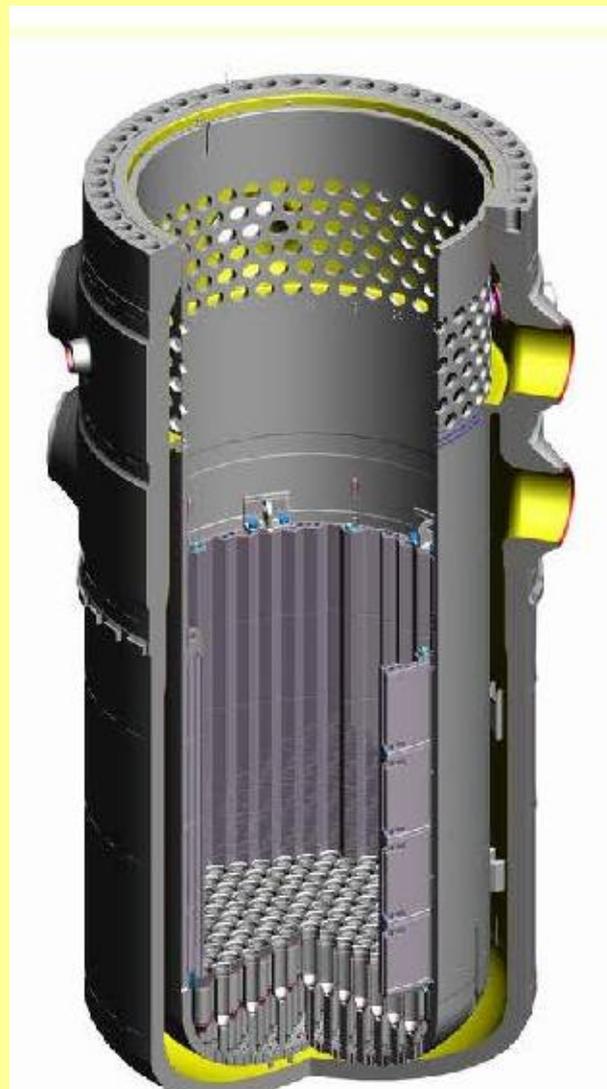
обеспечивает железобетонную защиту корпуса реактора от потока нейтронов

- Внутренний контур выгородки выполнен в соответствии с наружным контуром сечения активной зоны с конструктивным зазором между гранями выгородки и дистанционирующими решетками периферийных ТВС.
- В кольцах выгородки выполнены продольные каналы, через которые проходит теплоноситель, охлаждающий металл выгородки. Выгородка устанавливается в корпус и выгружается из корпуса совместно с шахтой, выемка выгородки в течение ее срока службы из шахты не предусматривается.



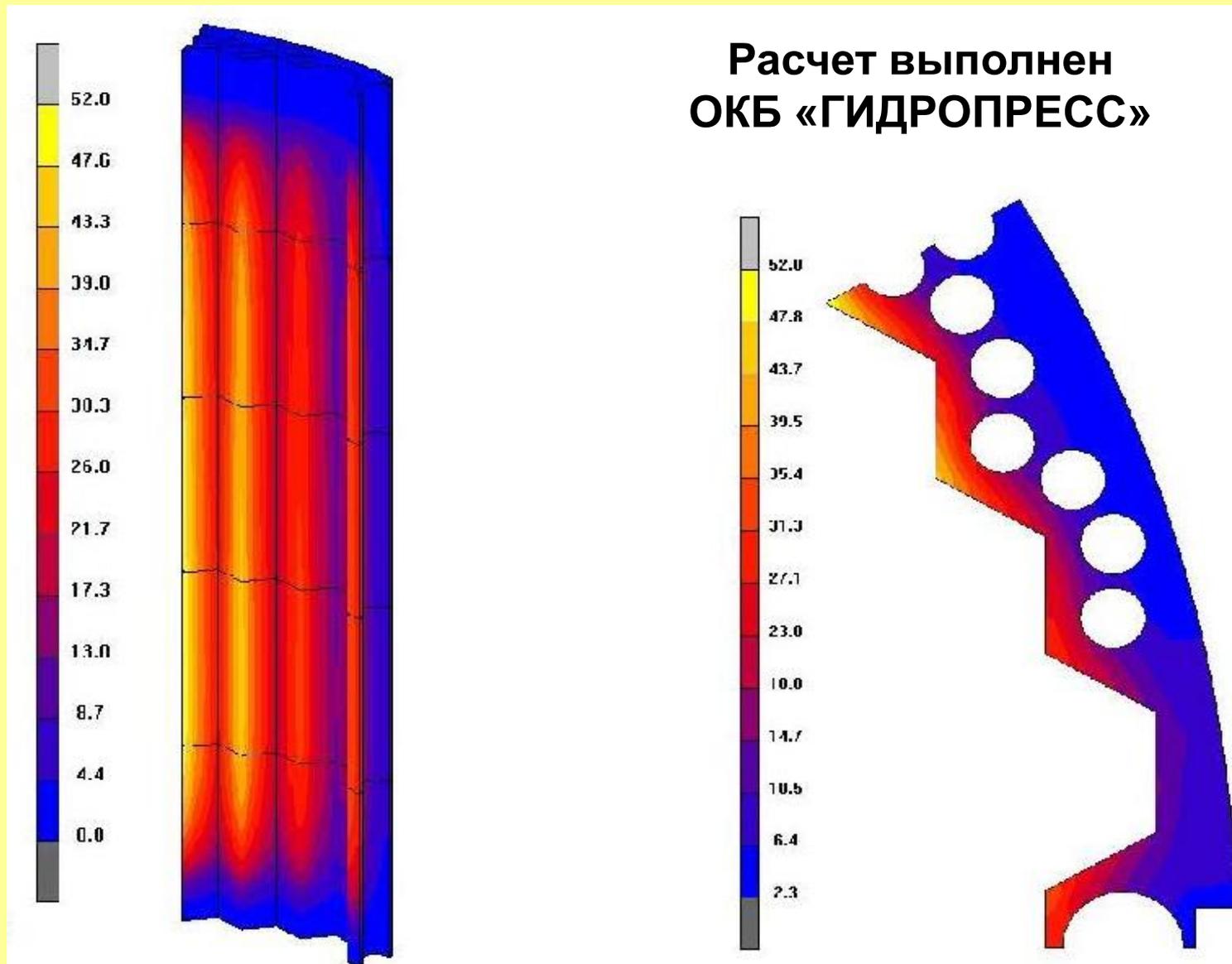


КОРПУС РЕАКТОРА С УСТАНОВЛЕННЫМИ ШАХТОЙ И ВЫГОРОДКОЙ



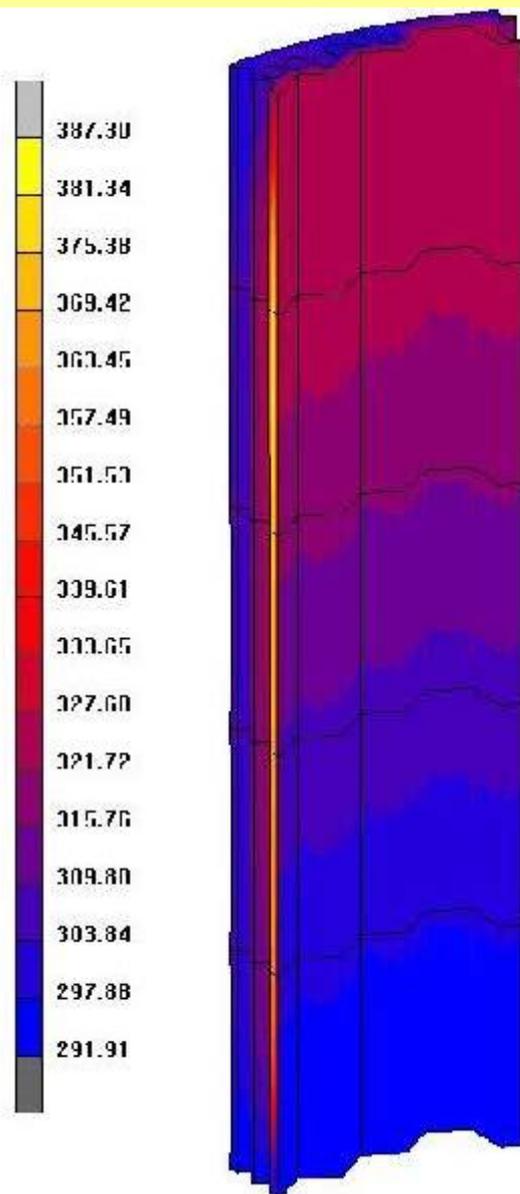


РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВРЕЖДАЮЩЕЙ ДОЗЫ В ВЫГОРОДКЕ ПОСЛЕ 30 ЛЕТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВВЭР-1000

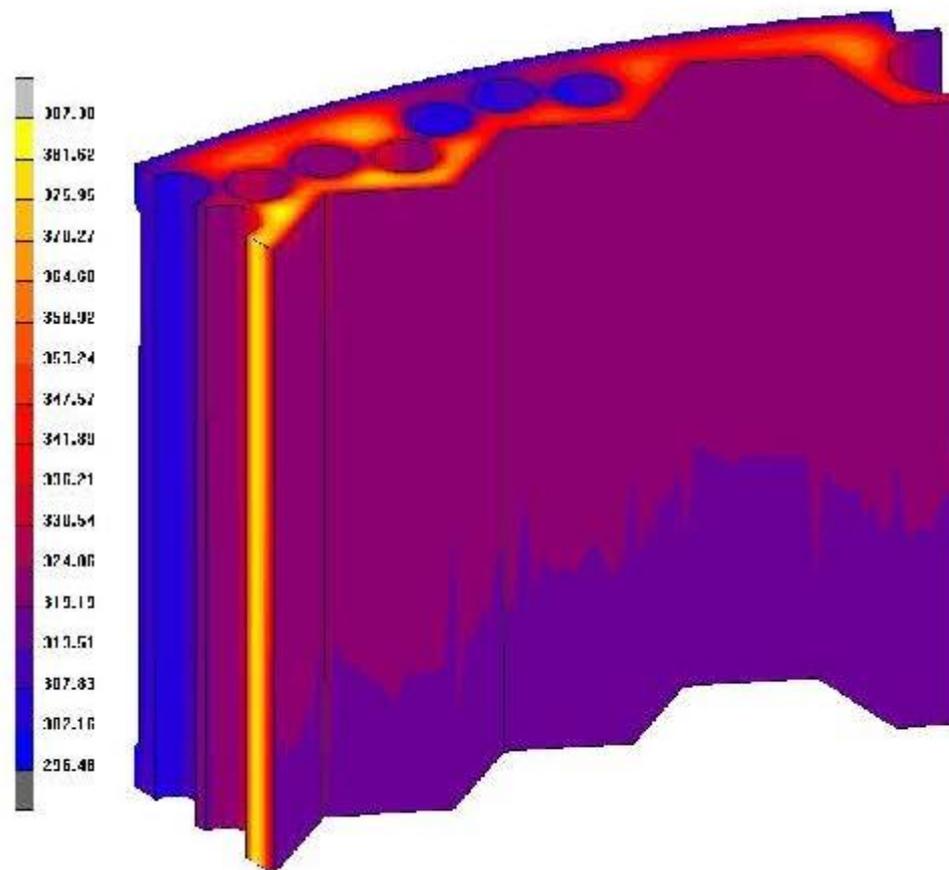




РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ВЫГОРОДКЕ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ВВЭР-1000



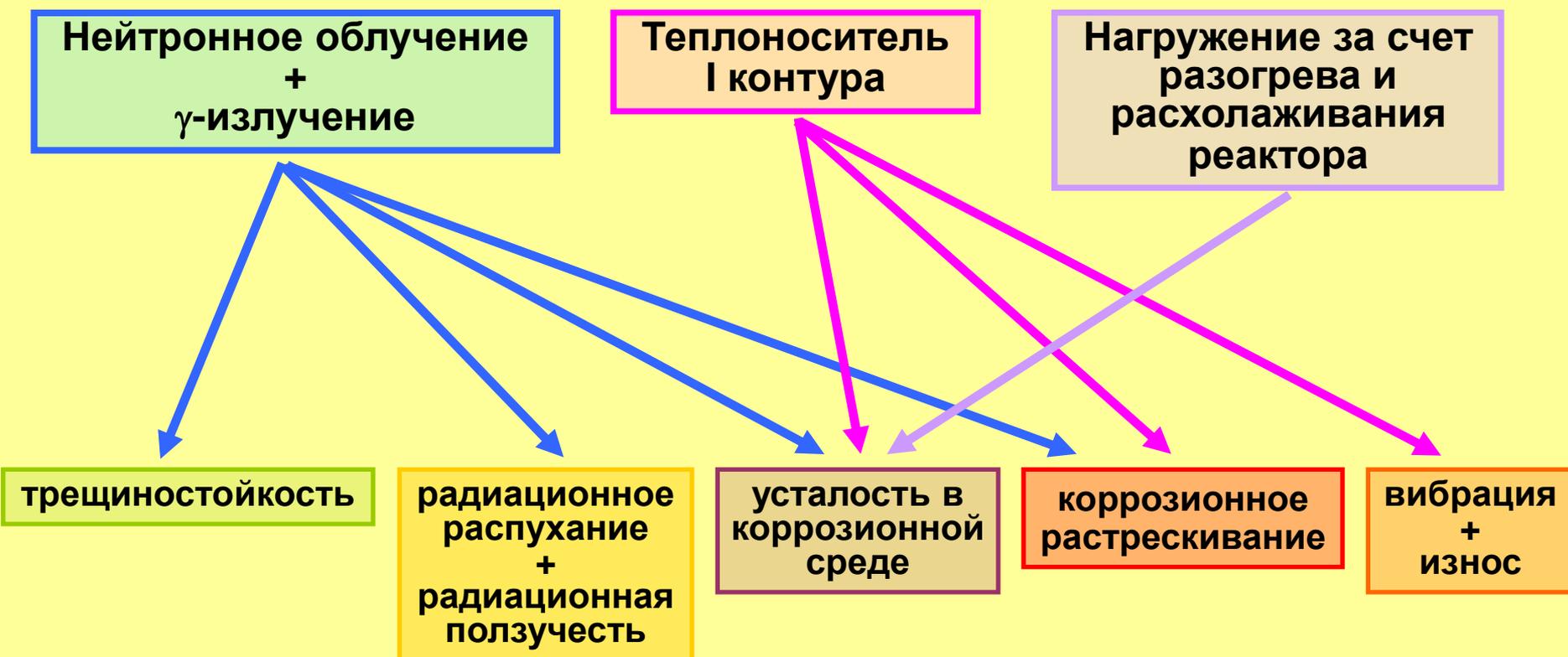
Расчет выполнен
ОКБ «ГИДРОПРЕСС»





ОСНОВНЫЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ВКУ

Материал ВКУ - сталь X18H10T



ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ОКАЗЫВАЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ НА ЭЛЕМЕНТЫ ВКУ

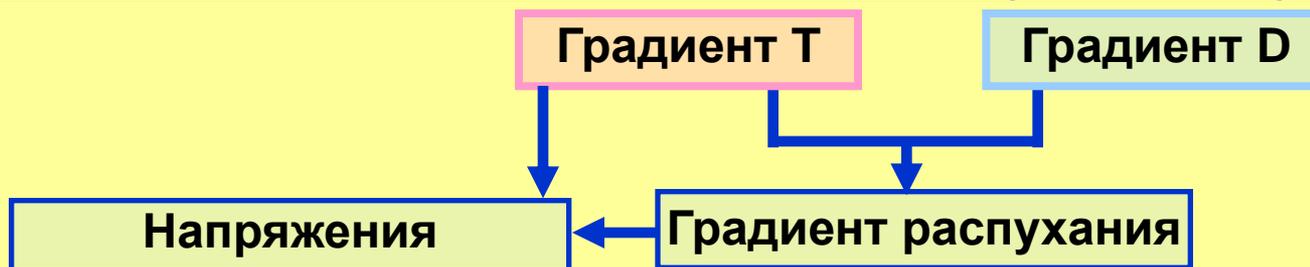
1. Нейтронное облучение

Максимальная скорость набора повреждающей дозы $\frac{dD}{dt} \approx (1,7 - 2) \frac{\text{сна}}{\text{год}}$

2. Температура

Максимальная температура облучения $T \approx 400$ °С (за счет γ -разогрева)
(температура теплоносителя I контура $290 \div 320$ °С)

3. Напряжения, вызванные градиентом температуры и распухания



4. Напряжения, вызванные динамическим нагружением ВКУ при землетрясениях и других авариях

5. Изменение геометрических размеров элементов ВКУ вследствие радиационного распухания и радиационной ползучести

6. Водная среда теплоносителя I контура

МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ ВКУ ВВЭР-1000, РАЗРАБОТАННЫЕ ДО 2012г

ОТ: РОСЭНЕРГОАТОМ

ТЕЛ: 7106269

17 ИЮН. 2011 03:58PM СТР1

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Российский государственный концерн по производству электрической
и тепловой энергии на атомных станциях»
(КОНЦЕРН «РОСЭНЕРГОАТОМ»)

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель Генерального
директора – технический директор

Н.М. Сорокин

2007

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ ВКУ ВВЭР-1000
ПРИ ПРОДЛЕНИИ СРОКА СЛУЖБЫ
1.6.1.08.0018-2007

Открытое акционерное общество
«Российский концерн по производству электрической
и тепловой энергии на атомных станциях»
(ОАО «Концерн Росэнергоатом»)

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель Генерального
директора – директор по
производству и эксплуатации АЭС
ОАО «Концерн Росэнергоатом»

А.В. Шутиков

"17" 06 2011

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ ВКУ ВВЭР-1000
ПРИ ПРОДЛЕНИИ СРОКА СЛУЖБЫ
1.6.1.08.0018-2007/2011



ЗАДАЧИ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ МЕТОДИКИ

- Экспериментально подтвердить до повреждающей дозы 150 сна зависимости физико-механических свойств для материала ВКУ.
- Обоснование и уточнение влияния напряжений на темп радиационного распухания.
- Ввести учет влияния радиационного распухания на прочность, пластичность и трещиностойкость материалов ВКУ, а также на сопротивление зарождению и росту трещины по механизму усталости.
- Откорректировать и обосновать подход к оценке коррозионного растрескивания материала ВКУ при облучении в реакторах типа ВВЭР.
- Ввести процедуру, позволяющую снизить консерватизм оценки радиационного распухания и формоизменения для элементов ВКУ конкретного энергоблока по результатам измерения геометрии его выгородки.
- Ввести учет формирования зон с предельным охрупчиванием, обусловленным радиационным распуханием, приводящим к фазовому $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращению и/или катастрофическому снижению трещиностойкости.
- Ввести учет возможного подраста трещин в элементах ВКУ на фоне радиационной ползучести.



ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛА ЭЛЕМЕНТОВ БОКОВОГО ОТРАЖАТЕЛЯ РЕАКТОРА БОР-60 (СБОРКИ Э-65 и БМ-7) И МЕТАЛЛА ЧЕХЛА КНИ РЕАКТОРА ВВЭР

Верификация зависимостей физико-механических свойств проводилась на базе исследования металла экранныхборок Э-65 и БМ-7 бокового отражателя БОР-60, изготовленных из стали 12Х18Н10Т.

Сборка БМ-7 бокового отражателя БОР-60 была облучена до доз **30-46 сна** при **T=320-450°C** в процессе эксплуатации в составе реактора в течение 15 лет.

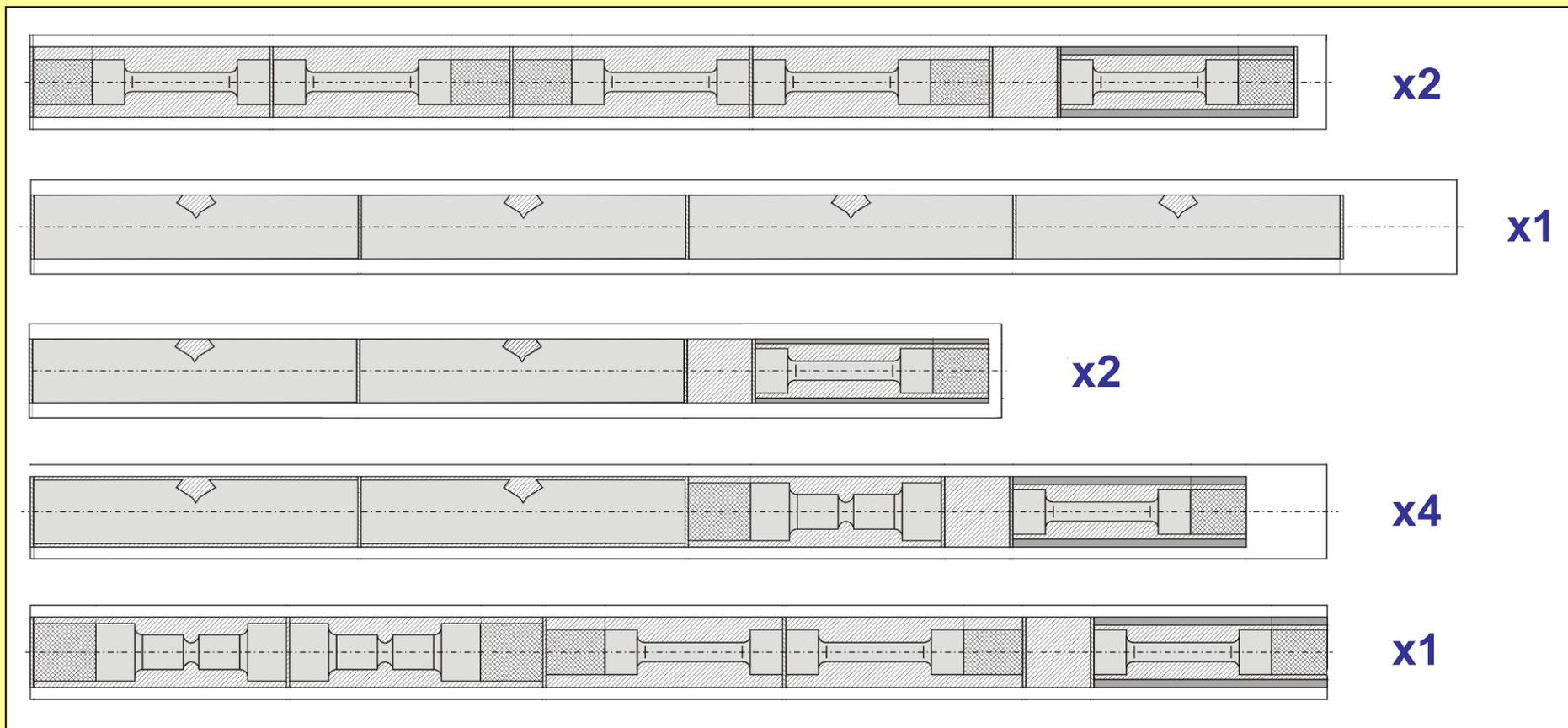
Сборка Э-65 бокового отражателя БОР-60 была облучена до доз **100-150 сна** при **T=320-370°C** в процессе эксплуатации в составе реактора в течение 41 года.

Чехол КНИ эксплуатировался в реакторе ВВЭР-1000 в течение 3 кампаний. Набранная доза составила **11-14 сна**.



ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛА ЭЛЕМЕНТОВ БОКОВОГО ОТРАЖАТЕЛЯ Э-65 И БМ-7 РЕАКТОРА БОР-60

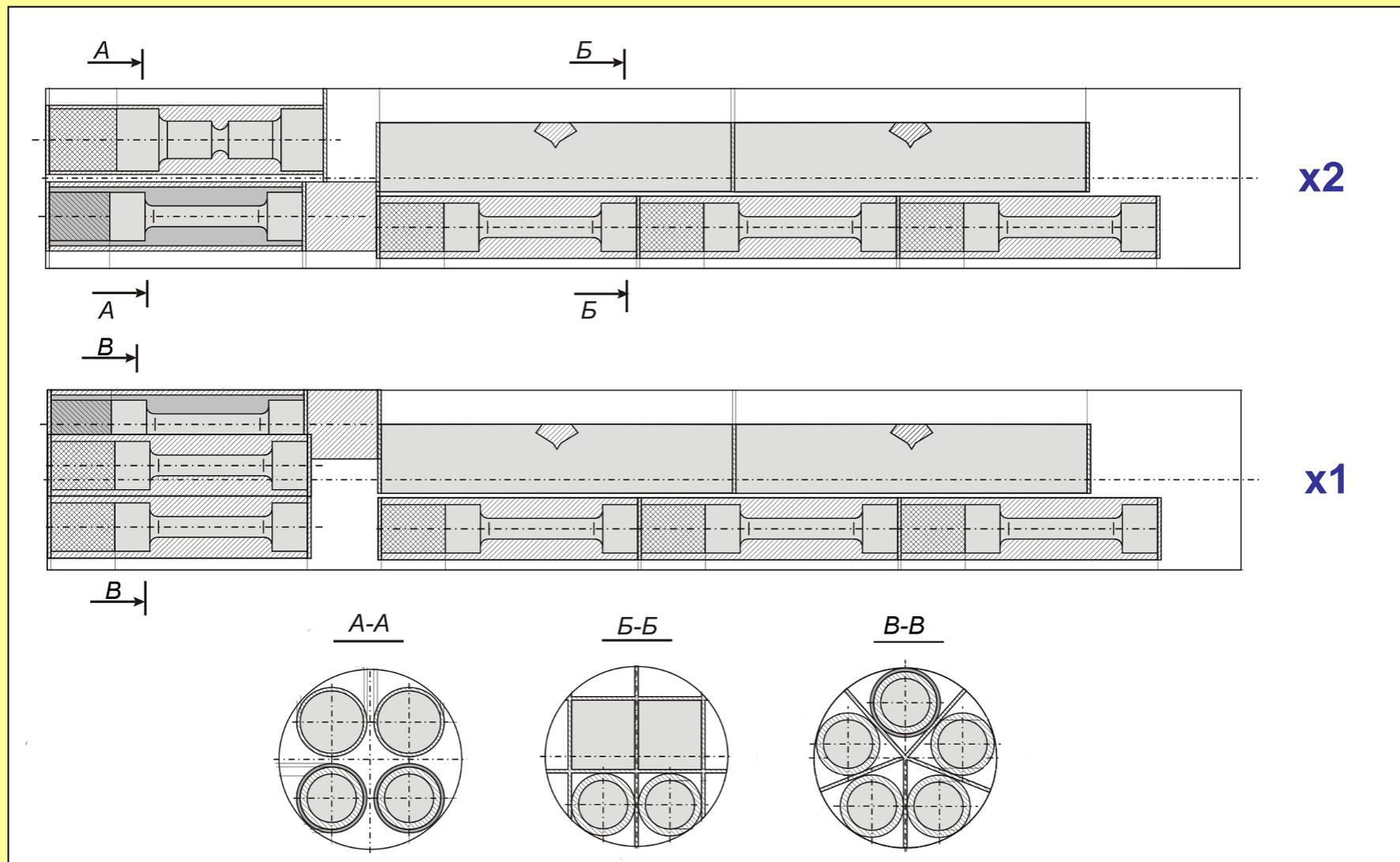
Схема разрезки стержней бокового отражателя БМ-7





ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛА ЭЛЕМЕНТОВ БОКОВОГО ОТРАЖАТЕЛЯ Э-65 И БМ-7 РЕАКТОРА БОР-60

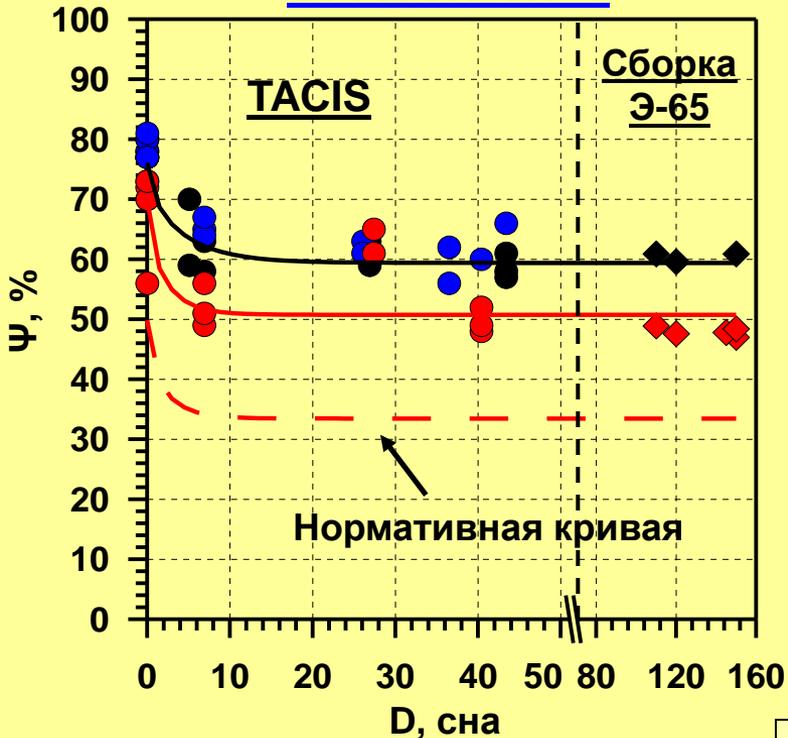
Схема разрезки сердечника бокового отражателя Э-65





ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА КРИТИЧЕСКУЮ ДЕФОРМАЦИЮ И СУЖЕНИЯ В ШЕЙКЕ В ОТСУТСТВИЕ РАСПУХАНИЯ

Сталь X18H10T



Металл шва



$$\epsilon_f = -\ln\left(1 - \frac{\Psi}{100\%}\right)$$

Аппроксимация относительного снижения критической деформации для консервативности выполнена для $T_{исп} = 290-350$ С:

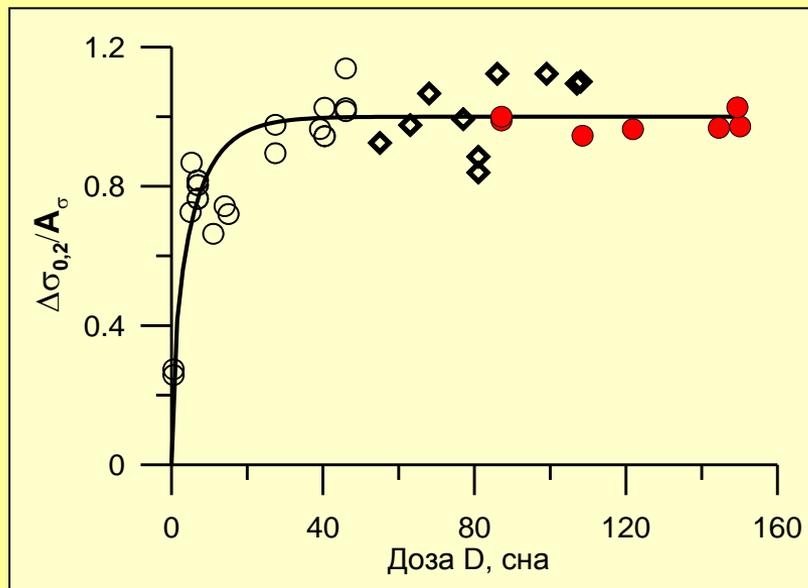
$$\frac{\Delta\epsilon_f}{\epsilon_f^0} = 0,41 \cdot [1 - \exp(-0,37 \cdot D)]^{0,5}$$

$$\frac{\Delta\epsilon_f}{\epsilon_f^0} = 0,52 \cdot [1 - \exp(-0,37 \cdot D)]^{0,5}$$

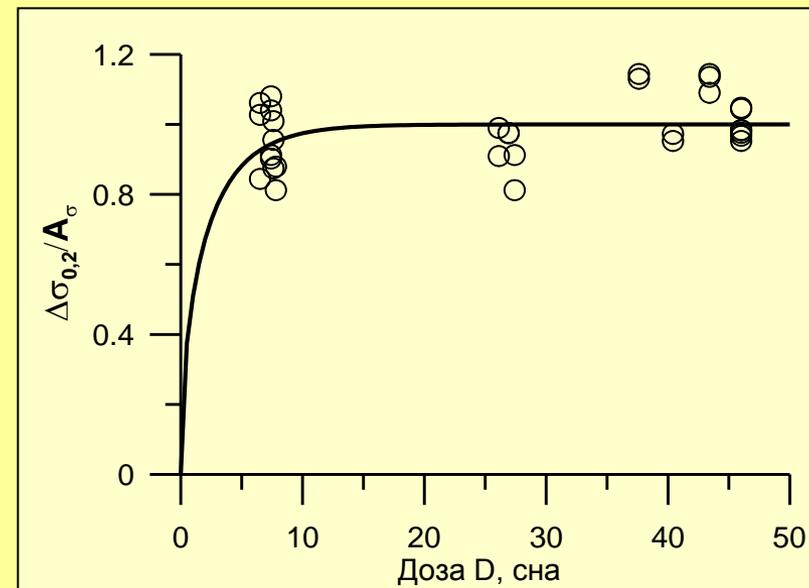


ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ В ОТСУТСТВИЕ РАСПУХАНИЯ

Сталь X18H10T



Металл шва



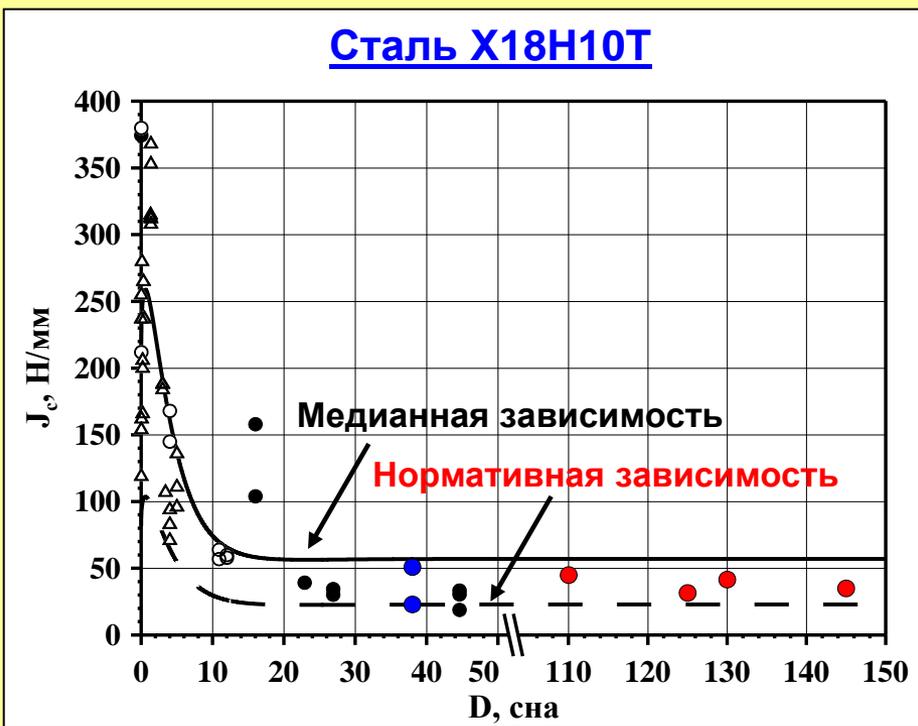
- – экспериментальные данные, полученные в рамках проекта TACIS;
- ◇ - данные по металлу сборки Э-182;
- - данные по металлу сборки Э-65;

- – экспериментальные данные, полученные в рамках проекта TACIS;

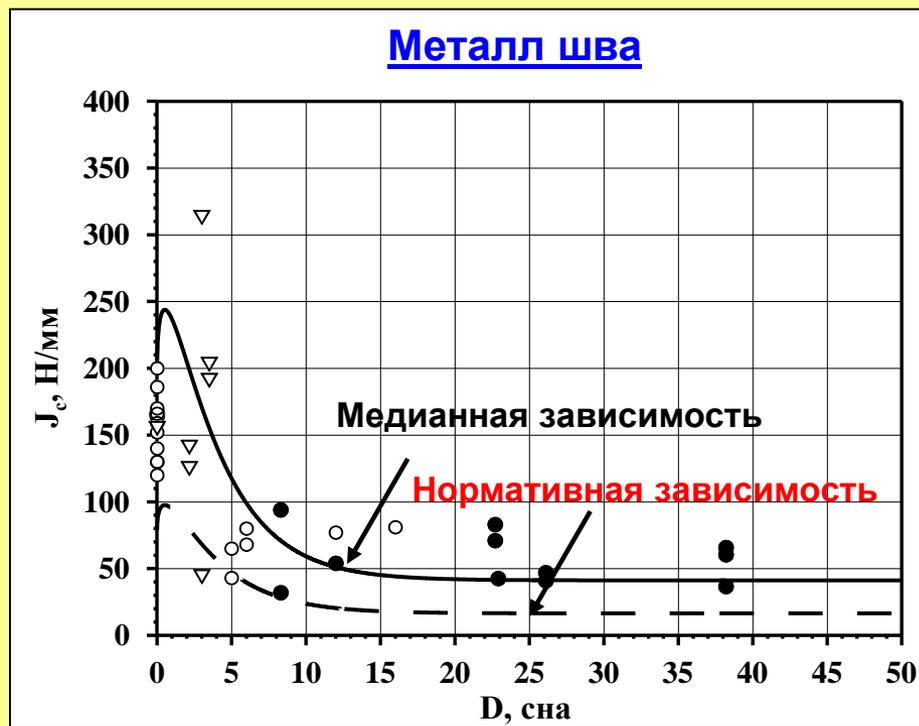


ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛА ВКУ В ОТСУТСТВИЕ РАСПУХАНИЯ

Сталь X18H10T



Металл шва



- , ○, △ – экспериментальные данные по сталям типа X18H9 и X18H10T;
- - данные по металлу сборки БМ-7;
- - данные по металлу сборки Э-65;

- ◆, ◇, ▽ – экспериментальные данные по металлу шва для сталей типа X18H9 и X18H10T;

$$J_{c,OM}^{обл}(D) = 0,27 \cdot \sigma_{flow}^{обл} \cdot (0,1 + 0,9 \cdot \exp(-0,3 \cdot D))$$

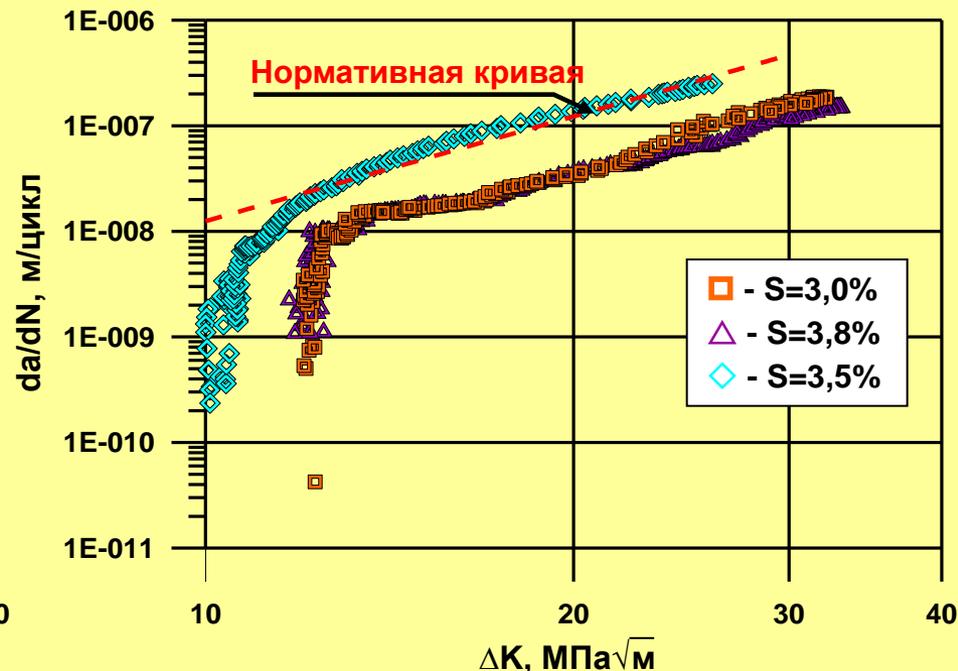
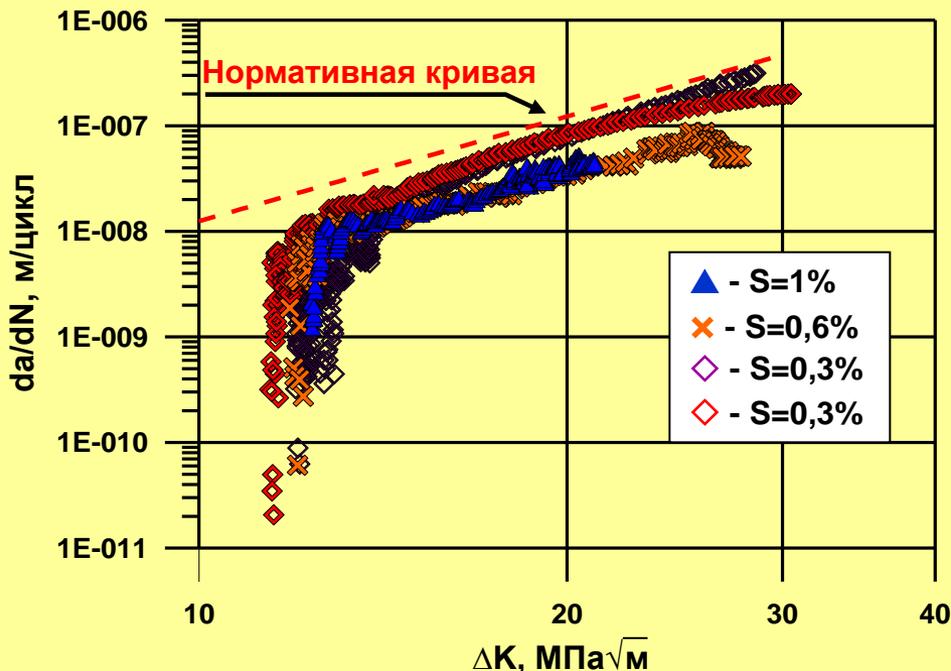
$$J_{c,МШ}^{обл}(D) = 0,19 \cdot \sigma_{flow}^{обл} \cdot (0,1 + 0,9 \cdot \exp(-0,3 \cdot D))$$



ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СКОРОСТЬ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ

Без распухания

С распуханием



Вывод: в отсутствие распухания скорость роста усталостной трещины в облученном материале ВКУ не превышает нормативной кривой, полученной для материала в исходном состоянии

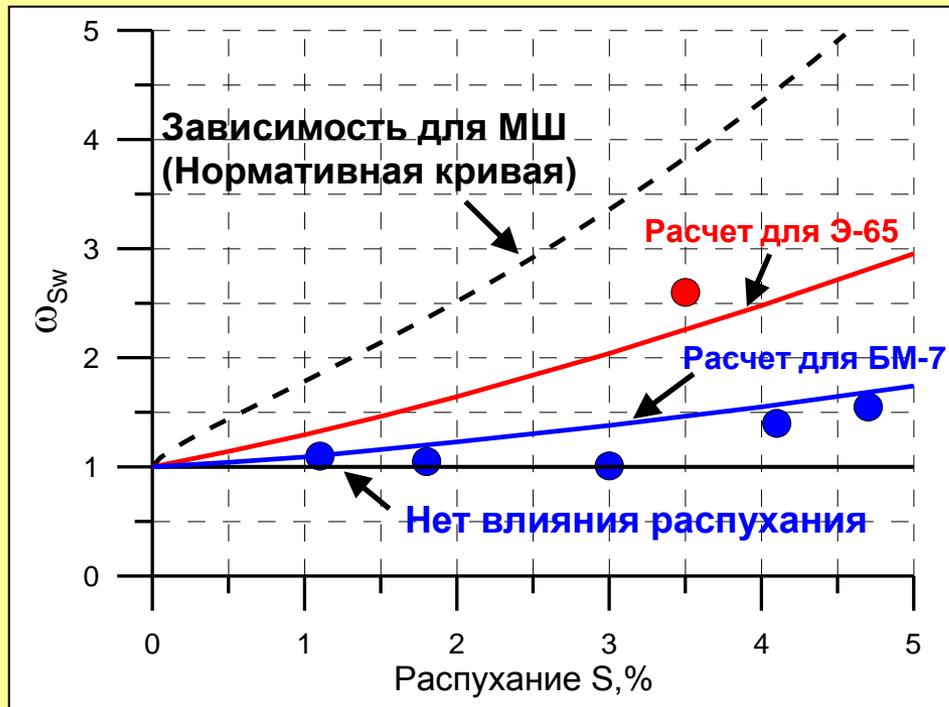
Вывод: распухание увеличивает скорость роста трещины по отношению к исходному состоянию

$$\frac{dl}{dN} = 5,2 \cdot 10^{-12} \cdot \left(\frac{\Delta K}{(1-R)^{0,25}} \right)^{3,3}$$

$$\frac{dl}{dN} = \omega_{S_w} \cdot 5,2 \cdot 10^{-12} \cdot \left(\frac{\Delta K}{(1-R)^{0,25}} \right)^{3,3}$$

где ω_{S_w} – параметр, описывающий ускорение роста трещины при распухании

ВЛИЯНИЕ РАСПУХАНИЯ НА СКОРОСТЬ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ



● - металл сборки БМ-7 (D=30-46 сна)

● - металл сборки Э-65 (D=100-150 сна)

Увеличение скорости роста усталостной трещины при распухании может быть описано

$$\omega_{S_w} = \frac{(dl/dN)_{S>0}}{\left(\frac{dl}{dN}\right)_{S=0}} = \left(\frac{\sigma_{flow}^{S=0} \cdot \epsilon_f^{S=0}}{\sigma_{flow}^{S>0} \cdot \epsilon_f^{S>0}} \right)^{m/2}$$

где m степенной показатель в уравнении Пэриса, m = 3,3; $\sigma_{flow} = (\sigma_{0,2} + \sigma_B)/2$

Зная влияние распухания на прочность и пластичность материала ВКУ, параметр ω_{S_w} записывается как:

$$\omega_{S_w} = \left(\varphi(S) \cdot \left[1 - \left(\frac{S}{1+S} \right)^{2/3} \right] \right)^{-1,65}$$

где $\varphi(S) = \exp(-6,55 \cdot S^{0,67})$



РАДИАЦИОННОЕ РАСПУХАНИЕ



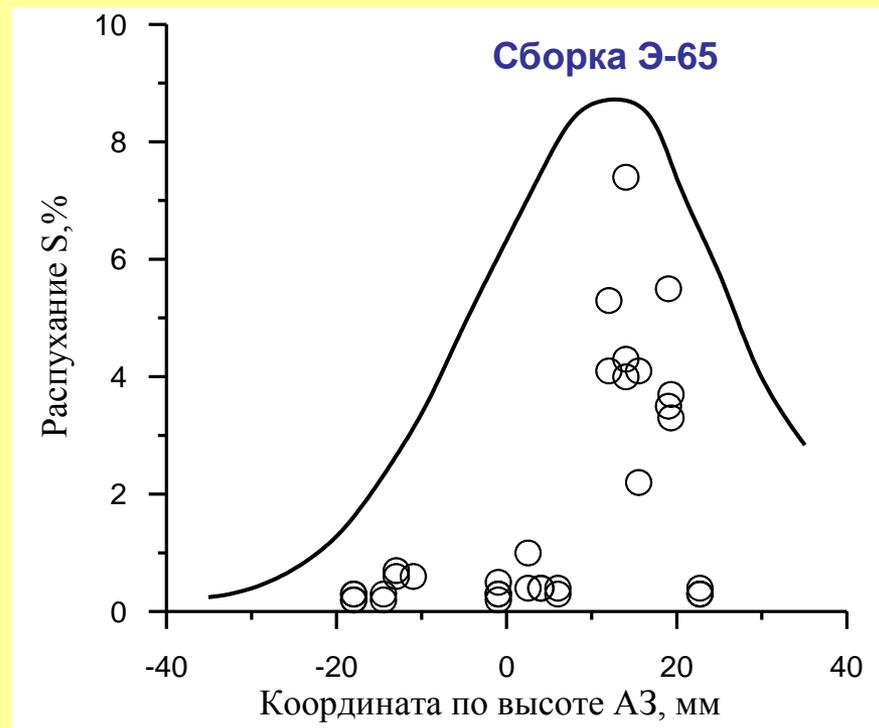
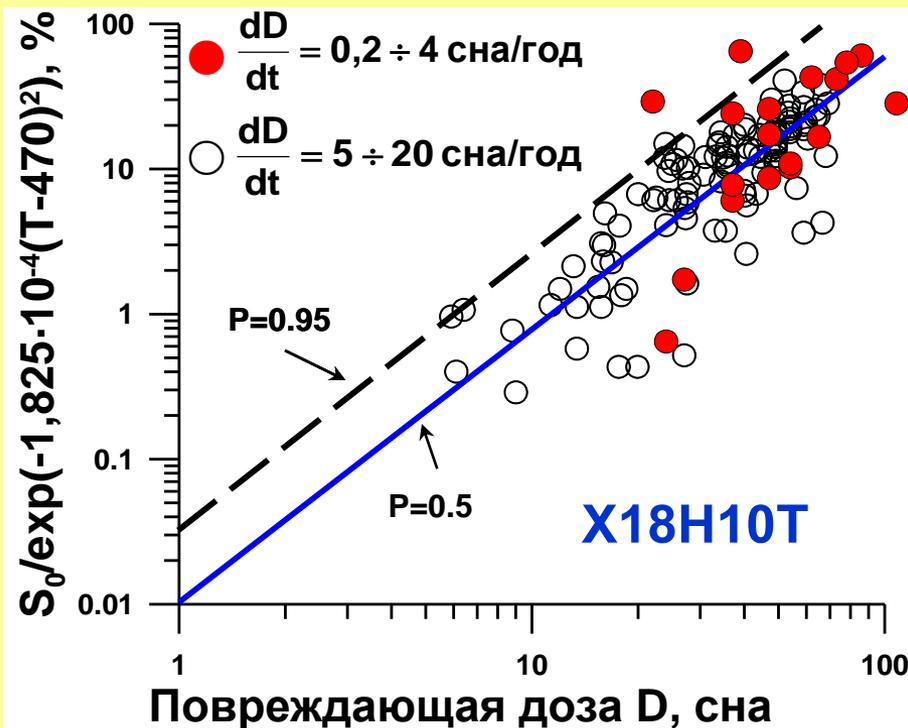
ТЕМПЕРАТУРНО-ДОЗОВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ РАСПУХАНИЯ СТАЛИ X18H10T

1. Температурно-дозовая зависимость распухания описывается уравнением:

$$S_0 \equiv \frac{\Delta V}{V} = C_D \cdot D^n \cdot \exp[-r \cdot (T_{\text{обл}} - T_{\text{max}})^2]$$

2. На основании обработки большого количества экспериментальных данных были получены следующие коэффициенты температурно-дозовой медианной зависимости распухания:

$$n = 1,88; T_{\text{max}} = 470 \text{ }^\circ\text{C}; C_D = 1,035 \cdot 10^{-4}; r = 1,825 \cdot 10^{-4} \text{ 1/ }^\circ\text{C}^2$$





ВЛИЯНИЯ ЗНАКА НАПРЯЖЕНИЙ НА РАСПУХАНИЕ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ ВКУ

Существует две гипотезы:

1) Знак напряжений не влияет на распухание, а влияет только интенсивность напряжений



Как сжимающие, так и растягивающие напряжения стимулируют распухание, что приводит к увеличению напряжений в конструкции – положительная обратная связь

2) Знак напряжений влияет на распухание



Сжимающие напряжения замедляют темп распухания, растягивающие – приводят к увеличению темпа распухания



Напряжения приводят к уменьшению градиента распухания в конструкции и, следовательно, к уменьшению напряжений – отрицательная обратная связь

Задача: определить влияния различных типов напряженного состояния на радиационное распухание.



МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПУХАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ:

$$S = S_0 (1 + P \sigma_{\text{eff}}) = S_0 + S_{\sigma},$$

$$S_{\sigma} = S - S_0;$$

σ_{eff} – эффективное напряжение:

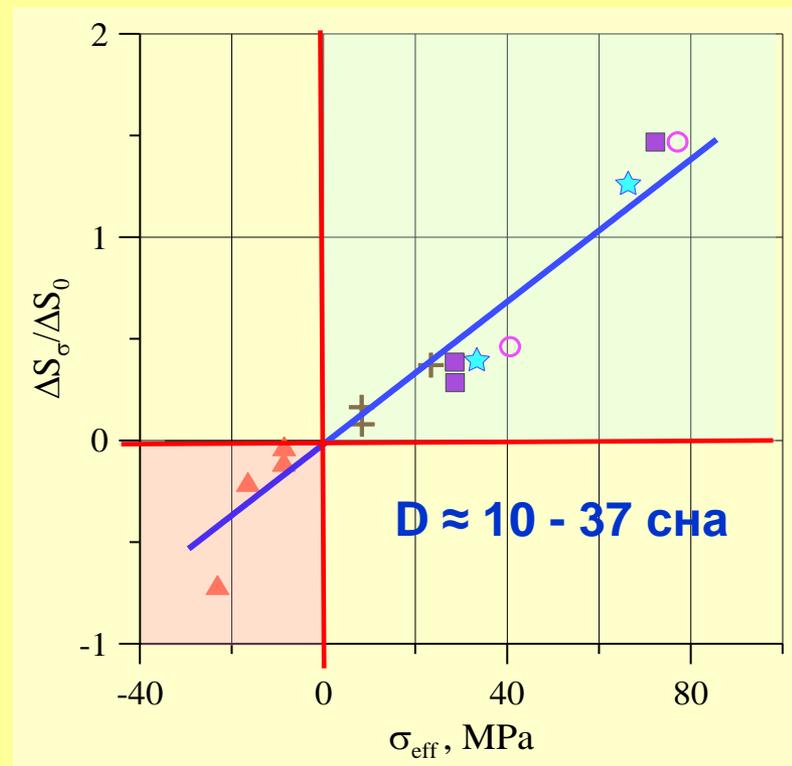
$$\sigma_{\text{eff}} = (1 - \eta) \cdot \sigma_m + \eta \cdot \sigma_{\text{eq}},$$

σ_m – гидростатическое напряжение;

σ_{eq} – интенсивность напряжений;

коэффициент $\eta = 0,15$;

$$P = 8 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}^{-1}$$

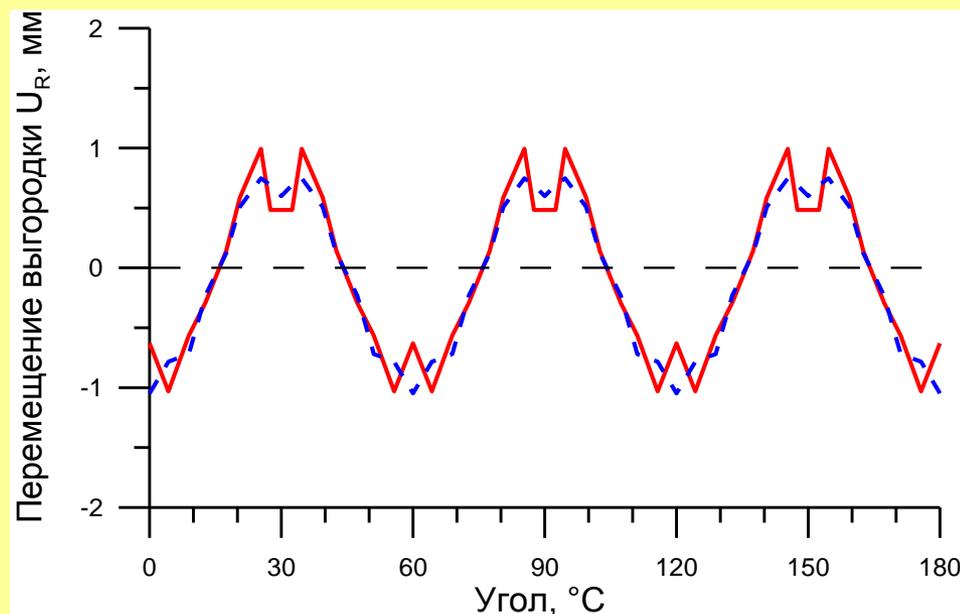


$\Delta S_{\sigma} / \Delta S_0$ – отношение приращения распухания, обусловленного напряжением, к приращению свободного распухания

Экспериментальные данные из работы
 M.M. Hall, J.E. Flinn, *Journal of Nuclear Materials*, 396(2010).

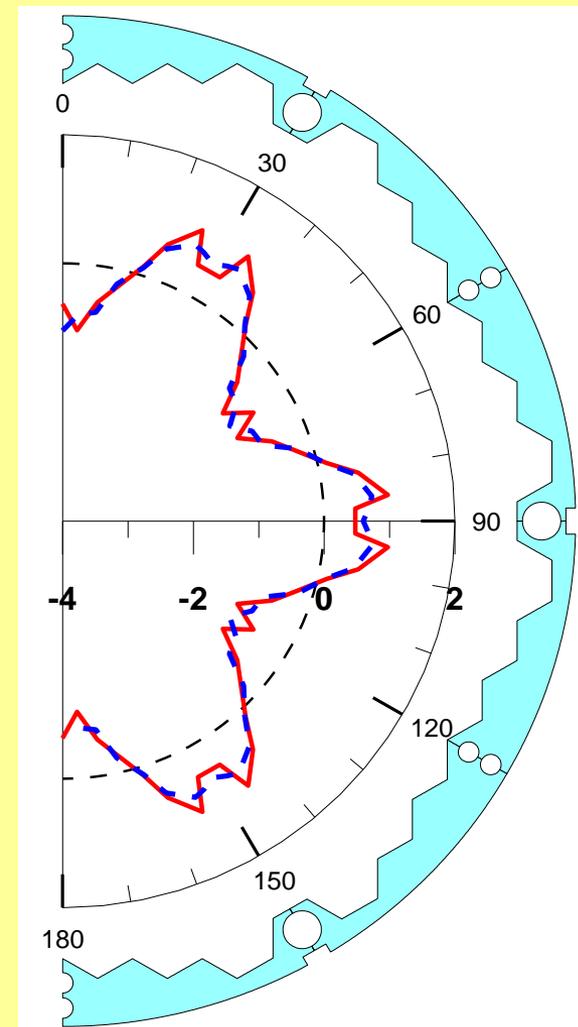


РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ВЫГОРОДКИ ПО ОКРУЖНОСТИ В СЕЧЕНИИ С МАКСИМАЛЬНЫМ РАСПУХАНИЕМ



- результаты измерения
- - - расчет в трехмерной постановке

Перемещения U_R рассчитаны и измерены относительно перемещения \bar{U} , осредненного по окружности выгородки.



Сечение выгородки



ПРОЦЕДУРА УТОЧНЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ РАСПУХАНИЯ НА ОСНОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ВЫГОРОДКИ РЕАКТОРА

1. Проводится расчетный анализ формоизменения выгородки (рассматривается 1/12 часть выгородки) в трехмерной постановке для момента времени, соответствующего времени эксплуатации выбранного энергоблока на момент измерения геометрии его выгородки
2. Для высоты h , соответствующей максимальному формоизменению, определяются расчетные расстояния $R_i^{\text{расч}}$ от центральной оси выгородки до каждого ребра 1/12 части сечения выгородки, ограниченной плоскостями симметрии, где i – номер ребра
3. На базе значений $R_i^{\text{расч}}$ определяется расчетное среднеинтегральное расстояние от центральной оси до ребер выгородки

$$\bar{R}^{\text{расч}} = \frac{6 \cdot R_1^{\text{расч}} + 12 \sum_{i=2}^N R_i^{\text{расч}}}{90}$$

4. Для высоты h проводится измерение фактической геометрии выгородки выбранного энергоблока и определяются фактические расстояния $r^{\text{изм}}$ от центральной оси выгородки до каждого её ребра.
5. Проводится осреднение результатов измерения по 12 сегментам

$$R_i^{\text{изм}} = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L r_{ij}^{\text{изм}}, \quad i = 0..8$$

6. На базе осредненных фактических значений определяется фактическое среднеинтегральное расстояние от центральной оси до ребер выгородки

$$\bar{R}^{\text{изм}} = \frac{6 \cdot R_1^{\text{изм}} + 12 \sum_{i=2}^N R_i^{\text{изм}}}{90}$$



ПРОЦЕДУРА УТОЧНЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ РАСПУХАНИЯ НА ОСНОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ВЫГОРОДКИ РЕАКТОРА

7. Для выгородки сравнивается расчетное и фактическое перемещение ее ребер относительно среднеинтегрального значения и вычисляется среднеквадратичное отклонение

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left((R_i^{\text{изм}} - \bar{R}^{\text{изм}}) - (R_i^{\text{расч}} - \bar{R}^{\text{расч}}) \right)^2}$$

8. При заданных результатах фактического измерения варьированием коэффициента c_D в зависимости радиационного распухания для расчетного анализа формоизменения подбирается такая зависимость радиационного распухания, чтобы

$$\delta = \min$$

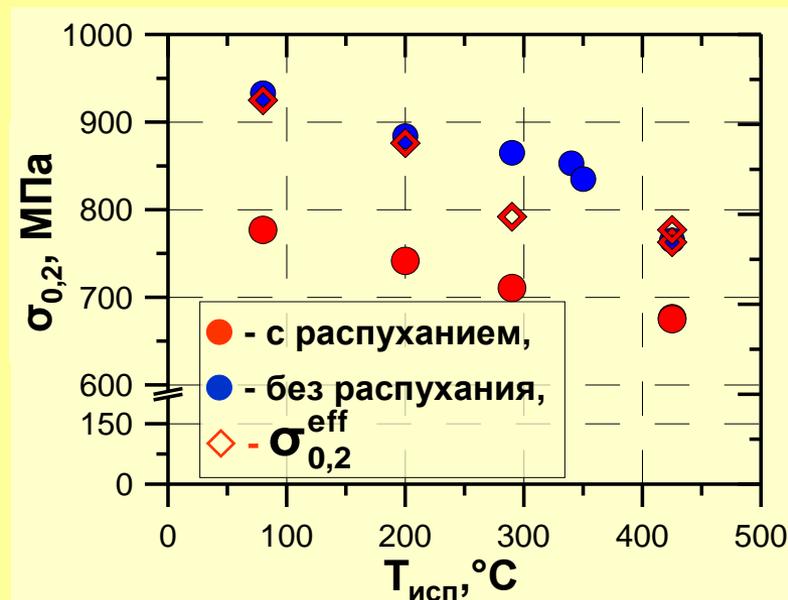


ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННОГО РАСПУХАНИЯ НА СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ ВКУ

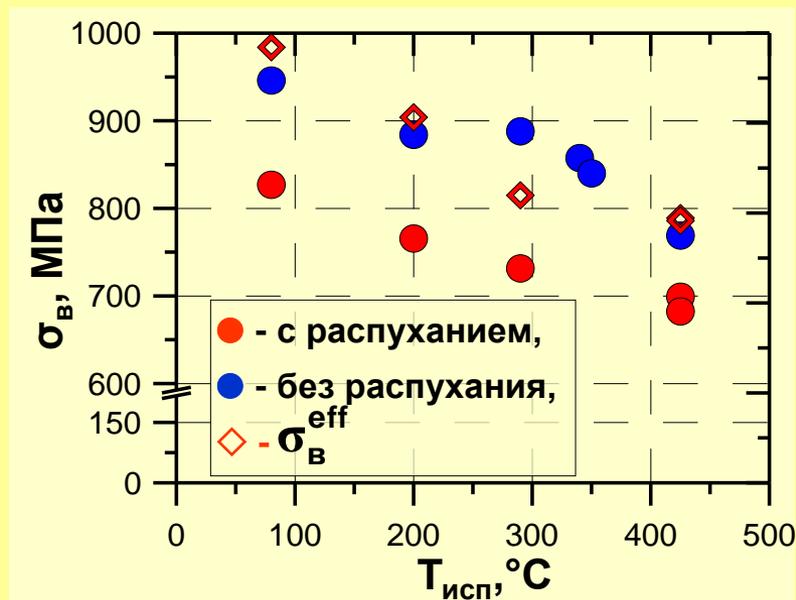


ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЛУЧЕНИЯ НА ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ И ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ

Основная причина влияния температуры облучения на предел текучести ($\sigma_{0,2}$) и предел прочности (σ_B) – это распухание



$T_{обл}$:
 ● 320 – 340 °С;
 ● 400 – 450 °С.



$$\sigma_{0,2}(T_{исп}, D, T_{обл}) = \sigma_{0,2}^{eff}(T_{исп}, D) \cdot (1 - \bar{A}_V(D, T_{обл}))$$

$$\sigma_B(T_{исп}, D, T_{обл}) = \sigma_B^{eff}(T_{исп}, D) \cdot (1 - \bar{A}_V(D, T_{обл}))$$

где σ^{eff} - напряжения, действующие на образец за вычетом пор, возникающих при распухании

$$\sigma^{eff} = \frac{\sigma}{(1 - \bar{A}_V)};$$

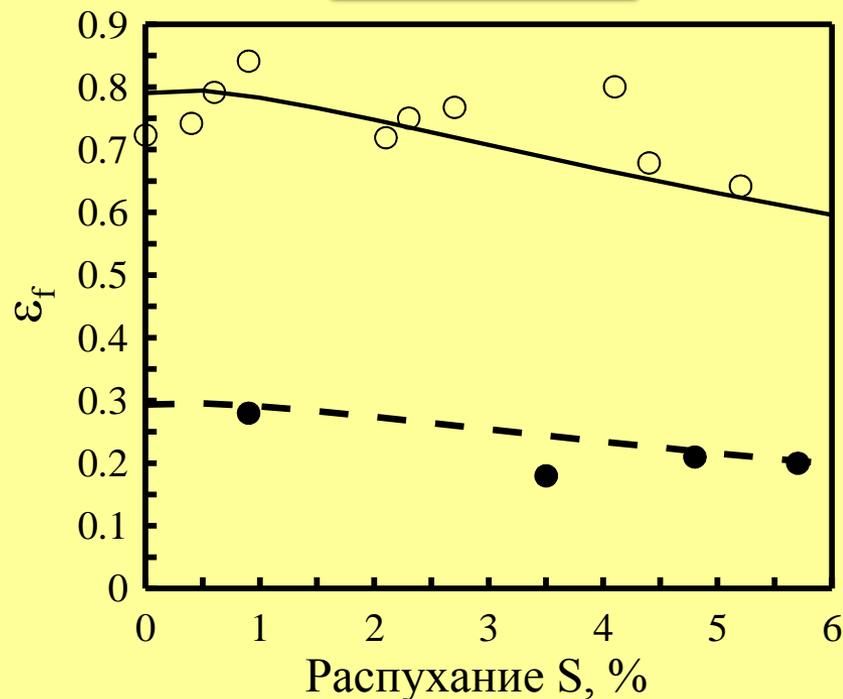
$$\bar{A}_V = \left(\frac{S}{1 + S} \right)^{2/3};$$

\bar{A}_V – относительная площадь вакансионных пор;
 S – радиационное распухание.

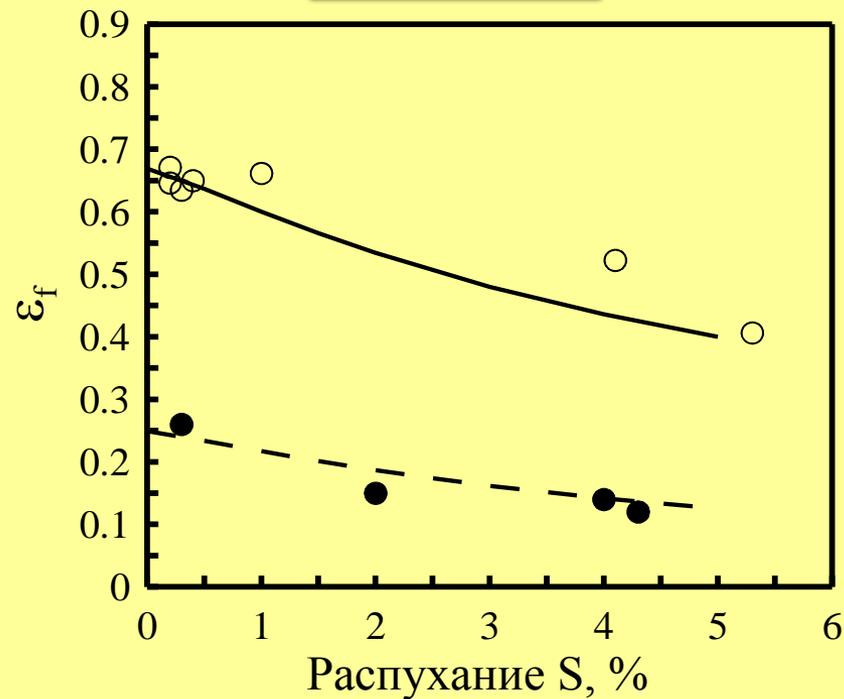


ВЛИЯНИЕ РАСПУХАНИЯ НА КРИТИЧЕСКУЮ ДЕФОРМАЦИЮ ОБРАЗЦОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ С РАЗЛИЧНОЙ ТРЕХОСНОСТЬЮ

Сборка БМ-7



Сборка Э-65

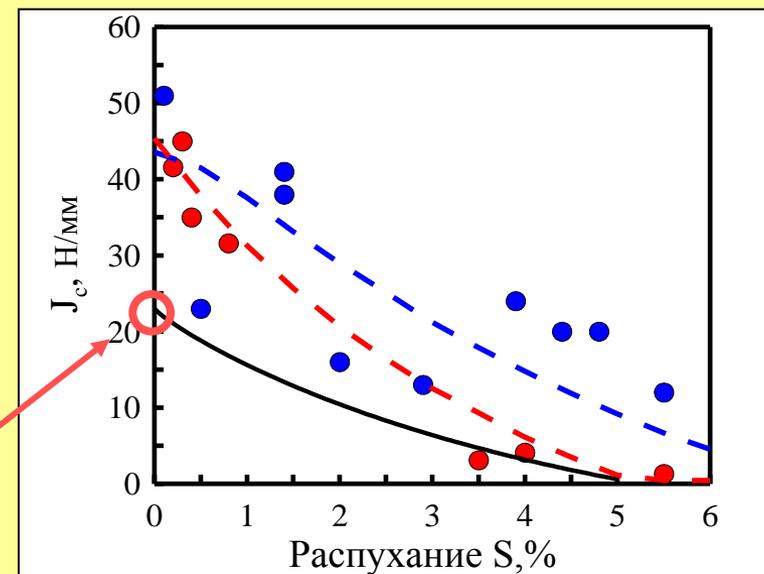
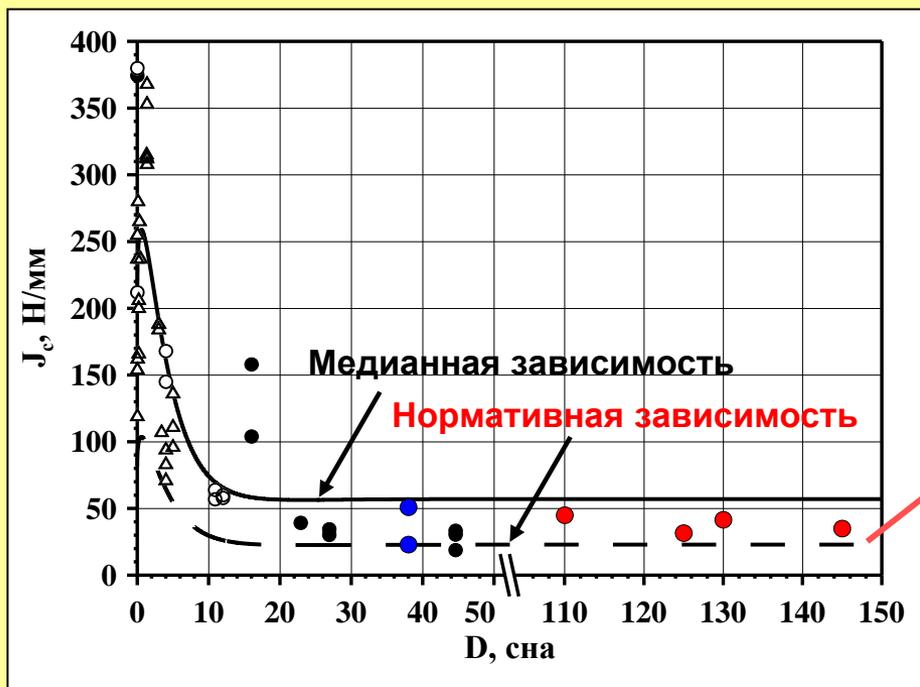


○ - гладкие образцы на растяжение;

● - образцы на растяжение с кольцевым концентратором.



ЗАВИСИМОСТЬ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ОТ РАСПУХАНИЯ



- - данные по металлу БМ-7 (D=30-46 сна);
- - данные по металлу Э-65 (D=100-150 сна);
- - расчет по модели для БМ-7;
- - расчет по модели для Э-65;
- - нормативная кривая.

Нормативная зависимость для описания снижения трещиностойкости от набухания:

$$J_c = J_c|_{S=0} \cdot \varphi_J(S) \cdot \left[1 - \left(\frac{S}{1+S} \right)^{2/3} \right]$$

где

$$\varphi_J(S) = (1 - 19,03 \cdot S) \cdot \exp(-6,94 \cdot S^{0,865})$$

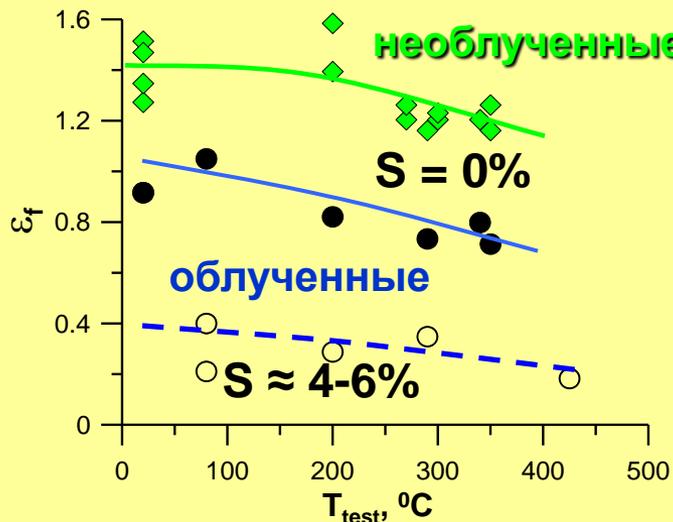


ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННОГО РАСПУХАНИЯ НА ОХРУПЧИВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ВКУ



ВЛИЯНИЕ РАСПУХАНИЯ НА ДЕФОРМАЦИЮ РАЗРУШЕНИЯ

$$S < S_{crit}$$



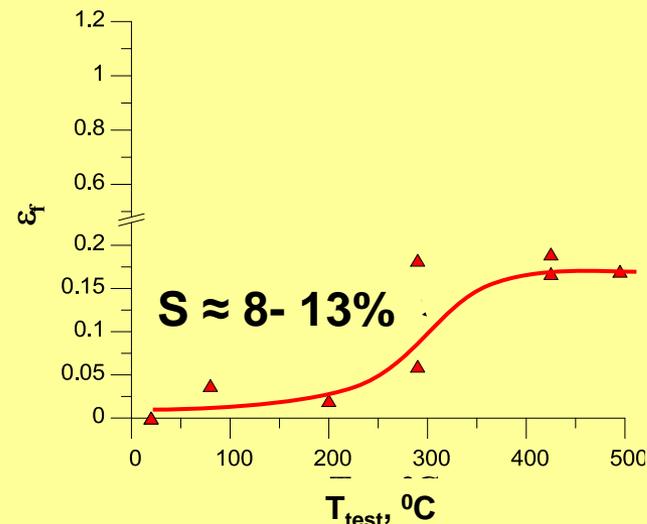
типичное поведение металла при вязком разрушении

$$\epsilon_f = \ln\left(\frac{1}{1-z}\right)$$

z – область сужения

$$S_{crit} \approx 7\%$$

$$S \geq S_{crit}$$



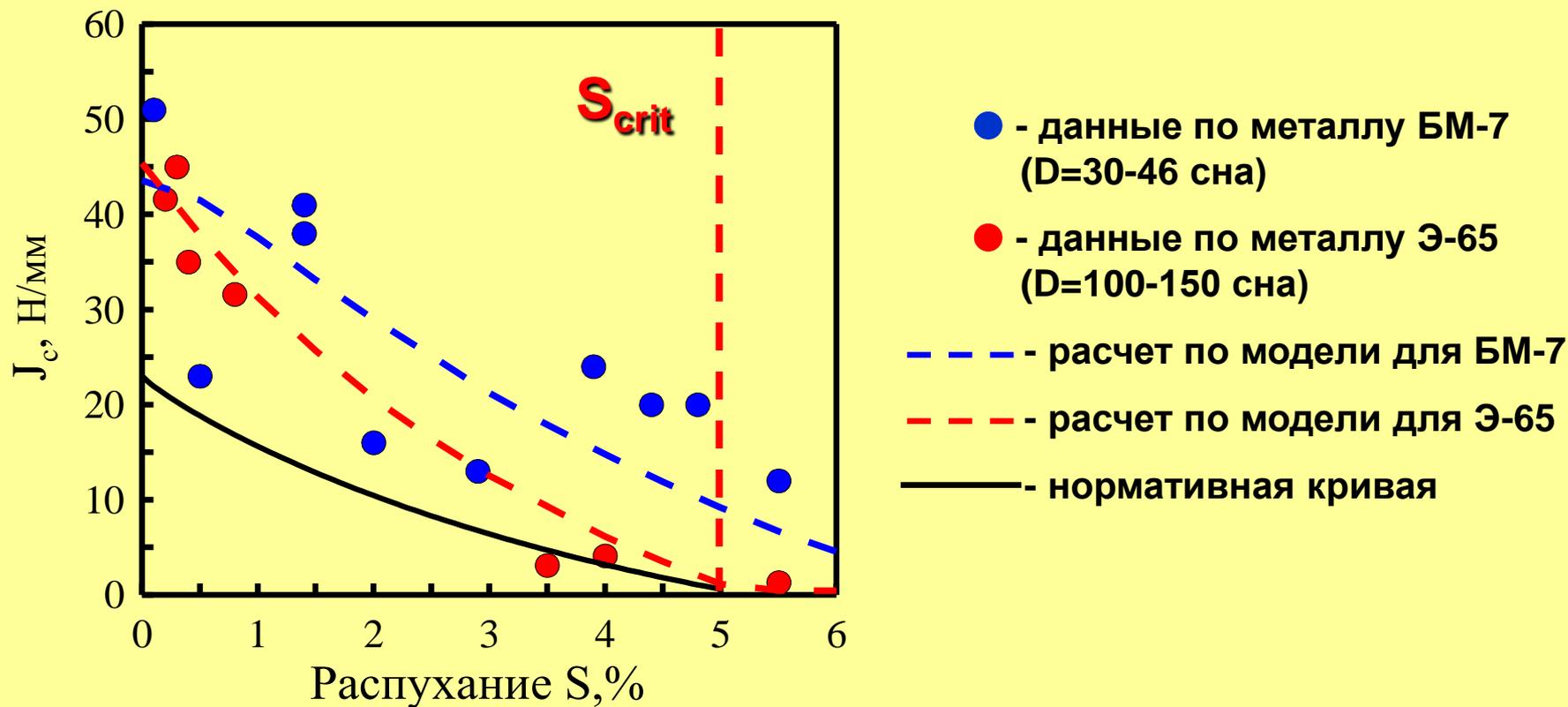
поведение типичное для ОЦК металла, имеющего хрупко-вязкий переход

Необходимо подчеркнуть:

все образцы были облучены при одной и той же дозе



ЗАВИСИМОСТЬ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ОТ РАСПУХАНИЯ



Исходя из полученных данных по влиянию набухания на трещиностойкость величина критического значения набухания для зоны предельного охрупчивания (ЗПО) была снижена:

$$S_{crit} = 5\%$$

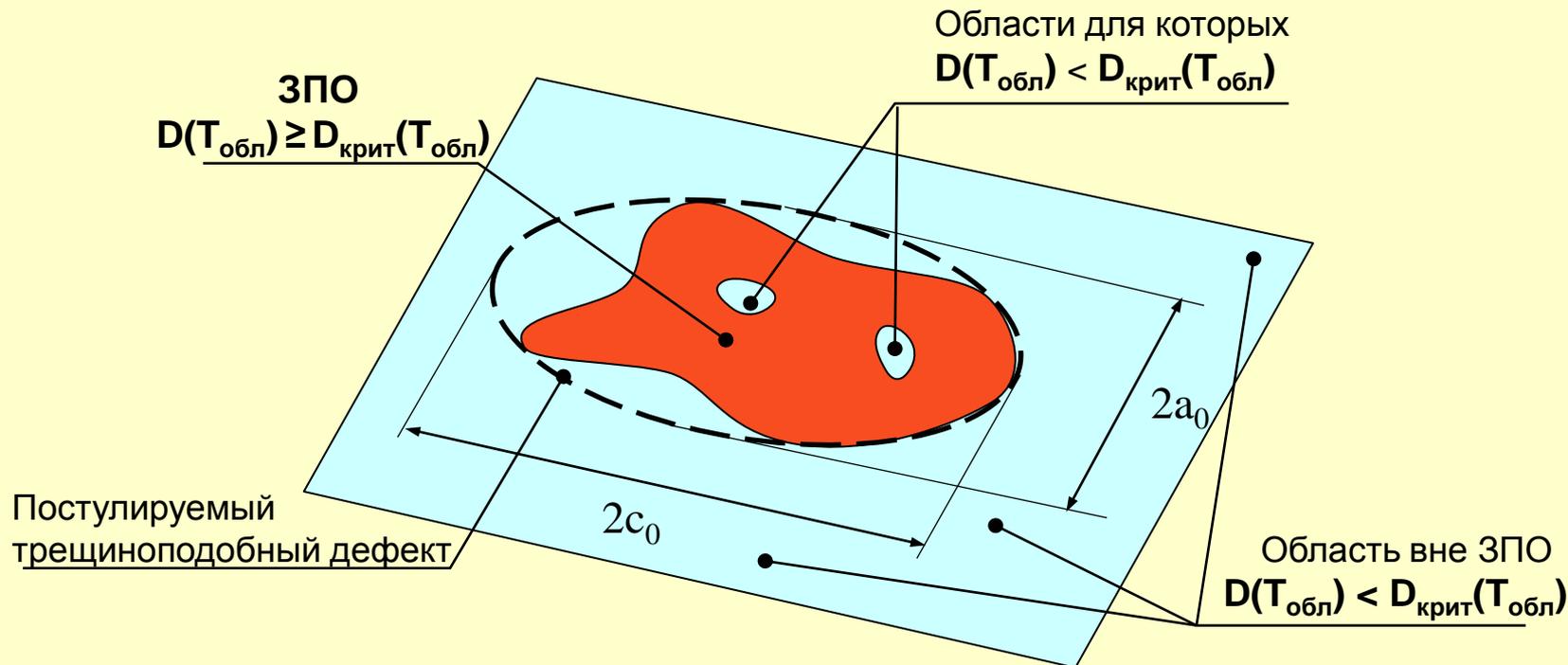


ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОНЫ ПРЕДЕЛЬНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ МАТЕРИАЛА

Зона предельного охрупчивания (ЗПО) – это область элемента ВКУ, которая отвечает следующим условиям:

- область ограничена одной или несколькими замкнутыми поверхностями, для каждой точки которых значение дозы D и температуры облучения $T_{\text{обл}}$ соответствуют зависимости $D_{\text{крит}}(T_{\text{обл}})$;
- для всех точек внутри ЗПО значения дозы D и температуры облучения $T_{\text{обл}}$ лежат ниже этой зависимости.

В зоне предельного охрупчивания постулируется трещиноподобный дефект. Начальные размеры дефекта a_0 и c_0 определяются согласно соответствующей процедуре.



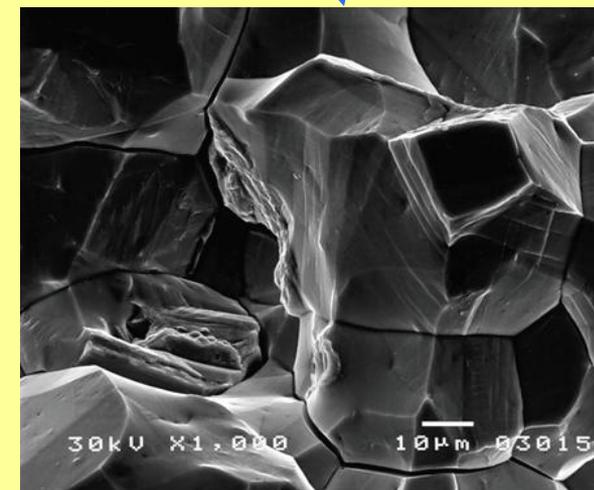
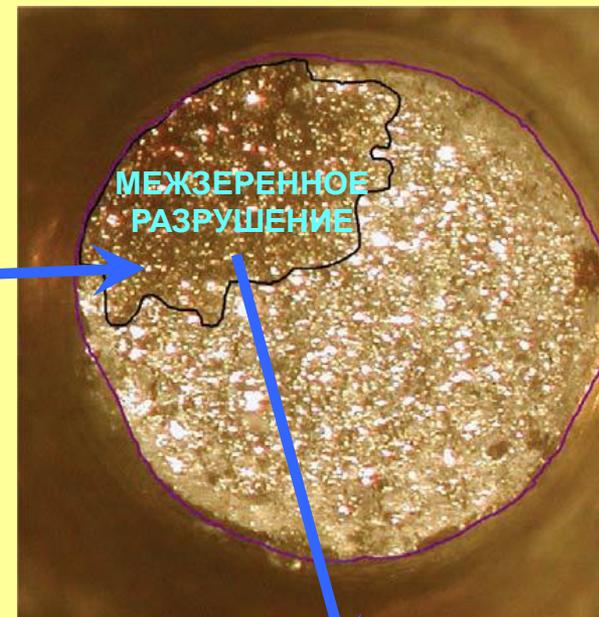
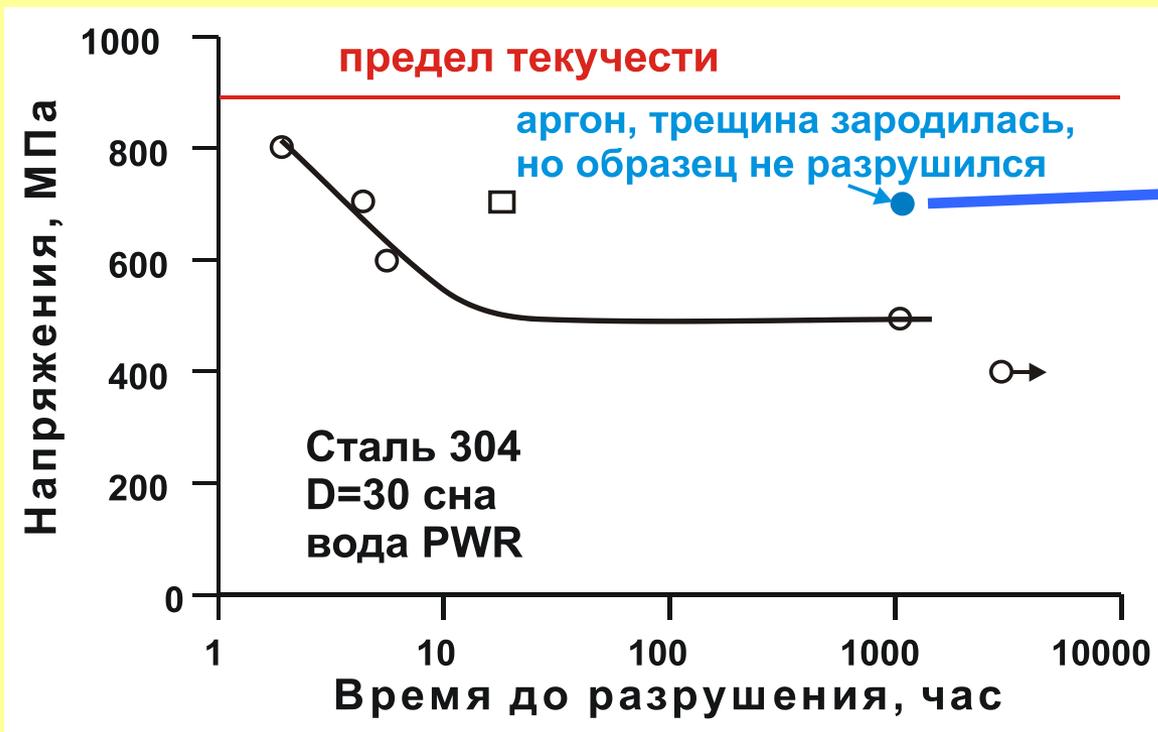


КОРРОЗИОННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ ОБЛУЧЕННЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ



ПРЕДПОСЫЛКИ

МЕЖЗЕРЕННОЕ РАЗРУШЕНИЕ ОБЛУЧЕННЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ В ОБЕСКИСЛОРОЖЕННОЙ РЕАКТОРНОЙ ВОДЕ

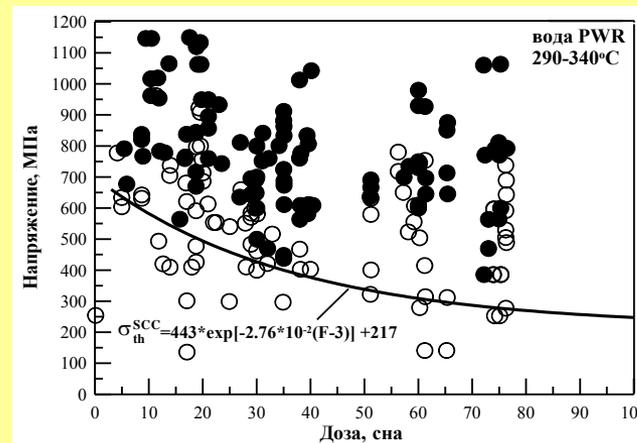
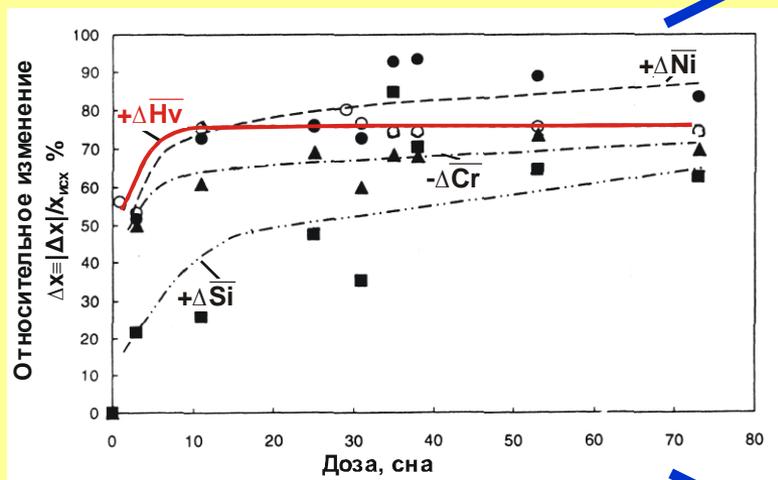


○, ● - температура испытаний $T_{исп} = 340^{\circ}C$;
□ - $T_{исп} = 290^{\circ}C$

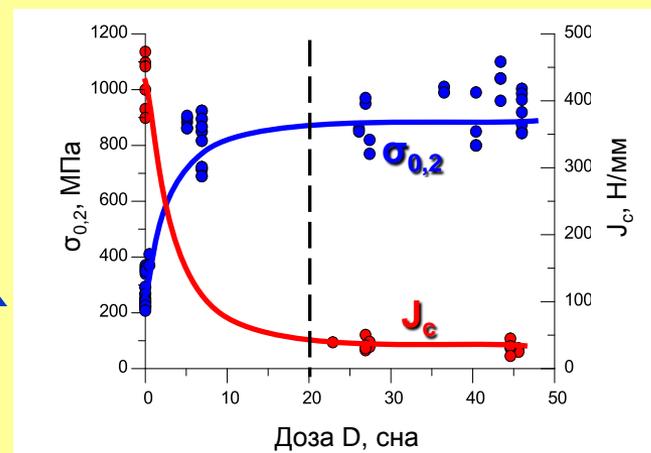


ПРЕДПОСЫЛКИ

Перераспределение химических элементов в процессе облучения, изменение механических свойств и сопротивление коррозионному растрескиванию металла ВКУ



Коррозионно-механическая прочность падает с увеличением повреждающей дозы, что обусловлено непрерывным перераспределением основных легирующих и примесных элементов



Увеличение повреждающей дозы $D > 20$ сн не приводит к изменению характеристик сопротивления деформированию и разрушению при отсутствии распухания (процесс упрочнения достиг насыщения)

Механизм коррозионного растрескивания облученных материалов:
 межзеренное проскальзывания при ползучести в условиях сильного упрочнения тела зерна + снижение когезивной прочности границ зерен за счет перераспределения легирующих и примесных элементов под облучением

СХЕМА КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ОБЛУЧЕННЫХ СТАЛЕЙ





ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОДЕЛИ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ

1. Скорость ползучести по механизму межзеренного проскальзывания не зависит от дозы облучения D и может быть описана уравнением $\dot{\varepsilon}_{gb}^c$

$$\dot{\varepsilon}_{gb}^c = c \cdot (\sigma_{eq} - \sigma_{th}^c)^n \cdot \exp(-\alpha t), \quad (1)$$

где σ_{th}^c - пороговое напряжение ползучести; σ_{eq} - интенсивность напряжений; t - время; c , n , α - константы.

2. Критическая деформация ε_f вследствие межзеренного проскальзывания снижается с повышением дозы, что описывается уравнением

$$\varepsilon_f = \varepsilon_f^o \cdot \exp[-\beta(D - D^*)], \quad (2)$$

где ε_f^o - критическая деформация при $D \leq D^*$, D^* - пороговая доза облучения для инициации межзеренного растрескивания; β - константа

Основываясь на положениях (1) и (2) условие разрушения может быть записано в виде:

$$\frac{c}{\alpha} \cdot (\sigma_{eq} - \sigma_{th}^c)^n \cdot [1 - \exp(-\alpha t_f)] = \varepsilon_f^o \cdot \exp[-\beta(D - D^*)] \quad (3)$$



ОСНОВНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ МОДЕЛИ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ

Принимая, что $t_f = \infty$ и $\sigma_{eq} = \sigma_{th}^{IASCC}$ из уравнения (3) получим

$$\frac{c}{\alpha} \cdot (\sigma_{th}^{IASCC} - \sigma_{th}^c)^n = \varepsilon_f^o \cdot \exp[-\beta(D - D^*)] \quad (4)$$

или

$$\sigma_{th}^{IASCC} = \left(\frac{\alpha \cdot \varepsilon_f^o}{c} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \exp\left[-\frac{\beta}{n}(D - D^*)\right] + \sigma_{th}^c \quad (5)$$

или

$$\sigma_{th}^{IASCC} = \left(\sigma_c^{\max} - \sigma_c^{\min} \right) \cdot \exp[-b(D - D^*)] + \sigma_c^{\min} \quad (6)$$

$$\sigma_c^{\max} = \left(\frac{\alpha \cdot \varepsilon_f^o}{c} \right)^{\frac{1}{n}} + \sigma_{th}^c \quad \sigma_c^{\min} = \sigma_{th}^c \quad b = \frac{\beta}{n}$$

$$\Lambda(t_f) \equiv \frac{\sigma_{eq} - \sigma_{th}^c}{\sigma_{th}^{IASCC} - \sigma_{th}^c} = \left[\frac{1}{1 - \exp(-\alpha t_f)} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

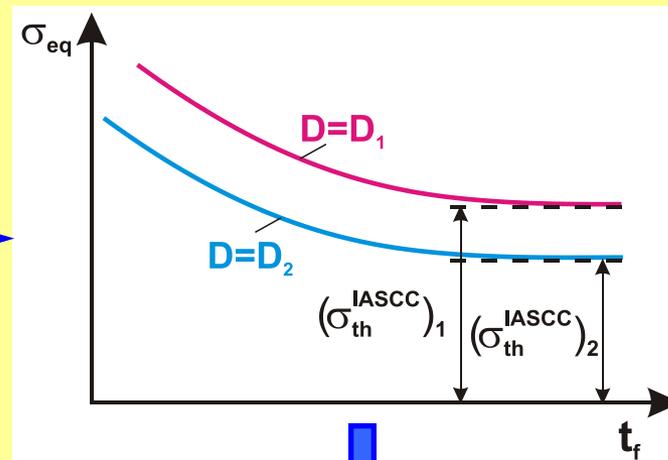
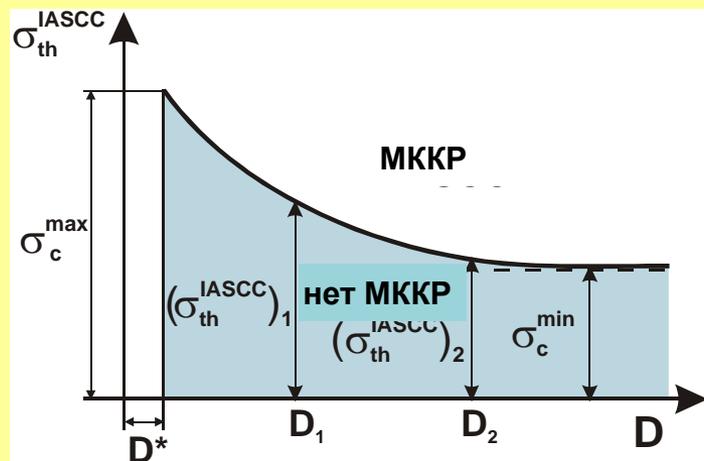
Как видно из уравнения (7), функция $\Lambda(t_f)$
не зависит от дозы облучения



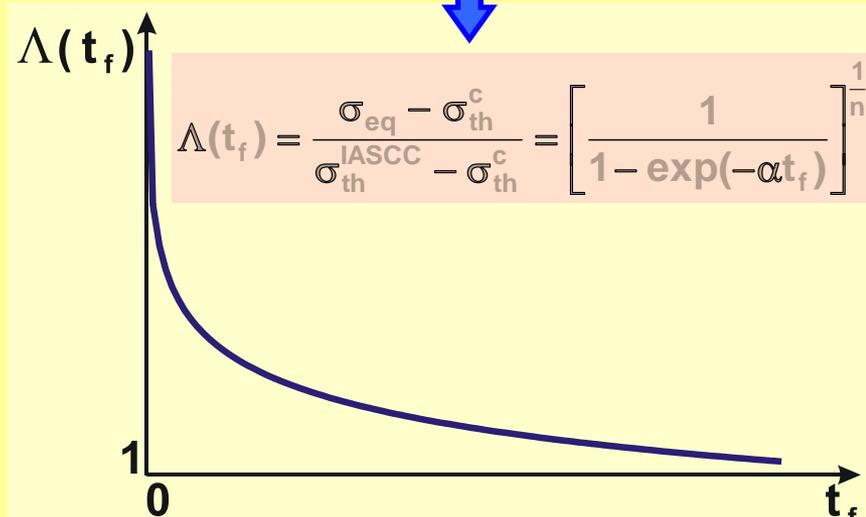
ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ

Кривая сопротивления коррозионному растрескиванию:

$$\sigma_{th}^{IASCC} = (\sigma_c^{max} - \sigma_c^{min}) \cdot \exp[-b(D - D^*)] + \sigma_c^{min}, D > D^*$$

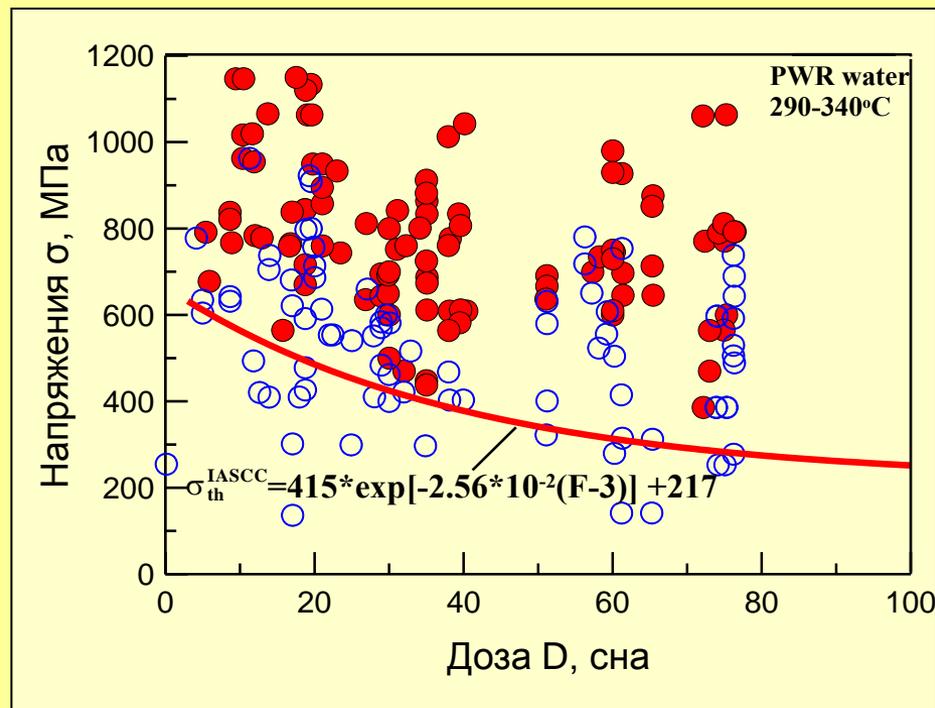


Зависимость $\Lambda(t_f)$ не зависит от дозы нейтронного облучения:





Сравнение расчетной кривой с имеющимися экспериментальными данными



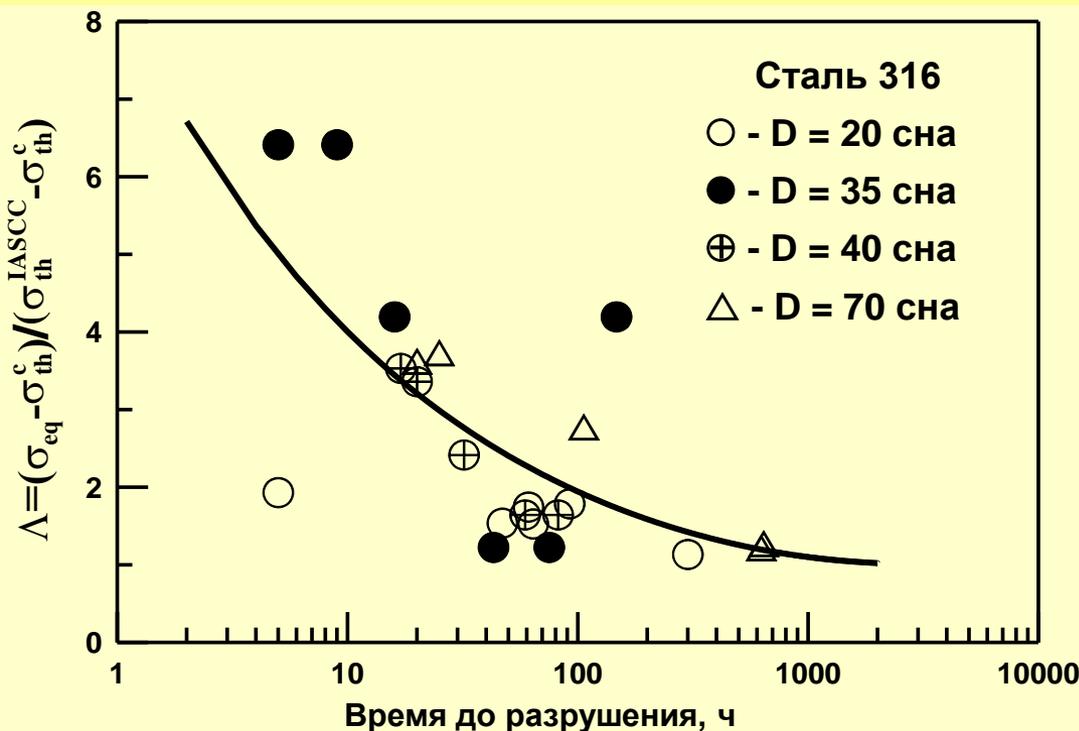
○ - разрушение отсутствует

● - разрушение по МККР

Данные Toivonen A. et al., 2006; Takakura K. et al., 2009;
Nishioka H. et al., 2008; Conermann J. et al., 2005; Freyer P. et al., 2007.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ $\Lambda(t_f)$



Кривая на рисунке рассчитана по уравнению:

$$\Lambda(t_f) = \frac{\sigma_{eq} - \sigma_{th}^c}{\sigma_{th}^{IASCC} - \sigma_{th}^c} = \left[\frac{1}{1 - \exp(-\alpha t_f)} \right]^{\frac{1}{n}}$$

Экспериментальные данные взяты из работ:

Conermann J. et al Irradiation effects in a highly irradiated cold worked stainless steel removed from a commercial PWR //Proc. of 12th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, USA, August 14-18, 2005. – 2005. - P. 277-287.

Takakura K., Nakata K., Kubo N., Fujimoto K., Sakima K. IASCC Evaluation Method of Irradiated Cold Worked 316SS Baffle Former Bolt in PWR Primary Water //Proc. of the ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference PVP 2009, Prague, Czech Republic, 2009. – PVP2009-77279

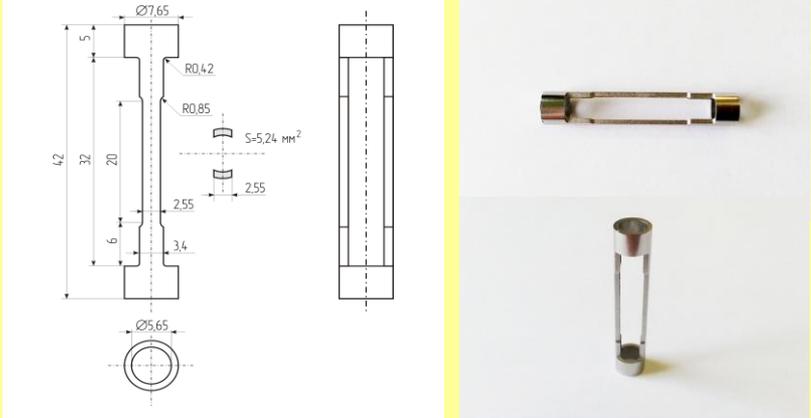
Toivonen A. et al Post-irradiation SCC investigations on highly-irradiated core internals component materials // Proc. of 6th Intern. Symp. on Contribution of Materials Investigation to Improve the Safety and Performance of LWRs, France, Fontevraud, – 2006. - P. 567-579.



ИСПЫТАНИЯ НА МЕДЛЕННОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ СТАЛИ X18H10T, ОБЛУЧЕННОЙ В РЕАКТОРЕ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ БОР-60 И КОММЕРЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ ТИПА ВВЭР-1000 (условия испытаний, материал, образцы)

Условия испытаний: $T_{\text{исп}}=290-320 \text{ C}$, $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1}$

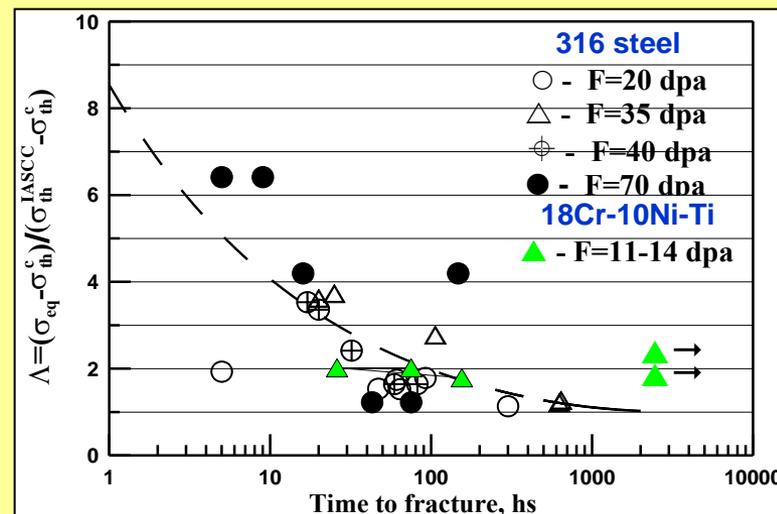
Среда: вода под давлением, имитирующая теплоноситель I контура

Материал	Тип образцов
Сталь X18H10T, вырезанная из элемента сборки Э-65 бокового отражателя реактора БОР-60 (D=100-150 сна)	Гладкий образец на одноосное растяжение диаметром 3 мм
Сталь X18H10T, вырезанная из чехла КНИ, после его эксплуатации в составе реактора ВВЭР-1000 (D=11-14 сна)	<p style="text-align: center;">Специальные образцы</p> 



ИСПЫТАНИЯ НА МЕДЛЕННОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ СТАЛИ X18H10T, ОБЛУЧЕННОЙ В РЕАКТОРЕ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ БОР-60 И КОММЕРЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ ТИПА ВВЭР-1000 (результаты испытаний, выводы)

- ✓ Сталь X18H10T, облученная в реакторе БОР-60 не обнаружила чувствительность к межкристаллитному коррозионному растрескиванию (МККР): вязкое разрушение по механизму зарождения, роста и объединения пор с высоким значением критической деформации.
- ✓ Сталь X18H10T, облученная в реакторе ВВЭР-1000 обнаружила чувствительность к МККР: низкая критическая деформация, фактура зародышевой трещины имеет межзеренный характер, макротрещина в ряде образцов зародилась при напряжениях $\sigma < \sigma_Y$.
- ✓ Склонность к МККР для стали, облученной в реакторе ВВЭР-1000, выше, чем для стали облученной в реакторе БОР-60. Это может быть связано с большей генерацией трансмутационного He и H в реакторе ВВЭР-1000, а также с насыщением H из радиолизной воды I контура.
- ✓ Сопротивление коррозионному растрескиванию стали X18H10T, облученной в ВВЭР очень близко к таковому для 316 стали, облученной в PWR.





СКОРОСТЬ РОСТА ТРЕЩИНЫ НА ФОНЕ РАДИАЦИОННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

Скорость роста трещины в аустенитных сталях по межзеренному механизму в условиях ползучести может быть описана зависимостью:

$$\frac{dl}{dt} = A_r (C^*)^{n_r}$$

где

$$A_r = \left[\frac{(1-2\mu)^2}{2\pi(1-\mu^2)} \right]^{1+n_c} \cdot a_c^{\frac{1}{1+n_c}} \cdot \frac{1}{C_{MG}} \cdot d_g^{\frac{1}{1+n_c}} ; \quad n_r = \frac{n_c}{1+n_c} ; \quad C^* = (1-\mu^2) \cdot K_I^2 (B\dot{D} + \omega\dot{S}) .$$

Тогда скорость роста трещины можно записать в виде:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{(1-2\mu)}{C_{MG}} \cdot \left(\frac{d_g}{2\pi} \right)^{1/2} \cdot (B\dot{D} + \omega\dot{S}) \cdot K_I$$

Или в инженерном виде для материалов ВКУ:

$$\frac{dl}{dt} = \lambda (B\dot{D} + \omega\dot{S}) \cdot K_I$$

$$\text{где } \lambda = 1,23 ; \quad B = 10^{-6} \frac{1}{\text{МПа} \cdot \text{сна}} ; \quad \omega = 2,7 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{МПа}}$$

Консервативная оценка скорости роста трещины при ползучести на конец продленного срока эксплуатации может достигать:

$$\frac{dl}{dt} = 1,57 \cdot (10^{-5} \cdot 2 + 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^{-2}) \cdot 50 = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м/год} = \mathbf{3,5 \cdot \text{мм/год}}$$



ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»

Открытое акционерное общество
«Российский концерн по производству электрической и
тепловой энергии на атомных станциях»

(ОАО «Концерн Росэнергоатом»)

УТВЕРЖДАЮ

40
Заместитель Генерального
директора – директор по
производству и эксплуатации АЭС

А.В. Шутиков

"25" // 2013

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ РД ЭО 1.1.2.99.0944-2013
ЭКСПЛУАТИРУЮЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА
ВНУТРИКОРПУСНЫХ УСТРОЙСТВ ВВЭР-1000 ПРИ ПРОДЛЕНИИ
СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ ДО 60 ЛЕТ



СОДЕРЖАНИЕ МЕТОДИКИ

1. Область применения
2. Нормативные ссылки
3. Термины и определения
4. Обозначения и сокращения
5. Общие положения
6. Расчетный дефект
7. Анализ возникновения критического события «Зарождение трещины при циклическом нагружении по механизму усталости» в элементах ВКУ
8. Анализ возникновения критического события «Зарождение трещины при статическом нагружении по механизму коррозионного растрескивания» в элементах ВКУ
9. Анализ возникновения критического события «Формирование зоны с предельным охрупчиванием материала» в элементах ВКУ
10. Подрост трещины и критические события «Нестабильное развитие трещины» и «Потеря несущей способности элемента конструкции»
11. Расчет по критическому событию «Недопустимое изменение размеров элемента конструкции»
12. Анализ возникновения критического события «Исчерпание деформационной способности материала»



ПРИЛОЖЕНИЯ К МЕТОДИКЕ

Приложение А (обязательное) Механические свойства и деформационное упрочнение материала ВКУ

Приложение Б (обязательное) Расчет кривых усталости

Приложение В (обязательное) Сопротивление коррозионному растрескиванию материала ВКУ

Приложение Г (обязательное) Статическая трещиностойкость материала ВКУ

Приложение Д (обязательное) Скорость роста усталостной трещины в материале ВКУ

Приложение Е (обязательное) Скорость роста трещины при коррозионном растрескивании в материале ВКУ

Приложение Ж (обязательное) Радиационное распухание материала ВКУ

Приложение И (обязательное) Скорость радиационной ползучести материала ВКУ

Приложение К (рекомендуемое) Процедура формирования циклов при сложном нагружении

Приложение Л (обязательное) Процедура расчета референсного напряжения

Приложение М (рекомендуемое) Определяющие уравнения для расчета вязкоупругопластических задач МКЭ

Приложение Н (обязательное) Определение зон с предельным охрупчиванием материала

Приложение П (обязательное) Скорость роста трещины при радиационной ползучести в материале ВКУ

Приложение Р (обязательное) Определение параметра c_D в зависимости радиационного распухания на базе результатов измерения геометрии выгородки ВВЭР-1000



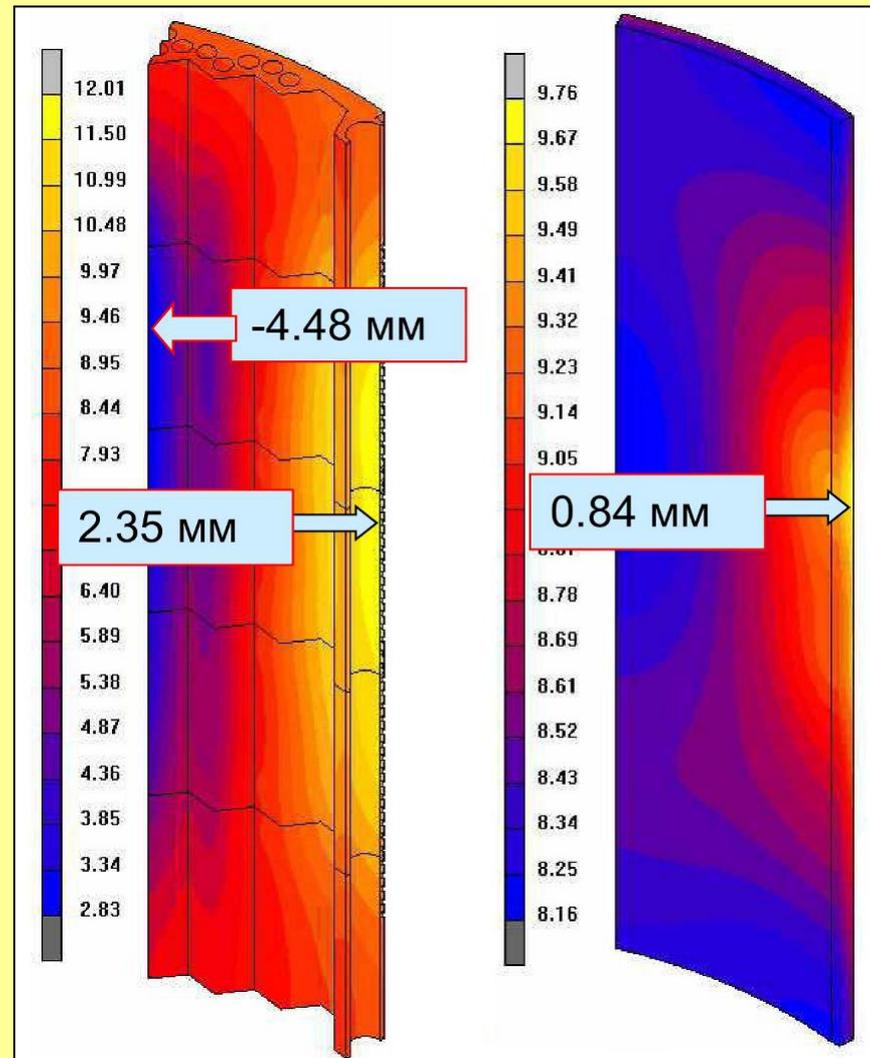
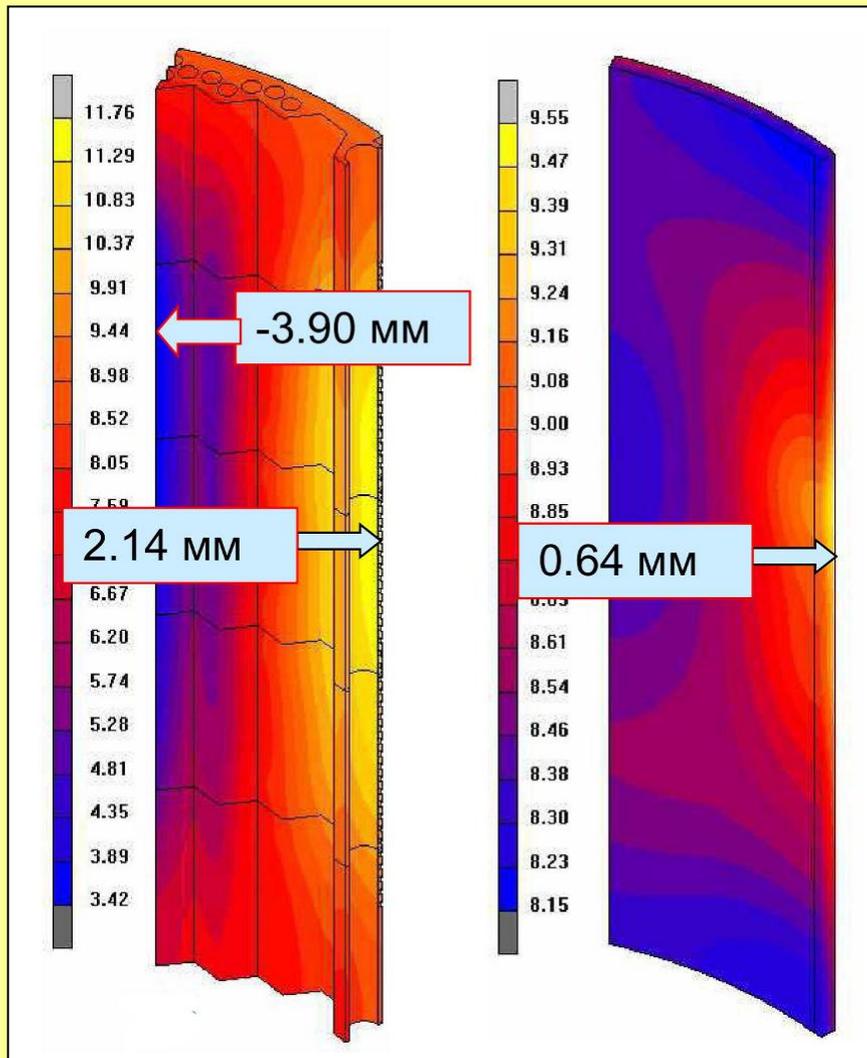
ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ВКУ



РАДИАЛЬНЫЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ВЫГОРОДКИ И ШАХТЫ ПРИ РАБОТЕ НА МОЩНОСТИ (104 % $N_{НОМ}$) ПРИ МЕДИАННОМ РАСПУХАНИИ

После 55 лет эксплуатации

После 60 лет эксплуатации



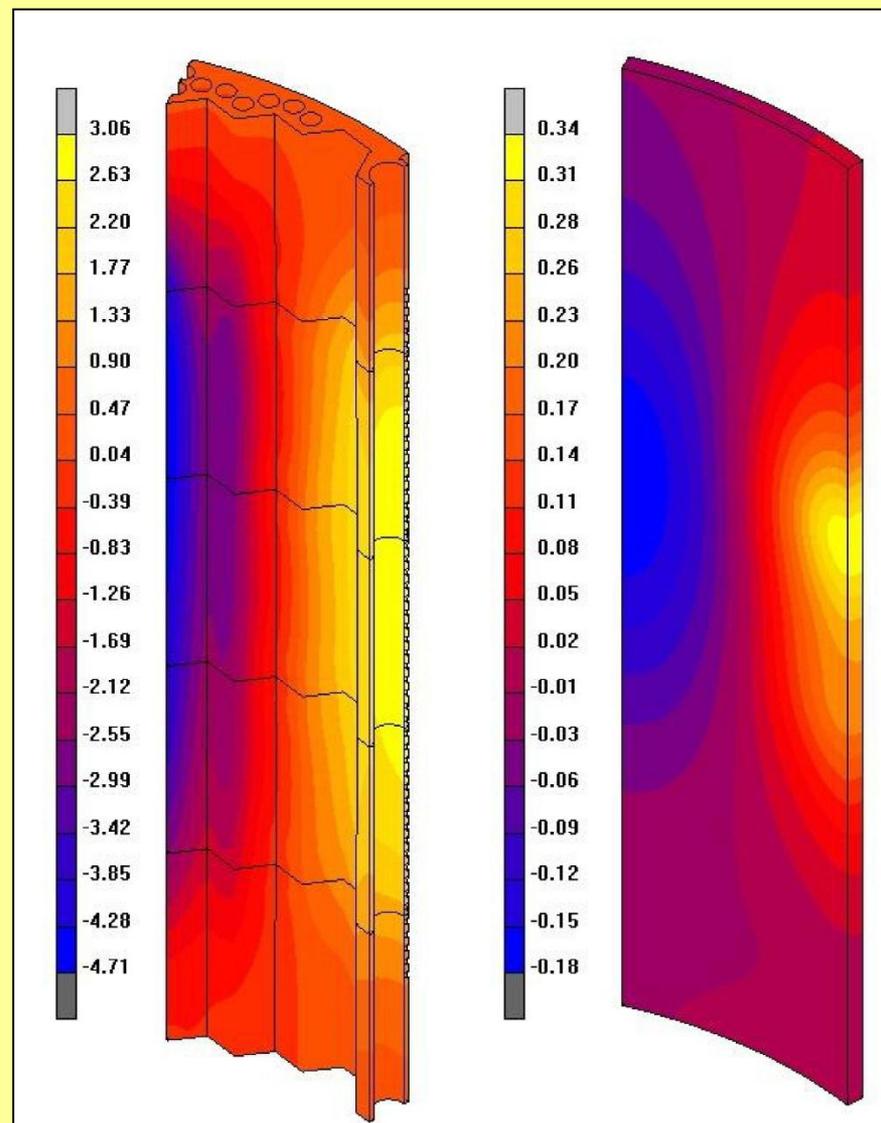


РАСЧЕТ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ВЫГОРОДКИ И ШАХТЫ

Остаточные радиальные перемещения сечения выгородки и шахты после 60 лет эксплуатации (при температуре 20 °С)

Расчетная оценка с использованием **медианных** параметров радиационного распухания

Выбор номинального зазора между дистанционирующими решетками периферийных ТВС и выгородки происходит **после 55 лет эксплуатации**



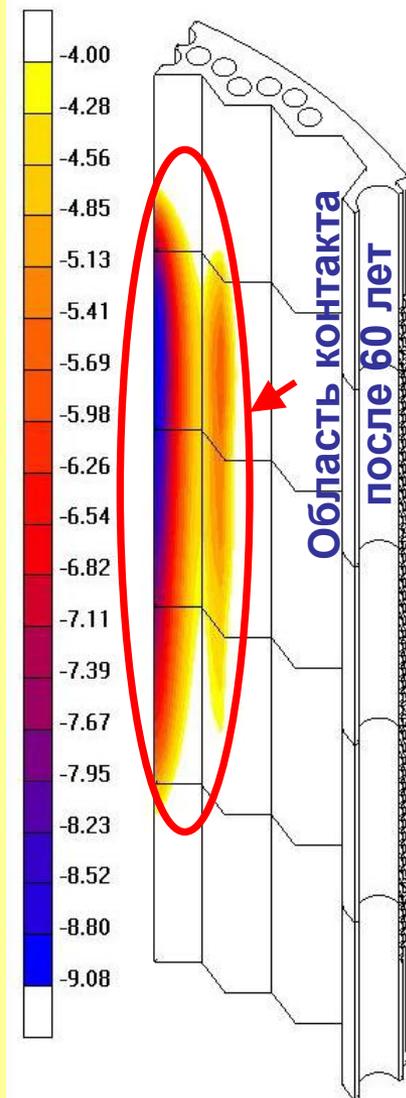
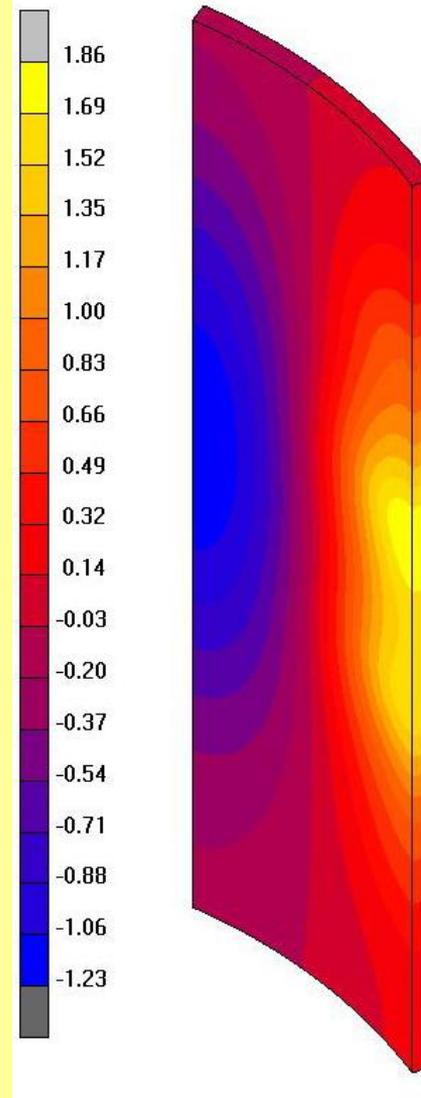
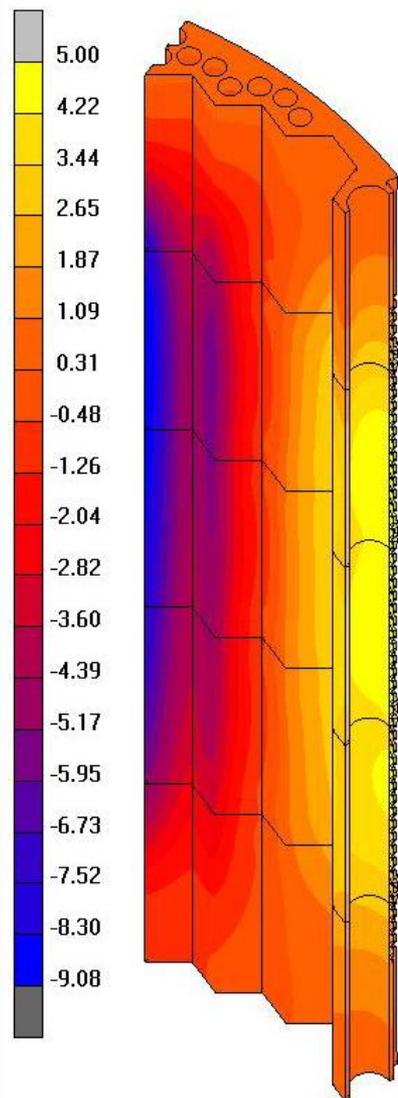


РАСЧЕТ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ВЫГОРОДКИ И ШАХТЫ

Остаточные радиальные перемещения сечения выгородки и шахты после 60 лет эксплуатации (при температуре 20 °С)

Расчетная оценка с использованием консервативных параметров радиационного распухания (95% огибающая)

Выбор номинального зазора между дистанционирующими решетками периферийных ТВС и выгородки происходит **после 37 лет эксплуатации**

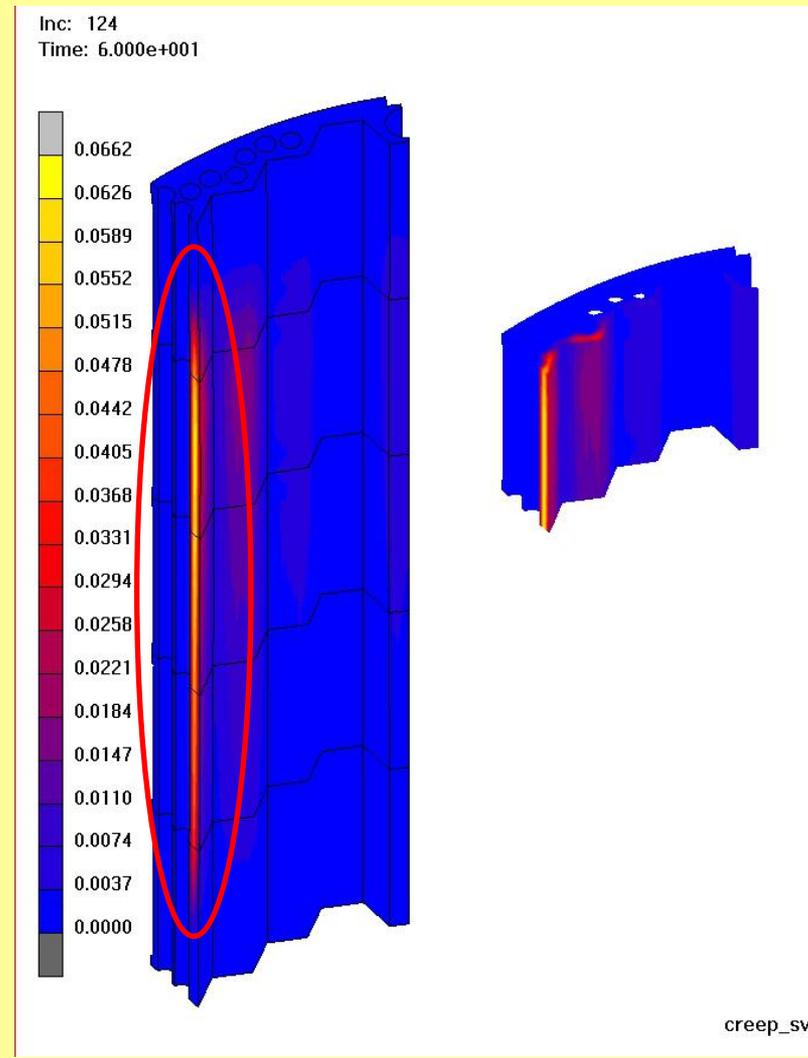
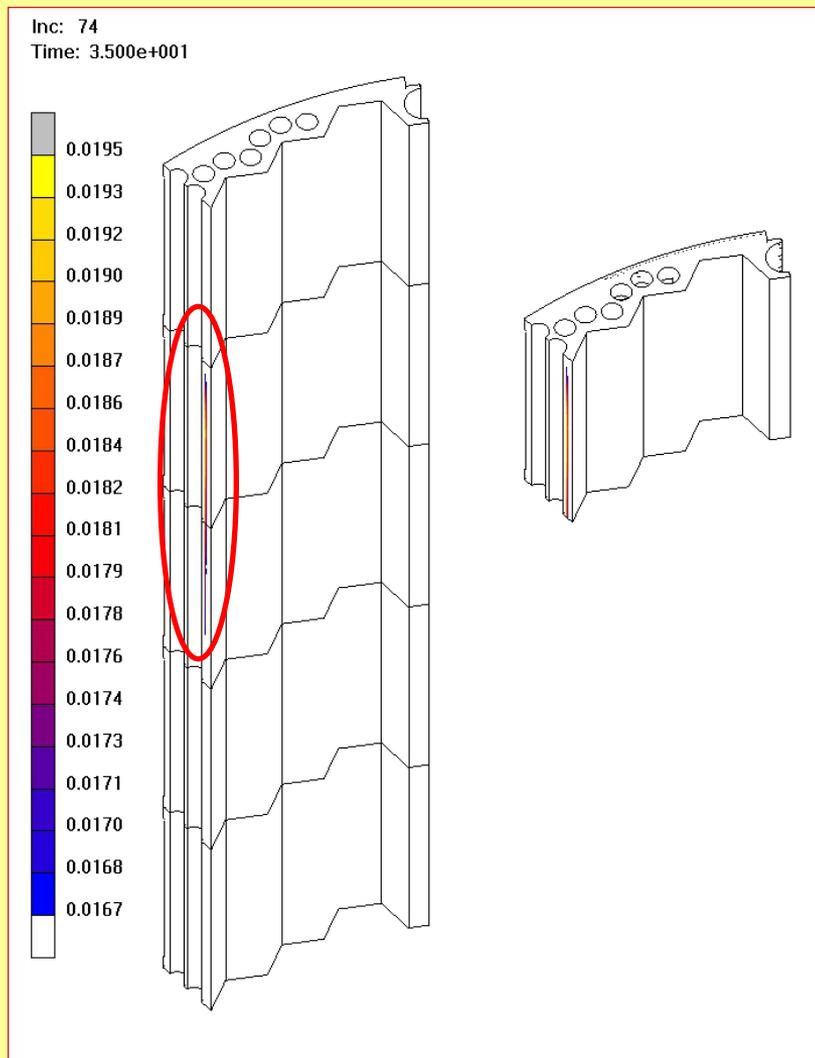




ОБРАЗОВАНИЕ ЗПО (5% РАСПУХАНИЯ) В ВЫГОРОДКЕ ВВЭР-1000 с использованием консервативных параметров радиационного распухания

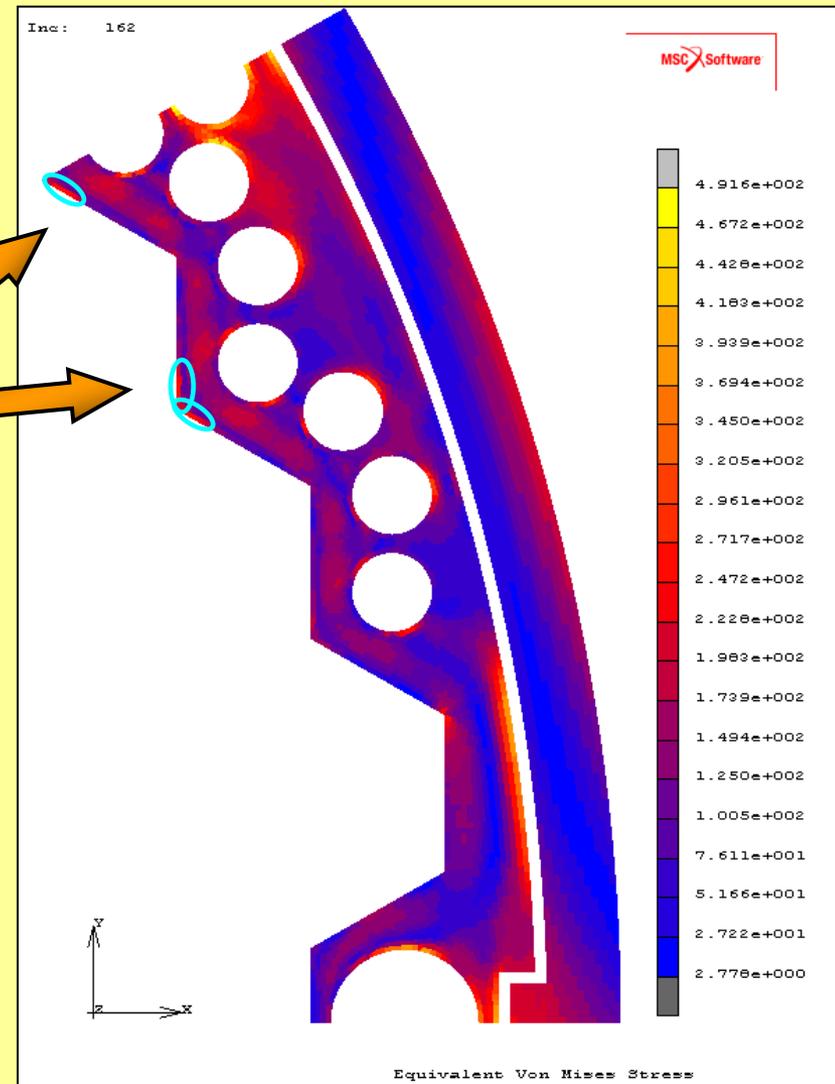
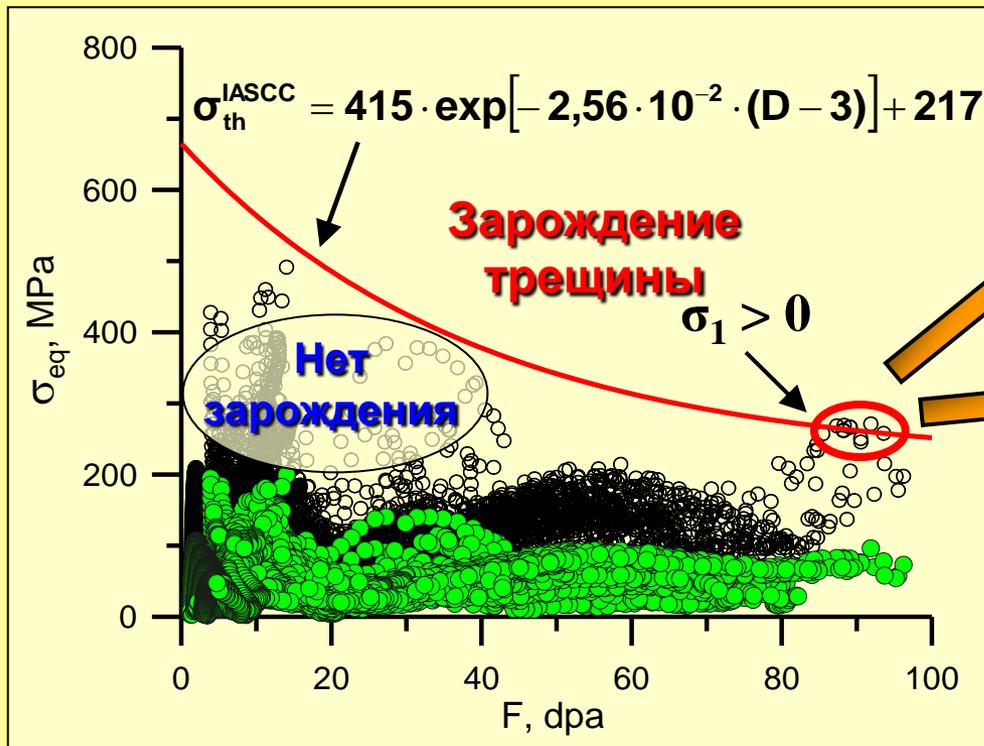
После 35 лет эксплуатации

После 60 лет эксплуатации



На рисунках указана деформация распухания (1/3 объемной величины распухания)

ЗАРОЖДЕНИЕ ТРЕЩИНЫ ПО МЕХАНИЗМУ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ПОСЛЕ 50 ЛЕТ ЭКСПЛУАТАЦИИ



- - расчет по медианной зависимости распухания
- - расчет по 95%-огибающей распухания
- - области выгородки, где возможно зарождение трещины по МККР



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлены основные механизмы радиационного повреждения, приводящие к снижению сопротивления разрушению металла ВКУ по различным механизмам.
2. Сформулированы базовые уравнения и зависимости, позволяющие определить напряженно-деформированное состояния, прочность и долговечность элементов ВКУ с учетом основных повреждающих факторов.
3. Проведены дополнительные исследования металла экранных сборок бокового отражателя БМ-7 и Э-65, облученных в реакторе до максимальных доз 46 и 150 сна соответственно, а также металла чехлов КНИ после их облучения в реакторе ВВЭР-1000.
4. На основании выполненных исследований откорректированы некоторые разделы методики и проведена полная верификация всех разделов методики, касающихся физико-механических свойств материалов ВКУ.
5. Проведенные широкомасштабные исследования позволили выпустить обновленную и усовершенствованную «Методику расчета прочности и остаточного ресурса внутрикорпусных устройств ВВЭР-1000 при продлении срока эксплуатации до 60 лет» РД ЭО 1.1.2.99.0944-2013, Методика одобрена Ростехнадзором и введена в действие «Концерном «Росэнергоатом».