

РАЗРАБОТКА НОВЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

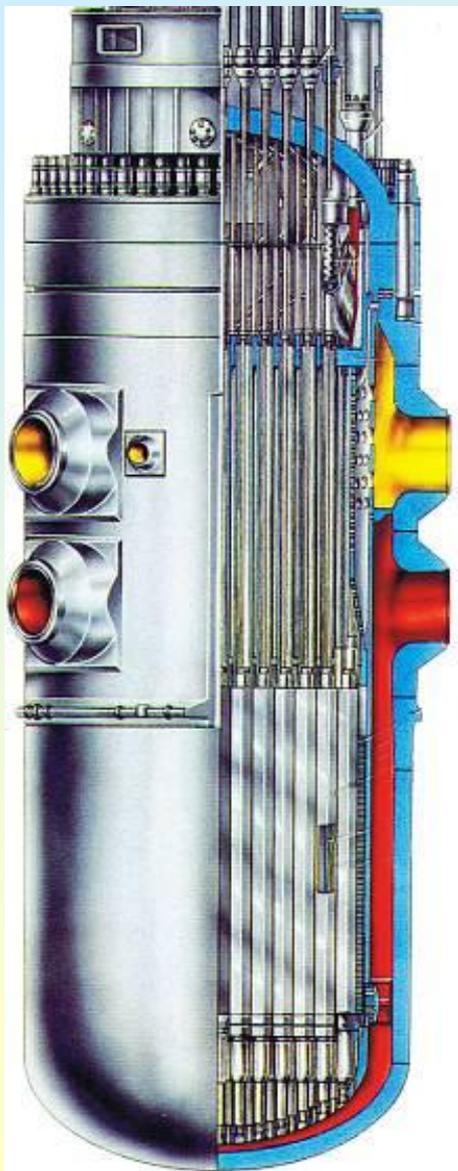
Докладчик: – **Заместитель генерального директора Карзов Г.П.**



МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

ЗАМКНУТЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ

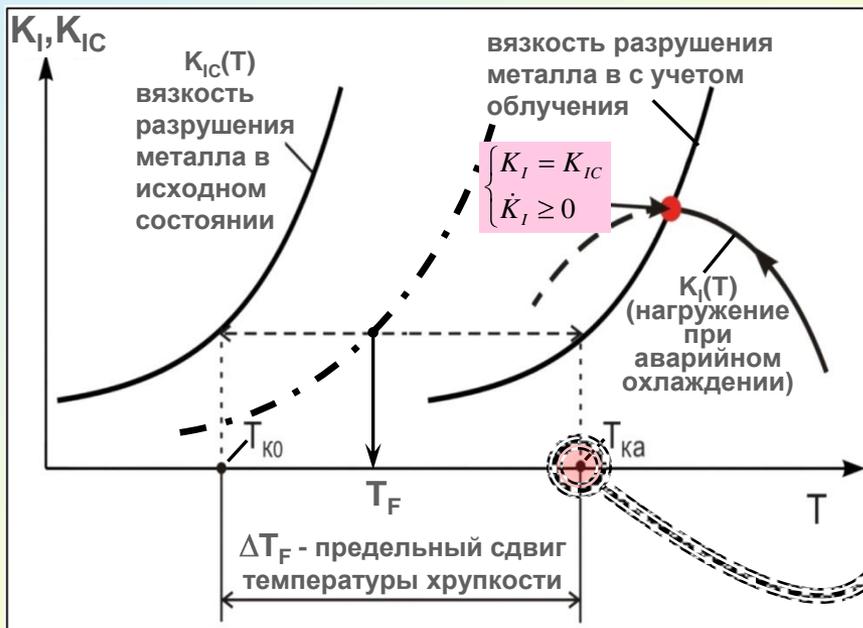




ВОДО-ВОДЯНЫЕ АТОМНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ ТИПА ВВЭР

СХЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСКАЕМОГО СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ КОРПУСА РЕАКТОРА

Определение допустимого состояния корпуса реактора



$T_{ка}$ – предельное значение критической температуры хрупкости металла корпуса реактора

Определение допустимого значения флюенса нейтронов



F – флюенс нейтронов

A_F – коэффициент радиационного охрупчивания металла

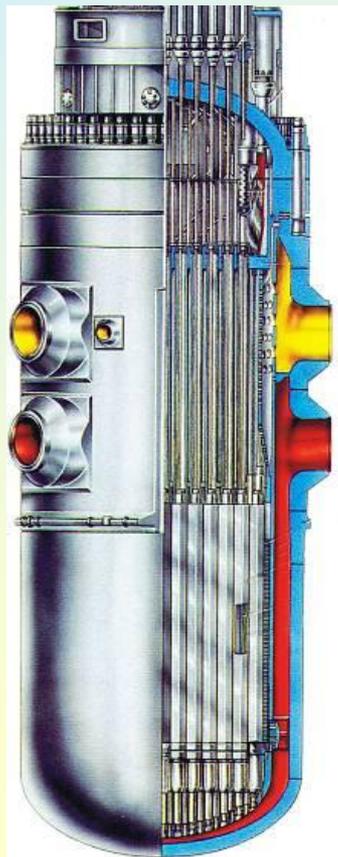
Предельный флюенс :

$$F = \left(\frac{T_{ка} - T_{ко}}{A_F} \right)^n$$

Ресурс : $t = \frac{F}{\Phi}$

Φ – флукс нейтронов

ВКУ АТОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР



Внутрикорпусные устройства

Виды эксплуатационных воздействий

1. Нейтронное облучение
2. Статические и вибрационные нагрузки
3. Коррозионное воздействие среды первого контура, активируемое продуктами радиолиза воды

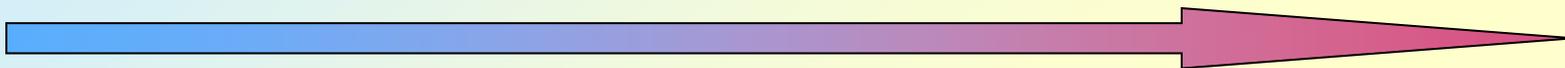
Механизмы повреждения

1. Охрупчивание под воздействием облучения
2. Радиационное распухание
3. Ползучесть, активированная облучением
4. Коррозионное растрескивание под напряжением

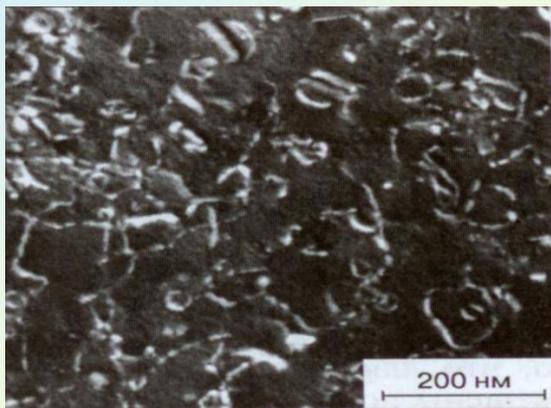
Виды возможного разрушения

1. Возникновение и развитие коррозионно-усталостных трещин
2. Низкоэнергетическое вязкое разрушение в зонах распухания

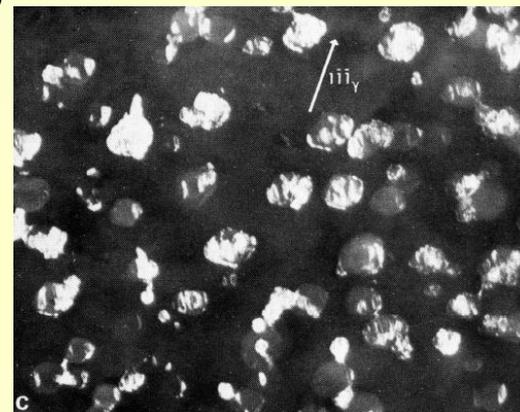
ВЛИЯНИЕ РАСПУХАНИЯ НА ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛИ. $\gamma \rightarrow \alpha$ – ПРЕВРАЩЕНИЕ



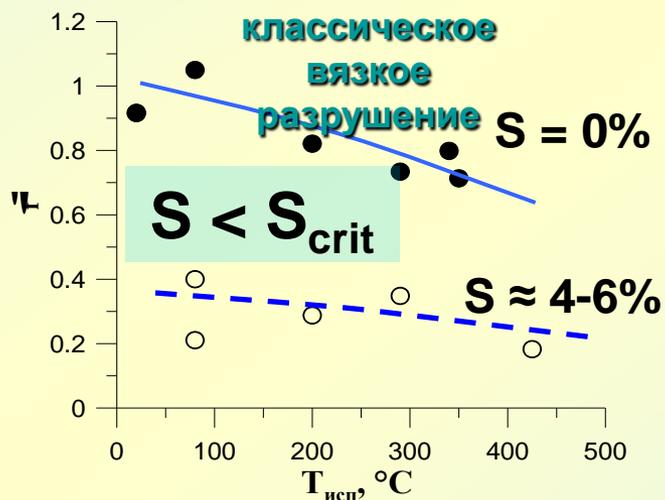
Распухание S



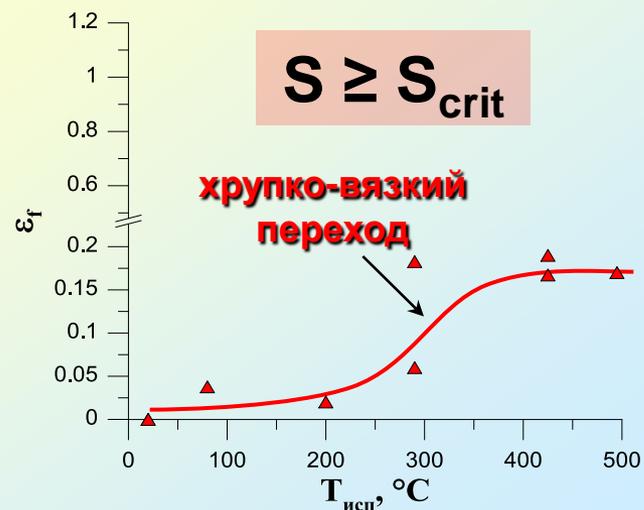
Дислокационная структура облученной стали. Вакансионные поры отсутствуют.



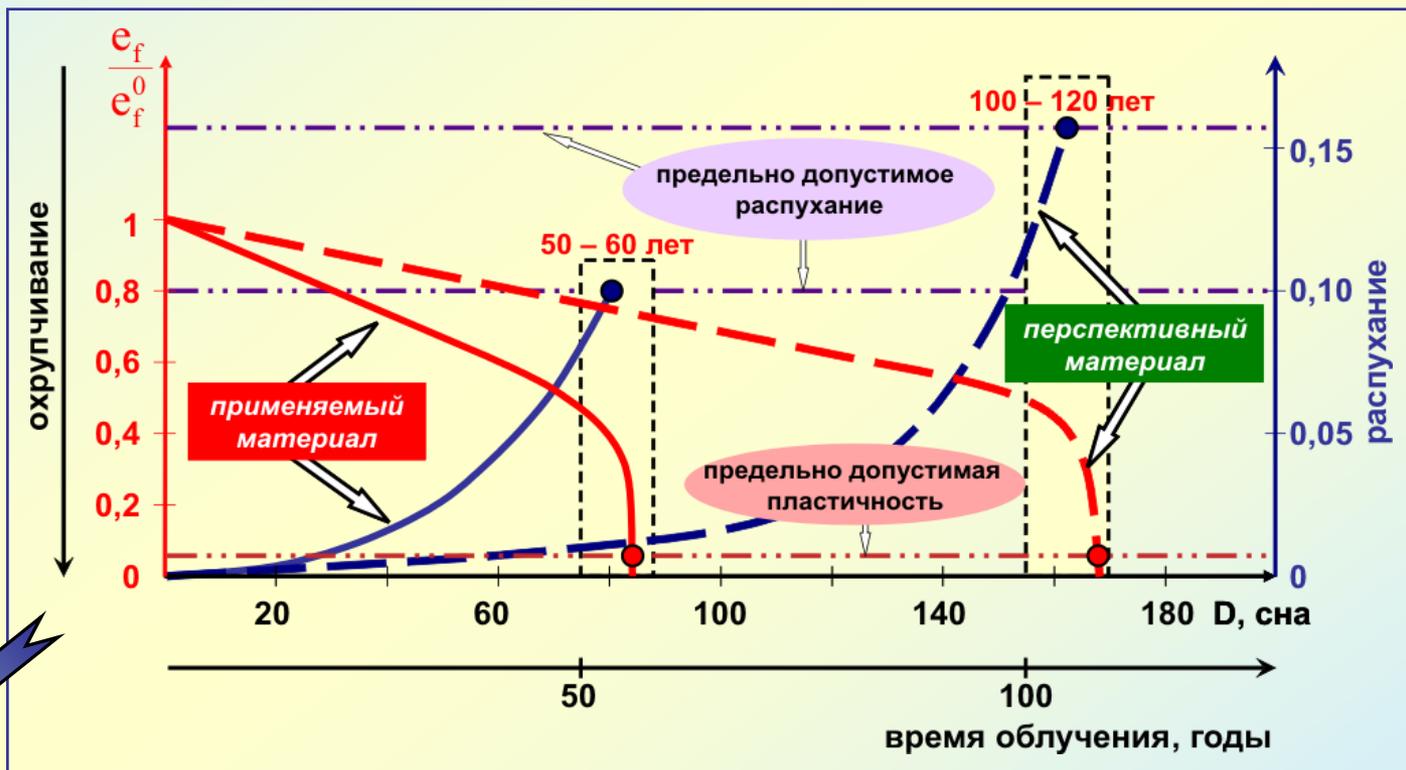
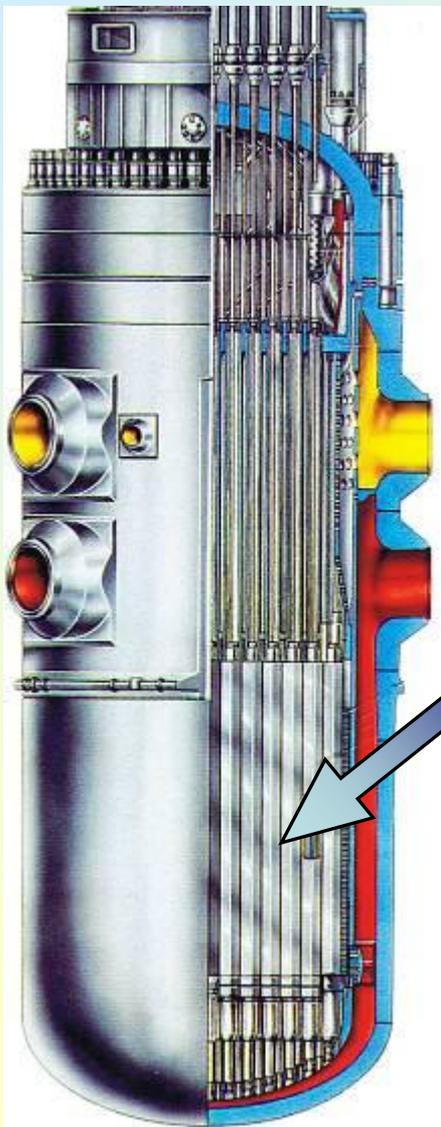
Оболочки α -фазы вокруг пор в облученной стали. Темнопольное изображение (111- γ рефлекс).



$S_{crit} \approx 7\%$



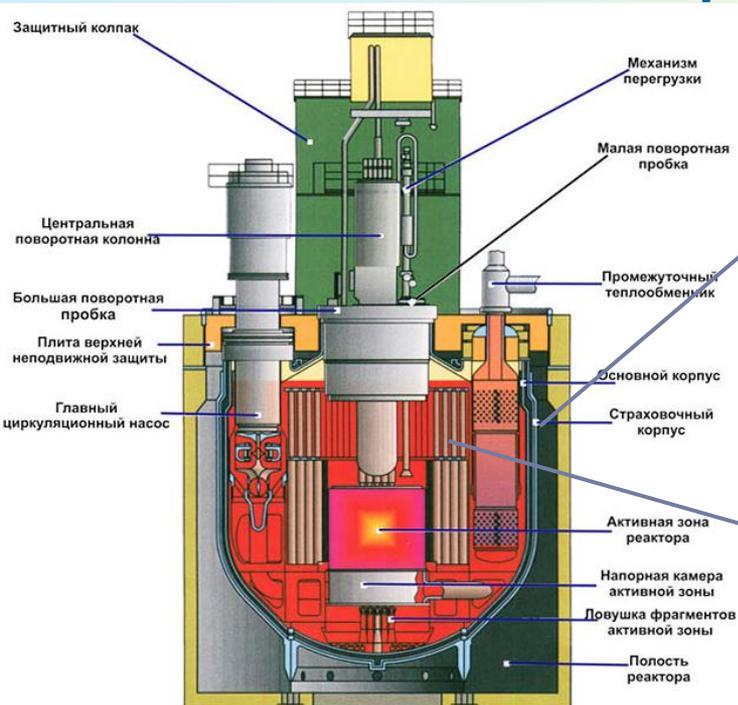
МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ВНУТРИКОРПУСНЫХ УСТРОЙСТВ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР



применяемый материал — сталь X18H10T

перспективный материал — сталь с повышенным содержанием никеля с наноструктурой в виде доменов ближнего порядка

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ПРИ ВЫБОРЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭНЕРГБЛОКОВ ТИПА БН



Задачи

Корпус

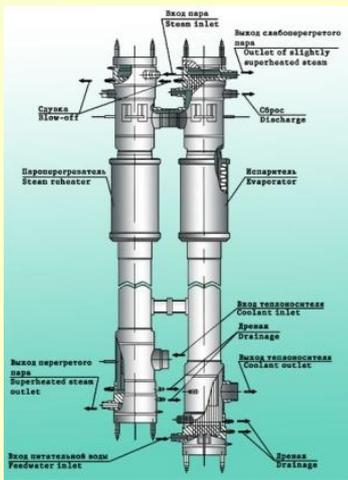
Обеспечение стойкости к тепловому старению

ВКУ

Обеспечение высокого сопротивления ползучести в условиях интенсивного нейтронного облучения

Парогенератор

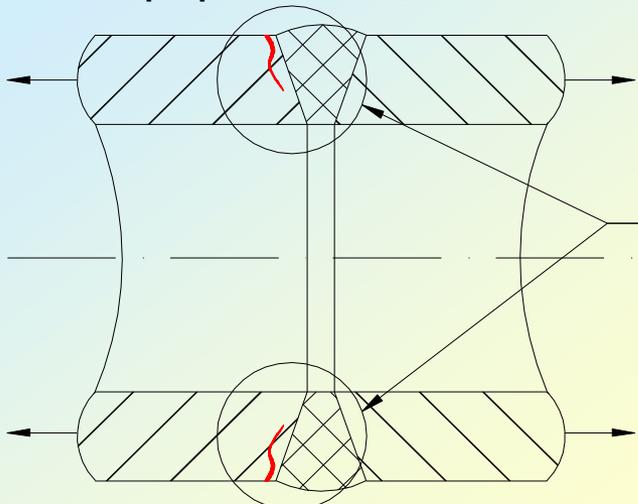
Обеспечение высокой коррозионной стойкости и жаропрочности.



Обеспечение коррозионной стойкости при монтаже в условиях атмосферной коррозии

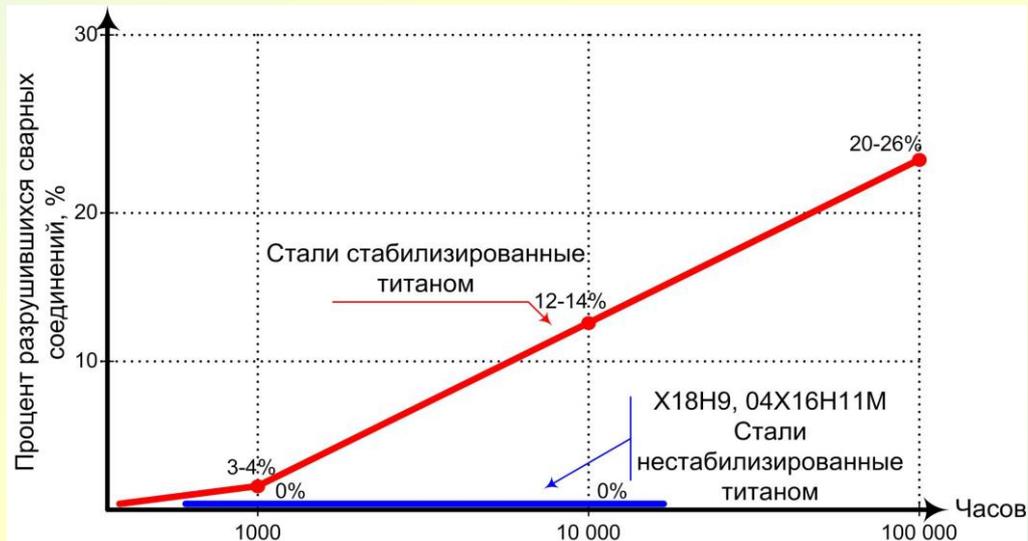
ВЫБОР КЛАССА СТАЛЕЙ ДЛЯ РЕАКТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ УСТАНОВОК ТИПА БН

Элемент трубопровода сверхкритического давления



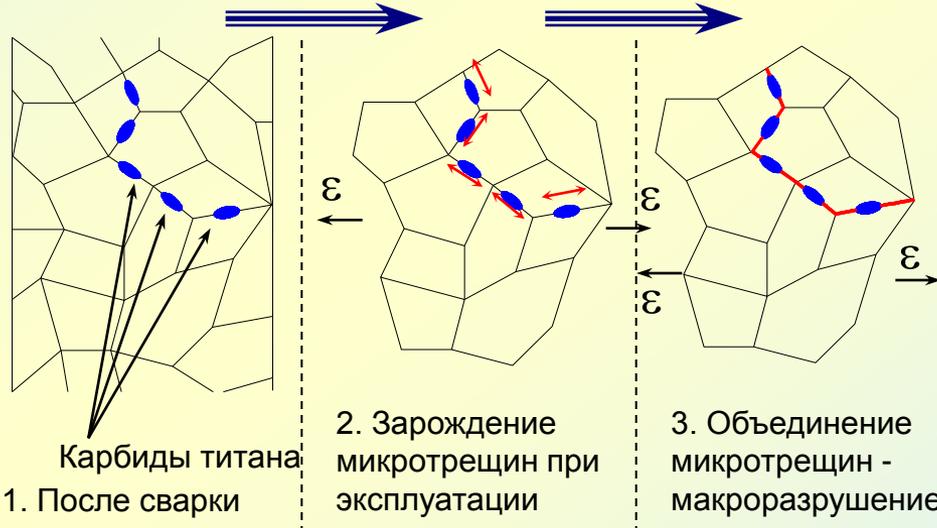
Область локального разрушения околошовной зоны

T-570-620 С Р=25-27МПа
 Стали: 06X17H11M3Т
 07X16H11M3ФТ



Результаты опытной эксплуатации на Черниговской ГРЭС

Схема возникновения разрушения в околошовной зоне



Для изготовления реакторов типа БН, работающих при температуре 560 С, рекомендуются стали **нестабилизированные ТИТАНОМ**

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РЕАКТОРА ТИПА БН (Этап I)

ПРИМЕНЕНИЕ СТАЛИ X16H11M3 ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НАИБОЛЕЕ НАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РУ БН-800 И БН-1200 ВМЕСТО СТАЛИ X18H9

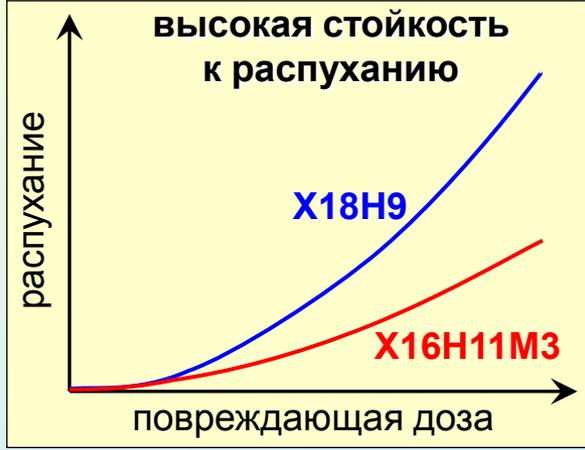
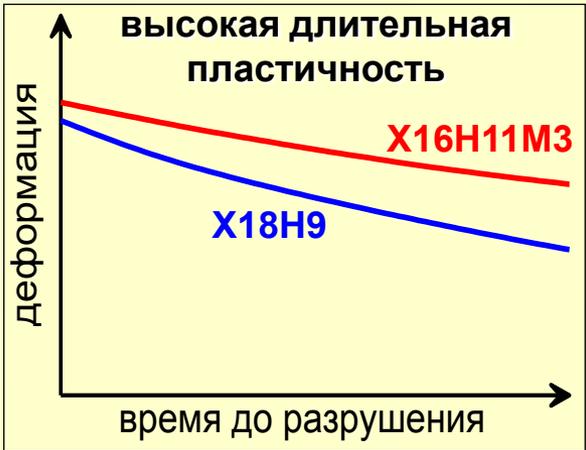
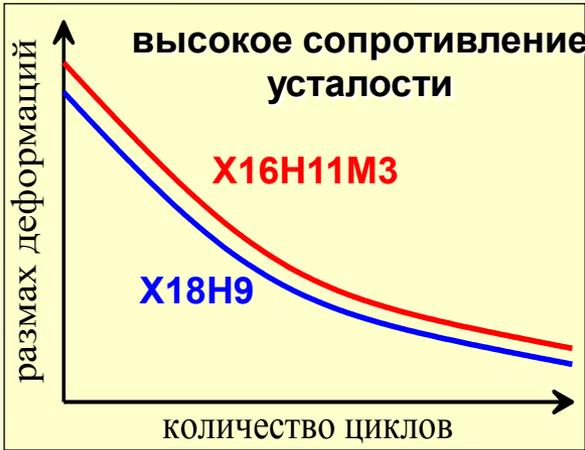
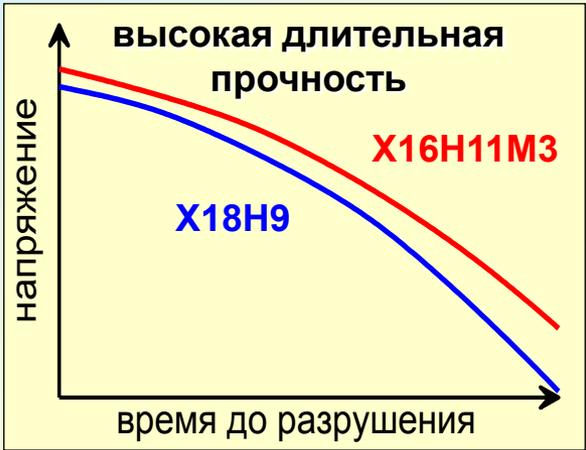
Нагружающие факторы:

- температура
- облучение
- распухание

Механизмы повреждения:

- усталость
- ползучесть
- формоизменение

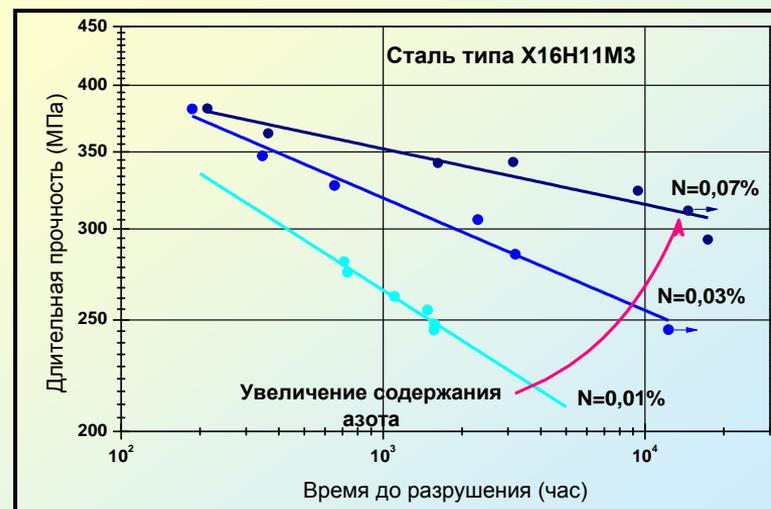
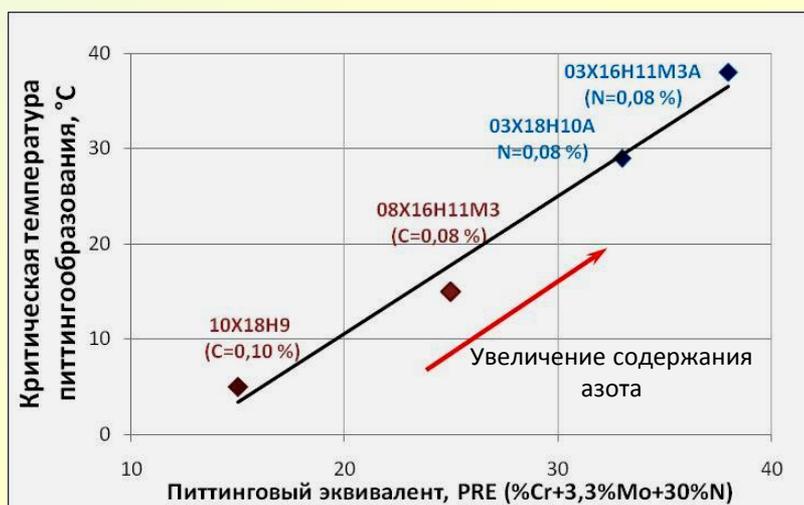
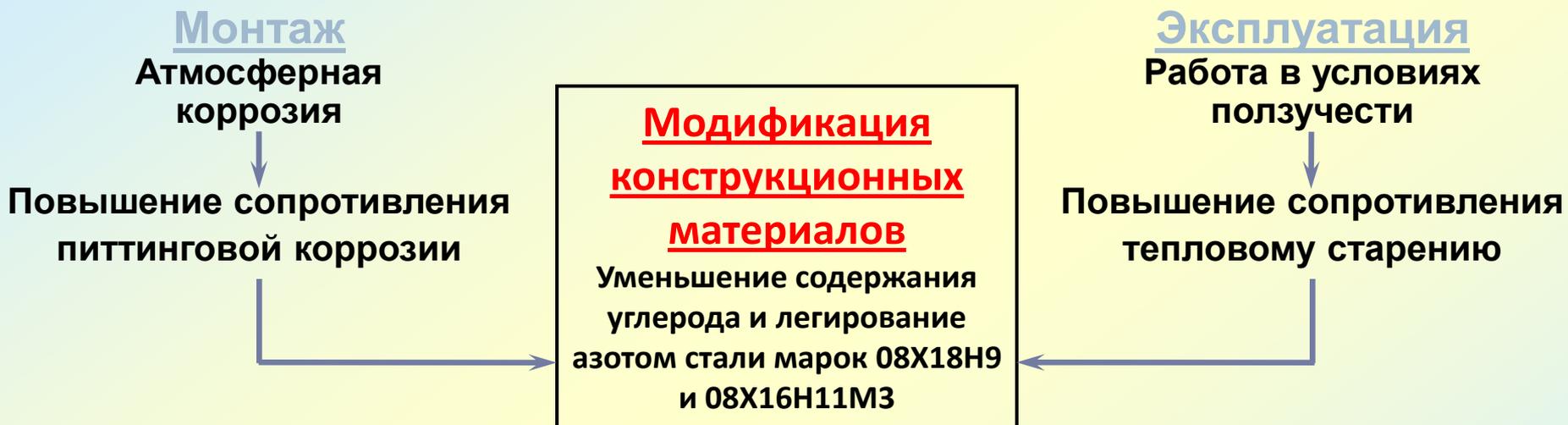
Преимущества стали X16H11M3



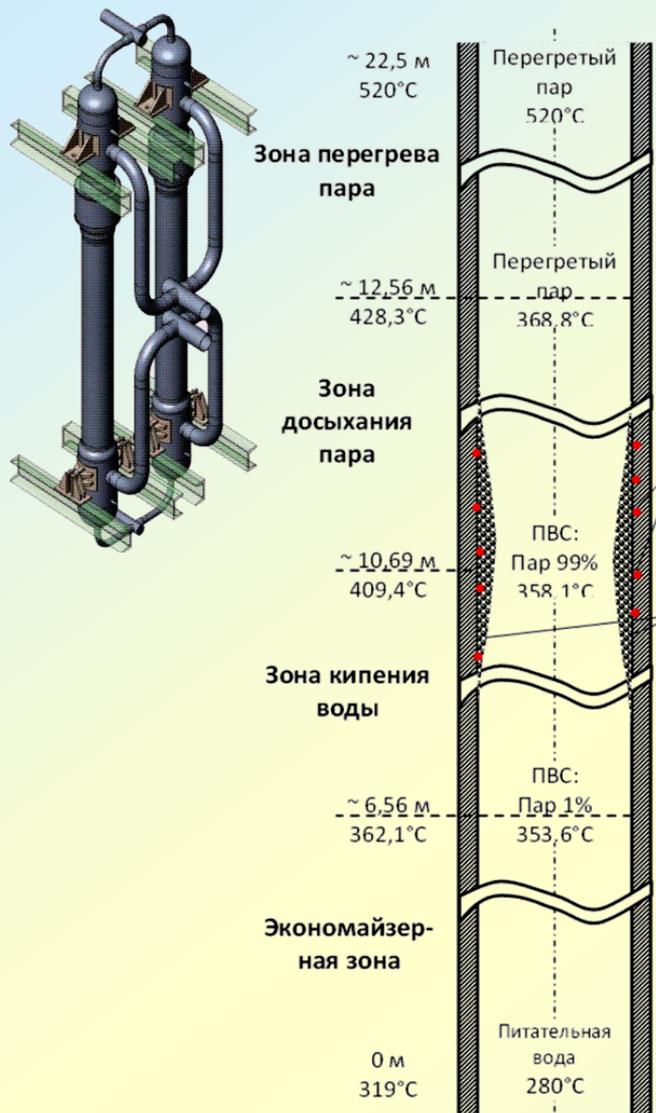
Отсутствие необходимости термообработки после сварки

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РЕАКТОРА ТИПА БН (Этап II)

РАЗРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РЕАКТОРА СЕРИЙНОГО ЭНЕРГБЛОКА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ БН-1200



РАЗРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПАРОГЕНЕРАТОРА ЭНЕРГООБЛОКА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ БН-1200



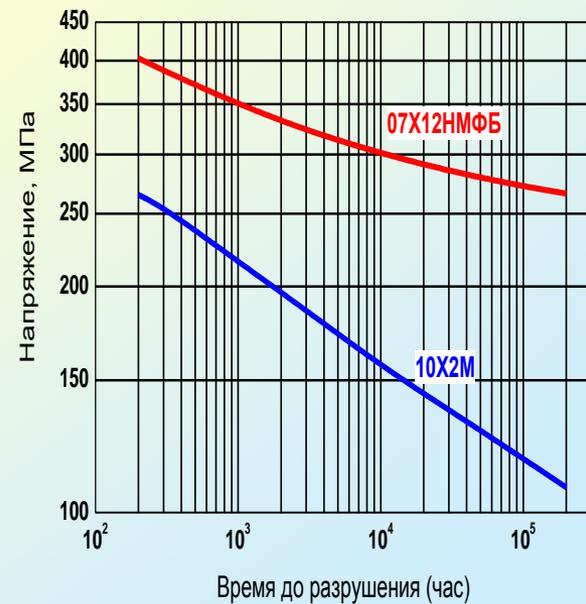
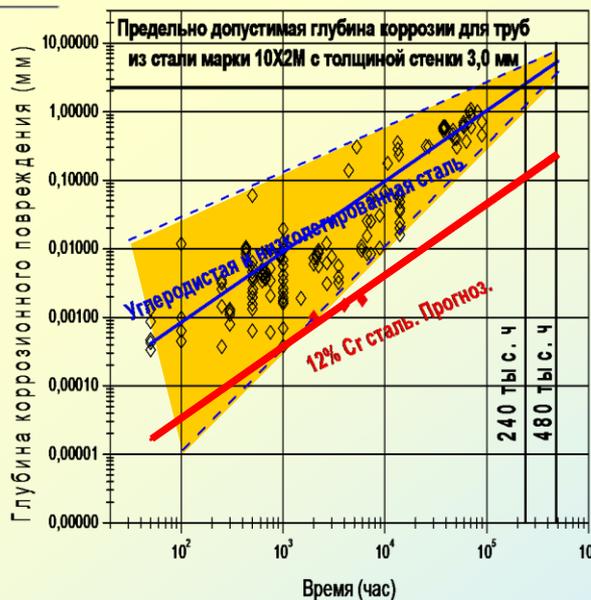
Коррозионное повреждение

Повышение сопротивления питтинговой коррозии

Работа в условиях ползучести

Повышение жаропрочности

Материал
Разработка новой жаропрочной 12% Cr стали марки 07X12NMФБ



ЗАДАЧИ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОРПУСА АТОМНОГО РЕАКТОРА И ОБОРУДОВАНИЯ РУ С ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ Pb и Pb-Bi

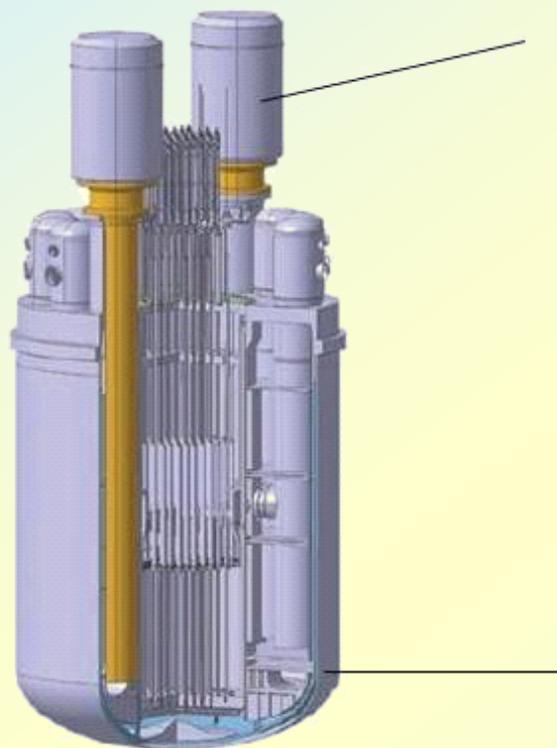
Pb-Bi

Парогенератор

- Коррозионная стойкость в пароводяной среде при ресурсе до 400 тыс. час.
- Коррозионная стойкость в жидком Pb и Pb-Bi.

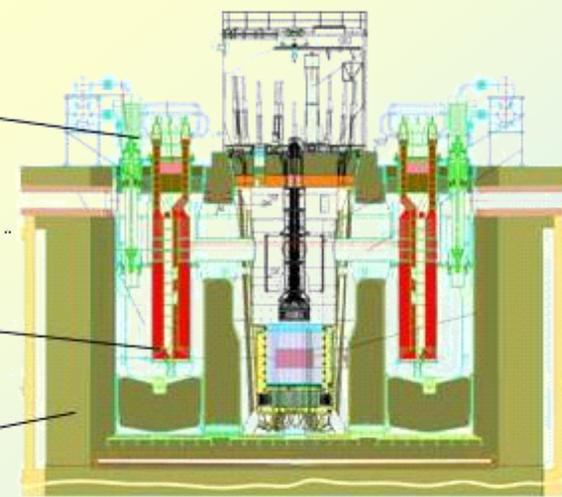
Корпус + ВКУ

- Коррозионная стойкость в жидком Pb и Pb-Bi.
- Радиационная стойкость при повреждающих дозах до 20-30 сна.



СВБР-100

Pb



Брест - 300

РАЗРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК С ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ Pb и Pb-Bi

АПЛ пр. 705

-Разработка конструкционных материалов: аустенитной кремнистой стали 10X15H9C3B1 (ЭП 302), низколегированных кремнистых сталей 15X1CMФБ, 10X1C2M
Отработка технологии теплоносителя
-Предварительное окисление тракта теплоносителя в газовых и жидкометаллических средах;
-Периодическая обработка сплава Pb-Bi водородом с последующим добавлением кислорода

Pb-Bi,

$T_{\max} = 465^{\circ}\text{C}$

СВБР-100

Применение сталей
-10X15H9C3B1 (ЭП 302) (ВКУ)
-биметаллические трубы в парогенераторе 10X15H9C3B+ 03X21H32M3B (ЭП 302 + ЧС-33)
Поддержание концентрации O_2 в Pb-Bi на уровне $10^{-6} \%$

Pb-Bi,

$T_{\max} = 490^{\circ}\text{C}$

БРЕСТ-300

Применение сталей: аустенитной кремнистой стали 10X15H9C3B1 (ЭП 302), 16X12BMCФ5P (ВКУ), 9%-хромистой стали с кремнием 10X9HCMФБ, аустенитной кремнистой стали X18H13C2AMBФ5P (трубы парогенератора)
Поддержание концентрации O_2 в Pb на уровне $10^{-6} \%$

Pb,

$T_{\max} = 550^{\circ}\text{C}$

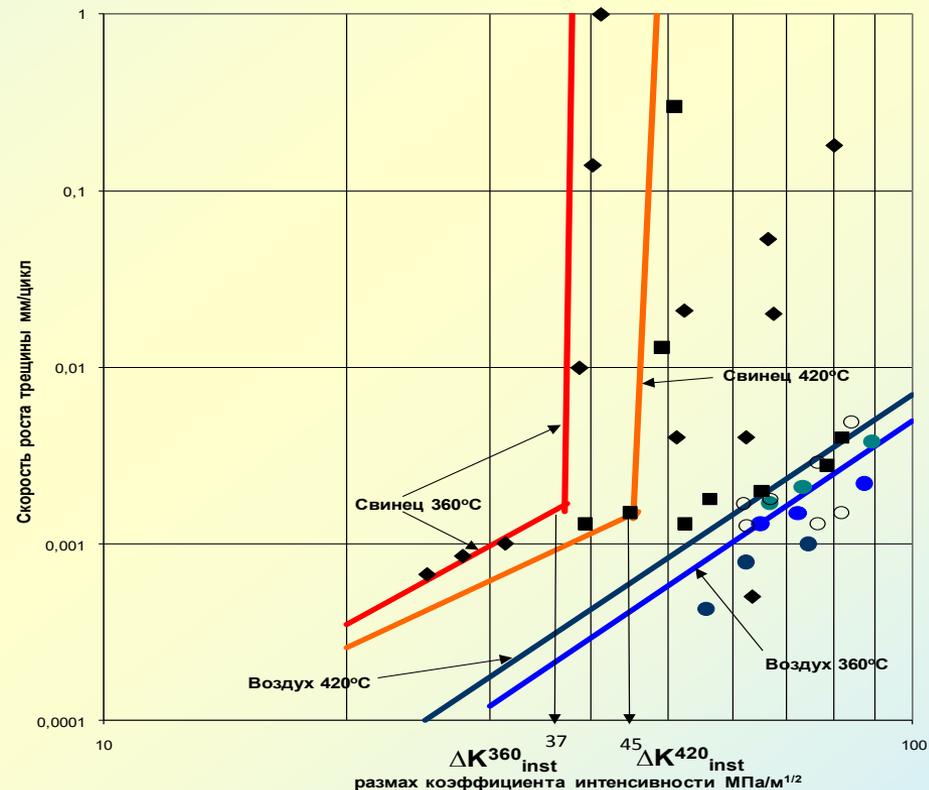
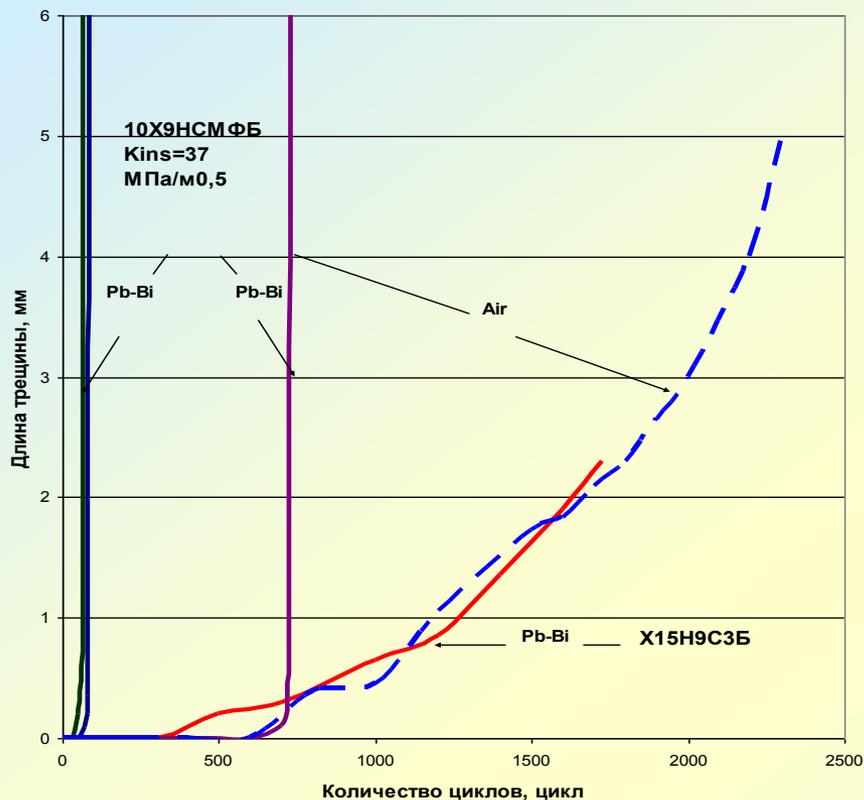
БРЕСТ-1200

Разработка конструкционных материалов: аустенитной кремнистой стали 04X15H11C3MT (ВКУ)
9%-хромистой стали с кремнием 10X9HCMФ аустенитной кремнистой стали X18H13C2AMBФ5P (трубы парогенератора).
Поддержание концентрации O_2 в Pb на уровне $10^{-6} \%$

Pb,

$T_{\max} = 550^{\circ}\text{C}$

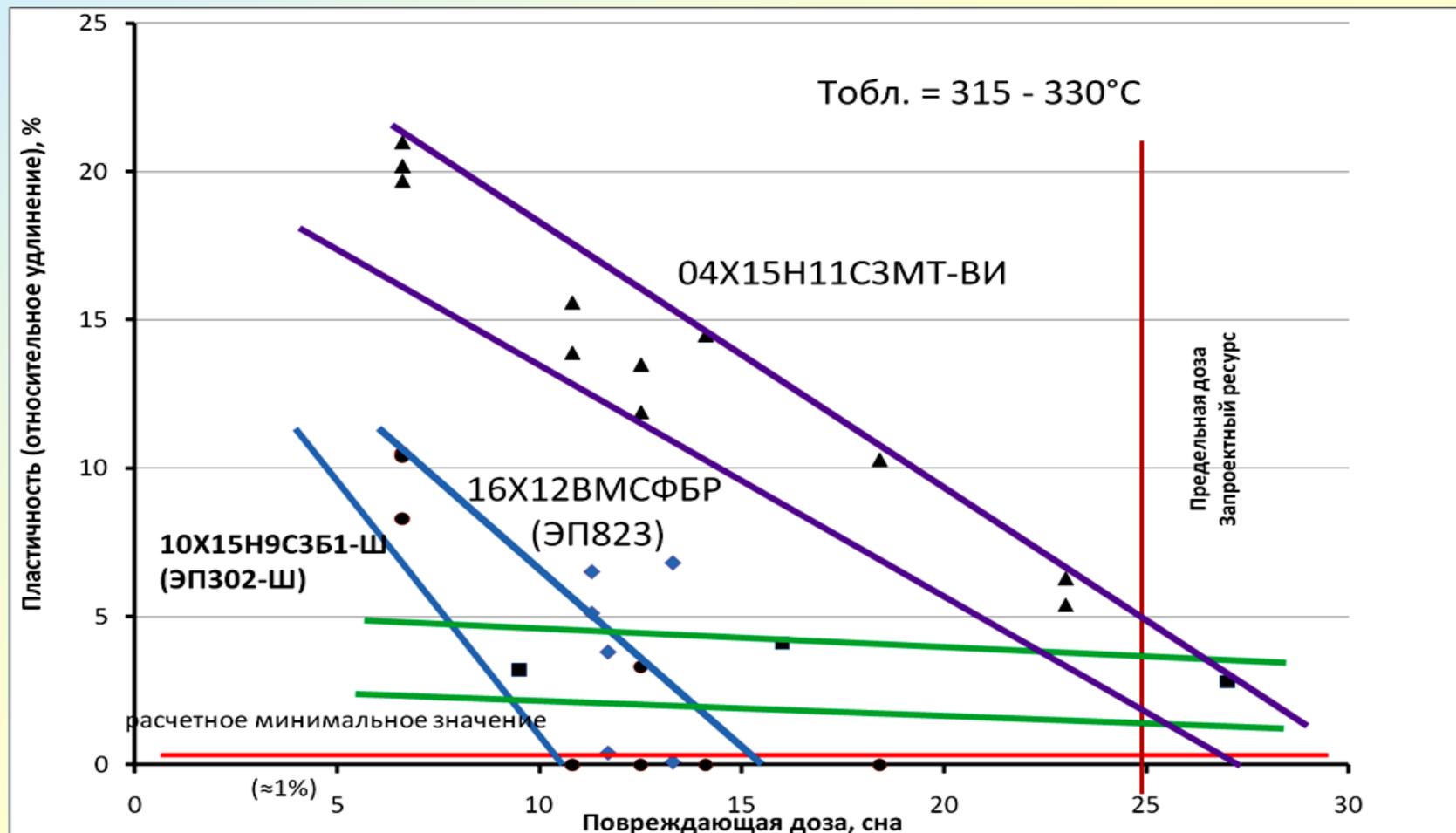
АДСОРБЦИОННОЕ ВЛИЯНИЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ



Кинетика трещины при температуре 360 С,
для хромистой стали 10X9HСMФБ и
аустенитной стали 10X15H9C3Б (ЭП 302)
в жидкометаллическом теплоносителе
и на воздухе

Обобщенная зависимость роста
усталостных трещин в стали
10X9HСMФБ(а) в свинце и на воздухе
при различных температурах.
(— свинец 420 С, — свинец 360 С,
о - воздух 420 С, - воздух 360 С.)

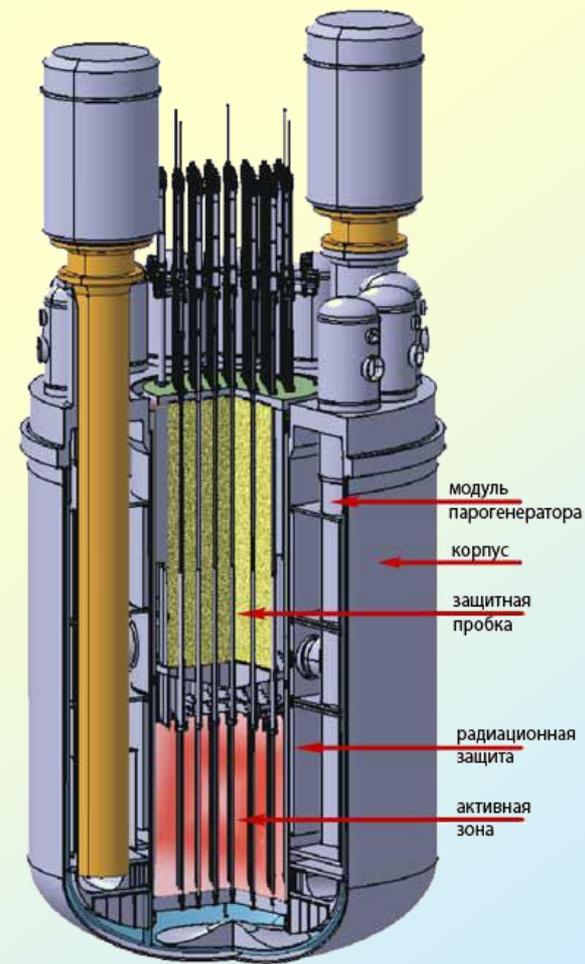
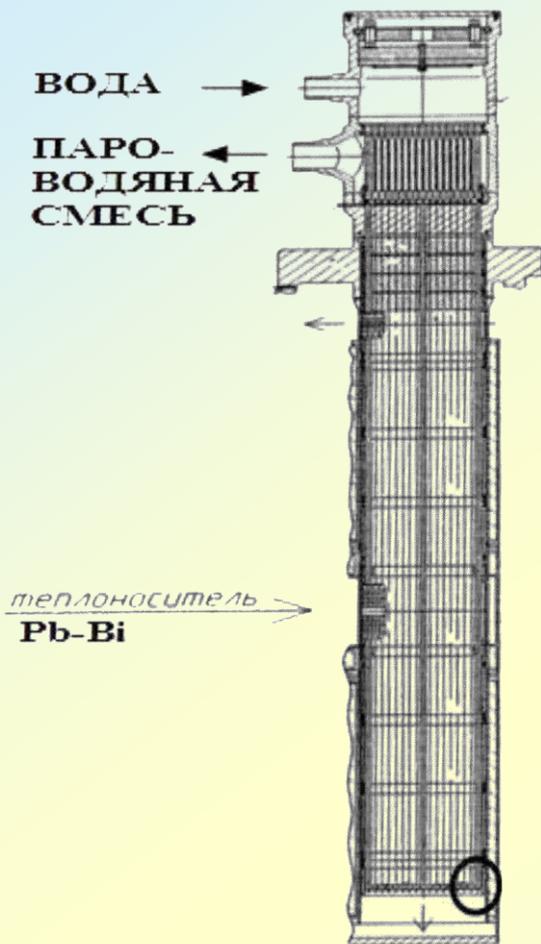
РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ВКУ РЕАКТОРОВ С ТЯЖЕЛЫМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ



Пластичность стали в зависимости от повреждающей дозы, (сна)

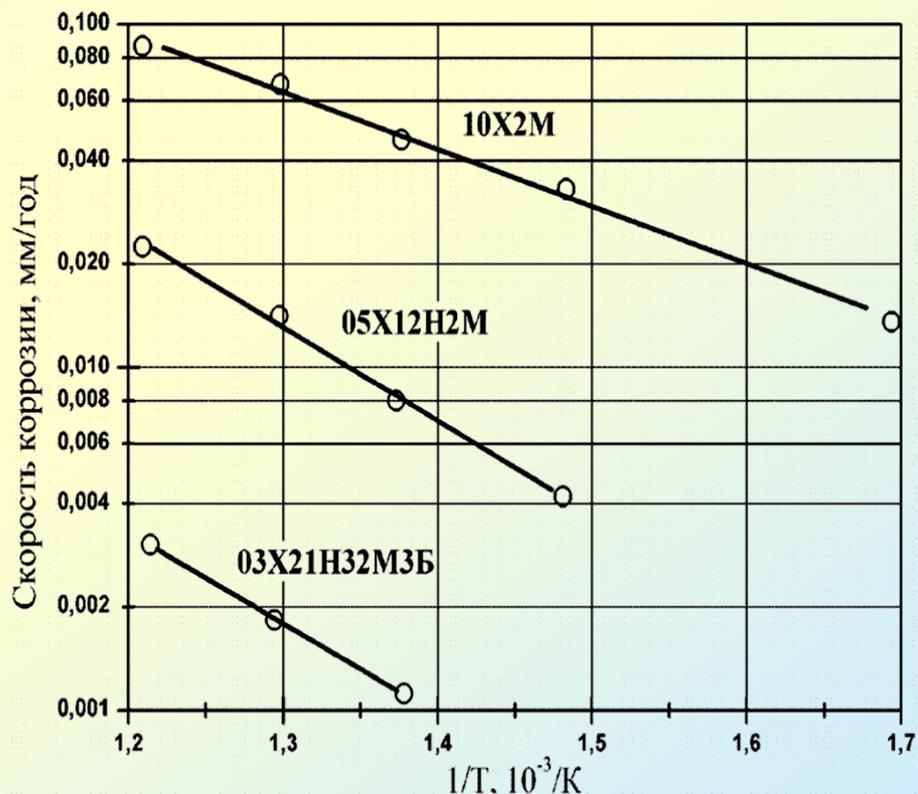
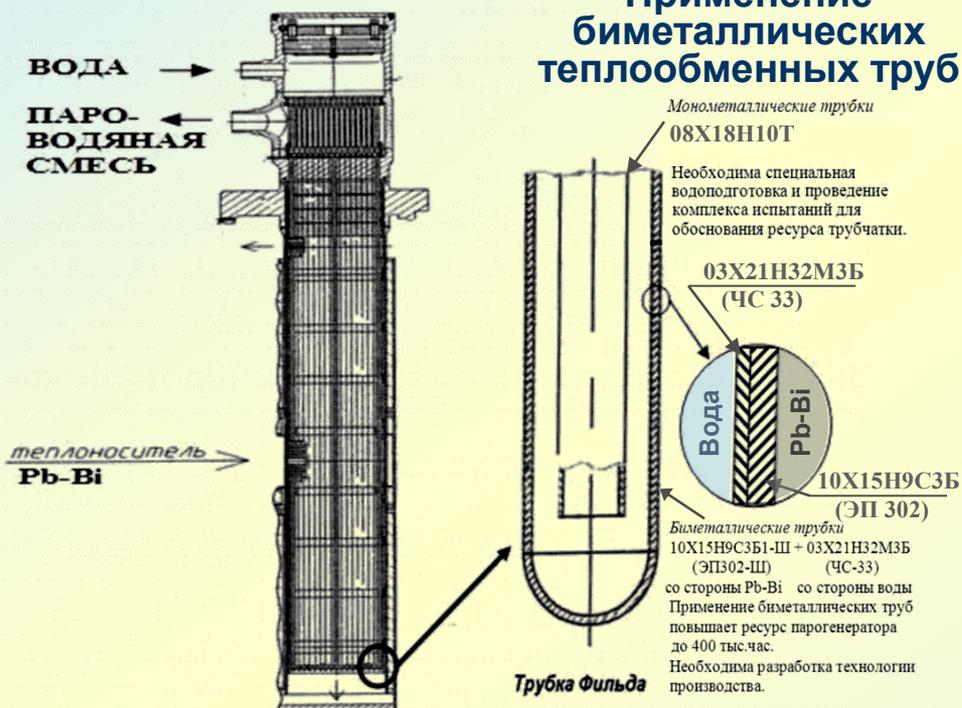
ВАЖНЫЙ ВЫВОД:

С целью обеспечения безопасности работы установок на быстрых нейтронах с теплоносителями свинец и свинец-висмут следует **исключить** применение в составе этих установок сталей ферритного класса в контакте с жидкими металлами



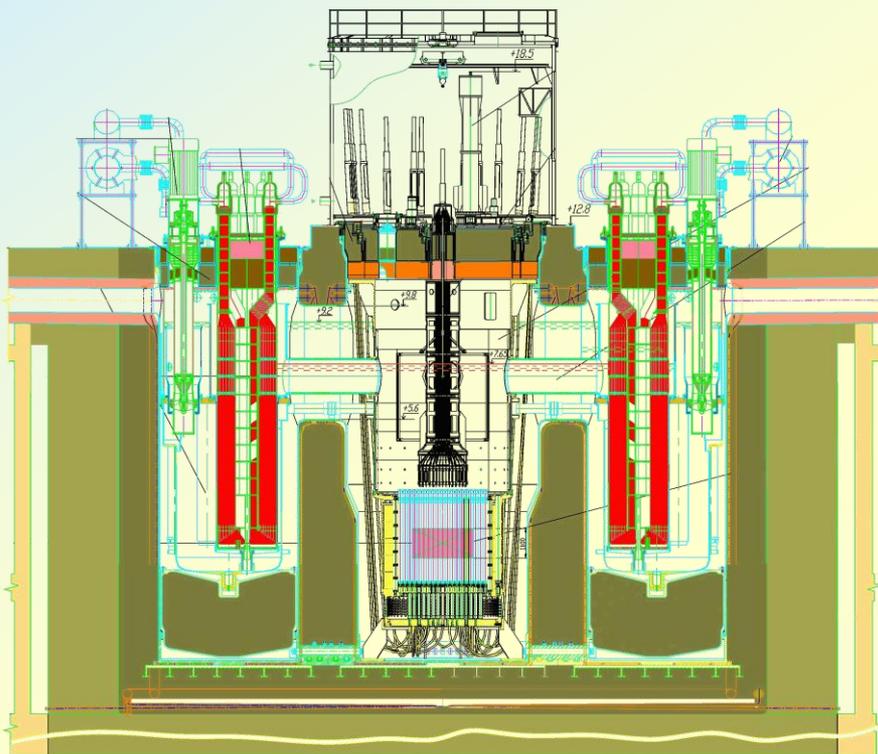
ВЫБОР КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК С ТЯЖЕЛЫМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

Особенности: одновременное воздействие жидкого металла и пароводяной среды.



Общая коррозия в пароводяной среде основных конструкционных материалов теплообменных труб парогенераторов

РЕАКТОРНЫЕ УСТАНОВКИ СО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ БРЕСТ-ОД-300, БРЕСТ-1200



Общий вид установки БРЕСТ-ОД-300

Эксплуатационное воздействие на конструкционные материалы реакторных установок со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями близко.

Это определяет возможность применения одинаковых материалов для реакторных установок проектов СВБР-100, БРЕСТ-ОД-300 и БРЕСТ-1200. При этом, однако, надо учитывать более высокую температуру эксплуатации установок со свинцовым теплоносителем – 550°C вместо 475°C .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На современном этапе развития атомной энергетики процесс создания и обоснования работоспособности новых конструкционных материалов в значительной мере определяет успех разработки и реализации принципиально новых технических решений.
2. Создание конструкционных материалов для оборудования атомных энергетических установок - сложный и долговременный процесс, который предусматривает:
 - поэтапное совершенствование химической композиции материала;
 - поэтапное совершенствование технологии его изготовления;
 - проведение комплексных испытаний его служебных характеристик;
 - обобщение опыта эксплуатации.
3. Процесс создания и совершенствования конструкционных материалов и технологий их производства - неотъемлемая составляющая обеспечения безопасности эксплуатации атомного энергетического оборудования.

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!