

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ
ОБЪЕДИНЕНИЕ
«ЦНИИТМАШ»



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ОТЖИГА КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000

Гурович Б.А.

НИЦ «Курчатовский институт»

Дуб А.В.

ОАО НПО «Цниитмаш»



При обосновании эффективности восстановительного 2
отжига МШ ВВЭР-1000 (с учетом особенностей химического
состава и структуры) было показано, что:

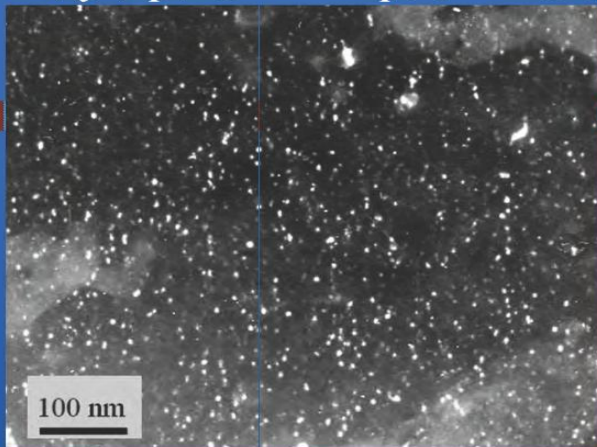
- Наиболее полный возврат радиационно-индуцированных изменений структуры и свойств сталей КР ВВЭР-1000 к исходному состоянию наблюдается при отжиге при температуре 565 °С в течение 100 ч;
- Восстановление структуры и свойств происходит независимо от флюенса быстрых нейтронов, накопленного при первичном облучении.
- Происходит восстановление структуры и свойств основного металла, находящегося в градиенте температур 400-565 °С, включающем температуры интенсивного развития отпускной хрупкости

Для обоснования возможности продления срока службы КР было проведено повторное ускоренное облучение МШ и ОМ до флюенсов, соответствующих суммарному сроку службы 60 лет и более

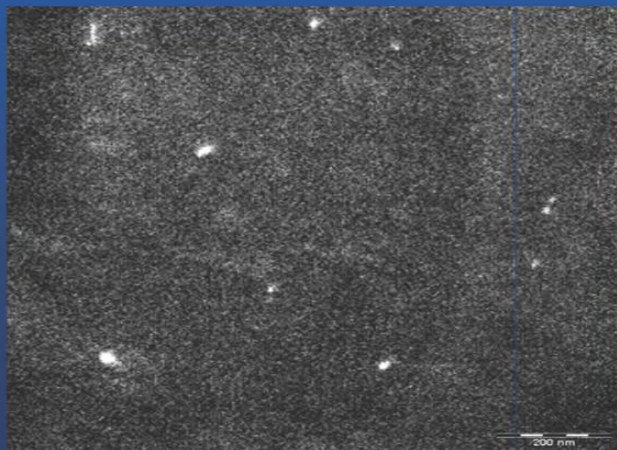


Восстановление структурного состояния и свойств МШ после облучения и отжига

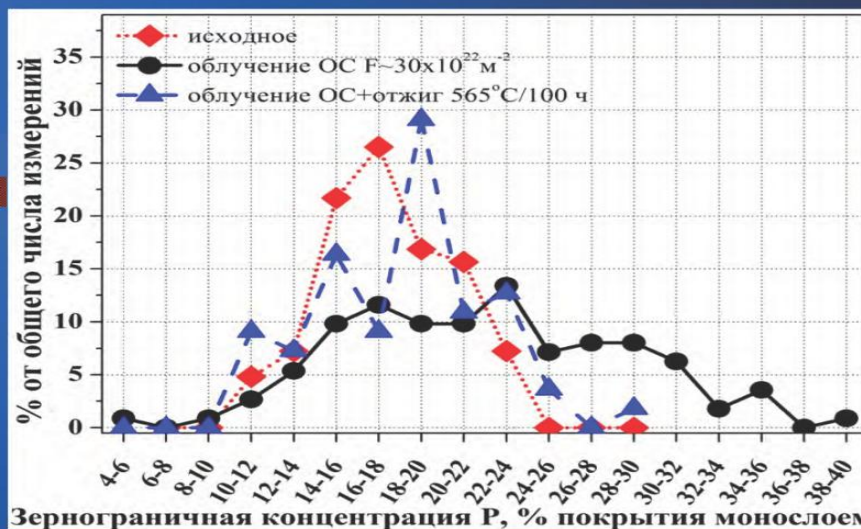
Растворение радиационно-индуцированных преципитатов



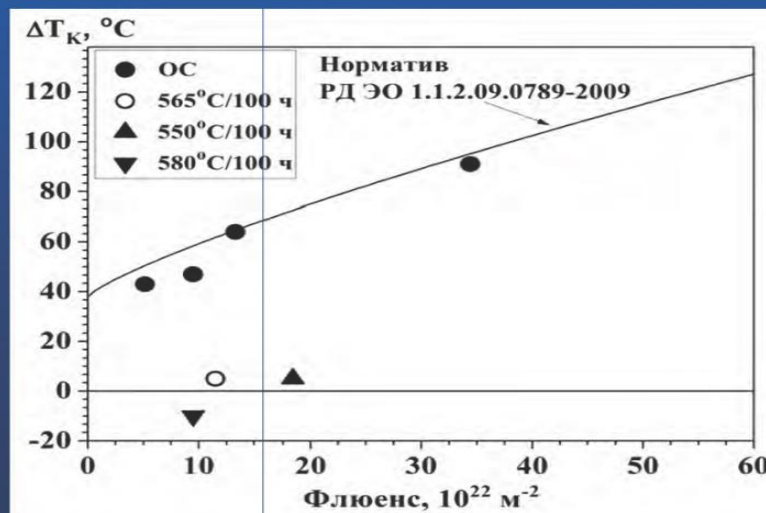
Первичное облучение



Восстановительный отжиг



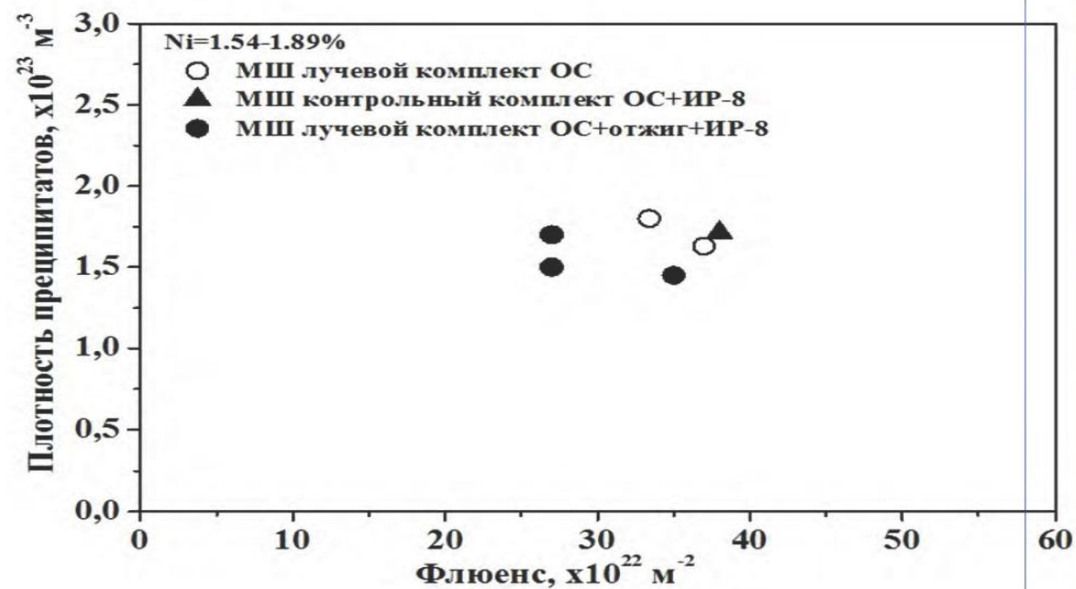
Снижение уровня зернограничной сегрегации фосфора до исходного состояния



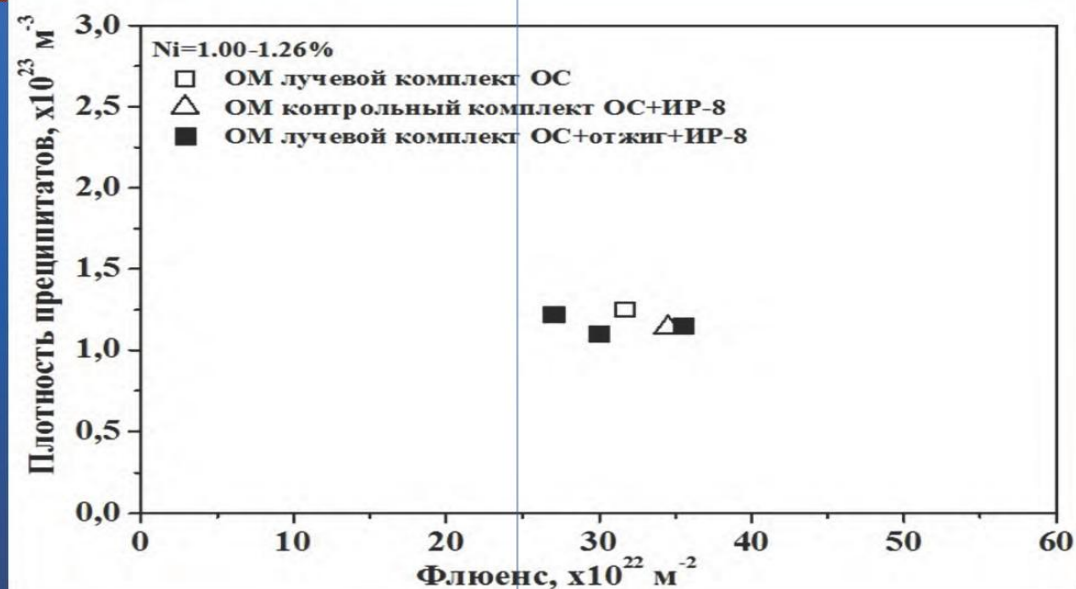
Возврат критической температуры хрупкости



Образование радиационно-индуцированных фаз при повторном ускоренном облучении сталей КР ВВЭР-1000 4



МШ

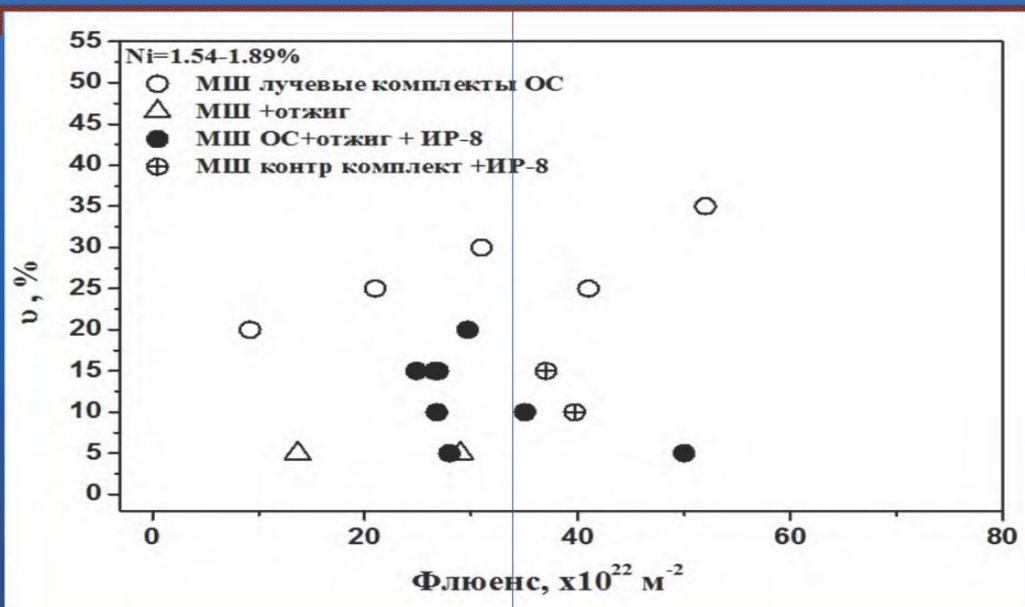


ОМ

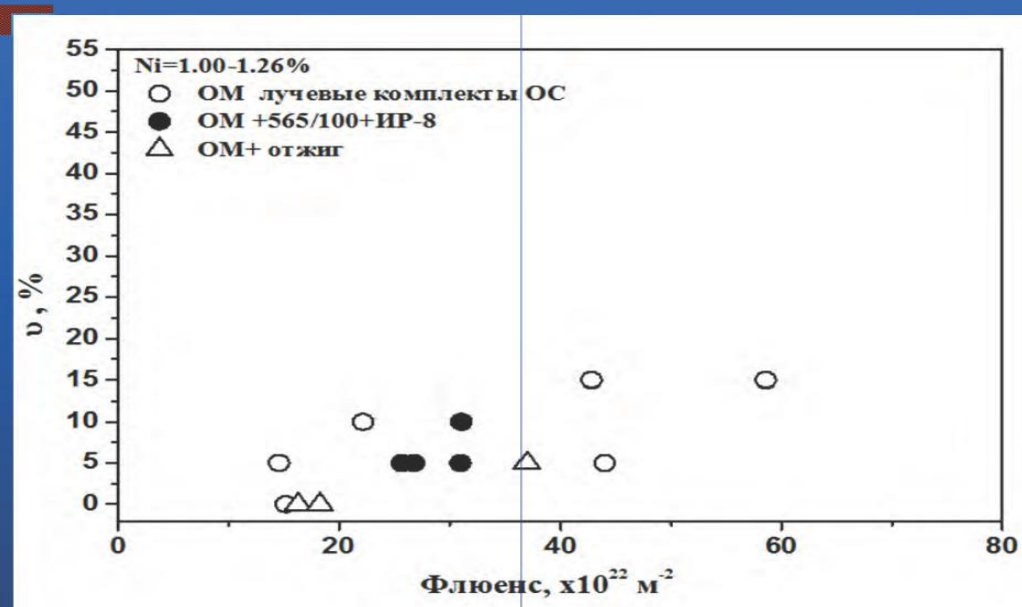
Плотность радиационно-индуцированных выделений при повторном облучении не выше, чем при первичном облучении (с учетом эффекта флакса для МШ)



Склонность сталей КР ВВЭР-1000 при повторном ускоренном облучении к зернограничному охрупчиванию 5



МШ



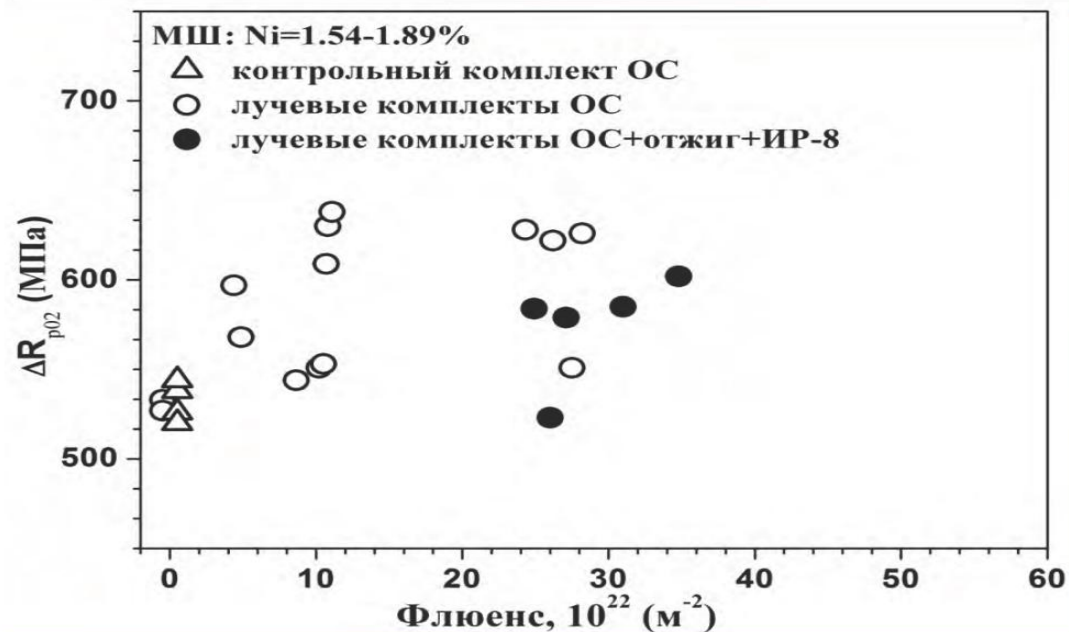
ОМ

Дозовые зависимости доли хрупкого межзеренного разрушения демонстрируют склонность к зернограничному охрупчиванию при повторном облучении не выше, чем при первичном облучении (с учетом эффекта флакса для МШ)

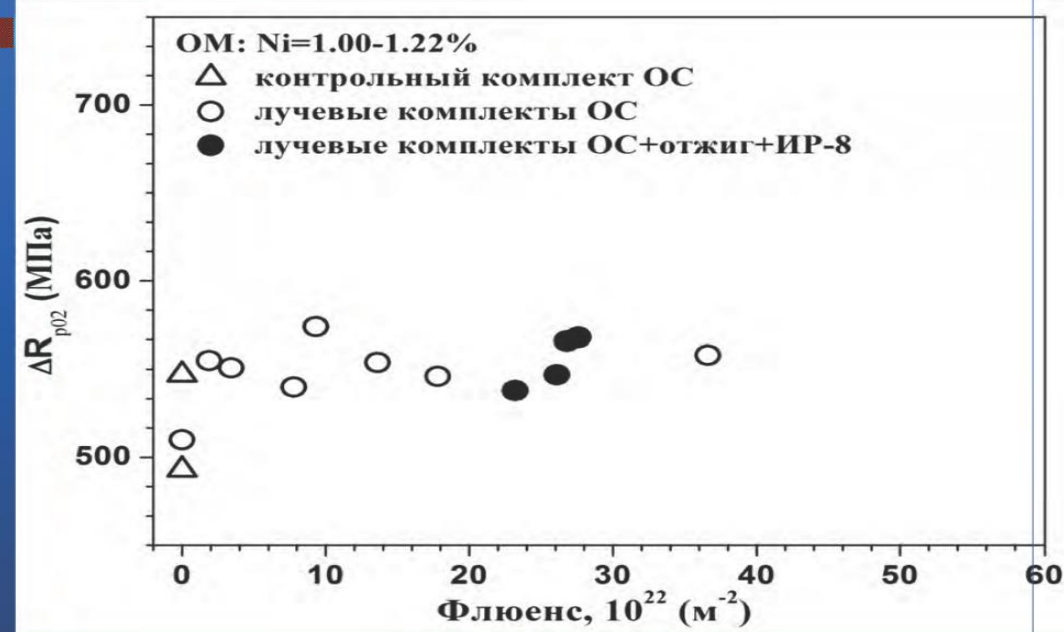


Механические свойства сталей КР ВВЭР-1000 после повторного ускоренного облучения

6



МШ



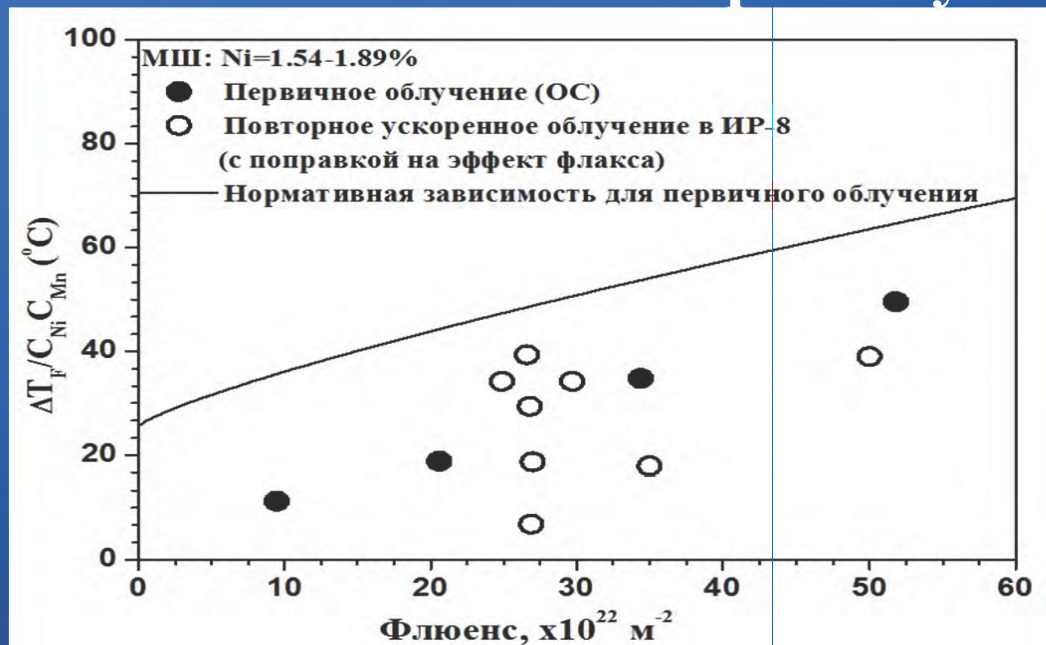
ОМ

Темп радиационного упрочнения сталей КР ВВЭР-1000 при повторном облучении не выше, чем при первичном облучении (с учетом эффекта флакса для МШ)

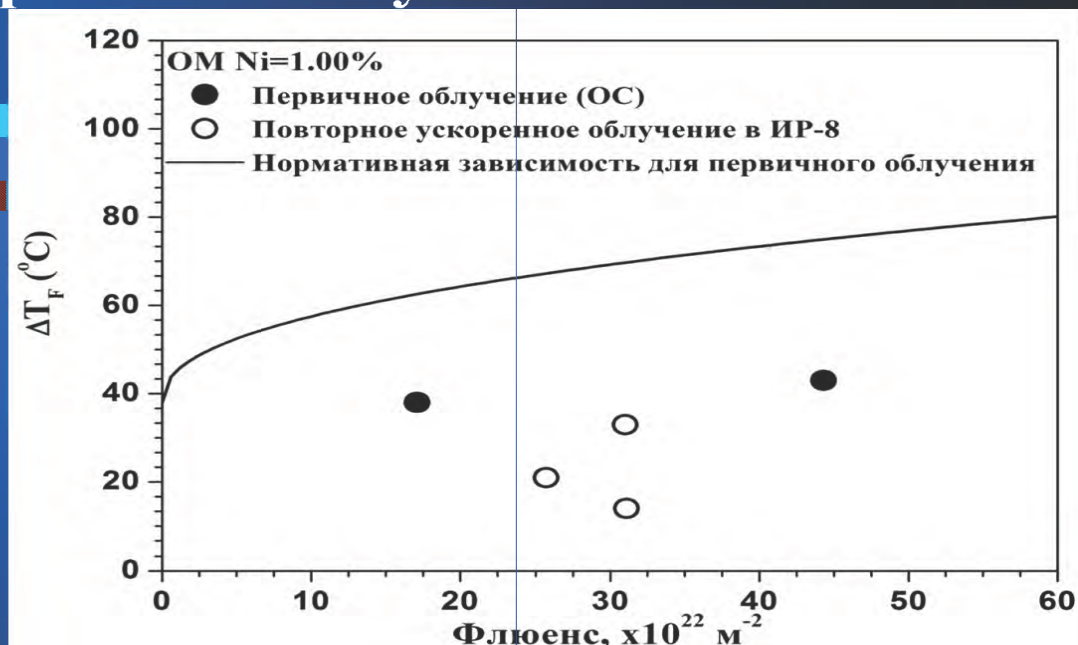


Механические свойства сталей КР ВВЭР-1000 после повторного ускоренного облучения

7



МШ



ОМ

Темп радиационного охрупчивания сталей КР ВВЭР-1000 при повторном облучении не выше, чем при первичном облучении (с учетом эффекта флюкса для МШ).

Для прогнозирования изменения свойств материалов КР ВВЭР-1000 при повторном облучении обосновано использование «консервативной» схемы, когда за исходное состояние принимается состояние после отжига ($\Delta T_{\text{ОСТ}}$), а зависимость изменения принимается как при первичном облучении



Комплекс исследований структуры и механических свойств сталей КР ВВЭР-1000 после повторного ускоренного облучения показал:

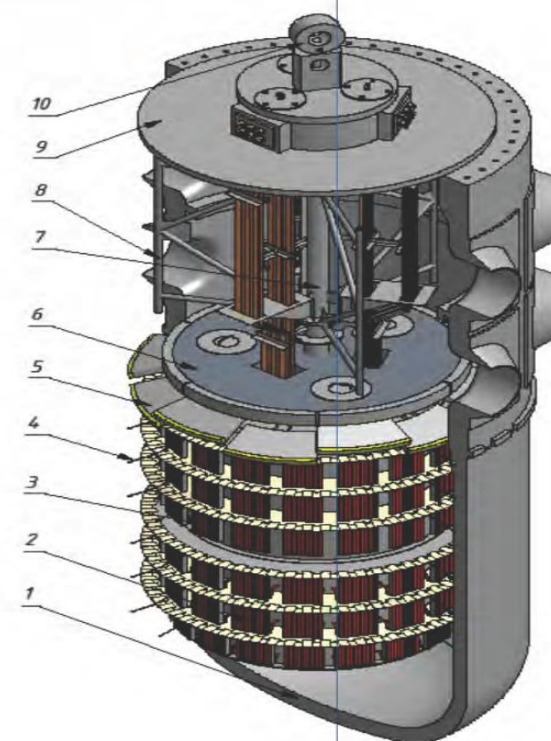
- закономерности эволюции микроструктуры при повторном после отжига охрупчивании не отличаются от наблюдаемых при первичном облучении;
- ожидаемый темп повторного радиационного охрупчивания материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000 будет не выше, чем при первичном облучении (с учетом эффекта флакса для МШ).

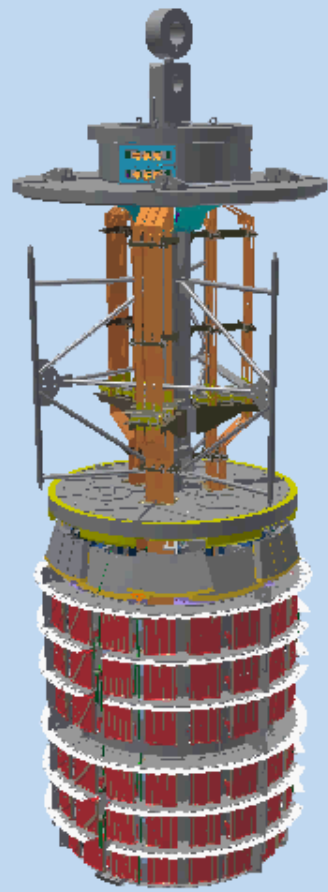
Таким образом, обоснована возможность продления срока службы КР ВВЭР-1000 после проведения восстановительного отжига до суммарного срока службы 60 лет и более

Нагревательное устройство

| | |
|---|------------------|
| Установленная мощность, кВА.....е более | 1000 |
| Напряжение питания, В, Гц..... | 380/220, 50 |
| Напряжение нагревателя, В..... | 36,6 |
| Сила тока на нагревателях, А..... | 364 |
| Количество нагревателей, шт..... | 108 |
| Количество тепловых зон, шт. | 18 |
| Соединение нагревателей в зоне | последовательное |
| Габаритные размеры блока нагрева, мм: | |
| Диаметр..... | max 3830 |
| Высота..... | 10900 |
| Масса, кг..... | 32000 |

- 1 - корпус реактора
- 2 - секция нижняя
- 3 - секция верхняя
- 4 - механизм терморпарный
- 5 - шторки
- 6 - диафрагма
- 7 - штанга
- 8 - направляющие
- 9 - крышка
- 10 - серьга





Основные технические решения

Схема двухстороннего нагрева (нагрев внутренней и наружной поверхностей корпуса) является оптимальной, но практически нереализуема в условиях АЭС.

Схема одностороннего нагрева корпуса с внутренней поверхности при хорошей теплоизоляции наружной поверхности обеспечивает выполнение требований ТЗ.

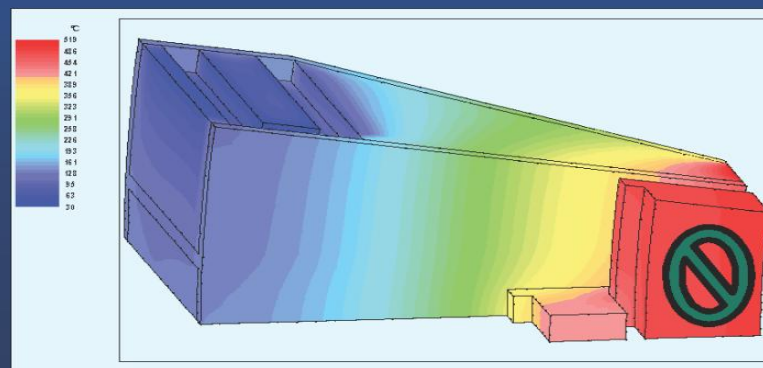
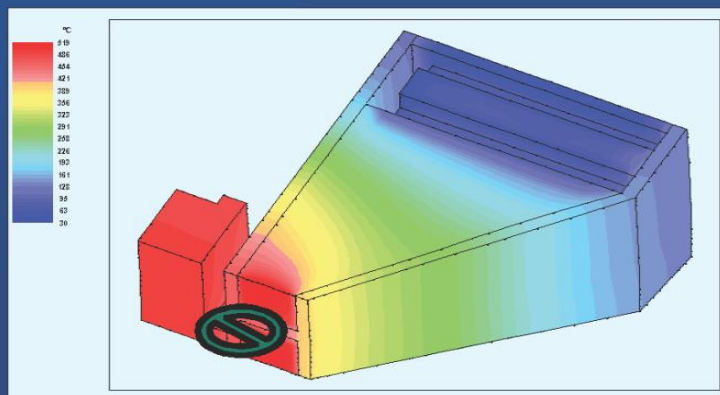
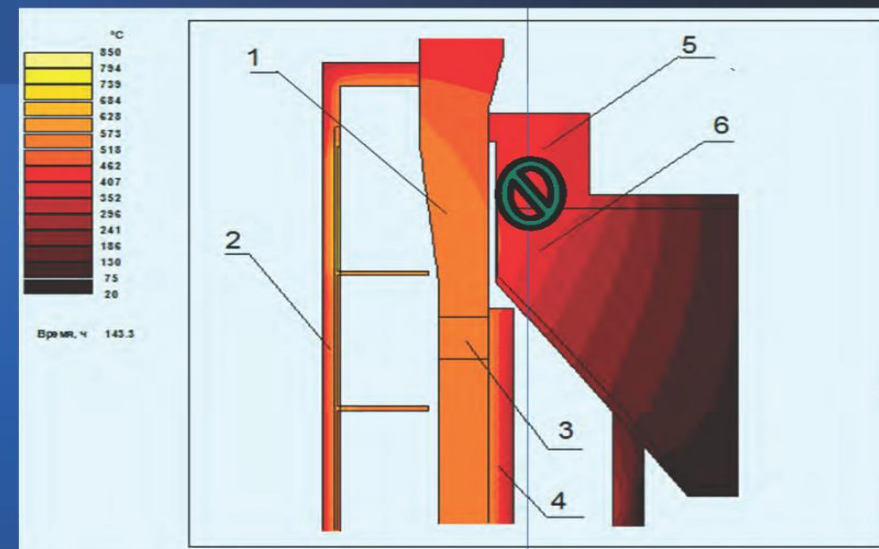
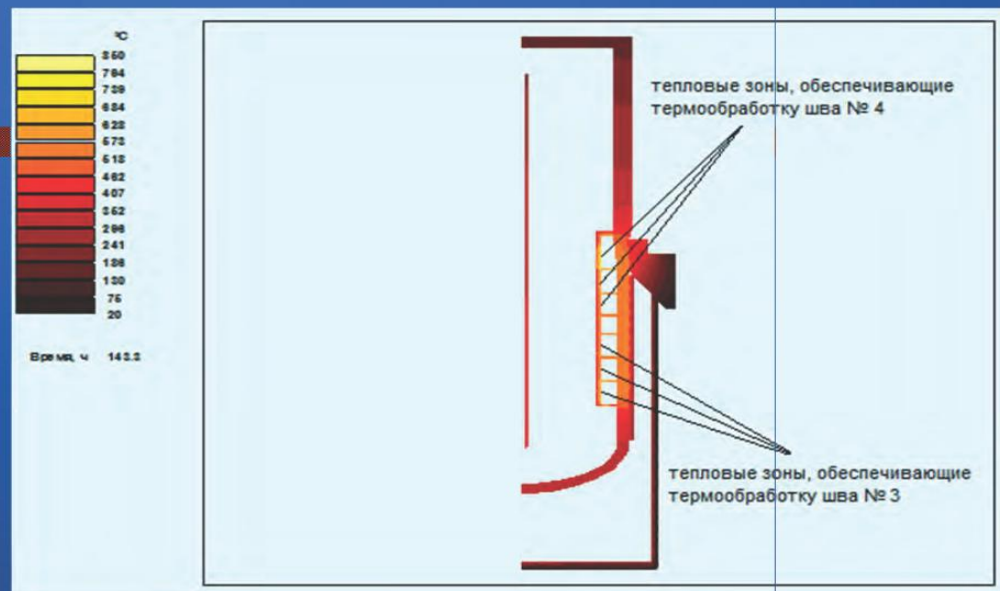
Монтаж теплоизоляции в труднодоступных местах представляется сложной, но реальной задачей.

В силу сложной конфигурации корпуса реактора значительные потери тепла необходимо компенсировать при очень ограниченной высоте тепловой зоны, а нагрев проводить с технологическим зазором 380 мм (было 250).

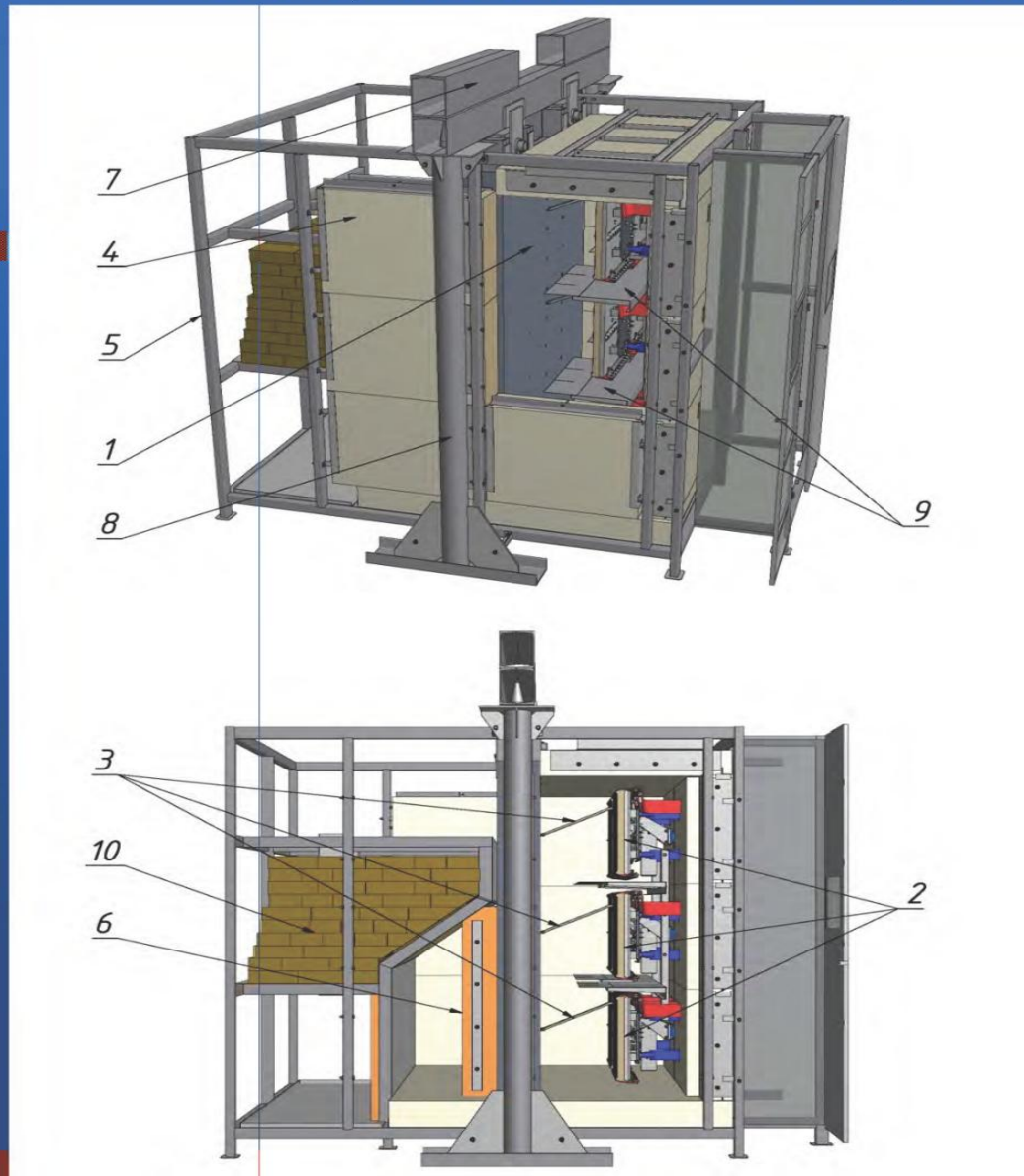
Для снижения взаимного влияния тепловых зон предусматривается установка гибких металлических тепловых экранов, перекрывающих технологический зазор.

Сварной шов № 4 расположен в непосредственной близости от опоры реактора, в этом месте нет практической возможности установить наружную теплоизоляцию, что дополнительно увеличивает стоки тепла и создает опасность нагрева бетона опоры выше допустимой температуры

Расчетная поддержка технических решений

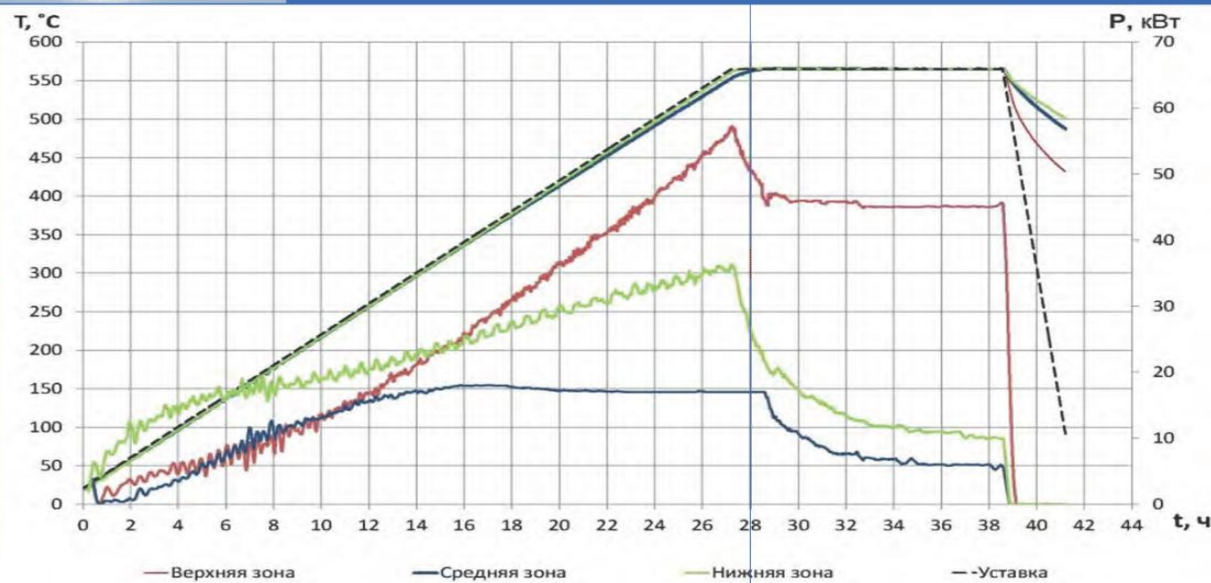


- 1 - корпус реактора
- 2 - нагревательное устройство
- 3 - шов № 4
- 4 - внешняя теплоизоляция
- 5 - опорное кольцо
- 6 - опорная ферма

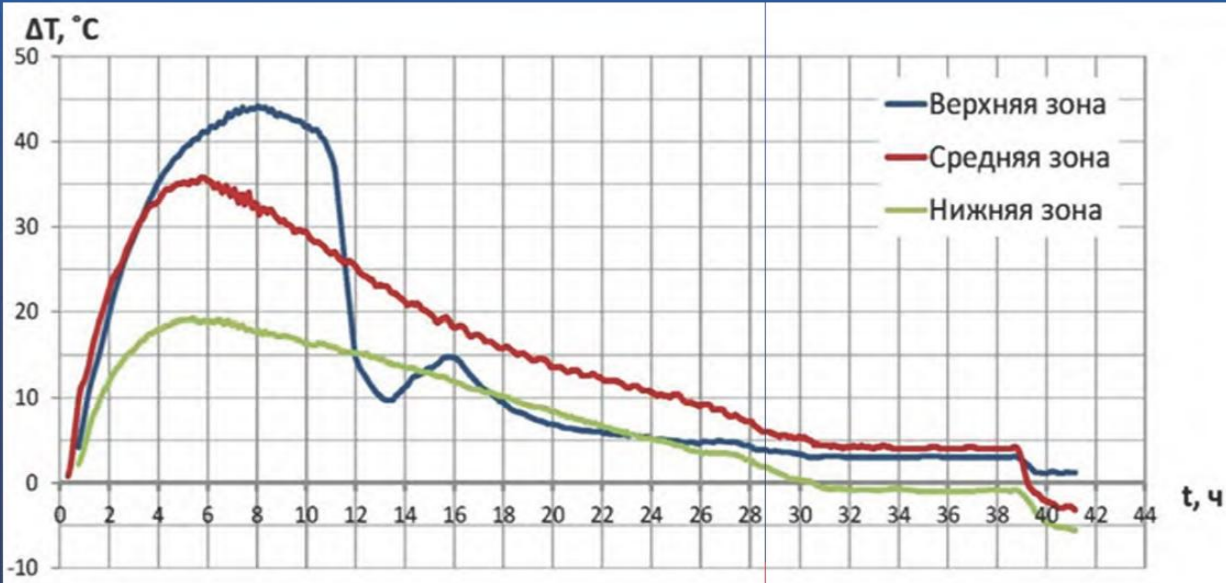


Стенд для тепловых испытаний

- 1 – имитатор стенки КР
- 2 – нагревательные панели
- 3 – термопарные механизмы
- 4 – теплоизоляция
- 5 – каркас нагревательной камеры
- 6 - имитация внешней теплоизоляции
- 7 – траверса
- 8 – опоры траверсы
- 9 – экраны
- 10 – имитатор опорной фермы.



Экспериментальные графики температуры контактных термопар и потребляемой мощности тепловых зон



Погрешность показаний контактных термопар

- Нагрев до температуры 565°C
- Скорость нагрева 20 °C/ч
- Выдержка 11,5 ч

Нагревательное устройство во время предварительных испытаний



Комплекс оборудования для установки внешней теплоизоляции КР

СОЗДАНИЕ ПОЛНОМАСШТАБНОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА И
ПРОВЕДЕНИЕ НА НЕМ РАБОТ В ОБОСНОВАНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ
БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОТЖИГА
СВАРНЫХ ШВОВ КОРПУСОВ ВВЭР-1000 (2014-2017)



- **Создание полномасштабного стенда на базе Волгодонского филиала ЗАО "АЭМ-технологии";**
- Ввод в действие системы стенд-корпус реактора-оборудование для отжига;
- Верификация расчетных оценок напряженно-деформационного и температурного состояния корпуса реактора и окружающих конструкций реакторной установки;
- Отработка режимов нагрева, технологии сборки и разборки нагревательного оборудования;
- Отработка и выбор оптимального варианта теплоизолирующих элементов и оборудования для их установки;
- Обучение персонала, включая персонал Балаковской АЭС;
- Получение лицензии на право проведения работ по отжигу корпуса реактора блока № 1 Балаковской АЭС.

Полномасштабный экспериментальный стенд

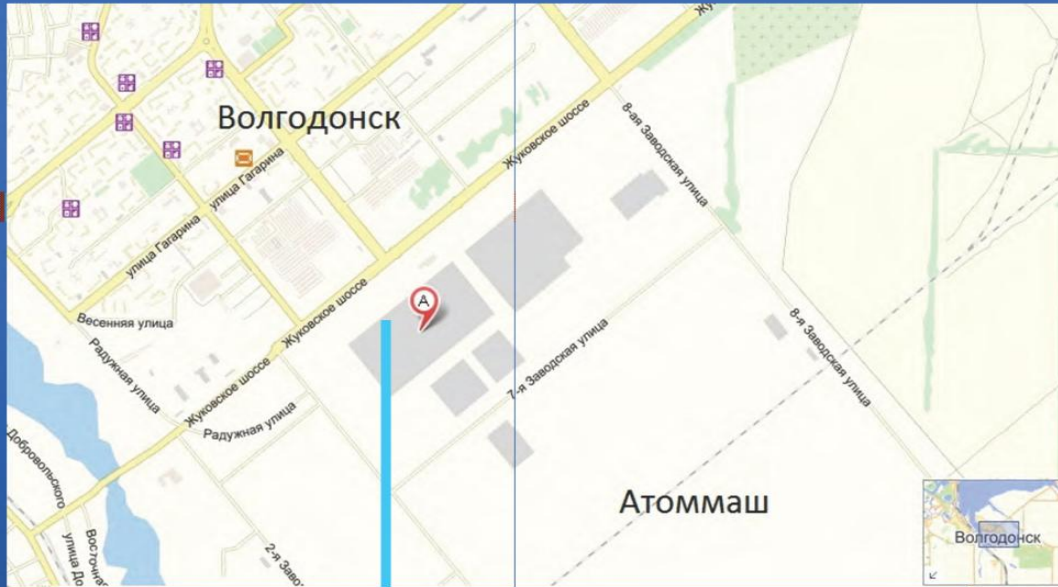


Схема размещения оборудования полномасштабного экспериментального стенда на уровне пола цеха - вариант для Волгодонского филиала ЗАО «АЭМ-технологии».

