

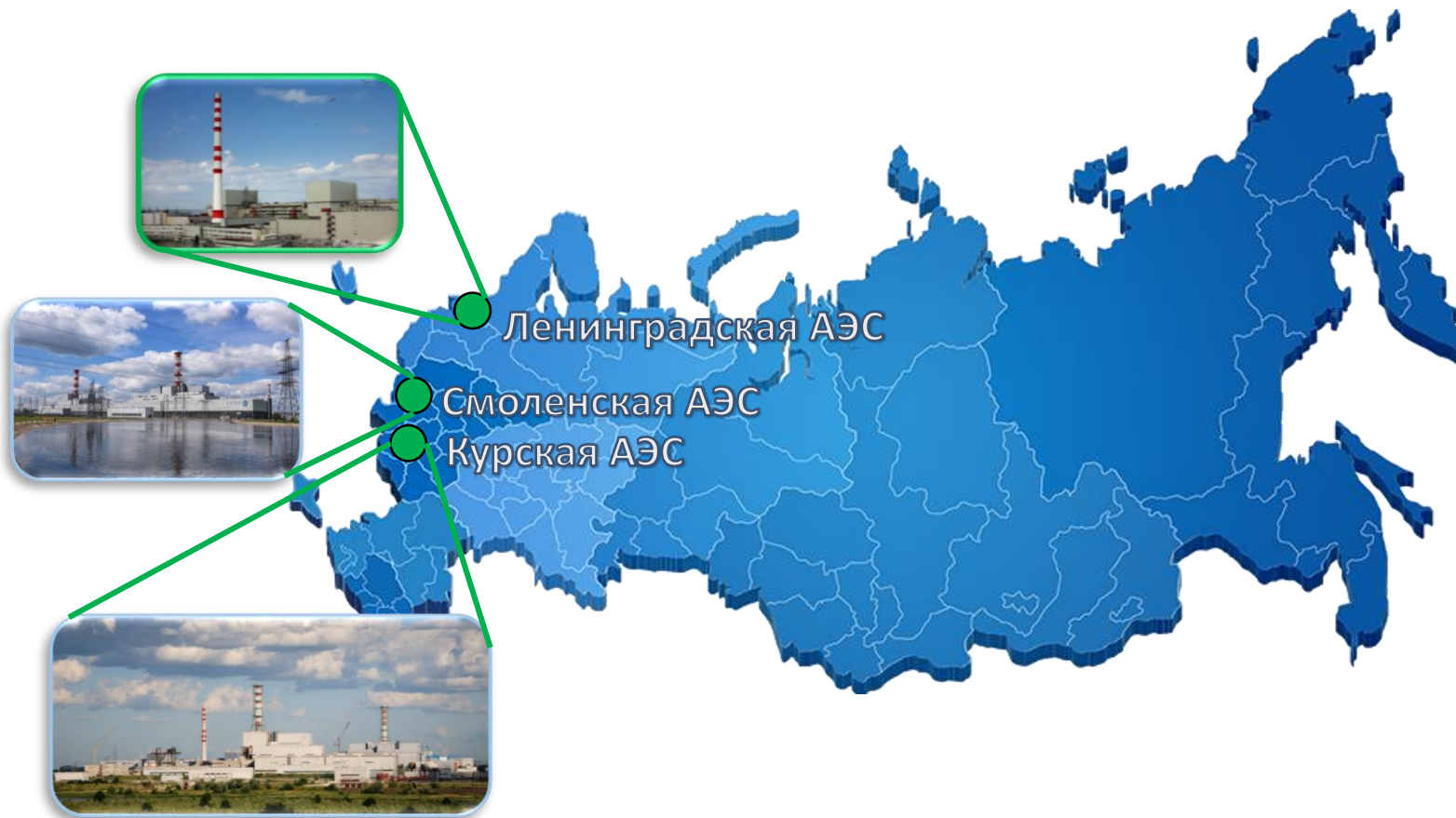


НИКИЭТ
РОСАТОМ

Наводороживание циркониевых частей каналов СУЗ реакторов РБМК-1000

Бакулин Дмитрий Викторович
Ведущий инженер
АО «НИКИЭТ»

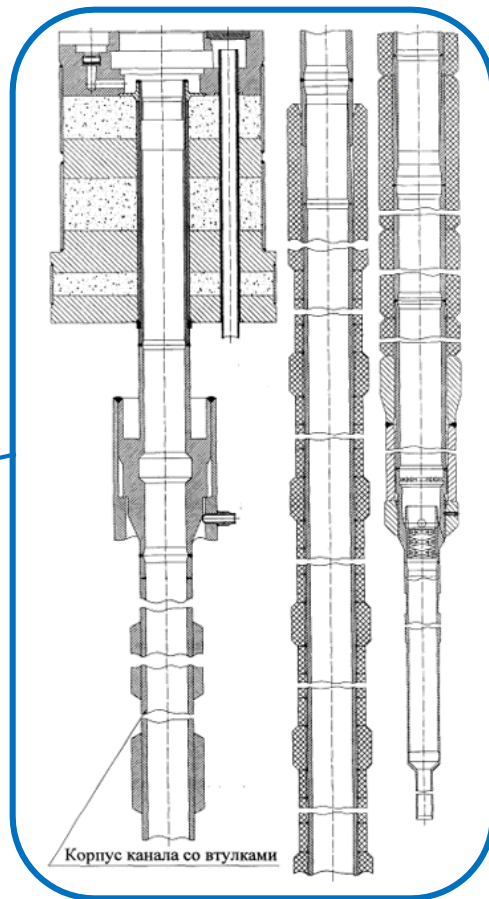
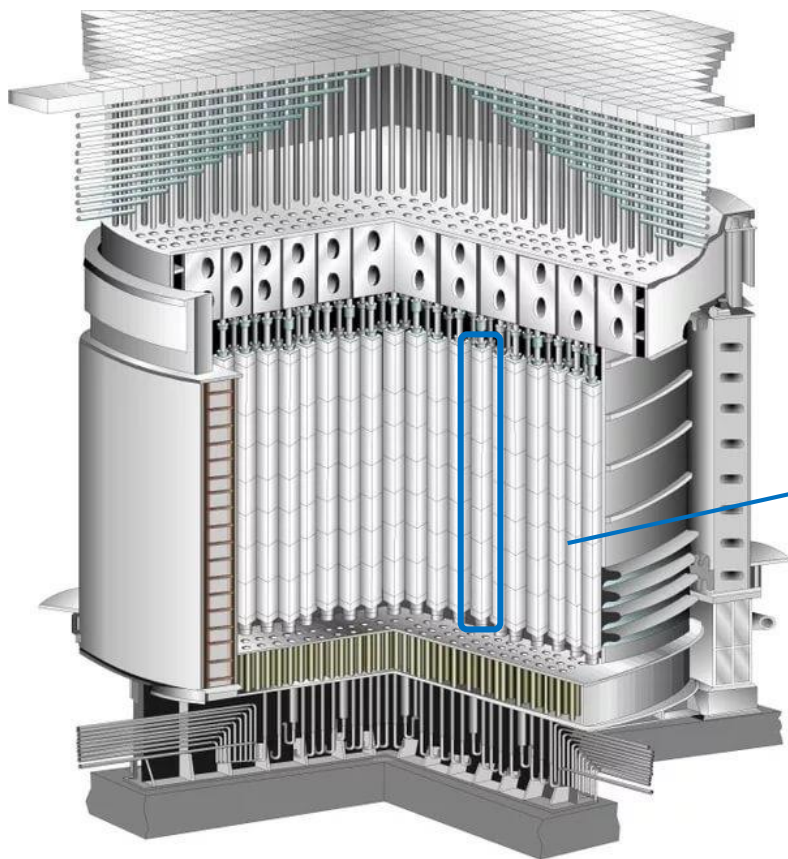
Атомные станции России с РБМК-1000



Общий вид реактора РБМК-1000



НИКИЭТ
РОСАТОМ



Процесс наводороживания циркониевых частей КСУЗ

1

- *Образование водорода в результате радиолиза воды и коррозии алюминия*

2

- *Поглощение водорода цирконием и его диффузия в зону, склонную к образованию гидридов*

3

- *Образование гидридов при превышении концентрацией водорода предела растворимости*

4

- *Образование блистеров*

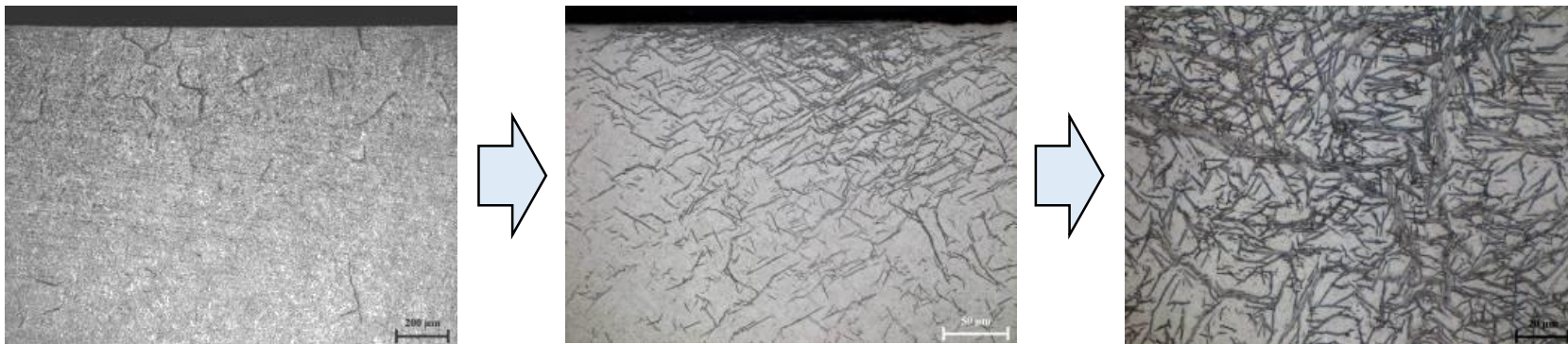
5

- *Рост блистеров до образования гидридного слоя и его прораствание до сквозного дефекта*

Образование гидридов

Образование гидридов циркония происходит в местах снижения температуры ниже температуры растворимости, либо в местах, где концентрация водорода превышает предел растворимости при данной температуре. Таким предпочтительным местом в канале СУЗ является зона расположения нижнего переходника.

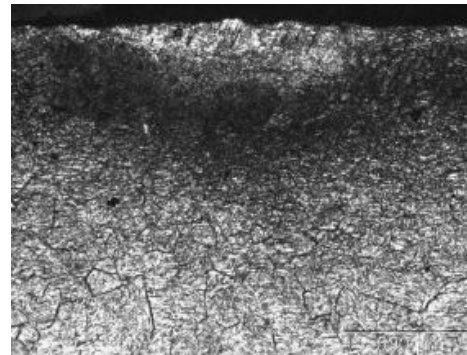
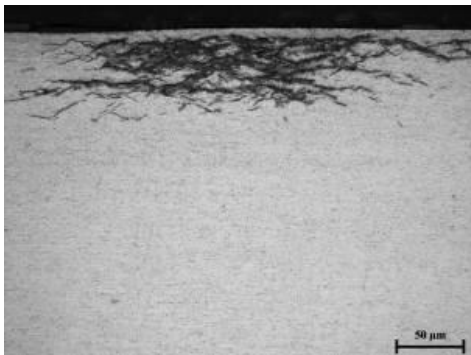
По данным АО «ИРМ» структура ниппеля наиболее благоприятна для поглощения водорода в связи с наличием остаточного бетта-циркония.



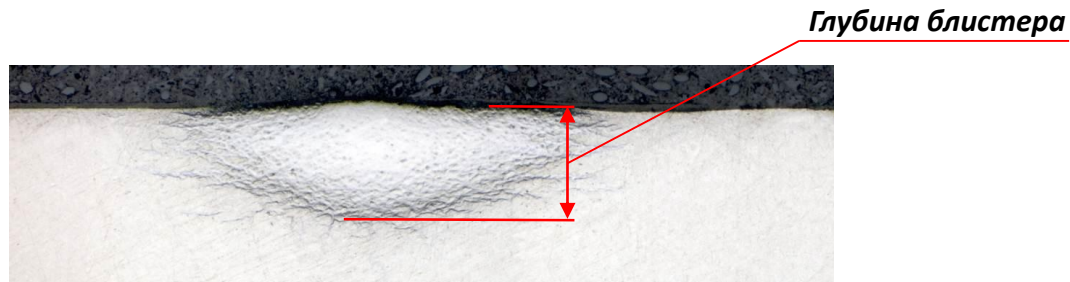
Образование и рост блистеров

Рост гидридного скопления происходит в тело металла в зависимости от его структуры (текстуры) и напряжений в этой зоне.

В районе ЭЛС, скопления гидридов могут расти в глубину по окружности в районе ЗТВ, а в теле трубы, в случае линейного контакта, вдоль оси трубы.

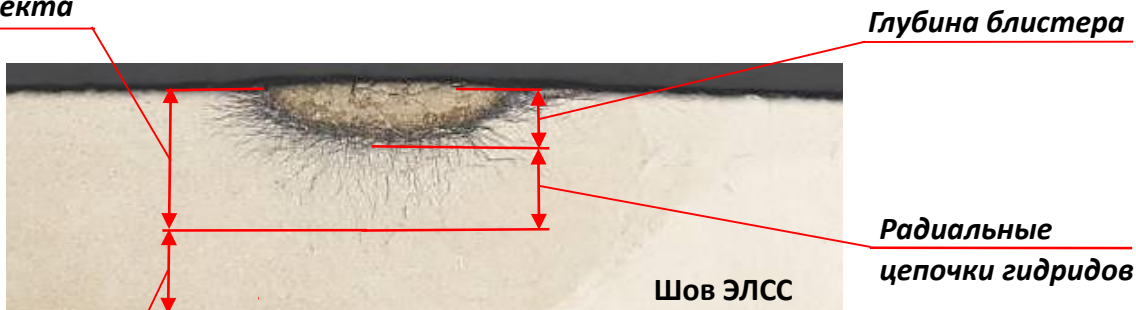


Гидридное повреждение КСУЗ



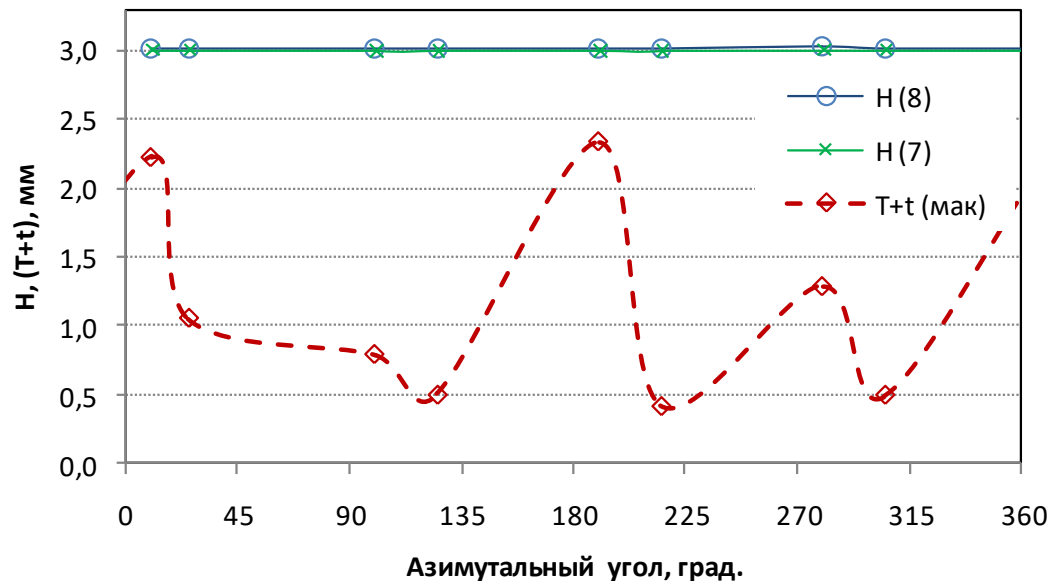
В ходе работ выявлено, что глубина «хрупкого дефекта» определяется не только глубиной «блистера», но и сопутствующими цепочками радиальных гидридов циркония.

Глубина хрупкого дефекта



Остаточная толщина стенки

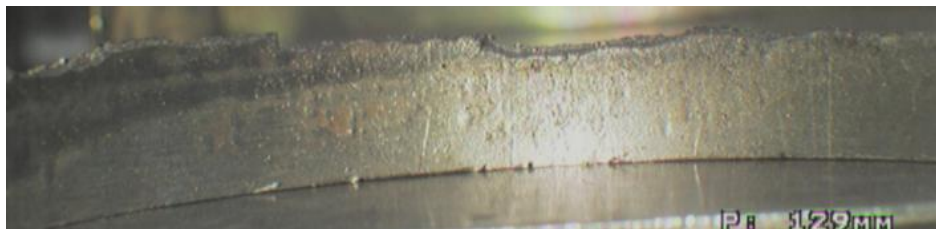
Азимутальный профиль толщины стенки и хрупкого дефекта по сечению нижнего ЭЛСС



H – толщина стенки канала

$T+t$ – глубина хрупкого дефекта

Из рисунка видно, что при продолжении развития дефекта в зонах 0 и 180 град. возможно было появление течи.



Оптимизация методики послереакторных исследований

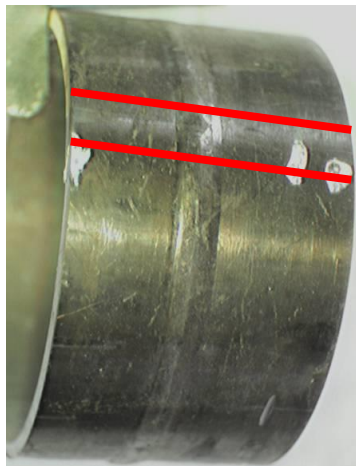
В ходе НИОКР оптимизирована методика ПРИ в части разделки канала на образцы. Предусмотрена вырезка широкого кольца 49 мм, содержащего ЭЛСС, с последующей вырезкой из него продольных образцов (темплетов) для испытаний на изгиб. Испытания образцов такой формы наиболее близки к нагружению канала СУЗ в реакторе и позволяют получить реальный профиль распределения хрупкого дефекта и остаточной толщины стенки по сечению канала (см. слайд 6).

Без данного подхода такие распределения можно было получить только по местам технологического разрушения канала при рубке.

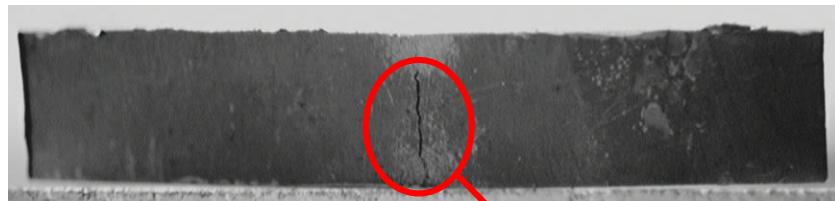
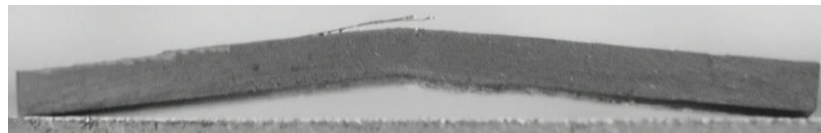
**Образец с ЭЛСС
до оптимизации**



**Образец с ЭЛСС
после оптимизации**



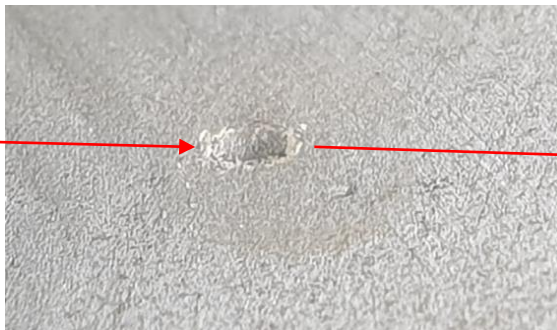
Образец после испытаний на изгиб



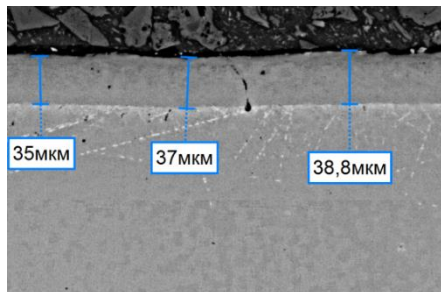
Трещина

Создание лабораторных образцов с блистерами

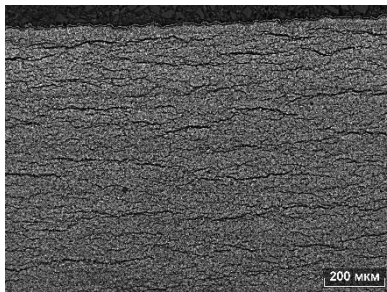
Гидридный блистер



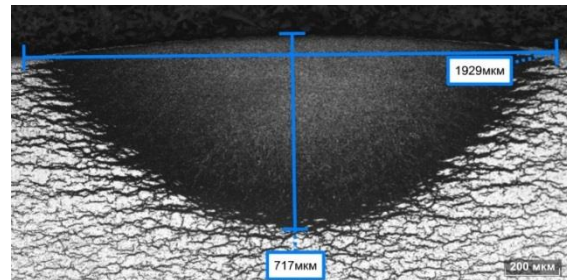
Гидридный слой на
поверхности образца после
наводороживания



Структура образца
после отжига

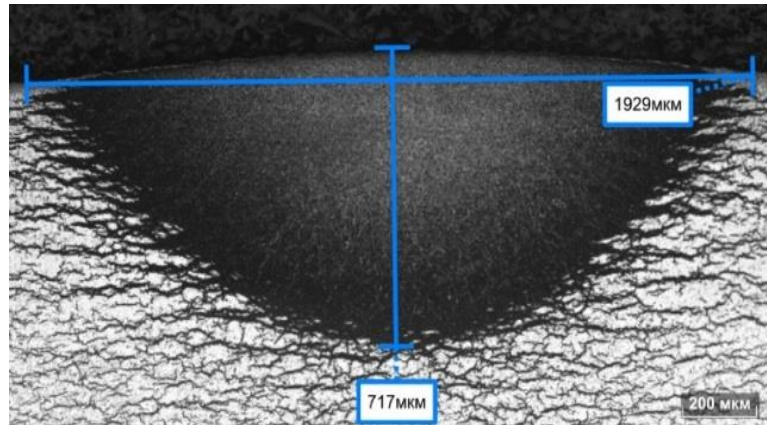
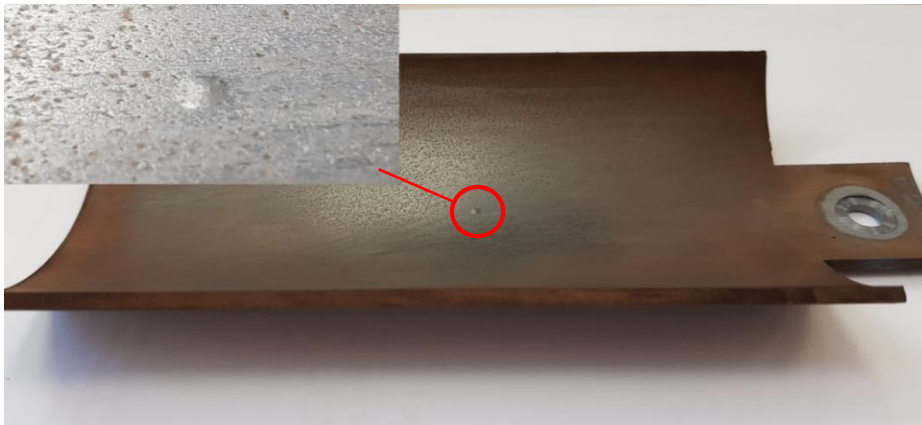


Блистер
на поверхности образца



Выращивание блистеров

Разработана методика изготовления и изготовлена первая партия лабораторных образцов канала СУЗ с нанесенными на них искусственными блистерами (локальными скоплениями гидридов циркония) для дальнейшей отработки технологии их выявления при ВРК.

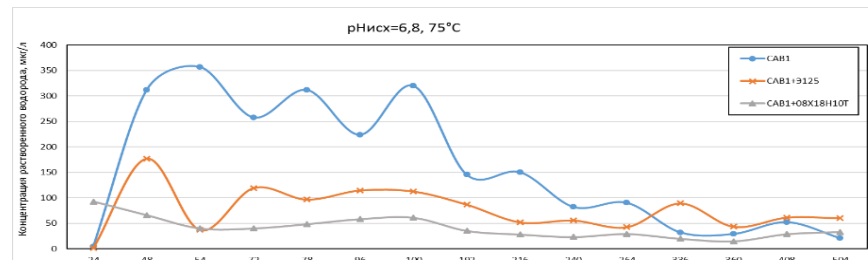
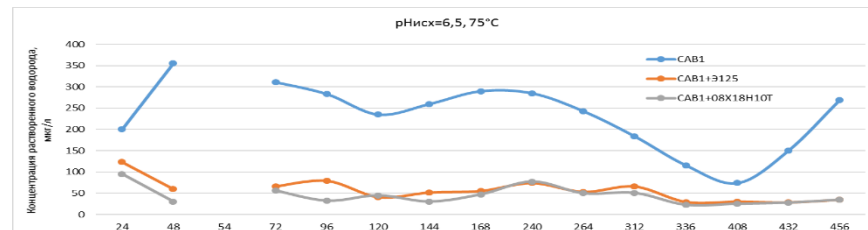
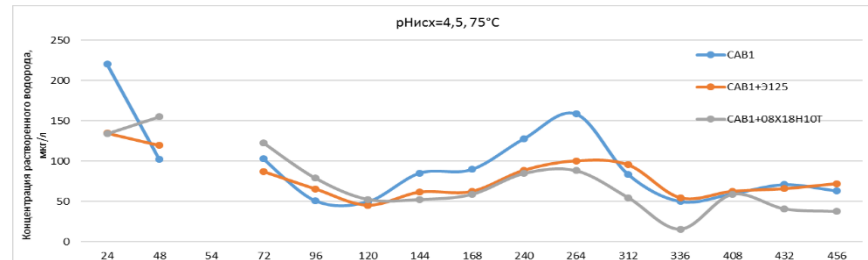
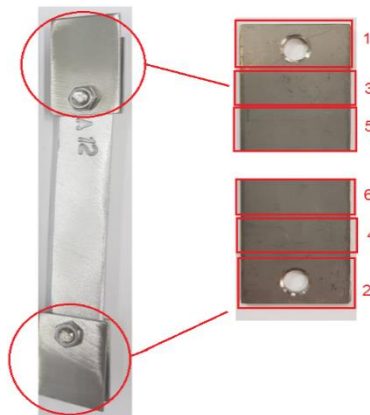


Конечная цель указанных работ – создание эталонного образца канала СУЗ с окружным хрупким дефектом в районе ЭЛСС, который будет использован в качестве настроечно стандартного образца для системы контроля.

Коррозионные испытания образцов конструкционных материалов

Анализ результатов измерения содержания коррозионного водорода в процессе испытаний показал:

- наводороживание образцов зависит от pH водной среды,
- при отклонениях от нормируемого диапазона pH водной среды 4,5-6,5 до pH=4,2, 6,8 и 7,2 отмечается усиление генерации водорода,
- наличие контакта между образцами из CAB1 с Э-125 и 08X18H10T при температурах 20 и 75°C и различных значениях pH не приводит к значительному усилению генерации водорода.



Заключение

В ходе работ исследованы процессы наводороживания каналов СУЗ реактора РБМК-1000. По результатам послереакторных исследований показано, что данный процесс является кумулятивным и протекает на всех энергоблоках, определены критические для ресурса каналов места максимального повреждения, выявлены параметры, определяющие ресурс и разработана методика оценки ресурса по критерию водородного охрупчивания.

По результатам комплекса работ разработаны первоочередные меры, направленные на достижение реакторами РБМК-1000 50-летнего срока эксплуатации и определены дальнейшие направления деятельности по данной проблеме.

Спасибо за внимание!

Бакулин Дмитрий Викторович
Ведущий инженер
АО «НИКИЭТ»

14-17.11.2023

