



**Национальный исследовательский центр
«Курчатовский Институт»
Курчатовский ядерно-технологический комплекс
«НИЦ «Строительство»»
ИПКОН РАН**



Продление сроков службы АЭС

**А.В Алтынбаев¹, Р.О. Полякова¹, М.Я. Якобсон², А.А. Чернобаева¹,
Д. Ю. Ерак¹, Д.А. Журко¹, И.В. Зверев³**

¹НИЦ «Курчатовский институт»

² «НИЦ «Строительство»»

³ ИПКОН РАН



**III Ежегодная научно-практическая Конференция
«АтомСтройСтандарт-2016»**

Москва, 7 октября 2016 года

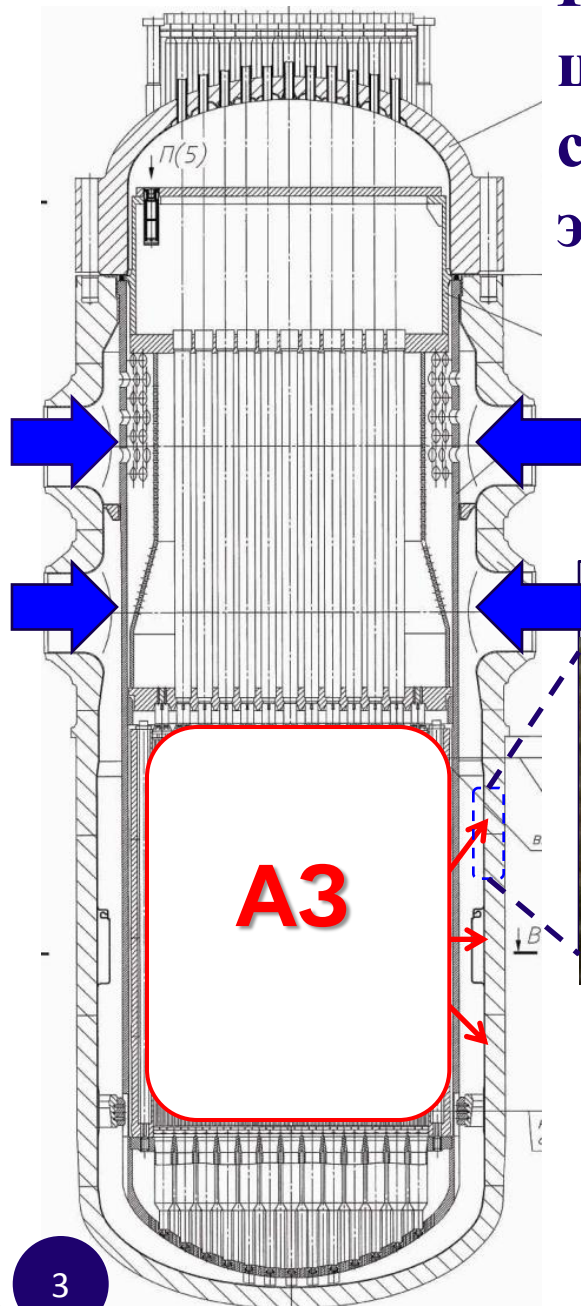
План доклада:

- Информация о корпусе реактора
- Отжиг как технология продления срока службы корпуса реактора
- Параметры отжига для ВВЭР-440 и ВВЭР-1000
- Влияние отжига на элементы строительных конструкций
- Испытания строительного бетона шахты реактора
- Результаты структурных исследований образцов из тяжелого бетона после 30 лет эксплуатации

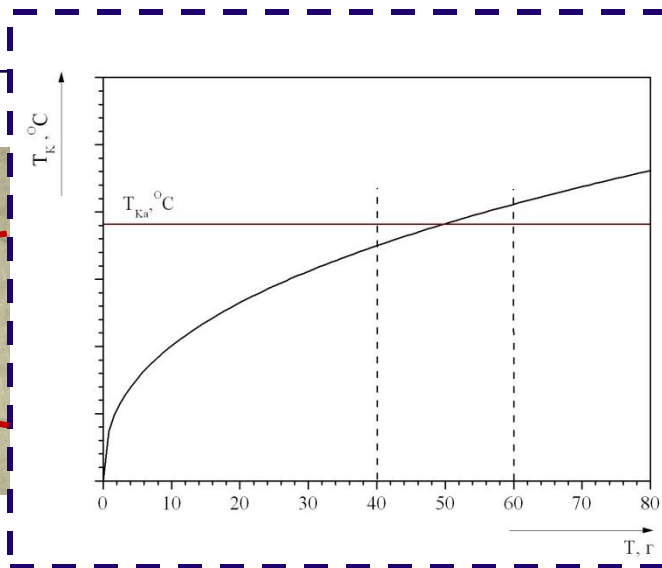
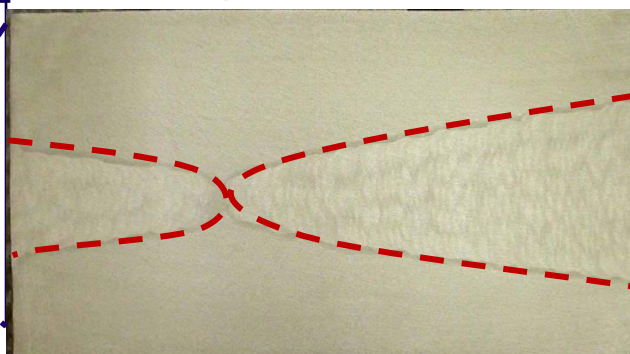
Залив холодной воды

Корпус реактора состоит из цилиндрических обечаек, соединенных сварными швами. Верх и низ корпуса – эллипсоиды верхнего блока и днища

Схема радиационного охрупчивания корпусов реакторов

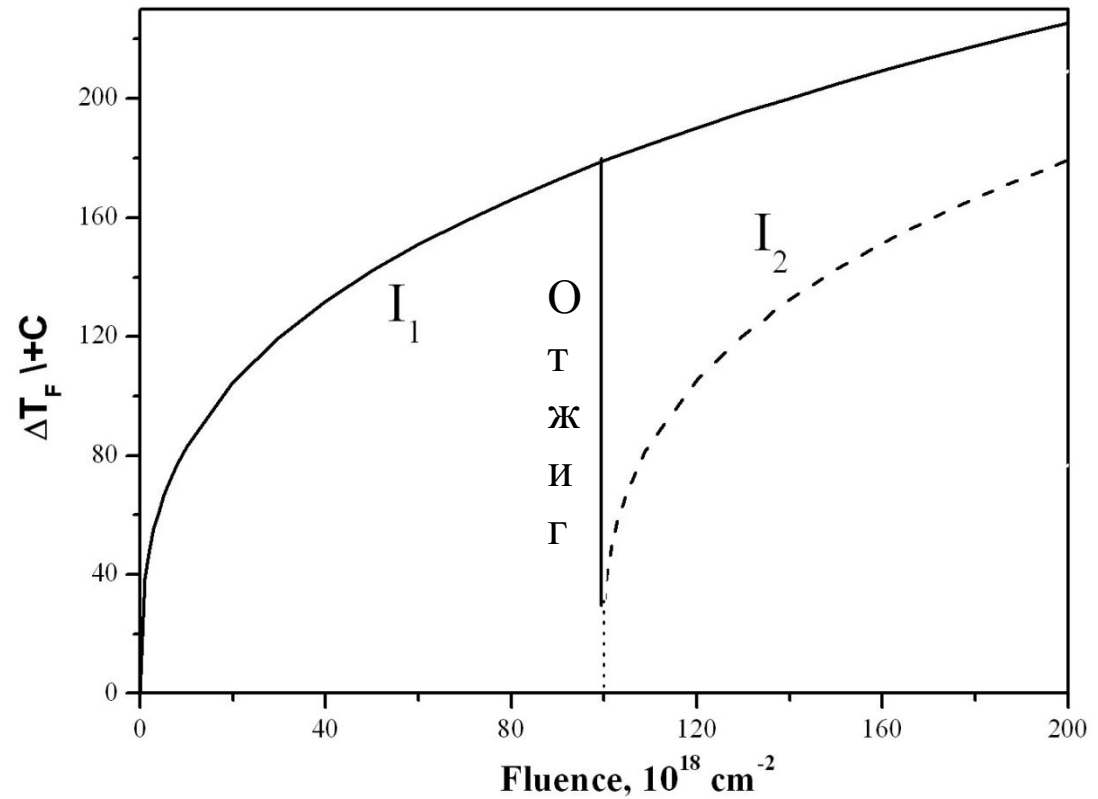
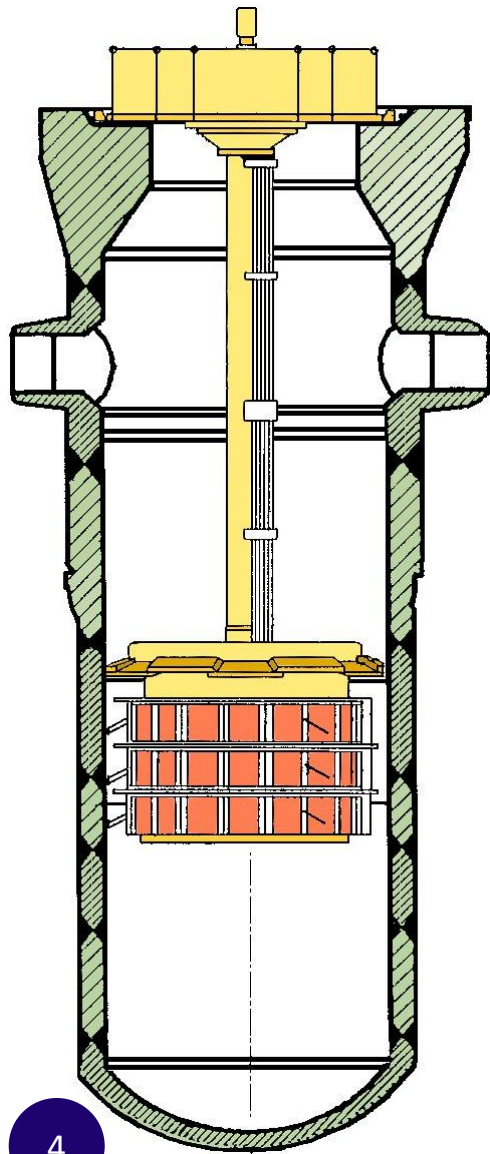


Толщина стенки



- T_k -критическая температура хрупкости
- T_{Ka} -предельно допустимая критическая температура хрупкости

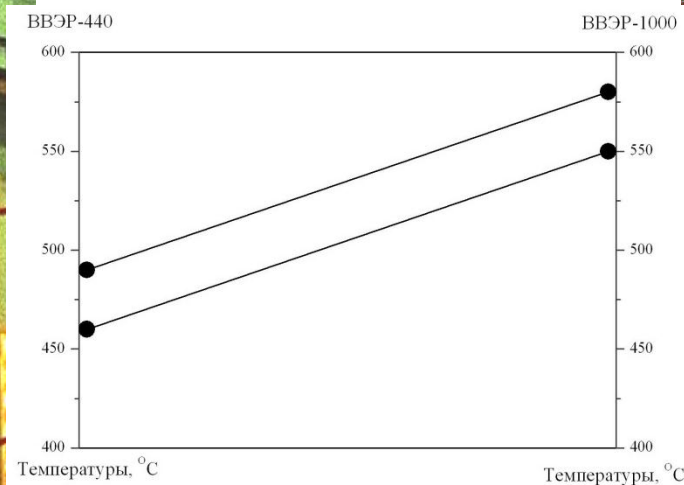
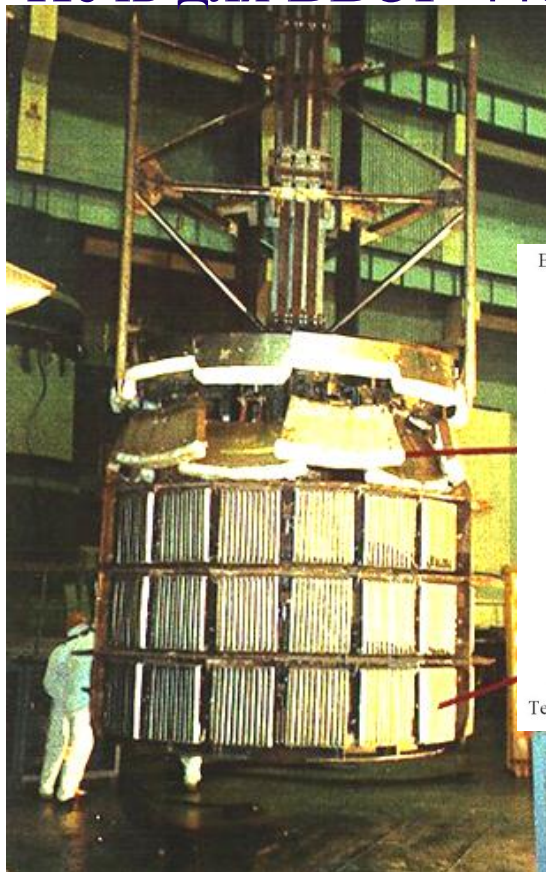
Проведение восстановительного отжига



Общее число отожженных корпусов ВВЭР-440 - 15

Продления срока службы корпусов реакторов ВВЭР

Печь для ВВЭР-440



Печь для ВВЭР-1000



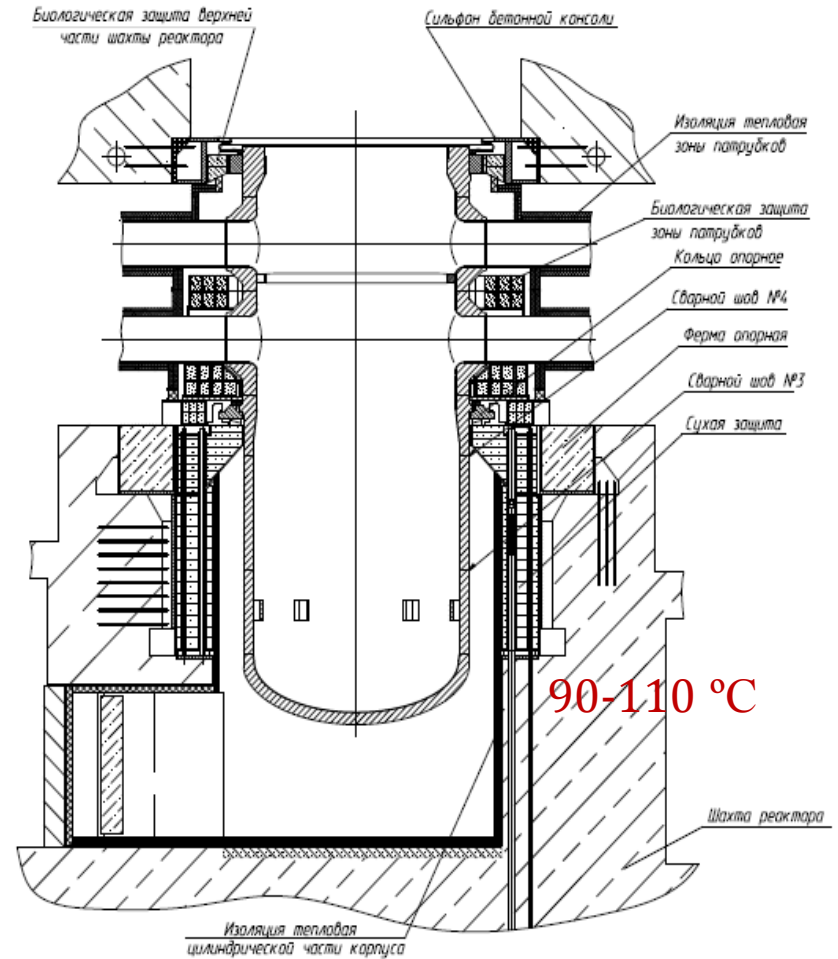
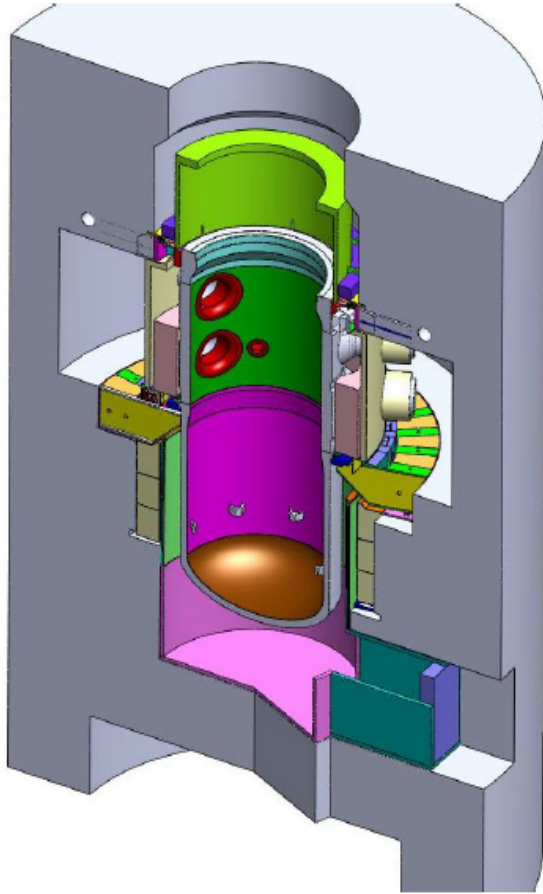
Интервал температур 460-490°C, 100-150ч
Отжигается один сварной шов
напротив активной зоны

Интервал температур 550-580°C, 100ч
Отжигается два сварных шва напротив
активной зоны и обечайка между ними

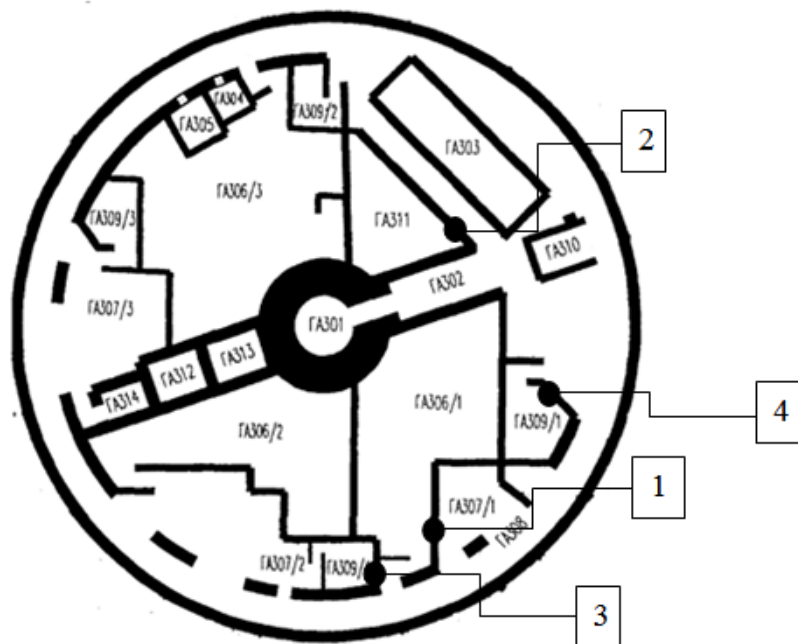
А.Д. Амаев, А. И. Крюков, В.А. Николаев и др. Способ
вспомогательной термической обработки стальных изделий.
Бюллетень изобретений и открытий, № 46, 1984, А.С. №1129926 СССР.

Патент № 2396361 от 10.08.2010 г. Способ восстановления физико -
механических свойств металла корпусов реакторов ВВЭР-1000. Я.И.
Штромбах, Б.А. Гурович, Д.Ю. Ерак, Д.А. Журко, О.О. Забусов, Е.А.
Кулешова, Ю.А.Николаев.

Схема шахты реактора ВВЭР-1000



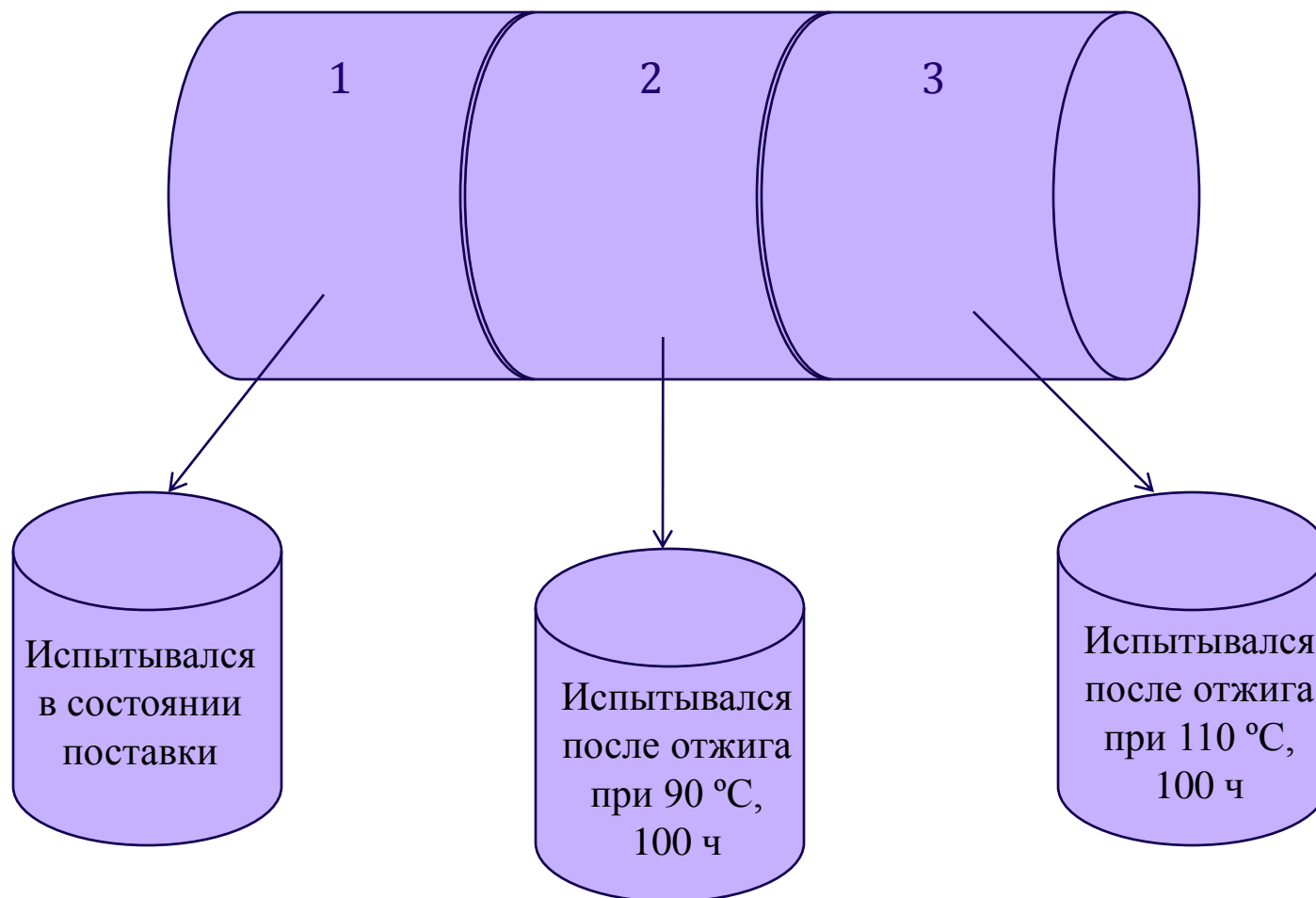
Места вырезки кернов и процесс отбора кернов



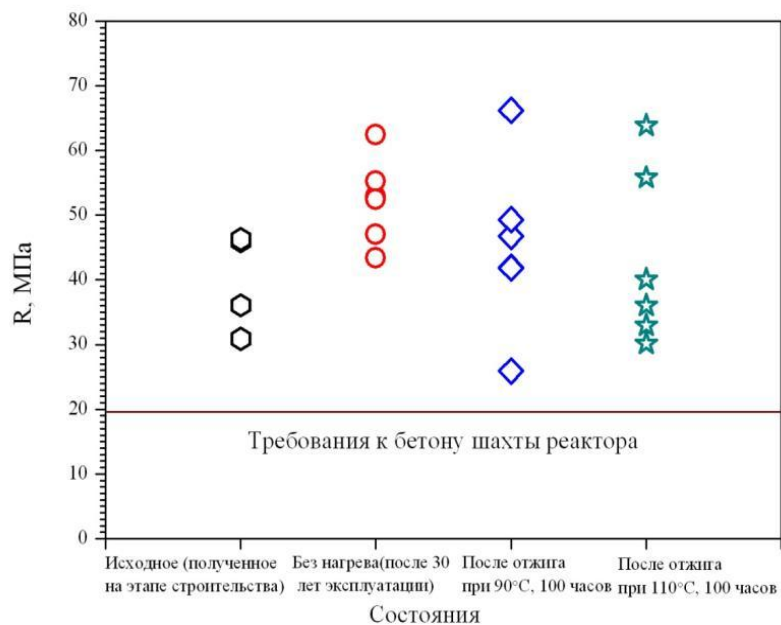
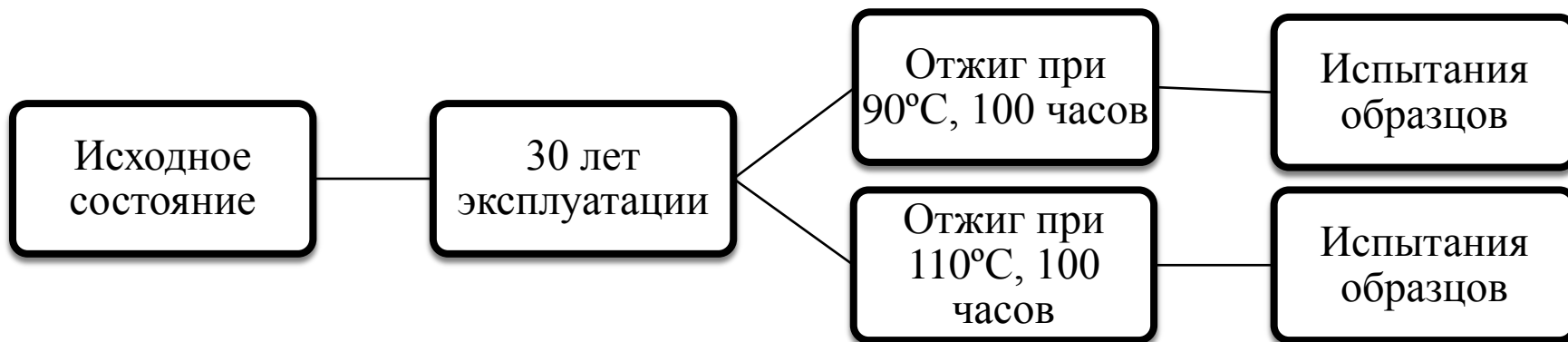
**Всего было
отобрано 16 кернов**

Схема изготовления образцов из кернов и проведения испытаний

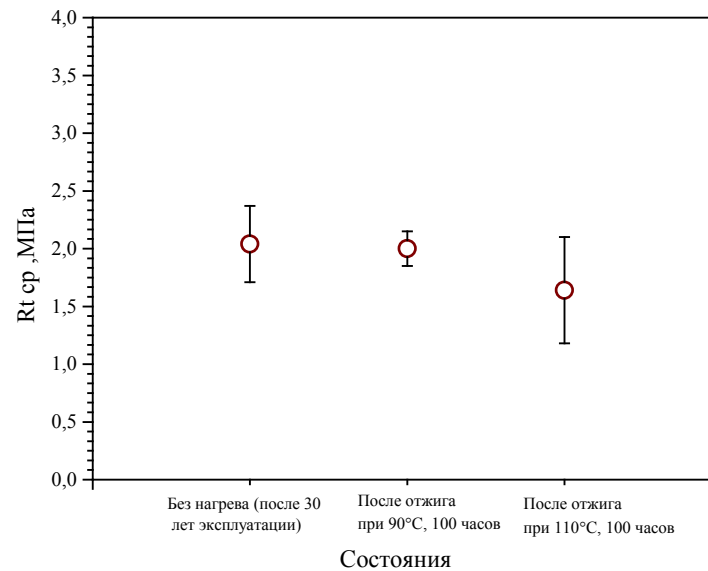
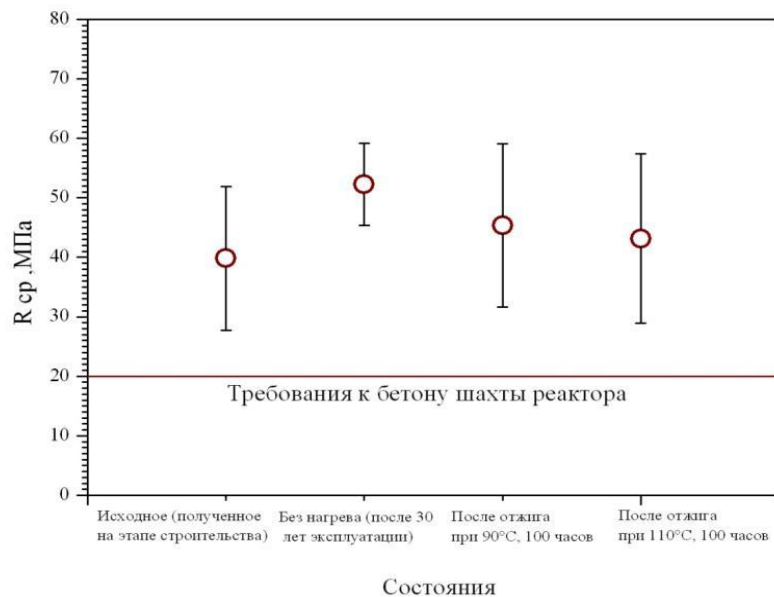
Каждый отобранный керн разделяли на 3 образца



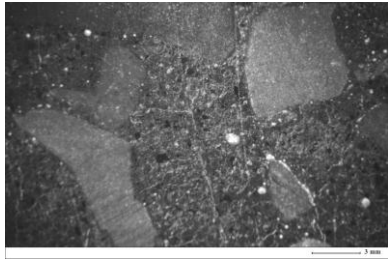
Результаты испытания образцов из тяжелого бетона



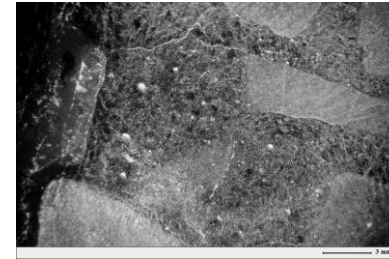
Результаты испытания образцов из тяжелого бетона



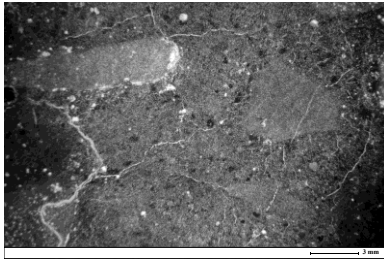
Морфологические исследования



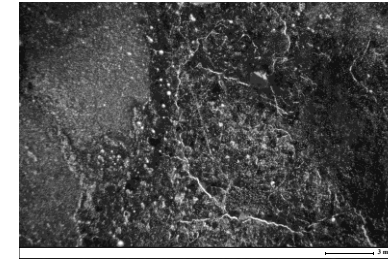
Аншлиф образца без термообработки после испытаний на растяжение при раскалывании, срез параллельно оси образца



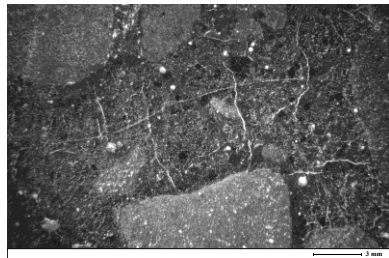
Аншлиф образца без термообработки после испытаний на растяжение при раскалывании, срез перпендикулярно оси образца



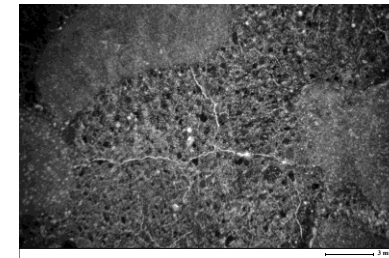
Аншлиф образца с термообработкой 90°C после испытаний на растяжение при раскалывании, срез параллельно оси образца



Аншлиф образца с термообработкой 90°C после испытаний на растяжение при раскалывании, срез перпендикулярно оси образца



Аншлиф образца с термообработкой 110°C после испытаний на растяжение при раскалывании, срез параллельно оси образца

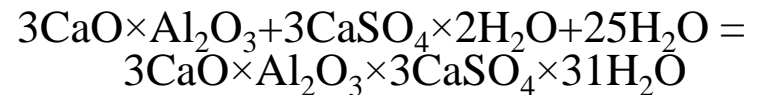


Аншлиф образца с термообработкой 110°C после испытаний на растяжение при раскалывании, срез перпендикулярно оси образца

Рентгенографические исследования

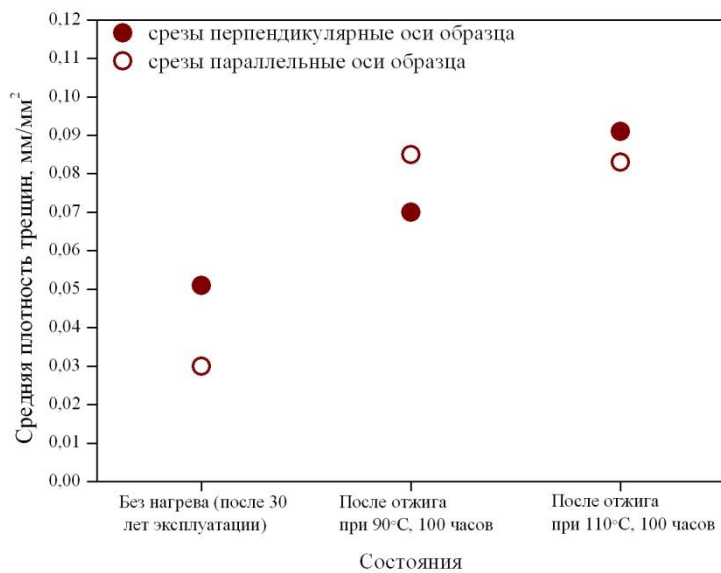


- На основании рентгенографических исследований установлено, что в непрогретом образце содержится до 2,5 % этtringита (трехсульфатная форма гидросульфалюмината кальция $[3\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times 3\text{CaSO}_4 \times (30-32)\text{H}_2\text{O}]$). Этtringит образуется в насыщенном водном растворе гидрата окиси кальция и гипса по схеме:

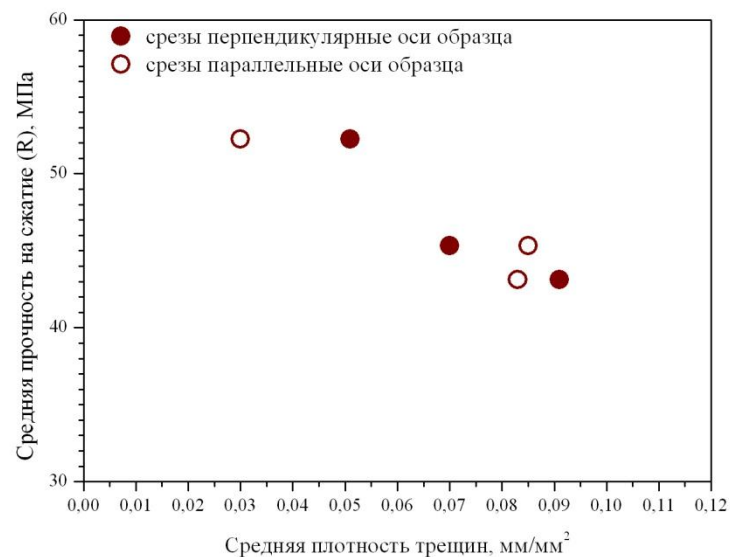


- Установлено, что после выдержки как при температуре 90°C, так и 110°C наблюдается полное исчезновение фазы этtringита при 90°C и повышение фазы гипса и кальцита.

Сопоставление морфологического анализа с прочностью бетона на сжатие

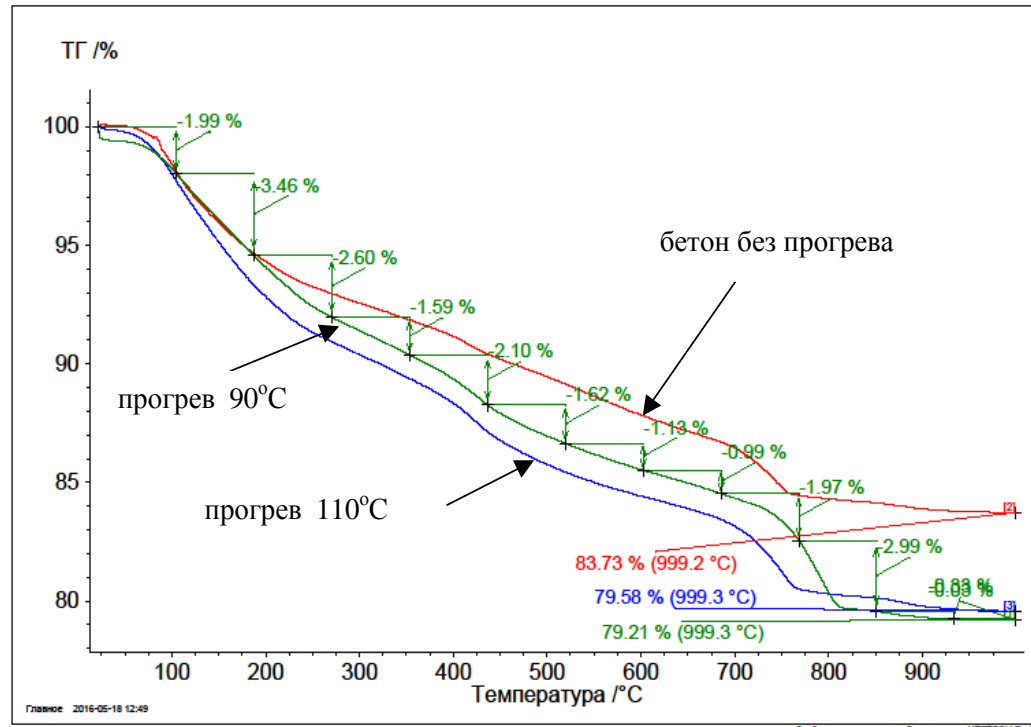


Зависимость средней плотности трещин от состояния



Сопоставление плотности трещин с значениями прочности на сжатие

Термографические исследования



- Термографические исследования содержания воды в образцах бетона показали, что при температурах 90 и 110°C внутрипоровая влага в бетоне сохраняется, что способствует сохранению прочности.

Выводы:

- Выполнена работа по исследованию прочности на сжатие тяжелого бетона, аналогичного бетону шахты реактора, после 30-летней эксплуатации и нагрева в диапазоне температур 90-110°C в течение 100 часов. В качестве объекта исследования использованы образцы из кернов тяжелого бетона, отобранных специально для этой работы из железобетонной облицовки реакторного отделения энергоблока №1 Балаковской АЭС.

Испытания показали, что после 30 лет эксплуатации средняя прочность бетона на сжатие шахты реактора возросла от 40 МПа в исходном состоянии до 52,3МПа.

Нагрев образцов до температуры 90°C в течение 100 часов привел к снижению прочности на сжатие до 45,33 МПа, а после прогрева при 110°C в течение 100 часов – до 43,14 МПа.

После исследованных термических воздействий (90°C/100 ч. и 110°C/100 ч) прочность бетона на сжатие в два раза превышает требования, предъявляемые к бетону шахты реактора на момент строительства блока (20 МПа).

Структурные исследования показали, что снижение прочности на сжатие после нагрева образцов в течение 100 часов связано с увеличением плотности трещин от 0,030 мм/м² для состояния после 30 летней эксплуатации до 0,085 мм/м² после выдержек при температуре 90 и 110°C.

На основании рентгенографических исследований установлено, что выдержка при температуре 90°C в течение 100 часов приводит к разложению фазы этtringита, содержание которого в непрогретых образцах достигает 2.5%, и повышению содержания фазы гипса и кальцита, что возможно является причиной повышения плотности микротрещин.

Термографические исследования содержания воды в образцах бетона показали, что при температурах 90 и 110°C внутрипоровая влага в бетоне сохраняется, что способствует сохранению прочности на сжатие.

Спасибо за внимание!