

Разработка оборудования для восстановительного отжига сварных швов корпуса реактора ВВЭР-1000

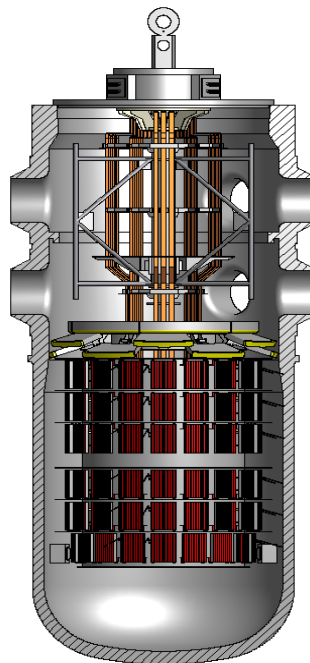
Выполненные работы

2010 г.

Разработка технического задания

Разработка технического предложения

Разработка эскизного проекта нагревательного устройства



2011 г.

Разработка конструкции, изготовление и испытания опытных образцов датчиков контроля и регистрации теплового режима

Разработка РКД системы автоматического управления, контроля и регистрации теплового режима

Подготовка производства, изготовление и испытания опытных образцов нагревательных панелей

Изготовление макета нагревательного устройства и проведение экспериментов на макете

Разработка РКД нагревательного устройства



ТЗ на установку и основные технические решения

- ▶ **нагрев сварных швов КР №3,4 со скоростью не более 20^oС /час от температуры окружающей среды до температуры 570^oС;**
- ▶ **выдержка при температуре 570^oС продолжительностью 120–150 час;**
- ▶ **охлаждение от 570^oС до 100^oС со средней скоростью 7^oС /час**
- ▶ **неравномерность распределения температуры в объеме сварных швов не более ± 15^oС**

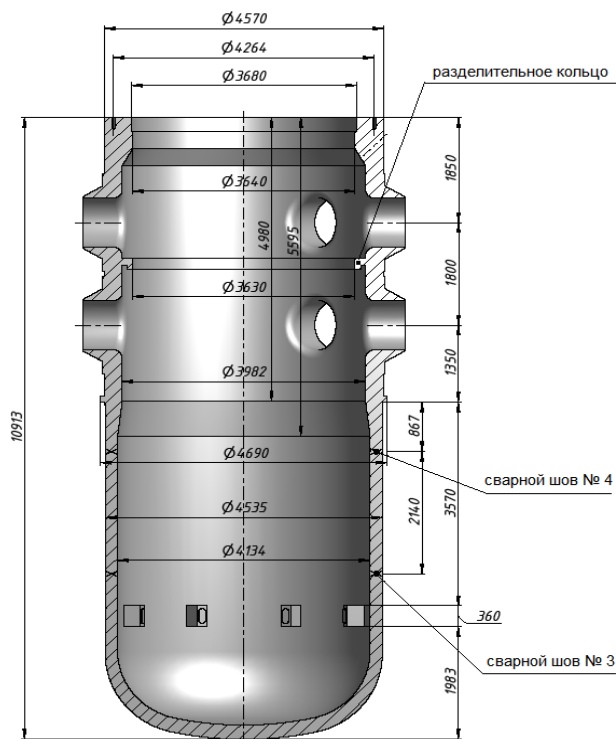


СХЕМА НАГРЕВА КОРПУСА РЕАКТОРА

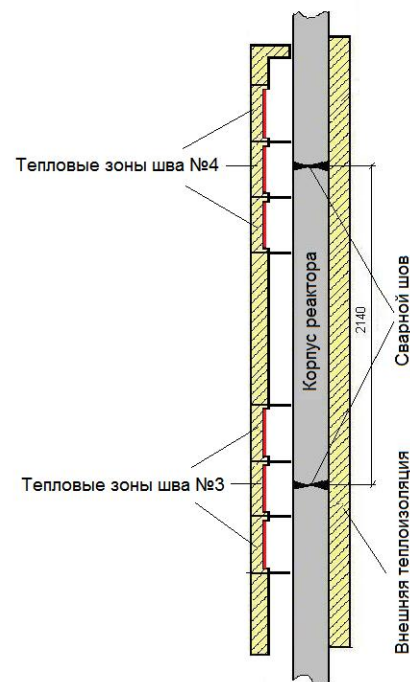


Схема двухстороннего нагрева (нагрев внутренней и наружной поверхностей корпуса)

Схема одностороннего нагрева корпуса с внутренней поверхности при хорошей теплоизоляции наружной поверхности

Монтаж теплоизоляции в труднодоступных местах представляется сложной, но реальной задачей

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

В силу сложной конфигурации корпуса реактора значительные потери тепла необходимо компенсировать при очень ограниченной высоте тепловой зоны

Нагрев с технологическим зазором 380 мм (было 250)

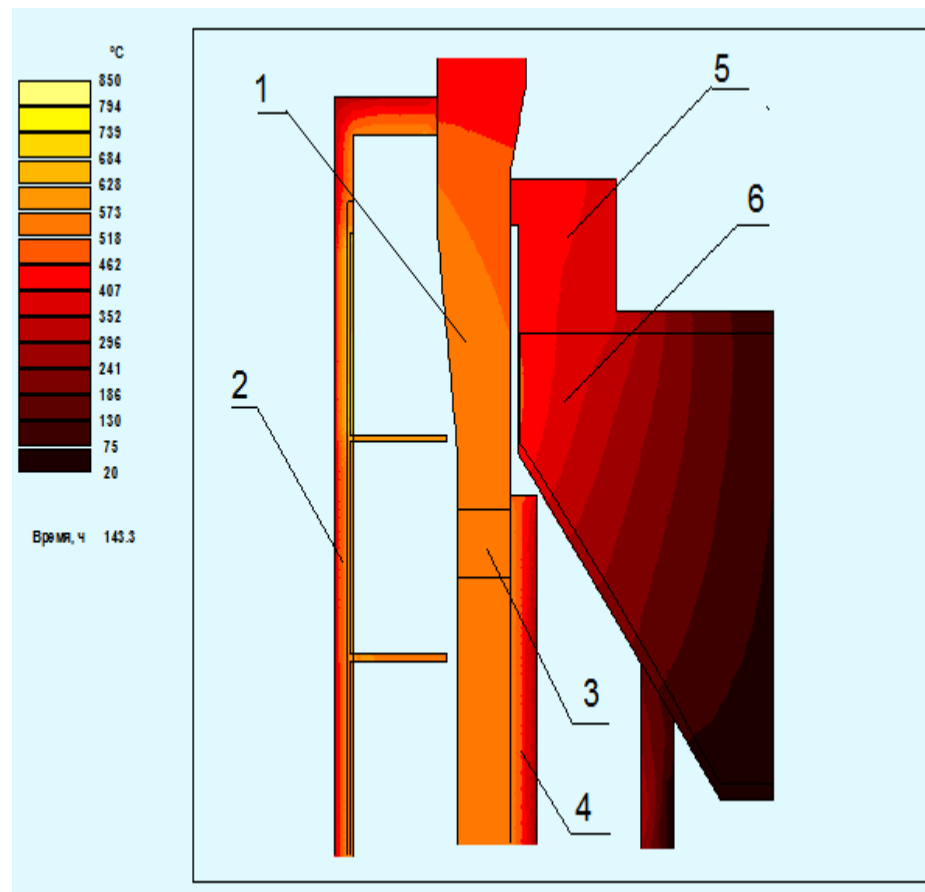
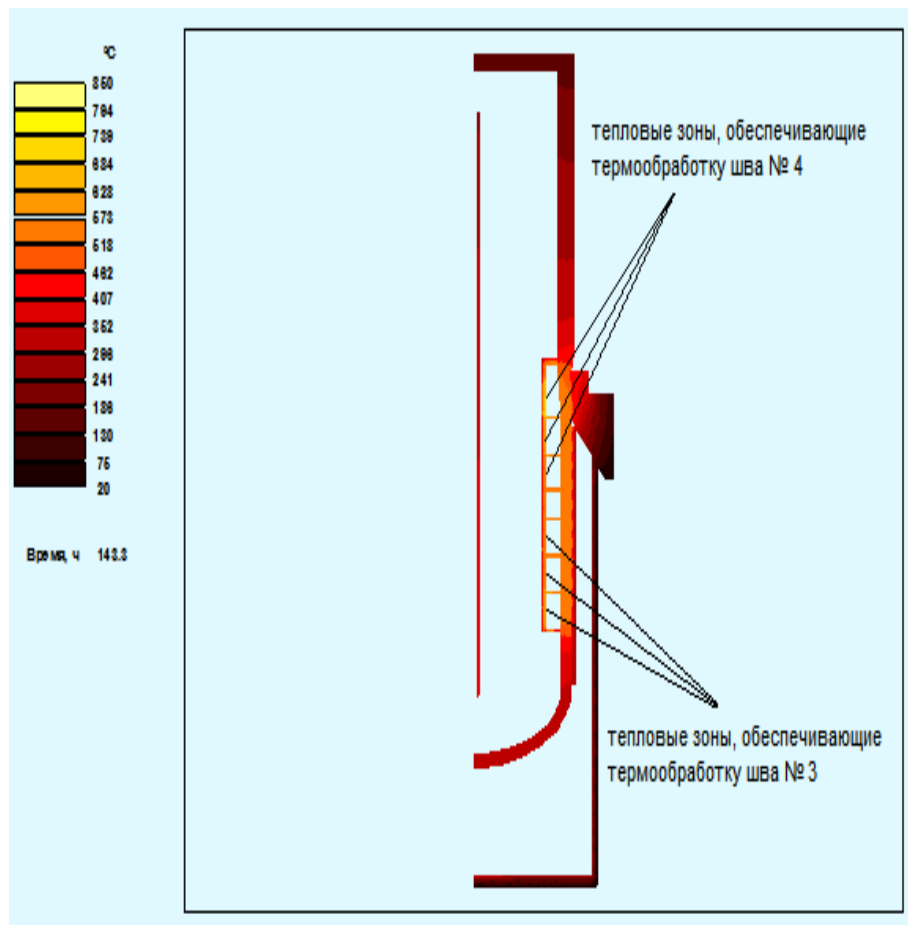
Для снижения взаимного влияния тепловых зон предусматривается установка гибких металлических тепловых экранов

Расчетное обоснование принятых технических решений

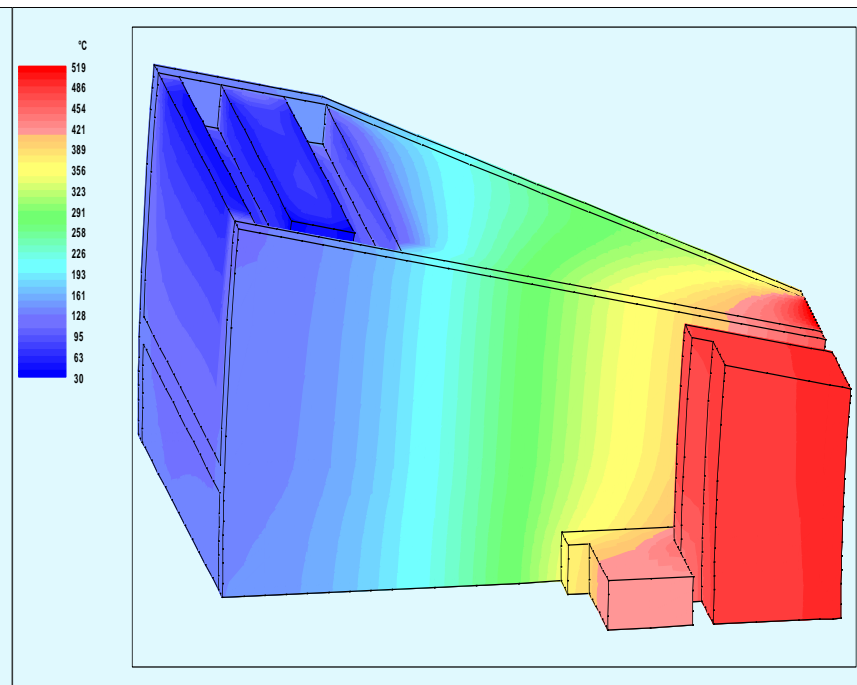
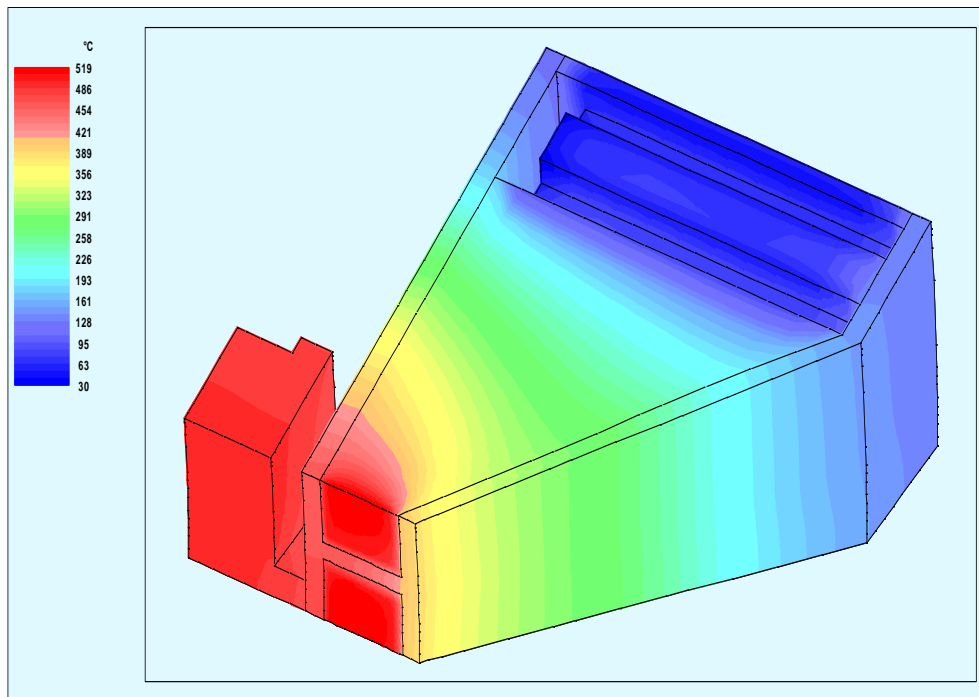
- ▶ математическая модель многозвенной системы теплотехнически массивных и тонких тел, учитывающая теплообмен излучением, теплопроводностью и конвекцией между ними
- ▶ комплекс программ (2-х и 3-х мерных), позволяющий моделировать стационарные и нестационарные тепловые процессы при проведении восстановительного отжига корпусов реактора ВВЭР-1000 с учетом специфики конструкции корпуса реактора, шахтного помещения и нагревательного устройства
- ▶ нестационарные расчеты по 2-мерной модели нагревательного устройства подтвердили правильность выбора принятой схемы нагревательного устройства, показали, что конструктивные решения обеспечивают следующие требования технического задания:

- нагрев корпуса реактора со скоростью $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{час}$ до температуры $570\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- выдержку при этой температуре в течение 100 и более часов; неравномерность температуры по корпусу реактора в период выдержки в районе термообрабатываемых сварных швов (по высоте $\pm 100\text{ мм}$ от средней линии шва) в пределах $19\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Область термообрабатываемого сварного шва № 4



Температурные поля корпуса в процессе отжига
•корпус реактора; 2- нагревательное устройство; 3- шов № 4; 4- внешняя теплоизоляция корпуса; 5- опорное кольцо; 6- опорная ферма

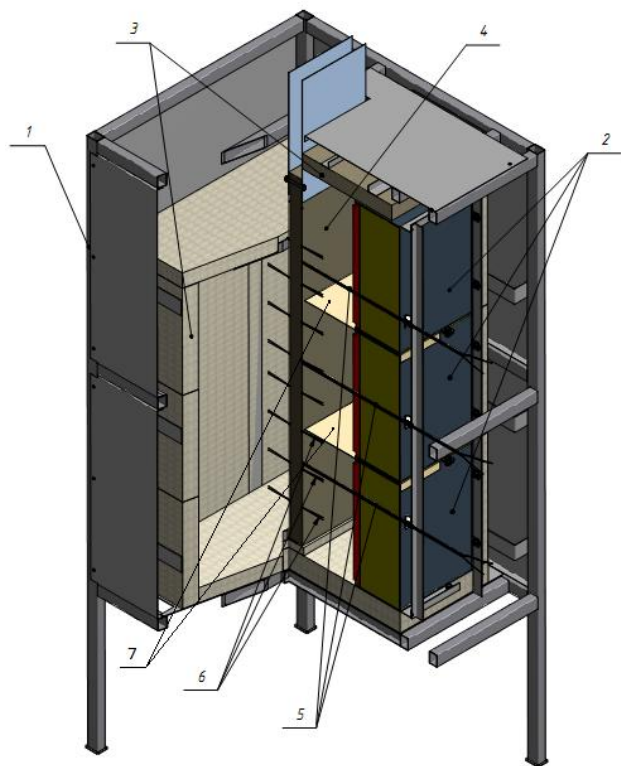


Температурное поле части фермы опорной

при принятых в расчетах по трехмерной модели условиях, температура примыкающих к корпусу реактора элементов опорной фермы (в объеме толщиной около 140 мм) может достигать 500–430 °С (регламентируемая температура – 430 °С)

Экспериментальная поддержка в обоснование технических решений

Стенд для тепловых испытаний



- 1 – корпус;
- 2 – нагревательные панели;
- 3 – теплоизоляция;
- 4 – имитатор корпуса реактора;
- 5 – регулирующие термодпары;
- 6 – контрольные термодпары;
- 7 – тепловые экраны



Внешний вид нагревательных панелей

Установка блока нагревательных панелей при монтаже стенда



Модель подъемника в исходном и поднятом положении



1. Экспериментальная проверка устойчивости работы системы автоматического регулирования температуры и определения степени взаимного влияния тепловых зон



Обеспечивается устойчивая работа системы, взаимное влияние тепловых зон не сказывается на качестве регулирования, определены динамические настройки ПИД-регуляторов температуры

2. Сравнительные испытания двух вариантов конструкции нагревательных панелей



Наиболее надежным является вариант панелей с зигзагообразным нагревателем из ленты сплава сопротивления, принят размер 550x400

3. Проверка соответствия показаний термопар контактного типа реальным температурам поверхности корпуса реактора



Термопары обеспечивали совпадение показаний с фактической температурой измеряемой поверхности с погрешностью не более 2°C

4. Проверка работоспособности основного узла механизма для монтажа наружной теплоизоляции корпуса реактора (масштаб 1:3)

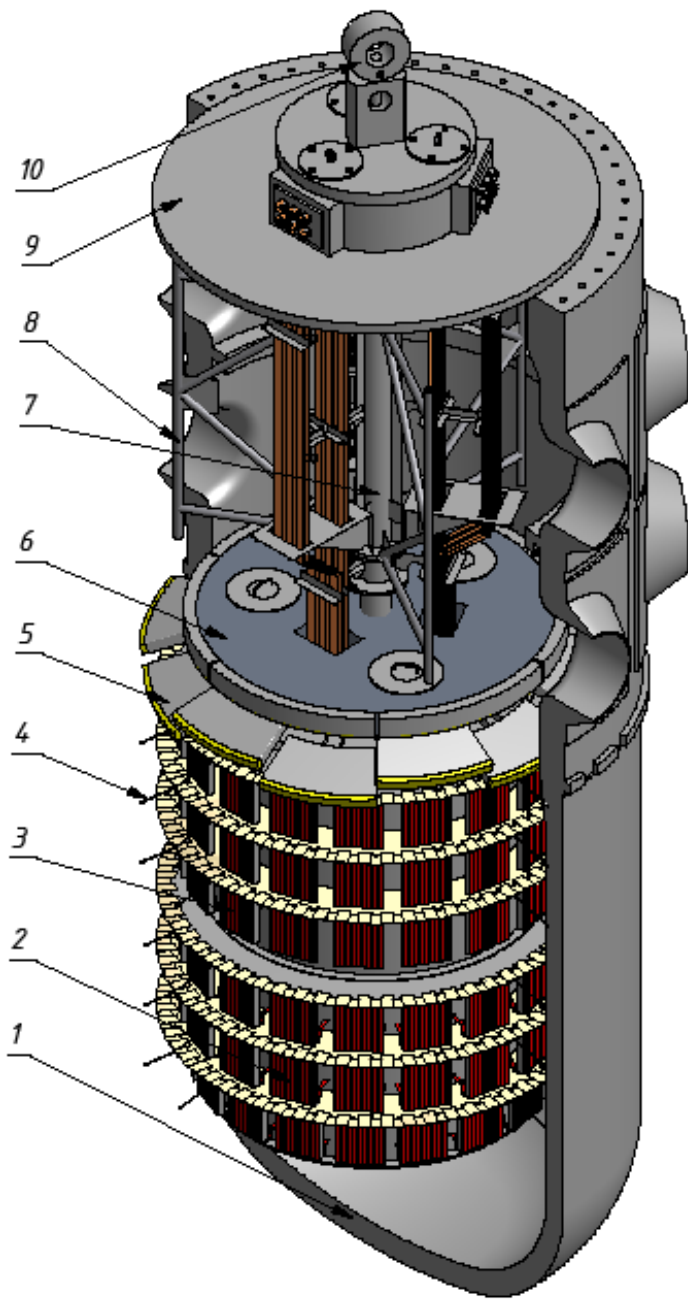


Испытания модели подъемника подтвердили работоспособность разработанной конструкции и позволили скорректировать выбор материалов для отдельных деталей устройства

Нагревательное устройство

1) Нагревательное устройство предназначено для восстановления механических свойств металла сварных соединений №3 и №4 корпуса реактора ВВЭР-1000 при многократном использовании на АЭС (подвергается дезактивации)

Установленная мощность, кВА.....	не 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



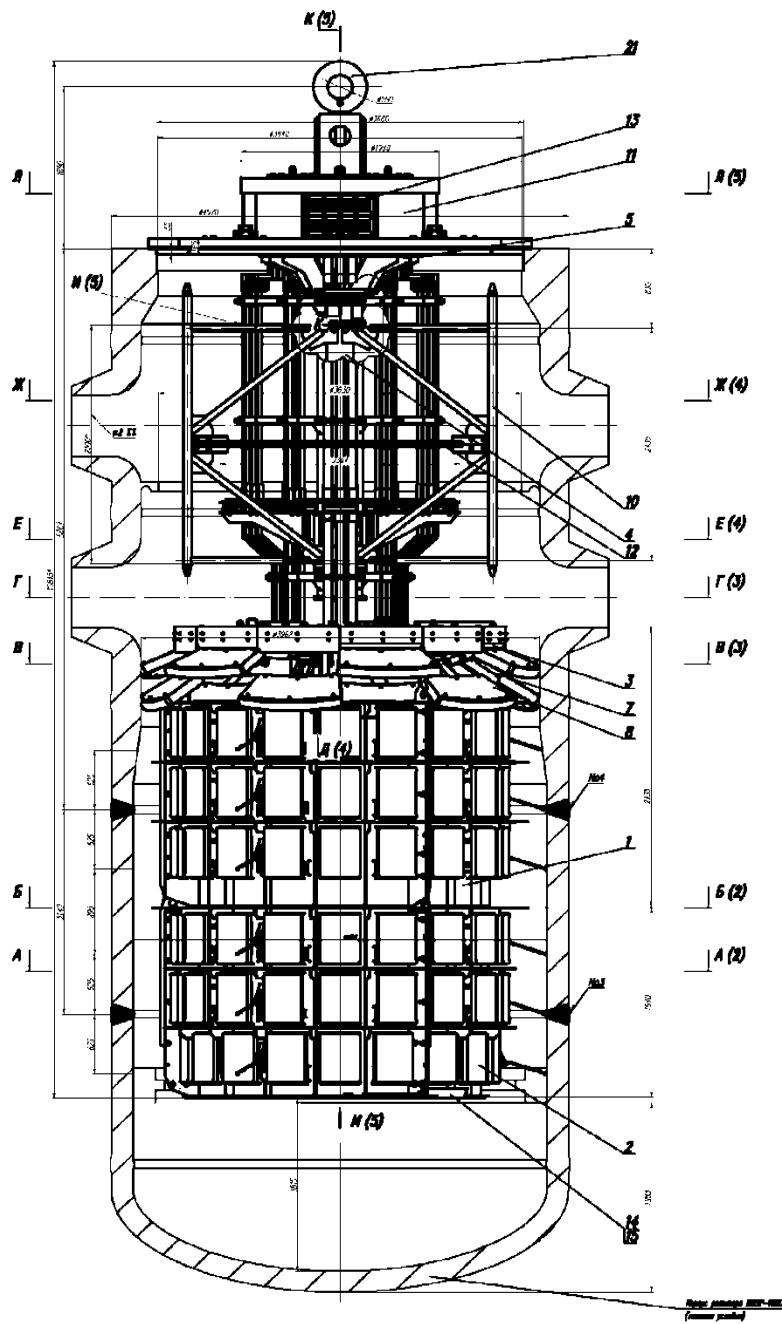
2) Нагревательное устройство состоит из крышки биологической защиты и двух секций нагревателей, соединенных штангой, на которой смонтирована диафрагма, связанная шарнирно со шторками и тягой.

3) В каждой секции 54 нагревателя, в двух секциях -108, образующих по высоте шесть колец нагрева по 18 в каждом кольце.

4) Нагревательное устройство содержит 18 самостоятельных тепловых зон, по 9 зон на каждый сварной шов. Три кольцевых зоны нагрева по шесть нагревателей в каждой зоне

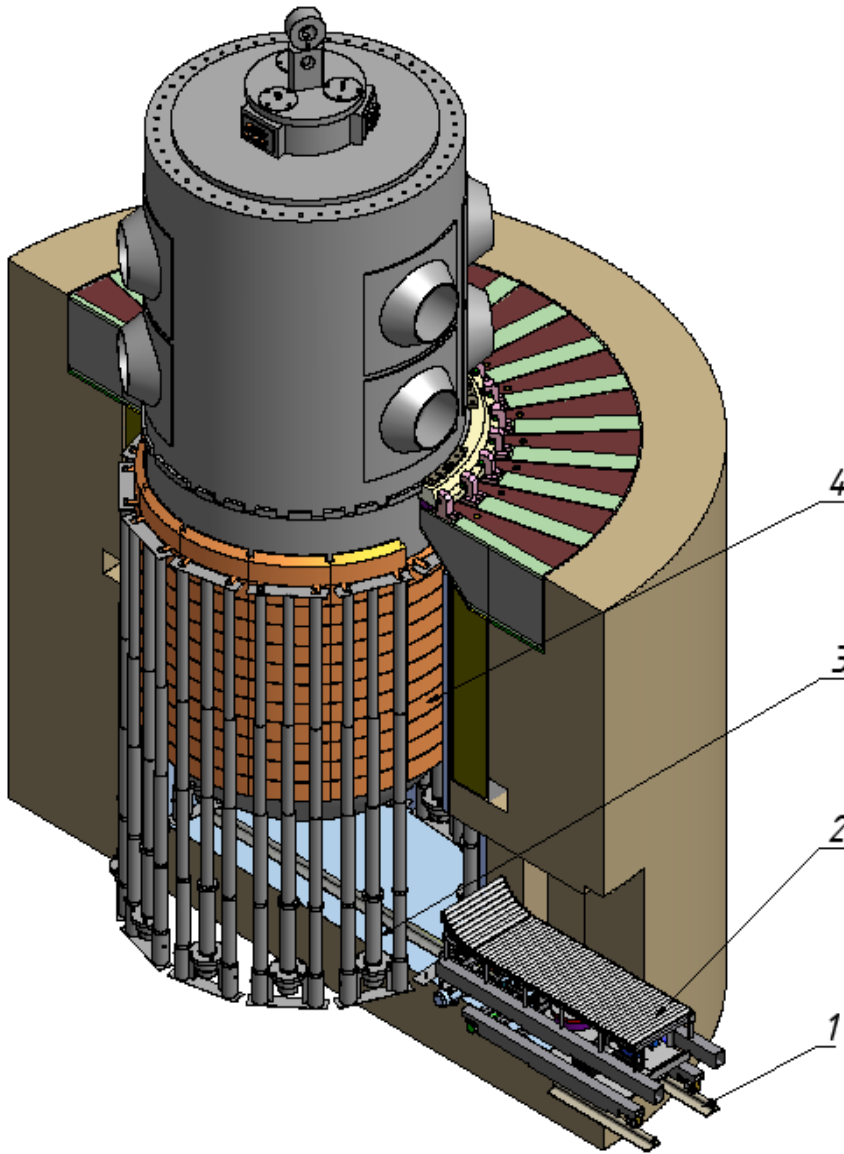
5) Нагреватели каждой зоны подключены к автономному источнику питания при помощи энергоподводов, проложенных по штанге на наружную поверхность крышки.

6) Каждая зона снабжена механизмом терморпар в виде двулучевого рычага



Нагревательное
 устройство
 в корпусе реактора

Внешняя тепловая изоляция, механизмы для ее установки



Тринадцать вертикальных «полос» теплоизоляции (металлический короб, заполненный теплоизоляционным материалом).

Тринадцать подъемников в виде телескопического четырехходового винтового домкрата с двумя телескопическими стойками.

На верхней поверхности – мягкая теплоизоляция, заполняющая объем между корпусом реактора и бетонным выступом опорной части реакторной шахты.

Самоходная тележка с четырьмя захватами (от опрокидывания) и поворотной рамой.

Лещевой захват для перемещения подъемников, приводной рольганг, на который укладывается полоса теплоизоляции, и привод вращения с зубчатой передачей

. Система внешней теплоизоляции в рабочем положении

- рельсовый путь, 2- самоходная тележка, 3- телескопические подъемники, 4- теплоизоляция.

Электрооборудование и средства автоматического управления и регистрации основных параметров процесса отжига

Подвод электропитания к нагревательным элементам

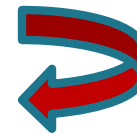


Автоматическое управление процессом термообработки по заданной оператором температурно-временной программе

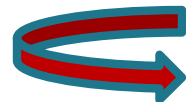
Сбор информации о температурном состоянии корпуса реактора реакторного помещения



Визуальное отображение хода процесса термообработки



Регистрация параметров процесса на бумажной диаграмме

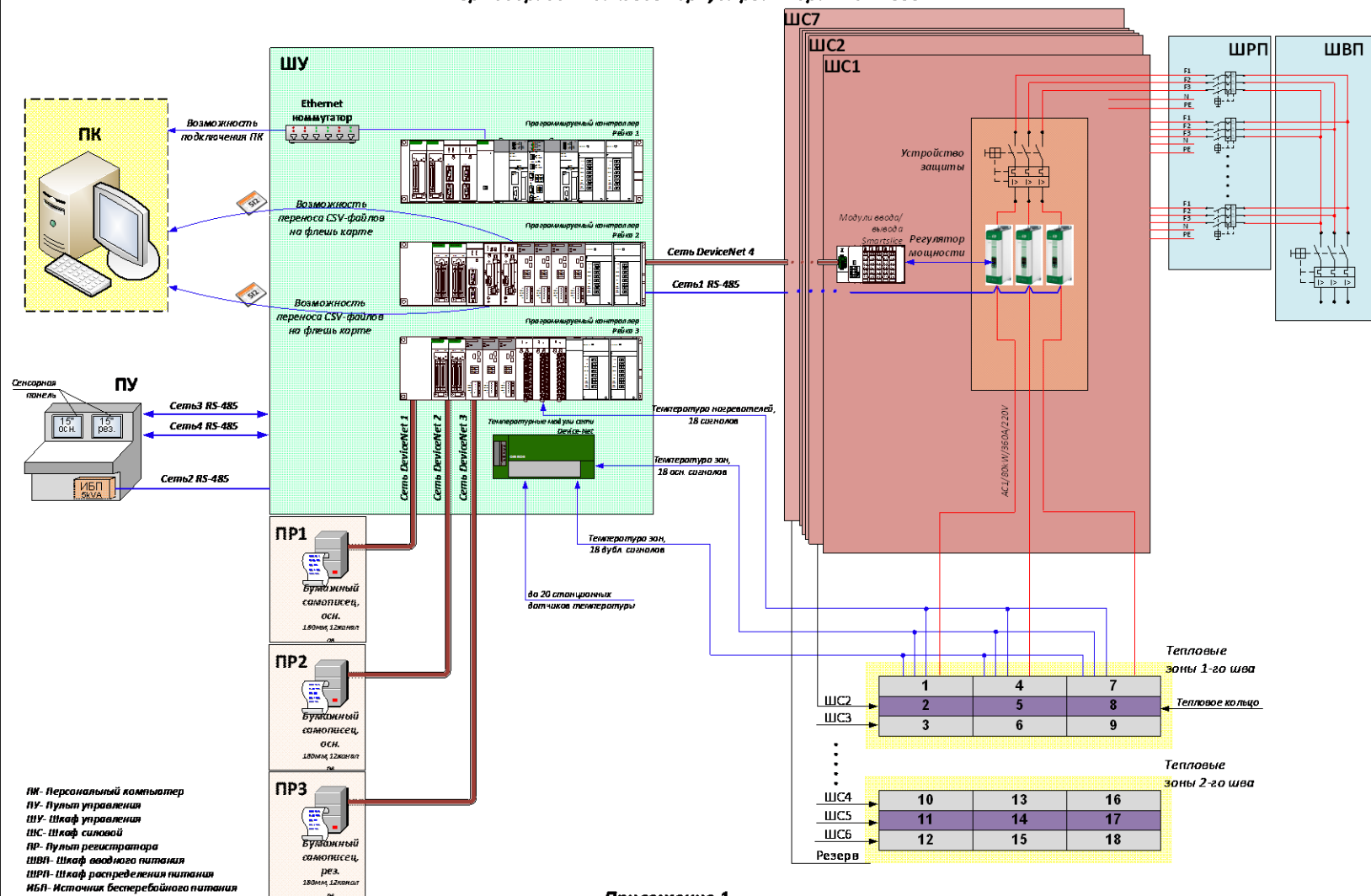


Архивирование и хранение параметров процесса

- ▶ ШУ – шкаф управления; ШС1 ÷ ШС7 – шкафы силовые (ШС7 – резерв);
- ▶ ШРП – шкаф распределения питания; ШВП – шкаф ввода питания;
- ▶ ПУ – пульт управления – основной и дублирующий операторские терминалы
- ▶ ПР1 ÷ ПР3 (ПР3 – резерв) – пульта регистрации.



Функциональная схема системы управления термообработкой швов корпуса реактора ВВЭР-1000



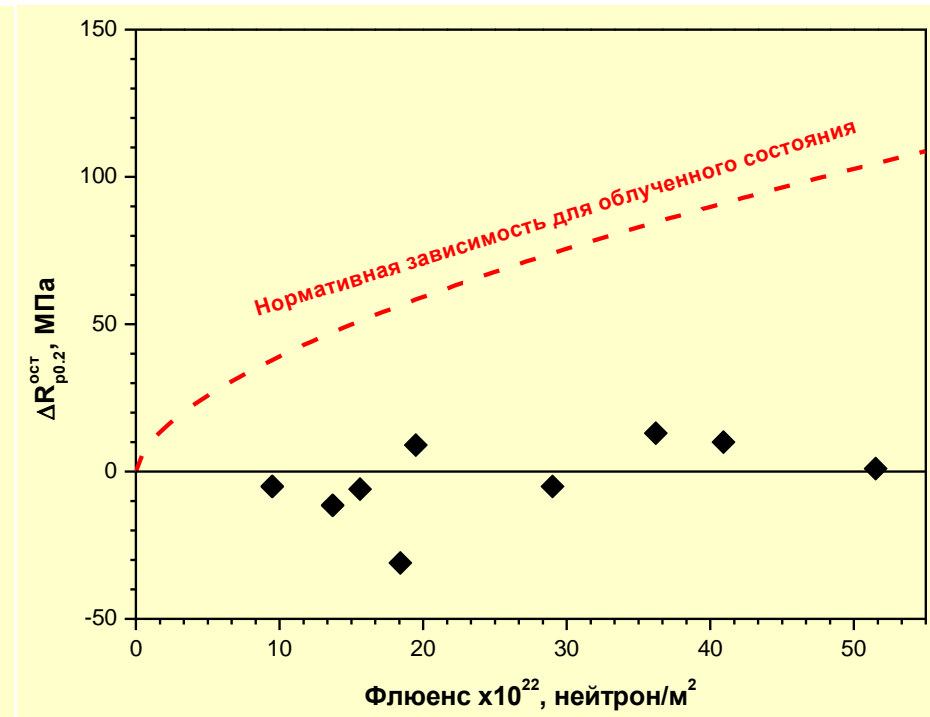
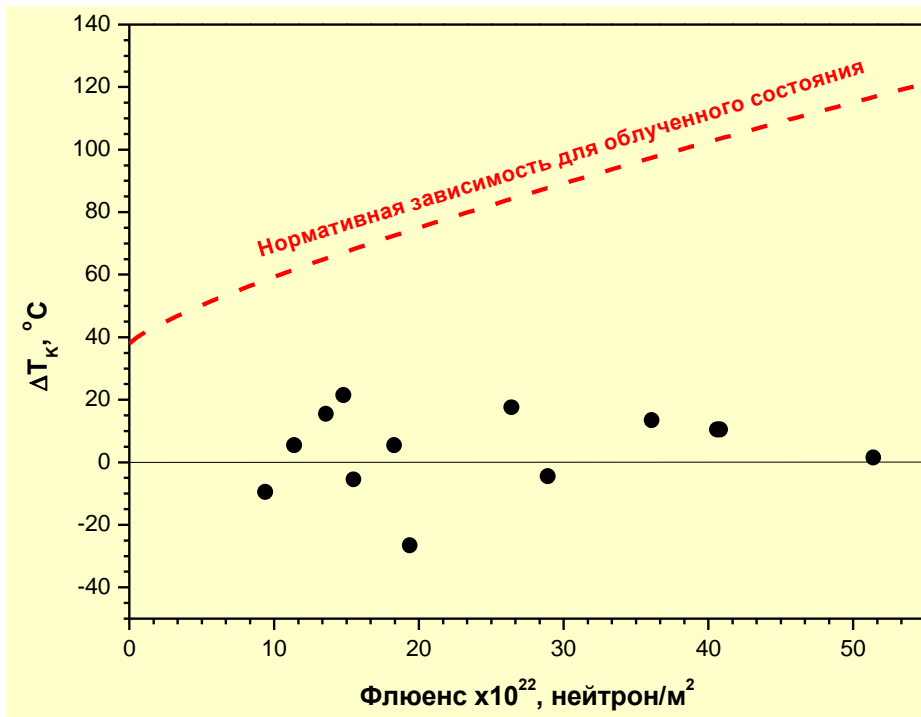
Приложение 1

Заключение и Выводы

1. Спроектирована установка для проведения отжига швов №3 и 4 корпуса реактора ВВЭР-1000.
2. Разработана рабочая конструкторская документация нагревательного устройства, системы управления и регистрации теплового режима, обеспечивающих реализацию заданной технологии отжига.
3. Проведено расчетное и экспериментальное обоснование принятых технических решений, ведется изготовление нагревательного устройства, проектирование и испытания вспомогательных устройств и механизмов.
4. Работы проводятся в строгом соответствии с графиком, обеспечивающим готовность технологии и оборудования к проведению первого отжига в 2016–2017 годах (Балаковская АЭС, блок №1).

Для отработки режимов работы оборудования, уточнения реальных граничных условий и температурных полей в корпусе реактора и несущих конструкциях необходимо провести полномасштабные эксперименты на «чистом» корпусе реактора не предназначенном для дальнейшей эксплуатации

Остаточное охрупчивание облученных сварных швов после восстановительного отжига $565 \pm 15^\circ\text{C} / 100 \text{ ч}$



Экспериментально подтверждена возможность практически полного восстановления структуры и свойств материалов корпусов реакторов ВВЭР в результате восстановительных отжигов после облучения в диапазоне флюенсов нейтронов, соответствующих не только проектному, но и продленному до 60 лет сроку эксплуатации. Это показывает возможность использования восстановительных отжигов для обеспечения эксплуатации корпусов реакторов до 60 лет и более

Продолжение работ по созданию оборудования

Изготовление системы управления и электропитания

Изготовление нагревательного устройства

Доработка и изготовление внешней теплоизоляции и механизмов ее установки

Проектирование и изготовление стапеля и оснастки для наладки нагревательного устройства перед загрузкой в реактор

Программирование и отладка системы управления

Проведение горячих испытаний, корректировка РКД

Экспериментально–расчетное подтверждение надежности и достаточности предложенной технологии восстановительного отжига корпуса реактора, безопасности принятой концепции отжига для конструктивных элементов корпуса, шахты реактора и другого оборудования АЭС.

Возможная проработка вариантов охлаждения опорных конструкций.

Разработка эксплуатационной документации, ПОР.

Создание и тренинг группы специалистов для проведения отжигов