

EUROPEAN COMMISSION  
DIRECTORATE-GENERAL JRC  
JOINT RESEARCH CENTRE  
Institute for Energy  
Technical and Scientific Support to TACIS and  
PHARE

ie

**TACIS NUCLEAR SAFETY**



**TACIS PROJECT R8.01/97**  
**TRANSLATION, EDITING AND DIFFUSION OF DOCUMENTS**  
**(Results Dissemination)**

**Проекты ТАСИС R1.2/91 и R2.16/93**  
**ЦЕЛОСТНОСТЬ ПЕРВОГО КОНТУРА:**  
**ПРИМЕНЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ ТПР К ВВЭР- 440/230**  
**НОВОВОРОНЕЖСКАЯ АЭС БЛОКИ 3 И 4**  
**И КОЛЬСКАЯ АЭС БЛОКИ 1 И 2**  
**АННОТАЦИОННЫЙ ОТЧЕТ**

TSSTP/DISS97/02/02002

Petten, 2002/02/27

**Автор(ы):**

Р. Альштранд  
М.Б. Бакиров

(EC/JRC-IE)  
ВНИИАЭС

**Согласовано:**

К. Риег

(EC/JRC-IE)

**Утверждено:**

М. Биет

(EC/JRC-IE)

## РЕЗЮМЕ

В рамках Программы Европейского экономического сообщества " ТАСИС 91 Ядерная Безопасность " с Консорциумом ЭДФ-ФРАМАТОМ-СИМЕНС/КВУ был заключен договор на работу "Целостность первого контура: Применение концепции Течь перед разрывом ".

Цель работы состояла в том, чтобы изучить возможность применения концепции ТПР к трубопроводам главного циркуляционного контура и дыхательным трубопроводам на Российских АЭС с ВВЭР- 440 - 230 на 3 и 4 блоках Нововоронежской АЭС и на 1, 2 блоках Кольской АЭС.

Подводя итог результатов различных исследований напряженного состояния и детерминистического анализа механики разрушения согласно Немецкой методологии, можно сделать следующие выводы :

- Принимая во внимание все предположения и допущения, концепция ТПР для ГЦК и дыхательных трубопроводов не может быть подтверждена на 3, 4 блоках НВАЭС (без установки дополнительных гидравлических амортизаторов сейсмических воздействий). Концепция ТПР может быть применена с учетом оптимизированной установки дополнительных сейсмических опор и предполагая, что дыхательный трубопровод отсечен от вершины компенсатора давления.

- Используя в расчете вместо землетрясения аналогичную по величине нагрузку аварийного режима (из-за низкого уровня сейсмичности она в расчете не рассматривается) концепция ТПР может быть применена для существующей ситуации на 1, 2 блоках Кольской АЭС.

Анализ акустических систем контроля течи (АСКТ), установленных на 3, 4 блоках НВАЭС и на 1, 2 блоках Кольской АЭС показывает:

- Чувствительность АСКТ на НВАЭС и Кольской АЭС обеспечивает выявление стабильных течей задолго до достижения критических размеров.

- АСКТ на НВАЭС и Кольской АЭС должны быть усовершенствованы (особенно для дыхательного трубопровода).

Представлены рекомендации для дальнейшей работы (уточнение реального уровня сейсмичности, повторная оценка различных систем обнаружения течей, оптимизация сейсмических опор). Эти работы были выполнены в рамках проекта ТАСИС 2.16/93, который является продолжением ТАСИС проекта 1.2/91. В рамках этого проекта "Целостность первого контура: Применение концепции Течь перед разрывом " на выполнение работы держателем договора являлся Сименс КВУ.

Задача выполнения ТАСИС 2.16/93 состояла в подготовке ответов на заключения и рекомендации, которые были сформулированы в Заключительном Итоговом Отчете ТАСИС 91, 1.2, главным образом следующие:

- Рассмотрение реального сейсмического состояния НВАЭС 3, 4;

- Определение и оптимизация сейсмических опор.

Расчеты ТПР в рамках ТАСИС 2.16/93 согласно Американским процедурам (NUREG-1061) показали, что при установке дополнительных сейсмических опор критерии ТПР также могут быть выполнены и на 3, 4 блоках НВАЭС.

В заключении представлены аспекты практической реализации результатов проектов.

**Участники проекта:**

**ТАСИС 1.2/91**

**Бенефициарий  
Участники проекта со  
стороны КЕС**

**Субконтрактор**

**Концерн «Росэнергоатом»  
Консорциум:  
Siemens/KWU (Руководитель)  
EDF, Framatome  
МОХТ-Отжиг РМ**

**ТАСИС 2.16/93**

**Бенефициарий  
Участники проекта со  
стороны КЕС  
Субконтрактор  
Привлеченные организации**

**Концерн «Росэнергоатом»  
Консорциум:  
Siemens/KWU  
АО «Атомэнергоэкспорт»  
ИЯИ-Ржеж (Чехия)**

# СОДЕРЖАНИЕ

РЕЗЮМЕ.....	2
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ЦЕЛИ ПРОЕКТА .....	6
2. СОДЕРЖАНИЕ ПРОЕКТА TACIS 1.2/91.....	9
2.1 ОБЪЕМ ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТ .....	9
2.2. ОПИСАНИЕ РАБОТЫ .....	9
2.2.1 Анализ фактического состояния трубопроводов .....	9
2.2.2 Оценка свойств материалов трубопроводов .....	10
2.2.3 Оценка методов неразрушающего контроля, используемых для контроля трубопроводов .....	10
2.2.4 Анализ существующей системы контроля течи .....	11
2.2.5 Анализ существующих процедур по действию персонала в случае обнаружения течи в трубопроводах Ду-500 и Ду-200.....	12
2.2.6 Численный анализ в соответствии с методологией ТПР и анализ надежности трубопроводов .....	12
2.3 Выводы по проекту TACIS 1.2/91 .....	13
2.4 Рекомендации по проекту TACIS 1.2/91 .....	15
3. ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ РАБОТ, НАМЕЧЕННОЕ В ПРОЕКТЕ TACIS-1.2/91.....	15
3.1. Пути дальнейших исследований .....	15
3.2 АНАЛИЗ НАПРЯЖЕНИЙ.....	16
3.3 АНАЛИЗ МЕСТ КОНТРОЛЯ ТЕЧИ И ИНСТРУКЦИЯ ПО ДЕЙСТВИЯМ ПЕРСОНАЛА .....	17
3.4 ОЦЕНКА СТАРЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ .....	23
3.5 УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ .....	23
3.6 ТПР АНАЛИЗ .....	26
3.7 РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТА TACIS 2.16/93.....	30
4. ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕАЛИЗАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОЕКТОВ.....	31

## ВВЕДЕНИЕ

Первое поколение энергоблоков АЭС с ВВЭР-440/В-230 (энергоблоки №3, 4 Нововоронежской АЭС и №1, 2 Кольской АЭС) разрабатывались в конце шестидесятых годов на основе действовавшей в то время нормативно-технической документации и отвечавшей требованиям безопасности на тот период.

С учетом накопленного опыта эксплуатации, а также анализа причин и последствий аварий на АЭС, требования к обеспечению безопасности существенно изменились. По этой причине для обеспечения безопасной эксплуатации МАГАТЭ выступила с инициативой проведения комплексного анализа безопасности АЭС всех поколений, в основу которого положена методология экспертов МАГАТЭ, примененная на АЭС с реакторами ВВЭР-440(230). В основу идентификации недостатков и отступлений от требований современных НТД для этой серии энергоблоков легли общепризнанные нормативы безопасности, такие как нормы и руководящие принципы и рекомендации МАГАТЭ, NUSS и INSAG.

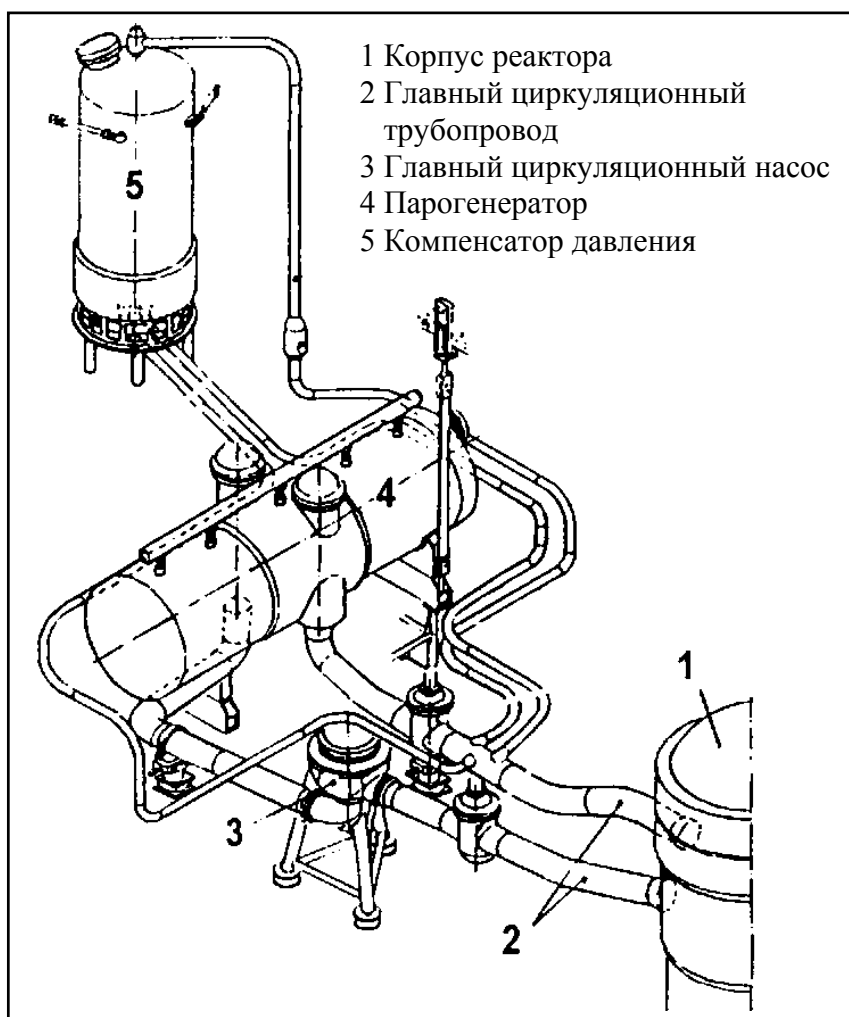
Концепция течь перед разрывом (ТПР) впервые разработана и применена на АЭС с PWR в США для того, чтобы исключить специальный учет динамических эффектов, связанных с большими разрывами трубопроводов первого контура. Основа концепции ТПР состоит в обосновании того факта, что в соответствующем трубопроводе до того, как может наступить его двухсторонний гильотинный разрыв, образуется достаточно большая надежно обнаруживаемая штатными средствами станции течь. Это достигается количественным определением и оценкой потери целостности и сопровождающих этот процесс течей. Внедрение концепции ТПР требует установки нескольких независимых систем обнаружения течи при переаттестации уже имеющихся. Кроме аспектов, связанных с требованиями к аварийному останову блока, необходимо обеспечить меры по выполнению условий концепции для всех стадий эксплуатации (надежный достоверный контроль, техническое обслуживание, мониторинг старения, периодическое обследование). Трубопровод первого контура, удовлетворяющий требованиям ТПР, может в принципе рассматриваться как имеющий очень низкую вероятность большой LOCA около  $10^{-6}$  на реактор в год.

Комиссия по ядерному регулированию США еще в 1981 году разработала нормативный документ об использовании концепции ТПР для высоконапряженных систем АЭС с температурой  $> 93^{\circ}\text{C}$  и давлением  $> 1,9$  МПа. Принятая в нем процедура применения ТПР легла в основу анализа возможности использования этой концепции для АЭС с ВВЭР-440.

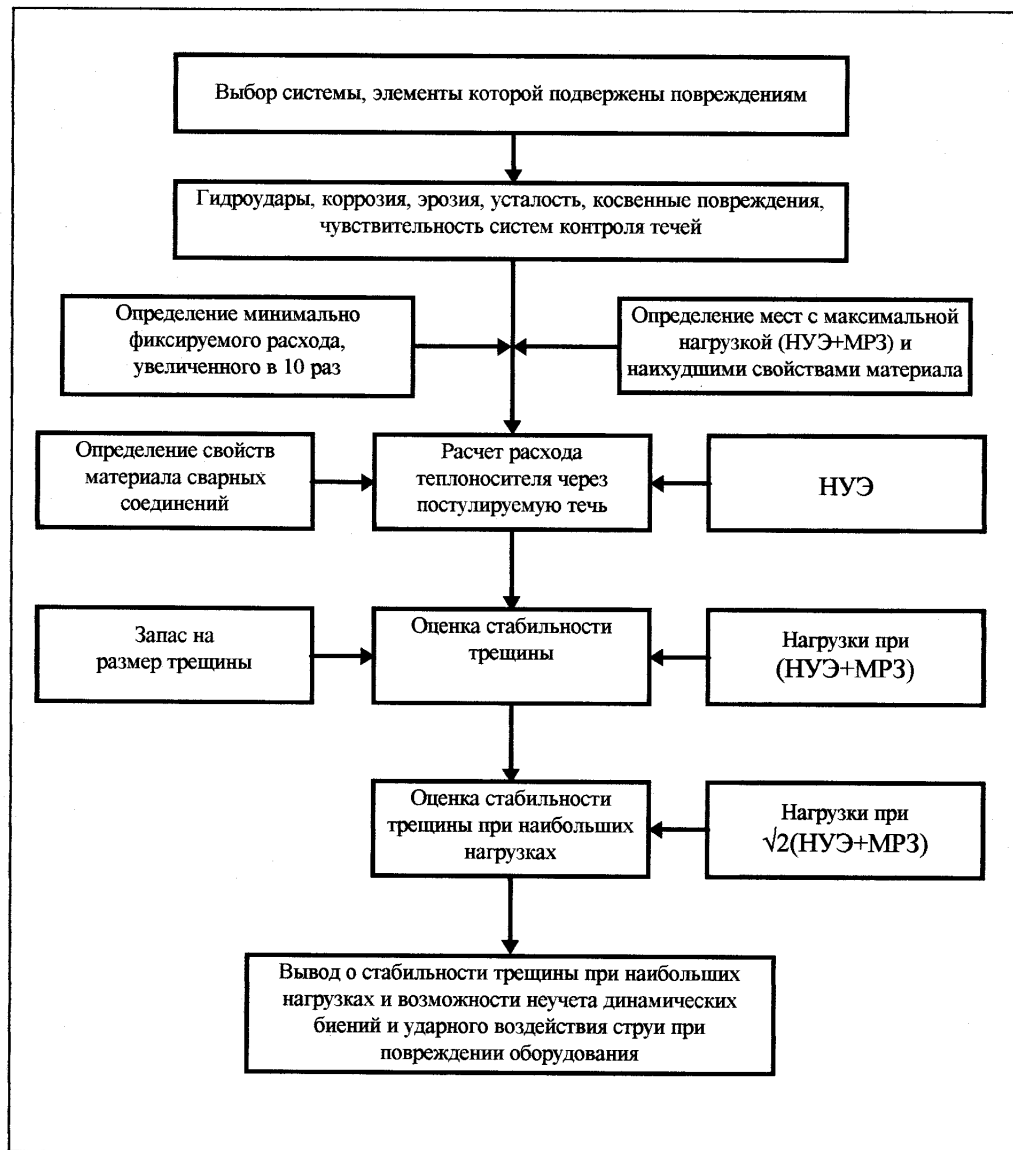
## 1 ЦЕЛИ ПРОЕКТА

В рамках проекта исследовалась возможность применения концепции ТПР к главным циркуляционным трубопроводам Ду-500 и дыхательным трубопроводам линии компенсации объема Ду-200 блоков 3, 4 Нововоронежской АЭС и блока 1, 2 Кольской АЭС.

На Рис. 1 показана общая компоновка одной циркуляционной петли реакторной установки ВВЭР-440/230. Схема анализа и расчета элементов на соответствие требованиям концепции ТПР представлена на Рис. 2.



**Рис. 1. Общая компоновка основного оборудования и трубопроводов 1 контура РУ ВВЭР-440**



**Рис. 2. Схема анализа и расчета элементов на соответствие требованиям концепции ТПР.**

Работы выполнялись в объеме «Технического задания» к проекту и основывались на Западном подходе к оценке ТПР согласно законодательным процедурам, таким как Методическое руководство 1.45, NUREG-1061, Standard Review Plan 3.6.3, Тех. док. МАГАТЭ 720 и 774 и т.п.

Также, в логике проведения этих работ в 1995г. ВНИИАЭС, НТЦ Госатомнадзора РФ, ОКБ «Гидропресс», НИКИЭТ разработали «Технические требования к применению концепции «течь перед разрушением» для трубопроводов действующих АЭС», которые были разрешены к применению Госатомнадзором России.

Этот документ отдельно рассматривался с целью практического внедрения результатов данного проекта на АЭС России.



## 2. СОДЕРЖАНИЕ ПРОЕКТА ТАСИС 1.2/91

### 2.1 Объем выполненных работ

Согласно Программе Европейского экономического сообщества сообщества "ТАСИС 91/Проект 1.2: Целостность первого контура " концепция ТПР на Нововоронежской АЭС 3+4 и на Кольской АЭС 1+2 применялась для:

- главного циркуляционного трубопровода Ду-500
- дыхательного трубопровода Ду-200.

В рамках данного проекта были сделаны следующие этапы работы:

1. Анализ фактического состояния трубопроводов.
2. Оценка свойств материалов трубопроводов.
3. Оценка методов неразрушающего контроля, используемых для контроля трубопроводов.
4. Анализ существующей системы контроля течи.
5. Анализ существующих процедур по действию персонала в случае обнаружения течи в трубопроводах Ду-500 и Ду-200.
6. Численный анализ в соответствии с методологией ТПР и анализ надежности трубопроводов.

### 2.2. Описание работы

Результаты расчетно-экспериментальных работ изложены в 26 отчетах, включая отчеты фирм Сименс (ФРГ), ЭДФ (Франция), Фраматом (Франция), выполненных в 1994-95 гг. в рамках проекта.

В ходе выполнения работы промежуточные и окончательные результаты подвергались экспертизе специалистами России и зарубежных стран. Эксперты оценивали как научно-методическую сторону работы, так и практические результаты.

#### 2.2.1 Анализ фактического состояния трубопроводов

Анализ фактического состояния Ду-500 и Ду-200 НВАЭС 3,4 и КолАЭС 1,2 включал:

- оценку их соответствия требованиям чертежной документации, ТУ и НТД;
- оценку качества проектно-конструкторских работ;
- учет качества изготовления;
- определение индивидуальных особенностей трубопроводов;
- учет особенностей эксплуатации;
- изучение сертификатов на металл и сварные соединения;
- анализ результатов предэксплуатационного и эксплуатационного контроля дефектов, толщин стенок и диаметров трубопроводов;
- уточнения фактических трассировок трубопроводов.

Химический состав, микро- и макроструктура, механические свойства и характеристики статической и циклической трещиностойкости основного металла, околошовной зоны, зоны сплавления и сварного шва, оценивали не только по

сертификатам, но и на основании лабораторных исследований вырезок из трубопроводов после 100000 часов эксплуатации.

Общее состояние трубопроводов показывает, что они спроектированы и изготовлены в соответствии с требованиями НТД и чертежной документации.

### 2.2.2 Оценка свойств материалов трубопроводов

По результатам фактического обследования состояния трубопроводов и безобразцового контроля по характеристикам твердости были уточнены не только фактические свойства материала, но и были оценены характеристики старения, склонность к межкристаллитному коррозионному растрескиванию.

Оценка трещиностойкости трубопроводов проводили по методике М-02-92, разрешенной к применению на АЭС Госатомнадзором России для расчета допустимых размеров несплошностей в металле оборудования и трубопроводов АЭС во время эксплуатации. Методика хорошо практически апробирована на АЭС, а так же в лабораторных условиях в ЦНИИТМАШ и ЦКТИ на основании испытания до разрушения полномасштабных элементов трубопроводов Ду-500 с искусственно нанесенными трещинами. Характеристики трещиностойкости основного металла и сварных соединений определяли, на воздухе при нормальной и высокой (350° С) температуре на воздухе и воде высоких параметров.

В рамках проекта ТАСИС 1.2/91 ФРАМАТОМ провел испытания на старение разнородных швов, с целью доказать требуемую вязкость. Проведенные исследования не показали изменений прочности и значения  $J_{0,2}$  в процессе термического старения. Результаты испытаний указывают на достаточную вязкость сварных соединений после длительного старения.

### 2.2.3 Оценка методов неразрушающего контроля, используемых для контроля трубопроводов

Проведенный анализ показал, что конструкция трубопроводов и боксов, в которых они находятся, позволяют осуществлять 100% контроль их состояния. Такой 100% контроль был осуществлен на НВАЭС как в соответствии со специально разработанным в ходе выполнения работ "Технологическим регламентом контроля ГЦТ ...", так и в соответствии с требованиями особого режима эксплуатации, установленном на 1, 2 блоках КолАЭС и на 3, 4 блоках НВАЭС с 1991 года. Выявляемость дефектов и определение размеров при неразрушающем контроле была экспериментально проверена с использованием полномасштабных тест-образцов Ф500 и Ф200, содержащих реальные и искусственные дефекты в сварных швах. Эти исследования показали, что вероятность пропуска сквозных дефектов критического размера в трубопроводах пренебрежимо мала.

Принятый на 3, 4 блоках НВАЭС и 1,2 блоках КолАЭС объем и методы контроля обеспечивают качество дефектоскопического контроля в рамках требований концепции ТПР. Для дальнейшего повышения надежности ГЦТ можно рекомендовать замену РГ (радиографического) метода на УЗК (ультразвуковой).

Рекомендуемые методы УЗК:

- ✓ Двухчастотный метод с применением дефектоскопа марки АДМТ-21УБ с преобразователями с углом призмы 50 на частотах 1,2-1,8 МГц и

преобразователем 40 на тех же частотах. При этом снятие усиления сварного шва обязательно.

- ✓ Контроль продольными волнами с применением серийного дефектоскопа типа УД2-12 или автоматизированной установки типа «Сумиад». При этом применять раздельно-совмещенные наклонные пьезоэлектрические преобразователи РСН-ПЭП.

Обозначение	Частота (МГц)	Угол ввода (град)	Фокус (мм)	Стрела (мм)	Соотношение Ас/Ашум
П122-1,8-45-L	1.8	45	38	8	~40/18
П122-1,8-60-L	1.8	60	25	8	~46/20
П122-1,8-70-L	1.8	70	17	8	~32/8

Контроль проводится тремя преобразователями последовательно. Указанный тип преобразователей прошел межведомственные испытания в составе автоматизированной многоканальной ультразвуковой системы контроля Сумиад в соответствии с требованиями Госатомнадзора России.

Принятый на 3, 4 блоках НВАЭС и 1,2 блоках Кольской АЭС объем и методы эксплуатационного контроля обеспечивают качество дефектоскопического контроля в рамках требований концепции ТПР.

#### 2.2.4 Анализ существующей системы контроля течи

Обеспечение безопасности эксплуатации ГЦТ Ду-500 и Ду-200 1, 2 блоков КолАЭС может быть достигнуто организацией на блоках контроля течей двумя независимыми системами и дефектоскопическим контролем состояния трубопроводов. В соответствии с п.4.3 «Технических требований к применению концепции ТПР...» контроль течей должен производиться двумя системами.

На Кольской АЭС 1,2 существует две системы контроля течи:

- 1) СКТ по аэрозольной активности на как часть «СРК Система»;
- 2) Система акустического контроля течей ALUS

НА НВАЭС 3,4 существует три системы:

- 1) СКТ по аэрозольной активности на как часть «СРК Система»;
- 2) Система акустического контроля течей ALUS
- 3) Система контроля течей по влажности в вентиляционной системе В-2.

В случае возникновения течи теплоносителя на трубопроводах Ду-500 и Ду-200 через сквозную стабильную трещину, она должна быть обнаружена двумя независимыми системами контроля течей – акустической системой контроля течей ALUS производства фирмы Сименс (ФРГ) и системой контроля радиоактивности аэрозолей в боксах. Для трубопроводов Ду-500 3, 4 блоков НВАЭС течь может быть дополнительно обнаружена третьей системой контроля влажности в боксах.

С учетом результатов расчета минимального расхода теплоносителя через трещины критического размера и коэффициентов запаса чувствительности систем контроля течей и расход теплоносителя должно быть  $\leq 700$  литров/час для Ду-500 и 300 литров/час для Ду-200 (с учетом шероховатости краев трещины).

Представленные расчеты чувствительности средств контроля течей в герметичных помещениях 1, 2 блоков КолАЭС показали следующее:

- ✓ Для аппаратуры радиационного контроля – не ниже 10 л/ч.
- ✓ Для штатной системы ALUS, установленной на трубопроводах Ду-500 не ниже 224 л/ч для всех участков трубопроводов за исключением участка ГЦН-ПП, где чувствительность составляет 505 л/ч и 394 л/с для 1 и 2 блоков соответственно; на трубопроводах Ду-200 – 135л/ч.

Чувствительность систем обеспечивает обнаружение течей с существенными запасами. Существующие средства обнаружения течей соответствуют требованиям концепции ИПР. Анализ механики разрушения в сопоставлении с размерами течей показал, что все коэффициенты запаса, установленные в «Технических требованиях...» (ВНИИАЭС, 1995) выполняются.

При проведении гидроиспытаний первого контура на плотность (прочность) система ALUS должна обеспечивать контроль течей всеми измерительными каналами. Для подтверждения работоспособности система должна быть протестирована и прокалибрована с помощью излучателей шума в соответствии с разделами 4 и 9 «Инструкции по эксплуатации систем акустического контроля протечек ALUS-1,2 (Блоки 1,2)» № 1,2-07-04ИЭ-97.

При выходе из строя измерительных каналов должны быть приняты меры для безусловного восстановления их работоспособности в ближайший останов блока, но в срок не превышающий 1 год после ППР. Рекомендовано доработать программное обеспечение по расчету данных от системы с целью ее совершенствования.

Применительно к техническим средствам системы контроля радиоактивности в герметичных помещениях отмечено, что система должна метрологически поверяться ежегодно. Также должна проводиться проверка работоспособности измерительных каналов системы в соответствии с «Графиком проверки работоспособности измерительных каналов от датчиков аппаратуры контроля радиационной безопасности», который разработан отдельно на каждой станции.

Вывод каналов системы в ремонт, приемка из ремонта, техобслуживание должны проводиться в соответствии с разделами 5, 8, 9 «Инструкции по эксплуатации системы радиационного контроля 1 и 2 блоков №1, 2-06-09ИЭ-95».

#### 2.2.5 Анализ существующих процедур по действию персонала в случае обнаружения течи в трубопроводах Ду-500 и Ду-200

Анализ действующих на 1, 2 блоках КолАЭС и 3, 4 блоках НВАЭС инструкций по действиям персонала по ликвидации малых течей и ликвидации аварий показал, что применение концепции ТПР на этих АЭС требует доработки специальной инструкции по действиям персонала в случае появления течи на трубопроводах Ду-500 и Ду-200.

#### 2.2.6 Численный анализ в соответствии с методологией ТПР и анализ надежности трубопроводов

Интегральным критерием корректности выполнения проектных и конструкторских работ, так же как изготовления и эксплуатации, является соответствие действительного уровня статических и циклических нагрузок и выполнение требований норм прочности, действующих на АЭС. Было показано, что с учетом фактических режимов нагружения проектный ресурс трубопроводов обеспечен, а коэффициенты запаса прочности в режимах НУЭ соответствуют требованиям норм прочности на АЭС. Также, был выполнен анализ дополнительных специфических нагрузок, и показано, что

вероятность возникновения гидроудара в трубопроводах первого контура пренебрежимо мала.

В то же время расчеты напряжений в режиме максимального расчетного землетрясения (МРЗ), проводимые для сейсмичности площадки равной 7 баллам по шкале MSK-64 превысили допустимый уровень для 3,4 блоков НВАЭС. Для снижения напряжений в режиме МРЗ необходимо либо уточнить сейсмичность площадки, либо произвести расчет установки дополнительных опор, для снижения нагрузок при землетрясении.

Результаты проведенных расчетов показывают, что на 3, 4 блоках НВАЭС безопасная эксплуатация ГЦТ Ду500 и Ду200 в режиме НУЭ может быть достигнута за счет организации мониторинга течей имеющимися системами и проведением адекватного ЭК. Для режима МРЗ требуется провести дополнительные расчеты, принимая во внимание эффект термической стратификации и установку дополнительных амортизаторов.

Эти результаты позволяют сделать вывод, что ГЦТ ДУ-500, Ду-200 спроектированы и изготовлены в соответствии с действующими требованиями НТД, эксплуатация трубопроводов является удовлетворительной и не приводит к преждевременному исчерпанию их ресурса. В то же время оценка состояния трубопроводов в режиме МРЗ требует дополнительных работ. В связи с этим внедрение концепции ТПР на 3, 4 блоках НВАЭС произвести в два этапа:

на первом этапе - для режимов НУЭ, на втором этапе - для МРЗ. Работы для режима МРЗ были выполнены в рамках проекта R2.16 программы TACIS 93.

В рамках проекта также была выполнена работа по оценке вероятности возникновения течи в трубопроводах Ду 500 и Ду 200. Согласно данным Западных партнеров консорциума представленная техническая оценка показала, что количественная оценка вероятности не может быть выполнена ввиду недостатка необходимых данных. Вероятности абсолютного разрушения соответственно были определены без учета конкретных данных Нововоронежской и Кольской АЭС. С использованием экспериментально определенных характеристик статической и циклической трещиностойкости было показано, что сквозные трещины достаточно устойчивы и дорастают до критических размеров за время, превышающее 1 год эксплуатации.

С использованием фактических характеристик достоверности неразрушающего контроля, данных по фактической дефектности трубопроводов, учета возможного развития дефектов в эксплуатации, фактической нагруженности трубопроводов и условий эксплуатации было показано, что надежность трубопроводов по критерию сопротивления внезапному разрушению находится на приемлемом уровне и составляет величину не ниже  $(1-10^{-6})$  1/реактор год.

### **2.3 Выводы по проекту TACIS 1.2/91**

Проведен расчетно-экспериментальный анализ возможности применения концепции ТПР на 3, 4 блоках НВАЭС и 1, 2 блоках КолаАЭС. Показано, что концепция ТПР может быть применена на указанных блоках. Определены условия, при которых обеспечивается применимость концепции ТПР с одновременным достижением требуемого уровня надежности ГЦТ в эксплуатации.

#### I. Для 1,2 блоков Кольской АЭС:

1.1. Концепция «Течь перед разрушением» применима для ГЦТ во всех режимах эксплуатации.

1.2. Состояние трубопроводов с течью для всех сварных швов возможно со следующими коэффициентами запаса:

- 2 - по длине критической сквозной трещины; (запас по длине трещины, обеспечивающий подрастание трещины до критического размера в течении 1 года эксплуатации);
- 1,4 - по величине нагрузки.

1.3. Существующие на 1, 2 блоках КолАЭС системы контроля течей позволяют контролировать течь через стабильные трещины с запасами  $n_Q$ :

Система контроля течи по радиоактивным аэрозолям  $n_Q > 10$ ;

Система контроля по акустическим шумам  $n_Q > 10$ .

1.4. Существующие системы контроля течей позволяют также контролировать максимальную компенсируемую течь с запасом  $> 10$ .

1.5. Количественный анализ вероятности возникновения течи и полного разрыва трубопроводов 1 контура показал, что на эти события существенно влияют качество (достоверность) неразрушающего дефектоскопического контроля и гидравлические испытания избыточным давлением. При этом в случае проведения 100% контроля существующими на АЭС методами цветной дефектоскопии и УЗК вероятность появления течи находится в диапазоне  $10^{-3} - 10^{-4}$  1/реактор год, а вероятность полного разрыва трубопровода - в диапазоне  $10^{-5} - 10^{-6}$  1/реактор год. Необходимо отметить, однако, что входные данные в вероятностном анализе не являлись специфическими для Кольской АЭС, как было указано выше.

1.6. Для обеспечения надежности трубопроводов на уровне  $\ll 10^{-6}$  1/реакт.год необходимо применение более совершенных методов ультразвукового контроля, включая также УЗК композитных сварных швов.

## II. Для 3,4 блоков Нововоронежской АЭС.

2.1. Концепция «Течь перед разрушением» может быть применена для ГЦТ во всех режимах эксплуатации. Однако при этом для режима (НУЭ+МРЗ) необходимо провести уточнения величины МРЗ. В случае подтверждения сейсмичности площадки, соответствующей 7 баллам по шкале MSK-64, необходима установка дополнительных опор и проведение дополнительных расчетов, в частности с учетом напряжений эффекта стратификации.

2.2. Состояние, трубопроводов с течью для сварных швов возможно со следующими коэффициентами запаса:

- 2 - по длине критической -сквозной трещины; (запас по длине трещины, обеспечивающий подрастание трещины до критического размера в течении 1 года эксплуатации);
- 1,4 - по величине нагрузки для НУЭ.

2.3. Существующие на 3, 4 блоках системы контроля течи обеспечивают контроль течей через устойчивые сквозные трещины (по п.2.2) со следующими запасами (для режима НУЭ):

Система контроля течи по радиоактивным аэрозолям  $n_Q > 10$ ;

Система контроля течи по влажности пара  $> 10$ ;

Система контроля течи по акустическим шумам  $> 10$ .

2.4. Существующие системы контроля течей позволяют контролировать максимальную компенсируемую течь с запасом 10.

2.5. Количественный анализ вероятности возникновения событий течи и полного разрыва трубопровода ГЦК в режиме НУЭ показал, что вероятность возникновения течи находится в диапазоне  $10^{-3}$  -  $10^{-4}$  1/реактор год, а вероятность полного разрыва в диапазоне  $10^{-5}$  -  $10^{-6}$  1/реактор год. Здесь опять необходимо отметить, что входные данные в вероятностном анализе не являлись специфическими для Нововоронежской АЭС, как было указано выше.

2.6. В случае применения УЗК с большей выявляемостью дефектов возможно достижения существенно большей надежности ГЦТ по критерию течи или разрушения.

## **2.4 Рекомендации по проекту ТАСИС 1.2/91**

1. Для 1,2 блоков Кольской АЭС: перейти к непосредственному внедрению концепции ТПР. При этом предусмотреть разработку новой (или доработку существующей) руководящей документации для персонала АЭС и применение УЗК с большей выявляемостью дефектов. Особое внимание при этом обратить на контроль композитных швов. Необходимость доработки систем контроля течи определить после их освидетельствования.

2. Для 3,4 блоков Нововоронежской АЭС перейти к внедрению концепции ТПР в два этапа:

1 этап - внедрение концепции ТПР в режиме НУЭ (по аналогии с КолАЭС).

2 этап - внедрение концепции ТПР в режимах (НУЭ + МРЗ). В этом случае предусмотреть:

- дополнительный анализ сейсмических нагрузок с целью уточнения напряжений и снижения их уровня;
- провести дополнительные прочностные расчеты с учетом дополнительного консерватизма на действие эффекта стратификации на металл трубопровода;
- повышение качества трубопроводов за счет применения более современных методов УЗК и повышения на этой основе сопротивления трубопроводов разрушению в режимах НУЭ+МРЗ;
- установка дополнительных опор (в случае недостаточности первых двух мероприятий).

## **3. РАЗВИТИЕ РАБОТ В РАМКАХ ПРОЕКТА ТАСИС-2.16/93**

### **3.1. Пути дальнейших исследований**

По результатам проведения работы с целью ее практического внедрения, особенно для 3, 4 блоков НВАЭС, наметились три возможных направления реализации:

1. Прямой путь: Установка (дополнительных) опор и ограничителей.

Это требует многовариантных вычислений напряжений в трубопроводах с целью оптимизации количества и расположения опор, изготовление, анализ пригодности стационарных помещений (по допустимым нагрузкам) и установка.

2. Второй альтернативный вариант - прояснить уровень сейсмических нагрузок, учитывая при проведении расчетов эффект демпфирования и величины (упруго-) пластических напряжений.

Возможно, что в данном случае удастся определить допустимый уровень напряжений, при котором установка опор не потребует.

3. Третий альтернативный путь - повышение качества неразрушающего дефектоскопического контроля (и качества ремонта) и увеличение таким образом надежности трубопроводов при МРЗ до приемлемого уровня.

Последний путь является наиболее экономичным решением и позволяет повысить надежность не только в режимах МРЗ, но и во всех эксплуатационных режимах. Однако, этот путь вызывает сомнения в силу того, что он будет основываться на вероятностных подходах, что, само по себе, отвергается концепцией ТПР.

С целью выбора более оптимального пути внедрения результатов проекта TACIS 1.2/91 была проведена в рамках нового проекта TACIS R 2.16/93 проработка дополнительных требований по расчетно-экспериментальному обоснованию применимости концепции ТПР (например, учет эффекта стратификации, установка ограничителей биения трубопроводов от эффекта хлыстового удара и воздействия бьющих струй, совершенствование расчетов с учетом сейсмике и т.д.).

Объем и определение задач работ было установлено в «Специальном техническом задании».

Для достижения поставленной цели была выполнена работа, объем и последовательность действий в которой представлена на рис.3.

### **3.2 Анализ напряжений**

Расчет напряжений в режимах НУЭ и МРЗ был проведен для каждого сварного шва. В качестве нагружающих факторов рассматривалась сумма нагрузок от нормальных условий эксплуатации (НУЭ) и максимального расчетного землетрясения (МРЗ). В качестве исходных данных по спектру частот для МРЗ использовались результаты, полученные институтом «Атомэнергопроект» из расчета 7 баллов для площадки Нововоронежской АЭС и 5 баллов для площадки Кольской АЭС.

Дополнительно учитывался эффект стратификации для дыхательного трубопровода в переходных режимах. Для его оценки использовалась система измерения температур FAMOS установленная на дыхательном трубопроводе 1 энергоблока Кольской АЭС. На рис.4 представлены места установки термопар на наружной поверхности трубопроводов. На рис.5 представлены обработанные результаты измерений температур системой на дыхательном трубопроводе. Анализ стратификации в дыхательном трубопроводе 1 блока Кольской АЭС проводился при различных режимах работы энергоблока. Напряжения рассчитывались консервативно, без учета самокомпенсации трубопроводов.

Учет влияния стратификации при определении применимости концепции ТПР был сделан путем введения дополнительного коэффициента запаса, полученного из опыта, т.е. значение отношения критической длины трещины ( $l_p$ ) к размеру трещины при выявляемой течи 38л/мин. ( $l_e$ ) использовалось равным 2.1 вместо 2.0.



### 3.3 Анализ систем контроля течи и инструкций по действиям персонала

Выполнена переоценка текущего состояния систем обнаружения течей с целью их усовершенствования.

Эта задача представлена в базовом отчете №2, где определено соответствие действующих систем обнаружения течей требованиям к чувствительности и надежности концепции ТПР.

Существует несколько типов систем определения течей. Согласно требованиям Комиссии по ядерному урегулированию США (NRC) для реализации концепции ТПР рекомендуются применять, по крайней мере, три автономных достоверных системы.

Следующие три системы непосредственного контроля течей существуют:

1. ALUS - система акусто-эмиссионного контроля (см. Рис.6);
2. Система измерения активности - радиационная дозиметрия (см. Рис.7)
3. Контроль влажности (Только на НВАЭС).

В ходе оценки текущего состояния систем обнаружения течей на рассматриваемых АЭС получены следующие результаты:

- Система контроля по влажности предложена как недостающее звено для усовершенствования систем обнаружения течи на КоАЭС 1, 2.
- Сформулировано техническое задание на установку системы контроля влажности на Кол. АЭС 1,2.
- Кроме того, разработано ТЗ на доработку системы акустического контроля течей – ALUS, с целью повышения чувствительности системы в отдельных зонах.
- Рассмотрена общая структура взаимодействия систем обнаружения течей, которая состоит из систем непосредственного контроля течей, а также из систем обнаружения течей по косвенным признакам.

Было показано, что наряду с используемыми системами интерпретации сигналов непосредственно с датчиков реагирующих на наличие течей (специализированные системы контроля течи), действует ряд систем, способных обнаруживать наличие течи теплоносителя по ряду косвенных признаков. Общая структура взаимодействия систем обнаружения течей теплоносителя, действующих на АЭС с ВВЭР-400/В-230 представлена на Рис. 8.

Было проведено усовершенствование/доработка процедур последовательности действий персонала АЭС при обнаружении течи.

Представленный анализ описывает процедуры для персонала, как взаимодействовать в случае обнаружения течи в первом контуре. Определены системы контроля течей, их возможности и пороговые значения.

Как на Кольской, так и на Нововоронежской АЭС процедуры по действиям персонала в случае утечек определены во внутренних инструкциях.

По работе каждой системы на АЭС разработаны инструкции для персонала, какие действия являются необходимыми при обнаружении течей по прямым или косвенным признакам.

Дополнительно представлены сведения по объему и периодичности проведения обучения и проверки знаний этих инструкции оперативным персоналом АЭС.

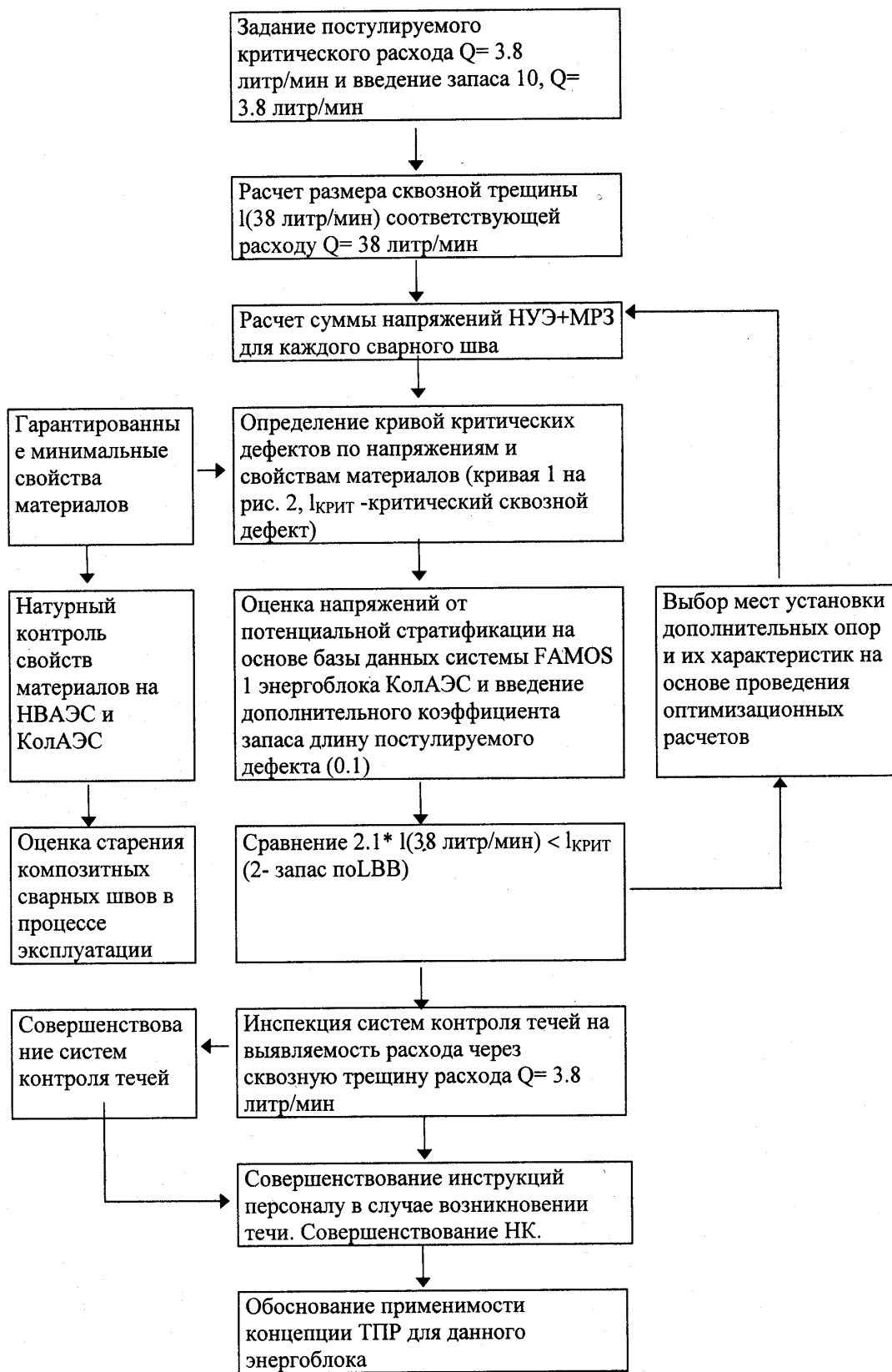


Рис. 3. Общая схема проведения расчетов по применению концепции ТПР

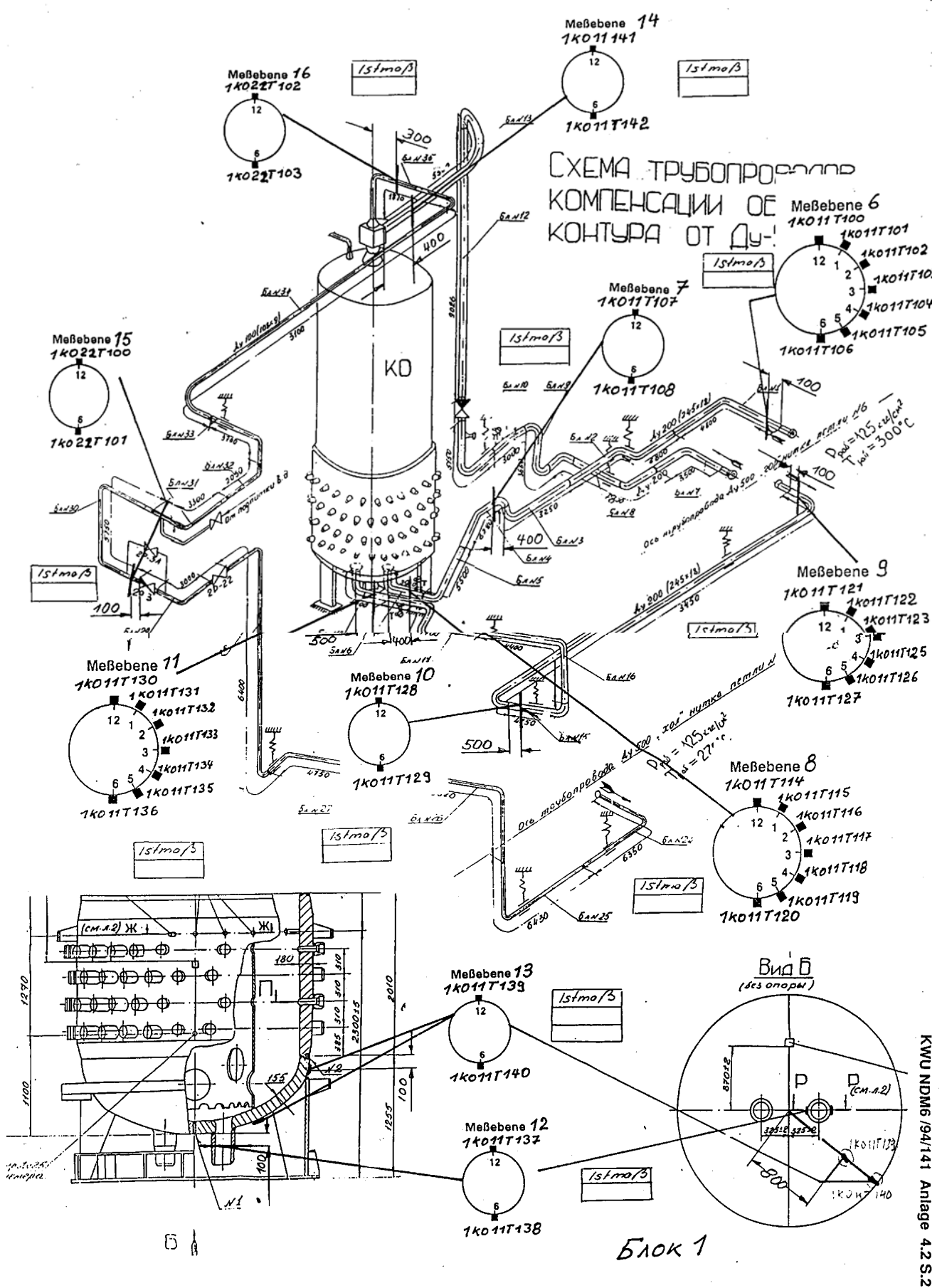
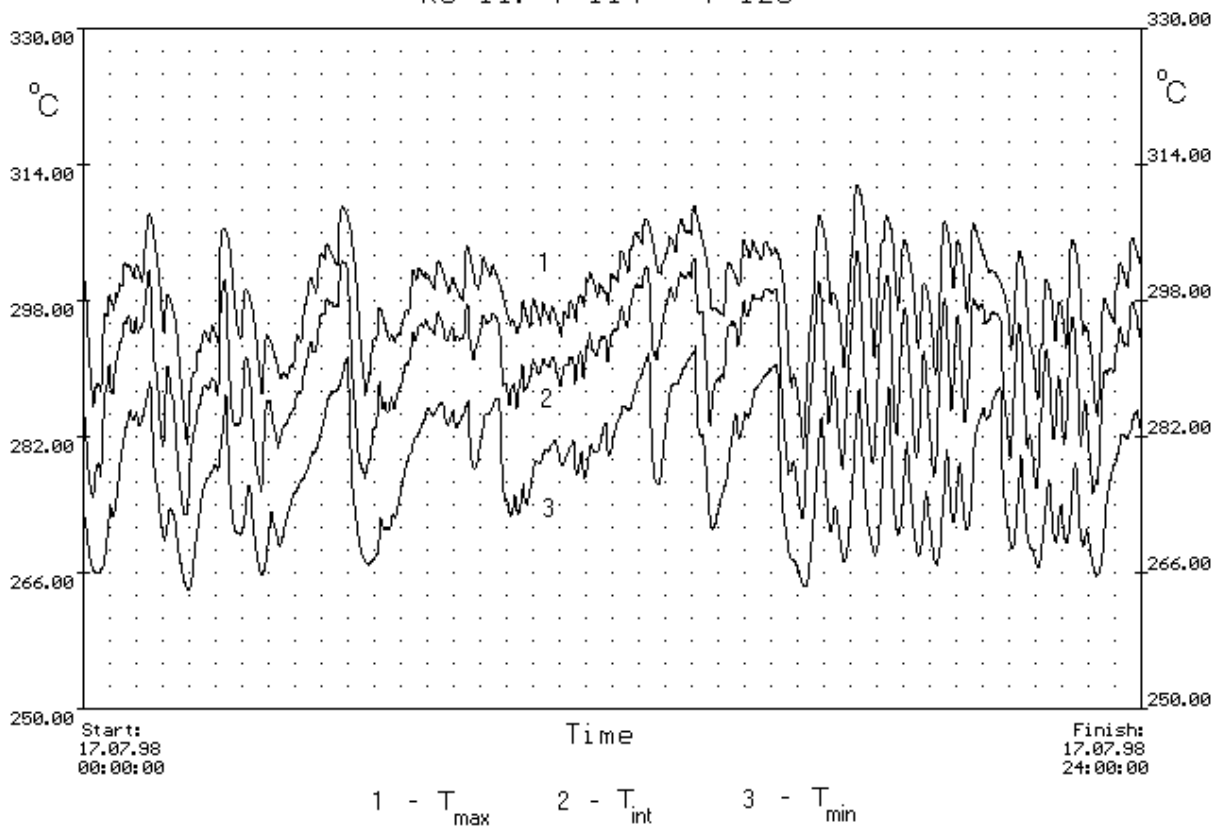


Рис. 4. Общий вид системы температурных измерений FAMOS, установленной на 1 блоке Кольской АЭС.

KO 11: T 114 - T 120

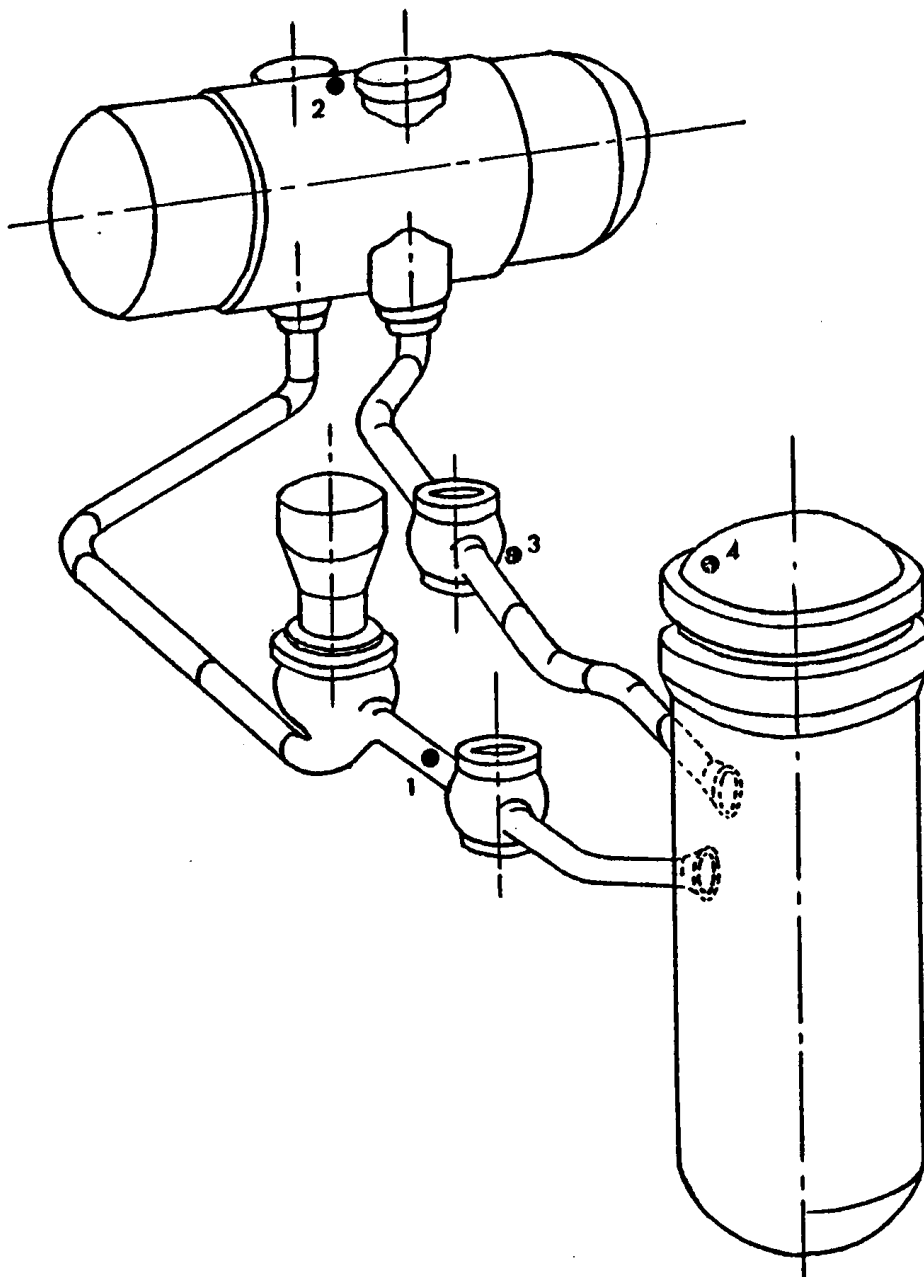


**Рис 5. Результаты измерения явления стратификации в сечении 8 дыхательного трубопровода (термопары №1КО11Т114-Т120) 1 блок КолаЭС.**

$T_{max}$  – максимальная измеренная температура;

$T_{min}$  - минимальная измеренная температура;

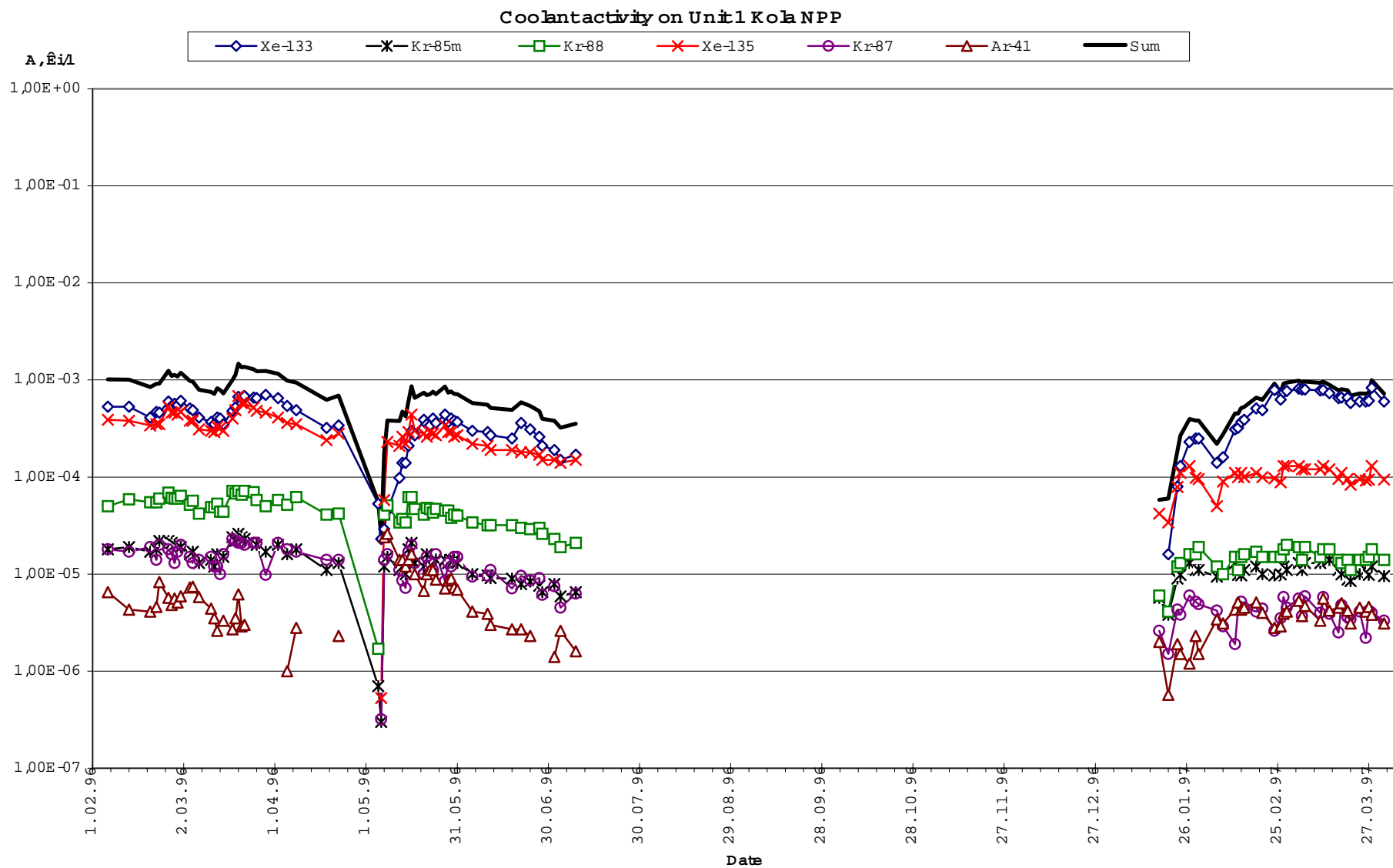
$T_{int}$  – текущее средне-интегральное значение температуры вдоль периметра сечения трубопровода.



**Рис. 6. Общий вид расположения датчиков системы акусто-эмиссионного контроля течей**

**ALUS**

- 1 – датчик на блоке ГЦТ между ГЦН и ГЗЗ на «холодной» нитке;**
- 2 - датчик на корпусе ПГ;**
- 3 - датчик на ГЗЗ на «горячей» нитки;**
- 4 - датчик на корпусе реактора.**



**Рис. 7. Пример диаграммы изменения активности теплоносителя 1 блока Кольской АЭС**

### 3.4 Оценка старения композитных сварных соединений

С учетом фактического срока эксплуатации блоков первого поколения проведены работы по оценке старения разнородных сварных швов ГЦТ.

Прежде всего, рассматриваются разнородные сварные соединения (аустенитных и перлитных материалов) между патрубками корпуса реактора и ГЦТ, и между компенсатором объема и дыхательным трубопроводом.

В рамках проекта R91-1.2 программы TACIS фирмой Framatome проводились испытания на старение разнородных сварных соединений, с целью подтвердить необходимую прочность. В дополнение к этим данным представлены результаты испытаний, которые выполнялись в Институте Ядерных исследований (Ржеж, Чехия) совместно с российскими специалистами. В течение этого исследования материал разнородных сварных соединений был искусственно состарен в течение сроков от 3000 до 10000 часов при температурах 325 °С и 425 °С.

В результате проведенных исследований:

Не отмечено никакого изменения прочностных характеристик и значений  $J_{0,2}$  в результате термического старения.

Результаты испытаний (высокие значения прочности) зоны термовлияния указывают на приемлемую прочность сварного соединения после длительного старения.

Отмечено незначительное увеличение содержания ферритной фазы во 2-ом и 3-ем слое сварного шва в макетном образце.

На основе анализа полученных результатов были сделаны рекомендации:

- На основе отмеченного изменения свойств ударной вязкости только в одном (втором) слое сварного шва макетного образца в настоящее время рекомендуются дополнительные исследования механизма деградации при расширенном интервале состояний термического старения.

- Содержание феррита во 2-ом и 3-ем слое подварки в макетном образце исследовалось также на тест-образце из АЭС «Greifswald». Результаты исследований показывают содержание феррита на уровне от 0 до 1%. Металлографические исследования на трубке КР первого блока АЭС «Козлодуй» подтверждают также низкое содержание феррита во втором и третьем слоях (0 - 3 %). Поэтому рекомендуются металлографические исследования на трубках КР (по крайней мере на одной трубке) каждого блока Кольской и Нововоронежской АЭС.

### 3.5 Усовершенствование и оптимизация системы эксплуатационного контроля

Определены пути дальнейшей доработки и разработано техническое задание на усовершенствование системы эксплуатационного контроля (ЭК) АЭС с ВВЭР-440 первого поколения.

В соответствии с действующими «Инструкциями по эксплуатационному контролю за состоянием основного металла и сварных соединений оборудования и трубопроводов I и II контуров АЭС с ВВЭР-440» АИЭ-2-95 определены требования по проведению ЭК и проведен анализ фактического состояния металла на основе выполнения данных требований. Описаны объем, методики и периодичность

неразрушающего контроля, включая описание приборных средств и их возможностей.

Проведен анализ существующей системы ЭК с учетом результатов вычисления максимально нагруженных зон с точки зрения концепции ТПР, представленных в «Сводных справочниках по применению ТПР» (см. рис. 9).

Проведенный анализ практики контроля сварных соединений трубопроводов первого контура АЭС с ВВЭР-440/230 на стадии изготовления, монтажа, пред-эксплуатационного контроля и контроля в эксплуатации позволил сделать вывод о пригодности сварных соединений для реализации концепции ТПР. Опыт многолетнего контроля в эксплуатации на рассматриваемых энергоблоках, включая ультразвуковой контроль автоматическими системами SIEMENS, подтверждает отсутствие дефектов в сварных соединениях трубопроводов первого контура.

В рамках разработки технического задания по усовершенствованию системы эксплуатационного контроля с учетом опыта эксплуатации АЭС даны рекомендации провести работы в следующих направлениях:

- На 3, 4 блоках Нововоронежской АЭС:
  - включить зоны дыхательных трубопроводов, указанные как критические в «Справочнике по применению концепции ТПР. Нововоронежская АЭС блоки 3, 4» в программу эксплуатационного контроля методами КК и УЗК в ближайший ППР;
  - увеличить частоту проведения контроля методами КК и УЗК с 1 раза в 6 лет до 2 раз в ближайшие 4 года;
  - предложить к внедрению на НВАЭС автоматизированную систему ультразвукового контроля кольцевых и продольных сварных соединений ГЦТ, аналогичную системе Siemens, применяемой на 1, 2 блоках Кольской АЭС.
- На 1, 2 блоках Кольской АЭС
  - включить зоны дыхательных трубопроводов, указанные как критические в «Справочнике по применению концепции ТПР. Кольская АЭС блоки 1, 2» в программу эксплуатационного контроля методами КК и УЗК в ближайший ППР;
  - увеличить частоту проведения контроля методами КК и УЗК с одного раза в 6 лет до 2 раз в ближайшие 4 года.



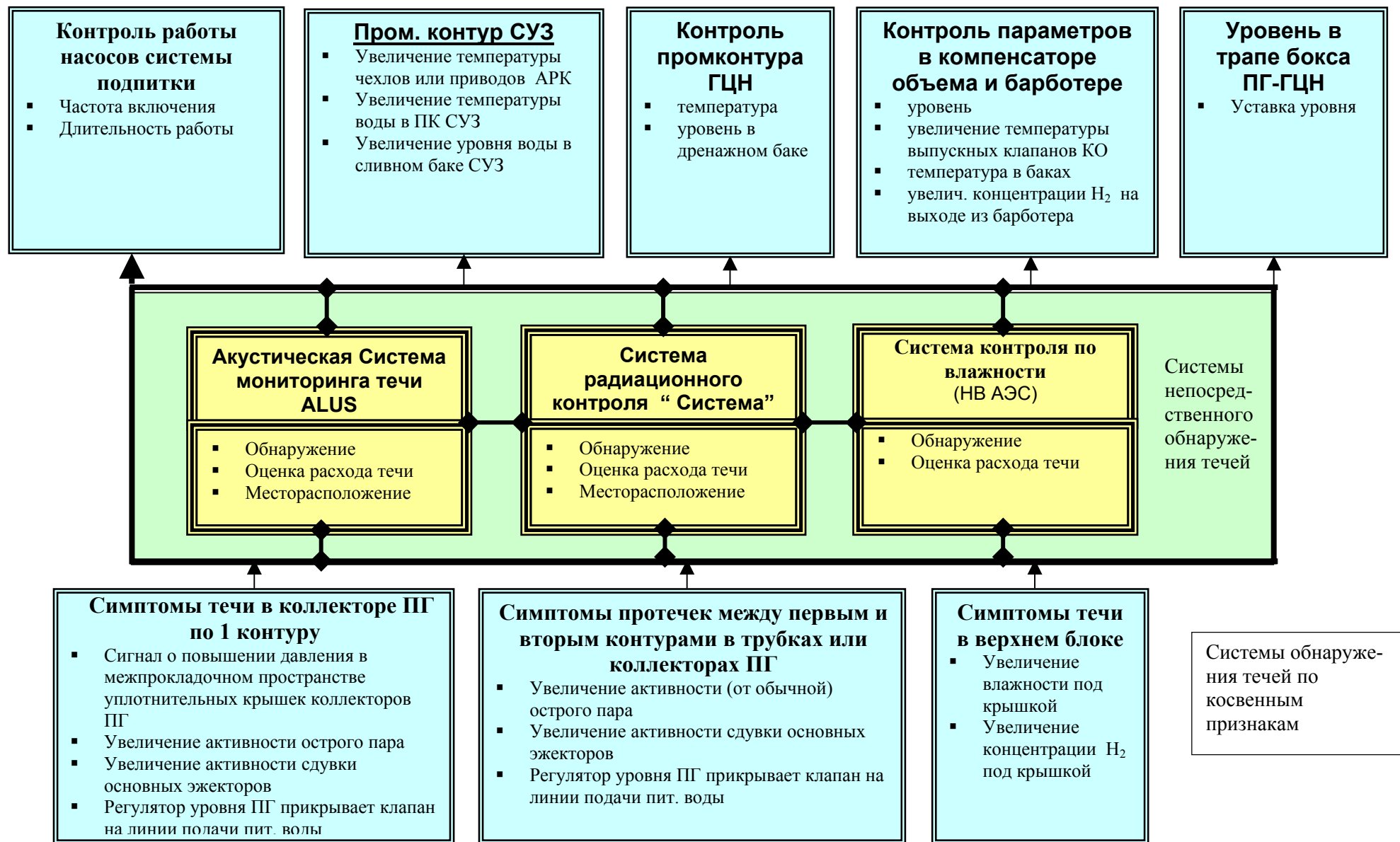


Рис. 8 Общая схема систем обнаружения течей

### 3.6 Результаты ТПР анализа для блоков 1, 2 КоАЭС и блоков 3, 4 НВАЭС

В рамках проекта разработаны «Сводные справочники концепции ТПР» (LBB Handbooks), в которых представлено резюме проведенного расчетного анализа ТПР для главного циркуляционного и дыхательного трубопроводов 1, 2 блоков Кольской АЭС и 3, 4 блоков НВ АЭС с ВВЭР-440/В230.

При проведении расчетов применимости ТПР в данных Справочниках использовались следующие основные предпосылки:

- Деграляция металла за счет эрозионно-коррозионного износа незначительна;
- Потенциальная вероятность возникновения гидро-удара пренебрежимо мала;
- Возможность деградации свойств вследствие тепловой, вибрационной и механически наведенной усталости чрезвычайно низка;
- сейсмичность площадки принималась равной 7 баллам по шкале MSK-64 для 3,4 блоков НВАЭС и 5 баллов для 1, 2 блоков Кольской АЭС.

Одновременно с доказательством незначительного роста усталостной трещины в течение расчетного срока эксплуатации, правомочность этих предпосылок была оценена для идентичного блока АЭС «Богуница» (оценка дефектов проводилась согласно ASME IX).

В ходе разработки этих документов были получены следующие результаты:

Требования ТПР согласно использованной Американской процедуре оценки применимости концепции ТПР выполняются для всего ГЦТ блоков 1, 2 Кольской АЭС и блоков 3, 4 Нововоронежской при условии установки дополнительных амортизаторов, чтобы уменьшить сейсмические напряжения, а также при условии, что установленные системы обнаружения течи, способны к обнаружению заданных норм течи, равных - 3.8 л/мин.

Некоторые из существующих систем обнаружения течи удовлетворяют этому требованию (например, система измерения активности воздуха в боксах, система контроля влажности), - другие должны быть модернизированы (например, система акустического контроля течи (ALUS) для отдельных участков ГЦТ).

Оптимизированное количество, тип и места расположения сейсмических амортизаторов предложены для каждого блока отдельно (на основе многократного расчета напряжений первого контура с учетом поэтажных спектров). Пример результатов расчета применимости концепции ТПР с указанием критических зон и мест расположения дополнительных опор для 3 блока НВАЭС показан на Рис. 9.

Проведена переоценка результатов расчета по немецким подходам - FSC/PLL и PLL.

Были сделаны следующие выводы:

- Требования ТПР выполняются для обоих подходов (FSC/PLL и LL), т.е. половина критической длины трещины больше длины трещины при нормативной течи.
- Соответствующие коэффициенты запаса выше для ГЦТ, в сравнении с дыхательным трубопроводом как для КоАЭС 1, 2 так и для НВ АЭС 3, 4 (независимо от использованного подхода).

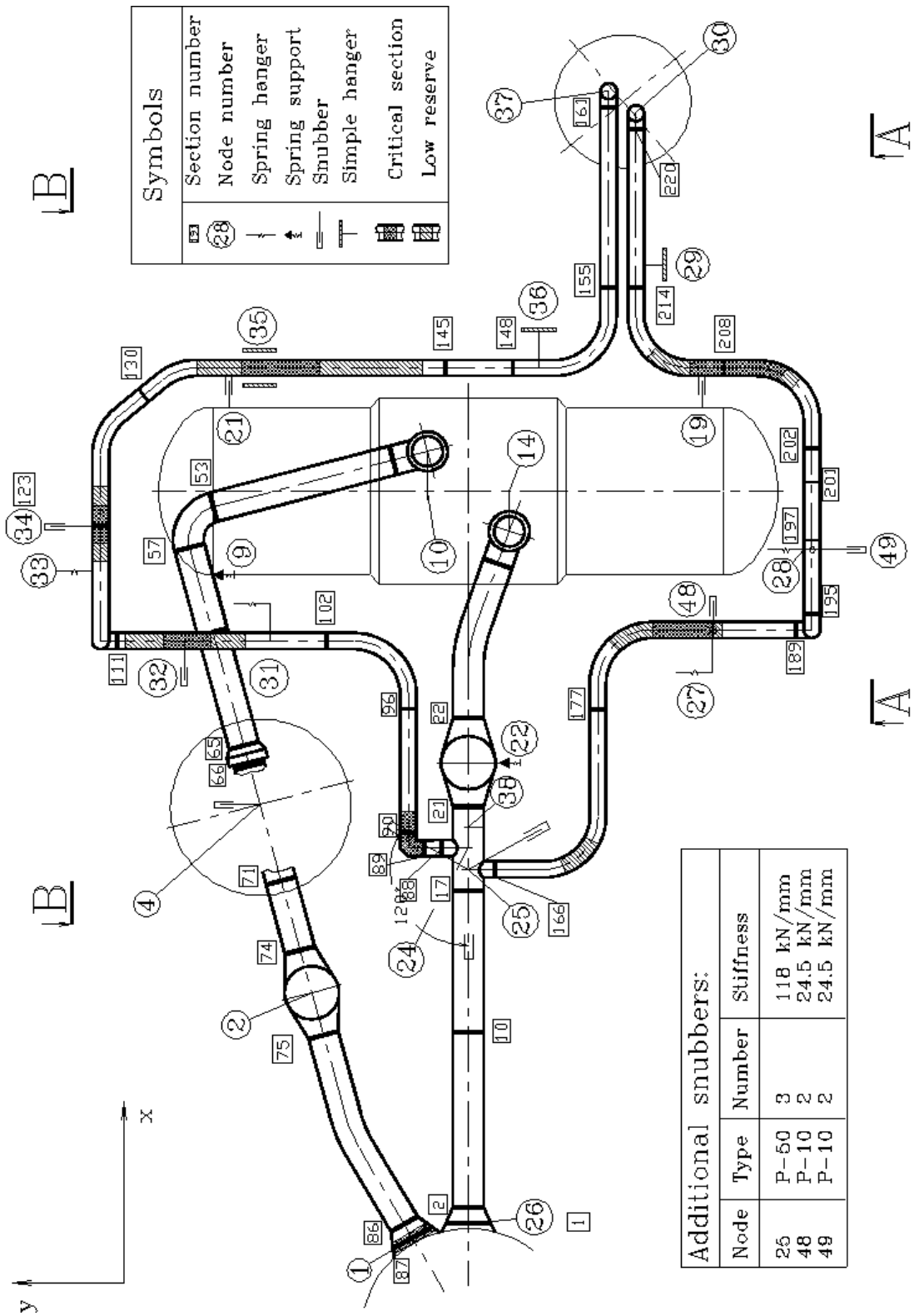
- Для ГЦТ американский подход дает более высокие коэффициенты запаса, чем немецкий подход, а для дыхательного трубопровода, это соотношение является противоположным.

Проведен расчет количества, типа и выбор расположение сейсмических амортизаторов и определение стоимости установочных работ.

В результате работы подготовлено техническое задание с указанием требуемых технических характеристик дополнительных амортизаторов. Пример дополнительных амортизаторов, необходимых для установки на 3 блоке НВАЭС, представлен в таблице 1 ниже.

Представлен приблизительный анализ затрат по закупке, доставке и монтажу этих амортизаторов, который проведен на основе аналогичных работ по установке опор типа GERB (Westinghouse) и опор типа LISEGA (установленных на АЭС “Моховица”). Общая сумма работ приблизительно оценена в размере 730 000 Euro.

# Novovoronezh Unit 3 Loop 1



**Рис. 9. Пример результатов ТПР анализа:  
Количество, тип и расположение сейсмических опор для 3 блока НВАЭС**

**Таблица 1. Перечень дополнительных амортизаторов, необходимых для установки на 3 блоке НВАЭС**

Тип	Количество	Узел компьютерной модели (точка расположения опоры)
P-50	3	25 (присоединение правой нитки дыхательного тр-да к ГЦТ)
P-10	2	48 (правая нитка дыхательного тр-да, в начале восходящего участка трубы)
P-10	2	49(правая нитка дыхательного тр-да, верхняя часть после восходящего участка трубы)
P-50	3	4 (ГЦН)
P –170	2	21 (ПГ)
P –170	2	19 (ПГ)
P-10	2	34 (левая нитка дыхательного тр-да, верхняя часть после восходящего участка трубы)
P-10	2	32 (левая нитка дыхательного тр-да, в начале восходящего участка трубы)

**Таблица 2. Спецификация амортизаторов**

Тип	Жесткость [kN/m]
P-50	$1.18 \times 10^5$
P-10	$2.45 \times 10^4$
P-170	$2,93 \times 10^5$

### 3.7 Результаты проекта ТАСИС 2.16/93

Требования ТПР согласно используемой Американской процедуре выполняются для всего ГЦТ и дыхательного трубопровода Кольской АЭС 1, 2 и НВАЭС 3, 4 при условии, что для уменьшения сейсмических напряжений установлены дополнительные опоры (гидравлические амортизаторы), а установленные системы обнаружения течей способны обнаружить течь определенного расхода  $1 \text{ gpm} = 3.8 \text{ л/мин}$ .

Некоторые из фактических систем контроля течей (СКТ) удовлетворяют этому требованию (например, система измерения активности воздуха или контроля по влажности, если она есть), другие - должны быть модернизированы (акустическая система контроля течи (АСКТ) для ГЦТ).

Оптимизированное количество, тип и местоположение опор предложены для каждой АЭС отдельно (на основе многократного анализа напряжений первого контура).

#### **4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОДОЛЖЕНИЯ РАБОТ**

В рамках проекта ТАСИС R1.2/91 и его продолжения ТАСИС R2.16/93 представлен расчетно-экспериментальный анализ применимости концепции ТПР на блоках 3, 4 Нововоронежской АЭС и на 1, 2 блоках Кольской АЭС. Показано, что концепция ТПР может быть применена для этих блоков как в режиме НУЭ, так и при дополнительных сейсмических нагрузках (режим НУЭ+МРЗ). Были определены условия для применимости концепции ТПР при одновременном достижении требуемого вероятностного уровня эксплуатационной надежности ГЦТ.

В настоящее время ситуация с внедрением концепции ТПР на АЭС с ВВЭР-440 (В-179/230) изменилась в следующих позициях:

- В рамках исследований, проведенных Институтом Физики Земли РАН РФ, получен более реалистичный уровень сейсмичности промплощадки размещения 3 и 4 блоков Нововоронежской АЭС. Показано, что расчет напряжений в режиме МРЗ должен проводится для уровня сейсмичности менее 5 баллов по шкале MSK-64.
- Выпущен новый нормативный документ «Руководство по применению концепции безопасности «течь перед разрушением» к трубопроводам АЭУ Р-ТПР-01-99» РД 95 10547-99, в котором существенно расширены требования при внедрении концепции ТПР по сравнению с документом «Технические требования к применению концепции «течь перед разрушением».
- В результате выполняемых работ по «Углубленному обеспечению безопасности» расширен перечень проектных режимов. Эти режимы (переходные процессы) также должны быть проанализированы.

С учетом этих данных и согласно требованиям новых нормативных документов результаты ТПР анализа, полученные в рамках проектов ТАСИС, должны быть частично пересмотрены и доработаны. Для практической реализации ТПР при уточненном уровне сейсмических нагрузок был выбран следующий путь (см. направления 2 и 3 в п. 3.1. выше) уточнить величины допустимых напряжений в ГЦТ и дыхательных трубопроводах во всех новых режимах при одновременном повышении качества неразрушающего дефектоскопического контроля. Эта работа выполняется ВНИИАЭС совместно с прочими российскими организациями. В этой связи необходимо отметить, что в ППР-99-2001 г.г. специалистами ВНИИАЭС, ОКБ ГП и НВАЭС проведена работа по натурному контролю механических свойств, структуры и целостности металла 3 блока НВАЭС после 200 тыс. часов эксплуатации и в рамках работ по продлению срока службы. В программе работ особое внимание было уделено зонам ГЦТ и дыхательного трубопровода, определенным в рамках анализа применимости концепции ТПР в проекте ТАСИС R 2.16/93 как критические. Специально контролировались такие места, как зона соединения дыхательного трубопровода с ГЦТ, разнородные сварные соединения «горячего» и «холодного» патрубков корпуса реактора с ГЦТ. Разработана методика и опробована на АЭС автоматизированная система УЗК «Авгур 4.2», которая существенно повышает точность контроля и предоставляет геометрические характеристики обнаруженных несплошностей.

Параллельно с этим ведутся работы по расчету вероятности гильотинного разрушения и вероятности возникновения течи для основного металла и сварных швов

ГЦТ и дыхательных трубопроводов. Результаты данной работы будут использованы в ВАБ.