



**ЕВРОПЕЙСКАЯ КОМИССИЯ  
ГЛАВНЫЙ ДИРЕКТОРАТ JRC  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ЦЕНТР**

Институт по Технической и Научной Поддержке  
Энергетики для ТАСИС и PHARE



## **ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ТАСИС**



**ПРОЕКТ ТАСИС R8.01/97**

**ПЕРЕВОД, РЕДАКТИРОВАНИЕ  
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДОКУМЕНТОВ  
(Распространение Результатов)**

**ПРОЕКТ ТАСИС R2.31/94  
ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ КОНЦЕПЦИИ ТЕЧЬ  
ПЕРЕД РАЗРУШЕНИЕМ” (РЕАКТОРЫ РБМК)  
ИСПОЛНИТЕЛЬНОЕ РЕЗЮМЕ**

**TSSTP/DISS97/**

**Петтен, 2002/02/18**

|                          |                             |                              |
|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| <b><u>Авторы:</u></b>    | Р. АЛСТРАНД<br>В.А. КИСЕЛЕВ | (ЕС/JRC-IE)<br><b>НИКИЭТ</b> |
| <b><u>Проверено:</u></b> | С. РИГ                      | (ЕС/JRC-IE)                  |
| <b><u>Одобрено:</u></b>  | М. БИТ                      | (ЕС/JRC-IE)                  |

## РЕФЕРАТ

Этот отчет для распространения подводит итог проекта Тасис NUCRUS 94231 с названием “Оценка Применимости Концепции Течь Перед Разрушением (Реакторы РБМК)”, который был полностью выполнен согласно Техническому Заданию на проект. Отчет составлен на основе заключительного отчета, подготовленного Джусси Солиным и Хейки Кейнаненом (VTT Manufacturing Technology), Еспоо, Финляндия, Июнь 1998. Отчет суммирует основные цели и ключевые результаты данного проекта.

Полный детерминированный анализ концепции безопасности течь перед разрушением (ТПР) выполнен для трубопроводов большого диаметра (Ду800) главного охлаждающего контура МПЦ выбранного 3-го энергоблока Смоленской АЭС. Концепция ТПР считается приемлемой для изученного случая. Все конструкционные материалы, использованные для изготовления трубопроводов большого диаметра контура МПЦ, являются вязкими в эксплуатационных температурных диапазонах. Проведенное конструкционное валидационное испытание было успешным в демонстрации условий ТПР, а полномасштабный компонент показал вязкое поведение при комнатной температуре. Были показаны достаточные коэффициенты безопасности относительно роста усталостной трещины, инициирования трещины и катастрофического разрушения.

Обзор проекта с выводами и рекомендациями дается в этом отчете.

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Этот отчет подготовлен для демонстрации результатов проекта Тасис NUCRUS 94231 с названием “Оценка Применимости Концепции Течь Перед Разрушением (Реакторы РБМК)”. Проект полностью выполнен, как определено в Техническом Задании (ТЗ). Все поставки, определенные в ТЗ, были подготовлены и цели проекта успешно достигнуты.

Контрактором проекта являлся VTT Manufacturing Technology. Бенефициаром или Локальным Оператором был Росэнергоатом, Локальным Субконтрактором – Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники (НИКИЭТ). АЕА Technology plc и Siemens KWU образовывали проектную команду как Субконтракторы.

Российские научные организации, участвующие в проекте под руководством НИКИЭТ, были ЦНИИКМ “Прометей”, МоАЭП, НПО ЦКТИ им. Ползунова, НПО ЦНИИТМАШ, РИЦ “Курчатовский Институт”, ВНИИАЭС и ВНИПИЭТ. Западные участники - АЕА Technology plc, Siemens KWU и VTT Manufacturing Technology.

Проект разделялся на восемь Заданий. Лидерами Заданий были Джусси Солин / VTT Manufacturing Technology (1,8), Тимо Саарио / VTT Manufacturing Technology (2), Питер Хёрст / АЕА Technology plc (3), Хейки Кейнанен / VTT Manufacturing Technology (4), Лауренс Гарднер / АЕА Technology plc (5), Питер Конрой / АЕА Technology plc (6) и Ульрих Кюнзе / Siemens KWU (7).

Совместная отправная встреча по проекту имела место в VTT Manufacturing Technology в Еспоо, Финляндия, 18 июня 1996, а заключительная встреча Руководящего Комитета - в НИКИЭТ, Москва, 4 июня 1998.

Этот отчет скомпилирован на основе заключительного отчета, подготовленного Джусси Солиным и Хейки Кейнаненом / VTT Manufacturing Technology. Лидеры Заданий и эксперты, в частности Джон Шарплис /АЕА Technology plc/, Виталий Киселев и Сергей Европин /НИКИЭТ/ участвовали в редактировании заключительного отчета.

Управляющий Комитет и все Партнеры по Проекту: АЕА Technology plc, НИКИЭТ, Siemens KWU и VTT Manufacturing Technology одобрили заключительный отчет. Усилия каждой организации и экспертов существенно признаны и хорошее сотрудничество Росэнергоатома и Смоленской АЭС благодарно оценено.

Локальная команда (НИКИЭТ) имеет основополагающий опыт во всех аспектах конструкционной целостности и оценке ТПР для реакторов типа РБМК.

# СОДЕРЖАНИЕ

|   | Лист |
|---|------|
| РЕФЕРАТ .....   | 2    |
| ПРЕДИСЛОВИЕ.....  | 3    |
| 1 ВВЕДЕНИЕ.....   | 5    |
| 1.1 Предпосылка.....  | 5    |
| 1.2 Энергоблок Реактора РБМК.....   | 5    |
| 2 ЦЕЛИ И РЕАЛИЗАЦИЯ.....  | 6    |
| 2.1 Задание 1: Управление Проектом и Определение.....                                   | 6    |
| 2.2 Задание 2: Оценка Свойств Материалов .....  | 7    |
| 2.3 Задание 3: Оценка Эксплуатационного Мониторинга.....                                | 7    |
| 2.4 Задание 4: Технические Анализы .....  | 7    |
| 2.5 Задание 5: Экспериментальное Подтверждение ТПР<br>Крупномасштабным Испытанием ..... | 8    |
| 2.6 Задание 6: Эксплуатационный Контроль .....  | 8    |
| 2.7 Задание 7: Системы Обнаружения Течи и Мониторинга Условий .....                     | 9    |
| 2.8 Задание 8: Оценка Случая Безопасности ТПР .....                                     | 9    |
| 2.9 Поставка Проекта.....   | 9    |
| 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЕКТА (ЗАДАНИЕ 1) .....   | 11   |
| 4 ОЦЕНКА СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ (ЗАДАНИЕ 2).....  | 12   |
| 5 ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ (ЗАДАНИЕ 3).....                                    | 14   |
| 6 ТЕХНИЧЕСКИЕ АНАЛИЗЫ (ЗАДАНИЕ 4).....  | 15   |
| 7 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ТПР<br>КРУПНОМАСШТАБНЫМ ИСПЫТАНИЕМ (ЗАДАНИЕ 5).....   | 18   |
| 8 ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ (ЗАДАНИЕ 6) .....   | 19   |
| 9 СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ТЕЧИ И МОНИТОРИНГА УСЛОВИЙ<br>(ЗАДАНИЕ 7).....                    | 20   |
| 10 ОЦЕНКА СЛУЧАЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕЧЬ ПЕРЕД РАЗРУШЕНИЕМ<br>(ЗАДАНИЕ 8).....                | 22   |
| 11 РЕЗЮМЕ .....   | 23   |
| 12 ОСНОВНЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.....   | 25   |
| ССЫЛКИ НА ИСТОЧНИКИ .....   | 26   |

# **1 ВВЕДЕНИЕ**

## **1.1 Предпосылка**

За последние годы концепция течь перед разрушением (ТПР) приобрела значительный широко распространенный импульс в установлении случаев безопасности для компонентов, находящихся под давлением, особенно в ядерной промышленности для трубопроводов всех типов реакторов. Так, концепция нацеливается на демонстрацию того, что утечка соответствующего газа или жидкости через трещину в стенке компонента может быть обнаружена до того, как трещина достигнет условий неустойчивости, при которых происходит быстрое распространение трещины. Аргументы ТПР могут быть использованы как часть случая для устранения ограничителей биения трубы, быть примененными в зонах затрудненных для контроля из-за неудобных или опасных условий и/или быть задействованы как чисто защитные соображения.

Концепция ТПР является очень важной при рассмотрении безопасности АЭС. В частности, она имеет большое значение для систем трубопроводов с высокой запасенной энергией, гарантируя, что условие ТПР преобладает и, таким образом, может быть исключено катастрофическое разрушение. С этой целью в различных странах, эксплуатирующих АЭС, были разработаны разные подходы ТПР. Концепция ТПР применяется, например, в Болгарии, Чехии, Словакии и для ряда Российских реакторов ВВЭР.

Первый приоритет этого проекта состоял в изучении главных охлаждающих трубопроводов большого диаметра (Ду800) контура МПЦ РБМК. Ситуация с другими важными компонентами по отношению к ТПР, например, такими, как барабан-сепаратор и трубопроводы меньшего диаметра, будет изучаться в последующих проектах.

## **1.2 Энергоблок Реактора РБМК**

Главный контур РБМК является довольно сложной конструкцией по отношению к компоновке так и использованным материалам. Главный охлаждающий контур МПЦ состоит из двух симметрично расположенных отдельных контуров. Частичное образование пара происходит в более чем 1600 топливных каналах, которые подпитываются от напорных коллекторов. Сухой пар сепарируется, а конденсат с турбины закачивается обратно в барабан-сепараторы. Из барабан-сепараторов теплоноситель стекает через многочисленные опускные трубопроводы в всасывающие коллекторы. Главные циркуляционные насосы (ГЦН) и трубопроводы

большого диаметра Ду800 поддерживают поток теплоносителя между всасывающим и напорным коллекторами Ду900.

Некоторые главные компоненты и трубопроводы располагаются за пределами конфаймента. Проектный базис энергоблоков первого поколения не включает разрыв трубопроводов Ду800, а системы безопасности не спроектированы для компенсации таких разрывов. Разрушения в трубопроводах Ду800 могли бы привести к разрушению конструкций здания на энергоблоках первого поколения. Проект последующих энергоблоков РБМК предусматривает разрыв трубопроводов Ду800 относительно возможностей систем безопасности САОР и СЛА. Однако не имеется никаких ограничителей биения трубопровода, защитные экраны от бьющих струй и компоненты разделяются только на ограниченной протяженности. Ограниченное пространство между трубами дает некоторую причину для беспокойства. Поэтому, успешное применение концепции ТПР рассматривается как высокий приоритет, поскольку она могла бы гарантировать малый риск разрушений в трубопроводах большого диаметра с высокой запасенной энергией и обеспечить оператора ранним предупреждением до того, как могло бы развиться крупное разрушение.

## **2 ЦЕЛИ И РЕАЛИЗАЦИЯ**

Основная цель проекта состояла в выполнении полной детерминистской оценки безопасности течи перед разрушением для трубопроводов большого диаметра Ду800 главного охлаждающего контура МПЦ выбранного референтного 3-го энергоблока Смоленской АЭС.

Проект был реализован через восемь Заданий, которые вкратце описаны в этой главе. Основные результаты в рамках каждого Задания суммированы в последующих главах.

### **2.1 Задание 1: Управление Проектом и Определение**

Основная цель состояла в подготовке основных проектных данных, словаря терминов и выборе подходящего референтного блока и конструкционных особенностей, которые должны подвергаться оценке ТПР. Задание включило следующие задачи:

*Задача 1.1 Разработка рабочего плана по проекту, календарного плана и проекта, связанного с программой качества;*

*Задача 1.2 Установление методологии и условий;*

*Задача 1.3 Обеспечение проектной базой данных;*

*Задача 1.4 Выбор конструкционных особенностей;*

*Задача 1.5 Словарь терминов;*

*Задача 1.6 Управление проектом, контроль, обзоры и отчетность.*

## **2.2 Задание 2: Оценка Свойств Материалов**

Главная цель этого Задания состояла в обеспечении дополнительного описания материалов, использованных в трубопроводах ГЦН референтного 3-го энергоблока Смоленской АЭС, в частности, изготовления, методов сварки и термообработки. Были скомпилированы необходимые для структурных анализов свойства материалов и сварных соединений. Для определения характеристик сопротивления росту трещины были проведены испытания материалов. Рассматривались следующие задачи:

*Задача 2.1 Описание материалов и изготовление;*

*Задача 2.2 Составление базы данных по свойствам материалов;*

*Задача 2.3 Испытание материалов;*

*Задача 2.4 Анализ результатов и отчет по Заданию 2.*

## **2.3 Задание 3: Оценка Эксплуатационного Мониторинга**

Основная цель Задания 3 состояла в анализе предшествующей истории эксплуатации и водно-химического режима для референтного 3-го энергоблока Смоленской АЭС, чтобы определить удовлетворяются ли необходимые условия для поведения течь перед разрушением. Сюда были включены следующие задачи:

*Задача 3.1 Оценка истории эксплуатации и окружающих условий референтного блока;*

*Задача 3.2 Идентификация известных проблем течей и дефектов;*

*Задача 3.3 Анализ результатов и отчет по Заданию 3.*

## **2.4 Задание 4: Технические Анализы**

После того, как кандидатный с позиций ТПР трубопровод был рассмотрен с точки зрения деградиционных механизмов и найден приемлемым в Задании 3, он был подвержен анализу по механике разрушения в Задании 4. Цель этой оценки состояла в демонстрации того, что трещина является стабильной и что результирующая течь будет обнаружена в случае, если сквозная трещина будет развиваться. Специфическими целями Задания 4 были:

- выявить информацию, которая уже существует о структурных анализах связанных с ТПР для РБМК применительно к 3-му энергоблоку Смоленской АЭС;
- верифицировать достоверность выполненных структурных анализов;

- выполнить дальнейшие технические анализы для оценки безопасности ТПР для РБМК применительно к 3-му энергоблоку Смоленской АЭС.

Задание 4 включало следующие задачи:

*Задача 4.1 Анализ существующих расчетов;*

*Задача 4.2 Расчет напряженного состояния;*

*Задача 4.3 Анализ по механике разрушения и расчет площади раскрытия трещин;*

*Задача 4.4 Расчеты расходов теплоносителя;*

*Задача 4.5 Рассмотрение неопределенностей и других факторов;*

*Задача 4.6 Анализ результатов и отчет по Заданию 4.*

## **2.5 Задание 5: Экспериментальное Подтверждение ТПР Крупномасштабным Испытанием**

Целью Задания 5 было получение экспериментальной поддержки для оценки применимости ТПР. Первая цель состояла в сборе и анализе существующей информации о конструкционных испытаниях, выполненных в поддержку реакторов РБМК относительно их вклада в подтверждение правильности анализа ТПР для референтного блока. В дальнейшем было выполнено конструкционное испытание с сопутствующим расчетом. Таким образом, были включены следующие задачи:

*Задача 5.1 Обзор предыдущих крупномасштабных испытаний;*

*Задача 5.2 Спецификация требований дополнительных испытаний;*

*Задача 5.3 Конструкционное испытание;*

*Задача 5.4 Анализ результатов и отчет по Заданию 5.*

## **2.6 Задание 6: Эксплуатационный Контроль**

Цель эксплуатационного контроля состоит в демонстрации того, что дефекты не превышают критического размера дефекта между периодическими инспекциями. В контексте ТПР необходимо было продемонстрировать, что в сварных швах трубопроводов большого диаметра КМПЦ не существует протяженных трещин.

Первая цель Задания 6 состояла в оценке зон трубопроводов большого диаметра контура МПЦ, которые не инспектируются из-за ограниченного доступа и других ограничений, и идентификации областей, которые не контролируются оптимальным образом. Другая цель состояла в оценке возможности обнаружения дефектов существующими методами эксплуатационного контроля, а также в экспертизе и демонстрации определения размеров дефектов с помощью отобранных



модернизированных систем контроля. Наконец, предметом цели были пригодные рекомендации относительно внедрения модернизированных систем контроля. Задание состояло из следующих задач:

*Задача 6.1 Производство инспекционных карт;*

*Задача 6.2 Демонстрация модернизированных процедур контроля;*

*Задача 6.3 Анализ результатов и отчет по Заданию 6 с рекомендациями для внедрения модернизированных систем контроля.*

## **2.7 Задание 7: Системы Обнаружения Течи и Мониторинга Условий**

Целью Задания 7 был анализ реактора РБМК в отношении обнаружения утечки и контроля нагрузки. Этот анализ должен быть сравнен с современным мировым статусом существующих систем контроля утечки и мониторинга условий, чтобы позволить оценить наиболее подходящие системы, которые должны использоваться при поддержке концепции ТПР. Задание включило следующие задачи:

*Задача 7.1 Обзор адекватности существующих систем для применения концепции безопасности ТПР;*

*Задача 7.2 Демонстрации модернизированных систем обнаружения течи;*

*Задача 7.3 Демонстрации модернизированных систем мониторинга условий;*

*Задача 7.4 Обзор результатов и отчет по Заданию с рекомендациями по внедрению модернизированных систем обнаружения течи и мониторинга условий.*

## **2.8 Задание 8: Оценка Случая Безопасности ТПР**

Цель этого Задания состояла в том, чтобы совместно подготовить и оформить отчет о полученных результатах для представления выводов, ограничений и рекомендаций по случаю безопасности ТПР. Задачами являлись:

*Задача 8.1 Подготовка заключительного отчета;*

*Задача 8.2 Утверждение выводов, ограничений и рекомендаций;*

*Задача 8.3 Усовершенствование словаря.*

## **2.9 Поставка Проекта**

Проект был завершен, как определено в Техническом Задании (ТЗ) на проект. Все из 18 определенных поставок были подготовлены, как указано в Таблице 1. В общей сложности были подготовлены 2240 страницы в 62 отчетах. Часть отчетов переведена на русский язык.

Цели проекта были успешно достигнуты. Полная детерминированная оценка безопасности течь перед разрушением была проведена для трубопроводов большого диаметра (Ду800) главного контура охлаждения выбранного референтного 3-го энергоблока Смоленской АЭС.

**Таблица 1 Список обеспеченных поставок и ссылок на перечень отчетов**

| <b>Пос-<br/>тавка</b> | <b>Задача</b> | <b>Описание</b>   | <b>Ссылки</b>               |
|-----------------------|---------------|---|-----------------------------|
| 1                     | 1.1           | План проекта, календарный план и программа качества   | 1,5,6                       |
| 2                     | 1.2           | Утверждения методологии и условий для оценки применимости концепции течь перед разрушением                                    | 1,7,8                       |
| 3                     | 1.3-4         | Отчет по описанию референтного блока и выбранных особенностей   | 2,9,10                      |
| 4                     | 1.5           | Словарь терминов  | 3,12,13                     |
| 5                     | 2.1           | Отчет по материалам и изготовлению  | 11,14                       |
| 6                     | 2.2           | База данных по свойствам материалов   | 15,17                       |
| 7                     | 3.3           | Отчет по истории эксплуатации, проблемам течей и дефектам   | 21,22,23                    |
| 8                     | 4.1           | Отчет по существующим анализам и спецификация для новых анализов  | 24,27                       |
| 9                     | 4.6           | Отчет по техническим анализам   | 25,28,29,30,<br>31,33,34,35 |
| 10                    | 2.4           | Отчет по испытанию материалов   | 16,18,19,20                 |
| 11                    | 5.1           | Обзорный отчет по валидации конструкционным испытанием  | 36,38                       |
| 12                    | 5.2           | Спецификация для конструкционного испытания   | 36,39,40,41                 |
| 13                    | 6.1           | Карты эксплуатационного контроля  | 43,45,46                    |
| 14                    | 6.3           | Отчет по системам эксплуатационного контроля и рекомендации для внедрения модернизированных систем эксплуатационного контроля | 44,47,48,49,<br>50          |
| 15                    | 7.4           | Отчет по адекватности систем обнаружения течи и мониторинга условий для ТПР и рекомендации для их улучшения                   | 51,52,53,54                 |
| 16                    | 5.4           | Отчет по конструкционному испытанию   | 37,42                       |
| 17                    | 8             | Заключительный отчет по случаю ТПР; усовершенствование Словаря  | 56,57                       |
| 18                    | 1.6           | Прогресс-отчеты в КЕС (как требуется по ТЗ)   | 4                           |

### 3 ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЕКТА (ЗАДАНИЕ 1)

Поставки 1, 2, 3, 4, 18 [1,2,3,4] и в общей сложности 21 отчет произошли из Задания 1. Общие выводы, относящиеся к работе по заданию 1, были следующие:

- Подробный рабочий план, пригодный для выполнения проекта, был включен в отчет по началу.
- 3-й энергоблок Смоленской АЭС был выбран в качестве референтного блока РБМК-1000. Этим отмечается, что анализ ТПР должен быть блокоспецифическим и результаты этого проекта не должны непосредственно распространяться для применения на другие энергоблоки.
- После тщательного рассмотрения, европейская процедура ТПР, базирующаяся на отчете Siemens KWU NT 13/96/E046, была выбрана в качестве методологии, которая должна быть использована для оценки применимости концепции ТПР для референтного блока РБМК, 3-го энергоблока Смоленской АЭС.
- Для сравнения была применена методология США NUREG 1061. На практике немецкая методология является более пригодной для оценки многочисленных потенциально критических мест в системах трубопроводов ГЦН РБМК.
- Расчет напряжений и анализы механики разрушения рекомендованы сконцентрировать как на кольцевых, так и на осевых биметаллических сварных швах, идентифицированных как потенциально-критические места для ТПР.
- Предварительный анализ указал на четыре критические зоны, представляющие потенциальные места для анализа поведения ТПР. Это - сварные швы приварки трубопроводов к ГЦН, гибам, клапанам и коллекторам.
- Местный кольцевой сварной шов 21-5 во всасывающей линии ГЦН 21 является потенциальным местом, чтобы иметь минимальный коэффициент запаса для ТПР. Тем не менее, окончательное суждение не могло быть сделано, пока не собраны свойства материалов в задании 2 и не выполнены дальнейшие расчеты в задании 4.
- Предварительная версия (исправленное издание 2) скомпилированного словаря являлась достаточной для целей текущего проекта и между участниками была достигнута договоренность о значении терминов. Русские языковые аналоги терминов включены в словарь. По мере развития проекта словарь должен был быть поддержан и конечная усовершенствованная версия (исправленное издание 3 или далее) должна была быть опубликована позже в проекте.

Отчет по Началу со всеми его приложениями [5,6] покрывает результаты Задачи 1.1. Отчет НИКИЭТ [7], ссылающийся на отчет Siemens [8] покрывает результаты Задачи 1.2.

Основные проектные данные по компонентам трубопроводов большого диаметра между ветками напорного/всасывающего коллекторов и главными циркуляционными насосами теплоносителя и общая информация по энергоблоку и его функционированию были представлены в отчете [9]. Обзор этого отчета был выполнен [10] и была получена дальнейшая информация по выбору наиболее соответствующих конструктивных особенностей [11].

Актуальная техническая терминология по реакторам РБМК и методологии ТПР, которая должна использоваться в текущих и будущих проектах, была определена [12,13].

## **4 ОЦЕНКА СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ (ЗАДАНИЕ 2)**

Поставки 5, 6, 10 [14,15,16] и в общей сложности 8 отчетов произошли из Задания 2. Общие выводы, относящиеся к работе по Заданию 2, были следующими:

- Все конструкционные материалы, использованные для изготовления трубопроводов большого диаметра ГЦН, являются вязкими в действующих температурных диапазонах.
- Производство, изготовление и монтаж выполнялись в соответствии с действующими нормативными документами. После производства основной металл и сварочные материалы подвергались разрушающему испытанию. После изготовления и монтажа были выполнены полный (100%) предэксплуатационный контроль и неразрушающие испытания.
- База данных доступных свойств материалов для трубопроводов ГЦН большого диаметра 3-го энергоблока Смоленской АЭС была скомпилирована [17]. Анализ этих данных показал, что механические свойства основного и сварочного металлов для 800 мм трубопроводов ГЦН 3-го энергоблока Смоленской АЭС выше, чем гарантированные свойства, определенные в спецификации.
- Почти никакого различия не обнаруживалось в результатах для продольного и перпендикулярного направлений прокатки, т. е. механические свойства являются вполне изотропными.
- Скомпилированные результаты указали, что сталь Creuzelso 330E демонстрирует вязкое поведение для всего действующего температурного диапазона и что

механические свойства удовлетворяют требованиям, определенными спецификацией, установленной в действующих Российских нормативных документах.

- Были определены механические свойства архивного материала с трубопроводов ГЦН 3-го энергоблока Смоленской АЭС. Базировавшееся на Задачах 2.1 и 2.2 дополнительное испытание материалов было необходимым, главным образом, для определения характеристик сопротивления разрушению J-R-кривых при температуре 285°C. Также температура нулевой пластичности (NDT-T) должна была быть проверена с использованием метода испытания падающим грузом [18].
- Результаты испытаний как НИКИЭТ [19], так и Siemens KWU [20], подтвердили предварительный вывод из Задач 2.1 и 2.2, что как сварочный, так и основной металл материала трубопровода, являются вязкими при температуре эксплуатации 285°C. К тому же температура нулевой пластичности (NDT-T) была ниже -50°C, указывая, что материал трубопровода ведет себя вязким образом при всех температурах от комнатной до температуры эксплуатации.
- Сравнение результатов НИКИЭТ и Siemens по сопротивлению разрушению J-R-кривым показало, что эти результаты согласуются. Основываясь на предшествующем опыте по определению J-R-кривых, результаты обеих организаций должны рассматриваться как представительные и попадающие в общую полосу разброса с нормальным отклонением от 5 до 20 % вокруг средней величины, не показывающие никаких систематических различий в результатах, полученных двумя организациями.

Изготовление и процедуры сварки, а также термообработки, использованные для производства трубопровода из биметаллического листа, произведенного заводом Creuzo-Loire, Франция описываются в отчете [11]. Там же приведены химический состав, а также гарантированные значения механических свойств основного металла Creuzelso 330E и сварочных материалов, включая ETNA-52HR, SF-2+SP601 и УОНИ 13/55. Дополнительно представлены скорости роста усталостной трещины для материалов Creuzelso 330E и ETNA-52HR при температурах 20°C и 350°C вместе со значениями вязкости разрушения тех же самых материалов для переходной области температур от хрупкой до вязкой (-180°C, чтобы +20°C).

Отчет [17], подготовленный НИКИЭТ, обеспечил компиляцию базы данных свойств материалов, относящейся к референтному энергоблоку. Была также приведена схема сварных соединений трубопроводов ГЦН 3-го энергоблока Смоленской АЭС для всасывающей, напорной и байпасной линий. Основные размеры прямых труб и гибов, оборудования и патрубков клапанов для заводских и монтажных соединений

трубопроводов Ду800 даны вместе с распределением типов сварных швов в каждой петле трубопроводов большого диаметра 3-го энергоблока Смоленской АЭС. Представлена соответствующая база данных по свойствам материалов.

Отчет также дает температурные зависимости механических свойств ( $R_m$ ,  $R_{p0.2}$ ,  $Z$  и  $A$ ) и результаты ударных испытаний (KCV, процент вязкого излома).

## **5 ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА (ЗАДАНИЕ 3)**

Поставка 7 [21] и в общей сложности 4 отчета произошли из Задания 3. Общие выводы, относящиеся к работе по заданию 3, были следующими:

- Никакой значимый механизм повреждения не был идентифицирован как имеющий деградирующее воздействие на трубопровод Ду800 референтного энергоблока.
- Считается, что растрескивание под действием окружающей среды должно быть очень маловероятным, что подтверждается действующим опытом реакторов РБМК. Тем не менее, обзор и/или экспериментальное исследование представляли бы интерес, чтобы подтвердить, возможно ли коррозионное растрескивание под напряжением или коррозионная усталость при неожиданных неблагоприятных комбинациях структуры материалов, водно-химического режима и условий нагружения. С этой рекомендацией, которая могла бы подтвердить, что механизмы растрескивания под действием окружающей среды не могут действовать, и продолжаемой программой обслуживания станции, делается вывод, что трубопроводы Ду800 контура МПЦ могут рассматриваться пригодными для анализа ТПР.

Как было согласовано [22], НИКИЭТ представил отчет [11] по оценке целостности и истории эксплуатации трубопроводов большого диаметра главного контура, связанных с референтным энергоблоком. Отчет АЕА Technology [23] обобщает и анализирует представленную в [11,17] информацию и разделяется на две части.

В первой части обобщается информация, относящаяся к материалам станции, спецификации водно-химического режима и истории эксплуатации. Проводится оценка восприимчивости трубопроводов к деградирующим механизмам, таким, как эрозия, коррозия, гидравлический удар и коррозия под напряжением.

Во второй части отчета эта информация анализируется. Растрескивание под действием окружающей среды идентифицируется как потенциальный механизм

деградации, заслуживающий внимания. Оценивается восприимчивость материалов контура, и коррозионное растрескивание под напряжением считается маловероятным.

## 6 ТЕХНИЧЕСКИЕ АНАЛИЗЫ (ЗАДАНИЕ 4)

Поставки 8, 9 [24,25] и в общей сложности 9 отчетов произошли из Задания 4. Общие выводы, относящиеся к работе по заданию 4, были следующими:

- Адекватность введенного текущего коэффициента запаса 2 на длину выявляемой сквозной трещины (против разрушения) и текущего (общего) коэффициента запаса 10 на расход теплоносителя и способность обнаружения течи была оценена из анализа неопределенностей. Остаточный коэффициент запаса 1.3 сохраняется для учета дополнительных неопределенностей в оценке максимальной несущей способности трубопровода с трещиной, и резервный коэффициент запаса 3.1 остается для учета дополнительных факторов и неопределенностей, влияющих на расход теплоносителя.
- Вода САОР впрыскивается через раздаточные групповые коллектора и поступает в каналы реактора. Из каналов вода течет к барабан-сепараторам, и вода САОР достигает трубопроводов Ду800 только в последней фазе охлаждения. Таким образом, условия аварийного охлаждения не проанализированы.
- Коллектора и чаши ГЦН прикрепляются к гражданским конструкциям в центре поперечных сечений. Граничные условия по перемещениям для трубопроводов ГЦН должны быть достаточно хорошо определены. Тем не менее, для того, чтобы определить реальное конструкционное поведение трубопроводов, остаются вопросы, относящиеся к точному поведению пружинных опор трубопровода и подвесов.
- Сварной шов с минимальным коэффициентом безопасности не обязательно совпадает с максимально нагруженным сварным швом.
- Минимальный коэффициент безопасности 3.4 для кольцевых трещин был получен для умеренно нагруженного кольцевого монтажного сварного шва 24-5 во всасывающей ветке ГЦН-24 вместо первоначально предполагаемого сварного шва 21-5 во всасывающей ветке ГЦН-21. Достаточность принятых коэффициентов безопасности была также оценена путем рассмотрения неопределенности и других факторов, влияющих на технические результаты.
- Намеренно в анализе предполагались консервативные граничные условия относительно приложенных равнодействующих усилий и моментов. Заключительное подтверждение или необходимость экспериментальных измерений здесь не рассматривается.

- На основе оценки, выполненной посредством расчетов напряженного состояния, анализа механики разрушения, термогидравлического анализа и расчетов скорости истечения, трубопроводы ГЦН Ду800 удовлетворяют всем критериям ТПР.

Подход ТПР базировался на методологии, разработанной в Германии [7,8]. Методология США NUREG 1061 [26] была применена для сравнения.

Результаты, относящиеся к существующим анализам, были представлены в [27]. Расчеты напряженного состояния были выполнены по Российским программам и в зависимости от участков трубопроводов контура МПЦ были рассмотрены различные расчетные схемы.

Новый расчет напряженного состояния был выполнен, чтобы определить внутренние нагрузки и напряжения в трубопроводах контура МПЦ 3-го энергоблока Смоленской АЭС. Расчет напряжений был выполнен соответственно для нагрузок при нормальных условиях эксплуатации и максимальном расчетном землетрясении [28]. Для сравнения расчет напряжений был выполнен по различным программам. В результате для различных случаев нагружения были представлены значения внутренних усилий и моментов. Также был выполнен расчет на прочность трубопроводов ГЦН.

На основании результатов общего анализа напряжений соответствующие гибы были выбраны для детального анализа [29]. Расчет напряжений был выполнен для усилий и давления, соответствующих нормальным условиям эксплуатации и комбинации нормальных условий эксплуатации плюс максимальное расчетное землетрясение.

Расчеты критических длин трещин и площадей истечения были выполнены как для максимально нагруженных, так и умеренно нагруженных сварных швов с использованием консервативных инженерных методов [30]. Расчет усталостного роста трещины был выполнен для наиболее нагруженного кольцевого монтажного сварного шва 21-5. Докритический прирост трещины от начального дефекта при нормальных условиях нагружения был выполнен с использованием Шведской программы SACC.

Продольные сварные швы 289-290 в гихах во всасывающем трубопроводе около ГЦН-21 были рассмотрены в конечно-элементном анализе [31]. В этом расчете были использованы диаграммы деформирования и J-R кривые, определенные на архивном материале с энергоблока.

Расчеты расходов теплоносителя были выполнены с использованием программы SQUIRT [32]. Размеры трещин (раскрытие трещины в зависимости от ее длины) были



первоначально рассчитаны для всех актуальных продольных трещин с использованием компьютерной программы «FLECS».

Для консервативных оценок коэффициентов безопасности расчеты критических длин трещин для нормальных условий эксплуатации плюс максимальное расчетное землетрясение были скомбинированы с нижними границами кривых деформирования актуальных материалов. Для расчетов расходов теплоносителя были использованы верхние граничные значения.

Анализ ТПР для монтажного кольцевого шва 21-5 во всасывающей ветке ГЦН-21 3-го энергоблока Смоленской АЭС был также выполнен согласно американской процедуре NUREG-1061 [33,34]. Расчеты по механике разрушения были выполнены на основе трехмерного упругопластического конечно-элементного анализа.

Для всех проанализированных случаев условия ТПР выполнены. Для кольцевых и продольных швов результаты расчетов критических длин трещин и размеров трещин, соответствующих заданному расходу теплоносителя, суммируются в отчете [35].

Аргумент ТПР не является и никогда не будет абсолютным, поскольку всегда остаются некоторые неопределенности, относящиеся к нему. Поэтому было необходимо рассмотреть все эти неопределенности и изменения во входных параметрах и оценить их влияние на поведение ТПР [35]. Для оценки коэффициентов безопасности ТПР был применен упрощенный подход.

В целом можно сделать заключение, что объединенный коэффициент запаса 2 на длину обнаруживаемой сквозной трещины (против разрушения) и текущий (общий) коэффициент запаса 10 на расход теплоносителя и способность обнаружения течи являются достаточными для применения ТПР, так как следующие максимальные понижающие коэффициенты были оценены из анализа неопределенностей:

- коэффициент 1.6 на критическую длину трещины, включая коэффициент 1.4 на свойства материалов;
- коэффициент 3.2 на размер трещины течи, включая коэффициент 2.0 на морфологические параметры трещины и коэффициент 1.3 на модели площади раскрытия трещины.

## **7 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ТПР КРУПНОМАСШТАБНЫМ ИСПЫТАНИЕМ (ЗАДАНИЕ 5)**

Поставки 11, 12 , 16 [36,37] и в общей сложности 7 отчетов произошли из Задания 5. Общие выводы, относящиеся к работе по заданию 5, были следующими:

- Ранее проведенные около двадцати конструкционных испытаний были достаточно хорошо документированы, что позволило запланировать новое испытание, которое восполнило пробел в предшествующих программах испытаний и обеспечило дополнительное экспериментальное подтверждение поведения течи перед разрушением для трубопроводов большого диаметра контура МПЦ РБМК.
- Испытание ставило различные вопросы, не закрытые в предшествующих уместных экспериментальных программах. Основными были:
  - сквозная трещина;
  - кольцевая трещина в кольцевом монтажном шве;
  - комбинированное нагружение внутренним давлением и изгибающим моментом;
  - циклическая фаза нагружения до статического испытания на разрушение.
- Ценное испытание было успешно проведено. Вязкое разрушение произошло при окружающей температуре 12°C. Аналогичный тип разрушения должен поэтому также ожидать и при повышенной температуре эксплуатации с возможно дальнейшим увеличением вязкости, и с не менее значительной пластической деформацией и раскрытием трещины, которые, как ожидается, должны способствовать большим, легко обнаруживающимся потокам истечения.
- Эксперимент продемонстрировал увеличению вязкости благодаря пластическому разрыву по крайней мере на коэффициент 1.5 по отношению к нагрузке, вызывающей инициирование трещины.
- Чтобы вызвать разрушение образца, приложенное внутреннее давление 100 бар было в 2 раза больше, чем уровень для нормальных условий эксплуатации.
- Любые будущие программы конструкционных испытаний трубопроводов Ду800 РБМК должны планироваться далее только на основе недостаточных коэффициентов запаса для ТПР, получаемых из расчетной оценки.

Информация, доступная из предшествующих крупномасштабных испытаниях, была представлена [38] и проанализирована [39], чтобы оценить ее уместность и влияние на требования для дополнительного крупномасштабного конструкционного испытания компонента трубопровода, которое должно было быть выполнено в этом

проекте. Чтобы гарантировать успешный и правильный результат для испытания была подготовлена тщательно рассмотренная программа испытания [40]. Были выполнены предварительные расчеты по механике разрушения [41], чтобы поддержать решения о точной последовательности нагружения.

Вопреки очень большим техническим и экономическим запросам, была испытана реальная часть трубы диаметром 800 мм и длиной 3 м с центральным опоясывающим монтажным сварным швом [42].

После многочисленных фаз подготовки сквозная трещина была закрыта внутренней компрессионной прокладкой, образец для испытания был тщательно оборудован инструментарием, и комбинированное нагружение было приложено через внутреннее гидростатическое давление вместе с внешним растяжением и изгибом, реализованных посредством гидравлического привода в 20 Мн.

Перед заключительными фазами монотонного нагружения трещина была выращена до длины 705 мм за счет циклического нагружения. Впечатляющее оборудование эксперимента было продемонстрировано на месте экспертам ЕС.

## **8 ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ (ЗАДАНИЕ 6)**

Поставки 13, 14 [43,44] и в общей сложности 7 отчетов произошли из Задания 6, связанного с аспектами эксплуатационного контроля в рамках этого проекта. Задание далее подразделялось на Задачу 6.1, этапы 1-3, Задачу 6.2, этапы 1-5 и Задачу 6.3, этап 1. Общие выводы, относящиеся к работе по заданию 6, были следующими:

- Предусмотренные 16 инспекционных карт были хорошо задокументированы и подробно проанализированы [45,46,43,44].
- Автоматизированные системы контроля используются по возможности в трубопроводах контура МПЦ, чтобы улучшить эффективность контроля. Это должно также обеспечить дополнительные преимущества для уменьшения дозозатрат инспекторов и улучшения стандартов сохранения записей контроля [44,47].
- Дальнейшая работа должна быть выполнена, чтобы установить эффективность автоматизированных систем контроля, оборудования и процедур, разработанных, в частности, для контроля АЭС с РБМК. Эта работа должна также содействовать оценке эффективности работы оператора, готовящегося к использованию этого оборудования и процедурам контроля.
- Условия теста и, в частности, расположение дефектов, связанное с практическими испытаниями двух протестированных автоматизированных систем, были

различными. Из этого следует, что это различие в продемонстрированном исполнении может не быть значительным.

- Дальнейшая работа должна быть осуществлена в виде поставки автоматизированного и полуавтоматизированного оборудования для ультразвукового контроля (УЗК) трубопроводов большого диаметра контура МПЦ при эксплуатации.

Как представлено в Поставке 13 рабочего плана VTT, Задача 6.1 закончилась комментариями относительно эффективности применяемого в России ручного метода контроля трубопроводов контура МПЦ. Некоторые недостатки по охвату данного метода были идентифицированы и сообщены НИКИЭТ [43].

Текущая эффективность ручного УЗК-метода для обнаружения дефектов была оценена в Задаче 6.2. Две усовершенствованные системы измерения дефектов были оценены в рамках Задачи 6.2, система АВГУР 4.2 и система SUMIAD/MASERA. Оценка системы АВГУР основывалась на предшествующих “слепых” опытах, выполненных в АЕА Technology, Рисли. Оценка системы SUMIAD/MASERA была выполнена в VTT, Еспоо [48,49,50].

## **9 СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ТЕЧИ И МОНИТОРИНГА УСЛОВИЙ (ЗАДАНИЕ 7)**

Поставка 15 [51] и в общей сложности 4 отчета произошли из Задания 7. Общие выводы, относящиеся к работе по заданию 7, были следующими:

- Для обнаружения течи из трубопроводов Ду800 и всасывающего коллектора (а также нижних частей опускных трубопроводов) крайне рекомендуется внедрение системы обнаружения течи по влажности с сенсорной трубкой FLUES (высокая чувствительность: < 1 кг/час, разумное время отклика: 15 мин, простая для монтажа, даже на старых энергоблоках).
- Из остальных систем обнаружения течей, рассмотренных в проекте, могут быть рекомендованы для внедрения на РБМК (мониторинг трубопроводов Ду800) следующее:
  - контроль влажности (также в сочетании с контролем уровня воды в замкнутом воздушном пространстве);
  - контроль аэрозольной активности;
  - акустический контроль утечки;
  - контроль газовой активности.

- Комбинация различных параметров мониторинга (акустический шум, влажность, аэрозольная активность) должна быть применена и оптимизирована, чтобы удовлетворить требованиям концепции ТПР на блоках РБМК.
- Системы мониторинга условий с приобретением данных “на входе” должны быть обеспечены для установки на реакторе РБМК в целом. Контроль вибрации (прежде всего для ротационного оборудования, особенно главных циркуляционных насосов), контроль водно-химического режима и мониторинг усталости должны быть выполнены. Рекомендации для внедрения этих систем исходили из общего рассмотрения ядерных и эксплуатационных аспектов безопасности РБМК в целом (неотложных требований для мониторинга условий только для трубопроводов Ду800 не существует), но необходимость должна быть проанализирована на специфической основе каждой станции.
- В России нормативные документы не содержат рамочных условий и требований для автоматизированного мониторинга нагрузки и усталости для компонентов АЭС с реакторами ВВЭР и РБМК. В настоящее время это может создать трудности для внедрения этих систем. Вот почему очень рекомендуется дополнить существующие руководства, стандарты и нормы в России новыми требованиями для приобретения автоматизированных данных для систем мониторинга условий на АЭС. Эти документы должны быть сопоставимыми с имеющимися в Западной Европе (Германия, Франция), США и Японии.

Во время представления систем обнаружения течей некоторые из них были детально рассмотрены и проанализированы [52]. В течение проекта эксперименты на месте были выполнены с использованием оборудования, разработанного российскими производителями. В частности, система обнаружения течи по влажности с сенсорной трубкой (FLUES) была продемонстрирована и испытана в лабораториях Siemens в Эрлангене. Система обнаружения течи и система акустического контроля течи ALUES обсуждались и результаты, полученные в период внедрения этих систем на реакторы PWR, были проанализированы [53].

Результаты обеспечивают технические возможности этих систем для обнаружения течи, определения места течи и оценки расхода теплоносителя.

Состояние дел по мониторингу условий на референтном энергоблоке РБМК (3-й энергоблок Смоленской АЭС) было представлено и требования для таких систем были проанализированы [54]. Система усталостного мониторинга, подобная FAMOS, не только удовлетворит требования норм, но также установит базу данных для принятия решений по периодичности неразрушающего контроля, техническому обслуживанию компонентов, ремонту, замене или продлению срока службы. Таким образом, безопасная и экономическая эксплуатация ядерной установки будет усилена.

Применение системы FAMOS на ВВЭР была проанализирована и продемонстрирована в других проектах Тасис [55].

## **10 ОЦЕНКА СЛУЧАЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕЧЬ ПЕРЕД РАЗРУШЕНИЕМ (ЗАДАНИЕ 8)**

Поставка 17 [56] и в общей сложности 3 отчета произошли из Задания 8. Выводы были следующими:

- Отчетные результаты указывают, что поведение ТПР может удовлетворительно продемонстрировано для трубопроводов Ду800 контура МПЦ 3-го энергоблока Смоленской АЭС.
- Имеется потенциал для распространения концепции ТПР на другие компоненты и трубопроводы реактора 3-го энергоблока Смоленской АЭС, а также на другие реакторы РБМК. Российские эксперты, вовлеченные в этот проект, должны играть ведущую роль в исполнении такой работы.

Была опубликована заключительная усовершенствованная версия (издание 4) составленного словаря терминов. Это достаточно для целей текущего проекта и договоренность по значению терминов была достигнута между сторонами. Русский языковые аналоги терминов включены в словарь [57].

Смотреть Разделы 11 и 12 с резюме и рекомендациями, относящимися ко всему проекту в целом.

## 11 РЕЗЮМЕ

Проект полностью выполнен, как определено в Техническом Задании (ТЗ) на проект. Все поставки, определенные в ТЗ, были подготовлены и цели проекта успешно достигнуты.

Полный детерминированный анализ концепции безопасности течь перед разрушением (ТПР) был выполнен для трубопроводов большого диаметра (Ду800) контура МПЦ выбранного 3-го энергоблока Смоленской АЭС. Концепция ТПР считается применимой для изученного случая.

Европейская (немецкая) процедура ТПР была выбрана в качестве методологии, которая должна быть применена и оценена для использования, в частности, для выбранного энергоблока РБМК-1000. Методология США NUREG 1061 была использована только для сравнения.

Все конструкционные материалы, использованные для изготовления трубопроводов большого диаметра контура МПЦ, являются вязкими в действующих температурных диапазонах. Скомпилированные результаты указывают, что все материалы демонстрируют вязкое поведение для всей действующей температурной области и, что механические свойства удовлетворяют требованиям, определенным спецификацией, установленной в соответствующих Российских Нормах. Сравнение результатов НИКИЭТ и Siemens по характеристикам трещиностойкости J-R-кривым показало, что эти результаты сопоставимы и находятся внутри общей полосы разброса.

Считается, что трещинообразование, связанное с воздействием окружающей среды должно быть очень маловероятным. Это подтверждается опытом эксплуатации всех энергоблоков РБМК. Однако было бы интересно подтвердить, возможны ли коррозионное растрескивание под напряжением и коррозионная усталость в неожиданных неблагоприятных комбинациях структуры материалов, водно-химического режима и условий нагружения.

Анализ ТПР продемонстрировал достаточные коэффициенты безопасности на размер трещины и скорость истечения для изученного трубопровода и реальных стационарных материалов трубопровода. Этот вывод был подкреплён результатами анализа механики разрушения, термогидравлического анализа и расчетами расхода теплоносителя. Достаточность текущего объединенного коэффициента запаса 2 на длину сквозной обнаруживаемой трещины (против разрушения) и текущего (общего) запаса 10 на расход теплоносителя и способность обнаружения течи была оценена из анализа неопределенностей. Остаточный запас 1.3 остается, чтобы учесть дополнительные неопределенности в оценке максимальной несущей способности

трубопровода с трещиной, и резервный запас 3.1 остается, чтобы принять во внимание дополнительные факторы и неопределенности, влияющие на скорость истечения.

Значительное усилие было затрачено на конструкционное валидационное испытание, условия нагружения которого были более суровыми по сравнению с нормальными условиями нагружения на энергоблоке. Полученные результаты продемонстрировали поведение ТПР для реального трубопровода ГЦН 3-го энергоблока Смоленской АЭС с достаточными коэффициентами безопасности по отношению к росту усталостной трещины, инициированию трещины и катастрофическому разрушению. Фактически эксперимент продемонстрировал упрочнение вязкости за счет стабильного разрыва по крайней мере на коэффициент 1.5 по отношению к нагрузке, вызывающей начало движения трещины. Это испытание обеспечило дополнительную подтвержденную экспериментом информацию к полученной ранее из многих конструкционных испытаний (около 20), выполненных в России на материалах трубопроводов Ду800 РБМК.

Предусмотренные инспекционные карты были хорошо задокументированы, а автоматизированные системы контроля за состоянием металла используются по возможности на трубопроводах контура МПЦ. Сравнение западных и российских процедур автоматизированного обнаружения дефектов и способности определения их размеров показало относительно хорошее соответствие. Рекомендуется срочная поставка соответствующего оборудования контроля для трубопроводов Ду800 на 3-й энергоблок Смоленской АЭС и все другие энергоблоки РБМК. Дальнейшая работа должна выполняться, чтобы установить эффективность автоматизированных систем контроля, оборудования и процедур для всех других элементов РБМК.

Для обнаружения течи из трубопроводов Ду800 и всасывающего коллектора, а также нижних частей опускных трубопроводов, рекомендуются следующие системы обнаружения течей:

- контроль влажности (также в сочетании с контролем уровня воды в замкнутом воздушном пространстве);
- контроль аэрозольной активности и контроль газовой активности;
- система обнаружения течи по влажности с сенсорной трубкой (FLUES).

Другой важный аспект проекта состоял в обмене знаний между европейскими и российскими экспертами и организациями. Экспертные знания и мотивация команды Локального Субконтрактора (НИКИЭТ) были очень хорошими. Ясно, что локальная команда формирует замечательный потенциал в поддержании уверенности в поведении ТПР для реакторов РБМК.



## 12 ОСНОВНЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Следующие главные рекомендации могут быть сделаны на основе результатов проекта:

1. Проект закончился выводом, что концепция безопасности ТПР применима и, основываясь на входных данных и сделанных предположениях, концепция безопасности ТПР была доказана для изученных трубопроводов Ду800 3-го энергоблока Смоленской АЭС. Тем не менее, для того чтобы полностью подтвердить это утверждение, внедрение систем обнаружения течей должно быть осуществлено для трубопроводов Ду800 и других компонентов контура МПЦ с диаметрами более чем 300 мм в том же помещении.
2. Анализы ТПР для других компонентов трубопроводов (с внешним диаметром более чем 300 мм) 3-го энергоблока Смоленской АЭС должны быть выполнены.
3. Следует выполнить анализы ТПР для трубопроводов Ду800 других энергоблоков РБМК. Берясь за это, важно, чтобы специфические анализы выполнялись для каждой станции и энергоблока и, что результаты, полученные в текущем проекте, не являются полностью переносимыми. В частности, оценка применимости концепции безопасности ТПР крайне рекомендуется для первых очередей АЭС с РБМК, поскольку проектная концепция первых очередей АЭС с РБМК предполагала, что для этих блоков АЭС двустороннее гильотинное разрушение трубопроводов ГЦН является запроектной аварией.
4. Локальная Команда, которая возглавлялась НИКИЭТ, рассматривается в качестве ценного потенциала для обеспечения и повышения ядерной безопасности в России, и поэтому должна быть сохранена активной в уместных технологических областях всеми, возможно доступными средствами.

## ССЫЛКИ НА ИСТОЧНИКИ

1. J. Solin. Deliverables 1&2, Project plans, methodology and conditions for LBB concept applicability evaluation (Task 1.1 - 1.2 of Tacis NUCRUS 94231 project, VTT report No. 13). VTT Manufacturing Technology, Espoo 1997, 3 pages.
2. J. Solin. Deliverable 3, Report describing reference unit and selected features (Task 1.3 - 1.4 of Tacis NUCRUS 94231 project, VTT report No. 18). VTT Manufacturing Technology, Espoo 1997, 8 pages.
3. J. Solin. Deliverable 4, Glossary of terms (Task 1.5 of Tacis NUCRUS 94231 project, VTT report No. 17). VTT Manufacturing Technology, Espoo 1997, 2 pages.
4. J. Solin. Deliverable 18, Progress and Completion reports (Task 1.6 of Tacis NUCRUS 94231 project, VTT report No. 28). VTT Manufacturing Technology, Espoo 1997.
5. J. Solin & E. Brylev (signers). Inception Report to Tacis NUCRUS 94231, Leak Before Break Concept Applicability Evaluation (RBMK Reactors), dated 4.11.1996, 7 pages + app.
6. VTT Manufacturing Technology. Detailed Work Plan for Tacis NUCRUS 94231 Project on LBB Concept for RBMK Reactor. CEC Contract WW.94.06/01.02/B009, Espoo, June 1996, 25 pages.
7. V. Kiselyov. Statement of methodology and conditions for leak before break concept applicability evaluation (RBMK reactors) (Task 1.2 of Tacis NUCRUS 94231 project, RDIPE report No 1, Revision 1, dated 13.09.1996). RDIPE report no. 23.5823, Moscow 1996, 18 pages.
8. G. Bartholomé. Leak-Before-Break-Assessment of pressurized components, part I: description of German LBB-procedures, practices and applications including leakage detection system capabilities. Siemens KWU report KWU NT 13/96/E046, Erlangen 1996, 25 pages.
9. G. Saprykin, R. Umjarov, A. Petrov & A. Arjaev. Supply of basic design data (Task 1.3 of Tacis NUCRUS 94231 project, RDIPE report No 2, Revision 1, dated 15.09.1996). RDIPE report no. 4.2280T, Moscow 1996, 45 pages.
10. L. Gardner. Tacis NUCRUS 94231: reference unit and structural features, AEA Technology plc report AEAT-1135, dated 8.1.1997. Risley 1997. 5 pages + app.
11. V. Kiselyov, L. Babkin, E. Rivkin, V. Belous & A. Zeygarnik. Evaluation of integrity and operation history of RBMK large diameter primary circuit piping (Tasks 2.1,3.1,3.2 of Tacis NUCRUS 94231 project, RDIPE report No 5, Revision 1, dated 15.01.1997). RDIPE report no. 23.5909, Moscow 1997, 61 pages.
12. V. Kiselyov, E. Rivkin, B. Strelkov & A. Arjaev. Glossary of terms (Task 1.5 of Tacis NUCRUS 94231 project, RDIPE report No 3, Revision 2, dated 15.09.1996). RDIPE report no. 23.5824R, Moscow 1996, 22 pages.
13. L. Gardner. Tacis NUCRUS 94231: Review of LBB glossary of terms (Task 1.5 of Tacis NUCRUS 94231 project, AEAT report No. 2). AEA Technology plc report no AEAT-1136, Risley 1997, 18 pages.
14. T. Saario. Deliverable 5, Report describing materials and fabrication (Task 2.1 of Tacis NUCRUS 94231 project, VTT report No. 16). VTT Manufacturing Technology, Espoo 1997, 3 pages.
15. T. Saario. Deliverable 6, Material properties database (Task 2.2 of Tacis NUCRUS 94231 project, VTT report No. 15). VTT Manufacturing Technology, Espoo 1997, 3 pages.

16. T. Saario. Deliverable 10, Material properties assessment (Task 2 of Tacis NUCRUS 94231 project, VTT report No. 25). VTT Manufacturing Technology VALC486, Espoo 1998, 9 pages.
17. L. Babkin, T. Osipova & L. Repina. Compilation of materials properties database (Task 2.2 of Tacis NUCRUS 94231 project, VNIIAES/RDIPE report No 12, Revision 1, dated 15.05.1997). VNIIAES report no. OE/912.0597, Moscow 1997, 370 pages.
18. V. Kiselyov, A. Popov & E. Parshutin. Programme of materials testing (Task 2.3 of Tacis NUCRUS 94231 project, RDIPE report No 7, Revision 1, dated 15.01.1997). RDIPE report no. 23.5905, Moscow 1997, 16 pages.
19. A. Popov & E. Parshutin. Testing results of MCP piping archive materials of Smolensk NPP Unit 3 (Task 2.3 of Tacis NUCRUS 94231 project, RDIPE report No 15, Revision 1, dated 21.09.1997). RDIPE/ENES Report no. 23.6072, Moscow 1997, 140 pages.
20. H. Schendzielorz. Fracture mechanics and drop weight tests of main circulation piping archive material of Smolensk NPP Unit 3, Siemens KWU report KWU NT 12/98/E007, dated 16.02.1998, Erlangen 1998, 29 pages.
21. D. Worswick, Peter Hurst. Deliverable 7, Report on operating history, leakage problems and defects (Task 3.3 of Tacis NUCRUS 94231 project, AEAT report No. 10). AEA Technology plc, Risley 1997, 3 pages.
22. D. Worswick. Tacis NUCRUS 94231 project LBB Concept Evaluation (RBMK Reactors): Initial AEA approach to agree specification for task 3 (Task 3.1 of Tacis NUCRUS 94231 project, AEAT report No. 1). AEA Technology plc, Risley 1996, 7 pages.
23. D. Worswick & P. Hurst. Evaluation of integrity and operational history of RBMK large diameter primary circuit piping (Task 3.3 of Tacis NUCRUS 94231 project, AEAT report No. 8), AEA Technology plc report AEAT-2097, Risley 1997, 37 pages.
24. H. Keinänen. Deliverable 8, Review of the existing technical analyses with specifications for new analyses (Task 4.1 of Tacis NUCRUS 94231 project, VTT report No. 14). VTT Manufacturing Technology, Espoo 1997, 4 pages.
25. H. Keinänen. Deliverable 9, Technical analyses (Task 4 of Tacis NUCRUS 94231 project, VTT report No. 24). VTT Manufacturing Technology, Espoo 1998, 15 pages.
26. NRC Pipe Break Task Group, Evaluation of Potential for Pipe Breaks, NUREG-1061, Vol.3, Washington, D.C, November 1984.
27. V. Kiselyov, E. Rivkin, A. Arjaev, I. Baranov, V. Tkachev & V. Aladinsky. Results of existing technical analyses for RBMK main circulation circuit piping (Task 4.1 of Tacis NUCRUS 94231 project, report No. 6, Revision 1, dated 15.01.1997). RDIPE report no. 23.5910, Moscow 1997, 76 pages.
28. A. Arjaev, Y. Smirnov, Y. Golovlev, V. Tkachev, M. Osokin & M. Malov. Results of Stress Analysis for Smolensk NPP Unit 3 Main Circulation Circuit Piping. (Task 4.2 of Tacis NUCRUS 94231 Project, RDIPE report No. 13, Revision 1, dated 26.05.1997). RDIPE Report no.23.5957, Moscow 1997, 154 pages.
29. A. Arjaev, Yu. Smirnov, & V. Tkachev. Analysis of stresses in longitudinal welds of Smolensk NPP unit 3 MCP pipe bends (Task 4.2 of Tacis NUCRUS 94231 project, RDIPE report No. 14, Revision 1, dated 26.06.1997). RDIPE report no. 23.5982, Moscow 1997, 62 pages.
30. V. Kiselyov & M. Dobrov. Fracture Mechanics Analysis of Large Diameter MCP Piping. (Task 4.3 of Tacis NUCRUS 94231 Project, RDIPE report No. 18, Revision 1, dated 22.09.1997). RDIPE/ENES Report no.23.6073, Moscow 1997, 65 pages.

31. V. Tkachev & K. Zheltukhin. Three dimensional finite element fracture mechanics analysis of large diameter pipe elbow for Smolensk 3 unit (Task 4.3 of Tacis NUCRUS 94231 project, RDIPE report No. 19, Revision 2, dated 24.11.1997). RRC "Kurchatov Institute" report no. 33-05/36. RRC "Kurchatov Institute" / ENES, Moscow 1997, 15 pages.
32. D. D. Paul, N. Ghadiali, S. Rahman, P. Krishnaswamy & G. Wilkowski. SQUIRT Computer Code. Version 2.3. Battelle, Columbus, November 1994.
33. K. Ikonen & H. Raiko. LBB assessment of the weld 21-5 (Task 4.4 of Tacis NUCRUS 94231 project, VTT report No. 21). Updated Research report ENE4/08/98. VTT Energy, Espoo 1998, 18 p. + app. 16 pages.
34. K. Ikonen & H. Raiko. Memorandum 1998.05.04 (Task 4.4 of Tacis NUCRUS 94231 project, VTT report No. 23). VTT Energy, Espoo 1998. This memorandum is related to reference [33], 4 pages.
35. V. Kiselyov, V. Tkachev, E. Rivkin & M. Dobrov. Leak before break evaluation for large diameter MCP piping (Task 4.4 and 4.5 of Tacis NUCRUS 94231 project, RDIPE report No. 20, Revision 2, dated 15.01.1998). RDIPE/ENES report no. 23.6115, Moscow 1997, 53 pages + app 20 pages.
36. L. Gardner. Deliverables 11 & 12, Review and specifications for structural testing (Tasks 5.1-5.2 of Tacis NUCRUS 94231 project, AEAT report No. 9). AEA Technology plc, Risley 1997, 3 pages.
37. L. Gardner. Deliverable 16, Tacis NUCRUS 94231: Review of LBB Validation Test (Task 5.4 of Tacis NUCRUS 94231 project, AEAT report No. 14). AEA Technology plc AEAT-3684, Risley 1998, 12 pages.
38. V. Kiselyov, E. Rivkin & A. Sudakov. Review of previous large scale tests of RBMK main circulation circuit piping components (Task 5.1 of Tacis NUCRUS 94231 project, RDIPE report No 4, Revision 1, dated 20.11.1996). RDIPE report no. 23.5856, Moscow 1996, 33 pages.
39. L. Gardner. Tacis NUCRUS 94231: Requirements for LBB validation test (Task 5.2 of Tacis NUCRUS 94231 project, AEAT report No. 7). AEA Technology report AEAT-1810, Risley 1997, 10 pages.
40. V. Kiselyov & A. Sudakov. Programme of structural test (Task 5.2 of Tacis NUCRUS 94231 project, RDIPE report No 10, Revision 3, dated 19.05.1997). RDIPE report no. 23.5952. Moscow 1997, 16 pages.
41. V. Kiselyov. Preliminary fracture mechanics analysis of cracked full size straight pipe for structural testing (Task 5.2 of Tacis NUCRUS 94231 project, RDIPE report No 11, Revision 1, dated 5.05.1997). RDIPE report no. 23.5953, Moscow 1997, 53 pages.
42. V. Kiselyov & A. Sudakov. Structural test of actual Smolensk 3 MCP straight pipe (Task 5.3 of Tacis NUCRUS 94231 project, RDIPE report No. 22, Revision 1, dated 03.06.1998). RDIPE report no. 23.6114, Moscow 1998, 20 pages + 35 figures.
43. P. Conroy. Deliverable 13, In-service inspection maps (Task 6.1 of Tacis NUCRUS 94231 project, AEAT report No. 11). AEA Technology plc, Risley 1997, 11 pages.
44. P. Conroy. Deliverable 14, Report on Task 6 of Tacis NUCRUS 94231 Leak Before Break Project (Task 6.3 of Tacis NUCRUS 94231 project, AEAT report No. 13). AEA Technology plc AEAT-3664 / IVCR9800023, Risley 1998, 8 pages + app. 22 pages.
45. B. Strelkov, A. Aref'ev, N. Timofejev, V. Anisimova & Y. Lobanov. Production of inspection maps (Task 6.1 of Tacis NUCRUS 94231 project, RDIPE report No 9, Revision 2, dated 15.01.1997). RDIPE report no. 840.04, Moscow 1997, 104 pages.

46. S. Smalley. Practical Investigation of RDIPE UT Inspection Techniques as Specified in Report No 840.04 (Task 6.2 of Tacis NUCRUS 94231 project, AEAT report No. 5). AEAT - 1505 / IVCR1485 Issue A, Risley 1997, 4 pages.
47. B. Strelkov, A. Aref'ev, N. Timofejev, V. Anisimova, V. Badalian, & D. Tikhonov. Demonstration of upgraded inspection performance (Task 6.2 of Tacis NUCRUS 94231 project, RDIPE report No. 16 Revision 1, dated 15.07.1997). RDIPE report no. 840.11, Moscow 1997, 135 pages.
48. C. Bostock & P. Conroy. Test Piece Design Specification for the Performance Evaluation Trials of Tacis NUCRUS 94231 Leak Before Break Project (Task 6.2 of Tacis NUCRUS 94231 project, AEAT report No. 4). AEAT -1497 / IVCS266 Issue A, Risley 1997, 5 pages + app. 8 pages.
49. P. Conroy. Specification for the Performance Demonstration Component of Tacis NUCRUS 94231 Leak Before Break Project (Task 6.2 of Tacis NUCRUS 94231 project, AEAT report No. 12). AEAT - 2710 / IVCS9700297 Issue A, Risley 1997, 6 pages.
50. P. Conroy. Report on the Defect Sizing Validation Trials of the RDIPE Inspectors and the AUGUR 4.2 Inspection System. IVCR1448 Issue A, Risley 1996.
51. U. Kunze. Deliverable 15, Report on adequacy of leak detection and condition monitoring systems for LBB and recommendation for their improvement (Task 7.4 of Tacis NUCRUS 94231 project, Siemens report No. 5). Siemens KWU, Erlangen 1998, 9 pages.
52. B. Strelkov & Y. Korolev. Review of existing system for leak detection at RBMK plant (Task 7.1 of Tacis NUCRUS 94231 project, RDIPE report No 8, Revision 1, dated 15.01.1997). RDIPE report no. 840.03, Moscow 1997, 71 pages.
53. B. Strelkov, Y. Korolev, V. Ovchinnikov & A. Burlakov. Demonstration of upgraded leak detection systems (Task 7.2 of Tacis NUCRUS 94231 project, RDIPE report No 17, Revision 2, dated 23.12.1997). RDIPE report no. 840.17, Moscow 1997, 69 pages.
54. B. Strelkov, S. Bougaenko, Y. Korolev, A. Arjaev, V. Belous & G. Saprykin. Condition monitoring system. Demonstration of key elements in the framework of LBB application to MCP piping of Smolensk NPP Unit 3 (Task 7.3 of Tacis NUCRUS 94231 project, RDIPE report No 21, Revision 1, dated 15.01.1998). RDIPE report no. 840.30, Moscow 1998, 59 pages.
55. Final reports of the Tacis Project 3.4/91 and Tacis Project 2.11/94 "Development of Residual Lifetime Diagnostic Systems".
56. J. Solin & H. Keinänen. Deliverable 17, Final report on the LBB case with recommendations (Task 8 of Tacis NUCRUS 94231 project, VTT report No. 26). VTT Manufacturing Technology, Espoo 1998, 33 pages.
57. V. Kiselyov. Glossary of terms (updated version) (Task 8.3 of Tacis NUCRUS 94231 project, RDIPE report No 23, Revision 1, dated 02.06.1998). RDIPE report no. 23.5824R, Moscow 1998, 22 pages.