

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ «МЕТОДИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРИМЕНЕНИЮ СИСТЕМНОЙ МЕТОДОЛОГИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ АЭС С ВВЭР-1000 И ВВЭР-440»

Приведено описание применяемой технологии и сравнение её эффективности с другими существующими на сегодня подходами как в России, так и за рубежом. Показаны преимущества системной методологии, включая стоимость её реализации на действующих АЭС.

Ключевые слова: методика, системная концепция прочностной безопасности, теплообменные трубы, парогенераторы, АЭС.

Введение. Проблема обеспечения целостности теплообменных труб (ТОТ) парогенераторов (ПГ) АЭС – одна из самых актуальных проблем мировой атомной энергетики. Эта проблема возникла на АЭС западного производства более 20 лет назад, а затем и на российских АЭС.

Актуальность проблемы обеспечения целостности ТОТ ПГ действующих и новых АЭС определяется тем, что повреждения ТОТ:

а) приводят к снижению экономических показателей АЭС из-за:

– необходимости замены ПГ с большим числом заглушенных ТОТ. Так стоимость замены более 200 ПГ на АЭС западного производства достигла 12 млрд. USD и продолжает расти и сегодня. В России произведена замена только 4 ПГ и рассматривается вопрос о замене ПГ еще на 2-х энергоблоках;

– внеплановых остановов из-за неплотностей ТОТ, которые приводят к существенной недовыработке электроэнергии;

– увеличения сроков ППР (в ряде случаев до нескольких месяцев) из-за больших объемов ВТК и глушения ТОТ по его результатам;

– увеличения трудозатрат и дозозатрат на АЭС из-за ремонта и контроля ТОТ (в один ППР в ряде случаев приходилось глушить 1000 и более ТОТ);

б) составляет угрозу радиационной безопасности АЭС (из-за малых и средних течей из первого контура во вторую);

в) составляет угрозу ядерной безопасности АЭС (в случае разрыва более одной ТОТ);

г) сложности проблемы. Так на западе она решается уже более 20 лет и до сих пор до конца не решена. Продолжаются глушения ТОТ на ряде АЭС западного производства. Планируются замены парогенераторов. Например, в феврале 2005 г. после вихретокового контроля (ВТК) двух ПГ на АЭС “St. Lucie” (США) было заглушено 798 и 838 ТОТ. На различных АЭС в эксплуатации наблюдаются случаи разрыва ТОТ.

Следует отметить, что несмотря на меньший объем повреждений ТОТ на АЭС российского производства, эта проблема является также актуальной из-за того, что ряд ПГ уже имеют существенно поврежденные трубные пучки.

В настоящей статье приведены результаты применения системной концепции прочностной безопасности для обеспечения целостности теплообменных труб парогенераторов АЭС с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000, а именно:

а) дано краткое описание принципов системной концепции прочностной безопасности;

б) приведено описание руководящего документа, разработанного на основе системной концепции и условия его применения;

в) представлены результаты применения РД;

г) наведены попутные технические результаты, полученные в ходе разработки системной технологии обеспечения целостности труб ПГ, а именно влияние технологии на:

– кинетику развития дефектов в трудах;

– достоверность ВТК;

– достоверность пневмогидравлического метода контроля.

1. О системной концепции прочностной безопасности. Системная концепция основана на системном подходе. Системный подход позволяет наиболее полно рассмотреть проблему и найти пути ее наиболее быстрого и оптимального решения. Центральным понятием системного подхода является понятие системы.

Основные принципы, положения и методы системного подхода применительно к проблеме обеспечения прочности, ресурса, надежности и безопасности оборудования и трубопроводов АЭС определены в нормативном документе [1], а их практическое применение для решения конкретной проблемы эксплуатации – в документе [2].

При рассмотрении проблемы обеспечения целостности ТОТ с применением системной концепции были решены следующие основные вопросы:

1. Определены причины возникновения непроектных состояний трубных пучков во время эксплуатации.

2. Определена целевая функция системы обеспечения целостности ТОТ во время эксплуатации с учетом возможностей современных технических средств и технологий.

3. Выполнен анализ существующих на АЭС технологий и методов обеспечения целостности ТОТ, прежде всего предусмотренных инструкциями по эксплуатации ПГ; проведена оценка эффективности этих мероприятий и по результатам выполненных работ разработана структура системы обеспечения целостности ТОТ во время эксплуатации.

4. Проведена доработка отдельных элементов системы обеспечения целостности ТОТ до состояния, необходимого для выполнения системой своей функции (цели).

2. Руководящий документ РД ЭО-0552-2004 «Методические рекомендации по применению системной методологии для обеспечения целостности теплообменных труб парогенераторов АЭС с реакторами

ВВЭР-440 и ВВЭР-1000». Технология обеспечения целостности труб ПГ на основе системной концепции прочностной безопасности (далее – системная технология) разработана в 1996 году для случая обеспечения надежной эксплуатации блока № 2 Балаковской АЭС. В связи с положительным опытом применения этой технологии на БалАЭС и нарастанием актуальности проблемы обеспечения целостности труб ПГ на других АЭС, была поставлена задача обобщить опыт, полученный на БалАЭС и применить его для всех блоков АЭС с ВВЭР-440 и ВВЭР-1000, на которых имелись поврежденные трубки ПГ.

Такая работа была выполнена в 2003 г. Результатом этой работы стал руководящий документ РД ЭО-0552-2004 «Методические рекомендации по применению системной методологии для обеспечения целостности теплообменных труб парогенераторов АЭС с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000» (далее РД). В 2004 году РД ввели в действие на всех АЭС с ВВЭР для опытного использования до 2007 года включительно.

Фактически РД применяли только на тех блоках АЭС, на которых имелись ПГ с поврежденными трубками. Таких блоков в России было 6. На одном блоке РД не применяли по организационным причинам.

В процессе разработки системной технологии обеспечения целостности труб ПГ были сделаны четыре изобретения, которые составляют основу системной технологии и которые защищены патентами [3–6].

3. Результаты применения РД. Наиболее тяжелые последствия от ненадежной работы трубок ПГ связаны с необходимостью внеплановой остановки блока для ликвидации межконтурных течей. Таким образом, одна из главных задач применения РД – обеспечение надежности трубок ПГ по критерию сопротивления образованию межконтурных течей (течь из первого контура во второй) во время эксплуатации (нахождения блока на мощности). Или другими словами, недопущение внеплановых остановов блоков из-за межконтурных течей.

Указанная выше задача решается с высокой степенью эффективности на основе применения системной технологии, предписанной РД.

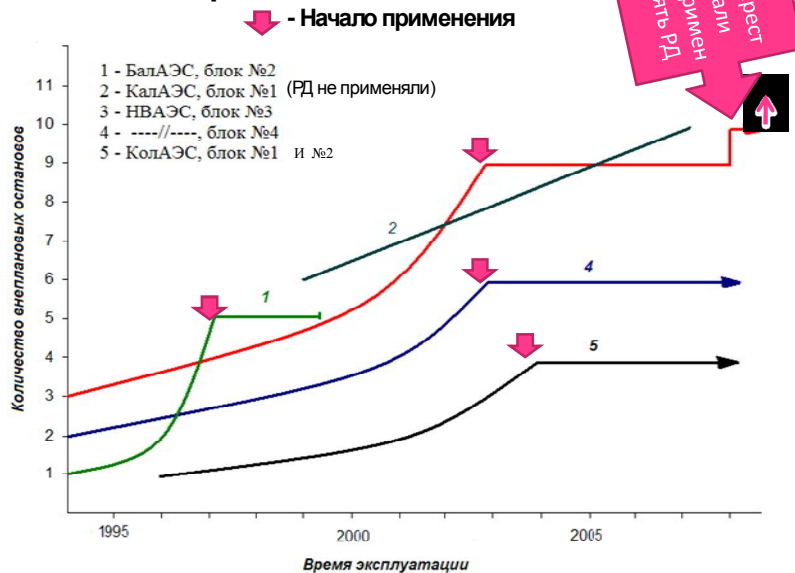
Во всех случаях эксплуатация трубных пучков ПГ этих энергоблоков после применения РД проходила успешно, без внеплановых остановов по причинам недопустимых протечек из первого во второй контур.

На рис. 1 показано изменение количества внеплановых остановов блоков до применения РД, и после. Из рис. 1 видно, что на всех блоках, где РД применяли, внеплановых остановов не было (кривые 1, 2, 4 и 5). Исключение составляет один блок, на котором РД не применяли по ряду организационных причин (кривая 3). На этом блоке за рассматриваемый период произошло два внеплановых останова (кривая 3).

Один внеплановый останов произошел также на 3 блоке Нововоронежской АЭС в 2008 году, что связано с прекращением применения рекомендаций РД по организационным причинам в плановый останов в 2007 году для проведения плановых профилактических работ. Этот случай свидетельствует о том, что все рекомендации РД необходимо применять с высокой тщательностью, в

противном случае процесс непроектной деградации труб ПГ возобновляется.

Рис. 1. Динамика внеплановых остановов до и после применения РД ЭО-0552-2004



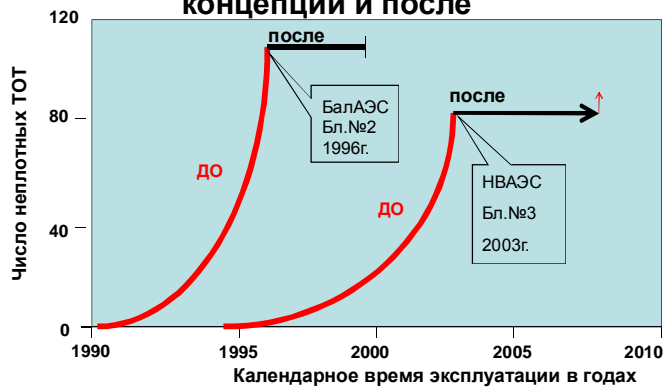
Примечание: 1) Суммарный положительный опыт применения РД – более 100 ПГ/лет;
 2) Блок №3 БалАЭС не имел внеплановых остановов, однако использованная на нем технология привела к преждевременному исчерпанию проектного ресурса и необходимости замены ПГ.

4. Другие технические результаты, полученные в ходе разработки и применения системной технологии обеспечения целостности труб ПГ.

4.1. Прекращение непроектного процесса коррозионного растрескивания под напряжением труб ПГ. На рис. 2 представлена динамика нарастания числа неплотных труб ПГ на парогенераторе с самыми поврежденными трубками. Видно, что до применения РД число неплотных труб нарастало с ускорением. После применения РД скорость нарастания числа неплотных труб упала практически до нуля.

4.2. Гарантированное исключение возможности внезапного разрыва труб с большим истечением теплоносителя во время эксплуатации. Исключение возможности внезапного разрыва труб с большим истечением теплоносителя во время эксплуатации имеет большое значение для обеспечения безопасности АЭС, так как в этом случае погут быть радиационные последствия и создаются условия для инициирования аварии с ядерными последствиями (в случае разрыва двух и более труб).

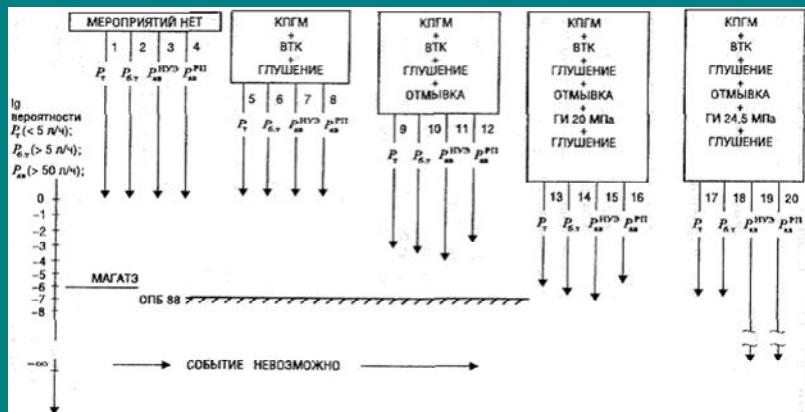
Рис.2. Нарастание числа неплотных труб в ПГ до применения системной концепции и после



Применение РД в полном объеме гарантированно исключает возможность разрыва труб во время эксплуатации. Вероятность разрыва труб становится равной нулю после выполнения рекомендаций РД в полном объеме. Некоторые результаты оценки надежности труб ПГ во взаимосвязи с выполняемыми мероприятиями показаны на рис. 3. Видно, что набор мероприятий последнего варианта на рис. 3 (химическая отмывка (ХО), гидравлические испытания (ГИ) давлением 240 атм., пневмогидравлический метод контроля плотности (ПГМК), и глушение текущих ТОТ) обеспечивает невозможность разрыва труб ПГ даже в самом жестком режиме – в случае падения давления во втором контуре ПГ (например, в результате разрыва паропровода).

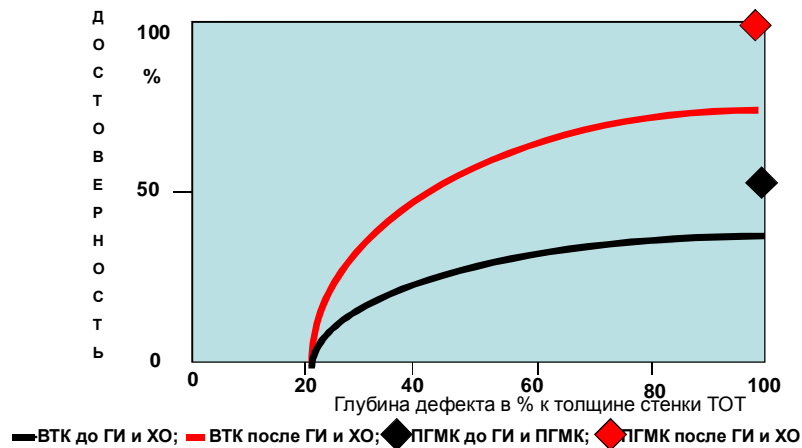
Рис.3. Влияние различных мероприятий на вероятность образования течей в ТОТ:

P_T - вероятность малой течи; $P_{б.т.}$ – вероятность большой течи;
 $P_{н\text{н}\text{э}}$ – вероятность разрыва ТОТ в режиме нормальной эксплуатации;
 $P_{ав}$ – вероятность разрыва ТОТ в аварийном режиме.



4.2. *Повышение достоверности вихретокового контроля.* После выполнения рекомендаций РД в полном объеме достоверность ВТК повышается в два раза (Кривые 1 и 2 на рис. 4).

Рис.4. Достоверность ВТК и ПГМК, определенная в ходе контроля на АЭС



4.3. *Повышение достоверности пневмогидравлического метода контроля плотности целостности труб ПГ.* Достоверность пневмогидравлического метода контроля плотности целостности труб ПГ после выполнения рекомендаций РД в полном объеме повышается с 50 до 100%. (точки 3 и 4 на рис. 4).

4.4. *Снижение затрат на эксплуатацию парогенераторов с поврежденными трубками ПГ.* В результате применения РД достигаются также и другие результаты, имеющие как техническое так и экономическое значение для АЭС, а именно:

а) Повышается выработка электроэнергии за счет прекращения внеплановых остановов блоков по причине межконтурных течей в ПГ, а также за счет сокращения сроков плановых ремонтно-профилактических работ, в которых вихретоковый контроль труб ПГ находился на «критическом пути» этих работ;

б) Сокращаются затраты на техническое обслуживание ПГ за счет того, что сокращаются объемы вихретокового контроля и глушения неплотных труб;

в) Отпадает необходимость замены парогенераторов, так как появляется возможность надежной эксплуатации парогенераторов не только в период проектного срока эксплуатации в 30 лет, но и при его значительном увеличении.

Выводы. Применение системной концепции прочностной безопасности на АЭС с ВВЭР для обеспечения целостности ТОТ ПГ с

существенно поврежденными ранее трубными пучками дало технический и экономический эффект, а именно:

- повысилась надежность трубных пучков ПГ;
- прекратились внеплановые остановки энергоблоков из-за неплотностей ТОГ;
- повысилась безопасность эксплуатации ПГ;
- внезапное появление больших течей, существенно превышающих 5 литров в час, становится невозможным;
- уровень протечек в ПГ после применения всего комплекса мероприятий по РД либо не намеряется, либо находится на нижнем допустимом уровне;
- состояние трубных пучков стабилизируется, в случае возникновения незначительных протечек их величина во время эксплуатации практически не меняется, даже при циклах, связанных с остановами блоков;
- отпадает необходимость в больших объемах ВТК;
- увеличивается ресурс ПГ по критерию «число заглушенных ТОГ» и сокращаются объемы глушения неплотных труб;
- недовыработка электроэнергии из-за неплотностей ТОГ падает до нуля, при этом стоимость технического обслуживания ПГ уменьшается.

Summary

The description of technology and compare its performance with other existing approaches to date in Russia and abroad. Showing the benefits of system methodology, including the cost of its implementation at the operating nuclear power plants.

Keywords: methodology, system concept of strength-based safety, SG tubes, steam generators, NPP.

Резюме

Наведено опис технології, що застосовується в роботі і порівнюється її ефективність з іншими існуючими на сьогодні підходами як в Росії, так і за кордоном. Показано переваги системної методології, включаючи вартість її реалізації на діючих АЕС.

Ключові слова: методика, системна концепція міцнісної безпеки, теплообмінні труби, парогенератори, АЕС.

1. *Руководящий* документ РД ЭО-0552-2004 "Методические рекомендации по применению системной методологии обеспечения целостности трубок ПГ на действующих АЭС с ВВЭР-1000 и ВВЭР-440".
2. *Руководящий* документ СК-1-2005 "Системная концепция обеспечения прочности, ресурса, надежности и безопасности оборудования и трубопроводов АЭС".
3. *Заявка* на изобретение № 2003105209/28 РФ, МПК⁷ G01N35/00,

- G01N35/00. Способ определения достоверности неразрушающего контроля дефектов, определяющих качество изготовления, надежность и безопасность эксплуатации изделия / Н. А. Махутов, А. А. Тутнов, А. Ф. Гетман, В. Н. Ловчев, Д. Ф. Гуцев, А. С. Зубченко, С. Е. Бугаенко, Г. С. Васильченко, А. В. Просвирин, Ю. Н. Конев, М. В. Григорьев, Ю. Г. Драгунов, И. В. Калиберда, Ю. А. Кураков. – Оpubл. 10.09.04.
4. Заявка на изобретение № 2003109692/28 РФ, МПК⁷ G01B23/02, G06F17/00, B21D26/10. Способ определения вероятности обнаружения дефектов, исходной и остаточной дефектности с использованием результатов неразрушающего контроля / Н. А. Махутов, А. А. Тутнов, А. Ф. Гетман, В. Н. Ловчев, Д. Ф. Гуцев, А. С. Зубченко, В. А. Гетман, Г. С. Васильченко, А. В. Просвирин, Ю. Н. Конев, М. В. Григорьев, Ю. Г. Драгунов, И. В. Калиберда, Ю. А. Кураков. – Оpubл. 20.12.04.
 5. Заявка на изобретение № 2004105008/28 РФ, МПК⁷ G01N3/00. Способ определения остаточной дефектности изделия после двух и более неразрушающих контролей / Н. А. Махутов, А. А. Тутнов, А. Ф. Гетман, В. Н. Ловчев, Д. Ф. Гуцев, Ю. А. Кураков, Ю. Г. Драгунов, А. С. Зубченко, М. В. Григорьев, И. В. Калиберда, Б. И. Нигматулин, Г. П. Карзов, В. Г. Васильев, А. В. Просвирин, Ю. Н. Конев, А. А. Тутнов, Г. И. Тарасенкова, Г. С. Васильченко. – Оpubл. 20.07.05.
 6. Заявка на изобретение № 2003105210/28 РФ, МПК⁷ G01M3/12, G01M3/00. Способ гидравлических (пневмогидравлических) испытаний сосудов и трубопроводов давления, обеспечивающих полную надежность и безопасность их эксплуатации / Н. А. Махутов, А. А. Тутнов, А. Ф. Гетман, В. Н. Ловчев, Д. Ф. Гуцев, А. С. Зубченко, С. Е. Бугаенко, Г. С. Васильченко, А. В. Просвирин, Ю. Н. Конев, М. В. Григорьев, Ю. Г. Драгунов, И. В. Калиберда, Ю. А. Кураков. – Оpubл. 10.09.04.

Поступила 20.05.2009