

УДК 621.039.4

## Анализ возможных причин и механизмов отказов трубных систем парогенераторов атомных судов

А. М. Бахметьев<sup>1</sup>, доктор технических наук, Н. Г. Сандлер<sup>2</sup>, доктор технических наук, И. А. Былов<sup>3</sup>, кандидат технических наук, А. В. Бакланов<sup>4</sup>

ОАО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И. И. Африкантова» (ОАО «ОКБМ Африкантов»), Нижний Новгород

М. М. Кашка<sup>5</sup>, С. В. Филимошкин<sup>6</sup>  
ФГУП «Атомфлот», Мурманск

*Рассмотрен и обобщен опыт эксплуатации парогенераторов атомных судов, представлены результаты анализа их фактического уровня надежности и тенденций его изменения, а также дана экспертная оценка возможных причин и механизмов отказов трубных систем парогенераторов.*

**Ключевые слова:** атомные суда, парогенератор, трубная система, интенсивность отказов, механизм отказа.

### Введение

Россия обладает мощным атомным ледокольным флотом и уникальным опытом конструирования, постройки и эксплуатации таких судов. В настоящее время российский атомный ледокольный флот насчитывает шесть атомных ледоколов, один контейнеровоз (атомный лихтеровоз «Севморпуть») и четыре судна технологического обслуживания. Его задача — обеспечивать стабильное функционирование Северного морского пути, а также доступ к районам Крайнего Севера и арктическому шельфу.

Ключевым условием успешной эксплуатации атомного ледокольного флота в тяжелых ледовых условиях Арктики является высокий уровень надежности атомной энергетической установки и входящего в ее состав оборудования. Опыт эксплуатации атомных судов показывает, что одним из основных элементов, определяющих надежность установки, является парогенератор (ПГ) [1]. Межконтурная течь трубной системы парогенератора, представляющая собой один из основных видов отказа ПГ, приводит к ограничению мощности установки, ухудшению радиационной обстановки и требует значительных затрат на восстановление работоспособности.

В связи с этим представляется актуальной задача рассмотрения и обобщения опыта эксплуатации парогенераторов атомных судов, анализа достигнутого фактического уровня надежности и тенденций его изменения, а также определение причин отказов трубных систем парогенераторов.

В настоящей статье представлены результаты статистической обработки данных по эксплуатации парогенераторов атомных судов ПГ-18Т и ПГ-28, основные результаты материаловедческих исследований отказавших трубных систем, а также дана экспертная оценка возможных причин и механизмов отказов трубных систем ПГ.

### Статистический анализ данных по эксплуатации парогенераторов атомных судов

В атомных паропроизводящих установках (АППУ) атомных судов используются два типа парогенераторов — ПГ-18Т и ПГ-28. Разработчиком их конструкции является ОАО «Специальное конструкторское бюро котлостроения» (СКБК), а изготовителем и поставщиком — ОАО «Балтийский завод» (Санкт-Петербург).

На июнь 2012 г. суммарная наработка трубных систем ПГ-18Т составляла  $3,75 \cdot 10^6$  ч, ПГ-28 —  $3,31 \cdot 10^6$  ч. Количество отказавших секций трубных систем — более 250, при этом у трубных систем парогенераторов более поздних годов выпуска по сравнению с трубными системами атомных ледоколов «Ленин» и «Арктика» наблюдается заметное увеличение

<sup>1</sup> e-mail: alexbakh@okbm.nnov.ru.

<sup>2</sup> e-mail: sandler@okbm.nnov.ru.

<sup>3</sup> e-mail: vab@okbm.nnov.ru.

<sup>4</sup> e-mail: vab@okbm.nnov.ru.

<sup>5</sup> e-mail: general@rosatomfлот.ru.

<sup>6</sup> e-mail: filimoshkinsv@rosatomfлот.ru.

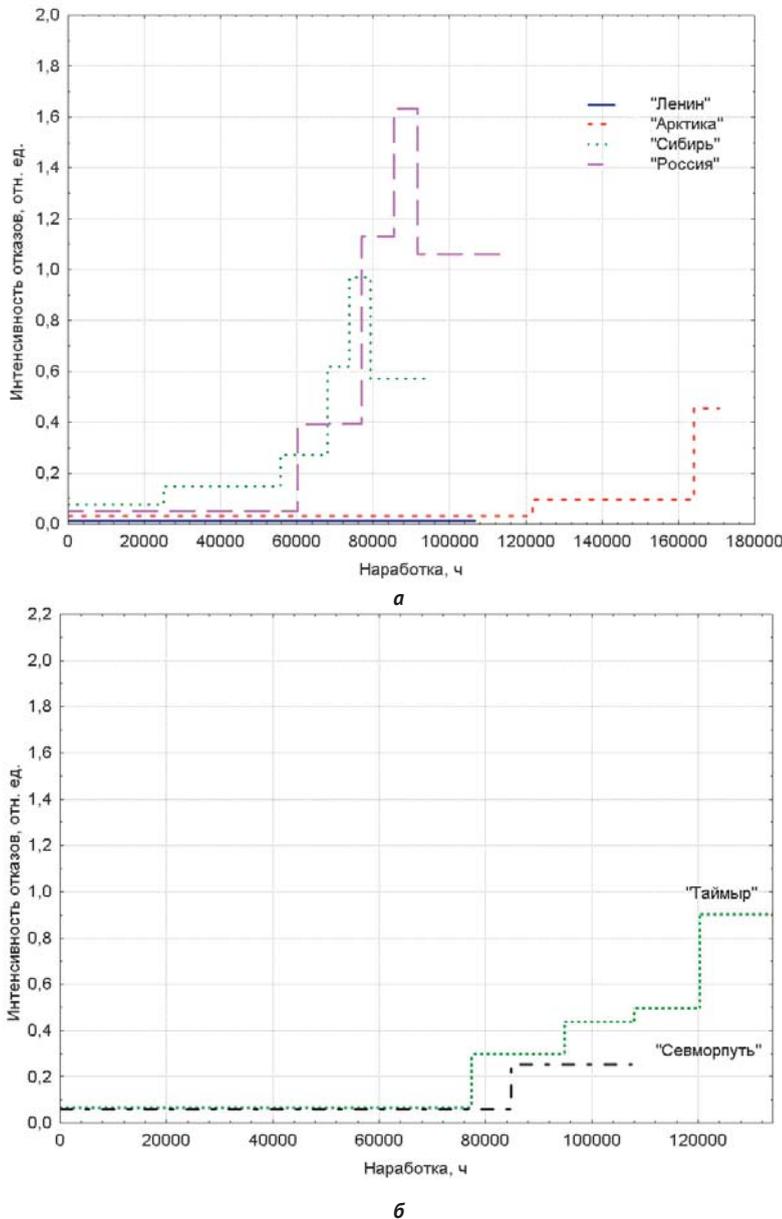


Рис. 1. Эмпирические зависимости интенсивности отказов секций трубных систем ПГ-18Т

количества отказов. Наибольшее количество отказов трубных систем ПГ-18Т наблюдалось на АППУ атомного ледокола «Россия», а ПГ-28 — на АППУ атомного ледокола «Ямал». Из трубных систем ПГ-28 изготовленных 1991—2007 гг. наибольшее количество отказавших секций имеет ПГ № 3 атомного ледокола «Таймыр» при наработке 19 421 ч.

По имеющимся данным по отказам трубных систем парогенераторов атомных судов были построены эмпирические зависимости интенсивности отказов от наработки секций трубных систем ПГ-18Т и ПГ-28 (рис. 1 и 2). Анализ этих зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

- конструкция ПГ-18Т дает возможность достигать наработки более 160 тыс. ч, а ПГ-28 — более 100 тыс. ч без потери установленной мощности;

- до наработки 50—60 тыс. ч интенсивности отказов секций трубных систем парогенераторов всех атомных судов существенно не различаются;
- после наработки 50—60 тыс. ч у парогенераторов отдельных атомных судов наблюдается резкое возрастание (в 10—20 раз) интенсивностей отказов секций трубных систем как ПГ-18Т, так и ПГ-28 с последующим снижением интенсивности отказов после наработки 70—80 тыс. ч.

На рис. 3 представлено сравнение эмпирических функций интенсивности отказов секций трубных систем ПГ-28 изготовления до 1991 г. и изготовления 1991—2007 гг. Интенсивность отказов секций изготовления 1991—2007 гг. уже при наработках до 15 тыс. ч в два-три раза превышает интенсивность отказов секций изготовления до 1991 г. При одинаковой конструкции и близких условиях эксплуатации снижение надежности трубных систем ПГ-28 может быть обусловлено технологическими проблемами при их изготовлении.

### Результаты материаловедческих исследований трубных систем

В 2004 г. специалисты ФГУП «ЦНИИ конструкционных материалов «Прометей», ОАО «Московское машиностроительное предприятие им. В. В. Чернышева» и ОАО СКБК проводили работы по поиску сквозных дефектов в секциях трубной системы ПГ № 3, демонтированной с ледокола «Вайгач» после обнаружения в ней межконтурных течей при наработках 67—70 тыс. ч.

По результатам исследования были обнаружены области течи — узлы приварки питательных коллекторных труб. Люминесцентный контроль одной из коллекторных труб выявил на ее наружной поверхности поперечную трещину. При этом по результатам проведенных затем исследований в остальных частях трубной системы повреждений не обнаружено. Были сделаны следующие выводы:

- Сквозная поперечная трещина, выявленная в коллекторной трубе на некотором расстоянии от сварного соединения с втулкой резьбового соединения (РПС), зародилась на внешней поверхности, причем признаков коррозионной повреждаемости в развитии трещины не обнаружено.
- Зарождение и развитие внешней трещины происходило под действием циклических нагрузок преимущественно изгибающего характера.

- Основными факторами концентрации напряжений при зарождении внешней усталостной трещины послужили: резкое изменение в осевом направлении площади сечения и изгибной жесткости в области сварного соединения, наличие вставки («усика»), оконечность которой могла механически взаимодействовать с внутренней поверхностью коллекторной трубы, локальное ослабление несущего сечения из-за ранее образовавшейся на внутренней поверхности сетки трещин.
  - Весьма жесткая с механической точки зрения конструкция соединения коллекторной трубки с втулкой все же не была первопричиной систематической повреждаемости этого узла. Указанные конструкционные особенности, безусловно, ускорили усталостное разрушение, но инициировалось оно охрупчиванием материала в ходе эксплуатации ПГ № 3 из-за интенсивного накопления водорода в локальных областях трубок вблизи сварного шва (локальная концентрация водорода в области повреждения почти на порядок превышает концентрацию водорода в остальных узлах трубной системы). Охрупчивание материала явилось также причиной образования сетки трещин на внутренней поверхности коллекторной трубы.
  - Анализ конструкции трубной системы ПГ № 3 показал, что верхняя часть коллекторной трубы, включая и ее сварное соединение с втулкой РПС, находится в области затрудненной циркуляции воды первого контура, так как эта вода в рассматриваемой области заполняет лишь очень узкий слой вокруг трубы. Это значительно ослабляет теплообмен, т. е. формирует область пониженной температуры, близкой к температуре питательной воды — 105°C на всем протяжении застойной зоны почти до участка искривления коллекторной трубы.
- В связи с возникновением межконтурных разгерметизаций во вновь установленных трубных системах парогенераторов ледокола «Россия» при наработках 3,5—15 тыс. ч и сроке эксплуатации от одного до четырех лет было принято решение о проведении исследований поврежденных образцов коллекторных труб, вырезанных из этих трубных систем. Было установлено следующее:
- на внутренней поверхности поврежденного фрагмента коллекторной трубы отмечены цвета побежалости, по интенсивности близкие к предельно допустимым;

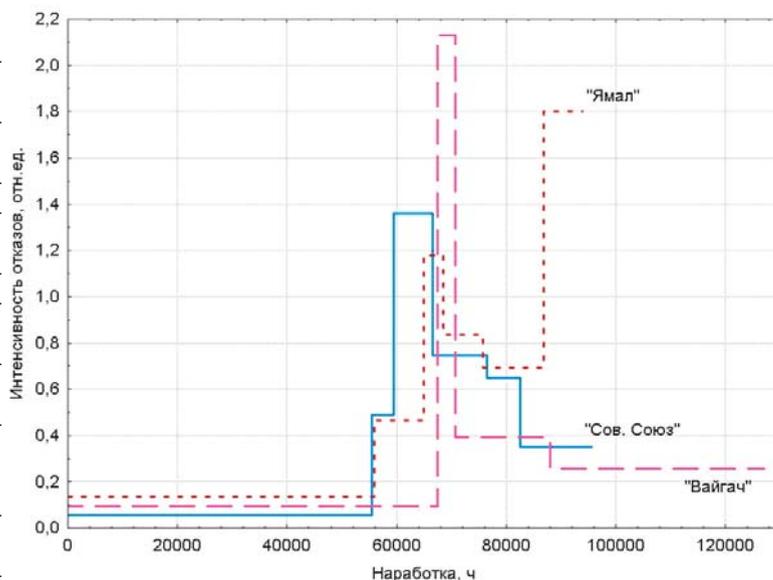


Рис. 2. Эмпирические зависимости интенсивности отказов секций трубных систем ПГ-28

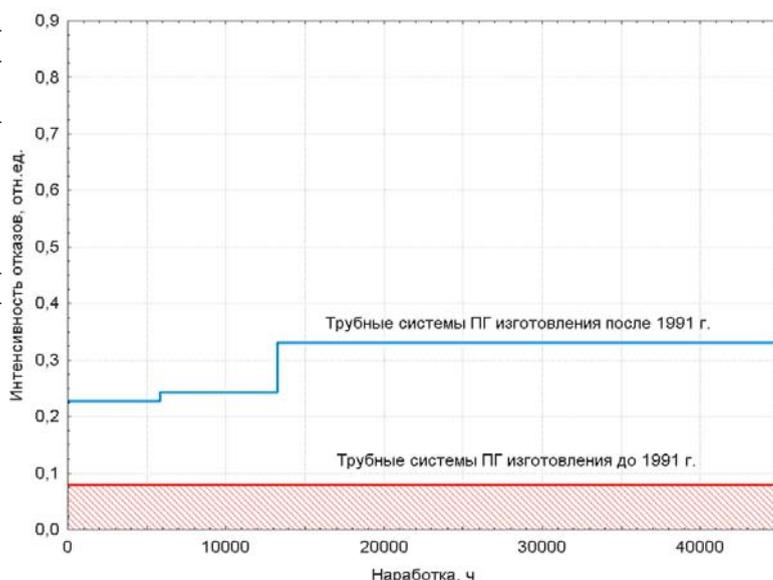


Рис. 3. Эмпирические функции интенсивности отказов секций трубных систем ПГ-28 различных периодов изготовления

- анализ распределения водорода и оценка локальной пластичности металла труб вблизи зоны повреждения, а также фрактографический анализ поверхностей разрушения свидетельствуют о том, что основным фактором деградации материала в этой зоне является чрезмерное содержание водорода;
- по степени наводороживания, характеру и расположению изломов исследованные дефекты оказались сходными с дефектами, обнаруженными в трубной системе ПГ № 3 ледокола «Вайгач» за исключением того, что очаг зарождения сквозных усталостных трещин находился не на наружной, а на внутренней поверхности коллекторных труб.



Рис. 4. Фотография трещины секции трубной системы ПГ № 3 на ледоколе «Россия», выполненная с помощью видеоэндоскопа ВД-6-300

В дополнение к ранее исследованным негерметичным секциям парогенераторов ПГ-28 исследовались одна герметичная и одна негерметичная секции ПГ.

По результатам исследований было установлено следующее:

- расположение сквозного дефекта коллекторной трубы питательной воды негерметичной секции на 6—8 мм ниже края сварного шва в области с максимальным содержанием водорода и отсутствие макроскопических признаков пластичности в месте разрушения полностью воспроизводят особенности поврежденности ранее исследованных негерметичных секций ПГ-28 ледоколов «Вайгач» и «Россия»; по мере удаления от шва более чем на 70 мм содержание водорода в данной секции снижается (рис. 4);
- в коллекторной трубе герметичной секции содержание водорода всюду в 1,5—2 раза превышает допустимый уровень, но в пробке РПС этой секции содержание водорода не превышает допустимого уровня;
- локальное скопление водорода в материале коллекторных труб вблизи шва предшествует их сквозному разрушению;
- на исследованных герметичной и негерметичной секциях трубной системы ПГ-28 цветов побежалости в области приварки коллекторной трубы к РПС не обнаружено;
- в отличие от коллекторных труб ПГ-28 ледокола «Вайгач» после длительной эксплуатации на внутренней поверхности исследованных коллекторных труб секций ПГ-28 ледокола «Россия» не обнаружено никаких поверхностных трещин;

- на наружной и внутренней поверхностях коллекторных труб обеих исследованных секций присутствуют несмываемые темные отложения.

#### Экспертная оценка возможных механизмов разрушения трубных систем парогенераторов ПГ-18Т и ПГ-28

Рассмотрим разрушения, вызванные малоцикловой усталостью, наличие которой убедительно подтверждается результатами исследований, проведенных в ЦНИИ КМ «Прометей» на элементах, вырезанных из трубных систем ледоколов «Вайгач» и «Россия». В коллекторных трубах систематически возникают сквозные трещины в районе «уса» сварных соединений приварки коллекторных труб к втулкам. На первоначальном этапе развитие трещин носит усталостный характер, а затем завершается хрупким доломом. Первопричиной возникновения сквозных трещин является локальное водородное охрупчивание материала коллекторных труб вблизи шва, вызванное аномально высоким содержанием водорода.

Такое высокое содержание водорода впервые отмечено за 50-летнюю практику эксплуатации и исследований парогенераторов из титановых сплавов транспортных установок. До этого считалось, что максимально ожидаемое наводороживание титановых сплавов парогенераторов атомных ледоколов за ресурс 175 тыс. ч не приводит к снижению кратковременных механических свойств титановых сплавов ПТ-7М и ПТ-3В и их сварных соединений в диапазоне температур 20—3000°C, а изменения длительной прочности и пластичности незначительны [2].

Конкретный механизм и кинетика насыщения коллекторных труб и пробок РПС водородом до

концентраций, почти на порядок превышающих ожидаемые, при разбросе отказов во времени от 3,5 тыс. до 125,5 тыс. ч с близкими условиями эксплуатации ПГ требуют дополнительного анализа.

Практически не изучались также разрушения титанового сплава ПТ-7М по механизму малоциклового коррозионной усталости. Предположительно они развиваются в следующей последовательности:

- в процессе длительного периода циклического нагружения (инкубации), во время которого в месте будущего разрушения накапливаются дефекты структуры (микрорастительная деформация), возникают микротрещины, в вершине которых образуется неспассивированная (свободная от окислов) поверхность;
- титан в неспассивированном состоянии обладает высокой коррозионной активностью и интенсивно взаимодействует со средой, причем скорости коррозии достаточно велики даже в относительно чистой воде первого контура;
- при коррозии выделяется водород, часть которого диффундирует в металл, причем из-за относительно низкой температуры в районе разрушения заметного оттока водорода вглубь металла не происходит, и формируется зона повышенной концентрации водорода;
- в этой зоне в соответствии с фазовой диаграммой Ti — H<sub>2</sub> [3] выделяются гидридные фазы и происходит охрупчивание металла;
- скорость развития трещины в охрупченном металле заметно увеличивается, соответственно увеличивается площадь неспассивированной поверхности в вершине трещины и, следовательно, количество выделяющегося водорода и хрупкой гидридной фазы, что приводит к еще большему ускорению процесса циклического разрушения.

Наличие хрупкого газонасыщенного (альфированного) слоя, появление которого можно связать с недостаточным поддувом аргона при сварке, приводит к заметному уменьшению продолжительности инкубационного периода. Трещина может появиться в самом начале циклического нагружения, и, соответственно, время до появления сквозного разрушения резко сокращается. Этим скорее всего объясняется ранняя разгерметизация трубных систем парогенераторов, установленных на ледоколе «Россия» в 2006 г. Течи появились спустя 3,5—14 тыс. ч. Характерно, что трещины начинались со стороны внутреннего диаметра труб, где уровень усталостного нагружения ниже, зато отмечается заметное окисление поверхности. Разброс во времени появления течей ПГ на других ледоколах может быть связан с различием амплитуды цикла нагружения, т. е. с величиной усталостных напряжений, которая определяется особенностями трассировки трубных элементов. Чем больше отклонение координат трассировки от номинальных значений, тем меньше инкубация и тем раньше возникает сквозное повреждение. Причиной отклонений могут быть технологические

отступления, такие как изгибы, монтажные натяги, утяжка при сварке и т. п.

### Заключение

1. Анализ статистических данных по эксплуатации атомных судов показывает следующее:

- Конструкция трубных систем ПГ позволяет достигать наработки без отказов более 170 тыс. ч.
- До наработки 50—60 тыс. ч интенсивности отказов секций трубных систем ПГ всех атомных судов существенно не различаются, что свидетельствует о правильности принятых конструкторских решений и выбора величины первоначально назначенного ресурса трубных систем ПГ (60 тыс. ч).
- После наработки 50—60 тыс. ч для ПГ отдельных атомных судов наблюдается резкое возрастание (в 10—20 раз) интенсивностей отказов секций трубных систем как ПГ-18Т, так и ПГ-28 с последующим снижением интенсивности отказов после наработки 70—80 тыс. ч.
- У трубных систем ПГ-28 изготовления 1991—2007 гг. уже при наработках до 15 тыс. ч проявляются массовые отказы секций. Их интенсивность в несколько раз превышает интенсивность отказов для ПГ-28 изготовления до 1991 г. Очевидно, что при одинаковой конструкции и близких условиях эксплуатации это может быть связано с нарушениями технологии изготовления трубных систем ПГ.

2. Предположительно отступления от технологии изготовления трубных систем связаны с нестабильностью геометрических размеров погиба, в отдельных случаях, возможно, превышающих требования конструкторской документации. Данные отступления определяют частоту и амплитуду усталостного нагружения, возникающего при теплосменах и вибрации трубных элементов.

3. В части нарушения технологических процессов следует обратить внимание на технологию сварки. По всей видимости, отказы трубных систем ПГ при малых наработках (3,5—14 тыс. ч) обусловлены образованием газонасыщенного хрупкого слоя на поверхности коллекторной трубы из-за недостаточно эффективной газовой защиты при выполнении сварки.

4. Для уточнения причин, вызывающих отказы трубных систем вследствие аномально высокого наводороживания титана при малых наработках и принятия мер по исключению этих причин, целесообразно проведение исследований малоциклового усталости титанового сплава, дополнительных испытаний имитаторов сварного соединения и стендовых испытаний модели верхней части ПГ-28.

### Литература

1. Кашка М. М., Мантула Н. В., Пономаренко А. В. Опыт и перспективы эксплуатации в Арктике атомного ледокольного флота России // Арктика: экология и экономика. — 2012. — № 3 (7).
2. Колачев Б. А., Ливанова В. А., Буханова А. А. Механические свойства титана и его сплавов. — М.: Металлургия, 1974.
3. Вол А. Е. Строение и свойства двойных металлических систем. — Т. 2. — М.: Физматгиз, 1962.