

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель генерального  
директора, научный руководитель ОАО  
«ВТИ», доктор технических наук

А.Г. Тумановский  
«03» ноября 2015 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации Открытого Акционерного Общества «Всероссийский Теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО «ВТИ») на диссертационную работу Мурманского Б.Е. «Разработка, апробация и реализация методов повышения надежности и совершенствования системы ремонтов паротурбинных установок в условиях эксплуатации», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки.

Представленная на отзыв диссертация состоит из введения, 8 глав, заключения, библиографического списка из 347 наименований. Диссертация изложена на 407 страницах и содержит 92 рисунка и 30 таблиц.

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен аналитический обзор литературных данных по теме исследования. Сформулированы и обоснованы основные задачи исследования.

**Во второй главе** представлены результаты разработки общей концепции комплексной системы повышения надежности паротурбинных установок (ПТУ) в условиях эксплуатации.

В рамках предложенной автором концепции разработаны основы комплексного подхода к сбору и обработке информации по надежности оборудования ПТУ. Представлены результаты апробации предложенного подхода, выполненного по 30 ПТУ мощностью от 100 до 300 МВт.

На основе статистического анализа данных эксплуатации ПТУ разработана методика определения основных элементов, лимитирующих надежность конкретных агрегатов. В качестве критерия при определении приоритетных направлений повышения надежности оборудования предложено применять удельную величину затрат на повышение общей надежности оборудования ПТУ в целом.

Представлены результаты разработки концепции комплексной системы мониторинга состояния оборудования ПТУ, позволяющей на основе единых принципов разрабатывать и реализовывать модули мониторинга для узлов турбины и вспомогательного оборудования турбоустановки.

**В третьей главе** представлены результаты исследования приоритетных направлений повышения надежности работы турбин и турбинного оборудования на основе статистического анализа данных эксплуатации и ремонта ПТУ.

Представлены собранные и обработанные автором статистические данные, а также результаты анализа причин отказов турбин и турбинного оборудования ПТУ мощностью от 100 до 800 МВт различных типов за период их эксплуатации, превышающий 25 лет.

При анализе отказов турбин они объединены в выборки по элементам, вызвавшим отказ.

Количественная оценка показателей надежности и построение функций плотности распределения характеристик отказов элементов турбин выполнена методом ядерной оценки, что целесообразно при обработке массивов малой размерности. Анализ показателей надежности выполнен по всем турбинам в целом и отдельно по каждому типу турбин. Используются два основных показателя: удельное число отказов узла на одну турбину данного типа в год (показатель безотказности) и среднее время восстановления из-за повреждения этого узла (показатель ремонтпригодности).

На основе собранной и обобщенной автором информации сформулированы перечни характерных (типовых) повреждений элементов турбин и их причин, а также изменения в состоянии оборудования ПТУ, которые наблюдаются при этих повреждениях.

На основе анализа ремонтной документации по 39 турбинам различных типо-размеров различных турбинных заводов определен перечень дефектов, выявленных в процессе ремонтов турбин и турбинного оборудования (в т.ч. арматуры, трубопроводов, теплообменников и др.).

На основе предложенной автором методики комплексного статистического анализа надежности работы оборудования ПТУ в различных условиях эксплуатации определены критические\_(наиболее повреждаемые) элементы, лимитирующие надежность ПТУ.

**В четвертой главе** представлены результаты разработки и реализации методов повышения надежности работы и снижения затрат на ремонт систем парораспределения и автоматического регулирования турбин в условиях эксплуатации.

На основе анализа причин неплановых остановов турбин и анализа отчетной документации по устранению выявленных дефектов показано, что основной причиной являются дефекты гидродинамических систем автоматического регулирования и защит, возникающие из-за износа конструкции.

Обоснована целесообразность для турбин малой мощности, имеющих большой износ гидродинамических систем регулирования, замены и реконструкции этих систем с переходом на микропроцессорные электрогидравлические системы; при этом создается возможность реализации в составе комплексной системы мониторинга ПТУ модуля САР и 3.

Показано, что большинство отказов систем парораспределения теплофикационных турбин вызвано повреждениями кулачкового механизма парораспределения.

Представлены результаты разработки и апробации специальной технологии нанесения раствора эпилама на поверхности трения в подшипниках качения, обеспечивающей полную обработку сепаратора и роликов подшипника; при этом обеспечивается упрочнение их поверхности, придание ей антикоррозионных и антифрикционных свойств.

**В пятой главе** представлены результаты разработки и реализации методов повышения надежности работы и снижения затрат на ремонт системы «ротор-подшипники»

Представлен обобщенный материал по видам и причинам повреждений баббитовой заливки подшипников.

На основе обобщения опыта реализации систем вибрационного мониторинга турбин предложены методические основы создания подсистемы мониторинга вибрационного состояния турбин, как одного из модулей комплексной системы мониторинга ПТУ. Представлены результаты разработки двух основных режимов функционирования модуля вибромониторинга: диагностика вибросостояния турбоагрегата после ремонта и эксплуатационная диагностика. Сформирован список из 34 дефектов и относящимся к ним 104 диагностическим признакам по дефектам роторов, подшипников и других узлов турбоагрегата, которые вызывают изменение его вибрационного состояния.

Предложена методика автоматизации процесса поиска дефектов в подсистеме мониторинга вибрационного состояния турбоагрегата; все признаки структурированы.

Представлены результаты исследований автора по подбору состава вещества, обладающего способностью изменять смачиваемость поверхности вала; разработана специальная технология нанесения вещества (на основе эпилама Эфрен-1) на шейки роторов турбин. Апробация предложенной разработки, выполненная на роторах 20 турбин, подтвердила ее высокую эффективность.

**В шестой главе** представлены результаты разработки методов повышения надежности работы систем тепловых расширений (СТР) турбин.

Показано, что реализация регламентных мероприятий согласно РД 34-30-506-90 дает лишь временный результат. В развитие ранее известных методов автором предложен и апробирован ряд новых методов повышения надежности работы СТР турбин.

Представлены результаты разработки аналитической и конечно – элементной моделей для анализа процессов, происходящих в СТР турбин при температурном перекосе на фланцах турбины. По результатам моделирования сформулирован и обоснован ряд рекомендаций по конструированию новых и эксплуатации действующих элементов СТР турбин.

**В седьмой главе** представлены результаты разработки и реализации методов повышения надежности работы и совершенствования ремонта вспомогательного оборудования ПТУ.

Сформулированы параметры качества и состояния, условия работоспособности для насосного оборудования ПТУ.

Для оптимизации сроков замены трубных пучков теплообменных аппаратов ПТУ разработана и апробирована методика, позволяющая определить необходимость и обосновать целесообразность их замены. Разработаны две статистические модели для определения оптимальных сроков замены трубных систем конденсаторов паровых турбин. Апробация разработанной методики выполнена на 12 конденсаторах турбин мощностью от 25 до 500 МВт

**В восьмой главе** представлены результаты разработки мероприятий по совершенствованию системы ремонта и технического обслуживания оборудования ПТУ; сформулированы рекомендации по оптимизации ремонта для ряда элементов ПТУ: турбины, теплообменных аппаратов, арматуры, трубопроводов.

Обоснована целесообразность перехода к регламентному поузловому ремонту турбин. На основе обобщения результатов исследования определены количественное и качественное распределение повреждений деталей турбин (и ПТУ) в течение межремонтного периода, а также распределение их причин.

**В диссертационной работе получен ряд новых научных результатов,** наиболее важными из которых представляются следующие:

- разработаны принципиальные положения концепции повышения надежности оборудования ПТУ в условиях эксплуатации;
- предложена и разработана методика комплексного анализа повреждаемости оборудования с учетом дефектов, приведших к его отказам, а также дефектов, обнаруженных во время ремонтов; данная методика позволяет также определять элементы оборудования, лимитирующие надежность ПТУ в целом;
- исследованы и разработаны методы и технологии повышения надежности и увеличения межремонтного периода для опорных подшипников и систем парораспределения турбин в условиях эксплуатации;
- сформулированы, обобщены и структурированы признаки для диагностированы 34 характерных дефектов турбоагрегатов, приводящих к изменению его вибросостояния;
- разработаны и прошли апробацию модели для оценки усилий в элементах системы тепловых расширений паровых турбин при возникновении разности температур на фланцах цилиндра;
- предложены, разработаны, исследованы и прошли апробацию статистические модели оценки состояния и прогнозирования остаточного ресурса теплообменных аппаратов ПТУ;
- сформулированы и обоснованы основные параметры подсистем мониторинга для ряда узлов турбины и вспомогательного оборудования ПТУ, каждый из которых является элементом комплексной системы мониторинга ПТУ;
- обосновано, что система ремонта и технического обслуживания оборудования ПТУ должна предусматривать применение (использование)

индивидуальных стратегий ремонта для каждой конкретной технологической подсистемы ПТУ с учетом конкретных условий эксплуатации.

**Практическая значимость** рассматриваемой диссертационной работы определяется тем, что основные результаты работы уже реализованы на предприятиях энергомашиностроения и энергетики. Отдельные результаты разработок, которые прошли апробацию и имеют положительный опыт эксплуатации, безусловно могут быть использованы при проектировании новых ПТУ, а также при модернизации действующих ПТУ в условиях эксплуатации.

Обобщенные результаты рассматриваемой диссертации уже используются рядом ТЭС при совершенствовании систем технического обслуживания и ремонта оборудования ПТУ. **Реализация** (внедрение) основных результатов исследования и разработок осуществлена на 49 ПТУ на различных ТЭС РФ.

Следует отметить, что основные результаты рассматриваемой диссертации использованы при написании ряда монографий, справочников, а также учебной и учебно-методической литературы, которая используется для подготовки, переподготовки и повышения квалификации специалистов-энергетиков и энергомашиностроителей.

**Достоверность и обоснованность результатов работы** определяется использованием современных методов исследования, хорошей воспроизводимостью опытных данных, полученных при натурных испытаниях, апробацией и подтверждением результатов исследований, длительным опытом эксплуатации ПТУ, на которых реализованы разработки.

#### **Замечания по работе**

1. В главе 2 предложено определять приоритетность направлений работ по повышению надежности ПТУ на основе статистического анализа повреждаемости, а в тех случаях, когда у одной и той же установки выявлен ряд узлов, лимитирующих надежность, то приоритетность выполнения работ по ним предложено определять на основе технико-экономического анализа. Предложены критерии для таких расчетов. Однако, в работе не представлены примеры таких расчетов, что было бы очень наглядно.

2. В третьей главе представлены результаты анализа поврежденных узлов турбин и турбинного оборудования в условиях эксплуатации и ремонта. Однако отсутствует единообразие при анализе повреждаемости различных узлов, а у ряда узлов не рассмотрены признаки, сопровождающие возникновение повреждения.

3. В третьей главе приведены результаты исследования повреждений турбин, показано распределение причин повреждений, но отсутствует пояснение каким образом эти причины повреждений были установлены.

4. В главах 4 и 5 представлены результаты исследований по применению растворов эпилама для повышения надежности узлов парораспределения и протечек масла из подшипников турбин. Исчерпываются ли этим возможности применения эпилама в узлах турбин?

5. В гл. 6 представлены разработанные автором две модели для анализа процессов, происходящих в системах тепловых расширений турбин. Представленные результаты не исчерпывают возможности данных моделей.

Было бы целесообразно смоделировать влияние других факторов, кроме температурного перекося по фланцам цилиндров турбины.

Указанные замечания не снижают научной и практической значимости работы в целом.

Диссертационная работа выполнена на современном научном уровне. Все основные результаты исследований и разработок соответствуют современным физическим и научно-техническим представлениям и их следует признать правильными.

Все основные результаты работы опубликованы в центральной печати (25 публикаций в изданиях по списку ВАК; 4 патента; справочник, монография, 4 учебных пособия для студентов вузов) и неоднократно обсуждались на различных конференциях и совещаниях специалистов-энергетиков и энергомашиностроителей.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

#### **Выводы.**

1. Диссертация Б.Е. Мурманского актуальна, она соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники РФ, а также критическим технологиям РФ из перечня, утвержденного Указом Президента РФ № 899 от 07.07.2011 г.

2. В работе получен целый ряд новых научных результатов.

3. Все основные результаты исследований и разработок прошли апробацию в энергетике; длительный опыт эксплуатации подтверждает большую практическую значимость всех основных разработок.

4. Диссертация полностью соответствует паспорту научной специальности 05.04.12 – Турбомашин и комбинированные турбоустановки.

5. Совокупность полученных в диссертации результатов представляет собой комплекс новых научно обоснованных технических решений, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие энергетической и энергомашиностроительной отраслей России. Диссертация полностью соответствует п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК, предъявляемых к докторским диссертациям, а ее автор – Б.Е. Мурманский заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.04.12 – Турбомашин и комбинированные турбоустановки.

Отзыв обсужден и одобрен на научно-техническом совете отделения турбинных установок ОАО «ВТИ» (протокол №8 от 03 ноября 2015 г.).

Председатель НТС  
Заведующий отделением  
турбинных установок, к.т.н.

  
В.Ф. Гуторов

Заведующий лабораторией  
Парогазовых установок, д.т.н.

  
П.А. Березинец