

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента

на диссертационную работу Сосновского Андрея Юрьевича на тему: «Повышение надёжности систем тепловых перемещений выносных корпусов подшипников паровых турбин», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.7

Турбомашины и поршневые двигатели

Диссертационная работа посвящена вопросам обеспечения маневренности и надежной работы проектируемых паротурбинных установок и уже находящихся в эксплуатации на ТЭС.

Научное направление всех основных разработок и исследований, представленных в диссертационной работе, соответствует паспорту научной специальности 2.4.7 Турбомашины и поршневые двигатели

### **Актуальность темы диссертации**

Основным приоритетом государственной политики является максимально эффективное использование потенциала существующего энергетического комплекса для повышения качества жизни населения страны, устойчивого роста экономики. Для достижения поставленных целей необходимо обеспечить решение таких первоочередных задач, как обеспечение надежной работы энергооборудования во всем диапазоне возможных нагрузок.

Нарушения в работе элементов системы тепловых перемещений (СТП) выносных корпусов подшипников паровой турбины, возникающие в режимах пуска и изменения нагрузки турбины, приводящие к нарушению вибрационного состояния турбоагрегата, повреждению радиальных и осевых уплотнений, опорных и упорных подшипников и ряда других элементов ограничивают маневренность турбоустановки, а в отдельных случаях и ее располагаемую мощность.

Разработка и реализация мероприятий по предотвращению нарушений в работе системы тепловых перемещений проводится с момента создания многоцилиндровых турбин. В 80-е годы прошлого века все разработанные мероприятия были отражены в РД 34.30.506-90: Методические указания по нормализации тепловых расширений цилиндров паровых турбин тепловых электростанций. Однако, опыт эксплуатации турбин, на которых были выполнены рекомендации этого РД, показал, что полностью исключить случаи нарушений в работе системы тепловых перемещений не удалось.

Таким образом исследования по определению факторов, влияющих на надежность работы систем тепловых расширений паровых турбин, разработка подходов к диагностированию работы этой системы, которые направлены на обеспечение надежной эксплуатации и проектной маневренности турбин являются актуальными.

Работа соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники РФ (энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика), а также критическим технологиям РФ (технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе) из перечня, утвержденного Указом Президента РФ № 899 от 07.07.2011.

Именно поэтому работа Сосновского А.Ю., посвященная решению проблемы обеспечения надёжности систем тепловых перемещений выносных корпусов подшипников паровых турбин, является своевременной и актуальной.

### **Научная новизна и значимость работы**

Научная новизна и значимость диссертационной работы заключается в разработке, апробации и внедрении в эксплуатацию комплекса методических и практических рекомендаций, позволяющих решать проблемы повышения надежности и совершенствования систем тепловых перемещений выносных корпусов подшипников паровых турбин:

- впервые показано и обосновано, что задачу повышения надёжности работы СТП паровых турбин необходимо рассматривать как комплекс инженерных и информационных решений, позволяющий учесть все важнейшие факторы, определяющие взаимодействия элементов СТП;
- выявлено, что ранее не учитываемыми причинами недопустимого изменения уклона ригеля являются дополнительные силы сопротивления перемещению выносных корпусов подшипников, возникающие при контакте боковых поверхностей паза в подошве корпуса подшипника с направляющими осевого перемещения; при этом наиболее неблагоприятным является «диагональный» контакт, когда обе боковые поверхности паза контактируют с направляющими осевого перемещения;
- разработана универсальная кинематическая модель системы цилиндр-подшипник-фундамент и на основе выполненного моделирования определены условия устойчивости для различных конструкций СТП; разработана диаграмма устойчивости для оценки устойчивости СТП к внешнему воздействию;
- разработана концепция модуля автоматизированной оперативной диагностики СТП, обоснован перечень параметров, необходимых для достоверной диагностики нарушений в работе СТП, сформулированы алгоритмы для определения наличия признаков дефектов. Разработаны контрольные примеры для проверки правильности реализации алгоритмов в программно-аппаратном комплексе АСУ ТП.

### **Практическая значимость полученных результатов**

В диссертационной работе разработаны универсальная кинематическая модель системы цилиндр-подшипник- фундамент и аналитическая модель взаимодействия цилиндра турбины, выносного корпуса подшипника и направляющих осевого перемещения при возникновении

температурного перекося по фланцам цилиндра турбины, позволяющие на стадии проектирования новой турбины выбрать геометрические характеристики элементов СТП обеспечивающие её устойчивость к внешним воздействиям и отсутствие затруднений в работе СТП. Предложена новая конструкция направляющих осевого перемещения выносных корпусов подшипников паровой турбины. Результаты исследования применяются при проектировании и изготовлении паровых турбин, а также разработаны рекомендации, обеспечившие надёжную работы СТП 18 паровых турбин, находящихся в эксплуатации. Разработанные элементы модуля диагностики СТП, реализованы в ПАО «Северсталь».

### **Обоснованность и достоверность результатов работы**

При выполнении исследований и решении поставленных в работе задач корректно использовались современные методы исследования и методы математического моделирования. Кроме того, обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждена апробацией и положительными результатами практического использования предложенных решений по нормализации тепловых перемещений корпусов подшипников паровых на действующем оборудовании мощностью от 50 до 300 МВт; многократной повторяемостью результатов опытов, выполненных в различных условиях эксплуатации.

### **Общая характеристика работы**

Диссертационная работа изложена на 325 страницах и состоит из введения, 8 глав, заключения, библиографического списка из 158 наименований,

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены направление и цель исследований, показаны научная и практическая значимость полученных результатов, обоснована их достоверность.

В первой главе представлены результаты анализа публикаций по вопросам конструкции элементов СТП и организации работы системы в целом, анализа основных известные причин нарушений нормальной работы СТП разработки мероприятий по нормализации тепловых перемещений корпусов подшипников. Сделан вывод о недостаточной изученности причин и механизмов возникновения затруднённых перемещений и сформулированы основные задачи исследования.

Во второй главе представлены предложенная автором концепция обеспечения надёжности СТП и результаты исследования влияния на надёжность СТП различных факторов.

Обосновано, что универсальным критерием, определяющим надёжность СТП, является угловое положение верхней поверхности ригеля фундамента под КП. На основе результатов анализа взаимодействия элементов системы «турбина-фундамент-основание» определены основные факторы, оказывающие влияние на изменение уклона ригеля.

Представлены результаты исследования влияния различных факторов на величину уклона ригеля и на основе этих исследований показано, что основной причиной нарушения

надёжности функционирования СТП, для новых турбин и турбин после капитального ремонта, являются силы сопротивления перемещению выносного корпуса подшипника, возникающие в паре «КП – продольная шпонка».

В третьей главе представлены результаты исследования по определению условий, при которых нарушается надёжность функционирования СТП.

Представлены результаты анализа четырех вариантов взаимодействия КП и продольных шпонок в паре «КП - продольная шпонка». На основе результатов натурных обследований турбин имеющих нарушения в работе СТП обосновано, что разность перемещений левой и правой сторон КП превышала пределы обусловленные зазорами между продольными шпонками и боковыми гранями паза в подошве КП.

Приведены результаты выполненных автором натурных и расчётных исследований влияния трубопроводов и показано, что влияние могут иметь маслопроводы, присоединённые к КП. По результатам анализа обоснована необходимость определения условий, при которых исключено возникновение «диагонального» контакта в паре «КП – продольная шпонка».

В четвертой главе представлены результаты разработки обобщённой универсальной модели взаимодействия цилиндров турбины, КП и фундамента турбины. На основе моделирования с использованием предложенной модели рассмотрены условия устойчивости традиционной конструкции СТП для одноцилиндровых и многоцилиндровых турбин.

Представлены результаты определения границ устойчивости для ЦВД различных типоразмеров турбин УТЗ и построена диаграмма устойчивости для этих турбин. Определены условия устойчивости для ряда вариантов сочленений цилиндров турбин.

В пятой главе представлены результаты исследования условий устойчивости СТП к температурному перекосу по фланцам цилиндра.

Показана разработанная автором аналитическая модель, которая позволяет оценить величину усилий реакции, действующих со стороны продольных шпонок на КП в зависимости от величины температурного перекоса по фланцам цилиндра турбины. Представлены результаты верификации этой модели, разработанной автором, для выполнения анализа методом конечных элементов. Обоснована возможность выполнения предварительных конструкторских расчетов при проектировании турбин с помощью аналитической модели.

В шестой главе представлены результаты исследования эксплуатационных характеристик известных вариантов конструкций направляющих осевого перемещения. Представлена конструкция разработанной автором направляющей осевого перемещения, минимизирующая возможность возникновения пластических деформаций в паре «КП-продольные шпонки».

В седьмой главе представлены результаты разработки концепция автоматизированного диагностику дефектов СТП. Представлены результаты исследования объёма и периодичности контроля параметров состояния турбины

необходимого для диагностики. Сформулированы требования обеспечения достоверного диагностирования. Представлены примеры алгоритмов для выявления дефектов и примеры для контроля правильности работы алгоритмов.

В восьмой главе представлены результаты апробации и реализации разработанных в ходе исследования решений. Сформулированы рекомендации по повышению надёжности СТП как для находящихся в эксплуатации, так и для вновь проектируемых турбин и турбоустановок на основе комплекса мероприятий, разработанных в ходе исследования.

По представленной диссертационной работе имеется ряд замечаний и вопросов:

1. В главе 5, для аналитической модели автор принял допущение, что зазоры на поперечных шпонках отсутствуют. Тем не менее эти зазоры могут оказывать влияние на устойчивость системы тепловых перемещений к температурному перекоосу. Почему автор не стал рассматривать влияние изменения величин этих зазоров?
2. Большой раздел диссертации посвящён моделированию поведения систем тепловых перемещений при температурных перекоосах фланцев цилиндра, что является очень важным, т.к. происходит достаточно часто в условиях эксплуатации. При этом на практике всех турбинах производства России отсутствует возможность оперативного изменения температуры одного из фланцев. Было бы целесообразно рассмотреть способы регулирования температурного перекооса.
3. Предложенный автором перечень диагностируемых дефектов системы тепловых перемещений представляется неполным. В дальнейшем его следует расширить, добавив обрыв вертикальной шпонки, неравномерное распределение нагрузок на лапы цилиндра и др.
4. В ряде новых турбин, в т.ч. в турбине Т-63-8,8 УТЗ цилиндр турбины опирается не на корпус подшипника, а на выносные тумбы. Необходимо пояснить, справедливы ли предложенные автором алгоритмы выявления дефекта для указанной конструкции системы тепловых перемещений.
5. В работе введён ряд новых понятий и терминов: величина эффективного зазора на продольной шпонке; граница самоторможения диаграмма устойчивости. Было бы целесообразно для удобства восприятия вынести эти понятия и их определения в отдельный перечень.

Указанные замечания не снижают научной и практической ценности диссертационной работы Сосновского А.Ю.

Содержание автореферата полностью соответствует диссертации. Результаты диссертации опубликованы в 27 статьях, в т.ч. 12 статей в научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ; представленные разработки защищены патентом полезную модель.

Считаю, что диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.4.7 Турбомашины и поршневые двигатели и требованиям п. 9 Положения о присуждении учёных степеней в УрФУ, а диссертант Сосновский Андрей Юрьевич заслуживает присвоения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.7 Турбомашины и поршневые двигатели.  
Официальный оппонент:

доктор технических наук, профессор, начальник аналитического отдела ОАО «Научно - производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И. И. Ползунова».

191167, г. Санкт-Петербург, ул. Атаманская, д. 3/6, ОАО «НПО ЦКТИ»

\_\_\_\_\_ 0 \_\_\_\_\_ Хоменок Леонид Арсеньевич

«03» \_\_\_\_\_ 10 \_\_\_\_\_ 2023г.

Подпись Хоменка Леонида Арсеньевича заверяю:

Ученый секретарь диссертационного совета ОАО «НПО ЦКТИ»



\_\_\_\_\_ Сухоруков Юрий Германович

\_\_\_\_\_ 10 \_\_\_\_\_ 2023г.