

0- 775309

На правах рукописи



Бусаров Андрей Владимирович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ  
КЛЕПАНОГО СОЕДИНЕНИЯ ЛОПАТОК ГТУ**

05.11.13 - Приборы и методы контроля природной  
среды, веществ, материалов и изделий

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Казань – 2009

Работа выполнена в  
ГУО ВПО «Казанский государственный энергетический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
Ваньков Юрий Витальевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Голенищев-Кутузов  
Александр Вадимович

кандидат технических наук, профессор  
Ившин Игорь Владимирович

Ведущая организация: ОАО КПП «Авиамотор»

Защита состоится «10» апреля 2009 года в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.082.01 при ГОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет», по адресу: 420066, Казань, Красносельская, 51, тел., факс (843) 519-42-55.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.082.01.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного энергетического университета, с авторефератом – на сайте <http://www.kgeu.ru>

Автореферат разослан «03» марта 2009г.



Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.082.01  
к. ф.-м. н., доцент

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Batanova'.

Батанова Н.Л.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Согласно данным ОАО «ГАЗПРОМ», общая протяженность магистралей системы газоснабжения составляет порядка 155 тыс. км. В ее состав входит также 268 компрессорных станций мощностью 44,8 млн. кВт. Основную часть компрессорного парка ОАО «Газпром» составляют газоперекачивающие агрегаты с газотурбинным приводом, из них мощностью 16 МВт около 32 %, число которых превышает 4 тыс. штук. Ежегодно производится капитальный и средний ремонт 1000-1200 газоперекачивающих агрегатов.

Опыт эксплуатации газоперекачивающих агрегатов показал, что дефекты клепаного соединения направляющих аппаратов существенно снижают их надежность. Разрушение хотя бы одного клепаного соединения в процессе эксплуатации приводит к значительным повреждениям проточной части газотурбинных двигателей, что существенно увеличивает стоимость его ремонта. По статистике вследствие разрушения клепаного соединения из строя выходит каждый пятый двигатель.

Контроль качества клепаных соединений производится в основном органолептически, что ведет к субъективизму в оценке дефектов и не позволяет выявлять скрытые дефекты клепаного соединения ввиду особенностей конструкции направляющих аппаратов. Существующие методы неразрушающего контроля имеют ряд недостатков применительно к контролю клепаного соединения.

Вышесказанное обуславливает актуальность диагностирования технического состояния клепаных соединений направляющих аппаратов газотурбинных двигателей неразрушающими методами контроля, как на этапе производства, так и в процессе эксплуатации и ремонта. Решение проблемы инструментального контроля клепаного соединения позволит решить задачу обоснованного прогнозирования сроков безотказной работы оборудования и назначения их ресурса в соответствии с фактическим состоянием направляющих аппаратов.

**Целью работы** является разработка методики и диагностического комплекса для проведения инструментального контроля качества клепаных соединений методом свободных колебаний в автоматическом режиме.

**Задачи исследования.** Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. На основе анализа литературных данных выбрать эффективный метод контроля клепаных соединений.
2. Создать математическую модель клепаного соединения лопатки с диском. Определить частотные диапазоны и информативные критерии наличия дефекта клепки.
3. Разработать информационно-измерительную систему и аппаратный комплекс для проведения контроля клепаного соединения дисков компрессоров высокого давления.
4. Экспериментально исследовать влияние дефектов клепки на частоты колебаний.

5. Создать методику инструментального контроля дисков направляющего аппарата газотурбинного двигателя.

**Достоверность результатов** обеспечивается использованием апробированного программного обеспечения для построения математической модели; стабильностью измеряемых характеристик свободных колебаний в повторных экспериментах при небольшом их рассеивании; сходимостью полученных результатов с данными, получаемых альтернативными методами контроля; применением аттестованных измерительных средств и апробированных экспериментальных методик.

**На защиту выносятся:**

1. Математическая модель расчета частот собственных колебаний годного и дефектного клепаного соединения.
2. Разработанный виброакустический диагностический комплекс.
3. Методика контроля клепаного соединения по параметрам виброакустического сигнала.
4. Виброакустический способ поиска и идентификации неудовлетворительной посадки лопатки в диск колеса.
5. Экспериментальные данные, подтверждающие эффективность применения разработанной методики контроля.

**Научная новизна:**

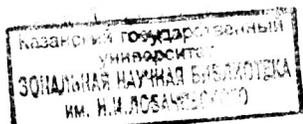
1. Создана математическая модель клепаного соединения и определены характерные частоты годного и дефектного клепаного соединения.
2. На основе теоретических и экспериментальных исследований обоснованы диагностические признаки для контроля клепаного соединения методом свободных колебаний.
3. Разработана методика инструментального контроля клепаного соединения на основе метода свободных колебаний.

**Практическая ценность работы** заключается в разработке системы регистрации, программного обеспечения, конструкторской документации комплекса на основе метода свободных колебаний, обеспечивающего обнаружение дефектов в клепаных соединениях в автоматическом режиме.

Применение разработанной методики в процессе неразрушающего контроля позволило улучшить качество направляющих аппаратов газотурбинных двигателей.

**Личный вклад автора.** Автор принимал непосредственное участие в создании математической модели клепаного соединения, разработке алгоритма анализа виброакустических сигналов, разработке и изготовлении измерительного комплекса, в создании программного обеспечения для анализа данных, проводил все измерения, первичную и статистическую обработку и анализ экспериментальных данных.

**Внедрение результатов исследования.** Методика контроля и диагностический комплекс для контроля клепаного соединения по параметрам виброакустического сигнала внедрены в производственный процесс Казанского моторостроительного производственного объединения для контроля направляющих аппаратов компрессоров газоперекачивающих агрегатов в



составе инструментального метода контроля клепаных соединений дисков газотурбинных двигателей. Имеется акт реализации научных исследований и решение № 1.390-08 о внедрении метода контроля направляющих аппаратов 4÷8 ступеней компрессора высокого давления изделий НК-16СТ, НК-16-18СТ в серийное производство.

**Публикации и апробация работы.** По теме диссертации опубликовано 14 работ, включая 2 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК, свидетельство об официальной регистрации программы, патент РФ на полезную модель.

Основные положения работы, научные и практические результаты докладывались и обсуждались на VIII – XI Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики» (МГУПИ, г. Сочи-Москва, 2005, 2006, 2007, 2008 г.), XVIII Всероссийской научно-технической конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике (НГТУ, Н. Новгород, 2008 г.), Международной научно-технической конференции «ЭНЕРГЕТИКА–2008: инновации, решения, перспективы» (КГЭУ, г. Казань 2008 г.); II, III Молодежной международной научной конференции «Тинчуриные чтения» (КГЭУ, г. Казань, 2007, 2008 г.); Всероссийской научной студенческой конференции по естественно-научным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодым» (МарГТУ, г. Йошкар-Ола, 2007, 2008 г.); XII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов (МЭИ, г. Москва, 2006 г.); научно-практической конференции и выставке студентов, аспирантов и молодых ученых «Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (УГТУ-УПИ, г. Екатеринбург, 2005 г.); XVII Ежегодной Международной Интернет-конференции молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения (Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, 2005 г.); на научно-технических советах ОАО «КМПО», ОАО КПП «Авиамотор».

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и 12 приложений, содержит 108 страниц основного текста, включая 63 рисунка и 19 таблиц. Список литературы содержит 133 наименования. Объем приложений - 46 страниц, включая 28 рисунков и 4 таблицы.

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** рассмотрена актуальность работы, дана её краткая характеристика и описание полученных в диссертации результатов.

**В первой главе** проводится обзор неразрушающих методов контроля клепаного соединения с анализом их достоинств и недостатков. Известны работы Панина В.И., Диянкова В.М., Рожкова А.Б., Дубова А.А., которые развивали магнитный способ выявления расшатанных заклепок. Он осуществляется с помощью магнитных датчиков с определением разности напряженностей магнитных полей рассеяния между естественно намагниченными головкой и прилегающей к ней части соединяемой детали.

Абделькадр Махамат Сейд изучал возможность применения ультразвукового метода с прямыми и наклонными преобразователями для оценки величины натяга заклепочных соединений.

Рассмотрены низкочастотные акустические методы. Наиболее подробно описан метод свободных колебаний. Сделан вывод, что применение метода свободных колебаний представляется весьма перспективным для контроля качества при изготовлении и ремонте направляющих аппаратов газотурбинных двигателей с целью выявления дефектов различного типа (трещины, коррозии и т.д.). В современных реализациях метода свободных колебаний наибольшую информацию удаётся извлечь при определении различий узкополосных спектров проверяемого и эталонного изделий.

На основе анализа литературных данных определены цель и задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена разработке математической модели расчета частот собственных колебаний годного и дефектного клепаного соединения.

Анализ существующих методов решения задач связанных с колебаниями конструкций показал, что наиболее приемлемыми методами моделирования являются численные. В частности, метод конечных элементов позволяет рассчитывать дефекты клепаного соединения при различных вариантах закрепления лопатки. Поставленная задача решалась с использованием программного комплекса «ANSYS».

Собственными или свободными колебаниями называется движение при отсутствии внешних сил и демпфирования. Система уравнений, которые описывают такие движения, записывается в виде

$$[M] \left\{ \frac{\partial^2 q(t)}{\partial t^2} \right\} + [K] \{q(t)\} = 0 \quad (1)$$

Решение этой однородной системы ищется в виде гармонической функции от времени

$$\{q(t)\} = \{q\} \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1) и считая, что уравнение (1) должно удовлетворяться в любой момент времени, получаем алгебраическую задачу

$$[K] \{q\} - \omega^2 [M] \{q\} = 0 \quad (3)$$

Такая задача в линейной алгебре называется обобщенной задачей на собственные значения, и ее целью является нахождение ряда значений  $\omega_i$ , при котором выполняется (3) и векторов  $\{q_i\}$ , удовлетворяющих уравнению (3). Число таких значений  $\omega_i$  равно порядку системы уравнений (3), их последовательность в порядке возрастания называется спектром собственных значений, и соответствующие вектора  $\{q_i\}$  называются собственными векторами. С точки зрения механики,  $\omega_i$  являются частотами собственных колебаний, а  $\{q_i\}$  характеризуют формы соответствующих колебаний.

Разработка модели состояла из несколько этапов. Первый этап работы заключался в создании чертежа клепаного соединения (системы диск-клепка-лопатка) направляющего аппарата в ПО «AutoCad» (рис.1). На втором этапе произведен импорт чертежа в ПО «ANSYS» создание модели и задание

характеристик ее материалов (рис. 2-4). В компрессорах высокого давления для изготовления направляющих лопаток и диска применяется титановый сплав. Механические свойства сплава представлены в таблице 1. На третьем этапе создавались связи между клепкой, диском и лопаткой и задавались вид и сила соединения между элементами и узлами сетки (рис. 5). Так как клепаное соединение держится за счет сжатия лопатки и диска головкой заклепки и замыкающей головки заклепки связи создавались между узлами на общих поверхностях головки заклепки с лопаткой и замыкающей головки с диском. Между узлами тела заклепки, лопатки и диска в общих плоскостях связи не создавались. Годное клепаное соединение создавалось закреплением заклепки к диску и лопатке без возможности вращения и перемещения вдоль осей OX, OY, OZ.

Таблица 1.

Механические свойства сплава

Параметр	Обозначение	Величина	Единица измерения
Плотность	$\rho$	4650	кг/м <sup>3</sup>
Модуль упругости	E	115	ГПа
Коэффициент Пуассона	$\mu$	0,36	-

Самым распространенным и опасным дефектом клепаного соединения направляющего аппарата компрессора является ослабление крепления клепки и как следствие качание лопатки.

При расчетах задавались следующие варианты ослабления соединения:

1. Заклепка закреплена от смещения по оси OX с возможностью вращения и перемещения вдоль осей OY, OZ.
2. Заклепка закреплена от смещения по оси OY с возможностью вращения и перемещения вдоль осей OX, OZ.
3. Заклепка закреплена от смещения по оси OZ с возможностью вращения и перемещения вдоль осей OX, OY.
4. Заклепка закреплена от вращения с возможностью перемещения вдоль осей OX, OY, OZ.

Четвертый этап заключался в проведении модального анализа перечисленных вариантов ослабления клепаного соединения при четырех вариантах закрепления контролируемого диска.

Задавались следующие варианты крепления диска с лопатками:

1. Закреплен диск, лопатка находится в «подвешенном» состоянии, при этом имеется контакт ребер лопатки с соседними лопатками.
2. Закреплен диск, лопатка находится в «подвешенном» состоянии. Лопатка с соседними лопатками не контактирует.
3. Закреплен диск и нижнее ребро лопатки, при этом имеется контакт ребер лопатки с соседними лопатками.
4. Закреплен диск и нижнее ребро лопатки. Лопатка с соседними лопатками не контактирует.

Результаты расчетов приведены в диссертации в виде графиков и таблиц. В качестве примера, на рис. 6 изображен вариант № 3 крепления направляющего аппарата. На рис. 7 результаты модального анализа этого варианта крепления.

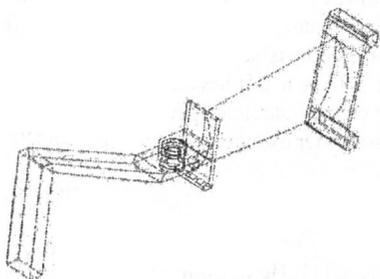


Рис. 1 Вид соединения в ПО «AutoCad»

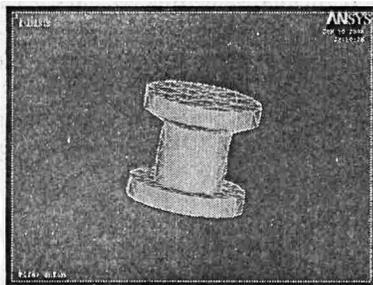


Рис. 2 Модель заклепки в ПО «ANSYS», разбитая на конечные элементы

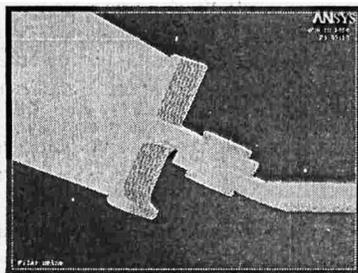


Рис. 3 Вид клепаного соединения, разбитого на конечные элементы

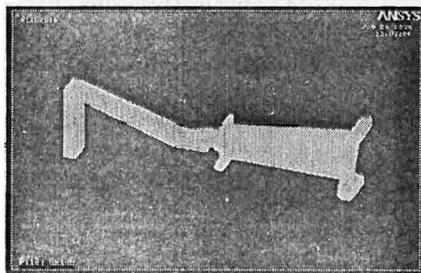


Рис. 4 Модель, разбитая на конечные элементы

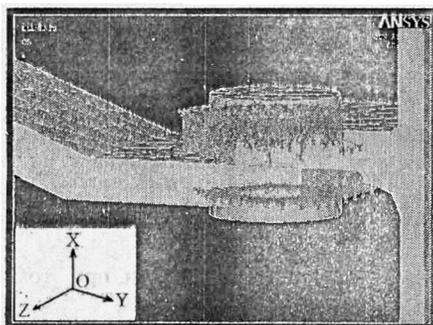


Рис. 5 Отображение связей между головкой заклепки с лопаткой и замыкающей головкой заклепки с диском

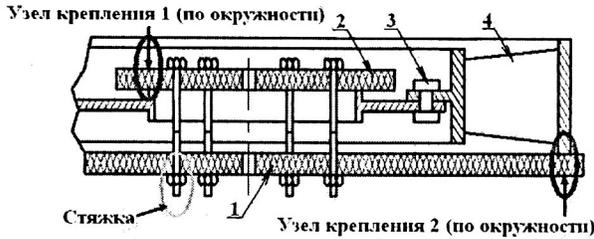


Рис. 6 Закрепление диска направляющего аппарата при третьем варианте расчетов

1 - нижний прижимной диск, 2 - верхний прижимной диск,  
3 - заклепка, 4 - лопатка

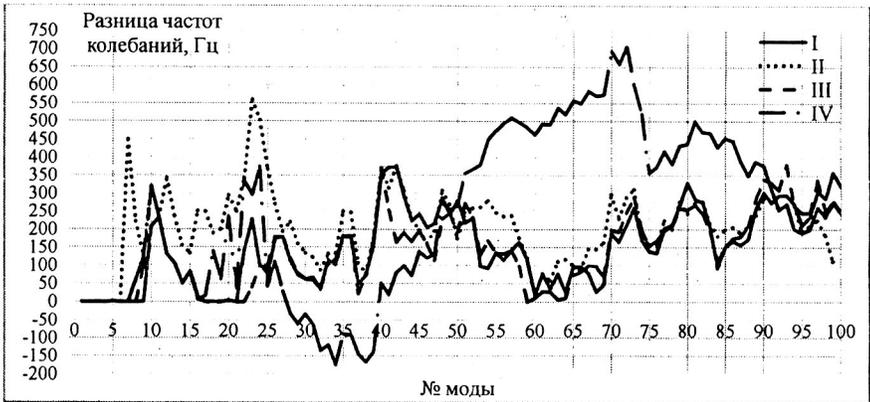


Рис. 7 Результаты модального анализа

I - разница частот колебаний между годным клепаным соединением и соединением, ослабленным по варианту 1, II - разница частот колебаний между годным клепаным соединением и соединением, ослабленным по варианту 2, III - разница частот колебаний между годным клепаным соединением и соединением, ослабленным по варианту 3, IV - разница частот колебаний между годным клепаным соединением и соединением, ослабленным по варианту 4.

В результате расчетов установлено, что наибольшая разница между годным и дефектным клепаными соединениями проявляется при третьем варианте крепления направляющего аппарата с 45 по 95 моды, что соответствует диапазону частот от 5 кГц до 9 кГц. Разница составляет до 700 Гц.

Проведенное во второй главе математическое моделирование позволило сократить время и средства на создание оснастки для диагностического комплекса.

Третья глава посвящена разработке автоматизированного диагностического комплекса и методики инструментального контроля клепаного соединения направляющих аппаратов 4+8 ступеней компрессора высокого давления изделий НК-16СТ, НК-16-18СТ. Дано описание разработанного комплекса, описана его структурная схема, взаимодействие элементов при проведении контроля, изложены алгоритмы формирования эталонного спектра, приведены вычисления информативных диагностических параметров и оценка погрешности результатов измерений, продемонстрирована работоспособность разработанной методики контроля технического состояния клепаных соединений.

В основе работы разработанного комплекса лежит метод свободных колебаний. Его особенностью является оценка технического состояния клепаного соединения на основе сравнения спектров колебаний с использованием критерия непараметрической статистики. Объектом контроля являются клепаные соединения направляющих аппаратов компрессора высокого давления. Блок-схема созданного комплекса приведена на рис. 8.

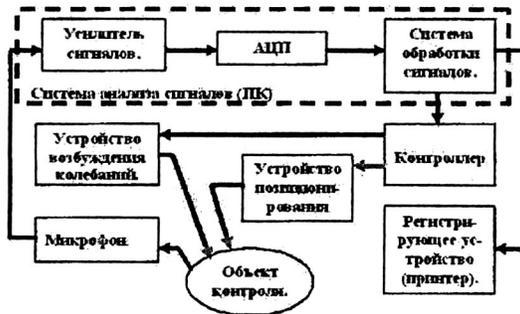


Рис. 8 Блок-схема диагностического комплекса

Комплекс работает следующим образом. После установки диска на измерительную позицию подается сигнал на контроллер, который запускает ударник. По полке лопатки контролируемого клепаного соединения направляющего аппарата наносится серия нормированных по силе ударов. После удара микрофон фиксирует колебания изделия, преобразует их в электрический сигнал, который передается на звуковой вход компьютера. В компьютере аналоговый электрический сигнал преобразуется в цифровую форму при помощи 16-ти разрядного АЦП, записывается на жесткий диск и впоследствии обрабатывается специализированной программой Detect Fault.

По завершении серии ударов подается сигнал на контроллер и происходит вращение диска до следующей клепки. В это время программа анализирует записанные сигналы и выводит результат о состоянии клепаного соединения (дефектное или бездефектное). Затем цикл повторяется до тех пор, пока не подвергнутся контролю все клепаные соединения диска. После чего осуществляется протоколирование результатов.

Работой комплекса управляет программа Detect Fault, разработанная в программной среде LabVIEW 8.2. Программа состоит из следующих модулей: регистрации акустических сигналов; формирования эталонных спектров; сравнения спектров с эталоном.

Контроль клёпаного соединения проводится по значению коэффициента корреляции спектров Спирмена  $r$ , который рассчитывается по формуле

$$r = 1 - \frac{6}{n(n^2-1)} \sum_{i=1}^n (\text{rank } a_i - \text{rank } a_{si})^2,$$

где  $n$  - количество сравниваемых частот в спектре;  $\text{rank } a_i$  - ранг амплитуды  $a_i$  в вариационном ряду амплитуд проверяемого спектра (номер места, которое эта амплитуда занимает среди всех амплитуд данного спектра, упорядоченных по возрастанию);  $\text{rank } a_{si}$  - ранг амплитуды  $a_{si}$  эталонного спектра.

Для классификации клёпаного соединения «годный» или «дефектный» (рис. 9) используется подход, характерный для процедур отбраковки аномалий: алгоритм анализа интерпретирует совокупность вычисленных значений коэффициента корреляции Спирмена как множество измеренных значений некоторого абстрактного параметра и применяет к этой совокупности значений следующую процедуру: вычисляется оценка положения  $\bar{p}$ ; вычисляется оценка разброса  $S$  как медиана абсолютных отклонений относительно оценки положения; для заданного уровня значимости  $\alpha$  строится доверительный интервал

$$p \pm St \left( 1 - \frac{\alpha}{2}, m - 2 \right),$$

где  $t(\alpha, m)$  -  $\alpha$  - квантиль распределения Стьюдента с  $m$  степенями свободы.

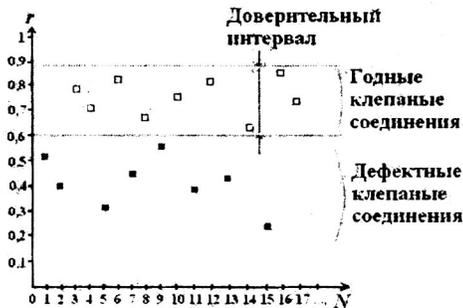


Рис. 9 Принцип построения решающего правила «годен-брак»

$r$  - коэффициент корреляции Спирмена,  $N$  - номер клёпаного соединения.

Оценка погрешности диагностического комплекса проводилась вероятностно-статистическим методом по ГОСТ 8.207-76, предусматривающим определение погрешности по характеристикам законов распределения погрешностей средств измерений, входящих в состав системы.

Для разработанного комплекса абсолютная погрешность  $\Delta_c = \pm 0,045596$  при доверительной вероятности  $P = 0,95$  при средних результатах измерений коэффициента корреляции Спирмена  $r_c = 0,6974$ .

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований. Для подтверждения работоспособности и эффективности диагностического комплекса для контроля клепаных соединений лопаток ГТУ были проведены испытания в условиях производства.

Работы проводились с направляющими аппаратами четвертой ÷ восьмой ступеней двигателя НК 16-18 СТ. Направляющие аппараты контролировались методом свободных колебаний путем сравнения текущих спектров клепаных соединений с эталонным спектром. После испытаний был проведен контроль на усилие сдвига лопатки. В процессе контроля установлено, что отдельные лопатки при приложении к ним усилия по касательной к окружности направляющего аппарата поворачиваются вокруг оси клёпки. Для количественной оценки момента силы поворота лопаток проведены испытания по схеме, изображенной на рис. 10.

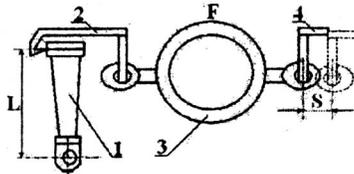


Рис. 10 Установка для измерения момента.

- 1 - лопатка, 2 - цепляющее устройство (зацеп), 3 - динамометр (марка ИП 1 ДПУ-002-2), 4 - зацеп устройства натяжения.  
L - длина лопатки, S - расстояние, F - сила сдвига лопатки

Испытания проводились следующим образом: при плавном изменении расстояния S фиксировались показания динамометра в момент первого падения показаний динамометра F, т.е. в момент начала вращения лопатки относительно оси клёпки в плоскости направляющего аппарата.

По результатам испытаний построены графики значений усилия сдвига лопаток в плоскости направляющего аппарата и коэффициента корреляции Спирмена ( $r$ ) спектров исследуемых лопаток. В качестве примера на рис. 11, а изображены результаты испытаний пятой ступени.

Установлено, что для данной ступени разброс момента силы сдвига лопаток составляет от 3,5 до 17 Н·м, а разброс значений по коэффициенту корреляции Спирмена - от 0,6 до 0,88. При установленном браковочном уровне 0,75 коэффициента корреляции Спирмена дефектными оказались 10 клёпаных соединений: № 52, 64, 70, 77, 85, 91, 98, 105, 108, 119, 127, а по усилию сдвига дефектными оказываются те же 10 клёпаных соединений. Это свидетельствует о том, что на направляющем аппарате находятся соединения «диск – клепка – лопатка» разного качества. Чем ниже значения характеристик, тем ниже качество соединения, и наоборот. При сопоставлении графиков видно, что для каждой лопатки большее значение коэффициента  $r$  определяет большее значение усилия сдвига, что в конечном итоге характеризует качество клёпаного соединения. Следовательно, при оценке фактического состояния

клепаного соединения характеристику усилия сдвига лопатки можно сопоставить с коэффициентом корреляции Спирмена.

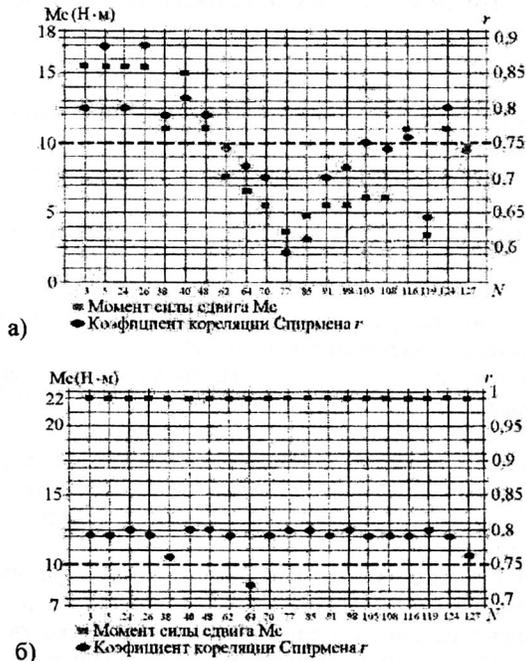


Рис. 11 Результаты испытаний направляющего аппарата пятой ступени ГТУ НК-16-18СТ (а) и результаты испытаний направляющего аппарата той же ступени после доклёпки (б)

Mc - момент силы сдвига,  $r$  - коэффициент корреляции Спирмена,  
 $N$  - номер клепаного соединения

Для подтверждения результатов испытаний направляющие аппараты были отправлены на доклёпку всех исследуемых лопаток. Клепанные соединения заклепывались до максимально допустимого диаметра замыкающей головки заклепки, чтобы лопатка сильнее прижималась к диску. После операции доклёпки были проведёны повторные испытания. В качестве примера на рис. 11,б изображены результаты испытаний пятой ступени после доклёпки.

Установлено, что для данной ступени разброса значений момента силы нет, эти значения постоянны и составляют примерно 22 Н·м, а разброс значений по коэффициенту корреляции Спирмена от 0,72 до 0,8. При установленном браковочном уровне 0,75 коэффициента корреляции Спирмена дефектным оказалось одно клепаное соединение № 64, а по усилию сдвига дефектных нет. Значения характеристик изменились в сторону увеличения.

Испытания комплекса в цеховых условиях подтвердили результаты математического моделирования, работоспособность и эффективность разработанных методики и инструментального комплекса, позволили оптимизировать место и силу нанесения ударов по клепаному соединению.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В соответствии с задачами исследований в диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Разработана методика инструментального контроля клепаного соединения.

2. Создана математическая модель клепаного соединения и рассчитаны частоты годного и дефектного клепаных соединений. Установлено, что наибольшая разница в частотах между годным и дефектным клепаными соединениями компрессора высокого давления изделия НК-16-18СТ проявляется в диапазоне частот от 5 кГц до 9 кГц.

3. Разработан автоматизированный диагностический комплекс для контроля клепаного соединения направляющего аппарата лопаток ГТУ, основанный на методе свободных колебаний.

4. Для управления работой комплекса, регистрации, анализа сигналов, реализации алгоритма обнаружения дефектов в клепаных соединениях по параметрам их виброакустического сигнала в среде LabVIEW 8.2. создана программа «Detect Fault».

5. В результате сравнительных испытаний установлена прямо пропорциональная зависимость значений коэффициента корреляции спектров Спирмена и величины момента сдвига лопатки в плоскости направляющего аппарата, характеризующего качество клепаного соединения. По результатам испытаний рекомендовано установить для контроля клепаного соединения направляющих аппаратов 4÷8 ступеней компрессора высокого давления изделий НК-16СТ, НК-16-18СТ браковочный уровень по оценке корреляции Спирмена на значении 0,75, что соответствует моменту силы сдвига лопатки  $10 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

6. Испытания комплекса в цеховых условиях подтвердили результаты математического моделирования, позволили оптимизировать место и силу нанесения ударов по клепаному соединению.

### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Бусаров А.В. Разработка методики инструментального контроля качества клепаного соединения / Бусаров А.В., Ваньков Ю.В., Казаков Р.Б., Тырышкин В.Н. // VIII Международная научно-практическая конференция Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения и информатики : Сборник научных трудов. М. : МГУПИ, 2005. С. 28-33.

2. Бусаров А.В. Диагностический комплекс для повышения эффективности использования энергетических ГТУ / Бусаров А.В., Габдуллин Л.М., Тырышкин В.Н. // Всероссийская научно-практическая конференция и выставка студентов, аспирантов и молодых ученых Энерго- и

ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : Сборник материалов. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2005. С. 24-26.

3. Бусаров А.В. Контроль клепаного соединения лопаток ГТУ методом свободных колебаний / Бусаров А.В., Габдуллин Л.М., Тырышкин В.Н. // Ежегодная XVII Международная Интернет-конференция молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения МИКМУС-2005 : Сборник материалов. М. : Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2005. С. 213-214.

4. Бусаров А.В. Неразрушающий контроль статорных колес ГТУ методом свободных колебаний / Бусаров А.В., Габдуллин Л.М., Тырышкин В.Н. // XII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов : Сборник докладов. М. : МЭИ, 2006. С. 210-211.

5. Бусаров А.В. Автоматизированный диагностический комплекс для контроля клепаного соединения лопаток ГТУ / Бусаров А.В., Ваньков Ю.В., Габдуллин Л.М., Тырышкин В.Н. // IX Международная научно-практическая конференция Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики : Сборник научных трудов. М. : МГУПИ, 2006. С. 26-30.

6. Бусаров А.В. Разработка автоматизированного диагностического комплекса для контроля клепаного соединения лопаток ГТУ / Ваньков Ю.В., Бусаров А.В., Казаков Р.Б., Александрович Ю.П. // X Международная научно-практическая конференция Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики : Сборник научных трудов. М. : МГУПИ, 2007. С. 49-55.

7. Бусаров А.В. Программа и результаты испытаний автоматизированного диагностического комплекса / Бусаров А.В., Ваньков Ю.В. // III Молодежная международная научная конференция Тинчуринские чтения : Сборник материалов докладов. Казань : КГЭУ, 2008. С. 45-46.

8. Бусаров А.В. Испытания автоматизированного диагностического комплекса в условиях производства / Бусаров А.В., Ваньков Ю.В., Акутин М.В. // Международная научно-техническая конференция ЭНЕРГЕТИКА-2008 : инновации, решения, перспективы : Сборник материалов докладов. Казань : КГЭУ, 2008. С. 136-140.

9. Бусаров А.В. Инструментальный метод контроля статорных колес ГТД НК 16-18 СТ и НК 16 СТ / Бусаров А.В., Ваньков Ю.В., Кондратьев А.Е., Акутин М.В. // XVIII Всероссийская конференция с международным участием Неразрушающий контроль и техническая диагностика : Сборник докладов. Н. Новгород : НГТУ, 2008. С. 250-251.

10. Бусаров А.В. Нахождение характерных частот при контроле клепаного соединения на автоматизированном диагностическом комплексе / Бусаров А.В., Ваньков Ю.В., Тырышкин В.Н., Казаков Р.Б. // XI Международная научно-практическая конференция Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики : Сборник научных трудов. М. : МГУПИ, 2008. С. 59-63.

**11. Бусаров А.В.** Автоматизированный диагностический комплекс для контроля клепаного соединения лопаток ГТУ / Бусаров А.В., Ваньков Ю.В., Тырышкин В.Н. // Казань : Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева - 2008. №3. С. 24-28.

**12. Бусаров А.В.** Автоматизированный диагностический комплекс для контроля клепаного соединения лопаток газотурбинной установки / Бусаров А.В., Ваньков Ю.В., Акутин М.В., Александрович Ю.П.. // М. : Заводская лаборатория. Диагностика материалов - 2008. № 12. С. 37-40.

**13. Бусаров А.В.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008610104 : Detect Fault / Авторы и правообладатели: Акутин М.В., Бусаров А.В., Ваньков Ю.В., Зиганшин Ш.Г. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 9 января 2008г.

**14. Бусаров А.В.** Патент 75 739 Российская Федерация, МПК G01H 1/00, G01M 7/00. Установка для акустического контроля качества клепаных соединений направляющих аппаратов газотурбинного двигателя / Бусаров А.В., Ваньков Ю.В., Акутин М.В., Габдуллин Л.М., Александрович Ю.П.; Заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский государственный энергетический университет». Заявл. 26.02.2008; опубл. 20.08.2008. Бюл. №23.

---

Подписано к печати 26.12.08

Гарнитура "Times"

Физ. печ. л. 1.0.

Тираж 100 экз.

Вид печать РОМ

Усл. печ. л. 0.94

Заказ № 3366

Формат 60 x 84 / 16

Бумага офсетная

Уч. – изд. л. 1.0

---

Типография КГЭУ

420066, Казань, Красносельская, 51