

УДК 539.4+621.431.75

ПРОЕКТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ ПО СОЗДАНИЮ УСТАНОВКИ ДЛЯ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ НЕВРАЩАЮЩИХСЯ ЛОПАТОК НА ПТИЦЕСТОЙКОСТЬ

© 2015 Б. Ф. Шорр, В. С. Мацаренко, Н. Н. Серебряков

Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва

Рассмотрены требования к обеспечению эффективности и безопасности стендовых испытаний на птицестойкость вентиляторов путём стрельбы птицами по невращающимся рабочим лопаткам, в том числе требования по обеспечению скорости удара птицы по испытываемой лопатке, установке лопаток под требуемым углом атаки к птице, прочности деталей установки и её ремонтпригодности. Изложены конструктивные особенности разработанной в ЦИАМ установки, включающей в себя две основные детали: модельный сектор диска для установки блока лопаток и жёсткую станину, относительно которой сектор диска может быть повернут на заданный угол и закреплён в этом положении. Модельный сектор диска представляет собой массивную деталь, имитирующую часть обода диска с профилированными пазами для установки хвостовиков блока исследуемых лопаток. Станина выполняется в виде набора опорных плит с расположенными по периферии отверстиями для их сборки и возможного дополнительного подкрепления с использованием прокатного профиля. Анализ прочности элементов установки в условиях действия больших кратковременных ударных нагрузок выполнен по результатам конечно-элементных 3D расчётов. На установке были успешно проведены стендовые испытания по забросу крупной птицы на блок из трёх лопаток вентилятора.

Лопатка вентилятора, заброс птиц, стендовые испытания.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-88-98

Введение

Натурные испытания по попаданию крупной птицы в авиадвигатель, которые, согласно действующим нормативным документам [1], проводятся на работающем двигателе, либо на вращающихся рабочих колесах вентиляторов или компрессоров на стендах являются крайне дорогостоящими и не позволяют исследовать влияние разнообразных конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов на птицестойкость рабочих лопаток. Поэтому перед проведением натурных испытаний целесообразно выполнять расчётный анализ стойкости рабочих лопаток к ударному взаимодействию с крупной птицей. Расчёты должны опираться на экспериментально проверенные модели динамического взаимодействия птицы и рабочих лопаток, что может быть выполнено путём проведения менее дорогостоящих стендовых баллистических испытаний, в том числе путём стрельбы по

неподвижно закреплённым рабочим лопаткам.

Стендовые установки для проведения испытаний по оценке стойкости невращающихся лопаток к ударному взаимодействию крупной птицы должны, по возможности, максимально отражать условия реального взаимодействия вращающихся лопаток натурального рабочего колеса с птицей и удовлетворять целому ряду трудно совместимых требований.

В статье приводится обоснование таких требований и изложены результаты конструкторской проработки и расчётов на прочность элементов крепления испытываемых лопаток, реализованных на баллистическом стенде ЦИАМ. Эффективность выполненных работ продемонстрирована кратким описанием проведения стендовых испытаний по забросу крупной птицы на блок из трёх лопаток вентилятора.

Основные требования к установке для испытаний невращающихся лопаток вентилятора на стойкость к удару крупной птицей

Основные требования, предъявляемые к стендовой установке, определяются следующими соображениями:

- Обеспечение скорости удара птицы (или её макета) массой до 3.65 кг [1] по испытываемой лопатке, равной относительной скорости удара птицы по вращающейся лопатке на данном радиусе рабочего колеса. Для современных компрессоров эта скорость на максимальном радиусе колеса приближается к 500 м/с. К сожалению, максимальная скорость разгона птицы, достижимая при стрельбе сжатым воздухом из пневматической пушки, лимитируется возникновением на выходе из ствола пушки звуковой скорости и, по имеющимся данным, не превышает 300 м/с. Поэтому характер повреждения лопатки при ударе по сечениям пера, для которых относительная скорость удовлетворяет указанному ограничению, может быть близок к эксплуатационному, а удар по верхней части пера лопатки может служить только для верификации расчётных моделей.

- Вторым важным параметром, влияющим на интенсивность удара по лопатке, является угол атаки α птицы (угол между направлением её относительной скорости при вращении колеса и хордой лопатки на выбранном радиусе). Угол атаки α определяется на основе анализа треугольника скоростей птицы, и на разных радиусах колеса он является различным. При подготовке к проведению стендовых испытаний по забросу птицы должна обеспечиваться регулировка угла атаки, но в процессе самого испытания положение лопатки относительно диска должно оставаться неизменным.

- К узлу крепления лопаток на стенде предъявляются жёсткие требования по обеспечению прочности его элементов, поскольку в процессе ударного взаимодействия лопаток с крупной птицей на

модельный сектор диска и весь узел крепления лопаток передаются хотя и кратковременные, но значительные динамические нагрузки, достигающие 20-25 тонн.

- Для испытаний используются рабочие лопатки реального вентилятора, имеющие весьма ограниченные размеры замковой части, что накладывает значительные ограничения на конструкцию узла крепления.

- Хотя выстрел производится по одной лопатке, желательно иметь на установке и соседние лопатки, установленные и закреплённые в секторе диска таким же образом, как на полном диске. Это лучше смоделирует условия крепления лопатки в диске и ограничит деформацию лопатки при отклонении пера при ударе.

- Установка должна удовлетворять жёстким требованиям по обеспечению безопасности персонала при стрельбе и быть защищена как от попадания самой выстреливаемой птицы с гильзой, так и от обломков лопатки в случае её разрушения. Следует учитывать, что в процессе ударного взаимодействия лопаток и птицы могут образоваться фрагменты лопаток и элементов установки с высокой кинетической энергией, способных повредить измерительную аппаратуру или нанести какой-либо другой ущерб помещению стенда.

- Установка должна допускать многообразное использование для возможности испытаний нескольких экземпляров лопатки при умеренном восстановительном ремонте между выстрелами.

- Движение птицы при выстреле и ударе по лопатке и процесс самого удара должны фиксироваться достаточно точной и быстродействующей контрольно-измерительной аппаратурой для возможности последующего детального анализа.

Конструктивные особенности установки

Принципиальная схема установки показана на рис. 1 [2]. Пневматическая пушка на баллистическом стенде имеет возможность перемещения только в плос-

кости, перпендикулярной оси ствола. Создание поворотного механизма пушки на её станине с учётом собственных габаритов пушки и объёма помещения стенда не представляется возможным. Поэтому устройство удержания лопаток должно иметь

возможность установки плоскости вращения лопаток относительно оси пушки под требуемым углом атаки на выбранном для стрельбы радиусе с жёсткой и неменяющейся в процессе эксперимента фиксацией в этом положении.

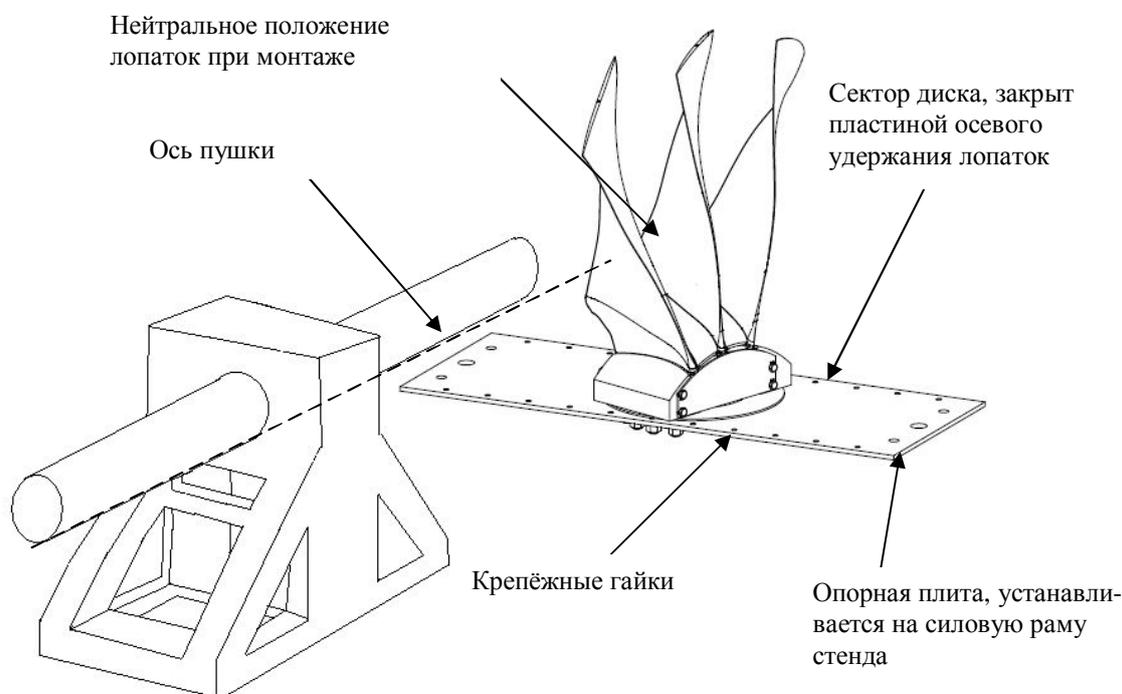


Рис.1. Принципиальная схема установки лопаток на баллистическом стенде

С этой целью конструкция устройства для испытаний невращающихся лопаток включает в себя две основные детали: модельный сектор диска для установки блока лопаток и жёсткую станину, относительно которой сектор диска может быть повернут на заданный угол и закреплён в этом положении. На рис. 2 показан модельный сектор диска 1 с профилированными пазами 2 на опорной плите 3, по периферии плиты расположены отверстия 4 для установки дополнительных плит и отверстия 5 для крепления на силовую раму стенда. Между плитой 3 и модельным сектором диска располагается шайба 6, на поверхности опорной плиты и на боковой поверхности модельного сектора диска нанесены установочные метки 7 и 8, по бокам модельный сектор диска закрывается пластинами осевого удержания лопаток 9, имеются кронштейны 10 для крепления межлопаточных вставок.

Модельный сектор диска представляет собой массивную деталь, имитирующую часть обода диска с профилированными пазами для установки хвостовиков блока исследуемых лопаток. В каждом из профилированных пазов в перпендикулярном направлении к подошве хвостовика выполняется по меньшей мере два отверстия с резьбой для винтов. Имитация действия центробежных сил, прижимающих контактные грани хвостовиков лопаток к ответным граням паза захвата, осуществляется посредством затяжки винтов, проходящих через указанные отверстия [3]. Дополнительно для частичной разгрузки замкового соединения от ударной нагрузки между соседними лопатками рекомендуется устанавливать межлопаточные вставки, если они предусмотрены в конструкции натурального рабочего колеса.

Для установления перед началом испытаний требуемого угла атаки α на бо-

ковую грань модельного сектора диска и установочные метки 7 и 8 (рис. 2).
поверхность опорной плиты наносятся

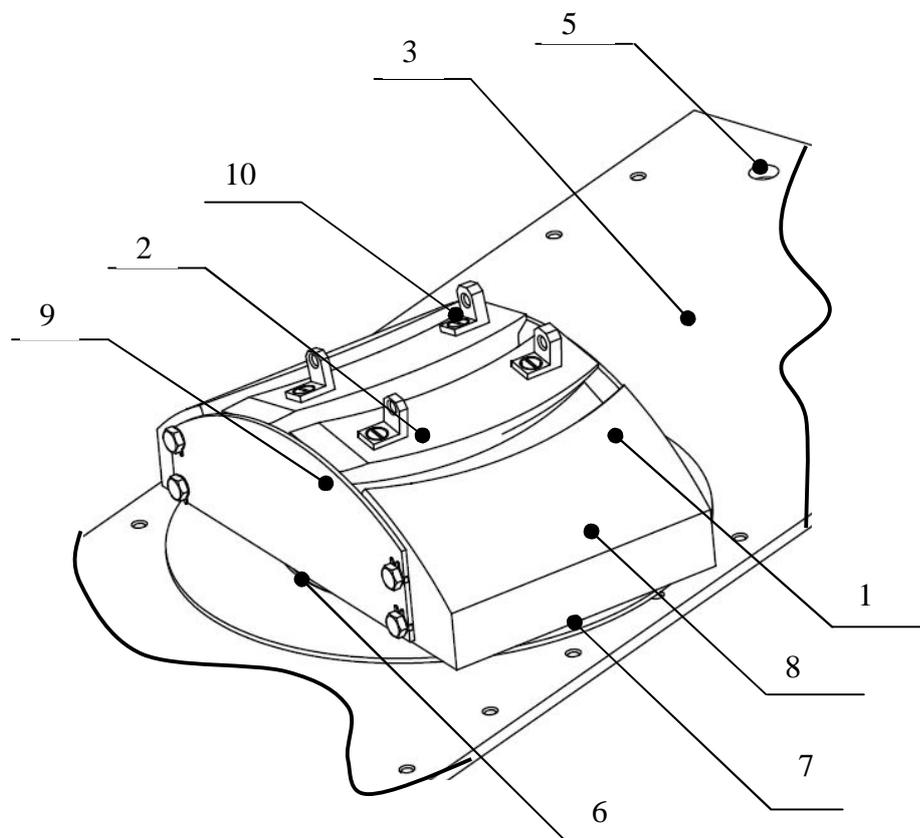


Рис.2. Модельный сектор диска на опорной плите

Станина выполнена в виде набора опорных плит с расположенными по периферии отверстиями для их сборки и возможного дополнительного подкрепления с использованием прокатного профиля. Это обеспечивает жёсткость станины при её сборке и установке на силовую раму баллистического стенда. В центре каждой плиты выполнен круговой вырез, размер которого обеспечивает свободный доступ к деталям модельного сектора диска и облегчает сборку установки, и прорезаны два серповидных симметричных отверстия, которые позволяют устанавливать модельный сектор диска под требуемым углом атаки к оси пушки для стрельбы на выбранном радиусе.

Соединение модельного сектора диска с опорной плитой происходит с использованием силовых шпилек, которые ввинчиваются в специальные отверстия, расположенные на некотором радиусе по

основанию модельного сектора диска. Между плитой и нижней поверхностью модельного сектора диска устанавливается перфорированная круговая пластина с отверстиями, совпадающими с отверстиями в секторе диска. Такая же пластина устанавливается с противоположной стороны плиты. Пластины выполняют роль шайб, облегчающих поворот сектора диска и предотвращающих повреждение краёв серповидных отверстий от затяжки силовых шпилек.

При подготовке установки к испытаниям крепёжные гайки силовых шпилек ослабляются и модельный сектор диска поворачивается вместе с шайбами в серповидных прорезях плиты так, чтобы установочные метки угла атаки на секторе диска и на опорной плите совпали в соответствии с требованием к текущему выстрелу. После установки сектора диска под требуемым углом к оси пушки балли-

стического стенда крепёжные гайки заворачиваются с заранее выбранным моментом динамометрическим ключом, обеспечивая необходимое прижатие сектора диска с шайбами к плите.

Затяжка винтов, плотно прижимающих вставку к подошве хвостовика лопаток, и установка межлопаточных вставок не дают лопатке провернуться в пазу. Диаметр резьбы прижимных винтов и момент их затяжки определяются на основе расчёта требуемого усилия прижатия лопаток к контактными граням профилированного паза при условии соблюдения прочности винтов.

Затяжка гаек силовых шпилек препятствует провороту основания модельного сектора диска относительно опорной плиты. Диаметр резьбы силовых шпилек, момент затяжки гаек и высота гаек выбираются на основе расчётного анализа прочности узла под действием ударной нагрузки.

Анализ прочности элементов установки

В процессе динамического взаимодействия лопатки с крупной птицей создаётся большое усилие, сначала деформирующее перо лопатки и затем нагружающее все узлы установки. Передача усилия от удара на модельный сектор диска и далее на весь узел крепления лопаток на стенде происходит через замковое соединение. Усилие удара создаёт изгибающий и крутящий моменты в замковом соединении на плече, примерно равном расстоянию от перехода хвостовика лопатки в профильную часть до центральной точки области удара птицы в лопатку. Эти моменты стремятся вывернуть хвостовик лопатки из профилированного паза модели обода, а также нарушить связь основания сектора диска с опорной плитой. Направления передающихся на элементы установки усилий при стрельбе по центральной в блоке лопатке схематически показаны на рис. 3.

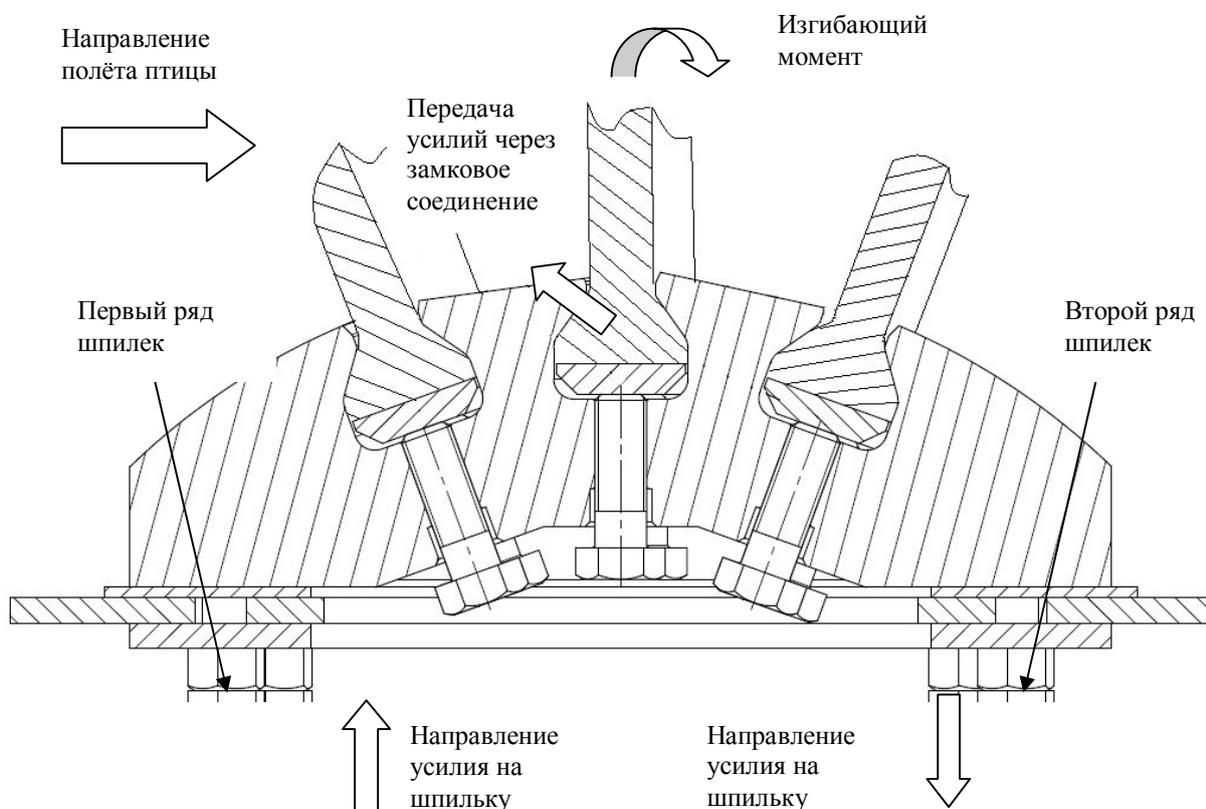


Рис. 3. Усилия в элементах установки в процессе удара

На основании предварительных расчётов динамических нагрузок были выбраны размеры опорной плиты и крепёжных

резьбовых соединений установки и было намечено их расположение (рис. 4).

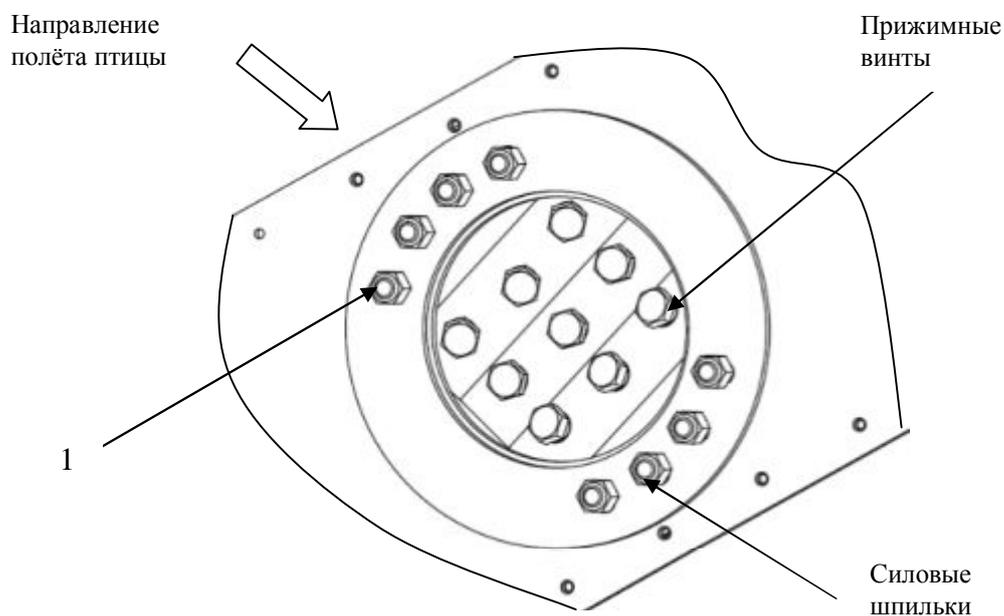


Рис. 4. Расположение резьбовых элементов установки

Расчёт осевых усилий в винте, создающем нормальное усилие на подошвы хвостовиков лопаток, был проведён с использованием рекомендаций [4], расчёт прочности витков резьбы – с использованием рекомендаций [5]. Назначенный по результатам расчёта момент затяжки винтов составил $M = 200 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Была создана 3D КЭ модель элементов, образующих силовой поток установки, в которой использовалась имеющаяся КЭ модель натурной лопатки и упрощённая КЭ модель сектора диска в виде параллелепипеда (рис. 5). Опорная плита предполагалась абсолютно жёсткой, а контакт модели сектора диска с ней – полным.

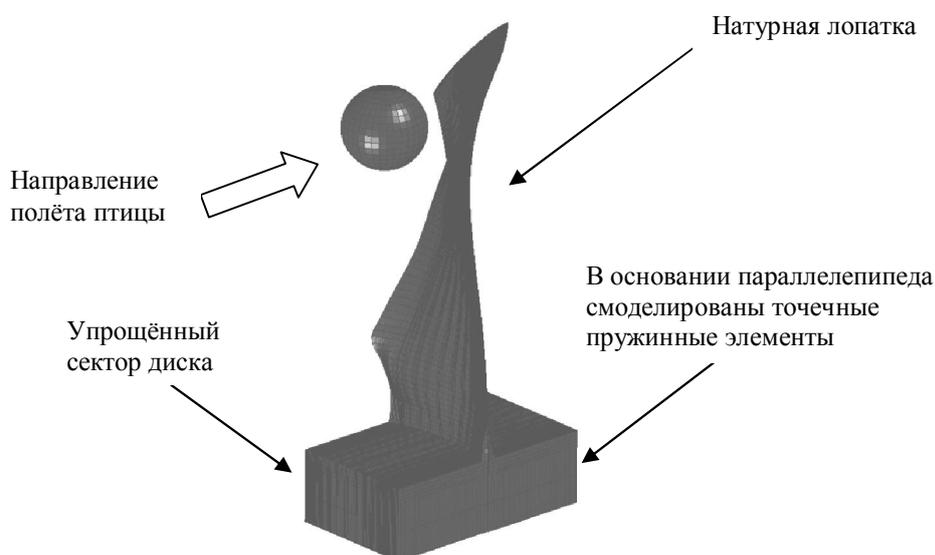


Рис. 5. КЭ модель птицы, лопатки и модельного сектора диска

При расчёте связь сектора диска с опорной плитой была смоделирована с использованием 1D пружинных элементов, имитирующих деформацию силовых шпилек под действием нагрузок. Расположение пружинных элементов в основании модели сектора диска было взято в соответствии с рис. 4.

Расчёты проводились при разных вариантах приложения импульса от удара птицы: $L_{пт} = m_{пт} w_{пт}$ к перу лопатки ($m_{пт}$ - масса, а $w_{пт}$ - скорость птицы перед ударом). Конфигурация птицы при расчёте действующих на установку нагрузок не имела принципиального значения

и поэтому КЭ модель птицы была принята в виде шара.

Используемый в расчёте материал лопатки и модельного сектора диска считался одинаковым и упруго-пластическим. Свойства материала были приняты по справочным данным.

По результатам нестационарных расчётов в пакете ANSYS/LS-DYNA [6] были построены графики изменения параметров процесса по времени. На рис. 6 приведён график изменения усилий в наиболее нагруженной шпильке (без учёта предварительной затяжки).

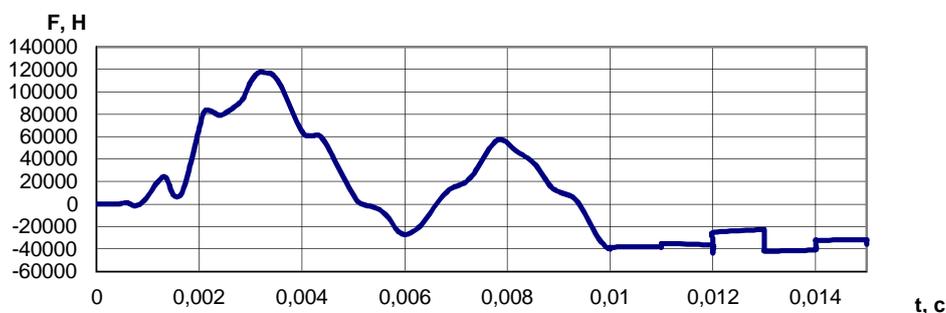


Рис. 6. Зависимость осевых усилий в наиболее нагруженной шпильке от времени

Видно, что после первого удара в системе возникают затухающие колебания.

С использованием результатов аналогичных расчётов были определены усилия и напряжения во всех шпильках. Пиковые значения амплитуд усилий в шпильках достигались в разные моменты времени. Максимальная растягивающая амплитуда осевого усилия была достигнута в момент времени $t \approx 0.0033$ с в шпильке, отстоящей на наибольшем расстоянии от срединной точки расчётной площадки контакта птицы с лопаткой и находящейся в первом ряду шпилек по направлению удара (позиция 1 на рис. 4). Шпильки во втором по направлению удара ряду испытывали преимущественно сжимающие усилия. По результатам расчёта была выбрана шпилька из стали 30ХГСА длиной 120 мм и диаметром резьбы М18, назна-

ченный по результатам расчёта момент затяжки гаек составил $M = 280$ Н·м.

По результатам оценочного расчёта пиковое значение динамических напряжений «по Мизесу» в прикорневой зоне лопатки и в области замкового соединения при действии ударной нагрузки составляет ~ 300 МПа, что не превышает предела текучести использованной для изготовления сектора диска стали 12Х2Н4А и применяемого для лопаток титанового сплава. Уточнённый расчёт замкового соединения лопатки с модельным сектором диска с решением контактной задачи не проводился.

Собранный на опорной плите модельный сектор диска показан на рис. 7 (для наглядности торцовые пластины осевого удержания лопаток перед фотографированием не устанавливались). Общий вид установки представлен на рис. 8.

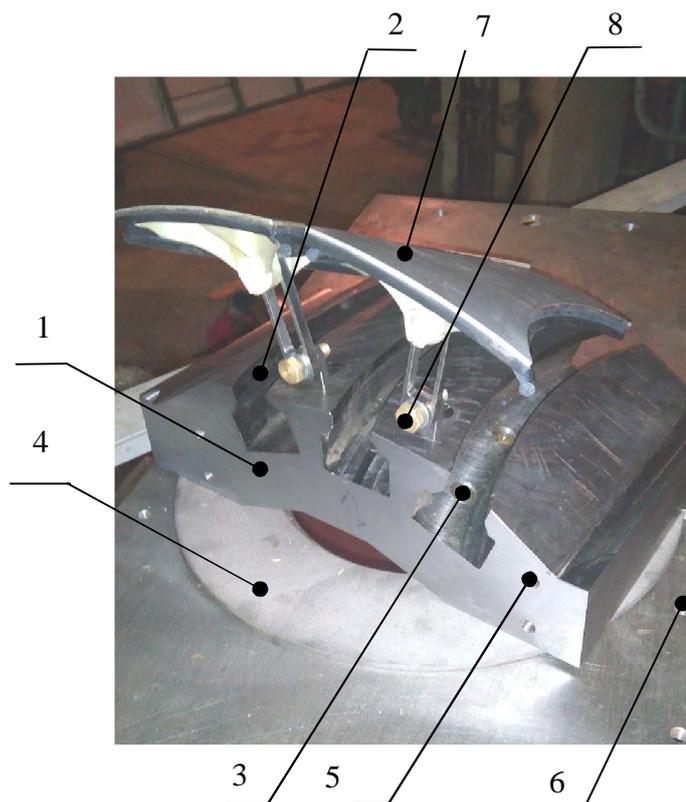


Рис. 7. Модельный сектор диска без лопаток на опорной плите:

1 - модельный сектор диска, 2 - профилированный паз, 3 - отверстия в пазу под прижимные винты, 4 - шайба, 5 - отверстия для винтов крепления пластины осевого удержания лопаток, 6 - отверстия по периферии опорной плиты, 7 - межлопаточные вставки, 8 - кронштейны для крепления межлопаточных вставок



Рис. 8. Общий вид установки с лопатками на силовой раме стенда

Использование установки для проведения стендовых испытаний по забросу крупной птицы в блок из трёх лопаток вентилятора

В блок из трёх лопаток забрасывались птицы массой в 2.8 и 1.4 кг со скоростью $w \approx 280$ м/с при расчётных углах атаки на выбранном радиусе. Баллистические испытания проводились группой специалистов ЦИАМ под руководством С.Б. Петрова.

Осмотр установки с сектором диска после первого выстрела с забросом птицы массой 1.4 кг показал, что установка получила повреждения: смятие внутренней резьбы отверстий под прижимные винты, что затруднило демонтаж установки для ремонта, коробление шайб и опорной плиты (рис. 9) и локализованный обрыв переднего кронштейна крепления межлопаточной вставки.



Рис. 9. Деформация опорной плиты

Разрушения профилированных пазов модельного сектора диска не произошло, перекоса лопаток в пазах по результатам осмотра отмечено не было. Лопатки после отворота прижимных винтов свободно входили и выходили из профилированных пазов сектора диска. Поворота модельного сектора диска относительно опорной плиты отмечено не было, установочная метка осталась на месте.

Испытания показали, что используемая конструкция опорной плиты недостаточно жёсткая, при этом стык между плитой и швеллером под действием удар-

ной нагрузки раскрывается. Поэтому было принято решение о подкреплении установки второй опорной плитой с дополнительным усилением связи между опорными плитами через болты 1 (рис. 10) центральной области плиты и усилением связи со швеллером в месте раскрытия стыка (поз. 2, рис. 10). Усиление связи опорной плиты было достигнуто за счёт введения шпилек, установленных заподлицо с опорной плитой между крепёжными болтами швеллера.

В таком виде установка использовалась для дальнейших выстрелов.

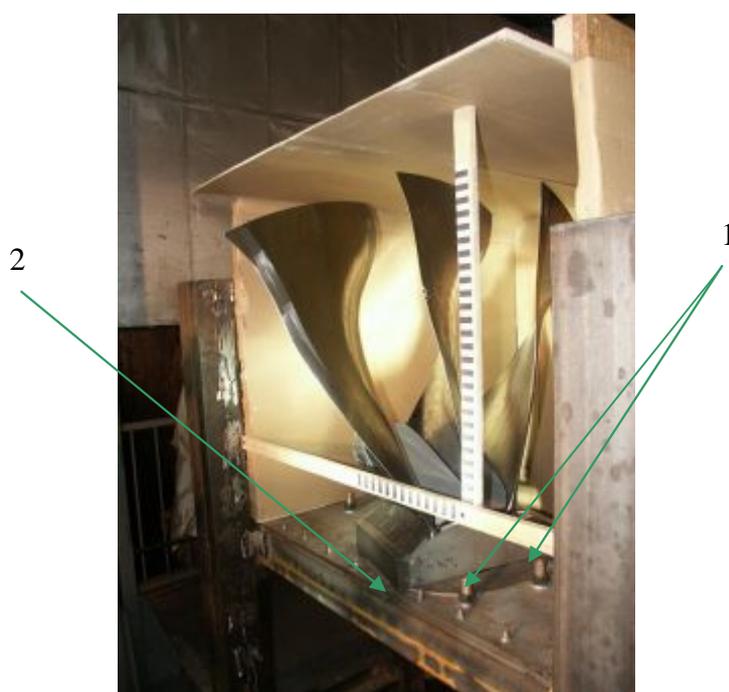


Рис.10. Усиленная конструкция установки

Библиографический список

1. Межгосударственный авиационный комитет. Авиационные правила АП-33, раздел 33-76, 2012. С. 45-48.
2. Шорр Б.Ф., Серебряков Н.Н., Мацаренко В.С., Шершаков М.С. Устройство неподвижной установки рабочих лопаток ГТД для стендовых испытаний. Заявка на полезную модель № 2015113818, 2015. 10 с.
3. Стадников А.Н., Шкуров В.И. Устройство для исследования демпфирующей способности турбинных лопаток с фрикционными демпферами: Патент РФ на полезную модель № 110483, 2011.
4. Биргер И. А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчёт на прочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.
5. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. М.: Машиностроение, 1990. 388 с.
6. LS-DYNA. Keyword user's manual. Version 971 R6.1.0// Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2012. P. 1953.

Информация об авторах

Шорр Борис Федорович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отделения прочности, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: shorr@ciam.ru. Область научных интересов: статическая и динамическая прочность авиационных ГТД.

Мацаренко Виктор Сергеевич, инженер отделения прочности, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва.

E-mail: matsarenko@ciam.ru. Область научных интересов: динамическая прочность авиационных ГТД.

Серебряков Николай Николаевич, кандидат технических наук, начальник сектора отделения прочности, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: serebryakov@ciam.ru. Область научных интересов: роторная динамика, демпфирование колебаний лопаток авиационных ГТД.

EXPERIMENTAL DESIGN OF A DEVICE FOR BIRD STRIKE BENCH TESTS OF NON-ROTATING FAN BLADES

© 2015 B. F. Shorr, V. S. Matsarenko, N. N. Serebryakov

Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation

Requirements on the efficiency and safety of fan bird strike bench tests by throwing birds against non-rotating blades are discussed, including the requirements for providing the bird strike velocity, the installation of blades at the required angle of attack relative to the bird, the requirements for the strength of the parts of the device and its overhaulability. Structural features of the device developed at CIAM are outlined in the paper. The device comprises two main parts: a disk model sector for blade installation and a rigid framework. The model disk can be turned relative to the framework and rigidly fixed in this position. The model disk sector is a solid part imitating part of the disk rim with shaped grooves for blade roots. The framework represents a set of supporting plates with peripheral slots for additional support using rolled section. Strength analysis of the device units operating under the action of heavy short-term impact loads is carried out by the results of finite-element 3D calculations. The device has been successfully used for bench tests during which large birds were being thrown against the block of three fan blades.

Fan blade, bird strike, bench test.

References

1. International aviation committee. Aviation rules AP-33, section 33-76, 2012. P. 45-48 (In Russ.)
2. Shorr B.F., Serebryakov N.N., Matsarenko V.S., Shershakov M.S. *Ustroystvo nepodvizhnoy ustanovki rabochikh lopatok GTD dlya stendovykh ispytaniy* [Device for fixed blade installation for bench tests. Application for useful model]. No. 2015113818, 2015. P. 10.
3. Stadnikov A.N., Shkurov V.I. *Ustroystvo dlya issledovaniya dempfirmuyushchey sposobnosti turbinnnykh lopatok s friktsionnymi dempferami* [Device for the investigation of damping ability of blades with friction dampers]. Patent RF no. 110483, 2011.
4. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. *Raschet na prochnost' detaley mashin* [Strength analysis of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1993. 640 p.
5. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. *Rez'bovye i flantsevye soedineniya* [Threaded and flange connections]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1990. 388 p.
6. LS-DYNA. Keyword user's manual. Version 971 R6.1.0 // Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2012. P. 1953.

About the authors

Shorr Boris Fedorovich, Doctor of Science (Engineering), Chief Research Associate, Strength Department, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: shorr@ciam.ru. Area of Research: static and dynamic strength of aviation engines.

Matsarenko Viktor Sergeevich, engineer, Strength Department, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov,

Moscow, Russian Federation. E-mail: matsarenko@ciam.ru. Area of Research: dynamic strength of aviation engines.

Serebryakov Nikolay Nikolayevich, Candidate of Science (Engineering), Head of Sector, Strength Department, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: serebryakov@ciam.ru. Area of Research: rotor dynamics, blade damping.