

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертационную работу Аунг Кхайн Мьинт на тему
«Расчетно-экспериментальный метод оценки птицестойкости элементов
авиационной техники для обеспечения эксплуатации летательных
аппаратов», представленную на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 2.5.13 «Проектирование, конструкция,
производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов»

Актуальность темы работы. По результатам исследований Федерального агентства воздушного транспорта (Росавиация) непрерывно ведется учет случаев столкновения авиационной техники с птицами в рамках обеспечения безопасности полетов. Причем, количество случаев столкновения и угрозах столкновения как с одиночной, так и стаями птиц увеличивается. Известно, что вероятность столкновения с птицами выше на этапах взлета, набора высоты, захода на посадку, а наибольшее количество соударений фиксируется с элементами двигателя и крыла. Для подтверждения работоспособности элементов конструкций авиационной техники проводятся сертифицированные испытания. Так, например, для самолетов транспортной категории приняты нормы летной годности НЛГ 25, а для двигателей воздушных судов НЛГ 33. Использование экспериментальных исследований, сертифицированных испытаний на птицестойкость элементов конструкций авиационной техники требует значительных временных и финансовых затрат. Очевидно, что применение расчетно-экспериментальных исследований с использованием численного моделирования на ранних стадиях проектирования элементов конструкций авиационной техники позволяет значительно снизить длительность разработки проектного облика с необходимой стойкостью к ударам птицей или птицами. В связи с чем, диссертационная работа посвящена **актуальному** направлению в области разработки расчетно-экспериментального метода оценки птицестойкости элементов авиационной техники.

Научная новизна проведенных исследований заключается в разработке расчетно-экспериментального метода исследований и оценки птицестойкости элементов авиационной техники на основе совмещения численного моделирования и статистической обработки экспериментов и данных испытаний. Предложены эмпирические кривые скорости птицы в зависимости от соотношения давления воздуха к массе птицы при выстреле, которые апробированы при численном моделировании соударения с разными элементами конструкций. Представляют научный интерес и результаты определения скорости непробития предкрылка самолета при выборе параметров конструктивно-силовой схемы, а также влияние ударного взаимодействия птицы на вращающиеся лопасти вентилятора двигателя и установленные зависимости напряжений на поверхности лобового стекла самолета с учетом наклона от угла удара птицы.

Практическая значимость представлена следующими результатами:

– разработан расчетно-экспериментальный метод оценки птицестойкости элементов авиационной техники, который позволяет: производить расчетно-экспериментальную оценку напряженно-деформированного состояния и оценивать параметры ударных динамических процессов при исследованиях на птицестойкость и имитацию соударения с элементами авиационной техники; снизить количество экспериментальных исследований; уменьшить время и сроки на подготовку и проведение экспериментальных исследований и испытаний;

– получено свидетельство № 2025665734 о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Степень обоснованности научных положений. В диссертационной работе решается ряд задач: разработка расчетно-экспериментального метода исследований и оценки птицестойкости элементов авиационной техники; разработка эмпирических кривых скорости птицы в зависимости от соотношения давления воздуха к массе птицы при выстреле; анализ и обработка результатов калибровочных лабораторных экспериментальных

исследований; численное моделирование ударного воздействия на элементы авиационной техники.

Диссертационная работа изложена на 171 странице, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 138 наименований, 86 рисунков, 3 таблиц.

Во введении приведена актуальность работы и представлены не получившие в настоящее время должного решения задачи, которые связаны с отсутствием опубликованных статистических данных по особенностям испытаний; эмпирических зависимостей, связанных как с моделированием птиц, так и влиянием геометрических особенностей на стойкость к удару. Представлена блок-схема расчетно-экспериментального метода оценки птицестойкости элементов авиационной техники. Сформулированы цель, задачи работы, научная новизна и практическая значимость. Приведены положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** приведен обзор и анализ исследований столкновений различных объектов авиационной техники с птицами в условиях эксплуатации. Представлены современные подходы к численному моделированию ударного воздействия птиц на конструкции, приведены преимущества отдельных подходов. Приведены характеристики пневматических ударных установок для проведения экспериментальных исследований.

Глава 2 посвящена математическим моделям и методам численного моделирования задач динамики. Рассматривается метод Лагранжа, метод Эйлера, комбинированный метод Лагранжа – Эйлера, метод сглаженных частиц SPH. Приведены основные математические модели и соотношения. Показаны преимущества и ограничения данных методов. Для численного моделирования использовался коммерческий программный комплекс LS DYNA (ANSYS), где реализованы различные математические модели для описания поведения пластичных, хрупких материалов. Уравнение состояния твердых тел выбрано по формуле Ми-Грюнайзена. Для моделирования

обшивки предкрылка и лопаток вентилятора использованы соотношения модели Джонсона-Кука. Модель Джонсона-Кука учитывает предел текучести материала в зависимости от накопленной пластической деформации, скорости деформирования и температуры. Лобовое стекло моделировалось с использованием соотношений Джонсона-Холмквиста, а модель Огдена применена для слоев клея.

В главе приведены алгоритмы статистического и регрессионного анализа, которые применялись для обработки экспериментальных данных по измеряемым параметрам: масса и скорость птицы, давление воздуха в ресивере, кучность стрельбы по мишеням в калибровочных лабораторных экспериментах и специальных испытаниях элементов летательных аппаратов на птицестойкость.

В **Главе 3** приведены результаты расчетных исследований на стойкость к удару птицей следующих объектов: лобовое стекло кабины, предкрылок крыла самолета, лопатка рабочего колеса вентилятора.

Первоначально исследовался удар по лобовому стеклу, где использована модель птицы в виде цилиндра с полусферами массой 1,8 кг и скоростью удара 158 м/с. Лобовое стекло представляло собой многослойный пакет из трех силикатных слоев, скрепленных с помощью полимерной пленки с клеевым слоем. Установлено, что уровень напряжений в момент удара составляет около 150 МПа, а коэффициент запаса 2,47 с учетом того, что удар птицей происходит не по нормали к поверхности стекла. Установлены зависимости от угла наклона стекла и угла удара птицей.

Для оценки корректности полученных ранее результатов проведены дополнительные исследования по ударному воздействию со скоростью 158 м/с птицей массой 1,0 кг и 2,5 кг, что позволило построить расчетную зависимость напряжений на поверхности лобового стекла от угла его наклона.

Следующим этапом проведены расчеты удара птицей массой 1,8 кг и скоростью 158 м/с предкрылка из материала Д16Т. При толщине обшивки 2 мм максимальные перемещения достигали 135 мм, а при толщине 3,2 мм –

42 мм. Результаты численного моделирования позволили построить зависимость скорости непробития предкрылка от разных углов удара птицей, массы, толщины обшивки. Дополнительно исследованы удары птицей с массой 2,5 кг и 3,6 кг.

Отдельно исследованы процессы ударного воздействия на вращающиеся лопатки вентилятора двигателя. Данный вид ударных нагрузок может привести не только к значительным деформациям лопаток, но также к их разрушению и последующему повреждению газоздушного тракта двигателя.

При численном моделировании считалось, что относительная скорость удара птицы по лопатке и ее направление менялись в зависимости от окружной скорости колеса и его отношения к осевой скорости попадания птицы. Осуществлялся учет влияния вращения и центробежных сил, образования трещин и отрыва элементов, а также то, что при ударе птица взаимодействует с несколькими последовательно стоящими лопатками, захватывая область колеса, превосходящую собственные размеры. Показано, что при ударе птицей о переднюю кромку лопатки происходит значительное деформирование с возможным образованием трещин и отрывом отдельных элементов из-за центробежных сил. Наибольшие эквивалентные напряжения в лопатке достигали 990 МПа. Птица фрагментируется и происходят последующие удары с соседними лопатками. Данные результаты сравнивались с экспериментальными исследованиями. Полученные данные по численному моделированию позволили вывести формулу для определения количества лопаток с повреждениями в зависимости от скорости птицы и параметров рабочего колеса вентилятора.

В **Главе 4** приведены общеизвестные зависимости из механики композитных сред, в частности представлены соотношения закона Гука, изгиба пластин и оценки напряженно-деформированного состояния оболочки. Представлены опубликованные данные по испытаниям лопаток вентилятора и проведено их численное моделирование. Выполнялась оценка напряженно-

деформированного состояния и ударного динамического процесса лопаток вентилятора при имитации удара с птицей. Представлена расчетно-экспериментальная методика, которая включала следующие этапы: на первом этапе расчета каждая интерферограмма (соответствующая своему моменту времени) обрабатывается по специальному алгоритму для получения картины перемещений по поверхности лопатки вентилятора; на втором этапе расчета исходные данные по перемещениям и свойства материала лопатки вентилятора вводятся в программу Lar Shell; на третьем этапе осуществляется расчет и оценка напряженно-деформированного состояния.

В главе подробно рассмотрена конфигурация и принцип работы устройства для измерения характеристик ударного динамического процесса в лопатках вентилятора, а также пневматическая пушка для испытаний на птицестойкость. Приведены результаты калибровочных исследований для определения реальных характеристик стенда, а именно: определение зависимости скорости полета птицы (снаряда) от давления в ресивере пневмопушки; определение точностных характеристик системы. По результатам серии калибровочных выстрелов получена эмпирическая кривая скорости полета птицы.

В заключение приведены основные выводы и результаты работы. Текст диссертационной работы свидетельствует о большом объеме проведенных автором исследований.

Автореферат отражает основные этапы и результаты диссертационной работы. По тематике диссертационной работы опубликовано 14 научных работ, в том числе в журналах из перечня, рекомендованных ВАК РФ по специальности 2.5.13 – 3. Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Замечания по диссертационной работе:

– в диссертационной работе имеются отдельные опечатки и неточности, в частности: одинаковые заголовки в оглавлении 1.5.1, 1.5.4; не переведены термины на рисунках 1.7 – 1.9, стр. 59 в параграфе 2.7 1-ый абзац и др.;

– в блок-схеме расчетно-экспериментального метода оценки птицестойкости элементов авиационной техники желательно было бы добавить не только последовательность этапов, но и их взаимосвязи, которые позволили бы выбирать рациональные параметры рассматриваемых конструкций;

– на рисунках 3.23 – 3.25 (диссертации) и на рисунке 16 (автореферата) приведены результаты расчета эквивалентных напряжений с максимальным уровнем значений 990 МПа, что ниже предельных для титанового сплава (таблица 2.2) в связи с чем, остается неясным, чем вызвано разрушение лопаток и образование отдельных элементов;

– при изучении ударного воздействия птицы на лопатки вентилятора не приведены данные по геометрическим особенностям, а также возможным их изменениям для достижения необходимой надежности;

– в главе 4 приведены зависимости для задачи изгиба пластины и оценки напряженно-деформированного состояния оболочки, но они не в полной мере адаптированы под рассматриваемые далее лопатки вентилятора;

– при численном моделировании удара птицей лобового стекла кабины, предкрылка крыла самолета, лопатка рабочего колеса вентилятора не учитывались аэродинамические нагрузки, действующие на конструкции при эксплуатации.

Сделанные замечания не влияют на положительную оценку работы, которая отвечает современным требованиям к диссертациям.


Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней».

В целом диссертационная работа объединяет в себе комплексные исследования, а также новые теоретические и практические результаты. Работа оформлена в соответствии с требованиями, установленными ВАК Российской Федерации, а также соответствует требованиям п. 9 – п. 14 «Положения о присуждении ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

Диссертационная работа на тему «Расчетно-экспериментальный метод оценки птицестойкости элементов авиационной техники для обеспечения эксплуатации летательных аппаратов» является законченной научно-квалификационной работой, а ее автор – Аунг Кхайн Мьинт заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.13 Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов.

Официальный оппонент

кандидат технических наук (по специальности 05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов), доцент кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана


«30» 04 2026 г.

Михайловский К.В.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Тел.: 8-499-263-65-14, e-mail: mikhaylovskiy@bmstu.ru

Подпись и должность Михайловского Константина Валерьевича заверяю:

С отзвном ознакомлен



06.05.2026



«ВЕРНО»

СПЕЦИАЛИСТ ПО ПЕРСОНАЛУ
ПОВАЛЯЕВА И.О.

ОТДЕЛ ПО ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ
ЕДИНОЙ ПРИЁМНОЙ
УКСА
МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА