

Математическое моделирование процесса соударения дрона с вентилятором ТРДД

Шорр Б.Ф., Бортников А.Д., Мацаренко В.С., Иванов И.И.

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

e-mail: vsmatsarenko@ciam.ru

Приведены результаты баллистических испытаний по забросу аккумуляторных батарей беспилотного летательного аппарата (БПЛА) – квадрокоптера – на пластины, имитирующие рабочие лопадки вентилятора ТРДД. Предложена математическая модель батареи в виде корпуса с электролитом, и проведена ее валидация. На основе экспериментально обоснованной модели аккумуляторной батареи построена математическая модель БПЛА массой 1,28 кг. Выполнено расчетное моделирование попадания БПЛА в рабочее колесо вентилятора ТРДД, которое показало возможность повреждения рабочих лопаток, подобного повреждению от попадания крупной птицы массой 2,75 кг.

Ключевые слова: ТРДД, попадание посторонних предметов, беспилотный летательный аппарат, беспилотное воздушное судно, квадрокоптер, лопадка вентилятора, столкновение

Mathematical modeling of the drone's collision with a fan of a turbofan engine

Shorr B.F., Bortnikov A.D., Matsarenko V.S., Ivanov I.I.

CIAM, Moscow

The article presents results of ballistic tests carried out by launching batteries of an unmanned aerial vehicle (UAV) – a quadcopter – on plates simulating fan blades of a turbofan. A mathematical model of a battery represented by casing with an electrolyte is proposed and its validation is carried out. Based on the experimentally validated battery model, a mathematical model of a UAV weighing 1,28 kg is developed. A computational modeling of the UAV colliding with the fan rotor of a turbofan was performed, which revealed possible damage to fan blades, equivalent to damage sustained by colliding with a large bird weighing 2,75 kg.

Keywords: turbofan engine, foreign objects ingestion, unmanned aerial vehicle, unmanned aircraft, quadcopter, fan blade, collision

Введение

По мере стремительного расширения применения в авиации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) разного типа (дронов) возрастает опасность их столкновения с пилотируемыми воздушными судами (ВС). Особенно быстро увеличивается количество гражданских БПЛА массой от нескольких сот граммов до нескольких килограммов, которые могут попадать, в частности, в авиационный двигатель. Низкая стоимость таких аппаратов приводит к их использованию для видеосъемки, в геодезии, при поисково-спасательных работах, доставке грузов и др.

Постоянный рост эксплуатационных характеристик БПЛА (скорости и высоты полета) при отсутствии

средств отслеживания маршрутов их передвижения также увеличивает вероятность их столкновения с воздушными судами [1].

В работе [2] приведен анализ свыше 900 случаев сближения БПЛА с пилотируемыми ВС. В 35% случаев они оказывались в опасной близости, причем 12 раз пилотам приходилось отклоняться от курса, чтобы избежать столкновения. Один раз пассажирский самолет получил повреждения носовой части фюзеляжа в результате столкновения с любительским БПЛА. Зарегистрировано два случая столкновения вертолетов с БПЛА.

О натуральных испытаниях, моделирующих такие столкновения, сведений мало. В исследовании [3] описаны выстрелы БПЛА разной массы по передней части списанных самолетов и вертолетов. Было показано,

что любые БПЛА опасны для легких самолетов и вертолетов, не имеющих специальной защиты от столкновений с птицами. Наибольшие повреждения могут получить лобовые стекла ВС, носовые обтекатели, передние кромки крыла, а также двигатели. Ущерб от БПЛА массой ~1,5 кг может быть больше ущерба от птиц той же массы, с которыми самолеты регулярно сталкиваются в воздухе.

О попадании БПЛА непосредственно в авиадвигатель авторам настоящей статьи не известно, однако исключить вероятность таких событий нельзя.

С точки зрения требований к обеспечению безопасности полетов столкновение с БПЛА отвечает случаю «попадания постороннего предмета» в ВС, и соответствие этим требованиям должно подтверждаться испы-



Рис. 1. БПЛА DJI Phantom 3 [5]:

1 – полетный контроллер (пластик, алюминий); 2 – корпус (пластик); 3 – пропеллер (углепластик); 4 – батарея (Li-Po); 5 – электромотор (алюминий, медь, сталь); 6 – контроллер скорости; 7 – видеокамера (алюминиевый корпус); 8 – подвес камеры (алюминий); 9 – ползковое шасси (пластик)

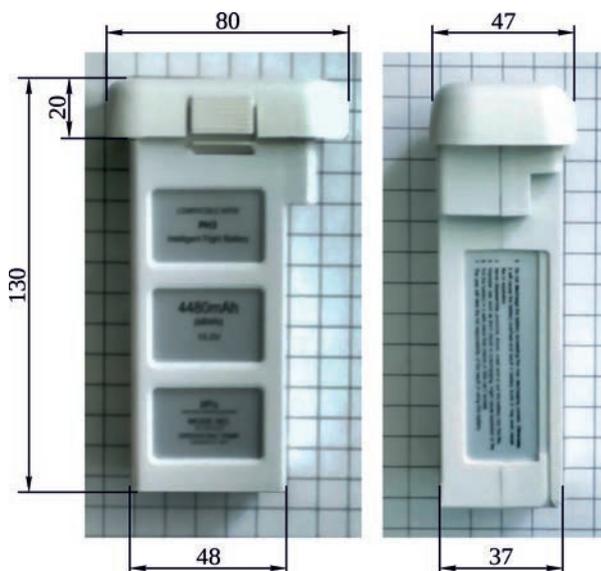


Рис. 2. Аккумуляторная батарея БПЛА

таниями и расчетами. Как и в случае столкновения с птицами, наибольшую опасность может представлять столкновение массивных узлов БПЛА с вращающимися рабочими лопатками вентилятора или первой ступени компрессора.

В работе [4], посвященной расчетному моделированию столкновения, использовали модель БПЛА с шестью несущими винтами массой 5,4 кг и максимальным диаметром 1 м. В результате моделирования удара по вентиляторной ступени ТРДД со скоростью ~90 м/с произошел обрыв одной рабочей лопатки. Другие опубликованные результаты компьютерного моделирования также показывают, что БПЛА массой более 3,6 кг представляют опасность для авиадвигателя.

Целью настоящей работы являлось экспериментально-расчетное исследование процесса столкновения массивной аккумуляторной батареи небольшого БПЛА с пластинами – имитаторами лопаток для уточнения математической модели БПЛА и оценки безопасности его столкновения с рабочими лопатками вентилятора/компрессора двигателя гражданской авиации.

Конструкция и эксплуатационные характеристики БПЛА

Распространенной конструкцией гражданских БПЛА является аппарат с четырьмя несущими винтами (квадрокоптер). В настоящей работе рассматривается один из таких БПЛА – DJI Phantom 3 (рис. 1).

Эксплуатационные характеристики БПЛА DJI Phantom 3

Габариты (длина по диагонали), мм:	
включая пропеллеры	590
по осям пропеллеров	350
Масса (включая батарею), г	1280
Масса батареи, г	365
Количество электромоторов	4
Скорость полета, км/ч	≤ 60
Максимальная высота полета, км	2

Экспериментальное исследование удара аккумуляторной батареи БПЛА по пластинам

Детальное экспериментальное исследование процесса взаимодействия с преградой всех многочисленных разнородных элементов конструкции квадрокоптера провести затруднительно. Целесообразно выбрать конструктивные элементы, которые могут оказать максимальное повреждающее воздействие на лопатки вентилятора. К таким элементам, прежде всего, относится массивная и компактная аккумуляторная батарея (рис. 2). Электромотор имеет массу 80 г, что в несколько раз меньше массы батареи. Видеокамера является внеш-

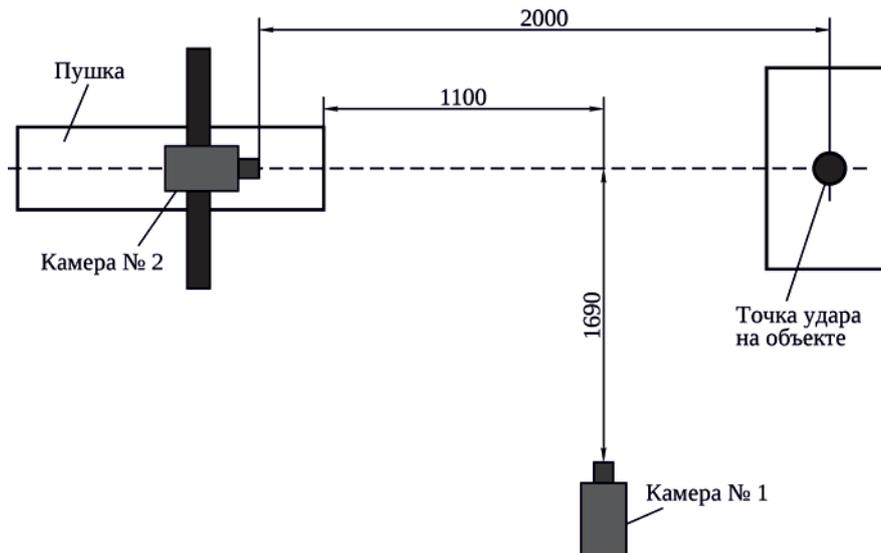


Рис. 3. Схема расположения элементов испытательного стенда ЦИАМ (вид сверху)

Таблица. Параметры выстрелов

Параметр	1	2	3	4	5	6
Скорость заброса батареи, м/с	103,7	57,5	56,5	80,1	81,7	254,1
Масса батареи, г	365,8	363,0	362,3	363,9	360,7	366,0

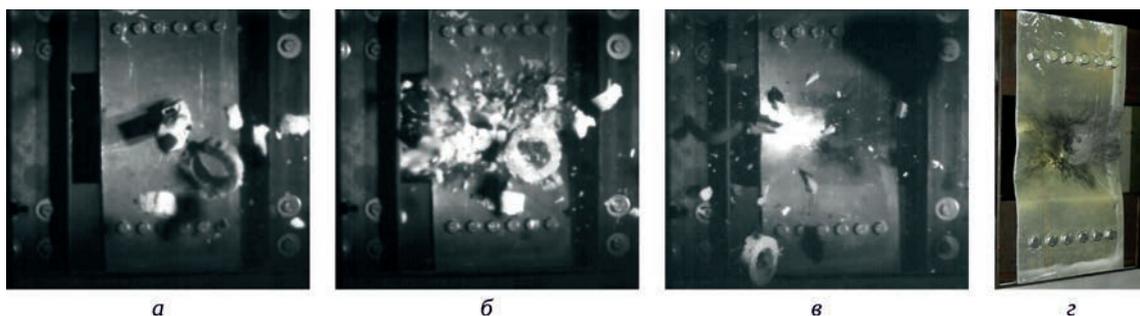


Рис. 4. Экспериментальная картина удара аккумуляторной батареи БПЛА по пластине-имитатору со скоростью $v = 254,1$ м/с: а – начало контакта; б – момент интенсивного разрушения батареи; в – полное разрушение батареи; г – состояние пластины после удара

ним навесным оборудованием, поэтому в данной работе не рассматривалась.

Испытания проводили на стенде ЦИАМ, предназначенном для стрельбы посторонними предметами из пневматической пушки (рис. 3). Пластины – имитаторы лопатки закрепляли в оснастке болтами по концам длинных сторон, что приближенно имитировало при ударе влияние центробежных сил. Материал пластины – алюминиевый сплав. Аккумуляторную батарею перед выстрелом помещали в пенопластовую гильзу и располагали в стволе пушки так, чтобы ее длинные ребра были параллельны оси пушки. После вылета из пушки гильза отделялась от батареи.

Всего по пластинам-имитаторам было выполнено шесть выстрелов батареями БПЛА со скоростью в диапазоне 57...254 м/с (таблица), не считая калибровочных выстрелов для отладки подачи воздуха в ресивер пушки.

Угол установки пластины относительно траектории батареи БПЛА составлял 90° .

На рис. 4 представлены кадры высокоскоростной видеосъемки испытания № 6, характеризующегося наибольшей скоростью столкновения батареи с пластиной. На рис. 4,а в центре кадра находится батарея в момент контакта с пластиной, справа и снизу от нее видны обломки гильзы (торообразное тело и светлые фрагменты). На рис. 4,б показан момент разрушения батареи с образованием мелких фрагментов, обломки гильзы по-прежнему видны. На рис. 4,г показана поврежденная в результате удара пластина. При обследовании испы-



Рис. 5. Остаточный прогиб пластины, $v = 254,1$ м/с

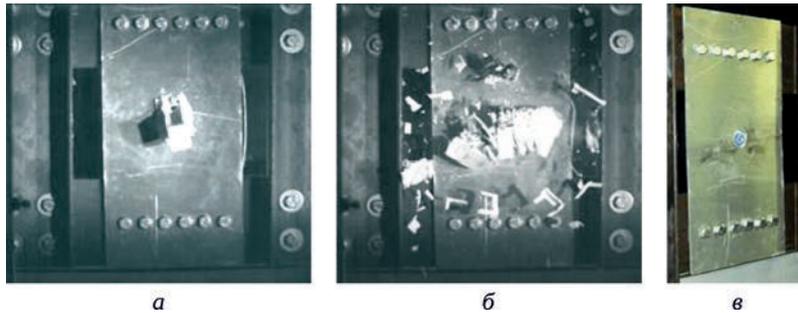


Рис. 6. Экспериментальная картина удара аккумуляторной батареи БПЛА по пластине-имитатору со скоростью $v = 81,7$ м/с:
 а – начало контакта; б – момент разрушения батареи; в – состояние пластины после удара

тательного стенда после удара были выявлены следы электролита, который разлетелся во все стороны.

Пластина получила значительные вмятины, но разрушения материала не произошло. Максимальный остаточный прогиб составил $\Delta \approx 50$ мм (рис. 5).

Для иллюстрации влияния скорости соударения на рис. 6 приведены кадры испытания № 5. Пластина получила малозаметные повреждения, разрушения материала не произошло. Максимальный остаточный прогиб составил $\Delta \approx 5$ мм.

Скорость соударения посторонних предметов с вращающимися лопатками вентилятора имеет значения близкие к скорости удара в испытании № 6, поэтому дальше проводится анализ результатов этого испытания.

Расчетный анализ процесса взаимодействия аккумуляторной батареи БПЛА и пластины

Для расчетного анализа процесса взаимодействия аккумуляторной батареи и пластины-имитатора на полученных в испытаниях скоростях применили конечно-элементные модели батареи, пластины и оснастки.

В качестве упрощенной модели батареи приняли модель в форме сплошного прямоугольного параллелепипеда с размерами $130 \times 48 \times 40$ мм (вспомогательные пластиковые элементы корпуса батареи не моделировали). Батарею моделировали в SPH-постановке [6]. Использовали модель материала с билинейной кривой деформирования и с критерием разрушения. В качестве критерия разрушения принимали достижение интенсивностью пластических деформаций заданного предельного значения.

В качестве модели материала пластины-имитатора использовали упругопластическую модель. Критерий разрушения материала пластины – достижение предельного значения интенсивности пластических деформаций. Оснастку моделировали в упругой постановке, критерий разрушения не задавали.

Свойства материала аккумуляторной батареи принимали согласно открытым публикациям (E , μ , $\sigma_{0,2}$ – по [7], E_τ – по [4]). Среднюю плотность материала вычисляли исходя из заданных массы и объема.

Свойства материала аккумуляторной батареи

Средняя плотность ρ , кг/м ³	1450
Модуль упругости E , ГПа	0,5
Коэффициент Пуассона μ	0,3
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	30
Касательный модуль E_τ , МПа	50

Были выполнены расчеты взаимодействия батареи с пластиной при разной скорости удара и различных значениях критерия разрушения материала батареи.

Упрощенная модель аккумуляторной батареи дает значительную погрешность в определении максимальных остаточных прогибов пластины. Так, прогиб для скорости $v = 254,1$ м/с на 22% меньше значения в соответствующем эксперименте. Характер разрушения расчетной модели батареи при ударе не соответствует характеру разрушения батареи в эксперименте.

Для получения уточненной модели аккумуляторную батарею смоделировали неоднородным телом, состоящим из пластикового корпуса, заполненного электролитом (оболочечная модель). Толщина стенки корпуса составляла 3 мм. Материал корпуса – упругопластический. В качестве критерия разрушения материала принимали достижение средней по его объему интенсивностью пластических деформаций ($\epsilon_{p,i}$) заданной предельной величины ($(\epsilon_{p,i})_f$).

Свойства упругопластической модели корпуса

Средняя плотность ρ , кг/м ³	1400
Модуль упругости E , ГПа	20
Коэффициент Пуассона μ	0,3
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	30
Касательный модуль E_τ , МПа	100
Интенсивность пластических деформаций $(\epsilon_{p,i})_f$	0,3

Электролит моделировали жидкостью с плотностью $\rho = 1470$ кг/м³, остальные параметры соответствовали параметрам воды. Суммарная масса корпуса и

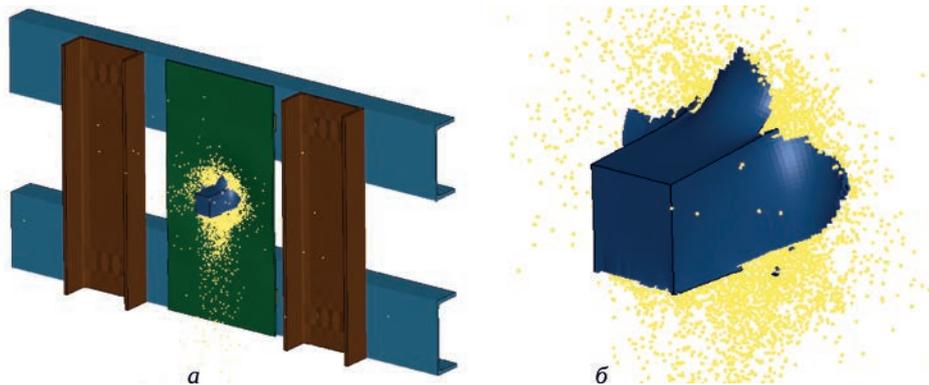


Рис. 7. Расчетная картина разрушения аккумуляторной батареи при ударе со скоростью $v = 254,1$ м/с: а – общий вид удара по пластине в оснастке; б – характер разрушения батареи

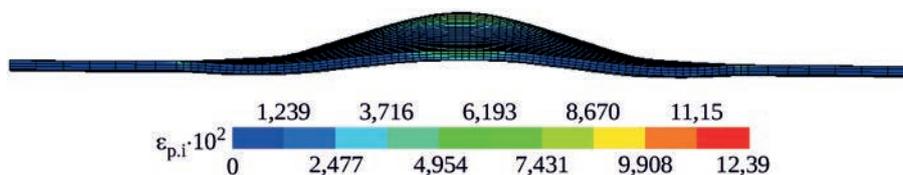


Рис. 8. Интенсивность остаточных пластических деформаций пластины, $v = 254,1$ м/с

электролита в модели составила 362 г, что соответствует параметрам испытаний.

Результаты расчета процесса взаимодействия аккумуляторной батареи и пластины представлены на рис. 7. Пластина после удара с распределением интенсивности остаточных пластических деформаций показана на рис. 8.

В процессе удара корпус батареи разламывается на отдельные фрагменты, а электролит разбрызгивается во все стороны. Сравнение расчетной картины с кадрами высокоскоростной видеосъемки показывает, что принятая уточненная расчетная модель удовлетворительно согласуется по характеру разрушения с натурной конструкцией.

Расчетное значение прогиба пластины для скорости $v = 254,1$ м/с составило $\Delta \approx 44$ мм, что на 12% меньше значения в соответствующем эксперименте. Интенсивность пластических деформаций в месте удара достигала $\epsilon_{p,i} = 0,13$, разрушения материала (трещин, локальных выбоин) по результатам расчетов, как и в испытаниях, отмечено не было.

В случае расчетного моделирования удара со скоростью $v = 81,7$ м/с повреждения пластины оказались малозаметными, а порядок остаточных деформаций соответствовал экспериментальным данным. Как было указано выше, скорости удара батареи в других испытаниях значительно меньше реальных скоростей соударения посторонних предметов с вращающимися лопатками, поэтому результаты соответствующих расчетов не приводятся.

Таким образом, рассмотренная уточненная модель аккумуляторной батареи дает близкие к эксперименту значения при определении максимальных остаточных

прогибов пластины. Характер разрушения модели самой батареи при ударе соответствует характеру разрушения аккумуляторной батареи, наблюдаемому в эксперименте.

Расчетное моделирование процесса попадания БПЛА в рабочее колесо вентилятора

Создание подробной модели квадрокоптера со всеми особенностями конструкции представляется нерациональным из-за ее большой размерности. Поэтому при создании модели целесообразно выделить основные конструктивные элементы, которые могут оказать максимальное повреждающее воздействие на лопатки вентилятора. К таким элементам относятся электромоторы, аккумуляторная батарея, рама (корпус). Конечно-элементная модель БПЛА состояла из рамы в виде диска с четырьмя лучами, аккумуляторной батареи в виде параллелепипеда и четырех моторов в виде цилиндров (рис. 9).

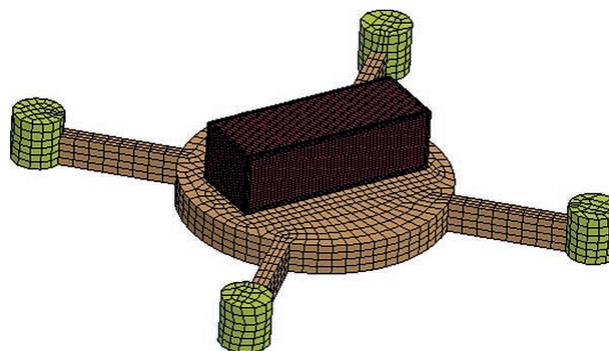


Рис. 9. Конечно-элементная модель БПЛА

В качестве модели батареи использовали экспериментально обоснованную оболочечную модель, предложенную выше. Электромоторы и пластиковую раму моделировали сплошными однородными телами. Использовали модели материала с билинейной кривой деформирования. В качестве критерия разрушения принимали $(\varepsilon_{p,i})_f$.

Среднюю плотность каждого элемента конструкции вычисляли исходя из информации о его массе и объеме. Свойства моделей материалов рамы и электромотора принимали согласно [4] (E_r) и [7] ($E, \mu, \sigma_{0,2}$).

Свойства материалов элементов модели (рама/электромотор)

Плотность ρ , кг/м ³	1280/3110
Модуль упругости E , ГПа	69/117
Коэффициент Пуассона μ	0,33/0,34
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	276/70
Касательный модуль E_r , МПа	150/300

Лопатки рассматриваемого вентилятора – облегченные, пустотелые, с внутренними упрочняющими

перегородками. Для уменьшения размерности задачи моделировали сектор из пяти лопаток. Материал лопаток – титановый сплав ВТ6.

С целью дальнейшего сравнения стойкости лопаток вентилятора к столкновению с БПЛА и птицей расчет проводили при условиях, отвечающих требованиям параграфа 33.76 Авиационных правил [8]:

- осевая скорость БПЛА (по оси двигателя) $v = 100$ м/с;
- направление заброса БПЛА перпендикулярно плоскости вращения рабочего колеса вентилятора.

В качестве радиуса заброса принят радиус, соответствующий 70% высоты пера лопатки. В этом случае на основании опыта исследований стойкости лопаток к попаданию птиц можно ожидать значительных повреждений.

На рис. 10 и рис. 11 приведены результаты расчета удара БПЛА по лопаткам вентилятора для случая, когда критерий разрушения материала рамы составляет $(\varepsilon_{p,i})_f = 0,1$ (соответствующие элементы рамы разруша-

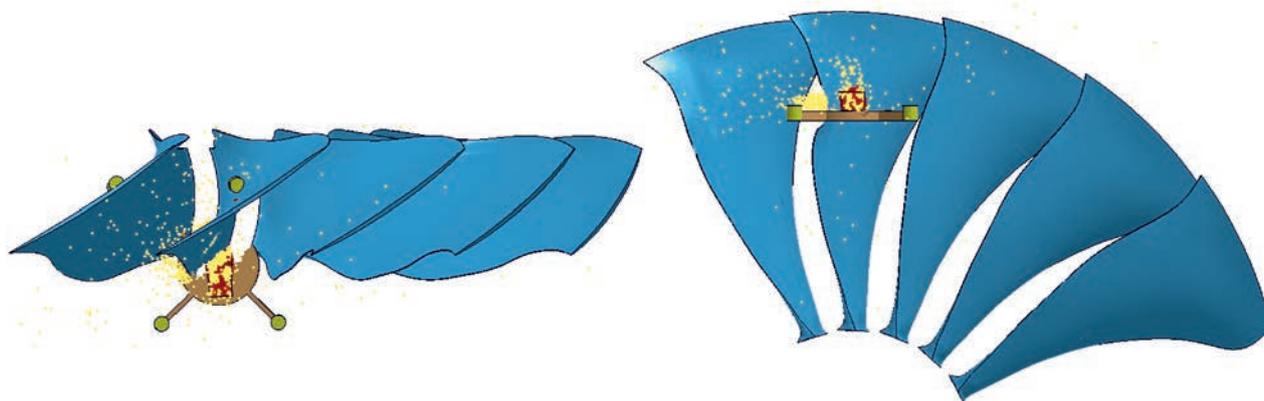


Рис. 10. Расчетная картина удара БПЛА по лопаткам вентилятора



Рис. 11. Интенсивность остаточных пластических деформаций лопаток вентилятора после попадания БПЛА

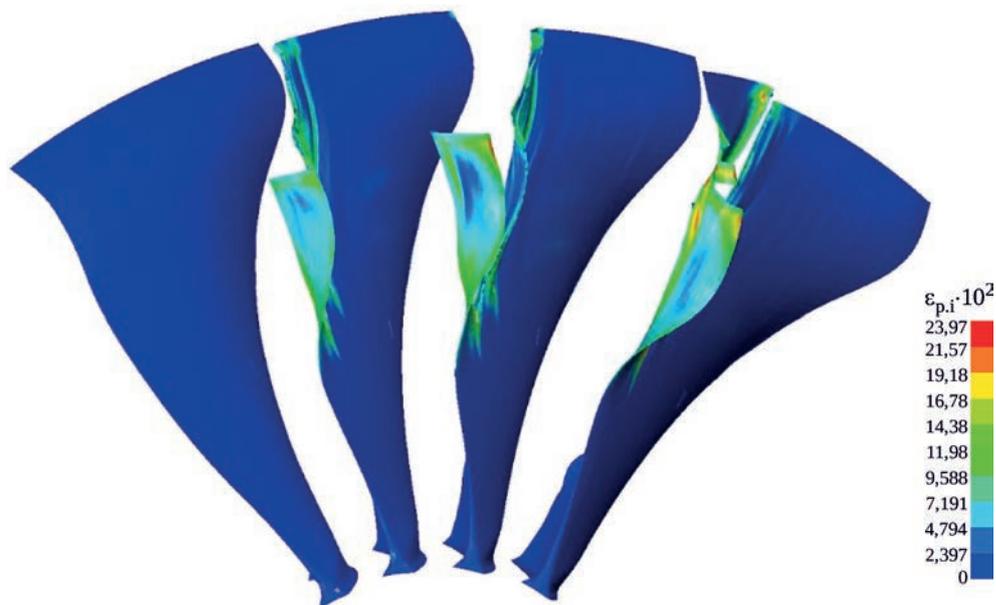


Рис. 12. Интенсивность остаточных пластических деформаций лопаток вентилятора после попадания крупной птицы

ются и исключаются из дальнейшего расчета). Показаны взаимное положение БПЛА и сектора рабочего колеса вентилятора (вид со стороны торца пера лопаток и со стороны спинки), характер деформации последовательно вступающих в контакт лопаток и распределение в них интенсивности остаточных пластических деформаций в конце удара.

В процессе столкновения набегающие лопатки разрезают раму квадрокоптера и батарею. Электромоторы при ударе о лопатки отделяются от рамы, деформируются, но не разрушаются.

Рабочие лопатки при ударе отгибаются в сторону противоположную вращению. Удар захватывает пять лопаток. Наибольшие повреждения получают средние лопатки (вторая и третья). В этих лопатках происходит значительная деформация с разрывом (разрушением материала) в области входной кромки. Также наблюдается значительная деформация в зоне перехода от сплошной входной кромки к полый средней части лопатки. В совокупности такие повреждения могут привести к обрыву верхней входной части пера. Между собой деформирующиеся лопатки не соприкасаются. Нижняя часть пера (примерно 50%) остается неповрежденной.

Сравнение последствий попадания БПЛА и крупной птицы в рабочее колесо вентилятора

Ниже представлены результаты проводившихся ранее в ЦИАМ расчетов повреждений при попадании крупной птицы в колесо вентилятора авиадвигателя. Масса птицы $m = 2,75$ кг. Осевая скорость птицы (по оси двигателя) $v = 100$ м/с. Геометрические характеристики

лопаток и параметры модели их материала аналогичны случаю попадания БПЛА.

Наиболее сильно повреждались вторая, третья и четвертая лопатки – происходил отрыв верхней части входной кромки по продольной линии, проходящей примерно по границе с полый средней частью пера (рис. 12). Между собой деформирующиеся лопатки не соприкасались. Нижняя часть пера (примерно 40%) оставалась неповрежденной.

Сравнение расчетных картин повреждений лопаток после попадания БПЛА массой 1,28 кг (см. рис. 11) и повреждений после попадания крупной птицы массой 2,75 кг (см. рис. 12) показывает, что в обоих случаях возможно разрушение нескольких лопаток в виде отрыва верхней части входной кромки. Учитывая, что принятая в расчете масса квадрокоптера в два раза меньше массы крупной птицы, можно сделать вывод о том, что попадание БПЛА на вход авиадвигателя несет опасность сравнимую с попаданием крупной птицы.

Заключение

Проведено экспериментально-расчетное исследование процессов столкновения массивного элемента квадрокоптера (аккумуляторной батареи) с пластинами – имитаторами рабочих лопаток вентилятора ТРДД.

Экспериментальная часть работы включала шесть выстрелов аккумуляторными батареями по пластинам со скоростью в диапазоне 57...254 м/с.

Расчетный анализ последствий соударения аккумуляторной батареи с пластиной-имитатором проводился с учетом упругопластических свойств материала оснастки и пластины. Предложена уточненная составная

модель батареи в виде жидкости, окруженной упруго-пластическим корпусом – оболочкой.

Разрушение аккумуляторной батареи в экспериментах и расчетах имеет качественно близкий характер. Расчетный абсолютный прогиб пластины удовлетворительно согласуется с экспериментальными значениями.

Близость результатов экспериментов и расчетов позволяет использовать предложенную модель аккумуляторной батареи для построения математических мо-

делей БПЛА и формирования рекомендаций по оценке безопасности их столкновений с авиадвигателями.

Расчетное моделирование попадания БПЛА в рабочее колесо вентилятора ТРДД подтвердило принципиальную возможность разрушения лопаток вентилятора.

Сравнительный анализ показал, что, несмотря на меньшую массу, попадание БПЛА может привести к таким же повреждениям лопаток вентилятора, что и попадание крупной птицы.

Литература / References

1. «Drone Collision» Task Force : final report : (04/10/16) / European Aviation Safety Agency. 2016. 33 p.
2. Gettinger D., Michel A.H. Drone sightings and close encounters: an analysis / Bard College, Center for the Study of the Drone. 2015. 20, [8] p.
3. Yang M., Wang Y., Wu Zh. Research on the collision threat of drones and civil airliners // International Journal of Science. 2018. Vol. 5, no. 6. P. 284–290.
4. Advanced propulsion collision damage due to unmanned aerial system ingestion / Y. Song, K. Schroeder, B. Horton, and J. Bayandor. 2016. 7 p. (30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Daejeon, DCC, Korea, 25–30 September 2016 ; ICAS 2016-629).
5. How do drones work and what is drone technology? // Drone tech planet : website. URL: <https://www.dronetechplanet.com/how-do-drones-work-and-what-is-drone-technology/> (accessed: 15.09.2022).
6. Monaghan J.J. Smoothed particle hydrodynamics // Reports on Progress in Physics. 2005. Vol. 68, no. 8. P. 1703–1759.
7. Unmanned aerial vehicle impacts on heat-strengthened glass / S.E. Lee, J.-W. Jung, Y. Choi, Y.-J. Yoon, and J.-W. Hong // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 104269–104278.
8. Попадание птиц // Авиационные правила. Ч. 33. Нормы летной годности двигателей воздушных судов / Межгос. авиац. комитет. 2012. § 33.76. С. 45–49.
Popadanie ptits [Bird ingestion]. Aviatsonnyye pravila [Aviation regulations]. Part 33. Normy letnoi godnosti dvigatelei vozdushnykh sudov [Airworthiness standards: aircraft engines]. Interstate Aviation Committee. 2012. Sec. 33.76. P. 45–49.

Материалы получены редакцией 19.07.2022