

## Методика расчета напряженно-деформированного состояния лопаток вентилятора ГТД при соударении с птицей

Аунг К.М., Лепешкин А.Р.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва

Повреждения элементов авиационной техники при столкновениях с птицами существенно снижают уровень безопасности полетов в гражданской и военной авиации, приводят к росту числа аварий и катастроф, увеличению затрат на эксплуатацию, связанных с необходимостью выполнения восстановительного ремонта поврежденного летательного аппарата. При таком столкновении высок риск деформации лопаток вентилятора и различных ступеней компрессора, так же возможен обрыв лопаток с повреждением газоздушного тракта и последующих ступеней, помпаж двигателя с последующим отказом [1-3]. Испытания и исследования по забросу птиц призваны решить задачи, относящиеся к проблеме птицестойкости деталей авиационных газотурбинных двигателей (ГТД): обосновать расчетную модель тела птицы, разрушающегося при ударе по твердой преграде, и обосновать применение методов компьютерного расчета для анализа соударения разрушающейся птицы с лопатками или другими твердыми преградами. Под твердыми понимаются преграды (детали), которые при ударе деформируются существенно слабее, чем птицы.

Известны многие универсальные программные комплексы (Nastran, ANSYS, LS-DYNA и др.) конечно-элементного анализа конструкций и многофазных систем, имеющих возможности расчета нестационарных динамических и переходных процессов, которые могут использоваться для расчета птицестойкости. Наличие в таких пакетах обширных банков данных по моделям материалов и методам вычислений, а также развитых компьютерных средств введения исходной информации и наглядного представления результатов расчета делает эти комплексы удобными для практического применения. Возникает актуальная задача соединения полученных пользователями более или менее достоверных экспериментальных характеристик тела птицы с имеющимися в программных пакетах или специальной литературе моделями материалов и расчетными процедурами многофазных систем. Необходимо принять модель птицы как мягкого разрушающегося при ударе тела, и другие вопросы, относящиеся к компьютерному моделированию ударного взаимодействия птиц с твердыми поверхностями деталей. Наличие в теле птицы большого количества жидкости приводит к тому, что усредненная по объему тела плотность мало отличается от плотности воды и это можно использовать в расчетном моделировании. Процесс соударения птицы или ее имитатора с преградой рассматривается как единичный удар из начального ненагруженного состояния движущейся птицы, позволяющий описать ее разрушение и разлет фрагментов. Низкая прочность тела птицы как единого целого, по сравнению с прочностью деталей двигателя, приводит к тому, что тело птицы в расчетах на удар можно считать полностью разрушающимся, точнее полностью распадающимся на отдельные части. Результаты расчетов могут быть распространены на расчеты вращающегося колеса вентилятора ГТД, когда птица последовательно разрезается лопатками на отдельные части, которые до удара продолжают начальное движение. Возможные дальнейшие столкновения останков птицы и фрагментов лопаток при этом обычно рассчитываются по тем же моделям, что и удар целой птицы.

Для учета значительного изменения геометрии птицы и лопатки вентилятора при их повреждениях от соударения и тем более при разрушениях целесообразно использовать бессеточные методы расчета. Из разных подходов к построению таких моделей наиболее успешным оказался метод сглаженных частиц, особенно его вариант, относящийся к задачам гидродинамики, который получил несколько условное название метода сглаженных частиц гидродинамики SPH (smooth particles hydrodynamics). Развитие этого метода показало, что он применим не только к гидродинамике, но и к другим проблемам, в том числе к задачам соударения и разрушения твердых деформируемых тел [4].

В данной работе в разработанной методике расчета используются метод SPH для модели птицы и конечно-элементное моделирование процесса удара птицы с лопатками вентилятора ГТД в программном комплексе LS DYNA. В указанной методике учитывается процесс удара птицы по вращающимся лопаткам рабочего колеса вентилятора ГТД. Методика учитывает следующие условия вращения рабочего колеса, которые влияют на птицестойкость лопаток: относительная скорость удара птицы по лопатке и ее направление меняются в зависимости от окружной скорости колеса и ее отношения к осевой скорости попадания птицы; натяжение пера лопатки центробежными силами повышает ее жесткость, особенно в верхних сечениях, что приводит к уменьшению как максимальных прогибов во время удара, так и остаточных прогибов; компоненты напряжений от центробежных сил алгебраически суммируются с динамическими напряжениями от удара, что влияет на уровень максимальных напряжений и на появление трещин в наиболее напряженных зонах пера лопатки; после появления трещины центробежные силы способствуют отрыву фрагментов пера лопатки, траектории оторвавшихся в этот момент кусков отличаются от траекторий кусков, оторвавшихся при ударе без вращения; при попадании во вращающееся рабочее колесо птица взаимодействует с несколькими последовательно стоящими

лопатками, захватывая область колеса, превосходящую собственные размеры птицы. Кроме того, в данной методике выполняются принципы учета в общем расчетном алгоритме удара контактной задачи в виде меняющихся граничных условий. Учет изменений условий удара осуществляется на каждом расчетном шаге путем последовательных приближений в конечно-элементном анализе.

С использованием разработанной методики получены следующие результаты расчета. Предварительные результаты статического расчета распределения механических напряжений от центробежных сил перед ударом показывают, что верхняя часть и почти вся область у входной кромки лопатки вентилятора ГТД статически мало нагружены. При принятом в расчете направлении удара с учетом отношения скоростей птицы и колеса вентилятора тело птицы вначале разрезается входной кромкой лопатки почти пополам. Под давлением действующей на корыто пера соответствующей половины тела птицы очень тонкий верхний конец пера лопатки резко отгибается в сторону спинки, и тогда вся верхняя часть корыта пера подвергается давлению обеих половин птицы, что приводит к сильному деформированию верхней части пера у входной кромки. В дальнейшем надорванный уголок под действием центробежных сил отрывается от лопатки.

Далее сравниваются результаты расчета при ударе птицы по вращающейся и невращающейся лопатке вентилятора. В результате удара все перо невращающейся лопатки изогнулось гораздо сильнее, чем при вращении, и область высоких напряжений распространилась до корневой области лопатки. Это связано с тем, что после удара под действием сил упругости лопатка несколько распрямилась, но общие деформации пера остались значительными. При сравнении видно, что натяжение центробежными силами тонкой верхней части вращающейся лопатки препятствует ее значительному деформированию. Максимальные суммарные напряжения от центробежных сил и удара больше, чем только от удара. Значительная пластичность материала лопатки и податливость верхней половины пера привели к сильному различию деформаций и последствий удара по исследуемой вращающейся и невращающейся лопатке. Но даже в этом случае расчеты подтвердили прочность нижней части лопатки. На рис. 1 представлены результаты расчета – напряженно-деформированного состояния лопаток вращающегося колеса вентилятора ГТД при соударении с птицей. На рис. 1 также видны фрагменты птицы и отгибы кромок лопаток после удара птицы. При сравнении расчетно-экспериментальных результатов исследований и испытаний на птицестойкость колеса вентилятора ГТД получено, что количество поврежденных лопаток в расчете и эксперименте совпало.

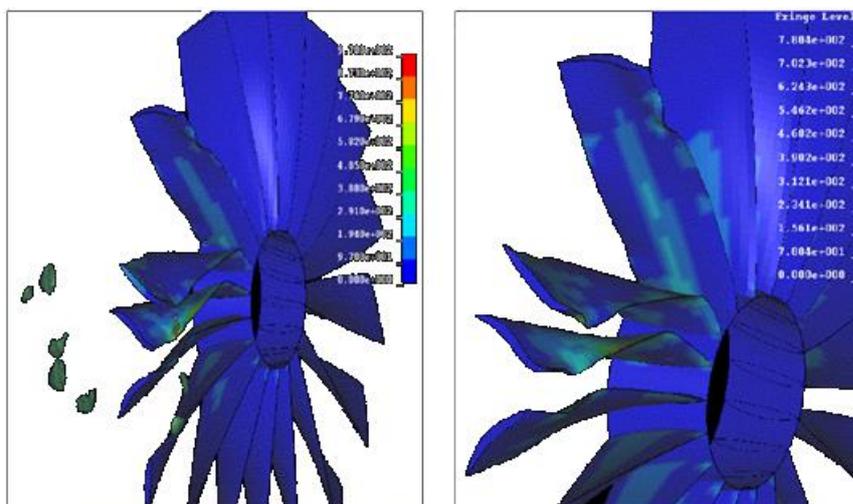


Рис. 1. Напряженно-деформированное состояние лопаток вентилятора при соударении с птицей

## Список литературы

- [1] Лепешкин А.Р., Ильинская О.И., Маликов С.Б. Динамика и прочность авиационных газотурбинных двигателей. М.: Изд-во МАИ, 2020. – 100 с.
- [2] Lepeshkin A. The blade releasing method for test of engine casing containment // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE). Сер. "ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2013". 2013. С. 63749.
- [3] Shorr B.F., Serebriakov N.N., Melnikova G.V. et al. Computational and experimental study of bird failure at different speeds of collision with a flexible plate // The International Conference on Aviation Motors (ICAM 2020). Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1891. 012050.
- [4] Блажевич Ю.В., Иванов В.Д., Петров Ю.Б. и др. Моделирование высокоскоростного соударения методом гладких частиц // Математическое моделирование. 1999. № 1. С. 88-100.