

Особенности постановки задачи исследования механических процессов соударения птицы с лопаткой двигателя

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Сформулирована задача исследования механических процессов соударения птицы с лопаткой двигателя, являющаяся нестационарной, пространственной, многоконтактной задачей механики сплошных сред. Описана механико-математическая модель для исследования этих, содержащая уравнение изменения количества движения, уравнения неразрывности и сохранения энергии, реологические модели и уравнения состояния, начальные, граничные и контактные условия. Приведена универсальная форма записи уравнений движения, неразрывности и сохранения энергии в подвижной системе координат, связанной с эйлеровой сеткой, позволяющая рассматривать решение задачи соударения в различных системах координат.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, механико-математическая модель, механика сплошных сред, лопатка двигателя, уравнение состояния, Лагранжевый подход, метод ALE, метод SPH.

Постановка проблемы. Исследование процессов деформирования, функций напряженно-деформированного состояния (НДС) и прочности лопатки двигателя представляет собой важное направление в обеспечении безопасности полетов и надежности двигателя [1], требующее разработки адекватных математических моделей механических процессов и методик численной реализации, оптимизации параметров моделей по критериям точности и эффективности вычислительного процесса, а также собственно исследования процессов деформирования, НДС и прочности лопатки.

Актуальность исследования определяется неиссякаемой потребностью в достоверных количественных данных о закономерностях и особенностях процессов деформирования и прочности лопаток для решения задач проектирования, эксплуатации, ремонта и восстановления авиационных двигателей. Изменения конструкции двигателя, условий и режимов его эксплуатации, а также сложность и многообразие явлений, сопровождающих процесс соударения, приводит к необходимости новых постановок задачи и разработки методик решения, отличающихся достоверностью, точностью и вычислительной эффективностью.

Цель работы. Целью данной работы является анализ особенностей постановки задачи исследования механических процессов соударения птицы с лопатками двигателя.

Основной материал статьи. Как отмечено в работе [1], компьютерное моделирование является одним из эффективных методов изучения сложных механических процессов. Компьютерные модели стали обычным инструментом математического моделирования и широко применяются при решении задач механики сплошных сред.

В приведенном ниже обзоре работ рассмотрены вопросы моделирования нестационарных процессов, возникающих при столкновении птицы с лопаткой двигателя.

В работе [2] рассмотрено моделирование НДС лопатки двигателя и ее разрушение, вызванное столкновением с птицей. Моделирование птицы и лопатки выполнено в системе LS-DYNA с применением подхода Лагранжа.

Проанализированы два последовательных этапа: определение напряжений и деформаций, возникающих при вращении лопасти и моделирование процесса соударения птицы с лопаткой двигателя. В качестве реологической модели поведения материала лопатки выбрана упругопластическая модель, параметры которой зависят от скорости деформирования. Для описания геометрии лопатки использованы оболочечные элементы переменной толщины. Птица моделировалась в виде эллипсоида вращения. Для описания геометрии птицы применены объемные конечные элементы. Для описания поведения материала тушки птицы при ударе использовано уравнение состояния с параметрами, близкими к параметрам воды. Отмечено хорошее согласование результатов моделирования с результатами эксперимента.

В работе [3] рассмотрено моделирование процесса столкновения птицы с лопаткой вентилятора и компрессора в системе нелинейного анализа NOSAPM и дано сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными. Столкновение описано как гидродинамический процесс, при котором птица моделируется струей жидкости, соударяющейся с пространственной деформируемой поверхностью произвольной формы. Соударение струи жидкости с преградой рассмотрено как квазистационарное безвихревое течение без учета начальной ударной волны, возникающей при ударе (давление Гюгонио). Таким образом, сложный ударно-волновой процесс сведен к рассмотрению решения уравнения Лапласа. Птица моделируется в форме цилиндра с плоскими торцами. В качестве реологической модели поведения материала лопатки выбрана упругопластическая модель с линейным деформационным упрочнением. Отмечено хорошее согласование результатов моделирования (по перемещениям и деформациям) с результатами эксперимента.

В работе [4] проанализирована применимость различных методов описания модели птицы, а именно: метода Лагранжа, Эйлера, Лагранжево–Эйлерового (ALE), сглаженных частиц (SPH) и метода узловых масс (NM). Исследования проводены в системе LS-DYNA. Тушка птицы моделировалась в виде цилиндра со скругленными торцами, имеющего следующие размеры: длина цилиндрической части – 20 см, диаметр сферических оголовков – 10 см. Для описания поведения материала тушки применена модель NULL и уравнение состояния Грюнайзена. Авторы указали на ограниченную применимость подхода Лагранжа, позволяющего получить удовлетворительный результат лишь при малых степенях деформаций. При сильных искажениях сетки применение Лагранжевого метода конечных элементов приводит к значительным ошибкам, при этом резко увеличивается время решения, а в ряде случаев происходит прекращение счета. Введение критериев разрушения в целях исключения из модели вырожденных элементов приводит к рассогласованию результатов численного анализа с экспериментом. В результате использования методов Эйлера и ALE получены результаты, неудовлетворительно согласующиеся с экспериментом. Авторы отметили, что улучшение качества сетки модели птицы позволяет повысить точность решения, однако приводит к увеличению времени решения.

Применение метода NM приводит к получению нереалистичного результата в силу отсутствия взаимодействия между точечными массами. Введение механизма рассеяния энергии, например, учет сил демпфирования в контактном алгоритме, позволяет описать более реалистично поведение модели птицы. Это приводит к повышению численной устойчивости решения, точности и уменьшению времени счета. Результаты, полученные при использовании метода SPH, близки к

результатам, полученным методом NM, однако метод SPH приводит к более реалистичному результату. В частности, общий характер и траектории движения частиц совпадают с результатом, полученным в ходе эксперимента.

Оба метода (метод SPH и модифицированный NM) позволяют получить хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных и уменьшают процессорное время. Увеличение коэффициента вязкого демпфирования дает возможность повысить устойчивость решения и устранить искусственные всплески (максимумы) контактных усилий. Учитывая все преимущества и недостатки этих методов, авторы утверждают, что метод SPH является наиболее надежным и подходящим для воспроизведения динамики процесса соударения птицы с лопаткой.

J. Frischbier и A. Kraus [5] использовали методы ALE и SPH для прогнозирования ударной нагрузки и реакции первой ступени компрессора высокого давления турбовентиляторного двигателя PW6000 в случае столкновения с птицей массой 2,5 фунта. Моделирование проведено в системе LS-DYNA версия 970. Было установлено, что по сравнению с традиционным методом Лагранжа методы ALE и SPH обеспечивают достаточно высокую численную устойчивость. Кроме того, установлено, что метод SPH приводит к более точному результату, чем ALE метод.

R. Jain и K. Ramachandra [6] исследовали реакцию вращающейся лопатки при столкновении с птицей. Они применили явный конечно-элементный метод с учетом взаимодействия деформируемой конструкции с текучей средой (Fluid Structure Interaction), который реализован в системе MSC-DYTRAN. Для описания геометрии модели птицы использован цилиндрический объем с соотношением длины и диаметра, равным двум, заполненный материалом, свойства которого близки свойствам воды. Авторы добились хорошего совпадения расчетных и экспериментальных результатов.

M. Anghileri и C. Bisagni в работе [7] предложили новую расчетную модель птицы, состоящую из узлов с дополнительными точечными массами и имеющих начальную скорость. Данная модель, являясь бессеточной, исключает проблемы, связанные с численной неустойчивостью, вызванной значительными искажениями сетки. Модель использовали для моделирования процесса столкновения стаи птиц с входным устройством турбовентиляторного двигателя. Авторы указали на необходимость сопоставления расчетной модели с экспериментальными данными, однако полученный результат хорошо согласуется с результатом, полученным с помощью модели Брокмана [8], и, таким образом, модель может быть использована для анализа процесса столкновения птицы с лопаткой двигателя. В дополнение отмечено, что процессорное время, необходимое для расчета новой бессеточной модели, в десять раз меньше процессорного времени, необходимого для расчета модели Брокмана.

N. Martin проанализировав столкновение птицы с лопаткой вентилятора усовершенствовал возможности программы WHAM, добавив сферический жидкий элемент, используемый для моделирования силового взаимодействия птицы с конструкцией [9, 10].

В работе [11] рассмотрено применение подхода Лагранжа для описания движения механической системы, используемой при моделировании процесса соударения птицы с жесткой преградой и деформируемой лопаткой двигателя. Постановка задачи и анализ полученных результатов выполнены в системе ANSYS, а решение задачи – в системе LS-DYNA. Исследованы различные аспекты решаемой задачи. Проведено сравнение полученных результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными J. Wilbeck [12].

В работе [13] описано моделирование процесса соударения птицы с лопаткой двигателя с помощью метода SPH, реализованного в системе EUROPLEXUS. Приведено математическое описание метода SPH. Рассмотрено НДС от вращения ротора со скоростью 13600 об/мин; столкновение птицы с лопаткой, замедление вращения ротора. Проанализированы реакция и остаточные деформации лопатки. Отмечено, что применение метода SPH позволяет избежать проблему численной неустойчивости, присущей традиционному Лагранжеву МКЭ, в случае значительных деформаций и искажений расчетной сетки.

Решению задачи обязательно предшествует этап формализации изучаемого физического процесса: его описание в виде соответствующей системы уравнений, соотношений и определяющих условий, т.е формулировка механико-математической модели (МММ) изучаемого процесса взаимодействия деформируемого тела и среды [14].

Постановка задачи исследования механических процессов деформирования лопатки двигателя при соударении с птицей заключается в составлении такой замкнутой системы уравнений и соотношений, которая описывает движение и состояние деформирования сред с учетом их физико-механических свойств, внешних силовых и других факторов и позволяет определять зависимости характеризующих движение и состояние физических величин от координат (x^i) и времени (t): перемещений $s(x^i, t)$, скорости $v(x^i, t)$, деформаций $\varepsilon(x^i, t)$, напряжений $\sigma(x^i, t)$ и плотности $\rho(x^i, t)$. Здесь верхний индекс i , равный 1, 2, 3 принимает значения в пределах определенной мерности пространства.

Нестационарные механические процессы в системах сплошных сред описываются несколькими группами условий, имеющих вид равенств или неравенств. С учетом возможного движения системы отсчета и связанной с ней эйлеровой сетки при использовании совместного Лагранжево-Эйлерового подхода (ALE) к описанию движения системы уравнения принимают следующий вид.

- уравнение движения (уравнение изменения количества движения, закон изменения импульса) [15, 16]:

$$\rho \ddot{s} + \rho \nabla \dot{s} (\mathbf{v} - \dot{s}) = \rho \mathbf{b} + \text{div} T_{\sigma}, \quad (1)$$

где \ddot{s} – вектор ускорения,

$$\nabla = \frac{\partial(\dots)}{\partial x} i + \frac{\partial(\dots)}{\partial y} j + \frac{\partial(\dots)}{\partial z} k \quad \text{– оператор Гамильтона,}$$

\mathbf{v} – скорость сетки,

\dot{s} – скорость материальной частицы,

\mathbf{b} – массовая плотность внешних сил,

div – дивергенция,

T_{σ} – тензор напряжений Коши;

- уравнение неразрывности (закон сохранения массы) [15]:

$$\dot{\rho} + \nabla \rho (\mathbf{v} - \dot{s}) + \rho \cdot \text{div} \mathbf{v} = 0; \quad (2)$$

- уравнение сохранения энергии [15]:

$$\rho \dot{u} + \rho \nabla u (\mathbf{v} - \dot{s}) = \sigma : T_{\dot{\varepsilon}}, \quad (3)$$

где \dot{u} – скорость изменения внутренней энергии,
 u – удельная внутренняя энергия,

$$T_{\dot{\varepsilon}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \text{тензор скоростей деформации,}$$

\cdot – двойное скалярное произведение;

- реологические модели и уравнения состояния [15, 17 – 20].

Реологические модели (физические соотношения) описывают зависимости между функциями напряженного и деформированного состояний, реакцию деформируемой среды на процесс деформирования и показывают, какие внутренние напряжения возникают в ней в ответ на деформацию.

При описании свойств жидких и газообразных сред используют уравнения состояния, связывающие функции давления, внутренней энергии и температуры [15]. Уравнение состояния характеризует фундаментальное свойство реальных деформируемых сред – их сжимаемость.

В случае отсутствия влияния температуры на физико-механическое поведение рассматриваемой сплошной среды физические соотношения имеют вид.

$$T_{\sigma} = T_{\sigma}(T_{\varepsilon}, T_{\dot{\varepsilon}}). \quad (4)$$

$$p = p(\rho, u), D_s \equiv 0, \quad (5)$$

где $T_{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial s_i}{\partial x_j} + \frac{\partial s_j}{\partial x_i} + \frac{\partial s_k}{\partial x_i} \frac{\partial s_k}{\partial x_j} \right)$ – тензор деформаций, p – давление,

D_{σ} – девиатор напряжений.

Ниже рассмотрены виды реологических соотношений при различных постановках задачи исследования соударения птицы с лопаткой двигателя.

Модель упругости является математической записью обобщенного закона Гука в тензорном представлении:

$$\sigma = D \cdot \varepsilon, \quad (6)$$

где D – матрица 6×6 упругих свойств.

Главным свойством рассматриваемой модели является обратимость процессов деформирования, т. е. отсутствие механизма накопления остаточных деформаций после разгрузки материала.

Наряду с моделью упругого тела также применима модель абсолютно жесткого тела. Ее использование уместно на этапе верификации расчетной модели птицы в целях исключения взаимного влияния жесткости лопатки на нагрузки, возникающие в процессе деформирования птицы.

Упругопластическая модель со скоростным упрочнением и разрушением [18]

При моделировании соударения важную роль играет описание пластических эффектов в материале, поскольку именно с пластическим деформированием обычно связывают образование ударных волн [21]. Особенностью реологических моделей, описывающих поведение материала при высокоскоростном динамическом нагружении, является то, что они должны учитывать такие факторы, как степень деформаций и скорость деформирования. На практике для этого часто используют упругопластическую модель со скоростным упрочнением и моделью разрушения [11, 18, 22]

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{n} \right)^{1/k} \right] \left(\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_{eff}^p \right), \quad (7)$$

$$p < p_{min} \quad (8)$$

или

$$\epsilon_{eff}^p < \epsilon_{max}^p, \quad (9)$$

где σ_y – текущее значение предела текучести материала,

n и k – параметры материала,

σ_0 – начальное значение предела текучести,

$\dot{\epsilon}$ – скорость деформации,

E_p – модуль упрочнения,

β – параметр упрочнения,

ϵ_{eff}^p – эффективная пластическая деформация.

Варьируя значения параметра упрочнения β можно получить различные виды упрочнения: при $\beta = 0$ – кинематическое упрочнение, при $\beta = 1$ – изотропное, и при $0 < \beta < 1$ – комбинацию кинематического и изотропного упрочнения.

Скорость деформации $\dot{\epsilon} = \sqrt{\dot{\epsilon}_{ij} \cdot \dot{\epsilon}_{ij}}$. Здесь использовано правило суммирования по повторяющимся индексам.

$$\text{Модуль упрочнения } E_p = \frac{E_t \cdot E}{(E - E_t)},$$

где E_t – касательный модуль;

E – модуль упругости первого рода (модуль Юнга).

Эффективная пластическая деформация

$$\epsilon_{eff}^p = \int_0^t \left(\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^p \cdot \dot{\epsilon}_{ij}^p \right)^{1/2} dt.$$

Уравнение (7) описывает поверхность деформирования материала при динамическом нагружении. Оно позволяет определить текущее значение радиуса поверхности текучести σ_y как сумму начальной величины предела текучести σ_0 и добавки $\beta E_p \epsilon_{eff}^p$, учитывающей механизм упрочнения, масштабированную с учетом влияния скорости деформирования.

Данная модель учитывает зависимость предела текучести от скорости деформирования (сомножитель в квадратных скобках) и накопленной пластической деформации (сомножитель в круглых скобках) (см. уравнение (7)).

Результаты исследований показывают, что при соударении птицы с конструкцией в теле птицы возникает гидравлический удар [12]. Таким образом, процесс соударения птицы с лопаткой двигателя можно рассматривать как удар струи жидкости о преграду.

В качестве реологической модели, описывающей поведение материала тушки птицы при ударе, обычно используют модель идеальной жидкости:

$$D_{\sigma} \equiv 0 \quad (10)$$

Данная модель не учитывает вязкости среды, т.е. в такой среде отсутствуют касательные напряжения.

Таким образом, тензор напряжений для модели идеальной жидкости представлен шаровым тензором:

$$T_{\sigma} = S_{\sigma} = -p\delta_{ij}, \quad (11)$$

где p – давление,

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \text{ – символ Кронекера.}$$

Отсюда следует, что напряженное состояние модели идеальной жидкости характеризуется, по существу, одной скалярной величиной – давлением p .

Наиболее часто в работах используют уравнение состояния в виде линейного полинома [11, 18, 22 – 24]:

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)u, \quad (12)$$

где $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$ и C_6 – константы;

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \text{ – коэффициент изменения массовой плотности,}$$

ρ и ρ_0 – плотность в текущий и начальный момент времени соответственно;

u – удельная внутренняя энергия.

Для моделирования поведения материала птицы часто используют модель Брокмана [11, 22 – 24]:

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3.$$

Здесь $C_0 = 0$, $C_1 = 2324$ МПа, $C_2 = 5026$ МПа, $C_3 = 15180$ МПа.

Наряду с уравнением состояния (12) также применимо уравнение состояния Грюнайзена [4, 18, 25]:

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu \left[1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2})\mu - \frac{\alpha}{2}\mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]} + (\gamma_0 + \alpha\mu)u, \text{ при } p > 0, \quad (13)$$

где c – объемная скорость звука,

γ_0 – коэффициент Грюнайзена,

α – коэффициент, характеризующий наклон графика зависимости коэффициента Грюнайзена от объема,

S_1, S_2 и S_3 – коэффициенты наклона ударной адиабаты.

В работе [25] указаны численные значения параметров ($c = 1,4829 \cdot 10^3$ м/с, $S_1 = 2,0367$), входящих в уравнение Грюнайзена, применительно к задаче исследования соударения птицы с лопаткой двигателя.

Для получения единственности решения МММ, уравнения (1)–(5) необходимо дополнить следующими условиями:

- граничные условия [15 – 17] описывают известное по своему характеру взаимодействие механической системы с окружающей средой. Это условия, которыми задаются значения искомых функций (или их производных по времени и координатам) на поверхности области Ω , занимаемой деформируемой средой:

$$s = s(x_{\Omega}^i, t). \quad (14)$$

- начальные условия [15 – 17] описывают значения функций НДС в начальный момент времени:

$$\text{при } t=0 \quad \dot{s}_i = \dot{s}_i(x^i, 0), \quad \rho = \rho(x^i, 0), \quad (15)$$

где $\dot{s}_i = V_0$ – начальная скорость птицы.

Начальные условия совместно с граничными и контактными условиями определяют единственность решений МММ.

- контактные условия (КУ) [26 – 28] описывают взаимодействие элементов механической системы.

Применительно к решаемой задаче справедлив наиболее общий вид контактных условий: неклассический контакт с неизвестной зоной контакта и возможностью раздельного движения элементов как в нормальном направлении (отрыв поверхностей), так и в касательном направлении (скольжение). Это широко распространенная форма контактного взаимодействия, описываемая кинематическим условием «непроникновения» и условием положительности контактного давления.

Кинематическому условию «непроникновения» соответствует утверждению о том, что взаимодействующие деформируемые среды, имеющие общую границу раздела Ω_i , не могут проникать друг в друга, а могут проскальзывать одна относительно другой со скоростью $v_{II} - v_I$, направленной по касательной к границе раздела.

Данному утверждению соответствует условие типа

$$(v_{II} - v_I)n = 0, \quad (16)$$

где v_I – вектор скорости движения любой точки среды I, находящейся в контакте с одноименной точкой среды II; v_{II} – скорость движения любой точки среды II, находящейся в контакте с одноименной точкой среды I; n – вектор общей нормали к поверхностям раздела сред I и II.

Динамическая часть контактных условий на границе раздела двух сред формулируется на основе третьего закона Ньютона и устанавливает взаимосвязь между тензорами напряжений:

$$T_{\sigma_{ij}} n^j \leq 0, T_{\sigma_{ij}} n^i \leq 0. \quad (17)$$

Контактные условия, описанные в виде неравенств, определяют существенную нелинейность соответствующей МММ механической системы.

С учетом перечисленных выше особенностей сформулирована система определяющих уравнений и неравенств МММ, которая является нестационарной, трехмерной и существенно неоднородной. Такие модели не имеют решений в простых функциях и решаются приближенно с использованием численных методов.

Выводы

1. Проанализированы работы, посвященные вопросу моделирования процесса соударения птицы с лопаткой двигателя.

2. Сформулирована задача исследования механических процессов соударения птицы с лопаткой двигателя, которая является нестационарной пространственной многоконтактной задачей механики сплошных сред и имеет ряд особенностей:

- механические процессы, протекающие в системе, существенно неоднородны и нелинейны. Источниками нелинейности являются геометрическая нелинейность (конечные деформации) и нелинейность поведения материала (вязко-пластичность и разрушение), а также ударно-контактное взаимодействие тел;
- процесс соударения характеризуется быстротечностью и высокой интенсивностью;
- зона контакта, в общем случае, заранее неизвестна и представлена подвижной областью общей границы раздела сред, меняющей форму и положение в процессе взаимодействия – неклассический характер контактного взаимодействия;
- наличие сильного взаимного влияния между силой ударного воздействия и откликом конструкции на воздействие.

3. Описана механико-математическая модель для исследования механических процессов соударения птицы с лопаткой двигателя, включающая уравнение изменения количества движения, уравнения неразрывности и сохранения энергии, реологические модели и уравнения состояния, начальные, граничные и контактные условия. Дана универсальная форма записи уравнений движения, неразрывности и сохранения энергии в подвижной системе координат, связанной с эйлеровой сеткой, позволяющая рассматривать решение задачи соударения в различных системах координат: Лагранжевой (при $\dot{s} = v$), Эйлеровой (при $v = 0$) и подвижной системе координат (при $\dot{s} \neq v$), связанной с эйлеровой сеткой при использовании совместного Лагранжево-Эйлерового подхода.

Список литературы

1. Нарыжный, А.Г. Анализ факторов, связанных со случаями попадания птиц в авиационный двигатель [Текст] / А.Г. Нарыжный, В.Н. Павленко, С.П. Светличный // Авиационно-космическая техника и технология: научно-технический журнал. – 2011. – Вып. 6(83). – С. 62 – 67.
2. Vasko, T.J. Fan Blade Bird-Strike Analysis and Design [Электронный ресурс] / T.J. Vasko – Режим доступа: <http://www.dynalook.com/international-conf-2000/session9-2.pdf>.
3. Storace, A. F. Analytical and Experimental Investigation of Bird Impact on Fan and Compressor Blading [Text] / A. F. Storace, R. P. Nimmer, R. Ravenhall // AIAA Journal of Aircraft. – 1983. – Vol. 21. – No. 7, Paper No 83-0954. – pp. 520–527.
4. Anghileri, M. Bird Strike: Approaches to the Analysis of Impacts with Penetration [Text] / M. Anghileri, L-M. Castelletti, V. Mazza // Impact Loading of Light Structures, WIT Transactions on Engineering Science. – 2005. – Vol. 49. – pp. 64–74.
5. Frischbier, J. Multiple Stage Turbofan Bird Ingestion Analysis with ALE and SPH Methods [Text] / J. Frischbier, A. Kraus // AIAA. – 2005. – Paper No. 1016. – pp. 1–9.

6. Jain, R. Bird Impact Analysis of Pre-Stressed Fan Blades Using Explicit Finite Element Code [Text] / R. Jain, K., K. Ramachandra // Proceeding of the International Gas Turbine Congress, Tokyo, November 2-7. 2003. – pp. 1–7.
7. Anghileri, M. New Model of Bird Strike against Aircraft Turbofan Inlet [Электронный ресурс] / M. Anghileri, C. Bisagni – Режим доступа: http://www.aero.polimi.it/~anghi/KRASH2001_bird1.htm
8. Nizampatnam, L.S. Models and Methods for Bird Strike Load Predictions [Электронный ресурс] / L.S. Nizampatnam – Режим доступа: <http://soar.wichita.edu/dspace/bistream/handle/10057/1494/d07030.pdf?sequence=1> – December 2007.
9. Martin N.F. A Fluid Soft-Body Projectile Model for Impact Damage Analysis [Text] / N.F. Martin // Master's Thesis. June 1982. – University of Delaware.
10. Martin, N.F. Nonlinear Finite Element Analysis to Predict Fan-Blade Damage Due to Soft-Body Impact [Text] / N.F. Martin // Journal of Propulsion. – 1990. – Vol. 6. – No. 4. – pp. 445–450.
11. Blair, A. Aeroengine Fan Blade Design Accounting for Bird Strike [Text] // A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Applied Science. Department of Mechanical and Industrial Engineering. The University of Toronto, March 2008. – 84 p.
12. Impact behaviour of low strength projectiles [Text]: Technical Report: AFML-TR-77-134 / Air Force Materials Laboratory, Air Force Wright Aeronautical Laboratory, Wright Patterson Air Base; Wilbeck James S – Ohio, July 1978.
13. Chevrolet, D. Bird Impact Analysis on a Bladed Disk [Text] / D. Chevrolet, S. Audic, J. Bonini // RTO AVT Symposium on Reduction of Military Vehicle Acquisition Time and Cost through Advanced Modeling and Virtual Simulation. 22-25 April 2002. – Paris. – 2002. – pp. 31-1–31-8.
14. Бабкин А. В. Основы механики сплошных сред [Текст]: учеб. для вузов / А. В. Бабкин, В.В. Селиванов; 2-е изд. испр.– М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 376 с.
15. Жермен, П. Механика сплошных сред [Текст] / П. Жермен. – М.: Мир, 1965. – 479 с.
16. Новацкий, В. Теория упругости [Текст] / В. Новацкий. – М.: Мир, 1975. – 872 с.
17. Седов, Л.И. Механика сплошной среды [Текст] / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1973, Т. 1. – 536 с.
18. LS-DYNA. Keyword user's manual. Version 971. – Livermore: LSTC, 2006. – 2102 с.
19. Коларов, Д., Механика пластических сред [Текст] / Д. Коларов, А. Балтов, Н. Бончева. – М.: Мир, 1979. – 302 с.
20. Флетчер, К. Вычислительные методы в динамике жидкостей [Текст] / К. Флетчер: в 2-х т. – М., Мир, 1991. – Т. 1: Основные положения и общие методы.
21. Holian, B.L. Atomic computer simulation of shock waves [Текст] / B.L. Holian // Shock waves. – 1995. V. 5 – P. 149 – 157.
22. Mao, R. H. Transient three dimensional finite element analysis of a bird striking a fan blade [Электронный ресурс] / R. H. Mao, S. A. Meguid, T. Y. Ng. – Режим доступа: <http://www.springerlink.com/index/y82245734271j740.pdf>
23. Rajeev, J Effect of Bird Material and Projectile Shape on Temporal Pressure Distribution during Bird Impact [Text] / J. Rajeev, Shivayogi // Altair CAE User Conference. Innovation through Simulation, 3-5 August 2006. – Bangalore, 2006. – pp. 1-14
24. Review of existing numerical methods and validation procedure available for bird strike modeling [Text] / M-A. Lavoie, A. Gakwaya, M. Nejad Ensan and D.G. Zimcik // ICCES. – 2007. – Vol.2, – No.4. – pp.111–118

25. McCallum, S.C The influence of bird-shape in bird-strike analysis [Электронный ресурс] / S.C. McCallum, C. Constantinou. – Режим доступа: <http://www.dynalook.com/european-conf-2005/Mccallum.pdf>
26. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия [Текст] / К. Джонсон. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
27. Гольдсмит, В. Удар [Текст] / В. Гольдсмит. – М.: Стройиздат, 1965. – 448 с.
28. Wriggers, P. Computational contact mechanics [Text] / P. Wriggers. – Wiley, 2002. – 464 p.

Рецензент: д-р техн. наук, профессор С.В. Епифанов
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»,
г. Харьков, Украина

Поступила в редакцию

Особливості постановки задачі дослідження механічних процесів зіткнення птиці з лопаткою двигуна

Сформульовано задачу дослідження механічних процесів зіткнення птиці з лопаткою двигуна, що є нестационарною, просторовою, багатоконтактною задачею механіки суцільних середовищ. Описано механіко-математична модель для дослідження механічних процесів зіткнення птиці з лопаткою двигуна, що містить рівняння зміни кількості руху, рівняння нерозривності й збереження енергії, реологічні моделі та рівняння стану, початкові, граничні та контактні умови. Дана універсальна форма запису рівнянь руху, нерозривності й збереження енергії в рухомій системі координат, пов'язаної з ейлеровою сіткою, що дозволяє розглядати рішення задачі зіткнення в різних системах координат.

Ключеві слова: напружено-деформований стан, механіко-математична модель, лопатка двигуна, рівняння стану, підхід Лагранжа, метод ALE, метод SPH.

Features of problem definition of bird impact mechanical processes analysis

The problem of bird impact mechanical processes analysis is stated. It is transient, three dimensional and multi contact problem of continuum mechanics. Mechanical and mathematical model for bird impact mechanical processes analysis is described. It involves momentum equation, continuity equation and energy conservation equation, rheological models and equations of state, initial, boundary and contact conditions. Universal notation of the equations of motion, continuity and energy conservation in the moving coordinate system aligned with Eulerian mesh is given, which allows to consider solution of the bird impact problem in different coordinate systems.

Keywords: deflected mode, mechanical and mathematical model, continuum mechanics, engine blade, Lagrangian method, ALE method, SPH method.