УДК (629.7.015.4+629.78):519.6

А. Г. НАРЫЖНЫЙ, В. Н. ПАВЛЕНКО

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ И АГРЕГАТАХ ИЗДЕЛИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Представлен обзор литературы по применению компьютерного моделирования механических процессов в системах и агрегатах изделий аэрокосмической техники (АКТ). Отмечена возрастающая структурная сложность объектов, для которых используется моделирование, междисциплинарный характер процессов, а также сложный характер контактного взаимодействия и значительная величина деформаций и перемещений элементов. Для моделирования используются различные методы дискретизации по пространству, причем часто в рамках единой модели. Моделирование рассматривается как конкурент или дополнение к экспериментальному методу исследования сложных систем АКТ.

Представлено огляд літератури стосовно застосування комп'ютерного моделювання механічних процесів в системах і агрегатах виробів аерокосмічної техніки (АКТ). Відзначена зростаюча структурна складність об'єктів, для яких використовується моделювання, міждисциплінарний характер процесів, а також складний характер контактної взаємодії та значна величина деформацій і переміщень елементів. Для моделювання використовуються різні методи дискретизації за простором, причому часто в рамках єдиної моделі. Моделювання розглядається як конкурент або доповнення до експериментального методу дослідження складних систем АКТ.

The literature on the simulation of mechanical processes in systems and units of aerospace engineering products is reviewed. The increasing structural complexity of the simulated objects, the interdisciplinary nature of the processes as well as the complex nature of the contact interaction and significant deformations and element displacements are highlighted. Various methods of space discretization are often used for the simulation with a single model. The simulation is considered as a competitor or a supplement to the experimental methods for studying complex systems of aerospace engineering.

Ключевые слова: *аэрокосмическая техника, математическое моделирование, летательный аппарат, лопатка, ударные нагрузки.*

При эксплуатации изделий аэрокосмической техники (АКТ) и авиадвигателей (АД) возникают разнообразные опасные ситуации, имеющие механическую природу, вызванные как внешними причинами, так и особенностями работы систем АКТ и АД. Необходимо изучать возникновение и развитие подобных ситуаций и предусматривать обоснованные проектные решения, препятствующие негативным исходам или снижающие негативные последствия.

Все более широкое распространение для исследования процессов и состояний получает математическое моделирование систем и агрегатов АКТ и АД.

В работе [1] отмечено, что моделирование является быстрым и малозатратным способом обоснования новых проектных идей. Численное моделирование часто дает более качественно верное и количественно точное воспроизведение подробностей напряжений, перемещений и деформаций, чем более затратные и сложные экспериментальные исследования.

В отличие от традиционных расчетных методик, моделирование позволяет учитывать большее количество особенностей конструкции и условий ее эксплуатации в их противоречивости и взаимовлиянии, повышая точность и адекватность, в целом – достоверность результатов исследования.

Целью статьи является описание предметной области исследований различных, в том числе опасных, ситуаций в работе изделий АКТ с помощью моделирования. Обзор не касается вопросов технологии и традиционных вопросов, например термопрочности и ползучести лопаток двигателей. Затро-

нуты вопросы моделирования сугубо нестационарных процессов, в основном связанных с соударением и контактным взаимодействием тел. Рассмотрены исследования, проведенные, в основном, с помощью пакета программного обеспечения (ПО) LS-DYNA [2] и опубликованные в последние 10 лет, применение других пакетов особо оговаривается.

В работе [1] отмечено, что пространственная дискретизация в численном анализе обычно основана на одном методе – лагранжевом методе конечных элементов (МКЭ) [3] или Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) [4], эйлеровом МКЭ или же смешанном Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) [5]. При моделировании конструкций при действии удара или импульсной нагрузки каждый из методов обладает достоинствами и недостатками. Нет одного лучшего во всех применениях метода. Комбинирование разных методов в рамках одной модели, по-видимому, будет лучшим с точки зрения точности и вычислительной эффективности. Но такой смешанный подход требует согласования применения методик в рамках единого вычислительного процесса.

Руководитель разработки J. Hallquist в работе [6] высказал стратегию единого кода пакета LS-DYNA (много задач и методов – единый код), что позволяет в единой программной среде моделировать комплексные процессы, например тепломассообмен в системе деформируемых тел, притом различными методами, что дает возможность обосновывать точность модели расчетным путем. Описаны новые возможности и направления развития пакета.

Локальные ударные воздействия и разрушение планера ЛА. Столкновения летательных аппаратов (ЛА) с птицами имеют важные технические и коммерческие последствия. В статье [7] отмечается, что потери авиакомпаний в 1999 – 2000 гг. оцениваются в 1 млрд. долл. США. Эти потери складываются из стоимости ремонта, восстановления и списания авиатехники, а также снижения доходов операторов в связи с задержками авиарейсов. Для уменьшения ущерба ведущие организации U.S. Federal Aviation Administration и European Joint Aviation Authority установили требования, в соответствии с которыми каждый вновь созданный коммерческий ЛА должен пройти процедуру сертификационных испытаний и продемонстрировать безопасность при столкновениях с птицами. Для различных типов ЛА установлены обязательные виды и параметры столкновений. Скорость соударения лежит в пределах 100 – 400 м/с. В рамках требований разработана программа исследований надежности ЛА the European Union Research Programme CRAHVI (Crashworthness of Aerocraft for Hygh Velocity Impact) [8], связанная с изучением высокоскоростного удара летящими объектами по ЛА, например птицей, градом, обломками двигателя или колес. Для исследований соударений применяется компьютерное моделирование.

Работа [7] описывает результаты моделирования для оценки влияния формы птицы (четырехфунтового канадского гуся) на процессы при столкновении ее с поверхностью. Параметры тушки гуся получены от International Bird-Strike Research Group. Рассмотрены общепринятая в расчетах форма модели птицы (цилиндр с полусферическими законцовками) и сложная модель (туловище, крылья, шея), позволяющая учесть неодновременность и неоднородность удара. Используются ALE и SPH методы дискретизации.

Результаты для мишени при взаимодействии со стандартной моделью птицы, полученные ALE и SPH, очень близки по амплитуде и по фазе. Ре-

зультаты для стандартной модели и «гуся» различаются, в особенности, по времени.

В работе [9] отмечено, что столкновение с птицами представляет растущую угрозу, особенно для элементов из композитных материалов. Предложена новая модель материала, основанная на теории механики повреждений, для композитных материалов на тканевой основе с возможностью моделирования прогрессирующего разрушения. Приведены примеры применения, подтверждающие достоверность модели материала. В статье [10] с использованием SPH подхода исследуется влияние количества и ориентации слоев композита на характер повреждения элемента конструкции при ударе птицы. В работе [11] приведены результаты исследования по соударению композитной конструкции крыла с птицей (использована лагранжева конечно-элементная (КЭ) модель), а также с твердыми обломками для Airbus A300. В статье [12] описано исследование в рамках подхода ALE столкновения с птицей передней кромки крыла самолета с обшивкой типа flexor; в отличие от предыдущих работ, использовавших ПО LS-DYNA, данное исследование проведено с использованием ПО DYTRAN [13]. Во всех случаях отмечено хорошее соответствие результатов исследования экспериментальным данным.

В статье [14] отмечается, что процесс соударения с птицей относится к направлению механики FSI (Fluid-Structure-Interaction), так как тушка при ударе не держит форму, «течет». С использованием SPH подхода моделируется как первичное, так и вторичное столкновение птицы с композитными элементами конструкции ЛА.

В работе [15] отмечается опасность соударения композитных элементов конструкции ЛА с градом. Приведены результаты моделирования соударения града и углеволоконного композита. Отмечено соответствие характера разрушения в модели и в эксперименте.

В статье [16] приведены результаты моделирования и экспериментов по косому удару твердым телом со скоростью 5 м/с по поверхности триплекса, содержащего начальные повреждения. Отмечено хорошее соответствие данным эксперимента. Модель может быть применена для анализа прочности и разрушения фонаря кабины пилотов.

В работе [17] описаны результаты моделирования и экспериментов по соударению обрывка протектора колеса со скоростью 7 – 50 м/с с панелью крыла с энергией удара до 400 Дж.

Статья [8] описывает моделирование соударения на скорости 39 м/с горизонтального стабилизатора ЛА из композитного материала со столбом при аварийной посадке, а также с птицей. Использованы лагранжев МКЭ и ALE подход для модели птицы.

Ударные повреждения и разрушение авиадвигателей. Особую роль и значение с точки зрения безопасности полета имеют повреждения АД. В литературе рассматриваются варианты соударения отличных по своим механическим свойствам объектов с различными частями АД.

В работах [18, 19] отмечается, что стойкость к удару птицы – одно из наиболее важных сертификационных требований, предъявляемых к современным АД. Удовлетворение указанных требований достигается сложно и обеспечивается дорогими экспериментами. Затраты могут быть существенно уменьшены посредством моделирования. В работе [18] рассматриваются и

сравниваются три похода к моделированию соударения (модели) птицы и лопаточного колеса АД: чисто лагранжева МКЭ модель птицы; модель птицы SPH; модель птицы ALE.

Во всех моделях колесо и лопатки жесткие недеформируемые. Используются различные контактные интерфейсы. Сравниваются силы взаимодействия лопатки и птицы, параметры сеток, а также необходимые ресурсы компьютера. Предпочтительной оказывается лагранжева модель МКЭ.

В статье [20] представлено моделирование попадания 2,5-фунтовой птицы в компрессор низкого давления и в компрессор высокого давления турбовентиляторного АД PW6000. Использованы подходы ALE и SPH. В качестве результатов моделирования показаны деформации лопатки компрессора высокого давления. Отмечено соответствие результатов моделирования и эксперимента.

В работе [21] описаны результаты моделирования и экспериментов по соударению птицы с коком винта поворотного АД. Особенности конструкции АД таковы, что повреждение кока поворотного винта из-за разрушения элементов системы управления приводит к аварии и потере самолета. Результаты исследования используются для уточнения параметров разработанной конструкции. В работе демонстрируется соответствие результатов расчетов и эксперимента.

В статье [22] описано моделирование столкновения птицы с лопатками вентилятора АД. Для генерации сеток использовано ПО ProStar. Использована материальная модель упругопластичности для лопаток АД, а также учтено трение между лопатками и тушкой птицы. Использована лагранжева модель птицы с дискретизацией по МКЭ и SPH. Использована необщепринятая форма модели птицы в виде цилиндра с коническим оголовком. Для материала птицы использовано уравнение состояния Грюнайзена.

Исследование влияния параметров тушки птицы на характер повреждений лопаток АД представлено в [19]. В работе используется лагранжева модель птицы с дискретизацией SPH и уравнение состояния Гюгонио.

В работе [23] представлены методика и результаты моделирования столкновения четырехфунтового канадского гуся и входного композитного обтекателя АД. В модели гуся выделены туловище, крылья, шея и голова. Дискретизация гуся выполнена по методу SPH. Дается сравнение результатов эксперимента и моделирования (вид обтекателя после столкновения), очевидно отличное соответствие. По результатам моделирования в [24] сформулирован принцип проектирования надежных композитных коков винта с учетом столкновения с птицами.

Статья [25] посвящена расширению подхода ALE с использованием оболочек, в частности для лопаток АД. В отличие от использованных в вышеупомянутых работах моделей, учтена толщина оболочек, что повышает адекватность модели. Ранее, например [20], для тела лопатки АД использовались объемные элементы, что приводило к увеличению потребных ресурсов компьютера. В качестве примеров применения названы различные системы, включающие конструкции типа оболочки, взаимодействующие с текучей средой: удар птицы по поверхности или по лопаткам АД, удар лопасти вертолета по воде, оболочки, испытывающие воздействие ударной струи под углом, сердечный клапан.

В работе [26] моделируется ситуация отрыва пера лопатки. В этом случае лопатка или ее обломки не должны проникать сквозь корпус АД. Во избежание прободения корпус обычно имеет утолщения, что заметно утяжеляет двигатель. В работе рассмотрено усиление корпуса путем изменения не толщины, но формы в виде рельефных проштамповок. Влияние параметров усиления анализируется на основе результатов моделирования. Отмечено хорошее соответствие данных моделирования экспериментальным данным.

В статье [27] описано моделирование воздействия града на элементы АД. Для града используется модель SPH, для оболочки – модель МКЭ. Дано сравнение результатов моделирования с результатами эксперимента, отмечено хорошее соответствие.

Катастрофы с участием летательных аппаратов. Крупные катастрофы невоспроизводимы в полном объеме и с учетом всего комплекса обстоятельств, в связи с чем возможность виртуального (при необходимости вариантного и многократного) воспроизведения процессов, сопровождающих катастрофы, является бесспорным преимуществом моделирования при расследовании инцидентов, а также планировании мер для снижения негативных последствий.

В работе [28] описано моделирование удара самолета по зданию торгового центра в Нью-Йорке. Результаты моделирования использованы для проведения различных экспертиз: динамики пожара, кинетики термических изменений в элементах конструкции и разрушения зданий. Применены подходы SPH и ALE. Приведено моделирование испытания образцов, отмечено хорошее соответствие результатам эксперимента.

В статье [1] отмечена тенденция использования смешанных моделей (комбинаций лагранжевого МКЭ, эйлерового МКЭ, ALE или лагранжевого SPH). Для демонстрации преимуществ смешанной дискретизации рассмотрены четыре примера: а) столкновение самолета с башней и ее последующим разрушением в Нью-Йорке; б) косой удар по железобетонной плите; в) подводный взрыв и его действие на полый цилиндр; г) взрыв оболочечного заряда в железнодорожном вагоне. Сравнение с экспериментальными результатами показывает преимущества смешанной техники. В отличие от предыдущей работы, для моделирования использовано ПО AUTODYN [29].

Ударные повреждения космических объектов. Особые условия открытого космоса трудно воспроизвести комплексно в эксперименте, что определяет преимущество моделирования. Искусственные спутники Земли (ИСЗ), космические аппараты (КА) различного назначения эксплуатируются в экстремальных условиях и испытывают ударное действие со стороны различных тел, движущихся с космическими скоростями. Моделирование используется для исследования повреждаемости и обоснования систем защиты от удара ИСЗ и КА.

В работе [30] описано моделирование, проводимое в рамках расследования катастрофы шаттла «Колумбия» 1 февраля 2003. Расследование позволило установить причину катастрофы (отрыв плитки теплозащиты и удар по передней кромке крыла при запуске 16 января 2003) и позволило проанализировать последовательность развития и тяжесть повреждений. Сравнение результатов моделирования и экспериментов показывает хорошее согласие как характера разрушения, так и количественных значений параметров.

В статье [31] высказано суждение о том, что всевозможные обломки (космический мусор) представляют в настоящее время наибольшую опасность для ИСЗ и КА на околоземной орбите. Соударения частиц мусора и защитных экранов происходят со скоростями порядка 4 – 8 км/с, при которых металлы проявляют свойства течения, что и порождает трудности в изучении механических процессов. Адекватные вычислительные модели позволят повысить действенность защитных мер и оценить возможные повреждения. В работе отмечено, что обычно и ударник, и мишень моделируются с помощью SPH частей. В данном случае используется комбинированная модель мишени, включающая сцепленные SPH модель зоны удара и лагранжеву МКЭ модель вне зоны повреждения. Такой подход снижает общее количество переменных в модели и общее время моделирования.

В статье [32] для уменьшения количества переменных и экономии ресурсов компьютера используется осесимметричная SPH модель соударения со скоростью 6,7 км/с и проникания ударника в мишень с образованием облака осколков и кратера. Рассмотрены удар стального стержня о жесткую преграду (тест Тейлора), удар по тонкой пластинке (эксперименты Piekutowsky), удар по двойной стенке. В отличие от предыдущих работ, в которых моделирование велось с помощью ПО LS-DYNA, в данном исследовании использовано ПО AUTODYN. Отмечается хорошее соответствие с результатами эксперимента и расчетами в рамках эйлерова подхода.

Особенностью работы [33] является исследование баллистического удара по тонким титановым пластинкам, в то время как в работе [34] моделируется прямой и косой удар (со скоростью 4000 м/с) алюминиевой сферы диаметром 3 мм по алюминиевой же мишени. Используются подходы SPH и ALE.

Процессы в топливных системах. Топливные системы ЛА представляют собой гетерогенные двухфазные механические системы, которым присущи большие перемещения и деформации в виде течений со свободной поверхностью, для которых неприменим лагранжев метод конечных элементов.

Значительное внимание уделено исследованию особенностей поведения топлива в баке и трубопроводах ЛА. Исследуются два вида систем: 1) замкнутые объемы жидкости (для них опасен гидроудар) и 2) жидкость со свободной поверхностью (для них характерно плескание – sloshing). В статье [35] эти задачи отмечаются как типичные задачи FSI и различаются следующие аспекты проблемы: 1) плескание как причина потерь топлива; 2) плескание как специфическое механическое возмущение бака и подкрепляющих бак конструкций; 3) плескание как особое условие работы топливной системы и насосов.

Плескания возбуждаются в различных условиях: 1) при резком изменении скорости (ударе); 2) при резком изменении направления движения (рулежке). Повторяющиеся во времени возмущения могут вызвать своеобразный «резонанс» в топливной системе.

Отмечается, что конструкция топливной системы воздушного судна и инструкции по ее эксплуатации должны пройти специальный sloshing test.

Традиционный метод анализа плескания (простые ручные вычисления) ограничен рассмотрением случаев: 1) слабого волнения; 2) не рассматривается плескание с ударом в свод и крышку бака; 3) рассматриваются только баки

с твердыми стенками простой формы и жесткие перегородки без отверстий и др.

В статье ставится вопрос о разработке численной методики анализа плесканий с учетом свободной поверхности на основе подхода ALE. Рассмотрены примеры моделирования движения жидкости в неполном баке без перегородок и с перфорированными перегородками.

В работе [36] рассмотрен еще один пример моделирования плескания (бак сложной формы) с применением ALE.

В статье [37], в отличие от предыдущих, использовавших явный метод решения задачи по времени, применен неявный метод, что повышает эффективность моделирования. Изучены особенности движения несжимаемой жидкости с низким числом Маха на большом промежутке времени.

В работе [38] рассматривается задача течения жидкости со свободной поверхностью. В качестве примеров приведены: волнение в резервуаре, свободное истечение из резервуара, вихревое течение в резервуаре. Используется подход ALE.

В статье [39] исследуется движение сжимаемой жидкости в трубопроводе. Рассмотрены в качестве примеров: гидравлический удар в трубе, дифракция волны давления около угла трубы.

В работе [40] моделируется взаимодействие алюминиевого контейнера, наполненного жидкостью, и ударника, пробивающего контейнер с первоначальной скоростью 2 км/с. Хорошо видна ударная волна, кавитационный след в виде канала следом за ударником. Рассмотрены варианты чистой и аэрированной жидкости, содержащей паровую фазу. Проведен эксперимент с водой для сравнения с результатами моделирования. В 6 точках регистрировалась зависимость давления от времени. Получено хорошее совпадение зависимостей по амплитуде и фазе. Отмечена зависимость результатов от степени аэрации. Модель можно использовать для анализа поражения топливного бака снарядом или осколком.

В работе [41] описано моделирование поражения осколками разрушенного двигателя жесткого топливного бака с топливом. В отличие от ранее цитируемых работ, использовавших ПО LS-DYNA, в данной работе использовано ПО AUTODYN.

Приземление и приводнение ЛА и КА. Отмеченная выше программа CRAHVI [8] предусматривает изучение условий безопасного приземления ЛА на различные поверхности (твердые или водные) при различной степени волнения. Приземление ЛА и КА сопряжено с ударом и разрушением. Для уменьшения ударных нагрузок используются различные методы и устройства. Решается общая задача об оценке воздействия удара и эффективности систем защиты конструкции и экипажа. Приводнение ЛА и КА связано с особым характером взаимодействия твердых тел и жидкости. Это типичная проблема FSI.

В исследовании [42] рассмотрено моделирование падения на твердую поверхность и удара секции КА многоразового использования. Для защиты конструкции и экипажа использован специальный разрушаемый блок. Изучена эффективность такой защиты. Проведено сравнение с результатами теста, в которых использован датчик внедрения в поверхность. Сравниваются

кратеры, образованные при ударе блока на поверхности. Отмечено очень хорошее соответствие результатов моделирования и эксперимента.

В работе [43] проведено моделирование взаимодействия шасси самолета и искусственного препятствия из разрушаемого вспененного материала, размещенного в конце взлетно-посадочной полосы при совершении аварийной посадки ЛА. При разрушении материала диссипируется кинетическая энергия ЛА, он безопасно тормозится. Используются два способа дискретизации материала – лагранжевы МКЭ и SPH. Выполнено сравнение результатов моделирования с использованием двух способов дискретизации.

В статье [44] представлены результаты моделирования приводнения командного модуля корабля «Аполло» и систем КА будущего поколения. Использован подход ALE. Отмечено хорошее соответствие результатам эксперимента.

В работе [45] описано моделирование приземления и приводнения капсулы корабля «Орион». Предварительно моделируется снижение капсулы с использованием парашюта. Одним из элементов модели корабля является манекен астронавта, что дает возможность оценки механического воздействия различных факторов как на конструкцию корабля, так и на экипаж.

В работе [46] приведены результаты моделирования удара о воду типичной авиационной панели, а также сравнение с экспериментом. При моделировании жидкости использованы бессеточные лагранжевы методы SPH и EFG (Element Free Galerkin) [4]. Второй метод первоначально предложен для задач распространения трещин, а для жидкости применяется редко. При моделировании жидкости применены неотражающие границы, вязкость, кавитация. Отмечается реалистичность результатов моделирования, например брызги. Амплитудные и в особенности частотные характеристики решений с применением EFG ближе к экспериментальным значениям.

В статье [47] отмечается, что приводнение вертолета, например при маневрировании, заборе воды при тушении пожаров, при аварии часто имеет трагические последствия. Приведены результаты моделирования удара панелей конструкции вертолета или винта по поверхности воды. Используются подходы SPH и ALE.

Акустическое и тепловое воздействия на элементы конструкции ЛА. Агрегаты ЛА, в особенности двигатель, являются источником и одновременно чувствительным объектом акустического и теплового воздействий, имеющих распределенный и быстро меняющийся во времени характер.

В работе [48] в качестве разновидностей акустического воздействия названы: основные вибрации, плоские волны, прогрессивные волны, реверберирующий звук, турбулентный погранслой, ударные волны. Отмечено, что некоторые элементы, кроме акустического воздействия, испытывают действие потоков тепла (воздухозаборники АД, термозащитные панели), что усложняет их работу, а также анализ состояния. Необходимо исследовать одновременное воздействие этих факторов, чтобы использовать полученные знания при проектировании. Рассмотрены два объекта моделирования при сложном термоакустическом воздействии: пластина и воздухозаборник АД.

В исследовании [49] описан вариационный метод граничных элементов для моделирования акустических полей и воздействий. В качестве примеров

рассмотрены: пульсирующая сфера, прямоугольная камера, жесткая полость с упругой стенкой.

В работе [50] рассмотрено моделирование методом конечных разностей нелинейного акустического взаимодействия двумерной пластинки и сжимаемой невязкой жидкости. Техническая проблема связана с акустическим воздействием на крупные объекты аэрокосмической техники, а также на органы слуха человека.

В статье [51] описаны новые возможности акустического анализа ПО LS-DYNA. В качестве примера рассмотрена акустическая модель ИСЗ.

Термомеханическое взаимодействие потоков и агрегатов ЛА. Одним из направлений исследований FSI является моделирование движений и теплообмена гибких элементов ЛА в низкоскоростном несжимаемом или сжимаемом потоке.

В работе [52] используется алгоритм решения уравнений Навье–Стокса для несжимаемых течений и описано моделирование парашютов различных систем, влияние спутного течения от пролетающего ЛА на парашют, моделирование параплана, моделирование набора воды «на ходу» в емкость, прикрепленную к вертолету при тушении пожаров.

В статье [53] описана подсистема CESE пакета LS-DYNA для решения задач о несжимаемом потоке. Особенность этой подсистемы в том, что она допускает объединение с твердотельной моделью в рамках задач FSI. Течение можно считать несжимаемым, если число Маха не превосходит 0,3. В пакете LS-DYNA CESE-подсистема обеспечивает высокую точность решений для сжимаемых жидкостей, а ALE-подсистема – и для сжимаемых, и для несжимаемых. Метод CESE для сжимаемых сред: полностью консервативный по пространству и времени, второго порядка точности, новейший и простой метод сквозного счета, ударные волны и малые возмущения моделируются одновременно.

Приведены примеры: обтекание и действие ветра на панель солнечной батареи, ток крови при максимальном открытии сердечного клапана, связанный тепло-массообмен в теплообменнике-змеевике, обтекание тела сложной формы.

В работе [54] проведено совместное междисциплинарное моделирование для изучения температурного поля в турбинной лопатке, расположенной в регуляторе высокого давления вертолетного двигателя. Использован подход Large Eddy Simulation (LES) для расчетов нестационарной реакции потока в камере сгорания и объединения моделирования радиационного и кондуктивного теплообмена в корпусе компрессора высокого давления.

Выводы. Механико-математическое моделирование широко применяется для изучения ситуаций и процессов в различных системах АКТ и во взаимодействии с разнообразными внешними объектами и полями. Разработаны методики моделирования, изучены их вычислительная эффективность и точность. Многочисленные сравнения результатов экспериментов и моделирования позволяют утверждать достоверность последних. Моделирование имеет ряд преимуществ перед экспериментальными исследованиями.

В отличие от экспериментальных методов, моделирование может быть проведено на допроектном этапе для обоснования возможности новых решений, сокращая таким образом сроки проектирования. Моделирование не ну-

ждается в использовании опытных образцов, сокращая трудоемкость и стоимость разработки изделий, и при этом позволяет сравнить широкий круг вариантов исполнения, обеспечивая выбор для реализации наиболее удачных проектных решений. Моделирование позволяет обосновать решения в случае, когда затруднительно воспроизвести условия функционирования систем (например, пониженная или повышенная гравитация), и при этом позволяет разделить влияние различных факторов и свойств, когда это трудно сделать в эксперименте. Моделирование позволяет раскрыть причины или условия отказа систем, поскольку позволяет получить значительно бóльший объем качественно иных данных о процессах, чем в эксперименте. Наконец, моделирование может быть этапом или элементом более обширной процедуры исследования, например с применением эксперимента или немеханических экспертиз.

Достоверность результатов моделирования основана на адекватности механико-математических моделей (ММ) процессов и точности числовых методик их реализации.

Для ММ характерна все возрастающая сложность, вытекающая из геометрического, структурного и материального разнообразия элементов моделируемых объектов, разнообразия воздействий на объект и взаимодействия элементов объекта, разнообразия материальных свойств и значений материальных характеристик, количества элементов и объема модели, достигающего изделия в целом. Многие объекты являются представителями FSI – нового направления прикладной механики систем взаимодействующих твердых и текучих сред. Взаимодействие элементов часто имеет контактно-ударный характер, что предъявляет особые требования к методикам решения ММ. Для процессов, протекающих в объектах, характерна связанность задач (мультифизичность). Часто объекты подвергаются последовательным воздействиям, в результате которых меняются их свойства, и эти изменения накапливаются, что должно быть отражено в формулировках ММ.

Эффективность моделирования обеспечивается наличием ряда подходов (эйлеров, лагранжев и смешанный ALE подходы) и методов численной реализации (методы конечных разностей, граничных и конечных элементов, SPH, EFG, CESE и др.), а также их комбинаций. Наличие разнообразных программных продуктов, использующих эти методы (LS-DYNA, DYTRAN, AUTODYN и др.), позволяет практически применять моделирование. Использование различных методов и программных продуктов для реализации одной ММ позволяет обосновать достоверность путем сравнения результатов по различным моделям, что особенно важно, когда иные методы исследования невозможны.

Различные методы и подходы к дискретизации имеют преимущества и недостатки в отношении моделирования конкретных материалов и условий, поэтому применяются комбинированные дискретные модели, например лагранжева МКЭ-модель металлической детали и CESE-модель обтекающего потока.

Общность основ (ММ, подходов, методов и программных продуктов) позволяет исследовать процессы в системах и объектах иного происхождения и назначения, чем АКТ. Разработка, обоснование адекватности, эффективное использование ММ для исследования таких объектов требует специальных знаний и навыков. Необходимо развивать образовательное направление по

обучению вопросам и приемам эффективного моделирования сложных гетерогенных механических систем при комплексном воздействии факторов различной природы.

1. Numerical simulation of structural deformation under shock and impact loads using a coupled multi- solver approach / *X. Quan, N. K. Birndaum , M. S. Cowler at all* // 5th Asia- Pacific Conference on Shock and impact loads on structures, november 12–14 , 2003, Hunan, China. – 9 p.
2. LS-DYNA. Keyword user′s manual. Version 971. – Livermore: LSTC, 2006. – 1520 p.
3. *Зенкевич О.* Конечные элементы и аппроксимация / *О. Зенкевич, К. Морган.* – М. : Мир, 1986. – 318 с.
4. *Belytschko T.* Meshfree and Particle Methods / *T. Belytschko, J. S. Chen*. – John Wiley and Sons Ltd, 2007. – 384 p.
5. Arbitrary Lagrangian-Eulerian methods / *J. Donea, A. Huerta, J.-P. Ponthot at all* // Encyclopedia of Computational Mechanics. – John Wiley & Sons, 2004. – P. 1 – 38.
6. *Hallquist J.* Recent developments in LS-DYNA / *J. Hallquist* // 7th European LS-Dyna conference, 2009, Solzburg. – P. 1 – 52.
7. *McCallum S. C.* The influence of bird-shape in bird-strike analysis/ *S. C. McCallum, C. Constantinou* // 5th European LS-DYNA Conference, 2005, Birmingham. – P. 1 – 11.
8. Horizontal tailplane subjected to impact loading / *M. Hormann, U. Stelzmann, M. A. McCarthy at all* // 8th International LS-DYNA Conference, 2004, Detroit. – P. 10 -11 – 10-30.
9. *Iannucci L.* Bird strike modeling using a new woven glass failure model / *L. Iannucci, M. Donadon* // 9th International LS-DYNA Conference, 2006, Detroit. – P. 18-41 – 18-54.
10. Effect of ply number & orientation of composite structure in bird strike analysis / *N. L. Trivikram, R. Y. Mrityunjaya, V. Ramesh at all* // 4th ANSA & μETA International Conference, 2008. – 5 p.
11. *Hormann M.* FE-application in aircraft structure analysis / *M. Hormann* // 10th International LS-DYNA Conference, Detroit, 2008. – P. 16-27 – 16-46.
12. *Guida M.* Evaluation and validation of multi-physics FE methods to simulation bird strike on a wing leading edge / *M. Guida, F. Marulo, M. Meo* // 2007. – P.2.
13. http://www.mscsoftware.com.
14. *Lavoie M.-A.* Application of the SPH method for simulation of aerospace structures under impact loading / *M.-A. Lavoie, A. Gakwaya, M. N. Ensan* // 10th International LS-DYNA Conference, 2008, Detroit. – P. 9-35 – 9-42.
15. *Starke P.* Hail impact simulation on CFC covers of a transport aircraft / *P. Starke, F. Mayer* // 8th European LS-DYNA Users Conference, may 2011, Strasbourg. – 11 p.
16. An approach to capture the ejection mitigation requirements of FMVSS 226 with finite element simulations / *A. Haufe, G. Dimitru, A. Hirth at all* // 8th European LS-DYNA Users Conference, may 2011, Strasbourg. – 18 p.
17. *Birch R. S.* Post-test simulation of airliner wing subject to tire debris impact / *R. S. Birch, C. Berger, M. Kracht* // 5th European LS-DYNA Conference, 2005, Birmingham. – P. 1 – 6.
18. Fan blade bird strike analysis using Lagrangian, SPH and ALE approaches / *A. A. Ryabov, V. I. Romanov, S. S. Kukanov at all* // 6th European LS-DYNA Conference, 2007, Gothenburg. – C. 1.183 – 1.194.
19. Modeling bird impact on a rotating fan: the influence of bird parameters / *M. Selezneva, P. Stone, T. Moffat at all* // 11th International LS-DYNA Users Conference, 2010, Detroit. – P. 1-37 –1-46.
20. *Frischbier J.* Multiple stage turbofan bird ingection analysis with ALE and SPH methods / *J. Frischbier, A. Kraus* // ISABE-2005. – 2005. – 1016. – P. 1 – 9.
21. *Tho C.-H.* Bird strike simulation for BA609 spinner and rotor control / *C.-H. Tho, M. R. Smith, H. Chen* // 9th International LS-DYNA Conference, 2006, Detroit. – P. 18-21 – 18-22.
22. Bird strike analysis of aircraft engine fan / *Y. N. Shmotin, P. V. Chupin, D. V. Gabov at all //* 7th European LS-Dyna conference, 2009, Solzburg. – P. 1 – 6.
23. External blast load on structures. – Empirical approach / *M. Anghileri, L. Castelletti, F. Invernizzi at all* // 5th European LS-DYNA Conference, 2005, Birmingha,.– C. 1 – 12.
24. A strategy to design bird-proof spinners / *M. Anghilieri, L.-M. Castelletti, D. Molinelli at all* // 7th European LS-Dyna conference, 2009, Solzburg. – P. 1 – 10
25. *Wang J.* Fluid Structure Interaction for Immersed Bodies / *J. Wang, H. Chen* // 6th European LS-DYNA Conference, 2007, Gothenburg. – P. 4.3 – 4.8.
26. Jet engine fan blade containment using two alternate geometries / *K. Carney, M. Pereira, D. Revilock at all* // 4th European LS-DYNA Conference, 2003, Ulm. – P. I-1-01 – I-1-10.
27. Development of hail material model for high speed impact on aircraft engine / *Y. Chuzel, A. Combescure, M. Nucci at all* // 11th International LS-DYNA Users Conference, 2010, Detroit. – P. 1-17 – 1-26.
28. Modeling methodologies for assessment of aircraft impact damage to the World Trade Center Towers / *S. W. Kirkpatrick, R. T. Bocchieri, R. A. Macneil at all* // 9th International LS-DYNA Conference, 2006, Detroit. – P. 9-53 – 9-68.
29. http://www.century-dynamics.com
30. Test and analysis correlation of foam impact onto space shuttle wing leading edge RCC Panel 8. / *E. L. Fasanella, K. H. Lyle, J. Gabrys at all* // 8th International LS-DYNA Conference, 2004, Detroit. – P. 3-11 – 3-22.

31. *Mazars G.* High velocity impacts simulations with SPH methods in LS-DYNA / *G. Mazars, G. Desille, V. Lapoujade* // 6th European LS-DYNA Conference, 2007, Gothenburg. – P. 1.195 – 1.196.
32. *Hayhurst C. J.* Cylindrically symmetric SPH simulations of hypervelocity impacts on thin plates / *C. J. Hayhurst, R. A. Clegg* // 1996 hypervelocity impact symposium, Freiburg, october 1996; International journal impact engineering. – 1996. –V. 20. – 16 p.
33. On fracture criterion of titanium alloy under dynamic loading conditions / *P. A. Mossakovsky, F. K. Antonov, A. M. Bragov at all* // 8th European LS-DYNA Users Conference, may 2011, Strasbourg. – 8 p.
34. *Plassard F.* Hypervelocity impact of aluminium sphere against aluminium plate : experiment and LS-DYNA correlation / *F. Plassard, J. Mespoulet, P. Hereil* // 8th European LS-DYNA Users Conference, may 2011, Strasbourg. – 11 p.
35. A new ALE formulation for sloshing analysis / *N. Aquelet, M. Souli, J. Gabrys at all* // Structural Engineering and Mechanics. – 2003. –Vol. 16, No. 4. – P. 1 – 18.
36. *Ma J.* Modeling of fuel sloshing phenomena considering solid-fluid interaction / *J. Ma, M. Usman* // 8th International LS-DYNA Conference, 2004, Detroit. – P. 4 -15 – 4-20.
37. *Del Pin F.* An implicit incompressible CFD solver in LS-DYNA for fluid-structure interaction problems / *F. Del Pin* // 10th International LS-DYNA Conference, 2008, Detroit. – P. 15-21 –15-22.
38. *Soulaimani A.* An arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for solving three-dimensional free surface flows / *A. Soulaimani, Y. Saad* // Computer methods in applied mechanics and engineering. – 1998. – 162. – P. 79 – 106.
39. *Zhang Z.-C.* How to use the new CESE compressible fluid solver in LS-DYNA / *Z.-C. Zhang* // 11th International LS-DYNA Users Conference, 2010, Detroit. – P. 6-19 – 6-20.
40. *McCallum S. C.* Simulation of hydrodynamic ram and liquid aeration / *S. C. McCallum, D. D. Townsend* // 5th European LS-DYNA Conference, 2005, Birmingham. – P. 1 – 12.
41. *Santini P.* Numerical simulation of fluid-structure interaction in aircraft fuel tanks subjected to hydrodynamic ram penetration / *P. Santini, D. Palmieri, M. Marchetti* // 21st ICAS congress, sept. 13-18, 1998, Melbourne, Australia. – 8 p.
42. *Fasanella E. L.* Soft soil impact testing and simulation of aerospace structures / *E. L. Fasanella, K. E. Jackson, S. Kellas* // 10th International LS-DYNA Conference, 2008, Detroit. – P. 18-29 –1 8-42.
43. *Barsotti M.* Comparision of FEM and SPH modeling a crushable foam aircraft arrestor bed / *M. Barsotti* // 11-th International LS-DYNA Users Conference, 2010, Detroit. –P. 16-37 – 16-54.
44. *Tutt B. A.* The use of LS-DYNA to simulate the water landing characteristics of space vehicles / *B. A. Tutt, A. P. Taylor* // 8th International LS-DYNA Conference, 2004, Detroit. – P. 1-1 – 1-15.
45. *Tabiei A.* ORION spacecraft water and land landing system simulation; an injury case study / *A. Tabiei, C. Lawrence* // 8th European LS-DYNA Users Conference, may 2011, Strasbourg. – 22 p.
46. *Anghileri M.* Water impact: experimentaltests and numerical simulations using meshless methods / *M. Anghileri, L. Castelletti, E. Francesconi* // 6th European LS-DYNA Conference, 2007, Gothenburg. – P. 1.183 – 1.194.
47. *Francesconi E.* A numerical-experimental investigation of crash behaviour of skin panel during a water impact comparing ALE and SPH approaches / *E. Francesconi, M. Anghilieri* // 7-th European LS-Dyna conference, 2009, Solzburg. – P. 1 – 10.
48. Structural analysis with vibro-acoustic loads in LS-DYNA / *M. Rassaian, Y. Huang, J. Lee at all* // 10th International LS-DYNA conference, 2008, Detroit. – P. 8-45 – 8-60.
49. *Alia A.* Acoustic and vibroacoustic modeling in LS-DYNA based on variational BEM / *A. Alia, M. Souli* // 5th European LS-DYNA Conference, Birmingham, 2005. – P. 1 – 10.
50. *Aginsky Z.* Numerical analysis of nonlinear acoustic fluid-structure interaction of a two dimensional plate in an inviscid compressible fluid / *Z. Aginsky, O. Gottlieb* // ENOC 2011, 24-29 July 2011, Rome, Italy. –2 p.
51. Development of frequency domain dynamic and acoustic capabilities in LS-DYNA / *Y. Huang, M. Souli, C. Ashcraft at all* // 8th European LS-DYNA Users Conference, may 2011, Strasbourg. – 9 p.
52. *Taylor A. P.* Developments in the application of LS-DYNA to fluid structure interaction (FSI) problems in recovery system design and analysis / *A. P. Taylor* // 7th International LS-DYNA Conference, 2002, Detroit. – P. 10-17 – 10-26.
53. *Del Pin F.* Advances on the incompressible CFD solver in LS-DYNA / *F. Del Pin* // 11th International LS-DYNA Users Conference, 2010, Detroit. – P. 6-1 – 6-4.
54. Coupling LES, radiation and structure in gas turbine simulations / *J. Amaya, E. Collado, B. Cuenot at all* // Center for Turbulence Research. Proceedings of the Summer Program, 2010. – Toulouse, 2010. – 10 p.

Национальный аэрокосмический
университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»,
Харьков

Получено: 26.02.14,
в окончательном варианте 03.12.14