

Крупенин Александр Михайлович



**ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЛОИСТЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С ЖИДКОСТЬЮ**

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент Мартиросов Михаил Иванович.

Официальные оппоненты: **Попов Виктор Сергеевич**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная математика и системный анализ» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»;

Афанасьев Александр Владимирович
кандидат технических наук, инженер ООО «Нанотехнологический центр композитов».


Ведущая организация: Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций имени В. А. Кучеренко АО «НИИЦ Строительство» (ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко).

Защита состоится «7» декабря 2016 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.05 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125871, г. Москва, ГСП-3, Волоколамское шоссе, дом 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета) и на сайте http://mai.ru/upload/iblock/051/dissertatsiya_krupenin.pdf.

Автореферат разослан «31» октября 2016 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Г. В. Федотенков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В современных авиационных, ракетных и космических системах применяются транспортные средства и аппараты, вступающие в ударное взаимодействие с жидкостью в процессе эксплуатации или на аварийных режимах работы (экранопланы, спускаемые капсулы и платформы с грузами, гидросамолеты).

Для эффективного проектирование подобных конструкций необходимо учитывать различные эффекты взаимодействия их с жидкостью и применять современные решения, способствующие сохранению прочности и надежности при уменьшении массы (слоистые конструкции, композиционные материалы). Сложный характер движения жидкости в сочетании с нелинейным поведением материалов конструкции исключает возможность аналитического решения поставленной проблемы.

Применительно к задачам сброса грузов на воду на практике используются платформы преимущественно прямоугольной или круглой формы, а при ударе различных конструкций о воду форма днищ, как правило, клинообразная. Ко всему прочему, как было отмечено выше, конструкция ударных поверхностей представляет собой набор слоев из различных материалов.

Проблема ударного взаимодействия конструкций с жидкостью исследовалась на протяжении многих лет и остается актуальной и по сей день.

Современные исследователи все шире используют численные методы, ибо они позволяют решать задачи такого рода в полной (связной) аэрогидроупругой постановке, когда уравнения для тела и жидкости решаются совместно.

Однако, влияние воздушной прослойки, между конструкцией и жидкостью, на процесс ударного взаимодействия в полной связной постановке до сих пор не проведено. Наличие воздушной прослойки между конструкцией и жидкостью может существенно сказаться на значении и распределении давлений

на конструкцию со стороны среды. Игнорирование воздушной прослойки приводит к снижению эффективности проектирования конструкций взаимодействующих с жидкостью.

Слоистые конструкции становятся все более распространены в современной технике в связи с более эффективными удельными параметрами.

Поведение слоистых конструкций под действием различных нагрузок достаточно подробно изучено. Однако, и в отечественных, и в зарубежных источниках отсутствует решение задач о взаимодействии слоистых конструкций с жидкостью с учетом воздушной прослойки в связанной постановке.

Учет связности, то есть взаимоучет деформаций тела, жидкости и воздушного слоя между ними, может существенно сказаться на процессе удара и погружения, и, как следствие, на динамических характеристиках и несущей способности конструкции.

Цель работы – исследовать динамические характеристики ряда слоистых элементов конструкций (круговая и прямоугольная пластины, малокилеватый клин), при их вертикальном ударном взаимодействии с первоначально невозмущенной поверхностью идеальной сжимаемой жидкости (воды). Исследуется начальный этап взаимодействия, когда гидродинамические давления достигают максимальных значений.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

- Разработать методику численного моделирования ударного взаимодействия слоистых элементов конструкций с жидкостью с учетом воздушной прослойки в связанной постановке;

- Исследовать влияние воздушной прослойки между элементом конструкции и жидкостью на процесс ударного взаимодействия элемента конструкции о поверхность жидкости;

- Исследовать влияние связности (взаимоучета деформаций тела, жидкости и воздушного слоя между ними) на процесс ударного взаимодействия элемента конструкции о поверхность жидкости;

- Исследовать динамические характеристики ряда слоистых элементов конструкций (круговой, прямоугольной трехслойных пластин, трехслойного малокилеватого клина) при их вертикальном ударе о первоначально невозмущенную поверхность идеальной сжимаемой жидкости;

Научная новизна:

- Разработана методика решения задач ударного взаимодействия слоистых элементов конструкций с жидкостью, учитывающая влияние воздушной прослойки, между конструкцией и жидкостью, в связанной постановке;

- Исследовано влияние воздушной прослойки между элементом конструкции и жидкостью на процесс удара конструкции о поверхность жидкости;

- Исследовано влияние связности на процесс удара конструкции о поверхность жидкости;

- Решен ряд новых задач о вертикальном ударе слоистых элементов конструкций (круговая, прямоугольная пластины, малокилеватый клин) о первоначально невозмущенную поверхность идеальной сжимаемой жидкости с учетом воздушной прослойки в связанной постановке. Проведен параметрический анализ динамических характеристик слоистых элементов конструкций в зависимости от начальной скорости взаимодействия;

Практическое значение работы заключается в использовании результатов исследования при проектировании и поверочном расчете элементов конструкций авиационной и морской техники, в частности:

1. Днищ гидросамолетов и экранопланов
2. Оснований платформ для сброса, спуска грузов на воду

Результаты диссертационной работы внедрены в расчетную практику, что подтверждается актом внедрения: ЗАО «ВСТ-Спецтехника» г. Москва, 2016 год.

Достоверность результатов. Достоверность научных положений и выводов диссертации базируется на комплексном применении современных математических методов анализа, удовлетворительном совпадении экспериментальных, аналитических и численных результатов.

Методы решения. Задача решается методом конечных элементов. Используется явная схема интегрирования по времени. Для моделирования элементов конструкций используются 4-х узловые элементы Лагранжа с неполным интегрированием. Перемещения на элементе ищется по формуле:

$$x_j(t) = \sum_{\lambda=1}^4 \phi_{\lambda} x_j^{\lambda}(t), \quad (j = x, y)$$

где ϕ_{λ} – функции формы:

$$\phi_{\lambda} = \frac{1}{4} (1 + \xi \xi_{\lambda}) (1 + \zeta \zeta_{\lambda}),$$

x_j^{λ} – координаты λ – ого узла в направлении j .

На защиту выносятся следующие положения:

- результаты исследования влияния воздушной прослойки между элементом конструкции и жидкостью на процесс удара элементов конструкций о жидкость.

- результаты исследования связности (взаимоучета деформаций тела, жидкости и воздушного слоя между ними) на процесс удара элементов конструкций о жидкость.

- результаты исследования поведения ряда слоистых элементов конструкций (круговая и прямоугольная пластины, малокилеватый клин) при их

вертикальном ударе о первоначально невозмущенную поверхность идеальной сжимаемой жидкости (воды).

Личный вклад автора.

Автором разработана и верифицирована методика численного исследования ударного взаимодействия слоистых элементов конструкций с жидкостью в связанной постановке с учетом воздушной прослойки между конструкцией и жидкостью. Выполнен весь объем аналитических и численных работ. Обработаны и проанализированы результаты. Сформулированы выводы по каждому разделу работы.

Апробация работы и публикации.

Результаты диссертационной работы докладывались на:

- Всероссийская студенческая научно-техническая школа-семинар «Аэрокосмическая декада» (г. Алушта, республика Крым, 2009 г.);
- Международная научно-техническая конференция «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (Санкт-Петербург, 2010 г.);
- Международной конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, 2010, 2011, 2013, г.г.);
- Международная молодёжная научная конференция «Туполевские чтения» (Москва, 2011 г.);
- Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (Ярополец, Московская обл., 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 г.г.);
- Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтке» (Москва, 2012, 2013, 2014, 2015 г.г.);

- Всероссийская научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии» (Москва, 2012 г.);

- Международная конференция «Математическое моделирование в механике деформируемых сред и конструкций. Методы граничных и конечных элементов.» (Санкт-Петербург, 2013, 2015 г.г.);

- Всероссийская научная конференция «Обратные краевые задачи и их приложения» (Казань, 2014 г.);

- Международный научный семинар «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы» (Москва, 2014, 2015, 2016 г.г.);

- Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения» (Москва, 2011 г.).

Основные результаты диссертации опубликованы в двадцати восьми печатных работах, в том числе в пяти статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из трех глав и основных выводов, списка обозначений, списка литературы и содержит 103 страницы. Список используемой литературы включает 116 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 кратко изложены основные положения, обосновывающие актуальность темы диссертационной работы. Сформулированы цели работы и задачи, поставленные для достижения перечисленных целей. Кратно изложены новые научные результаты, полученные автором лично, и обоснована достоверность полученных результатов. Перечислены положения, выносимые на защиту, сведения об апробации и основных публикациях, содержащих результаты работы.

Приведен обзор литературы. Рассмотрено состояние дел в области исследования вертикального удара о жидкость различных элементов конструкций. Показано, что на момент написания диссертации не исследованными остаются вопросы влияния воздушной прослойки на процесс удара тела о воду в связной постановке. Также показано, что все более широкое применение в современной технике получают слоистые конструкции. В связи с этим необходимо исследовать поведение ряда слоистых элементов конструкций (круговая, прямоугольная пластины, малокилеватый клин) при их ударном взаимодействии с водой, что необходимо при проектировании платформ для сброса грузов на воду и днищ приводяемых аппаратов.

Во второй главе ставится задача, проводится верификация математической (численной) модели.

На примере сравнения аналитического и численного решений задачи о вертикальном ударе круговой трехслойной пластины об идеальную сжимаемую жидкость исследуется влияние связности.

На примере сравнения экспериментального и численного решений задачи о вертикальном ударе однослойной прямоугольной пластины об идеальную сжимаемую жидкость исследуется влияние воздушной прослойки.

В работе рассматривается вертикальный удар ряда слоистых элементов конструкций о первоначально невозмущенную поверхность идеальной сжимаемой жидкости (воды).

В первоначальный момент времени элемент конструкции находится на некотором расстоянии от невозмущенной поверхности воды, со всех сторон окружен воздухом, т.е. между элементом конструкции и поверхностью воды присутствует слой воздуха (рисунок 1).

В начальный момент времени элемент конструкции приобретает начальную скорость и далее под действием гравитационных сил падает на поверхность воды.

Начальная скорость пластины много меньше скорости звука в воде. Исследуется начальный этап взаимодействия, когда возникают максимальные гидродинамические давления, и характеристики реакций достигают предельных значений.

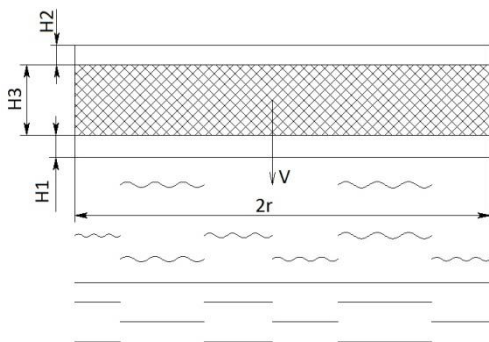


Рис. 1 – Элемент конструкции в первоначальный момент времени

Задача решается в двумерной плоскосимметричной (пластина прямоугольная бесконечного размаха по длине, клин) или осесимметричной (круговая пластина) связанной постановке (т. е. происходит взаимоучет деформаций пластины, жидкости и воздушного слоя между ними). В осесимметричной постановке рассматривается симметрия относительно оси вращения пластины. В плоскосимметричной постановке рассматривается симметрия относительно центра пластины по ширине.

Пластины рассматриваются как симметричного, так и несимметричного строения по толщине. Слои пластины считаются однородными и изотропными, работающими в рамках закона Гука.

Разрешающими уравнениями являются уравнения движения механики сплошной среды.

Уравнение сохранения массы:

$$\frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V}. \quad (1)$$

Уравнения движения:

$$\begin{aligned} \rho \ddot{x} &= \rho F_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z}, \\ \rho \ddot{y} &= \rho F_y + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z}, \\ \rho \ddot{z} &= \rho F_z + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}. \end{aligned} \quad (2)$$

Соотношение для удельной энергии:

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz} \dot{\epsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy} \dot{\epsilon}_{xy} + 2\sigma_{xz} \dot{\epsilon}_{xz} + 2\sigma_{yz} \dot{\epsilon}_{yz}). \quad (3)$$

Здесь ρ_0, V_0 – начальные плотность и объем; m, V, ρ – текущая масса, объем и плотность; σ, σ_{ij} – тензор напряжений и компоненты тензора напряжений; F_i – компоненты объемных сил; x, y, z – компоненты перемещений в соответствующих направлениях; ϵ – удельная энергия; ϵ, ϵ_{ij} – тензор деформаций и компоненты тензора деформаций. Точкой традиционно обозначается производная по времени.

Для осесимметричного и плоскосимметричного случая используются соответственно осесимметричный и плоскодеформированный варианты уравнений (2).

Гипотез о распределении перемещений по толщине пластины, приводящих к разделению на мягкие и жесткие слои, не вводится. В качестве

граничных условий сопряжения между слоями пластины рассматриваются условия равенства перемещений. Края пластины свободные.

Вода рассматривается как идеальная сжимаемая жидкость. Для моделирования воды использовалась уравнение состояния Ми-Грюнайзена, полученное с использованием уравнения Ранкина-Гюгонио.

$$p = p_H + \Gamma \rho (\epsilon - \epsilon_H).$$

Здесь p , p_H , ϵ_H – давление, давление и удельная энергия Гюгонио, Γ – коэффициент Грюнайзена.

Между пластиной и поверхностью воды находится слой воздуха. Воздух рассматривается как идеальный политропный газ.

$$p = (\gamma - 1) \rho \epsilon.$$

Здесь γ – показатель адиабаты.

Также, для исследования влияния воздушной прослойки, анализируется случай, когда элемент конструкции в начальный момент времени соприкасается с невозмущенной поверхностью воды.

Задача решается методом конечных элементов. Используется явная схема интегрирования по времени. Для моделирования пластины используются элементы Лагранжа. Для моделирования воздуха и жидкости используются элементы Эйлера.

В программном комплексе элементами Эйлера строится область, часть которой заполняется жидкостью (нижняя), а часть воздухом (верхняя). Область элементов Эйлера строится так, чтобы ее ширина была вдвое больше ширины (радиуса) пластины, глубина жидкости равна ширине (радиусу) пластины. На

нижней границе области задается условие убегания волн (случай бесконечной глубины).

Верхняя часть области элементов Эйлера складывается из расстояния между пластиной и жидкостью, а также еще некоторого расстояния так, чтобы воздух окружал пластину со всех сторон (около половины ширины (радиуса) пластины).

В связи с тем, что в качестве метода решения используется численный метод (метод конечных элементов), во второй главе также проводится исследование сходимости результатов от размера конечно-элементной сетки и верификация метода.

Верификация проводится путем сравнения аналитического и численного решения задачи о вертикальном ударе круговой трехслойной пластины об идеальную сжимаемую жидкость, и сравнения экспериментального и численного решения задачи о вертикальном ударе однослойной прямоугольной пластины об идеальную сжимаемую жидкость.

Сравнение с аналитическим решением.

Для задачи об ударе абсолютно твердого диска о поверхность идеальной сжимаемой жидкости доведено до конца (для случая конечной массы диска) аналитическое решение Поручикова для гидродинамической силы, действующей на диск. Диск в первоначальный момент времени лежит на поверхности жидкости. Получено, что максимальное гидродинамическое давление зависит только от свойств жидкости и начальной скорости диска и распределено равномерно по всей поверхности соприкосновения диска с жидкостью.

Проведено сравнение гидродинамического давления для дисков из разных материалов (рисунок 2). Гидродинамическая сила от времени зависит линейно. Масса диска влияет только на угол наклона прямой. Чем меньше масса, тем быстрее со временем убывает давление. Максимальное давление возникает в начальный момент времени и для всех дисков одинаково.

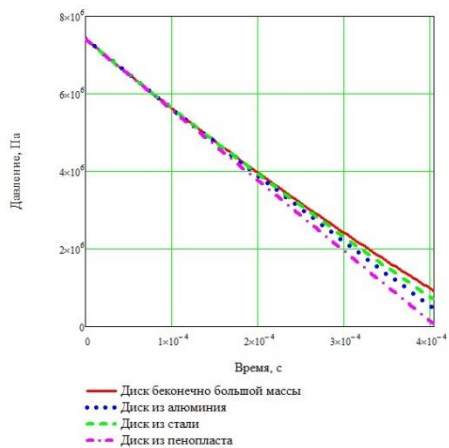


Рис.2 – Сравнение давлений, действующих на диски из разных материалов

Проведено сравнение давлений для однослойной стальной круговой пластины, которую в первом приближении можно считать абсолютно твердой, найденных формуле для абсолютно твердого диска, и полученных по разработанной методике (рисунок 3). Показано, что ударные давления, полученные по разработанной методике, хорошо согласуются с аналитическим решением.

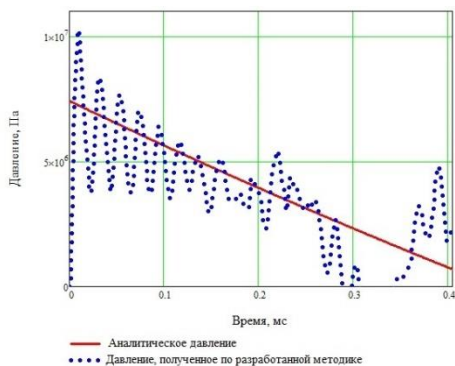


Рис.3 – Сравнение давлений в центре диска, полученных аналитически и по разработанной методике

На основании решения для гидродинамической силы, действующей на абсолютно твердый диск для случая диска конечной массы, получено аналитическое решение задачи об ударе трехслойной круговой пластины о поверхность идеальной сжимаемой жидкости.

Проведено сравнение полученного решения с решением той же задачи по разработанной методике. Показано, что прогибы, полученные аналитически и по разработанной методике, качественно совпадают, однако, количественно прогибы, полученные по разработанной методике, учитывающие гидроупругое взаимодействие между пластиной и жидкостью, существенно меньше. Происходит это потому, что трехслойную пластину абсолютно жесткой считать нельзя, она деформируется, и за счет этого давления быстро убывают.

Пик гидродинамических давлений возникает также в начальный момент времени и хорошо совпадает с аналитическим значением (рисунок 4).

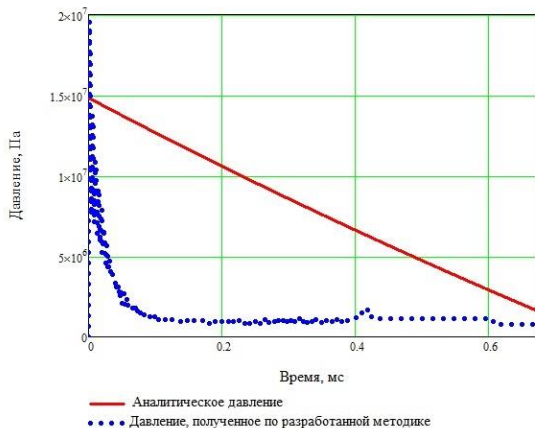


Рис. 4 – Сравнение давлений в центре круговой трехслойной пластины, полученных аналитически и по разработанной методике

Сравнение с экспериментом.

Проведено сравнение экспериментального и численного (по разработанной методике) решений задачи о вертикальном ударе однослойной прямоугольной пластины об идеальную сжимаемую жидкость. При численном решении рассмотрено два случая: с учетом и без учета воздушной прослойки. Рассмотрено влияние на гидродинамические давления скорости начального взаимодействия пластины и жидкости, а также влияние воздушной прослойки на величину максимальных гидродинамических давлений.

Показано, что ударные давления, полученные по разработанной методике, с учетом воздушной прослойки как количественно, так и качественно хорошо согласуются с экспериментальными. Время действия ударных давлений также хорошо совпадает с экспериментальным.

Давления в случае без воздушной прослойки существенно выше экспериментальных.

Сравнение численных решений с воздушной прослойкой и без нее показывает, что гидродинамические давления зависят от начальной скорости взаимодействия пластины со средой по линейному закону. Влияние воздушной прослойки существенно сказывается на величине максимальных давлений только на малых скоростях взаимодействия. При увеличении скоростей взаимодействия влияние воздушной прослойки уменьшается (рисунок 5).

Также показано, что при учете воздушной прослойки давления и скорость пластины изменяются плавно (рисунок 6). Понятия скорости соударения при учете воздушной прослойки неопределено, поэтому в дальнейшем все зависимости будут строиться от начальной скорости.

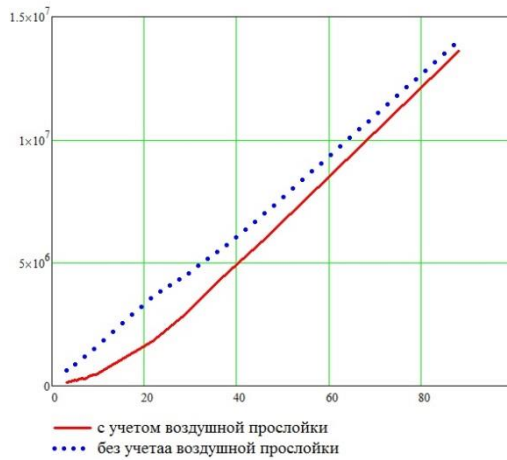


Рис.5 – Зависимость гидродинамических давлений от скорости соударения

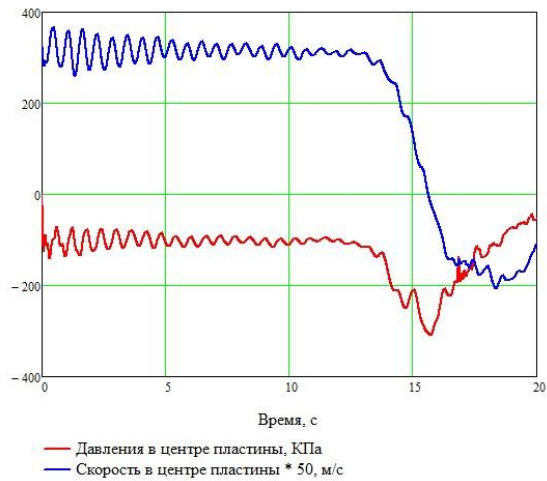


Рис. 6 – Зависимость гидродинамических давлений в центре пластины и скорости пластины от времени

Третья глава вся, целиком и полностью, посвящена решению поставленной задачи об исследовании поведения выше перечисленных слоистых элементов конструкций при их вертикальном ударе об идеальную сжимаемую жидкость.

На ряде частных случаев продемонстрированы основные результаты работы.

Глава разделена на три раздела посвященных круговой, прямоугольной пластинам и малокилеватому клину.

В каждом разделе приводится описание конечно-элементной модели, на примере которой демонстрируются результаты работы, и, собственно, приводятся сами результаты и выводы по главе.

Рассмотрено 4 случая: без воздушной прослойки и без груза, без воздушной прослойки с грузом, с воздушной прослойкой без груза, с воздушной прослойкой с грузом.

Получен численный набор данных, характеризующий изменение динамических характеристик рассмотренных элементов конструкций в зависимости от начальной скорости, для всех случаев.

На основании анализа данных получены следующие результаты:

Прогибы пластины существенно зависят от жесткости системы пластина-среда. Так в случае без воздушной прослойкой прогибы значительно меньше, чем с ней, так как жесткость системы пластина-воздух меньше, чем жесткость пластина-вода. Груз придает пластине дополнительную жесткость, что также уменьшает прогибы.

При наличии груза пик сжатия заполнителя больше пика растяжения в 1.5 раза. Сжатие пластины с грузом также в 1.5 больше сжатия пластины без груза. Сравнение для разных случаев соударение показывает, что учет воздушной прослойки и груза может существенно сказаться на сжатии пластины.

В случае отсутствия воздушной прослойки максимальные гидродинамические давления для пластины с грузом и без, одинаковы. Максимальные давления возникают в начальный момент времени.

В случае с воздушной прослойкой максимальные давления нарастают постепенно. За счет учета воздушной прослойки давления значительно меньше, чем для случая без учета воздушной прослойки.

Показано, что наличие груза и воздушной прослойки существенной влияет как на уровень, так и на характер распределения напряжений.

В расчетном случае с грузом максимальные напряжения возникают во втором несущем слое, и они существенно больше, чем напряжения в первом несущем слое, что в перспективе позволяет внести асимметрию по толщине в конструкцию пластины.

Наблюдается высокий уровень осевых напряжений по всей толщине пластины, что может быть причиной расслоения. В дальнейших исследованиях необходимо более точно смоделировать взаимодействие между слоями пластины.

Сравнение максимальных эквивалентных напряжений для случаев с грузом и без груза, с учетом воздушной прослойки и без нее позволяет сделать вывод, что самые высокие напряжения возникают при учете, как груза, так и воздушной прослойки, и их необходимо учитывать при проектировании конструкций вступающих в ударное взаимодействие с жидкостью.

Показано, что основные динамические характеристики рассмотренных элементов конструкций: прогибы элементов конструкций, деформации пластин и клина, давления, действующие на конструкции со стороны воды, напряжения в элементах конструкций имеют линейную зависимость от начальной скорости взаимодействия. Так как это справедливо для всех рассмотренных элементов конструкций, можно сделать вывод, что данная зависимость проявляется в общем при ударном взаимодействии тел с жидкостью.

Основные выводы диссертационной работы.

1. На основании метода конечных элементов разработана методика решения задач взаимодействия конструкций с жидкостью, учитывающая влияние воздушной прослойки между телом и жидкостью, и гравитационных сил, в связной постановке.

2. Для случая конечной массы диска доведено до конца аналитическое решение Поручикова для гидродинамической силы, действующей на диск, для задачи об ударе абсолютно твердого диска о поверхность идеальной сжимаемой жидкости.

3. На основании решения для гидродинамической силы, действующей на абсолютно твердый диск, для случая диска конечной массы, получено аналитическое решение задачи об ударе трехслойной круговой пластины о поверхность идеальной сжимаемой жидкости.

4. С использованием разработанной методики исследовано влияние воздушной прослойки между конструкцией и жидкостью на процесс удара элементов конструкции о жидкость.

5. С использованием разработанной методики исследовано влияние связности задачи взаимодействия конструкций с жидкостью на процесс удара элементов конструкции о жидкость.

6. С помощью разработанной методики исследовано поведение ряда слоистых элементов конструкций при их вертикальном ударе о первоначально невозмущенную поверхность идеальной сжимаемой жидкости. Проведен параметрический анализ динамических характеристик элементов конструкции в зависимости от начальной скорости взаимодействия.

Публикации

1. Говоров А. А., Крупенин А. М., Мартиросов М. И. Вертикальный удар о воду слоистой пластины с легким наполнителем// 9-я Международная

конференция «Авиация и космонавтика—2010». 16-18 ноября 2010 года. Москва. Тезисы докладов. — Спб.: Мастерская печати, 2010.— С. 63-64.

2. *Говоров А. А., Крупенин А. М., Мартыросов М. И.* Нестационарное взаимодействие трехслойных элементов конструкций с жидкостью// Часть I. Материалы II Всероссийской студенческой научно-технической школы-семинара «Аэрокосмическая декада». Часть II. Материалы II Всероссийской научно-практической студенческой школы-семинара «Компьютерный инжиниринг в промышленности и ВУЗах», посвященной 80-летию МАИ. — М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. — С. 61-63.

3. *Говоров А. А., Крупенин А. М., Мартыросов М. И.* Численное исследование ударного взаимодействия слоистых элементов конструкций с поверхностью воды// Высокие технологии и фундаментальные исследования. Т. 1 : сборник трудов Десятой международной научно-технической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». 09-11.12.2010, Санкт-Петербург, Россия/ под ред. А. Н. Кудинова.— Спб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2010.— С. 249-250.

4. *Крупенин А.М., Мартыросов М.И.* Численное исследование поведения прямоугольной трёхслойной пластины несимметричного строения при вертикальном приводнении //Материалы Международной молодёжной научной конференции «XIX Туполевские чтения». Том 1. Казань, 24-26 мая 2011 г., изд-во КГТУ, 2011 г. С. 95-96.

5. *Крупенин А.М., Мартыросов М.И.* Сравнение динамических характеристик слоистых пластин с лёгким и жёстким изотропными заполнителями при ударе о воду // Тезисы докладов 9-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2011». Москва, 8-10 ноября 2011 г. М., МАИ, 2011 г. С. 129.

6. *Крупенин А.М., Мартыросов М.И.* Динамика слоистых пластин с различными заполнителями при вертикальном ударе о воду //Материалы XVIII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы

механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Том 1. Ярополец, 13-17 февраля 2012 г. М., МАИ, 2012 г. С. 116-118.

7. *Крупенин А.М., Мартиросов М.И.* Численное исследование удара о воду слоистого клина с различными заполнителями // Сборник тезисов докладов Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтке – 2012». Москва, 17-20 апреля 2012 г. М., МАИ 2012 г. С. 270-271.

8. *Крупенин А.М., Мартиросов М.И.* Исследование удара о воду трёхслойного клина с различными заполнителями //Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Новые материалы и технологии». Москва, 20-22 ноября 2012 г.М., МАТИ, 2012 г. С. 183-184.

9. *Крупенин А.М., Мартиросов М.И.* Удар о воду трёхслойного клина с малым углом килеватости // Материалы XIX Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Том 1. Ярополец, 18-22 февраля 2013 г. М., МАИ, 2013 г. С. 131-132.

10. *Крупенин А.М., Мартиросов М.И.* Поведение слоистой прямоугольной пластины со сплошным изотропным заполнителем при вертикальном приводнении // Сборник тезисов докладов Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтке – 2013». Москва, 16-18 апреля 2013 г. М., МАИ 2013 г. С. 55-56.

11. *Крупенин А.М., Мартиросов М.И.* Динамика слоистого клина со сплошным заполнителем из изотропного материала при вертикальном ударе о воду// Тезисы докладов XXV Международной конференции «Математическое моделирование в механике деформируемых сред и конструкций. Методы граничных и конечных элементов.» Санкт-Петербург, 23-26 сентября 2013 г. СПбГУ, 2013 г. С. 120-121.

12. *Крупенин А.М., Мартиросов М.И.* Численное моделирование поведения трехслойной прямоугольной пластины при вертикальном ударе о

жидкость // Электронный журнал «Труды МАИ». 2013 г. Выпуск № 69:<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=43066>.

13. *Крупенин А.М., Мартиросов М.И.* Исследование динамических характеристик трехслойной круговой пластины при вертикальном ударе о воду методом конечных элементов // Тезисы докладов 12-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2013». Москва, 12-15 ноября 2013 г. М., МАИ, 2013 г. С. 66-67.

14. *Крупенин А.М., Мартиросов М.И.* Анализ поведения круговой слоистой пластины при ударе о жидкость // Материалы XX Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Том 1. Ярополец, 17-21 февраля 2014 г. М., МАИ, 2014 г. С. 116-117.

15. *Крупенин А.М., Мартиросов М.И.* Конечно-элементный анализ взаимодействия трехслойных пластин с жидкостью// Сборник тезисов докладов Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2014» Москва, 22-24 апреля 2014 г., М., МАИ, 2014 г. С. 207.

16. *Крупенин А.М., Мартиросов М.И.* Верификация численной модели взаимодействия прямоугольной пластины с поверхностью воды// Электронный журнал «Труды МАИ». 2014 г. Выпуск № 75:<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=49676>.

17. *Крупенин А.М., Мартиросов М.И.* Симметричный удар круговой трехслойной пластины о воду// Материалы Всероссийской научной конференции «Обратные краевые задачи и их приложения», посвященной 100-летию со дня рождения М.Т. Нужи́на. Казань, 20-24 октября 2014 г. Казань, изд-во Казан. ун-та, 2014 г. С. 1-4.

18. *Крупенин А.М., Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н.* Численное моделирование нестационарного взаимодействия пластин с жидкостью//

Международный научно-технический журнал «Нелинейный мир». Том 12, № 11, 2014 г. С. 21-29.

19. *Крупенин А.М., Мартиросов М.И.* Численное исследование поведения трехслойного клина при вертикальном взаимодействии со свободной поверхностью жидкости// Тезисы докладов Международного научного семинара «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы». Москва, 8-10 декабря 2014 г. М., МАИ, 2014 г. С. 33-34.

20. *Крупенин А.М., Мартиросов М.И.* Поведение трехслойного клина с заполнителем сплошной структуры при входе в жидкость// Материалы XXI Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Том 1. Вятчи, 16-20 февраля 2015 г. М., МАИ, 2015 г. С.110-111.

21. *Крупенин А.М., Мартиросов М.И.* Численное исследование нестационарного взаимодействия круговой слоистой пластины с поверхностью воды// Электронный журнал «Труды МАИ». 2015 г. Выпуск № 80: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=56943>.

22. *Крупенин А.М., Мартиросов М.И.* Поведение слоистой платформы с дополнительной массой при ударе о поверхность воды// Сборник тезисов докладов Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2015» Москва, 21-23 апреля 2015 г., М., МАИ, 2015 г. С.31-32.

23. *Крупенин А.М., Мартиросов М.И.* Поведение круговой трёхслойной пластины с жёстким заполнителем при ударе о воду //Научные труды Международной молодёжной научной конференции «XXXVII Гагаринские чтения». Том 5. Москва, 5-8 апреля 2011 г. М., МАТИ, 2011 г. С. 27-28.

24. *Крупенин А.М., Мартиросов М.И. Рабинский Л.Н.* Удар трехслойной пластины о свободную поверхность жидкости// Известия ТулГУ. Технические науки. Вып.5:в 2 ч. Ч.2. Тула: Из-во ТулГУ, 2015 г. С. 65-73.

25. *Крупенин А.М., Мартиросов М.И.* Конечно-элементное моделирование удара круговой трехслойной пластины несимметричного строения по толщине о жидкость// Тезисы докладов XXVI Международной конференции "Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций" Санкт-Петербург, 28-30 сентября 2015 г. СПбГУ, 2015 г. С. 214-215.

26. *Крупенин А.М., Мартиросов М.И.* Удар о воду слоистой платформы с грузом при сбросе с авиационного носителя// Тезисы докладов III Международного научного семинара «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы». Москва, 17-19 декабря 2015 г. М., МАИ, 2015 г. С. 59.

27. *Крупенин А.М., Мартиросов М.И.* Исследование поведения трехслойной пластины при ударе о поверхность воды// Материалы XXII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Том 1. Вятчи, 15-19 февраля 2016 г. М., МАИ, 2016 г. С.

28. *Крупенин А.М., Мартиросов М.И.* Исследование влияния воздушной подушки на динамические характеристики трехслойной пластины при падении на воду// Тезисы докладов IV Международного научного семинара «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы». Москва, 15-19 февраля 2016 г. М., МАИ, 2016 г. С.