

УДК 539.3:623.4:623.9

Результаты численного моделирования конструкций изделий, при ударе о жидкую и твердую преграды

Юдин Д.А.

Научно-производственное объединение «Базальт»,

ул. Вельяминовская, 32, Москва, 105318, Россия

e-mail: clasic29.00@mail.ru

Статья поступила 03.09.2019

Аннотация

Представлена адаптивная методика и результаты математического моделирования элементов конструкций изделий при соударении с различными типами преград. Решается задача разработки эффективной методики численного моделирования трехмерных динамических задач гидроупругости и динамики конструкций. Для решения этих связанных задач используется метод конечных элементов.

Получены результаты расчетов напряженно-деформированного состояния, с помощью численного моделирования, а также некоторые особенности процесса ударного взаимодействия изделия и преград.

Ключевые слова: напряжения и деформации, рикошетирование, разрушение, скорости подхода, угол приводнения, разрушение мембраны, смятие демпфера.

Введение

За последние годы разработано большое количество аналитических и полуэмпирических методов исследования напряженно-деформированного состояния конструкций при ударных воздействиях. Однако эти методы главным образом применялись для ограниченного типа конструкций, как правило, простой геометрии и при наличии ряда ограничений при постановке задач и формировании граничных условий [1]. В то же время очевидно, что для решения практических задач, в том числе для объектов ракетно-космической отрасли, требуется учитывать достаточно сложную геометрию элементов конструкций и соответствующие граничные условия. Основная проблема моделирования при этом заключается в необходимости получения совместного согласованного решения уравнений динамики конструкции и уравнений движения жидкости или твердой преграды. В связи с этим в настоящее время, одним из основных и, безальтернативных подходов для решения указанных сложных задач является численное моделирование [2].

Постановка задачи

Достоинства МКЭ заключаются в относительно несложном задании граничных условий, достаточно высокой точности, возможности проследить всю эволюцию свободной границы и высокой степенью универсальности [3]. Следует отметить, что применение данного метода при проведении расчетов в областях со сложным поведением свободной поверхности может привести к перехлесту границ ячеек расчетной сетки за счет больших деформаций моделируемой конструкции.

Заметим также, что наиболее полное описание МКЭ и его приложений для задач теории упругости и гидродинамики можно найти в монографии [4].

МКЭ в рамках постановки ALE широко применяется для задач со свободной поверхностью, подвижными границами, значительными деформациями и контактными взаимодействиями. Целый набор публикаций связан с развитием методов и решателей для численного моделирования жидкости и (или) сооружений в [5] разработали эффективный численный метод моделирования поведения связанной системы «изделие – жидкость», интегрированный в программный комплекс ANSYS [12]. При этом для соответствующей конечноэлементной аппроксимации жидкости использовались элементы с неизвестными узловыми давлениями (постановка в давлениях), тогда как для изделия применялись модальные (спектральные) методы [6].

Целью работы является разработка эффективной методики численного моделирования трехмерных динамических задач гидроупругости, для определения напряженно-деформированного состояния элементов металлических конструкций при ударе о воду и твердую преграду.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Обзор существующих нормативных документов, экспериментальных и теоретических подходов решения заявленной проблемы.
2. Классификация основных задач гидроупругости с позиции, как физики явлений, так и математических/численных подходов их моделирования.

3. Обоснованный выбор наиболее эффективных и альтернативных математических моделей, численных методов и программных реализаций.

Достоверность полученных результатов и обоснованность научных положений и выводов обеспечивается:

- корректностью постановки задач в рамках теоретических предпосылок механики деформируемого твёрдого тела и жидкости;
- обоснованностью алгоритмов расчёта с применением апробированных численных методов механики сплошной среды, реализованных в верифицированных программных комплексах.

Для решения связанных задач гидроупругости в программном комплексе ANSYS реализован прямой метод (Direct Method), основанный на конечно-элементном анализе связанных полей с использованием специализированных конечных элементов в постановках Эйлера для воды и Лагранжа для конструкции. Для моделирования связанной системы «изделие – жидкость» рекомендуется использовать конечный элемент SOLID187 и FLUID80, соответственно (Рис.1) [7].

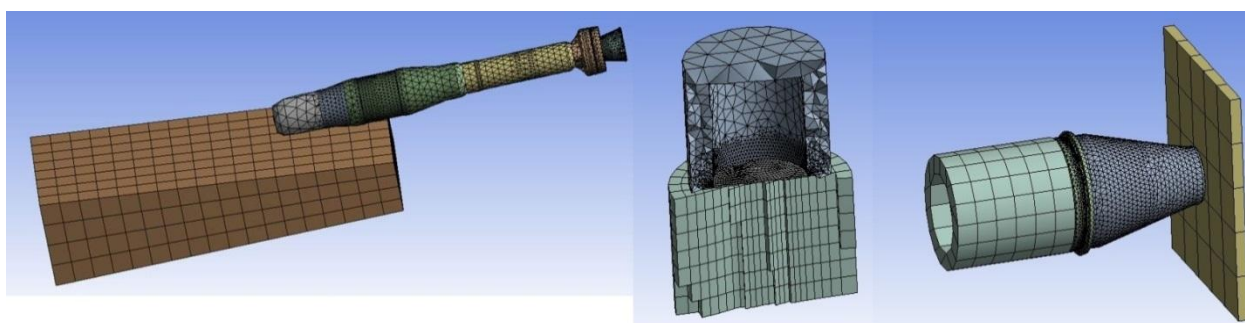


Рис.1 Конечно-элементные модели

В основе явного динамического решателя ANSYS Workbench, именуемого Explicit Dynamic, для рассматриваемых задач динамики лежит решение дифференциальных уравнений в частных производных, выражающих законы сохранения масс, импульсов, энергии с использованием интегрирования по времени в явном виде [8].

Результаты численного моделирования

Рассматривается несколько примеров расчетов.

1. Алюминиевый цилиндрический объект, радиусом $R=22$ мм, наполнен веществом с плотностью 1663 кг/м³. Толщина боковой стенки цилиндра 2 мм, передней 3 мм, скорость подхода к преграде $V=130$ м/с, углы приведения $\varphi=7^\circ$, 14° . В качестве преграды рассматривается вода с плотностью 1020 кг/м³ (Рис.2,3).

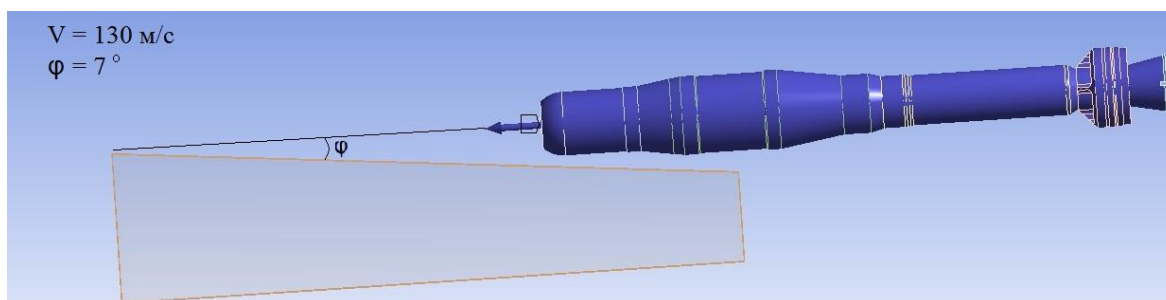


Рис.2 Начальные условия подхода изделия к поверхности воды

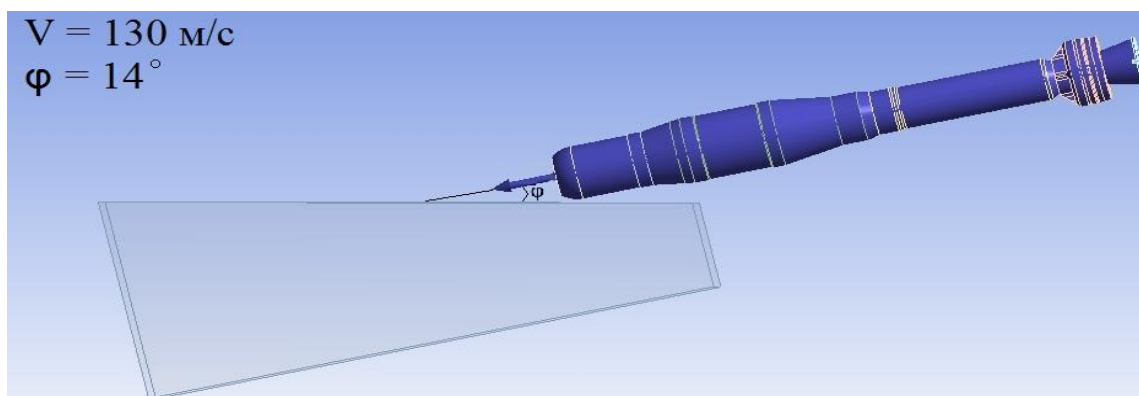


Рис.3 Начальные условия подхода изделия к поверхности воды

Расчет показал, что при подходе к поверхности воды под углом $\varphi=7^\circ$, изделие рикошетирует (Рис.4).

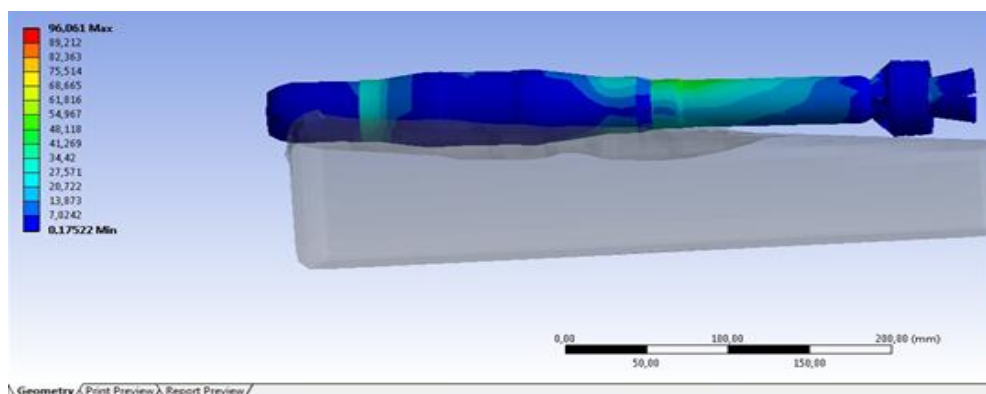


Рис.3 Распределение напряжений по изделию (МПа)

При подходе к поверхности воды под углом $\varphi=14^\circ$ изделие погружается без рикошетирования, максимальные напряжения не превышают предел прочности материалов, из которых изготовлено изделие (Рис.5).

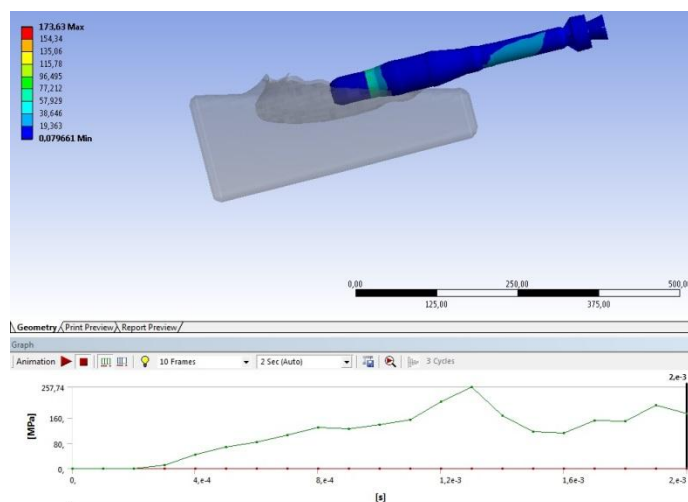


Рис.5 Распределение напряжений по изделию (МПа)

2. Определение момента времени, при котором происходит разрыв мембраны при ударе о воду.

Алюминиевый полый цилиндр рис.6, радиусом $R=17$ мм, с мембраной, толщиной 0,1 мм, в донной части, изготовленной из сплава АД-1, скорость подхода к преграде $V=80$ м/с, угол подхода к преграде $\varphi=90^\circ$. В качестве преграды использована вода с плотностью 1020 кг/м³.

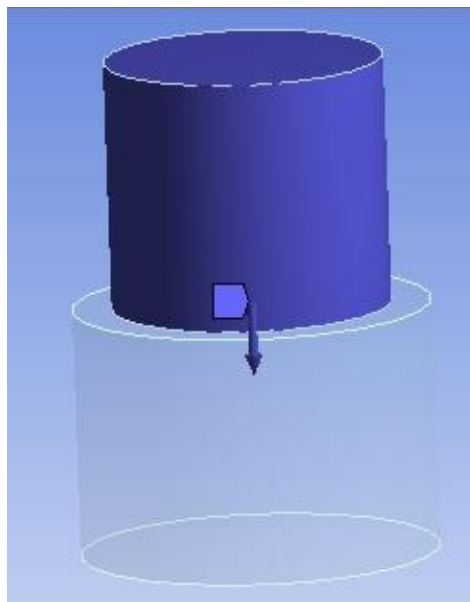


Рис.6 Начальные условия подхода изделия к поверхности воды

На рис.7 показано начало зарождения пластических деформаций и на рис.8 окончательный вид после разрыва мембраны. В данном расчетном случае разрыв мембраны происходит в момент времени $t = 0,00003$ с.

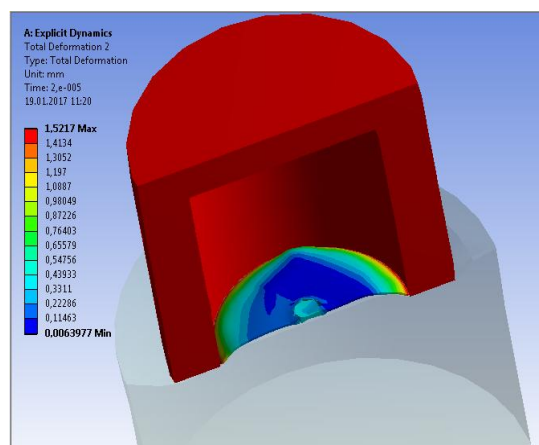


Рис.7 Распределение деформаций

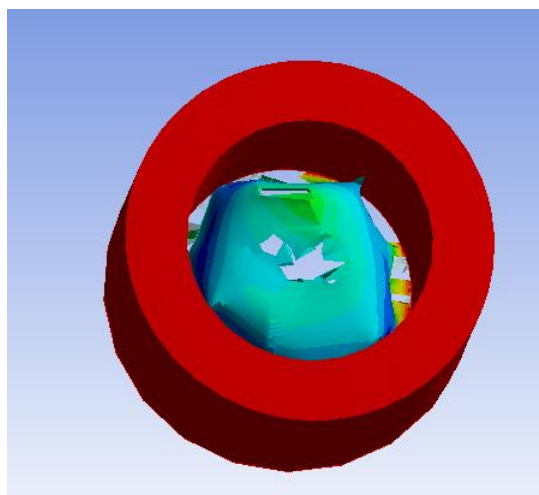


Рис.8 Разрыв мембраны

3. Расчет на смятие изделия при встрече с абсолютно жесткой преградой [12].

Алюминиевый демпфер, радиусом $R=25$ мм, изготовленной из сплава Д16, скорость подхода к преграде $V=180$ м/с, угол подхода к преграде $\varphi=90^\circ$. В качестве преграды использована стальная плита толщиной 100 мм (Рис.9)[13]. В результате расчета получена максимальная перегрузка равная 5271, и максимальное перемещение цилиндра в 37 мм, что привело к смятию демпфера (Рис.10).

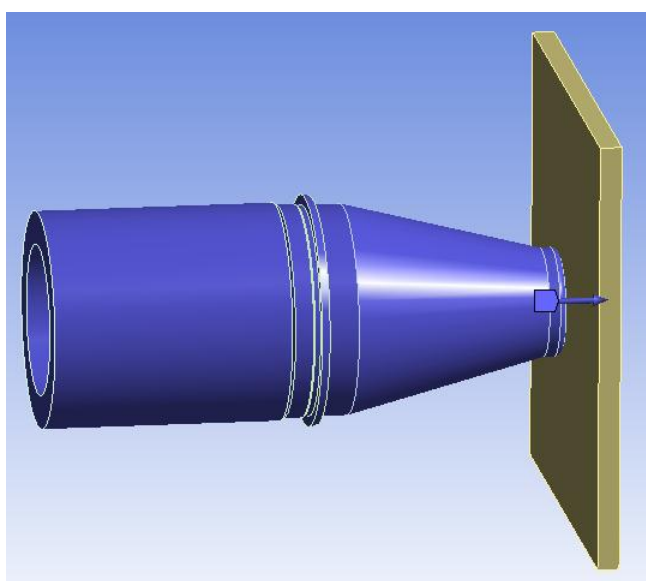


Рис.9 Начальные условия подхода изделия к преграде

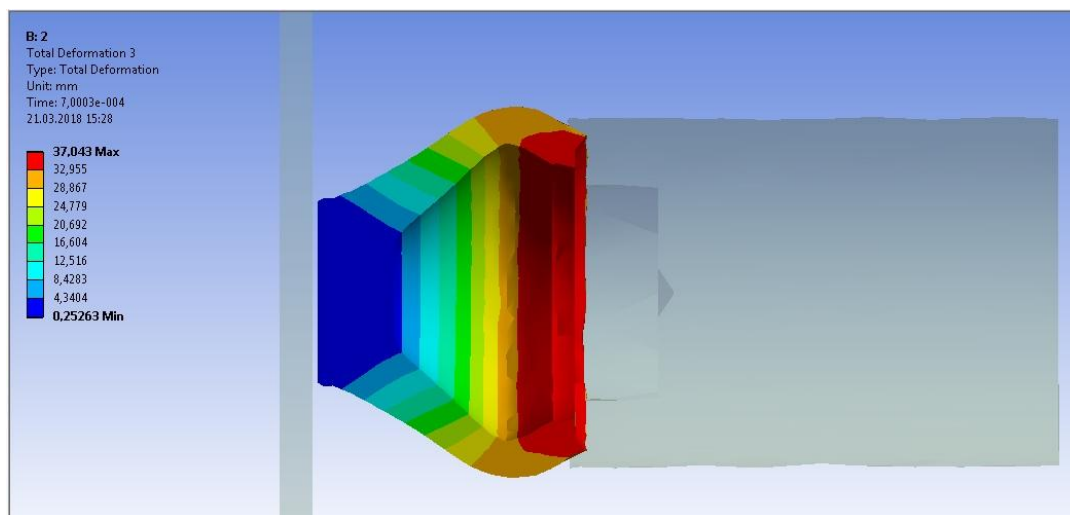


Рис.10 Процесс смятия демпфера

Заключение

Разработана методика численного моделирования напряженно-деформированного состояния элементов конструкции изделий при ударных процессах с жидкими и твердыми преградами. Предлагается эффективная методика численного моделирования трехмерных динамических задач гидроупругости.

В результате расчетов получены значения напряжений, перемещений, времени разрушения конструкций, а также величины углов рикошетирования при встрече с жидкой преградой.

Анализ полученных результатов показал, что изделие, при малых углах, рикошетирует от поверхности воды и, следовательно, требуется продолжить исследование по определению оптимальных углов подхода.

Результаты выполненных расчетных исследований напряженно-деформированного состояния изделия при ударе о поверхность воды, могут быть использованы для оптимизации параметров несущих конструкций при

проектировании аналогичных изделий с различными физическими и механическими свойствами.

Выражаю благодарность моему научному руководителю Фирсанову Валерию Васильевичу, доктору технических наук, профессору, заведующему кафедрой 906 Московского авиационного института

Библиографический список

1. Горшков А.Г., Морозов В.И., Пономарев А.Г., Шклярчук Ф.Н. Аэрогидроупругость конструкций. – М.: Физматлит, 2000. – 592 с.
2. Чижов А.В., Шмидт А.А. Высокоскоростной удар капли о преграду // Журнал технической физики. 2000. Т. 70. № 12. С. 18 – 27.
3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. - 543 с.
4. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The Finite Element Method, vol. 2: Solid Mechanics, Butterworth-Heinemann, 2000, 476 p.
5. Каплун А.Б., Морозов Е.В., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2015. - 272 с.
6. Горшков.А.Г., Рабинский. Л.Н., Тарлаковский Д.В. Основы тензорного анализа и механика сплошной среды. – М.: Наука, 2000. -214 с.
7. Григолюк Э.И., Горшков А.Г. Взаимодействие упругих конструкций с жидкостью (удар и погружение). – Л.: Судостроение, 1976. - 199 с.

8. ANSYS Help, available at:
<http://research.me.udel.edu/~lwan/teaching/ME81/ansys56manual.pdf>
9. Тишков В.В., Фирсанов В.В. Комбинированная аналитическая модель динамического состояния объекта авиационной техники при ударе о твёрдую преграду // Научный вестник МГТУ ГА. 2007. № 123. С. 58 - 67.
10. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. – М.: Наука, 1974. – 311 с.
11. Xing YuFeng, Zhu DeChao. Analytical solutions of impact problems of rod structures with springs // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1998, vol. 160, issue 3 - 4, pp. 315 – 323.
12. Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В. Основы работы в ANSYS 17, ДМК Пресс, 2017. URL: <http://waspeer.info/fedorova-osnovi-raboti-ansys-2017-t232272.html>
13. Тишков В.В., Фирсанов В.В. Многоуровневый подход при построении расчётных моделей динамического состояния объектов авиационной техники при среднескоростном ударе о твёрдую преграду // Научный вестник МГТУ ГА. 2010. № 161. С. 74 - 84.
14. Терегулов И.Г. Изгиб и устойчивость тонких пластин и оболочек при ползучести. - М.: Наука, 1969. - 206 с.
15. Вербицкий А.Б. Сидоренко А.С. Динамическое деформирование конструкции авиационного изделия при аварийном соударении с преградой // Труды МАИ. 2014. № 78. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=53502>

16. Зверяев Е.М. О соотношениях упругости в линейной теории тонких упругих оболочек // Прикладная математика и механика. 1970. Т. 34, № 6. С. 1136 - 1138.
17. Власов В.З. Общая теория оболочек и ее приложения в технике. - М.: Гостехиздат, 1949. - 784 с.
18. Жилин П.А. Прикладная механика. Основы теории оболочек. - СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2006. - 167 с.
19. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. - М.: Наука, 1980. - 512 с.
20. Новожилов В.В., Финкельштейн Р.М. О погрешности гипотез Кирхгофа–Лява в теории оболочек // Прикладная математика и механика. 1943. Т. 7. № 5. С. 323 – 330.