

ЛИТЕРАТУРА

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов: справ. / Ю.С. Борисов [и др.]. – Киев: Наук. думка, 1987. – 543 с.
2. Плазменные покрытия на основе керамических материалов: монография / А.Ф. Ильюшенко, В.А. Оковитый, А.И. Шевцов; под ред. А.Ф. Ильюшенко. – Минск: Бестпринт, 2006. – 316 с.
3. Газотермическое напыление композиционных порошков / А.Я. Кулик [и др.] – Л.: Машиностроение, 1985. – 199 с.
4. Порошковый материал для напыления защитного керамического покрытия и способ его получения: пат. ВУ 21612 / О.Г. Девойно, М.А. Кардаполова, О.К. Яцкевич, В.Г. Щербаков. – Опубл. 28.02.2018.
5. Газотермическая обработка керамических оксидов / М.Н. Бодяко, Ф.Б. Вурзель, Е.В. Кремко [и др.]; под ред. О.В. Романа. – Минск: Наука и техника, 1988. – 233 с.

УДК 625.748.32

UDC 625.748.32

ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖИДКОСТИ И ТВЕРДОГО ТЕЛА

SOFTWARE SYSTEMS FOR SOLVING PROBLEMS OF INTERACTION OF A LIQUID AND SOLID

Колесникович А.Н.¹, Калина А.А.², Шукюров А.О.¹
Kolesnikovich A.N., Kalina A.A., Shukurov A.O.

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
Минск, Беларусь

²Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь
¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences
of Belarus, Minsk, Belarus

²Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация. В статье проведен обзор существующих современных программных комплексов для решения связанных задач взаимодействия жидкости и конструкции, FSI (Fluid-solidinteraction). Проведено сравнение возможностей программных комплексов, описаны достоинства и недостатки представленных решений.

Summary. The article provides an overview of existing modern software systems for solving coherent problems of fluid-structure interaction, FSI (Fluid-structure interaction). A comparison of the capabilities of software systems is carried out, the advantages and disadvantages of the presented solutions are described.

Проблема взаимодействия конструкций/сооружений с жидкостью (Fluid – Structure Interaction, далее – FSI) весьма актуальна в расчетной практике.

Основная сложность моделирования заключается в необходимости получения совместного решения уравнений движения жидкости и динамики конструкции. Существуют аналитические и полуэмпирические методы решения данной задачи. Данные методы имеют достаточно узкую область применения и используются для решения задач с простейшей геометрией и с ограниченными начальными условиями. Однако в практике, для расчета реальных конструкций необходимо сводить к минимуму подобные упрощения, поэтому возникает потребность в применении средств математического и компьютерного моделирования.

Современные программные комплексы (далее – ПК), позволяют проводить связанные расчеты взаимодействия жидкости и конструкции. Использование компьютерного моделирования позволяет провести ряд виртуальных испытаний эквивалентных натурным, но при этом со значительно меньшими материальными и временными затратами. Минимизация погрешности результатов между натурными и виртуальными испытаниями достигается корректным созданием компьютерной модели, применением соответствующих методов моделирования, исходных данных.

1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЖИДКОСТИ И КОНСТРУКЦИИ (Fluid-structure interaction)

Для моделирования FSI применяются, в основном следующие постановки: постановка Эйлера (Euler) и произвольная постановка Лагранжа-Эйлера (Arbitrary Lagrangian-Eulerian Formulation (ALE)).

Постановка Эйлера применяется для анализа характеристик движения сплошной среды в разные моменты времени в каждой фиксированной точке пространства. При этом анализируются не частицы среды, а точки пространства, через которые эти частицы проходят.

Однако широкое распространение для моделирования жидкости получают смешанные постановки Лагранжа-Эйлера, сочетающие в себе обе постановки.

Существует большое количество ПК с открытым исходным кодом для моделирования FSI. ПК с открытым исходным кодом обладают важными преимуществами, т.к. открытый исходный код позволяет видеть, каким образом происходит расчет. ПК перестаёт быть черной коробкой, в которую задаются исходные данные и на выходе получают результат. Еще одно из преимуществ таких ПК – это гибкость. Если расчетчик предъявляет специальные требования, он может их реализовать. Но для использования ПК с открытым

исходным кодом к пользователю предъявляются повышенные квалификационные требования, в противном случае увеличивается время получения результатов. В таком случае лучше применять коммерческие ПК.

2. ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ СВЯЗНЫХ ЗАДАЧ

2.1 Программные комплексы с открытым исходным кодом (OpenSourceCodes)

Open FOAM [1]. ПК с открытым исходным кодом для операций с полями (тензорными, скалярными и векторными). Первоначально программа предназначалась для прочностных расчетов, но в результате многолетнего академического и промышленного развития на сегодняшний момент позволяет решать множество различных задач механики сплошных сред (не ограничиваясь ею).

Elmer [2] это ПК для связанного моделирования с открытым исходным кодом, разработанное Computer Science Corporation. Разработка Elmer началась в 1995 году в сотрудничестве с финскими университетами, исследовательскими институтами и промышленностью.

Elmer включает, физические модели гидродинамики, строительной механики, электромагнетизма, теплопередачи и акустики. Они описываются уравнениями в частных производных, которые данный ПК решает методом конечных элементов.

PALM [3] (Projet d'Assimilation par Logiciel Multimethodes). В рамках PALM приложения разбиты на элементарные компоненты, которые могут обмениваться данными через Message passing interface. Основными особенностями PALM являются динамический запуск связанных компонентов, полная независимость компонентов от алгоритма приложения, параллельный обмен данными с перераспределением и отделение физики от алгебраических манипуляций, выполняемых с помощью набора инструментов алгебры PALM.



Рис. 2.1. ПК с открытым исходным кодом

2.2. Коммерческие программные комплексы (Commercial Codes)

LS-DYNA [4] основанная в 1987 году со штаб-квартирой в Ливермор, Калифорния, LSTC является ведущим поставщиком явной динамики и других

передовых технологий анализа методом конечных элементов. Широко распространенное решение LSTC, LS-DYNA, многофункциональный решатель с высокой степенью масштабируемости, точно предсказывает и моделирует сложные реальные проблемы для автомобильной, аэрокосмической, гражданской, оборонной, производственной и биомедицинской отраслей и других.

Одна из основных задач решателя - не только решить уравнения Навье-Стокса, но и решить полностью связанную задачу FSI, в которой структурной частью может быть любая лагранжевая модель LS-DYNA. Поэтому постановка прочностной задачи выполняется так же, как и для классического анализа LS-DYNA. Все границы FSI являются лагранжевыми и деформируются вместе со структурой, допускающей точное наложение граничных условий. Могут быть активированы как структурные явные, так и неявные решатели. Для анализа FSI доступны три направления связи:

- Двусторонняя связь. Нагрузки и смещения передаются через интерфейс FSI, решается нелинейная задача.
- Односторонняя связь. Статический решатель передает перемещения гидродинамическому решателю.
- Односторонняя связь. Гидродинамический решатель передает напряжения статическому решателю.

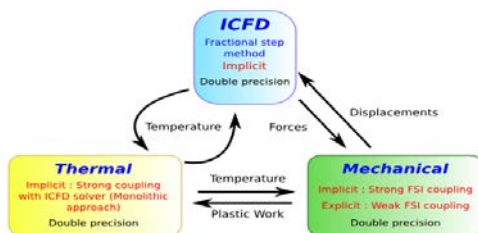


Рис. 2.2. Схема сопряжения дисциплин в LS-Dyna

Abaqus [5] предоставляет встроенные процедуры для решения связанных задач. Для задач, для которых Abaqus не предоставляет встроенную процедуру решения или где процедура решения ограничена по функциональности, можно использовать метод совместного моделирования, например, для моделирования взаимодействия жидкости и конструкции в сочетании с программой анализа вычислительной гидродинамики, ComputerFluidDynamics (далее – CFD). Взаимодействие может быть тепловым, механическим или и тем, и другим и может быть постоянным или переходным. Многие важные проблемы связаны с той или иной формой FSI, но эффект сопряжения часто игнорируется из-за отсутствия легкодоступной технологии решения.

Dytran [6] - это решение для явного анализа методом конечных элементов для моделирования кратковременных событий, таких как удар и авария, а также для анализа сложного нелинейного поведения, которому конструкции подвергаются во время этих событий.

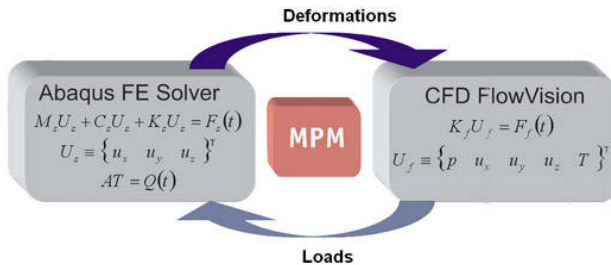


Рис. 2.2. Схема сопряжения дисциплин в Abaqus

В Dytran доступны как лагранжевые, так и эйлеровы решатели, позволяющие моделировать структуры и жидкости в одной модели и моделировать взаимодействие между ними. Взаимодействие между жидкостями и структурами достигается за счет поверхности связи, созданной на конструкциях (лагранжева область).

Dytran предоставляет возможности структурного анализа, анализа потоков материалов и комбинированного анализа FSI в одном пакете. Dytran использует уникальную функцию сопряжения, которая позволяет проводить комплексный анализ структурных компонентов с жидкостями и сильно деформированными материалами в одном непрерывном моделировании.

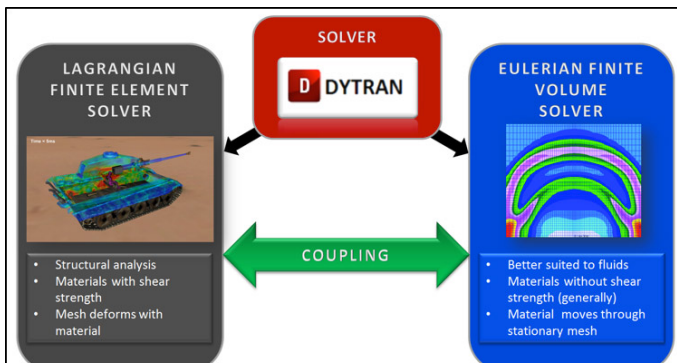


Рис. 2.3. Схема сопряжения дисциплин в Dytran

ADINA [7] предлагает возможности полного взаимодействия жидкости и конструкции в единой программе. Исследуемый объект может подвергаться сильно нелинейному отклику из-за больших деформаций, неупругости, контакта и зависимости от температуры. Полностью связанное взаимодействие жидкости и конструкции означает, что реакция твердого тела сильно зависит от реакции жидкости, и наоборот.

Взаимодействие жидкости и конструкции происходит, когда поток жидкости вызывает деформацию конструкции. Эта деформация изменяет граничные условия течения жидкости.

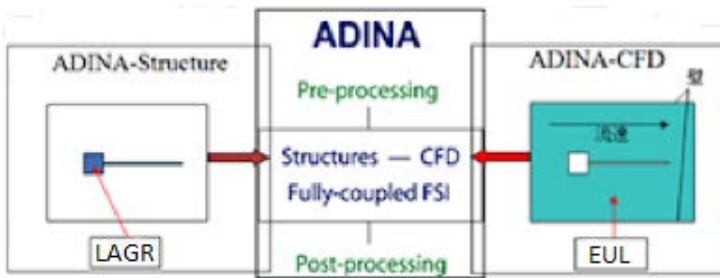


Рис. 2.4. Схема сопряжение дисциплин в Adina

ANSYS [8] предлагает ряд решений для всех проблем взаимодействия жидкости и конструкции, с которыми можно столкнуться, чтобы обеспечить необходимый уровень точности.

У Ansys есть автоматизированное, простое в использовании решение, называемое односторонней связью. Одностороннее сопряжение решает исходное моделирование CFD или ANSYS Mechanical и автоматически передает и отображает данные в другую систему.

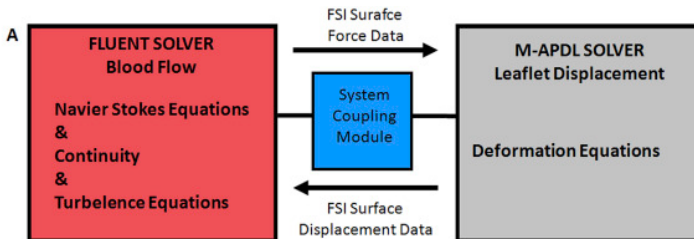


Рис. 2.5. Схема сопряжения дисциплин в ANSYS

Для наиболее сложных и тесно связанных проблем взаимодействия жидкости и конструкции можно использовать System Coupling для выполнения двухстороннего моделирования FSI. Оба решателя настраиваются и решаются одновременно. Во время решения данные автоматически передаются между двумя решателями для получения точных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преимущества:

1. Возможность учета динамического воздействия жидкости на конструкцию, что позволяет получить достоверные результаты при моделировании.
2. Снижение временных и материальных затрат.
3. Отсутствие необходимости изготовления прототипов в металле.
4. Возможность доработки конструкции на стадии проектирования.

Недостатки:

1. Высокая наукоемкость.
2. Повышенные требования к квалификации работников.
3. Вероятность внесения ошибок в компьютерную модель и как следствие результаты не соответствующие действительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. OpenCFD Ltd official website [Electronic resource]. – Mode of access: <https://openfoam.com/> Date of access : 14.05.2020.
2. CSC – IT Center for Science (CSC) [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.csc.fi/web/elmer/> Date of access : 14.05.2020.
3. Florent Duchaine official website [Electronic resource]. – Mode of access: https://www.cerfacs.fr/globc/PALM_WEB/index.html/ Date of access : 14.05.2020.
4. Livermore software technology official website [Electronic resource]. – Mode of access: <http://lsc.com/> Date of access : 14.05.2020.
5. Dassault Systemes [Electronic resource]. – Mode of access: [https://www.3ds.com\](https://www.3ds.com/) Date of access : 14.05.2020.
6. MSC software official website [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.mssoftware.com/> Date of access : 14.05.2020.
7. ADINA R&D, Inc. official website [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.adina.com/index.shtml/> Date of access : 14.05.2020.
8. ANSYS Inc. official website [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ansys.com/products/platform/multiphysics-simulation/fluid-structure-interaction/> Date of access : 14.05.2020.