

1. ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

Методы решения инженерных задач

Представим решение типовой инженерной задачи. Необходимо спроектировать некий объект (механизм). Как эта задача может быть решена? Независимо от используемых инструментов, процесс создания технических объектов носит итерационный характер и состоит из трех основных этапов:

- создание объекта;
- анализ процессов, происходящих в объекте;
- принятие решения о изменении.

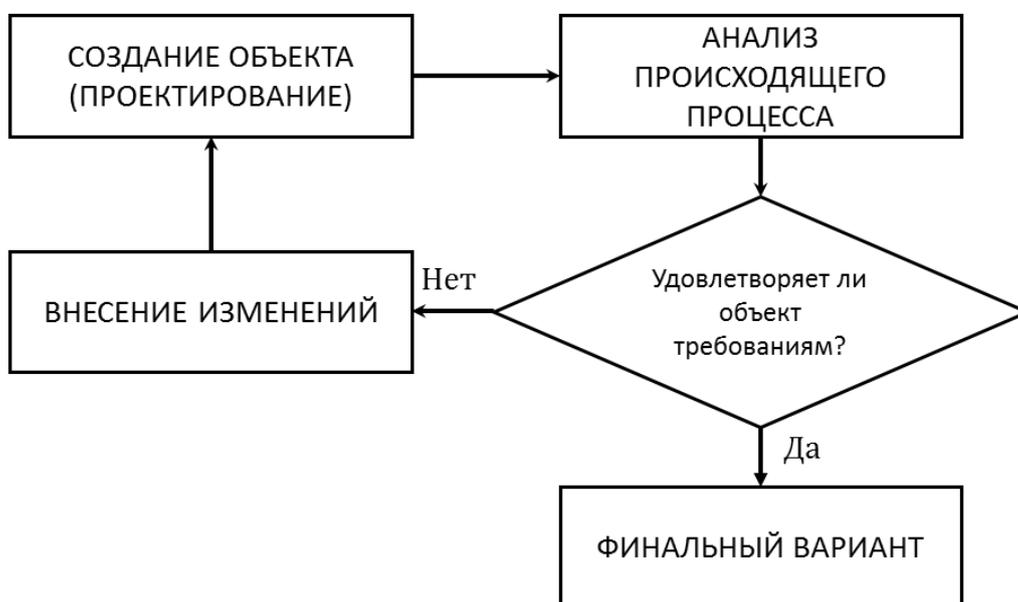


Рисунок 1.1 – Типовая схема проектирования технического объекта

Ключевым вопросом в этой схеме является способ анализа происходящего процесса. Действительно, если инструмент анализа упрощен, то проектировщик не сможет получить необходимого объема данных для принятия верного проектного решения (будет выбран не оптимальный, либо «не проходной вариант»). С другой стороны, инструмент должен быть там, чтобы позволять получать решения в разумные сроки. Малое время решения позволит рассмотреть большее число вариантов (комбинаций исходных данных) за тот же период времени, что позволит с большей вероятностью спроектировать наилучший объект.

Среди всего множества способов анализа результатов проектирования принципиально можно выделить 3 принципиальных способа:

- Экспериментальное исследование – изучение происходящих процессов в ходе проведения эксперимента, в ходе которого прямо или косвенно измеряются физические величины.
- Аналитическое решение – изучение происходящих процессов в ходе расчета на базе аналитических решений (решений по относительно простым аналитическим формулам), чаще всего представляющим собой запись различных законов сохранения.
- Численное решение - изучение происходящих процессов в ходе расчета дифференциальных уравнений, описывающих происходящие процессы. Эти уравнения как правило выводятся на основе методов изучения сплошной среды.



Рисунок 1.2 – Способы получения информации о происходящем процессе

Возможные методы условно можно разделить на 2 группы – экспериментальные и расчетные. Экспериментальные методы изучают реальность. В расчетных методах реальность заменяется математической моделью, которая затем изучается. Математическая модель — это математическое представление реальности [5].

Для большинства целей жидкость можно рассматривать как континуум, а ее динамика описывается законами сохранения, выраженными в форме дифференциальных уравнений в частных производных (УЧП) или, когда они сформулированы для небольшого, но конечного объема жидкости, в виде

интегральных уравнений, В CFD эти уравнения моделирования дискретизируются на вычислительной сетке, что приводит к аппроксимации конечных разностей, конечного объема или конечных элементов.

Сравнение особенностей разных способов получения информации приведено в Таблица 1.1.

Таблица 1.1 – Сравнение характеристик разных способов анализа происходящих процессов

	Эксперимент	Численное решение	Аналитическое решение
Суть	Эксперимент является самым достоверным способом изучения происходящих процессов, поскольку в нем исследователь наблюдает с помощью приборов за реально происходящим процессом	Численное решение – это решение численными методами дифференциальных физических уравнений, которые описывают физические явления. Эти уравнения сложнее аналитических, но при их выводе сделаны меньшие допущения, чем при выводе аналитических формул. Базируются на допущение о сплошности	Аналитические решения получаются в результате решения уравнений, которые описывают физические явления. Как правило, это относительно простые аналитические или эмпирические формулы, которые могут быть подсчитаны с помощью простых вычислительных средств. Хорошо

		<p>среды и полном описании геометрии интересующей области. Хорошо подходят для анализа. На сегодня это самый точный метод расчетного исследования.</p>	<p>подходят для проектных расчетов.</p>
<p>Время получения результата</p>	<p><u>Большое</u> Эксперимент требует большого времени для подготовки, изготовления опытного образца, модернизации оборудования и оснащения всеми средствами измерения. Обработка результатов также требует времени. За определенное время можно рассмотреть только</p>	<p><u>Умеренное</u> Проведение численного исследования требует построения расчетной модели, разбиения ее на конечные элементы и проведения непосредственно расчета. Время одного расчета в зависимости от сложности достигает от нескольких минут, до нескольких суток.</p>	<p><u>Малое</u> Большинство аналитических решений проводятся простыми вычислительными средствами и не требуют больших ресурсов</p>

	малое число вариантов.		
Стоимость проведения	<p><u>Высокая</u></p> <p>Высокая стоимость обуславливается необходимостью:</p> <ul style="list-style-type: none"> – изготовления опытного образца; – иметь специальное лабораторное оборудование – содержать высококвалифицированный персонал – оснащения объекта средствами измерения – энергозатрат на проведение 	<p><u>Умеренное</u></p> <p>Стоимость обуславливается:</p> <ul style="list-style-type: none"> – стоимостью вычислительной техники. – стоимостью лицензий на программное обеспечение. – временем получения решения. – затратами на энергию. – повышенным требованиям к квалификации расчетчика. 	<p><u>Малое</u></p> <p>Из-за малого времени получения решения и низкими требованиями к вычислительной технике затраты малые.</p>

	экспери- мента – большого времени испытаний и обра- ботки дан- ных		
Достовер- ность	<u>Высокая</u> В экспери- менте исследова- тель наблюдает за реальный про- цессом.	<u>Средняя</u> В основе ме- тода лежат урав- нения, которые описывают про- исходящие физи- ческие процессы в соответствии с нашими совре- менными знани- ями. Упрощения минимальны. Геометрия рас- четной области учитывается мак- симально.	<u>Низкая</u> В основе ме- тода лежат урав- нения, которые описывают про- исходящие физи- ческие процессы в соответствии с нашими совре- менными знани- ями. Как правило такие формулы имеют упроще- ния. Геометрия расчетной обла- сти упрощается. Используют эм- пирические зави- симости.
Информатив- ность	<u>Умеренная</u>	<u>Высокая</u>	<u>Умеренная</u>

	<p>Параметры определяются только в тех точках, в которых стоят средства измерения (причем они могут вносить искажение в процесс), либо происходит измерение глобальных параметров. Информация о процессах в других местах определяется косвенно.</p>	<p>В результате можно найти значения всех имеющихся переменных (таких, как скорость, давление, температура, концентрация, интенсивность турбулентности) во всей области решения. В отличие от эксперимента, для расчета доступна практически вся исследуемая область и отсутствуют возмущения процесса, вносимые датчиками при экспериментальном исследовании.</p>	<p>Как правило параметры определяются в контрольных сечениях. Параметры часто осредняются.</p>
<p>Возможность моделирования любых условий</p>	<p><u>нет</u> Не все условия могут быть воспроизведены в ходе реальных</p>	<p><u>да</u> В расчете могут быть воспроизведены все возможные условия</p>	<p><u>да</u> В расчете могут быть воспроизведены все возможные условия</p>

	<p>испытаний. Проблема может быть связана с размерностью процесса (слишком большой или малый) или возможностью имитации условий (посадка спускаемого аппарата в атмосфере другой планеты).</p>		
<p>Необходимость в специальном оборудовании</p>	<p><u>Специальные испытательные станции</u></p> <p>Требуется дорогой и энергоемкий комплекс экспериментального оборудования, для работы на котором требуется высококвалифицированные сотрудники</p>	<p><u>Требуются средства, которые могут быть универсальными</u></p> <p>Требуется мощная вычислительная техника и лицензионное программное обеспечение. Оснащение рабочих помещений.</p>	<p><u>Не требуется</u></p> <p>Для проведения расчетов достаточно обычных ПК, калькуляторов и т.п.</p>
<p>Квалификация персонала</p>	<p><u>Высокая</u></p>	<p><u>Умеренная</u></p> <p>Необходимы знания области</p>	<p><u>Низкая</u></p> <p>Доступно большинству</p>

		моделирования и опыт.	людей с инженер- ным образова- нием
--	--	--------------------------	---

Таким образом наилучшим способом изучения процесса является эксперимент, поскольку именно он позволяет на практике определить реальные свойства проектируемого объекта. Однако его проведение требует больших материальных и временных затрат, что вместе с низкой информативностью и невозможностью воспроизведения всех условий, ограничивает его применение. Стоимость экспериментального исследования сложных систем может на порядок превосходить затраты на расчеты этих систем. Во многих проблемах экспериментальное изучение процесса вообще практически невозможно. Это относится, например, к задачам входа спускаемого аппарата в атмосферы удаленных планет. В этом случае расчетные методы являются единственным инструментом исследования.

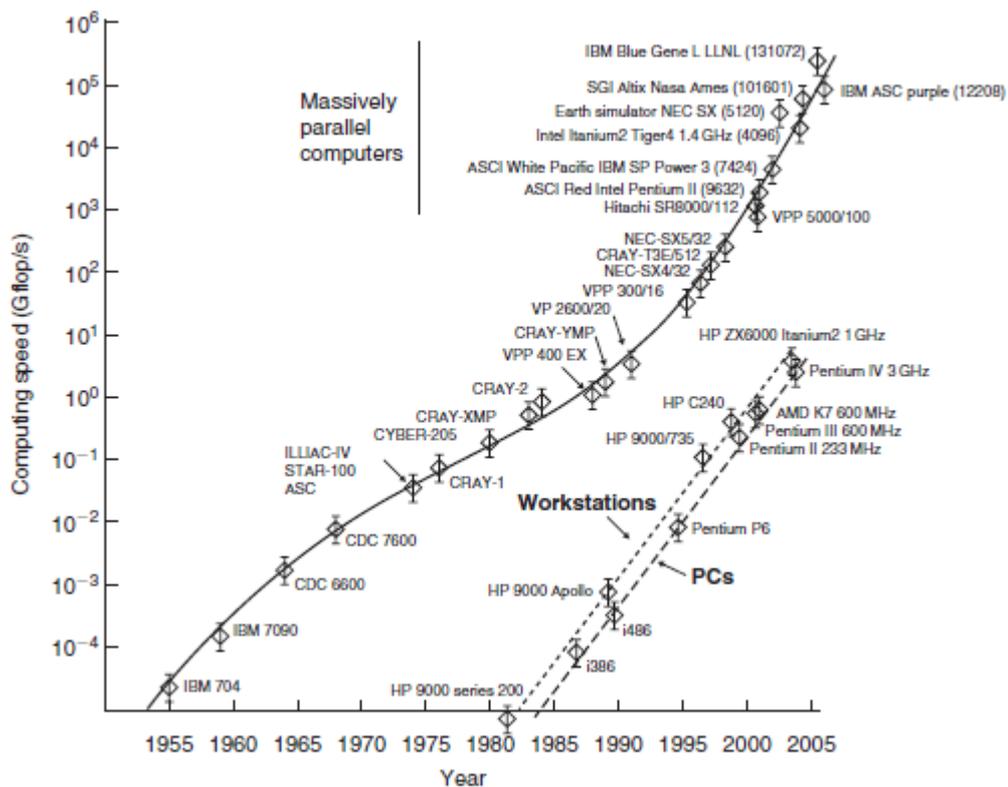


Рисунок 1.3 – Развитие производительности компьютерной техники

Расчет дает больше информации и требует меньше времени и затрат для получения результата. Однако при этом следует помнить, что все расчетные методы это всего лишь решение уравнений, которые как мы думаем отражают наше представление о физике. Основным недостатком расчетных методов исследования является то, что эффективность расчета зависит от степени обоснованности математической модели, в то время как с помощью экспериментального исследования наблюдается сама действительность.

В последнее время в связи с развитием возможностей вычислительной техники появилась возможность решать дифференциальные уравнения механики сплошной среды численными методами. На сегодняшний день это самый точный расчетный метод, поскольку содержит минимальное число допущений и упрощений. За свою точность численные методы иногда называют численным экспериментом или виртуальными испытаниями. Применение численных решений позволяет удешевить и ускорить создание и модернизацию технических устройств технических устройств, автомобилей, самолетов, судов и т.п. Важность численного эксперимента сравнялась с важностью натурального эксперимента.

Методы CFD позволяют пользователю проводить виртуальные эксперименты, которые, по словам П.Л. Роу, были бы «дорогими, сложными или опасными, [или] невозможными» в реальном мире.

Бурное развитие CFD - отрасли позволяет постепенно сокращать затраты на эксперимент. Например, на Рисунок 1.4 показано, насколько сократилось количество экспериментов в аэродинамической трубе при проектировании самолетов компании Боинг [7].

В 1973 году приблизительно от 100 до 200 компьютерных прогонов имитировали потоки вокруг транспортных средств были произведены на Boeing Commercial Airplanes, Сиэтл. В 2002 г. более 20 000 CFD расчетов были доведены до конца.

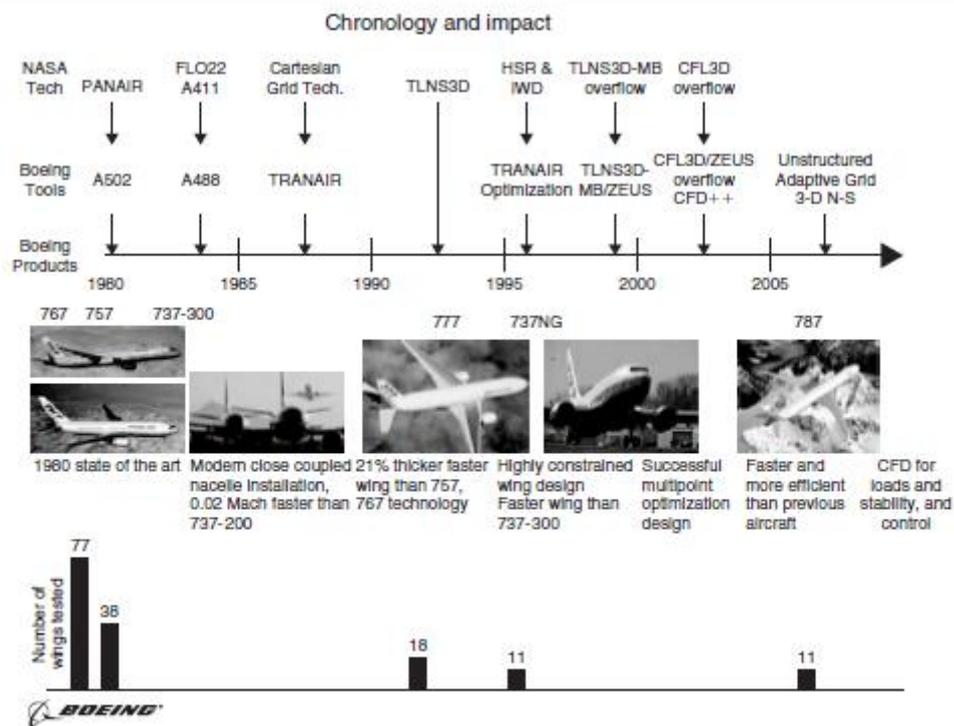


Figure I.1.6a Evolution of the CFD tools over the last 40 years at Boeing, with an indication of the influence of CFD on the reduction of the number of wing tests (for color image refer Plate I.1.6a). Courtesy Enabling Technology and Research Organization, Boeing Commercial Airplanes.

Рисунок 1.4 - Изменение числа испытаний в аэродинамической трубе компании Боинг

С точки зрения построения математической модели имеет смысл разделить все научные проблемы на две категории: проблемы, для которых математическая модель достаточно обоснована, и проблемы, для которых обоснованные математические модели пока не разработаны. Во втором случае требуется экспериментальное обоснование результатов расчета.

В этом курсе мы будем изучать уравнения используемые при численном моделировании физических процессов и методы их решения. Мы сконцентрируемся на численном моделировании гидрогазодинамических процессов (CFD моделировании).

Типичное численное решение поставленной задачи состоит из следующих этапов.

Построение математической модели. В модель включаются следующие элементы:

1. Основная система уравнений. В данном случае она состоит из уравнений неразрывности, количества движения и энергии для сжимаемой жидкости. Вполне возможно, что для решения поставленной задачи этих уравнений будет недостаточно, и их придется дополнить.

2. Дополнительная система уравнений. Как правило, течение является турбулентным, и необходимо дополнить основную систему моделью турбулентности. Несмотря на то, что турбулентностью занимается множество ученых на протяжении многих десятилетий, можно со всей ответственностью сказать, что универсальной теории турбулентности не существует. Поэтому выбор модели, соответствующей конкретной задаче, требует большого искусства от исследователя.

3. Физические свойства веществ, используемых в задаче. В рассматриваемом случае это отнюдь не тривиальная задача, особенно если необходимо учесть переменность состава продуктов сгорания при течении.

4. Граничные условия.

5. Создание численной схемы. При использовании численных методов мы заменяем непрерывные функции, входящие в дифференциальные уравнения, дискретными значениями в некоторых узловых точках. Вместо решения сложной системы дифференциальных уравнений мы решаем алгебраические уравнения, которые называются дискретным аналогом исходной системы. Эти уравнения включают неизвестные значения интересующих нас функций

(давления, температуры, концентраций и т.д.) в выбранных узловых точках. Совокупность узловых точек называется расчетной (вычислительной) сеткой.

б. Численное моделирование поставленной задачи состоит из следующих этапов:

а. Построение расчетной сетки.

б. Дискретизация исходной системы дифференциальных уравнений на расчетную сетку.

в. Решение системы алгебраических уравнений, входящих в дискретный аналог исходной системы.

г. Анализ полученных результатов.

Трудно сказать заранее, какой из этапов самый сложный, но можно утверждать, что наиболее трудоемким и протяженным по времени является третий этап.

Коды CFD построены вокруг численных алгоритмов, которые могут решать проблемы потока жидкости. Чтобы обеспечить легкий доступ к их возможностям решения, все коммерческие пакеты CFD включают сложные пользовательские интерфейсы для ввода параметров задачи и проверки результатов. Следовательно, все коды содержат три основных элемента: (i) препроцессор, (ii) решатель и (iii) постпроцессор. Мы кратко рассмотрим функцию каждого из этих элементов в контексте кода CFD.

Предварительно процессор

Предварительная обработка состоит из ввода задачи потока в программу CFD с помощью удобного для оператора интерфейса и последующего преобразования этого ввода в форму, подходящую для использования решателем. Действия пользователя на этапе предварительной обработки включают:

- Определение геометрии интересующей области: расчетная область
- Генерация сетки - разделение домена на ряд меньших, неперекрывающихся подобластей: сетка (или сетка) ячеек (или контрольных объемов или элементов)

- Выбор физических и химических явлений, которые необходимо моделировать.
- Определение свойств жидкости
- Определение соответствующих граничных условий в ячейках, которые совпадают с границей домена или касаются ее.

Решение проблемы потока (скорость, давление, температура и т. Д.) Определяется в узлах внутри каждой ячейки. Точность решения CFD зависит от количества ячеек в сетке. В целом, чем больше количество ячеек, тем выше точность решения. Как точность решения, так и его стоимость с точки зрения необходимого компьютерного оборудования и времени расчета зависят от тонкости сетки. Оптимальные сетки часто неоднородны: более мелкие в областях, где большие изменения происходят от точки к точке, и более грубые в областях с относительно небольшими изменениями. В настоящее время предпринимаются усилия по разработке кодов CFD с возможностью (само) адаптивного построения сетки. В конечном итоге такие программы будут автоматически уточнять сетку в областях с быстрыми изменениями. Еще предстоит проделать значительный объем базовых разработок, прежде чем эти методы станут достаточно надежными для включения в коммерческие коды CFD. В настоящее время все еще зависит от навыков пользователя CFD, чтобы спроектировать сетку, которая является подходящим компромиссом между желаемой точностью и стоимостью решения.

Более 50% времени, затрачиваемого в промышленности на проект CFD, посвящено определению геометрии домена и генерации сетки. Чтобы максимизировать производительность персонала CFD, все основные коды теперь включают в себя собственный интерфейс в стиле САПР и / или средства для импорта данных из запатентованных моделей поверхности и генераторов сеток, таких как PATRAN и I-DEAS. Современные препроцессоры также предоставляют пользователю доступ к библиотекам свойств материалов для обычных жидкостей и возможность вызывать специальные физические и химические модели процессов (например, модели турбулентности, радиационный

теплоперенос, модели горения) наряду с основными уравнениями потока жидкости. ,

Существует три различных потока методов численного решения: методы конечных разностей, методы конечных элементов и спектральные методы. Мы будем заниматься исключительно методом конечных объемов, специальной формулировкой конечных разностей, которая является центральной для наиболее хорошо зарекомендовавших себя кодов CFD: CFX / ANSYS, FLUENT, PHOENICS и STAR-CD. В общих чертах численный алгоритм состоит из следующих шагов:

- Интегрирование основных уравнений потока жидкости по всем (конечным) контрольным объемам области
- Дискретизация - преобразование полученных интегральных уравнений в систему алгебраических уравнений.
- Решение алгебраических уравнений итерационным методом.

Первый шаг - интегрирование контрольного объема - отличает метод конечных объемов от всех других методов CFD. Результирующие утверждения выражают (точное) сохранение соответствующих свойств для каждой ячейки конечного размера. Эта четкая взаимосвязь между численным алгоритмом и лежащим в его основе физическим принципом сохранения образует одну из главных достопримечательностей метода конечных объемов и делает его концепции намного более простыми для понимания инженерами, чем методы конечных элементов и спектральные методы. Сохранение общей переменной потока ϕ , например компонент скорости или энтальпия в пределах конечного контрольного объема может быть выражена как баланс между различными процессами, имеющими тенденцию увеличивать или уменьшать ее. На словах у нас есть:

Коды CFD содержат методы дискретизации, подходящие для обработки ключевых явлений переноса, конвекции (перенос из-за потока жидкости) и диффузии (перенос из-за вариаций ϕ от точки к точке), а также для исходных условий (связанных с созданием или разрушением ϕ) и скорость изменения во

времени. Основные физические явления сложны и нелинейны, поэтому требуется итеративный подход к решению. Наиболее популярные процедуры решения - это построчный решатель алгебраических уравнений TDMA (трехдиагональный матричный алгоритм) и алгоритм SIMPLE для обеспечения правильной связи между давлением и скоростью. Коммерческие коды могут также предоставить пользователю выбор дополнительных, более современных методов, таких как итерационные методы Гаусса-Зейделя с использованием многосеточных ускорителей и методы сопряженных градиентов.

Пост-процессор

Как и в случае с предварительной обработкой, в последнее время был проведен огромный объем опытно-конструкторских работ в области постобработки. В связи с ростом популярности инженерных рабочих станций, многие из которых обладают выдающимися графическими возможностями, ведущие пакеты CFD теперь оснащены универсальными инструментами визуализации данных. Это включает:

- Геометрия домена и отображение сетки
- Векторные графики
- Линейные и закрашенные контурные графики
- 2D и 3D графики поверхности
- Отслеживание частиц
- Просмотр манипуляций (перемещение, вращение, масштабирование и т.

Д.)

- Цветной вывод PostScript

В последнее время эти средства могут также включать в себя анимацию для динамического отображения результатов, и в дополнение к графике все коды производят надежный буквенно-цифровой вывод и имеют средства экспорта данных для дальнейших манипуляций вне кода. Как и во многих других отраслях CAE, возможности вывода графики в кодах CFD произвели революцию в передаче идей неспециалистам.

В математическую модель входят сложные дифференциальные уравнения в частных производных, которые, как правило, решаются численными методами. Существует очень большое количество численных методов решения задач динамики жидкости. Мы должны быть уверены, что численная схема соответствует выбранной математической модели. Численная схема должна с достаточной точностью аппроксимировать исходную систему уравнений, и ее решение должно устойчиво сходиться.

Таким образом, для доказательства достоверности необходимо:

1) обосновать используемую математическую модель, а если математическая модель недостаточно обоснована, необходимо четко сформулировать все используемые гипотезы;

2) обосновать выбранную численную схему, доказать устойчивость и аппроксимацию;

3) при анализе полученных результатов, во-первых, всесторонне исследовать сходимость решения, во-вторых, проверить использованные в математической модели гипотезы путем сопоставления с экспериментальными данными и другими расчетами.

К. Гастингса, написанного еще до появления информационных технологий в 1955 году: «Цель вычислений - это понимание, а не числа ». Основная идея справедливо предостерегает. Мы должны быть уверены, что основным результатом любого упражнения CFD будет лучшее понимание поведения системы, но поскольку нет чугунных гарантий в отношении точности моделирования, нам нужно часто проверять наши результаты и строго.

[История CFD](#)

Первые попытки математически описать движение жидкости появились еще в 18-ом веке и связаны с работами Бернулли и Эйлера. Но, пожалуй, самый большой вклад в этой области внесли Клод Навье и Джордж Стокс,

описав математически движение вязкой жидкости, а также, Осборн Рейнольдс, внесший весомый вклад в изучение турбулентности [7].

В 1922 году Льюис Ричардсон разработал на основе численного метода первую систему по предсказанию погоды, использовав разбиение пространства на ячейки с последующей конечно - разностной аппроксимацией дифференциальных уравнений Бьеркнеса. В период 30 – 50х годов 20 - го века появляются первые работы по численному решению задачи обтекания цилиндра, ныне являющейся классической задачей в механики жидкости и газа [7].

Вычислительная гидродинамика (CFD) зародилась во время Второй мировой войны, когда ученые из Лос-Аламосской национальной лаборатории разрабатывали не только атомную бомбу, но и числовые инструменты для описания сильного потока, создаваемого таким устройством. Среди них был математик Дж. Фон Нейман, который внес ключевой метод искусственной вязкости для «улавливания» ударов в численных решениях и считается отцом CFD. Его метод немедленно бросил вызов самым первым в мире программируемым электронным компьютерам [11].

Исторически CFD зародилось и развивалось в сфере ядерного оружия. Однако, полученный опыт использовался и в других областях. В первую очередь в аэрокосмической отрасли. Изначально она в этом вопросе была догоняющей. Однако уже в 1980 годы аэрокосмическая отрасль стала основным местом применения CFD и драйвером развития.

В СССР работы математика С.К. Годунов разработал метод для расчета сжимаемого потока (Годунов, 1959), после которого моделируются самые современные методы конечного объема и разрывные методы Галеркина (конечных элементов).

Наиболее интенсивное развитие вычислительной Гидродинамики начинается с 60 - х годов 20 - го века. В 60 – 70 -е годы появляются все новые и новые численные методы (Particle - In – Cell , Arbitrary Lagrangian – Eulerian , k-ε turbulence model , SIMPLE algorithm). Некоторые из них используются и по сей день. Параллельно, с 60 - х годов начинают расти вычислительные мощности.

Появляются новые, более мощные компьютеры. Например, производительность компьютеров, измеряемая во флопсах (FLOPS - количество операций с плавающей запятой в секунду), в период с 70 - х по 2009 - й увеличивается с одного мегафлопса до одного гигафлопса. Такой рост производительности компьютеров не мог не повлиять на динамику развития CFD . Как следствие в 80 - 90 - х годах появляются первые коммерческие CFD - программы (Fluent , CFX , STAR - CD , Flow 3 d , Phoenix и др.) [7].

Алгоритм SIMPLE был разработан в начале 1970 годов Брайаном Сполдингом и его студентом Сухасом Патанкар, работавшими в Имперском колледже Лондона. С тех пор он использовался во множестве работ для решения различных задач гидродинамики и теплопереноса и послужил основой для развития целого класса численных методов.

В 1979 году Патанкар предложил модифицированный вариант алгоритма, получивший название *SIMPLER* (SIMPLE Revised). Другие усовершенствования алгоритма (используются, например, в ANSYS Fluent) — методы PISO (Pressure implicit with splitting of operators) и SIMPLE-C (SIMPLE-Consistent) [7].

Первые попытки применения методов конечных разностей для решения дифференциальных уравнений относятся к 1910 годам. При этом эти методы считались инструментом математических исследований.

Первые работы посвященные численному решению задач гидрогазодинамики относятся к 1930...1940. Это направление возникло на стыке механики жидкости и газа и вычислительной математике и получило название «Вычислительная гидрогазодинамика CFD» [2].

В 1950...1960 годах появились и стали развиваться мощные ЭВМ. Они стали применяться при решении задач ГГД в первую очередь в аэрокосмических задачах [2].

1970...1990 бурное развитие ЭВМ и внедрение численных методов ГГД в деятельность конструкторских бюро и проектных организаций [2]. Интенсивное развитие численных методов газовой динамики.

1990 – появление и развитие большого числа универсальных и прикладных программ, широко применяемых сегодня в работе инженеров.

2000 – развитие вычислительной техники сделало возможным параллельные вычисления.

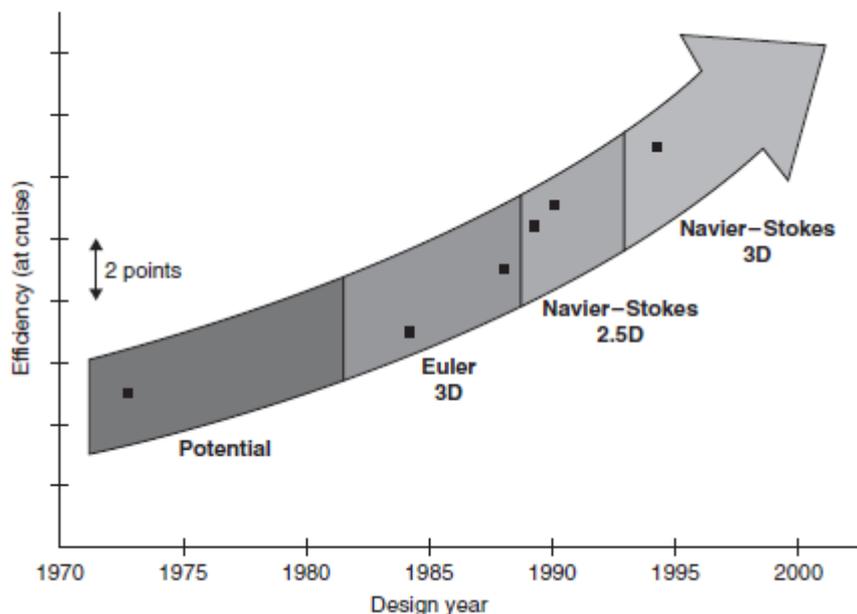


Рисунок 1.5 [12]

Перечень программ

Развитие возможностей вычислительной техники, совершенствование методов численного моделирования позволило создать мощные прикладные программные системы инженерного анализа. Сейчас такие программные комплексы (STAR - CCM +, ANSYS , Flow Vision) стали инструментом современного инженера при решении задач, связанных с разработкой и созданием высокотехнологичных изделий. Но владение навыками работы с такими инструментами требуют от инженеров знания и глубокого понимания процессов, которые стоят за работой этих программных комплексов [7].

[Заключение по разделу](#)

Успешное применение CFD программ требует определенного уровня знаний в области методов вычислительной гидродинамики, понимания свойств и возможностей нового инструмента, способов управления его свойствами [2]. Существующие в настоящее время учебники по CFD предназначены для

студентов с глубокой математической подготовкой, которые могут выступать в роли разработчиков схем и алгоритмов. Данное пособие предназначено для студентов технических специальностей и ставит цель познакомить с основными принципами формирования численных методов, алгоритмов их реализации, свойствами получаемых решений и способами управления свойствами. Наличие таких знаний необходимо для успешного применения современных программ численного моделирования, проведения вычислительного эксперимента и интерпретации результатов расчета [2].

Численные методы позволяют найти только частные решения, отвечающие заданным начальным и граничным условиям.

Надежность вычисленных потоков можно оценить только в условиях, для которых экспериментальные и / или теоретические результаты доступны для сравнения. Стандартная практика состоит в том, чтобы, по крайней мере, выполнять те же вычисления на последовательности сеток с возрастающим разрешением; такое «исследование сходимости» дает представление о близости точного решения к PDE, моделирующим физику потока. Но ошибки моделирования остаются, в то время как, с другой стороны, эксперименты, используемые для сравнения, имеют свои собственные неопределенности в условиях установки и измерений.

При таком большом количестве симуляций потоков растет потребность и спрос на методы измерения и прогнозирования надежности вычисленных решений и вычислительных методов. Отсюда текущий бум в областях валидации и верификации (V&V) и количественной оценки неопределенности (UQ) (см. «Проверка и валидация экспериментов с турбулентными потоками на основе CFD»).

Разработчики методов CFD создают виртуальную реальность, которую пользователи могут заполнять чем угодно, независимо от масштаба.

Компьютер может хранить и обрабатывать только конечное количество информации; таким образом, решения PDE должны быть представлены ограниченными данными. Для этой цели мы обычно разделяем пространственно-

временной континуум на небольшие области (сетки или ячейки) с помощью вычислительной сети или сетки.

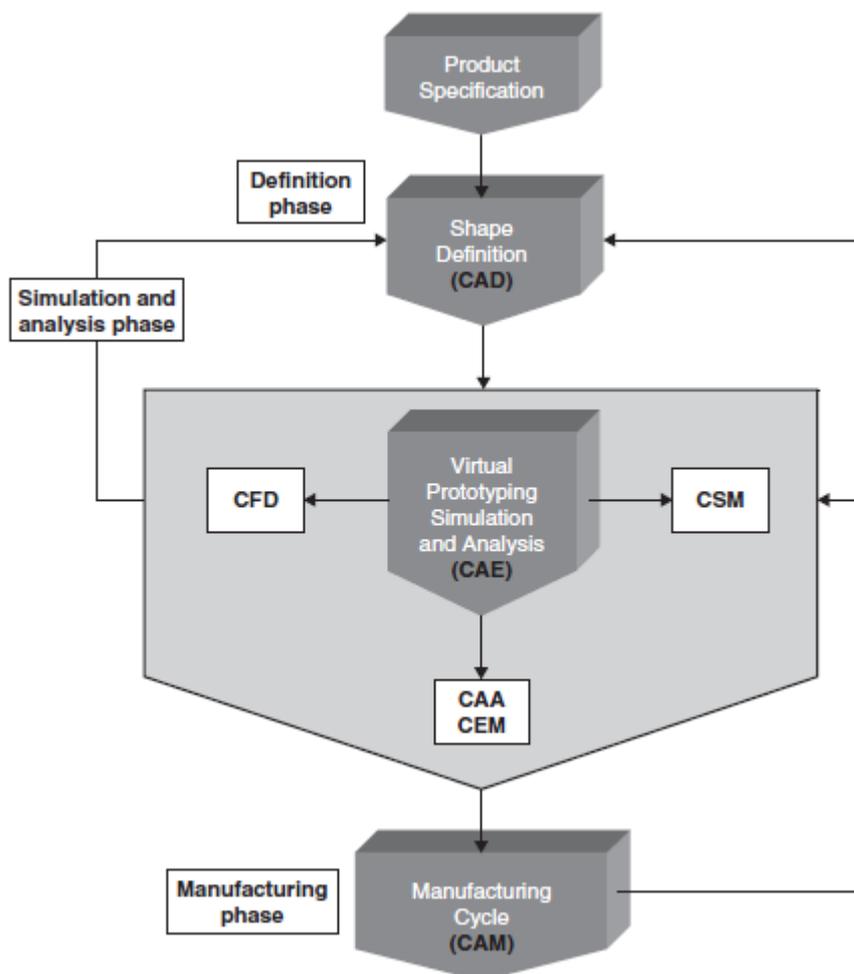


Рисунок 1.6 – Место CFD в современной последовательности создания продукта [12]

Теперь признано, что CFD обеспечивают значительную ценность и создали смену парадигмы в дизайне, анализе и поддержке транспортных средств.

Вычислительная гидродинамика или CFD - это анализ систем, включающих поток жидкости, теплопередачу и связанные явления, такие как химические реакции, посредством компьютерного моделирования. Этот метод очень мощный и охватывает широкий спектр промышленных и непромышленных областей применения. Вот несколько примеров:

- аэродинамика самолетов и транспортных средств: подъемная сила и сопротивление.

- гидродинамика судов
- силовая установка: сгорание в двигателях внутреннего сгорания и газовых турбинах
- турбомашинное оборудование: потоки во вращающихся каналах, диффузорах и т. Д.
- электротехника и электроника: охлаждение оборудования, включая микросхемы.
- химическая технология: смешивание и разделение, формование полимеров
- внешняя и внутренняя среда зданий: ветровая нагрузка и отопление / вентиляция.
- морская техника: нагрузки на морские сооружения
- экологическая инженерия: распределение загрязняющих веществ и стоков
- гидрология и океанография: потоки в реках, эстуариях, океанах
- метеорология: прогноз погоды
- биомедицинская инженерия: кровь течет по артериям и венам

С 1960-х годов аэрокосмическая промышленность интегрировала методы CFD в разработку, исследования и разработки и производство самолетов и реактивных двигателей. В последнее время эти методы стали применяться для проектирования двигателей внутреннего сгорания, камер сгорания газовых турбин и печей. Кроме того, производители автомобилей теперь регулярно прогнозируют силы сопротивления, потоки воздуха под капотом и условия в автомобиле с помощью CFD. CFD становится все более важным компонентом в разработке промышленных продуктов и процессов.

Конечная цель разработок в области CFD - обеспечить возможности, сопоставимые с другими инструментами CAE (автоматизированного проектирования), такими как коды анализа напряжений. Основная причина отставания CFD - это огромная сложность лежащего в основе поведения, которая не позволяет описать потоки жидкости, которое в то же время является

экономичным и достаточно полным. Доступность доступного высокопроизводительного компьютерного оборудования и введение удобных интерфейсов привели к недавнему всплеску интереса, и CFD вошла в более широкое промышленное сообщество с 1990-х годов.

В зависимости от взаимного расположения потока жидкости и обтекаемого тела они разделяются на внешние и внутренние [9].

Внешняя задача рассматривает твердое тело, обтекаемое потоком снаружи (вокруг). Пример обтекание крыла самолета [9].

Внутренняя задача рассматривает движение потока в трубах и внутренних каналах, где стенки канала ограничивают поток снаружи [9].

Иногда задачи сложно разделить на внешние и внутренние. Это не всегда является минусом, поскольку позволяет при решении применять методы, адаптированные для всех классов задач [9].

Если при постановке задачи известны форма и размеры обтекаемого тела и требуется определить параметры потока – такая задача называется прямой [9].

Если заданы параметры потока и требуется определить геометрические размеры и форму обтекаемого тела – такая задача называется обратной [9].

Каждый класс задач имеет свои особенности, хотя они используют одни и те же уравнения [9].

Рабочее тело – движущаяся материальная среда (**сплошность**) (жидкая или газообразная) которая служит посредником при превращении тепла в механическую работу или при передаче энергии из одного места в другое [9]. Наиболее часто применяется вода, воздух, продукты сгорания керосина, водяной пар, масло.

Для описания свойств жидкости применяется модель жидкости – воображаемая жидкость, отличающаяся от реальной тем, что лишена некоторых своих реальных свойств [9].

Жидкость – сплошная среда. Объем жидкости можно дробить на какие угодно мелкие части вплоть до самых мелких, но при этом ее основные свойства не меняются. Молекулярное строение вещества не отрицается, но не берется во внимание. Данное допущение вызвано необходимостью применения

методов матанализа, которые оперируют бесконечно малыми величинами. Такая модель не применима для очень разреженных газов [9].

Под термином "жидкость" понимается среда, обладающая текучестью. Такая среда может быть несжимаемой (например, вода) и сжимаемой (например, воздух, любой газ). сжимаемые жидкости часто называют капельными. Несжимаемая жидкость – жидкость, не меняющая объема (плотности) при изменении давления [9]. Кроме того, если параметры состояния газа практически не меняются, его поведение ничем не отличается от поведения капельной жидкости и поэтому такой газ можно считать несжимаемым. Наряду с этим в механике жидкости и газа используются такие понятия как вязкая и невязкая жидкость. При пренебрежении вязкостью в случае капельной жидкости - она считается идеальной. Идеальная жидкость – жидкость, лишенная вязкости [9].

Невесомая жидкость – жидкость, обладающая массой, но не имеющая веса. Применяется в тех случаях, когда сила тяжести существенно меньше остальных сил [9].

Бароклинная жидкость – жидкость, плотность которого зависит от давления и температуры;

Баротропная жидкость – жидкость у которого плотность зависит только от давления [9].

Жидкость, в которой связь напряжений и скорости деформации линейна – называется ньютоновской. Она подчиняется закону трения Стокса.

Жидкость называется изотропной, если связь между составляющими напряженного состояния и скорости одинаковы во всех направлениях. В противном случае жидкость анизотропна.

Идеальный газ — математическая модель газа, в которой предполагается, что потенциальной энергией молекул можно пренебречь по сравнению с их кинетической энергией. Между молекулами не действуют силы притяжения или отталкивания, соударения частиц между собой и со стенками сосуда абсолютно упруги, а время взаимодействия между молекулами пренебрежимо мало по сравнению со средним временем между столкновениями [5].

В случае газа есть небольшая тонкость, связанная с расхождением в понятиях. Под понятием идеальный газ в аэромеханике и газовой динамике понимается невязкий газ. А вязкий газ, подчиняющийся закону Клайперона - Менделеева, называется совершенным. В термодинамике, например, совершенный газ называют идеальным [9].

Совершенный газ – газ, в котором силы сцепления между молекулами отсутствуют и собственный объем молекул равен нулю. Совершенный газ – лишенный вязкости – идеальный газ [9].

При исследовании законов движения этих сред в механике жидкости и газа "забывают" о дискретной молекулярной структуре и рассматривают их в рамках гипотезы сплошности. Суть этой гипотезы заключается в том, что жидкость, газ или деформируемое твердое тело (все, что обладает свойством текучести), представляется средой, способной непрерывно заполнять пространство. А значит характеристики этих сред, такие как плотность, напряжения, скорость изменяются в пространстве также непрерывно. Другими словами, считается, что размеры в любом, сколь угодно малом, объеме жидкости или газа несравнимо больше межмолекулярных расстояний в них. Это позволяет применять к изучению закономерностей движения жидкостей и газов проверенный математический аппарат, основанный на непрерывных функциях [7].

Установившееся движение (стационарное) – движение, при котором параметры потока зависят только от координат рассматриваемой точки и не зависят от времени [9].

Нестационарное движение (неустановившееся) – движение, при котором параметры зависят от не только от координат, но и от времени [9].

В общем случае течение носит трехмерный характер (параметры меняются вдоль всех трех координатных направлений), но возможны допущения 2D и 1D [9]. Также стоит упомянуть осесимметричное течение.