

Введение Численные методы, применяемые для решения задач газовой динамики, по сути, являются инструментом, позволяющим использовать имеющуюся математическую модель - систему Навье-Стокса. Их использование в известном смысле расширило возможности исследователей, для которых стало возможным моделировать поведение жидкости или газа при самых разнообразных условиях, подчас трудно выполнимых и регистрируемых в условиях реального эксперимента. С этой целью создавались программные алгоритмы, которые затем непосредственно использовались для расчетов на компьютерах. Число пользователей на данном этапе ограничивалось узким кругом специалистов, непосредственно занимающихся вычислительной газовой динамикой [1], алгоритмы для проведения математических вычислений в данном случае формулировались непосредственно исследователем и реализовывались программно путем написания отдельных программных модулей [2-4].

Естественным шагом в эволюции численного моделирования динамики жидкости и газа стало создание расчетных пакетов (CFD-пакетов или комплексов), ориентированных на широкую аудиторию пользователей - научных работников, инженеров, учащихся и т. д. Вычислительные комплексы ANSYS

Вычислительные комплексы для проведения расчетов по газовой динамике принято характеризовать по уровню сложности решаемых задач (поддерживаемое число узлов расчетной сетки, степень учета нелинейностей), по количеству моделей поведения жидкостей и газов. На сегодняшний день CFD-пакеты условно делятся на следующие классы: 1. «Тяжелые» - комплексы высокого класса, подходящие как для научных, так и инженерных расчетов, способные решать самые сложные задачи с учетом большого количества эффектов и использованием широкого набора математических подходов, в том числе специфических. К классу «тяжелых» относятся лидеры среди коммерческих CFD-пакетов - ANSYSCFX (ANSYS, Inc.), Star-CD (CD-adapco), FLUENT (ANSYS, Inc. совместно с Fluent, Inc.). Все они содержат большое число моделей турбулентности, способны решать задачи различной сложности с учетом горения, химических реакций, многофазных потоков, поддерживают различные типы сеток и т. д. [5-6]. 2. Среднего класса. Предназначены, главным образом, для расчетов инженерного уровня сложности. Набор используемых моделей также может быть достаточно широким. К этому разряду можно отнести COSMOSFloWorks (SolidWorksCo.), STAR-CCM+ (CD-adapco), ANSYS FLOTRAN (ANSYS, Inc.). 3. «Легкие» - CFD-комплексы, использующие алгоритмы невысокой точности (используются, например, в качестве учебно-методических), либо имеющие узкую направленность расчета (специально созданные под определенную проблематику) [2]. ANSYS-программный пакет конечно элементного анализа, решающий задачи в различных областях инженерной деятельности (прочность конструкций, термодинамика, динамика жидкостей и газов, электромагнетизм), включая связанный междисциплинарный анализ [5].

Пакет ANSYS FLUENT предназначен для моделирования сложных течений жидкостей и газов с широким диапазоном изменения теплофизических свойств посредством обеспечения различных параметров моделирования и использования многосеточных методов с улучшенной сходимостью. Он дает оптимальную эффективность и точность решения для широкого диапазона моделируемых скоростных режимов. Изобилие физических моделей в пакете FLUENT позволяет с хорошей точностью предсказывать ламинарные и турбулентные течения, различные режимы теплопереноса, химические реакции, многофазные потоки и другие явления на основе гибкого построителя сеток и их адаптации к получаемому решению [6]. ANSYSCFX - программный комплекс, предназначенный для расчета задач аэро- и гидродинамики. С 2003 года CFX входит в состав программного комплекса ANSYS (ANSYS CFX). Сочетает анализ гидрогазодинамических процессов, многофазных потоков, химической кинетики, горения, радиационного теплообмена и многих других, расчёт турбомашин. Программа имеет широкий спектр приложений, по основным отраслям: аэрокосмическая, автомобилестроение, судостроение и морская техника, нефтегазовая и химическая, турбомашиностроение, теплотехника, вентиляция и кондиционирование, биомедицинские приложения. Ориентирован на решение наиболее сложных задач вычислительной газовой динамики [7]. Решатель ANSYS CFX использует сетку конечных элементов (числовые значения в узлах сетки), схожую с теми, что используется в анализе прочности, для дискретизации области. В отличие от ANSYS CFX, решатель ANSYS FLUENT использует сетку конечных объемов (числовые значения в центрах ячеек). В итоге оба подхода формируют уравнения для конечных объемов, которые обеспечивают сохранение значений потока, что является необходимым условием для точных решений задач гидрогазодинамики. В ANSYS CFX особый упор сделан на решение основных уравнений движения (сопряженная алгебраическая сетка), а ANSYS FLUENT предлагает несколько подходов к решению (метод на основе плотности, расщепленный метод на основе давления, сопряженный метод на основе давления). Оба решателя содержат в себе самые ценные возможности физического моделирования для получения максимально точных результатов. Программный продукт ANSYS® POLYFLOW® - специализированное программное средство для удовлетворения потребностей перерабатывающей промышленности, например, в задачах обработки полимеров, заполнения форм, высокотемпературного формообразования, производства стекла. В этом модуле можно моделировать потоки жидкостей и газов с очень сложным поведением, как в случае с вязкоупругими жидкостями. Технология ANSYS POLYFLOW предлагает уникальные возможности, например, возможность выполнения обратных расчетов для определения форм штампа для экструзии. Также можно рассчитать конечную толщину стенки в процессах формования давлением [8]. Сопоставление возможностей продуктов ANSYS для задач вычислительной

гидродинамики представлена в таблице 1. Таблица 1 - Возможности продуктов ANSYS

ANSYS	Функциональные возможности	ANSYS_Multiphysics	ANSYS CFD	ANSYS CFD Flow	ANSYS Polyflow	ANSYS Fluent	ANSYS CFX
	Различные граничные условия на входе/выходе	+	+	+	+	+	+
	Стационарные течения	+	+	+	+	+	+
	Нестационарные течения	+	+	+	+	+	+
	Двумерные задачи (отдельный решатель)	+	+				
	Двумерные задачи с использованием тонкого трехмерного сегмента	+	+	+	+	+	+
	Трехмерные задачи	+	+	+	+	+	+
	Изменяемые во времени граничные условия	+	+	+			
	Несжимаемая жидкость	+	+	+	+	+	+
	Сжимаемая жидкость	+	+	+			
	Естественная конвекция	+	+	+	+	+	+
	Модель вентилятора	+	+	+	+		
	Условия периодичности	+	+	+	+	+	+
	Модель пористой среды	+	+	+	+		
	Теплообмен	+	+	+			
	Сопряженный теплообмен	+	+	+	+	+	+
	Неньютоновская вязкость	+	+	+	+	+	+
	Вязкоупругость	+					
	Турбулентность (изотропная)	+	+	+	+		
	Турбулентность (анизотропная/RSM/LES)	+	+	+	+		
	Турбулентность (переходная/SAS/DES)	+	+				
	Вращающиеся машины - множественные вращающиеся системы координат	+	+				
	Динамические/подвижнодеформируемые сетки	+	+	+	+		
	Метод погруженной границы	+	+	+			
	6DOF-решатель	+	+	+			
	Внутреннее излучение с учетом оптических свойств среды	+	+	+	+		
	Внутреннее излучение без учета оптических свойств среды	+	+				
	Внешнее излучение	+	+				
	Солнечное излучение	+					
	Моделирование многокомпонентных сред	+	+	+	+		
	Линии тока частиц (без учета массы)	+	+	+	+		
	Линии тока частиц (с учетом массы)	+	+				
	Связанное моделирование дискретной фазы	+	+				
	Акустика - экспорт источника	+	+	+	+		
	Акустика-моделирование шумов	+					
	Химические реакции	+	+	+			
	Горение	+	+				
	Кавитация	+	+				
	Многофазные задачи в Эйлеровой постановке	+	+				
	Многофазные задачи со свободной поверхностью	+	+	+	+		
	Расчет взаимодействия жидкости с твердым телом	+	+	+	+		
	Встроенные средства оптимизации	+	+				
	Модели экструзии	+					
	Модели формовки	+					
	Специализир. модели непрерывного волокна	+					
	Pressure-based связанный решатель	+	+	+	+		
	Density-based связанный решатель	+					
	Pressure-based отдельный решатель	+					
	Анализ чувствительности	+					
	Распределенные вычисления на локальном ПК	+	+	+	+		
	Пакеты моделирования Autodesk	+	+	+	+		

Autodesk® Simulation CFD имеет широкий набор возможностей для моделирования потоков жидкостей и процессов теплопередачи. С их помощью можно быстро и точно выполнять моделирование турбулентных и несжимаемых потоков, а также теплопроводности и процессов конвективного теплообмена [9].

Технология расчета Accelerant в Autodesk Simulation CFD состоит из нескольких передовых интеллектуальных компонентов, каждый из которых оптимизирован для быстрого и эффективного получения результатов с высокой точностью и надежностью. Метод конечных элементов предоставляет гибкие возможности моделирования любых геометрических форм. Решающий модуль Accelerant базируется на системе решения разреженных матриц Крылова, использующая два уровня предобусловливания. Каждый уровень предобусловливания контролируется допуском на обрезку и строится в процессе факторизации.

После завершения факторизации он используется в петле итеративной конвергенции. Интеллектуальное управление решением задач осуществляется таким образом, что параметры конвергенции и временной шаг подбираются автоматически. Возможность автоматической оценки конвергенции позволяет пользователю точно знать, когда подбор нужного решения будет закончен, благодаря отслеживанию процесса и автоматической остановке моделирования при достижении нужного значения. Моделирование потоков жидкостей и процессов теплопередачи AutodeskSimulation CFD имеет широкий набор возможностей для анализа методами вычислительной гидродинамики. С их помощью можно быстро и точно выполнять моделирование высокоскоростных турбулентных и несжимаемых потоков, а также теплопроводности и процессов конвективного теплообмена. Продукт позволяет изучать поведение жидкостей и газов, движущихся внутри физических объектов и вокруг них. В качестве примеров областей применения можно указать аэродинамику крыла самолета, падение давления в клапане, распределение выхлопных газов в выпускной системе автомобиля и др. Возможности анализа потоков жидкостей в AutodeskSimulation CFD представлены моделями ламинарных, турбулентных, несжимаемых, стационарных потоков, а также случаями вынужденной и естественной конвекции. Сравнение возможностей продуктов AutodeskSimulation CFD для задач вычислительной гидродинамики представлено в таблице 2. STAR-CD и STAR-CCM+ универсальные системы конечно-объемного анализа с пре-/постпроцессором, предназначенные для проведения расчётов в области механики жидкости и газа. Области применения данных пакетов достаточно широки: это расчеты для объектов газо- и нефтедобычи, машиностроения, обрабатывающей и химической промышленности, радиоэлектроники, строительства, транспорта, электротехники и энергетики. Пакеты позволяют решать задачи стационарных и нестационарных течений; ламинарных и турбулентных течения; теплопереноса (конвективный, радиационный, теплопроводность с учетом твердых тел); массопереноса; химических реакций; горения газообразного, жидкого и твердого топлива; распределенное сопротивление; многокомпонентные течения; свободные поверхности [10].

Таблица 2 - Вычислительные возможности Autodesk

Возможности для расчета
гидродинамики потоков Autodesk Simulation CFD
Autodesk Simulation CFD
Advanced Autodesk Simulation CFD Motion
Ламинарный поток
Турбулентный поток
Несжимаемый поток
Дозвуковой поток
Устойчивое (стационар.) состояние
Декартова 2D- и 3D-система координат
Осевая 2D-симметрия
Граничные условия по скорости и давлению
Граничные условия по объемному и массовому расходу
Расчет внешних лопастей с учетом скорости вращения и коэфф.скольжения
Граничные условия по периодичности в пространстве
Начальные условия по скорости и давлению
Сжимаемый поток
Переходные состояния
Двухфазные потоки
Высота столба жидкости
Скалярное смешение двух жидкостей

Сжимаемая жидкость (гидравлический удар) Кавитация STAR-CCM+ отличается простотой в использовании и включает в себя новейшие численные алгоритмы, такие как передовые решатели, последовательный и связанный, с предобуславливанием. Новые мощные средства построения сеток: от восстановления целостности поверхности до создания сеток из многогранных ячеек. Является мощным средством визуализации и управления параметрами моделирования в процессе расчёта, включает большой набор физических моделей: ламинарные и турбулентные течения, ньютоновские и неньютоновские жидкости, многофазные потоки, излучение, горение, развитие пограничного слоя, сопряженный теплообмен. Пакет предназначен для выполнения масштабируемых параллельных вычислений на сколь угодно больших расчётных сетках и позволяет решать относительно простые задачи прочности совместно с газодинамикой [11]. Кроме того, она предоставляет возможности интеграции с другими программными пакетами, что имеет большое значение в современных условиях. Заключение Приведенные в работе результаты обзора и проведенного сопоставления пакетов прикладного программного обеспечения семейства ANSYS, Autodesk® Simulation CFD, STAR-CD, STAR-CCM показывают широчайшие расчетные возможности современных программных средств моделирования, применяемые во многих областях современной науки и промышленности. При всем многообразии существующих программных продуктов важной задачей является грамотный выбор программного пакета, в котором будет производиться расчет. Систематизированные в статье функциональные возможности и особенности рассмотренного программного обеспечения могут служить подобрать пакет, наилучшим образом отвечающий требованиям исследователя.