

СОГЛАСОВАНО

Руководитель ИЦ ПС ФГУП "ОКБМ"

_____Банкрутенко В.В.

"_____" _____2005г.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ООО «ТЕСИС»

_____Курсаков С.Н.

"_____" _____2005г.

“Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision”

(“FlowVision”)

ОКП 50 3000

Технические условия

Москва
2005

Содержание

1 Область применения

2 Общие сведения о FlowVision

2.1. Назначение

2.2. Область применения

2.3 Краткое техническое описание FlowVision

2.4. Структура программных средств

2.4.1 Препроцессор - блок формирования информационной модели исследуемых задач

2.4.2 Процессор - блок решения задач движения жидкости и газа

2.4.3 Постпроцессор - блок, обеспечивающий вывод и визуализацию информации об исследуемых конструкциях на различных этапах решения задачи

2.5. Методы и алгоритмы решения

3 Блок решения задач движения жидкости и газа (процессор)

3.1 Технические требования к характеристикам FlowVision

3.1.1 Требования к составу характеристик ПС

3.1.2 Характеристики идентификации

3.1.3 Требования к функциональным характеристикам. Состав программных компонент, входящих в FlowVision

3.1.4 Требования к характеристикам операционной среды

3.1.5 Требования к характеристикам аппаратных ресурсов

3.1.6 Требования к характеристикам интерфейса пользователя

3.1.7 Требования к общим характеристикам качества

3.1.7.1 Надежность

3.1.7.2 Удобство применения

3.1.7.3 Универсальность

3.1.7.4 Базовые значения общих характеристик качества

3.2 Требования к методам оценки характеристик

3.2.1 Состав объекта испытаний и условия проведения испытаний

3.2.2 Описание методов испытаний

3.2.3 Инструментальные средства, используемые для оценки характеристик системы

3.2.4 Идентификация системы

3.2.5 Оценка функциональных характеристик и потребительских свойств

3.2.6 Методы оценки общих характеристик качества системы

3.3 Требования к представлению результатов испытаний

3.4 Порядок контроля и приемки

3.5 Гарантийные обязательства и услуги

Приложение “FlowVision. Описание тестовых примеров”

Пример 1. Ламинарное течение несжимаемой вязкой жидкости в трубе

Пример 2. Турбулентное течение в прямой гладкой трубе

Пример 3. Турбулентное течение в прямой трубе с равномерно-зернистой шероховатостью

Пример 4. Турбулентное течение в гладких трубах с плавным поворотом

Пример 5. Турбулентное течение в круглой гладкой трубе со сферическим клапаном

Пример 6. Обтекание крылового профиля NASA 0012

Пример 7. Обтекание прямого уступа и клина для сверхзвукового режима течения

Пример 8. Теплоотдача при вынужденном продольном обтекании пластины

Пример 9. Свободная поверхность - обрушение плотины,

Пример 10. Скользящие сетки и турбомшины

Пример 11. Горение - отрыв пламени на цилиндре

Пример 13. Частицы - испарение капель в потоке горячего воздуха

Пример 14. Горение частиц - горение жидкого дисперсного топлива

Пример 15. Подвижные тела - стационарное падение сферы, ламинарное течение

Пример 16. Импорт геометрии из файлов конечно-элементных сеток и экспорт результатов расчета

Пример 17. Излучение – нестационарное охлаждение горячего газа

1 ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

В документе содержатся основные сведения о программном комплексе (ПК) FlowVision:

- назначении,
- области применимости,
- математической технологии,
- структуре используемых информационных средств.

Документ устанавливает состав и допустимые значения характеристик для ПК FlowVision, подтверждаемых при сертификации в “Системе сертификации ГОСТ Р”.

Установлены критерии приемки и контроля свойств ПК FlowVision, и указания по его эксплуатации.

2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О FlowVision

2.1 Назначение

ПК FlowVision предназначен для моделирования трехмерных течений жидкости и газа в технических и природных объектах, а также визуализации этих течений методами компьютерной графики.

Моделируемые течения включают в себя стационарные и нестационарные, сжимаемые, слабосжимаемые и несжимаемые потоки жидкости и газа. Использование различных моделей турбулентности и адаптивной расчетной сетки позволяет моделировать сложные движения жидкости, включая течения с сильной закруткой, горением, течения со свободной поверхностью.

ПК FlowVision основан на конечно-объемном методе решения уравнений гидродинамики и использует прямоугольную адаптивную сетку с локальным измельчением. Для аппроксимации криволинейной геометрии с повышенной точностью ПК FlowVision использует технологию подсеточного разрешения геометрии. Эта технология позволяет импортировать геометрию из систем САПР и обмениваться информацией с системами конечно-элементного анализа. Использование этой технологии позволило решить проблему автоматической генерации сетки — чтобы сгенерировать сетку, достаточно задать всего лишь несколько параметров, после чего сетка автоматически генерируется для расчетной области, имеющей геометрию любой степени сложности.

Чтобы начать работать ПК FlowVision, необходимо иметь на своем персональном компьютере операционную систему Windows-NT/2000/XP и систему автоматизации проектирования (САПР), в которой Вы будете задавать геометрию расчетной области. Рекомендуемые системы: SolidWorks, T-Flex, Unigraphics, Autocad Mechanical Desktop, ProEngineer, Catia.

2.2 Область применения

Краткий список задач, решаемых с использованием ПК FlowVision, включает в себя следующие направления.

- Автомобильная промышленность:
 - определение коэффициентов сопротивления корпуса автомобиля набегающему воздушному потоку;
 - вентиляция подкапотного пространства и салона;
 - моделирование горения топлива в камере сгорания;
- Аэрокосмическая промышленность:
 - моделирование обтекания самолетов и ракет;
 - вентиляция и пожаробезопасность салонов самолетов;
 - моделирование физико-химических процессов в турбореактивных двигателях и в камерах сгорания ракет;
- Технологические процессы производства материалов:
 - моделирование литья металлов и пластмасс в форму;
 - моделирование физико-химических процессов в химических и биологических реакторах;
- Строительство:
 - расчет ветровых нагрузок на здания и сооружения;
 - вентиляция и пожаробезопасность зданий;
 - определение сопротивлений воздухопроводов и водо-раздаточных устройств;

- Энергетика:
 - расчет горелок для сжигания топлива в котлах ТЭЦ;
 - расчет выбросов оксидов азота котлами ТЭЦ;
 - определение сопротивлений газоходов;
- Экология и чрезвычайные ситуации:
 - моделирование распространения загрязнений в водо-воздушных бассейнах;
 - моделирование распространения пожаров в лесах и городах.

2.3 Краткое техническое описание ПК FlowVision

Описание технических характеристик программного комплекса FlowVision.

Интерфейс пользователя:

MS-Windows.

Препроцессор:

Импорт геометрии, созданной в различных системах автоматизированного проектирования и сохраненной в форматах VRML, STL, ABAQUS, ANSYS, NASTRAN, MESH.

- Интерактивное задание граничных условий на поверхностях.

Расчетная сетка:

- Автоматическая генерация сетки.
- Прямоугольная сетка с подсеточным разрешением геометрии.
- Локальное измельчение сетки.
- Адаптация сетки вдоль границы расчетной области и по решению.

Возможности моделирования:

- 3D стационарные/нестационарные сжимаемые/ слабосжимаемые/ несжимаемые потоки жидкости.
- Ламинарные или турбулентные потоки.
- $k-\varepsilon$ — подобные модели турбулентности.
- Перенос скалярных величин и их флуктуаций.
- Свободные поверхности.
- Горение предварительно перемешанных/неперемешанных газовых смесей.
- Сопряженный теплообмен.
- Сопряженное моделирование движения жидкости с различными математическими моделями в различных областях.
- Граничные условия на стенке:
 - Проскальзывание/Прилипание.
 - Степенной и логарифмический законы для турбулентных течений.
 - Адиабатические/ изотермические/ тепловой поток/ теплообмен/ сопряженный теплообмен.
- Граничные условия, зависящие от времени.
- Периодические и сопряженные граничные условия.
- Скользящая сетка.

Метод решения:

- Конечно-объемный метод.
- Явный и неявный методы.
- Неявный алгоритм расщепления для решения уравнения Навье-Стокса.
- Схема расчета уравнений переноса повышенной точности.
- Решение систем линейных алгебраических уравнений методами:
 - сопряженного градиента с использованием неполного разложения Холесского.
 - модифицированный метод поточечной верхней релаксации.

Постпроцессор:

- Векторы на плоскости или поверхности.
- Изолинии или тоновая заливка на плоскости или поверхности.

- Отрезающие или полупрозрачные поверхности.
- Анимация движения маркеров.
- Интегрирование параметров течения жидкости по сечению и по поверхности.
- Локальные характеристики.

Графика:

Основана на OpenGL.

Платформа:

Intel/AMD

Windows-98/ME/NT/2000/XP.

2.4 Структура программных средств

С точки зрения архитектуры ПК FlowVision представляет собой интегрированный пакет программных средств, состоящий из нескольких компонент:

- блок формирования информационной модели исследуемых задач (препроцессор);
- блок решения задач движения жидкости и газа (процессор);
- блок, обеспечивающий вывод и визуализацию информации об исследуемых задачах движения жидкости и газа на различных этапах решения задачи (постпроцессор);

2.4.1 Препроцессор - блок формирования информационной модели исследуемых задач

С помощью препроцессора в системе FlowVision осуществляются следующие шаги, выполняемые пользователем.

Создание области расчета (“геометрии” устройства) в САПР и импортирование ее через форматы VRML, STL, ABAQUS, ANSYS, NASTRAN, MESH в ПК FlowVision.

Под областью расчета понимается объем, в котором определены уравнения математической модели, и граница объема, на которой определены граничные условия. Задачи моделирования движения жидкости подразделяются на задачи внешнего обтекания и внутренних течений. Область расчета не может быть безграничной, поэтому для задач внешнего обтекания физический объем никогда не совпадает с расчетной областью. Чтобы обеспечить моделирование неограниченного объема, на границах расчетной области, удаленных от рассматриваемого объекта, ставят соответствующие граничные условия.

Область расчета создается вне программного комплекса FlowVision в системах САПР. Поверхности расчетной области, которые импортируются в ПК FlowVision, должны представлять собой совокупность плоских многоугольников — фасеток. Многоугольники объединены в замкнутые поверхности, которые вложены друг в друга и не пересекаются.

После задания геометрии расчетной области в САПР, геометрия сохраняется в отмеченных выше форматах.

Задание математической модели.

Целью моделирования движения жидкости и газа в расчетной области является получение распределений скорости, давления и других физических параметров жидкости (газа). Чтобы рассчитать эти параметры, необходимо задать физические законы их изменения, совокупность которых для данной задачи называется математической моделью.

Математическая модель движения жидкости или газа — это система уравнений в частных производных, определяющих законы сохранения (энергии, массы, импульса) и уравнений состояния жидкости (газа).

Задание граничных условий.

Следующий шаг создания расчетного варианта — это задание граничных условий (ГУ) на границе расчетной области. Граничные условия задаются для каждой из расчетных переменных. Чтобы облегчить выбор и исключить постановку несовместимых граничных условий, они объединены в **Type**

of boundary (Тип границы) — ТГ. Каждый ТГ соответствует некоторому физическому процессу, происходящему на границе.

В ПК FlowVision существует две группы типов границ — тип «стенка с и без вдува» и тип специальных границ, в которые входят периодические и сопряженные граничные условия.

Совокупность типов границ «стенка с и без вдува» включает в себя ТГ

- **Wall (Стенка),**
- **Inlet/Outlet (Вход/Выход),**
- **Free Outlet (Свободный выход),**
- **Symmetry (Симметрия).**

Они имеются во всех моделях, за исключением **SolidModel (Твердый материал)**, в которой имеется только ТГ

- **Wall (Стенка)**
- **Symmetry (Симметрия).**

Каждый тип границы включает в себя наборы граничных условий для каждой независимой переменной данной математической модели.

Тип «сопряженная граница» **Conjugate** предназначен для решения сопряженных задач. Термин сопряженная задача в основном используется для обозначения класса задач теплообмена между твердым телом и жидкостью, когда важен одновременный расчет распределения температуры и в твердом теле и в жидкости. Решение в двух различных областях, имеющих разные математические модели, сопрягается (сшивается) на общей границе этих двух областей.

Тип **Conjugate (Сопряженное)** может быть использован также для произвольного связывания двух границ. Границы могут принадлежать как одному, так и разным объемам и могут принадлежат двум разным поверхностям. Достаточным условием такого связывания является условие существования однозначного отображения одной поверхности в другую путем преобразований переноса и поворота.

Граничное условие **Sliding (Скользкая поверхность)** предназначено для задания границы взаимодействия между двумя подвижными подобластями (расчет течения жидкости и газа в устройствах, в которых есть вращающиеся и неподвижные части).

Граничное условие **Period (Периодическое)** предназначено для задания периодики на двух поверхностях, как правило, одной расчетной подобласти

Задание расчетной сетки нулевого уровня, задание критериев адаптации сетки по решению и по граничным условиям.

FlowVision использует прямоугольную адаптивную локально измельченную сетку (АЛИС) для решения уравнений математической модели. Возможность адаптации этой сетки позволяет разрешать малые детали геометрии расчетной области и высокие градиенты рассчитываемых величин.

Во всей расчетной области вводится прямоугольная сетка. Выделяются подобласти с особенностями геометрии или течения, в которых необходимо провести расчет на более мелкой, чем исходная, сетке. При этом расчетная ячейка, в которую попала выделяемая особенность, делится на 8 равных ячеек. Далее, если необходимо, ячейки делятся еще раз и так до достижения необходимой точности. Ячейки начальной сетки называются ячейками уровня 0, ячейки, получаемые измельчением уровня 0, называются ячейками уровня 1 и т.д. При генерации АЛИС накладывается условие, что гранями и ребрами могут граничить друг с другом только ячейки с номерами уровней, отличающимися не более, чем на единицу.

Метод подсеточного разрешения геометрии, который используется в FlowVision, предназначен для аппроксимации криволинейных границ на прямоугольной сетке. Ячейки, через которые проходит граница, расщепляются на 2, 3 и т.д. ячеек. При этом они теряют свою первоначальную форму параллелепипеда и превращаются в многогранники произвольной формы. Уравнения математической модели аппроксимируются для этих многогранников без каких-либо упрощений. Такой подход позволяет с достаточной степенью точности рассчитывать течения даже на грубой расчетной сетке.

Задание параметров методов расчета,

определяющих скорость сходимости вычислительного алгоритма и порядок аппроксимации исходных уравнений, выбор шага по времени вычислительного алгоритма.

2.4.2 Процессор - блок решения задач движения жидкости и газа

Предназначен для реализации на ЭВМ методик и алгоритмов численного моделирования исследуемых процессов при сформированной в результате работы препроцессора входной информации. С помощью программных средств этого блока формируется последовательность полей, характеризующих промежуточные и конечное состояние течения жидкости или газа при заданном начальном состоянии (характеризуемом полями начальных скоростей, давления, параметров турбулизации потока).

По своей архитектуре программные средства блока представляют собой, работающую на единой информационной основе, иерархическую открытую модульную систему, включающую ряд головных программ (модулей верхнего уровня), составляющих верхний пользовательский уровень программных средств. Каждая из таких программ ориентирована на решение достаточно широкого класса задач (например, теплопроводность, квазистатика, динамика и т. д.).

Рассчитываемые переменные

Рассчитываемыми переменными математической модели являются векторные и скалярные поля, разделяемые на независимые и зависимые переменные. Независимые переменные определяются из решения систем уравнений с совокупностью начальных и граничных условий, а зависимые выражаются через них. Например, скорость V – независимая векторная переменная, определяемая из решения уравнений Навье-Стокса и уравнения неразрывности, а модуль скорости $||V||$ – скалярная зависимая переменная.

В Табл. 1 показано соответствие имен уравнений (системы уравнений) и входящих в них зависимых и независимых переменных математической модели.

Имя уравнения (системы уравнений)	Независимая переменная	Обозначение	Зависимая переменная	Обозначение
Velocity	Скорость (Velocity)	V	Модуль скорости (ModVelocity)	$ V $
	Давление (Pressure)	P		
Temperature	Температура (Temperature)	T		
Concentration	Концентрация (Concentration)	C		
Turbulence	Турбулентная энергия (TurbEnergy)	k	Турбулентная вязкость (TurbViscosity)	
	Турбулентная диссипация (TurbDissipation)			
VOF	Объем жидкости в ячейке (VOF)	VOF		

Табл. 1 Соответствие имен уравнений (системы уравнений) и входящих в них переменных

Теплоперенос в твердой фазе

Модель теплопереноса в твердом теле включает в себя следующие уравнения:

Общепринятое название	Имя в FlowVision
Закон сохранения энергии	Temperature
Уравнение диффузионного переноса скалярной величины (закон сохранения массы)	Concentration

Примеры применения:

- моделирование теплопереноса в микросхемах,
- моделирование теплопереноса в стенах зданий и сооружений. **Ламинарное несжимаемое течение.**

Модель ламинарного тепломассопереноса в жидкости включает:

Общепринятое название	Имя в FlowVision
Уравнения Навье-Стокса (закон сохранения импульса) Уравнение неразрывности (закон сохранения массы жидкости)	<i>Velocity</i>
Закон сохранения энергии	<i>Temperature</i>
Уравнение диффузионного переноса скалярной величины (закон сохранения массы)	<i>Concentration</i>

Эта модель медленного течения при малых изменениях плотности (приближение Буссинеска), малых числах Рейнольдса Re и малых числах Маха M

$$Re = UL/\nu < 2 \div 10 \times 10^3 \quad M = U/a < 0.3$$

где U - характерная скорость, L - расстояние, ν - кинематическая вязкость жидкости, a — скорость звука.

Турбулентное несжимаемое течение

Модель турбулентного тепломассопереноса в жидкости включает:

Общепринятое название	Имя в FlowVision
Уравнения Навье-Стокса (закон сохранения импульса) Уравнение неразрывности (закон сохранения массы жидкости)	<i>Velocity</i>
Закон сохранения энергии	<i>Temperature</i>
Уравнение диффузионного переноса скалярной величины (закон сохранения массы)	<i>Concentration</i>
k- модель турбулентности	<i>Turbulence</i>

Ограничения этой модели соответствуют ограничениям предыдущей модели по плотности и числам Маха, но позволяют рассчитывать течение при больших (турбулентных) числах Рейнольдса $Re > 2 \cdot 10^3 \div 10^4$

Примеры применения:

- моделирование обтекания автомобиля;
- моделирование движения воды в водозапорных устройствах, клапанах и жиклерах;
- моделирования движения воздуха при вентиляции помещений.

Турбулентное слабосжимаемое течение

Модель слабосжимаемого течения жидкости включает:

Общепринятое название	Имя в FlowVision
Уравнения Навье-Стокса (закон сохранения импульса) Уравнение неразрывности (закон сохранения массы жидкости)	<i>Velocity</i>
Закон сохранения энергии	<i>Temperature</i>
Уравнение диффузионного переноса скалярной величины (закон сохранения массы)	<i>Concentration</i>
k- модель турбулентности	<i>Turbulence</i>

В отличие от модели турбулентного несжимаемого течения, эта модель допускает течение с любыми изменениями плотности жидкости (однако числа Маха все равно малы — т.е. изменения плотности обусловлены только температурными эффектами или влиянием примесей в жидкости/газе). Отметим, что эту модель можно использовать для моделирования только стационарных течений.

Примеры применения:

- моделирование смешения двух газов с разной плотностью (например метана и воздуха в горелках котлов ТЭЦ);
- моделирование движения газа в теплообменниках с большим перепадом температуры.

Турбулентное сжимаемое течение

Модель полностью сжимаемого газа включает:

Общепринятое название	Имя в FlowVision
-----------------------	------------------

Уравнения Навье-Стокса (закон сохранения импульса)	<i>Velocity</i>
Уравнение неразрывности (закон сохранения массы жидкости)	
Закон сохранения энергии, записанное через полную энтальпию	<i>Enthalpy</i>
Уравнение диффузионного переноса скалярной величины (закон сохранения массы)	<i>Concentration</i>
k- модель турбулентности	<i>Turbulence</i>

В отличие от модели турбулентного слабосжимаемого течения, эта модель допускает течение с любыми изменениями плотности жидкости и при любых числах Маха. Отметим, что эта модель может полностью заменять модель слабосжимаемой жидкости, однако стоит иметь ввиду, что в своем диапазоне физических параметров, расчет слабосжимаемой жидкостью будет происходить в 1.5-2 раза быстрее, чем моделью сжимаемого течения.

Примеры применения:

- моделирование обтекания самолетов и ракет при до-, транс- и сверхзвуковых скоростях полета;
- моделирование движения газа в соплах ракетных двигателей.

Многофазное течение со свободными поверхностями

Модель движения двухфазной жидкости включает:

Общепринятое название	Имя в FlowVision
Уравнения Навье-Стокса (закон сохранения импульса) Уравнение неразрывности (закон сохранения массы жидкости)	<i>Velocity</i>
Закон сохранения энергии	<i>Temperature</i>
Уравнение диффузионного переноса скалярной величины (закон сохранения массы)	<i>Concentration</i>
k- модель турбулентности	<i>Turbulence</i>
Уравнение переноса "концентрации жидкости в газе" (функция VOF) для аппроксимации свободной поверхности.	<i>VOF</i>

В отличие от модели турбулентного несжимаемого течения, в этой модели включена возможность расчета двухфазной среды, например вода-воздух.

Примеры применения:

- моделирование обтекания корабля водой;
- моделирование движения газоконденсатной смеси в порах породы.

Течение с горением

Модель течения с горением является наиболее сложной моделью движения газа, реализованной в системе FlowVision. Модель включает:

Общепринятое название	Имя в FlowVision
Уравнения Навье-Стокса (закон сохранения импульса) Уравнение неразрывности (закон сохранения массы жидкости)	<i>Velocity</i>
Закон сохранения энергии, записанный через энтальпию	<i>Enthalpy</i>
Уравнения переноса реагентов в приближении брутто-реакции (перенос топлива, окислителя и продуктов сгорания).	
Уравнения k- модели турбулентности.	<i>Turbulence</i>

Эта модель представляет собой развитие модели течения слабосжимаемой жидкости со всеми ее ограничениями, но при этом учитывается горение газовой смеси. Предполагается, что газовая смесь может быть предварительно перемешана и не перемешана.

Примеры применения:

- моделирование горения метана в котлах ТЭЦ;
- моделирование пожаров в помещениях.

2.4.3 Постпроцессор - блок, обеспечивающий вывод и визуализацию информации об исследуемых конструкциях на различных этапах решения задачи

Постпроцессор FlowVision предназначен для визуального анализа сложных трехмерных течений жидкости. Постпроцессор имеет общий с препроцессором и блоком расчета интерфейс. Постпроцессор работает с файлами в собственном формате FlowVision. Кроме того, с его помощью можно просматривать VRML-файлы. Блок 3D графики реализован с помощью библиотеки **OpenGL**.

Постпроцессор FlowVision предоставляет следующие возможности отображения исходной геометрии:

- Трехмерное изображение модели в параллельной и перспективной проекциях.
- Высокоскоростная отрисовка сцены с помощью функций **OpenGL**.
- Возможность ускорения отрисовки с помощью аппаратных **OpenGL**-ускорителей.
- Различные модели освещения 3D сцены.
- Интерактивная настройка проекции 3D сцены (положения и параметров камеры).
- Плоскости отсечения. Интерактивная настройка их положения в пространстве.
- Визуализация движущихся частей геометрии в случае скользящих сеток.

Постпроцессор FlowVision предоставляет следующие возможности визуального анализа течения жидкости:

- Полный набор стандартных методов визуализации течений (изолинии, тоновая заливка, различные графики одной переменной, вектора, изоповерхность).
- Визуализация расчетной сетки с локальным измельчением.
- Возможность получения характеристик течения в точке, интегральных характеристик течения на плоскости и поверхности.
- Анимационные методы визуализации векторного поля.
- Возможность интерактивной настройки параметров методов визуализации.
- Отображение легенды метода отрисовки в отдельном окне.

Любая 3D сцена представляется набором различных слоев визуализации. Слои визуализации — это визуальные объекты, отображаемые в графическом окне FlowVision.

В общем случае слой имеет трехкомпонентную внутреннюю структуру: он состоит из геометрического объекта, расчетной переменной и метода отрисовки. Типы слоев различаются по методам отрисовки, которые в них заложены. Названия типов слоев — это названия их методов отрисовки.

Тип слоя визуализации	Название слоя (метод отрисовки)	Геометрические объекты	Тип переменной
Специальный	Solids (Твердые тела)	Whole space (Все пространство)	—
	Coordinate system (Координатная система)	Whole space (Все пространство)	—
	Grid (Расчетная сетка)	Whole space (Все пространство)	—
	Cell debug (Отладка ячеек)	Whole space (Все пространство)	—
	Small Cells (Маленькие ячейки)	Whole space (Все пространство)	—
Статический	2D plot (Двумерный график)	Plane (Плоскость) Line (Линия)	Скаляр
	Plot along curve (График вдоль кривой)	Plane (Плоскость)	Скаляр
	Circle plot (График по окружности)	Plane (Плоскость)	Скаляр
	Distributed characteristics (Распределенные характеристики)	Line (Линия)	Скаляр Вектор

Тип слоя визуализации	Название слоя (метод отрисовки)	Геометрические объекты	Тип переменной
	Characteristics (Характеристики)	Whole space (Все пространство) Plane (Плоскость) Complex object	Скаляр Вектор
	Vectors (Вектора)	Plane (Плоскость)	Вектор
	Isolines (Изолинии)	Plane (Плоскость) Complex object	Скаляр
	Flood (Заливка)	Plane (Плоскость) Complex object	Скаляр
	Isosurface (Изоповерхность)	Whole space (Все пространство)	Скаляр
С анимацией	Drop (Капля)	Whole space (Все пространство)	Вектор
	Flashes (Вспышки)	Whole space (Все пространство)	Вектор
	Group of particles (Группа частиц)	Plane (Плоскость)	Вектор

2.5 Методы и алгоритмы решения

Аппроксимация уравнений

Математическая модель движения жидкости (газа) представляет собой совокупность уравнений конвективно-диффузионного переноса. FlowVision использует метод конечных объемов для численного решения управляющих уравнений. В этом методе управляющие уравнения интегрируются по объему каждой ячейки расчетной сетки и по отрезку времени (шаг времени). В FlowVision используется несколько схем аппроксимации конвективного потока. Эти схемы основаны на восстановлении рассчитываемой переменной из ее средних значений внутри ячейки расчетной сетки и переноса восстановленной функции по линиям тока жидкости (характеристикам поля скорости). Используются следующие методы восстановления рассчитываемой переменной внутри расчетной ячейки

- а) средние величины в расчетных ячейках
- б) восстановление первого порядка ("Upwind scheme")
- в) гладкое восстановление высокого порядка ("Smooth reconstruction")
- г) ступенчатое восстановление высокого порядка ("Sharp reconstruction").

Способ восстановления "Upwind scheme" соответствует известной схеме против потока, имеющей первый порядок точности по пространственной переменной. Расчет течения с использованием этой схемы для аппроксимации конвективного члена дает грубое решение, имеющее большую схемную диссипацию, и приводит к искусственному уменьшению его градиентов ("размазыванию"). Расчет этой схемой имеет максимальную скорость сходимости решения к стационарному состоянию (если оно есть). Более того, итерация по времени выполняется при использовании схемы быстрее. Эта схема используется при расчетах тех вариантов, на которых схемы высокого порядка точности не устойчивы, либо в начальные моменты времени при расчетах стационарных вариантов для получения первого приближения решения с последующим расчетом схемами высокого порядка точности.

Способ восстановления "Smooth reconstruction" соответствует формально схеме второго порядка по времени и по пространству, однако, как показали исследования (Aksenov A.A., Dyadkin A.A., Gud-zovsky A.V., *Numerical Simulation of Car Tire Aquaplaning*. Computational Fluid Dynamics '96, J.-A. Desideri, C.Hirsch, P.Le Tallec, M.Pandolfi, J.Periaux eds, John Wiley&Sons, 1996, pp. 815-820) эта схема имеет точность схем повышенного порядка точности. Рекомендуется использовать для расчета всех уравнений конвективного переноса.

Способ восстановления “Sharp reconstruction” соответствует схеме для расчета переноса ступенчатой функции, принимающей только два значения «минимальное» и «максимальное» во всей области расчета. Пример перенос функции VOF, принимающей значения 0 (газ) и 1 (жидкость), которая применяется в FlowVision для отслеживания границ раздела между жидкостью и газом.

Точность численного решения уравнения конвективного переноса сильно зависит от ориентации потока жидкости относительно расчетной сетки. Наиболее сильно схемные искажения решения проявляются при диагональном, “скошенном” потоке жидкости относительно ячеек сетки. Чтобы повысить точность расчета при диагональном потоке жидкости, в FlowVision применяется “скошенная” расчетная схема. Применение этой схемы увеличивает время расчета уравнения конвективного переноса примерно на 50%. Данная схема используется для моделирования закрученных течений.

Явный и неявный методы расчета

Интегрирование управляющих уравнений производится с шагом по времени, значение которого определяется из условий устойчивости вычислительного алгоритма. В FlowVision имеется возможность расчета этого уравнения явным и неявным алгоритмами.

В явном алгоритме только конвективный член уравнения переноса записывается в явном виде. Все остальные члены вычисляются неявно.

Шаг по времени в явном алгоритме (далее этот шаг будем называть явным шагом) ограничен условием Куранта-Фридрихса-Леви.

Для решения уравнения конвективного переноса неявным алгоритмом используется метод коррекции ошибки. Неявный алгоритм не имеет ограничений на величину шага по времени. Этот шаг задается либо постоянным, либо через “неявное число Куранта-Фридрихса-Леви”.

3 БЛОК РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ И ГАЗА (процессор)

3.1 Технические требования к характеристикам FlowVision

3.1.1 Требования к составу характеристик ПС

В состав характеристик входят:

- характеристики идентификации;
- функциональные характеристики;
- характеристики операционной среды;
- характеристики аппаратных ресурсов;
 - характеристики интерфейса пользователя;
 - общие характеристики качества.

3.1.2 Характеристики идентификации

- 1) Сведения о разработчике:
125083, Россия, Москва, ул. Юннатов, 18, комн. 701-703. ООО «ТЕСИС»;
Генеральный директор – Курсаков С.Н.
- 2) Сведения о регистрации: - СВИДЕТЕЛЬСТВО об официальной регистрации программы для ЭВМ № 990672 Российского агентства по патентам и товарным знакам от 15 сентября 1999г.
- 3) Комплект программных документов на ПС:
“Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision. Руководство пользователя”.
Комплект программных документов оформляется на русском языке в соответствии с требованиями ГОСТ 19.502 - 78, ГОСТ Р 9294 - 93.
- 4) Сведения о продажах (рассылках) представляются в виде официальной справки, подписанной разработчиком (поставщиком) ПС и содержит: № версии, дату начала продаж (рассылки), число проданных (разосланных) копий.
- 5) Контрольный вариант содержит перечень входных заданий и соответствующих им выходных результатов.

3.1.3 Требования к функциональным характеристикам. Состав программных компонент, входящих в FlowVision.

Программные компоненты - математические модели программного комплекса FlowVision, разделены на три группы — **базовые** и **специальные** модели и **дополнительные модули**.

Базовые модели предназначены для моделирования широкого класса гидродинамических явлений. Они описывают движение однородной жидкости при различных скоростях с учетом эффектов сжимаемости, турбулентности и теплопереноса:

- **Solid Model (Твердый материал)** предназначена для моделирования теплопереноса и диффузионных процессов в твердом теле. Эта модель используется в задачах сопряженного теплообмена для учета теплопереноса между жидкостью и твердым телом;
- **Laminar Fluid Model (Ламинарная жидкость)** используется для моделирования течений вязкого газа (жидкости) при малых и умеренных числах Рейнольдса при небольших изменениях плотности (приближение Буссинеска);
- **k-ε Turbulent Model (k-ε модель турбулентности)** предназначена для моделирования течения газа (жидкости) при больших (турбулентных) числах Рейнольдса и при малых изменениях плотности;
- **Weak Compressible Fluid Model (Слабосжимаемая жидкость)** описывает стационарное движение газа при дозвуковых числах Маха и любых изменениях плотности;
- **Full Compressible Fluid Model (Полностью сжимаемая жидкость)** описывает стационарное и нестационарное движение газа при любых числах Маха (до-, транс-, сверх- и гиперзвуковые течения).

Специальные модели предназначены для моделирования движения жидкости (газа) при учете дополнительных физико-химических эффектов, характерных для узкоспециальных приложений:

- **Free Surface Model (Свободная поверхность)** предназначена для исследования двухфазных течений со свободной поверхностью. Эти модели используются для определения коэффициентов сопротивления кораблей и подводных аппаратов, заполнения форм расплавом металлов и т.д.;
- **Methane Air Combustion Model (Модель горения)** используется для моделирования процессов сжигания метана при дозвуковых числах Маха
- **Combustion dispersion fuel Model (Модель горения дисперсного топлива)** используется для моделирования газо-термодинамических характеристик горелок, работающих на пульверизованном угле, сланцах и целлюлозосодержащей биомассе.

Дополнительные модули:

- **Sliding Mesh (Моделирование вращающихся тел)** предназначен для моделирования движения вращающихся тел (колесо компрессора, винт и т.д.);
- **Radiation (Моделирование радиационного переноса)** предназначен для моделирования процессов теплового излучения и поглощения газов;
- **Moving bodies (Моделирование движения твердого тела)** предназначен для моделирования динамики движения твердых тел, в том числе, под действием внешних сил гидродинамической природы;
- **Moving particles (Моделирование движения частиц)** предназначен для моделирования двухфазных течений с примесью в виде частиц.

3.1.4 Требования к характеристикам операционной среды.

- операционная система Windows-NT/2000/XP.

3.1.5 Требования к характеристикам аппаратных ресурсов.

- | | |
|----------------------|---------------------|
| - тип ЭВМ | - ПЭВМ типа IBM PC; |
| - тип процессора | - Intel, AMD |
| - тактовая частота | - не менее 1 Ghz |
| - оперативная память | - не менее 512 Mb; |
| - жесткий диск | - не менее 10 Gb. |

3.1.6 Требования к характеристикам интерфейса пользователя.

№ п/п	Наименование характеристики	Значение характеристики
1	Язык взаимодействия пользователя с ПС	Русский, английский
2	Тип интерфейса	Оконный, диалоговый
3	Система меню	Иерархическая
4	Помощь	Встроенная в систему
5	Квалификация пользователя	Имеющий опыт работы в OS Windows

3.1.7 Требования к общим характеристикам качества.

3.1.7.1 Надежность

Достигается следующими мерами:

- наличием системы контроля входных данных краевой задачи, позволяющей производить просмотр их в цифровом виде и визуализировать геометрию, топологию, граничные условия и физические поля на экране дисплея;
- возможностью контроля за изменением характеристик течения в процессе счета; обновление графической информации в окне происходит на каждом шаге по времени, поэтому пользователь имеет возможность наблюдать развитие решения постоянно;
- возможностью прерывания счета в любой момент для анализа промежуточных результатов и последующего продолжения счета с точки останова;
- диагностикой аварийных (нестандартных) ситуаций, возникающих в процессе счета.

3.1.7.2 Удобство применения

Обеспечивается:

- наличием качественной и полной программной документацией, содержащей описание методики, алгоритмов, описания применения и т. д.);
- обеспечением удобства ввода и контроля исходных данных;
- возможностью различных форм представления выходных данных и их детализации как в файловом, так и в графическом виде.

3.1.7.3 Универсальность

Достигается следующими оценочными показателями:

- FlowVision предназначен для широкого круга пользователей, занимающихся аэро- и гидродинамическими расчетами на стадии проектирования и во время анализа реальных конструкций и физических явлений;
- работает в различных операционных системах (Windows-NT/2000/XP);
- адаптируется к возникающим новым функциональным потребностям (изменения, связанные с включением новых физических моделей, характеристик течения, геометрических и (или) технологических особенностей исследуемых объектов;
- представляет собой многоуровневую иерархическую модульную систему.

3.1.7.4 Базовые значения общих характеристик качества

Таблица 3

№ п/п	Наименование характеристики	Метод оценки	Нижнее значение
1	Надежность	Экспертный	0.75
2	Удобство применения	Экспертный	0.85
3	Универсальность	Экспертный	0.75

3.2 ТРЕБОВАНИЯ К МЕТОДАМ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК FlowVision

3.2.1 Состав объекта испытаний и условия проведения испытаний

3.2.1.1 Для испытаний привлекается ПЭВМ "Pentium - 4" с операционной системой Windows.

3.2.1.2 Испытания проводятся при положительных результатах экспертизы по всем параметрам идентификации.

3.2.2 Описание методов испытаний

Содержится в настоящем документе, в нормативных и методических документах, разрешенных к применению в “Системе сертификации ГОСТ Р”, а также в протоколах испытаний, оформленных по результатам оценки характеристик подсистемы.

Дополнительные нормативно-методические документы, расширяющие и уточняющие методы испытаний, способы регистрации и обработки результатов испытаний, должны быть утверждены к применению в установленном в Системе порядке.

3.2.3 Инструментальные средства, используемые для оценки характеристик системы

Должны быть аттестованы в установленном в Системе порядке.

3.2.4 Идентификация системы

Проводится экспертным методом путем проверки выполнения требований настоящего документа.

3.2.5 Оценка функциональных характеристик и потребительских свойств

Производится экспертами путем проверки выполнения тестовых задач в соответствии с функциональными характеристиками программы (табл.4) и потребительскими свойствами (табл.5). Перечень тестовых задач и результатов их выполнения приведены в приложении.

Таблица 4

№	Наименование характеристики (программной компоненты)	Метод оценки	Тестовый пример
1	Работа в различных операционных системах:		
	Windows-NT/2000/XP	Экспертный	1-7
ПРЕПРОЦЕССОР			
2	Импорт геометрии в различных форматах:		
	- VRML	Экспертный	1-17
	- STL		
	- ABAQUS		
	- ANSYS		
	- NASTRAN		
	- MESH		
3	Граничные условия		
	- Wall (Стенка);	Экспертный	1-17
	- Inlet/Outlet (Вход/Выход);		
	- Free Outlet (Свободный выход);		
	- Symmetry (Симметрия);		
	- Conjugate (Сопряжение);		
	- Period (Периодическое);		
	- Sliding (Скользящая поверхность).		
4	Адаптация расчетной сетки		
	- Адаптация по объему;	Экспертный	1-6, 11,13,15
	- Адаптация по граничному условию;		
	- Адаптация по решению.		
5	Фильтры		
	- Подвижное тело;	Экспертный	6, 11, 14, 15
	- Сопротивление;		

№	Наименование характеристики (программной компоненты)	Метод оценки	Тестовый пример
	- Горение;		
	- Начальное распределение;		
	- Установка переменной;		
МОДЕЛИ И МОДУЛИ			
5	Solid Model (Твердый материал)		
	Моделирование теплопереноса и диффузионных процессов в твердом теле;	Экспертный	8, 17
6	Laminar Fluid Model (Ламинарная жидкость)		
	Моделирование течения вязкого газа (жидкости) при малых и умеренных числах Рейнольдса при небольших изменениях плотности (приближение Буссинеска);	Экспертный	1, 8, 15
7	k-ε Turbulent Model (k-ε модель турбулентности)		
	Моделирование течения вязкого газа (жидкости) при больших (турбулентных) числах Рейнольдса и при малых изменениях плотности;	Экспертный	2-5, 8
8	Weak Compressible Fluid Model (Слабосжимаемая жидкость)		
	Моделирование стационарного движения газа при дозвуковых числах Маха и любых изменениях плотности;	Экспертный	13
9	Full Compressible Fluid Model (Полностью сжимаемая жидкость)		
	Моделирование стационарного и нестационарного движения газа при любых числах Маха (до-, транс-, сверх- и гиперзвуковые течения);	Экспертный	6, 7
10	Free Surface Model (Свободная поверхность)		
	Моделирование двухфазных течений со свободной поверхностью;	Экспертный	9
11	Methane Air Combustion Model (Модель горения)		
	Моделирования процессов сжигания метана при дозвуковых числах Маха	Экспертный	11
12	Combustion dispersion fuel Model (Модель горения дисперсного топлива)		
	Моделирование процессов сжигания pulverized уголь, сланцев и целлюлозосодержащей биомассы.	Экспертный	14
13	Sliding Mesh (Моделирование вращающихся тел)		
	Модуль предназначен для расчета вращающихся тел (колесо компрессора, винт и т.д.);	Экспертный	10
14	Radiation (Моделирование радиационного переноса)		
	Модуль предназначен для моделирования процессов теплового излучения и поглощения газов;	Экспертный	17
15	Moving bodies (Моделирование движения твердого тела)		
	Модуль предназначен для моделирования движения твердых тел, в том числе, под действием внешних сил гидродинамической природы;	Экспертный	6, 15
16	Moving particles (Моделирование движения частиц)		
	Модуль предназначен для моделирования двухфазных течений с примесью в виде частиц.	Экспертный	13
ПОСТПРОЦЕССОР			
17	Специальные слои визуализации:		
	- Solids (Твердые тела); - Coordinate system (Координатная система); - Grid (Расчетная сетка); - Cell debug (Отладка ячеек); - Small Cells (Маленькие ячейки)	Экспертный	1-17
18	Статические слои визуализации:		

№	Наименование характеристики (программной компоненты)	Метод оценки	Тестовый пример
	- 2D plot (Двумерный график);	Экспертный	1-17
	- Plot along curve (График вдоль кривой);		
	- Circle plot (График по окружности);		
	- Distributed characteristics (Распределенные характеристики);		
	- Characteristics (Характеристики);		
	- Vectors (Вектора);		
	- Isolines (Изолинии);		
	- Flood (Заливка);		
	- Isosurface (Изоповерхность).		
19	Экспорт результатов расчета на конечно-элементные сетки		
	- ABAQUS (версия 6.5-4)	Экспертный	16
	- ANSYS (версия 7.1)		
	- NASTRAN (версия V.2002)		

Примечание. Достоверность результатов выполнения тестовых задач, за исключением пунктов раздела “ПОСТПРОЦЕССОР”, подтверждается совпадением их либо с известным аналитическим решением, либо с результатами натуральных экспериментов, либо с результатами полученными с помощью других пакетов прикладных программ, чья достоверность подтверждается многолетней практикой их использования. При этом, оценка результатов тестирования раздела “ПРЕПРОЦЕССОР” проводится по результатам тестирования соответствующих примеров раздела “МОДЕЛИ И МОДУЛИ”. Оценка результатов тестирования раздела “ПОСТПРОЦЕССОР” определяется удобством и наглядностью примененного способа визуализации.

3.2.6 Методы оценки общих характеристик качества системы

Оценка значений общих характеристик качества осуществляется экспертным методом с использованием программы автоматизированной выдачи результатов экспертизы “APM эксперта”.

3.3 ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДСТАВЛЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Результаты испытаний системы оформляются протоколом. Протокол испытаний должен содержать полный перечень оцениваемых характеристик, методики их оценки и перечень полученных результатов идентификации, экспертных оценок и испытаний системы в соответствии с требованиями настоящего документа.

3.4 ПОРЯДОК КОНТРОЛЯ И ПРИЕМКИ

Контроль (функциональных характеристик) и приемку осуществлять путем сравнения результатов выполнения тестовых задач с помощью FlowVision с результатами выполнения тестовых задач, приведенных в приложении.

3.5 ГАРАНТИЙНЫЕ ОБЯЗАТЕЛЬСТВА И УСЛУГИ

3.5.1 Сопровождение вычислительного комплекса FlowVision по согласованию с Заказчиком.

3.5.2 Возможны доработки и развитие по согласованию с Заказчиком.

3.5.3 Возможно обучение персонала пользователей (лекции, практические занятия) на месте эксплуатации FlowVision.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision

Описание тестовых примеров

Авторы:

Аксенов А.А. - начальник отдела ООО «ТЕСИС», к.ф.-м.н.

Похилко В.И. – ведущий инженер, к.ф.-м.н.

Дядькин А.А. – ведущий инженер

Сельвачев А. – ведущий инженер

- Пример 1. Ламинарное течение несжимаемой вязкой жидкости в трубе
- Пример 2. Турбулентное течение в прямой гладкой трубе
- Пример 3. Турбулентное течение в прямой трубе с равномерно-зернистой шероховатостью
- Пример 4. Турбулентное течение в гладких трубах с плавным поворотом
- Пример 5. Турбулентное течение в круглой гладкой трубе со сферическим клапаном
- Пример 6. Обтекание крылового профиля NASA 0012
- Пример 7. Обтекание прямого уступа и клина для сверхзвукового режима течения
- Пример 8. Теплоотдача при вынужденном продольном обтекании пластины
- Пример 9. Свободная поверхность - обрушение плотины,
- Пример 10. Скользящие сетки и турбомшины
- Пример 11. Горение - отрыв пламени на цилиндре
- Пример 13. Частицы - испарение капель в потоке горячего воздуха
- Пример 14. Горение частиц - горение жидкого дисперсного топлива
- Пример 15. Подвижные тела - стационарное падение сферы, ламинарное течение
- Пример 16. Импорт геометрии из файлов конечно-элементных сеток и экспорт результатов расчета
- Пример 17. Излучение – нестационарное охлаждение горячего газа

ЛИТЕРАТУРА

1. Aksenov A., Gudzovsky A., Serebrov A., 1993, "Electrohydrodynamic Instability of Fluid Jet in Microgravity", 19-24, in Proc. of 5th Int. Symposium on Computational Fluid Dynamics (ISCFD), Aug. 31 - Sept. 3, 1993, Sendai, Japan, Japan Society of Computational Fluid Dynamics, Vol.1, 1993.
2. А.А.Аксенов, А.В.Гудзовский, А.А.Дядькин, А.П.Тишин. Смещение газов при вдуве низконапорной струи в поперечный поток, 67-74, Izvestia of Russian Academy of Sciences, Mechanics of Fluids and Gas, 3, 1996 (in Russian).
3. Aksenov A., Dyadkin A., Gudzovsky A., 1996, "Numerical Simulation of Car Tire Aquaplaning". Computational Fluid Dynamics '96, J.-A. Desideri, C.Hirsch, P.Le Tallec, M.Pandolfi, J.Periaux eds, John Wiley&Sons, pp. 815-820.
4. Aksenov A, Dyadkin A, Pokhilko V. Overcoming of Barrier between CAD and CFD by Modified Finite Volume Method, Proc. 1998 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, San Diego, ASME PVP-Vol. 377-1., 1998
5. Serguei Timouchev, Jean Tourret, Goran Pavic, Andrey Aksenov, Numerical 2-D and 3-D methods for computation of internal unsteady pressure field and sound near field of fans, Proc. Of Finnoise 2003, France, Senlis, 2003
6. A.A. Aksenov, S.A. Kharchenko, V.N. Konshin, V.I. Pokhilko FlowVision software: numerical simulation of industrial CFD applications on parallel computer systems. Proc. Parallel CFD 2003, May 13-15, 2003, Moscow, pp280-284
7. Aksenov A, Dyadkin A, T. Luniewski, Pokhilko V. Fluid Structure Interaction analysis using Abaqus and FlowVision, Proc. 2004 Abaqus user conference, USA, Boston, 2004

О Т Ч Е Т

по экспертной оценке качества программного продукта

Класс программного продукта: 50 3000 Программные средства моделирования и исследования

Методика: ГОСТ 28195 - 89 Оценка качества программных средств. Общие положения

Программный продукт: “ Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision ”

Испытатели: Банкрутенко В.В.
эксперт - аудитор Госстандарта РФ
сертификат эксперта N РОСС RU.0001.3101833 от 10.04.96г.

Копылов Л.А.
инженер - испытатель