

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

С.О. НЕКРАСОВА, А.А. ДИДЕНКО, В.В. БИРЮК

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАКЕТА STAR-CD В ЗАДАЧАХ ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ

Часть I. НАЧАЛЬНЫЙ КУРС

*Утверждено Редакционно-издательским советом
университета в качестве учебного пособия*

САМАРА
Издательство СГАУ
2006

УДК 004.9
ББК 32.97
Н48



**Инновационная образовательная программа
«Развитие центра компетенции и подготовка
специалистов мирового уровня в области аэро-
космических и геоинформационных технологий»**

Рецензент д-р техн. наук, проф. А. Г. Шахов

Некрасова С.О.
Использование пакета STAR-CD в задачах гидрогазодинамики.
Н48 **Часть I. Начальный курс** : учеб. пособие / С.О. Некрасова, А.А. Диденко, В.В. Бирюк. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 125 с. : ил.

ISBN 5-7883-0489-X

Изложены основы использования информационных технологий механики в ракурсе применения инженерного пакета STAR-CD для расчета задач гидрогазодинамики, приведен пример его использования в лабораторном практикуме. Пособие содержит описание и инструкции по всем основным этапам осуществления CFD моделирования в рамках данного пакета STAR-CD, что позволяет освоить широкий круг прикладных задач гидрогазодинамики.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям 160301 – «Авиационные двигатели и энергетические установки», 160302 – «Ракетные двигатели», 140501 – «Двигатели внутреннего сгорания», по учебной дисциплине «Механика жидкости и газа». Может быть полезно аспирантам, инженерам и научным работникам.

УДК 004.9

ББК 32.97

ISBN 5-7883-0489-X

© Некрасова С.О., Диденко А.А.,
Бирюк В.В., 2006
© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2006

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Основные принципы CFD моделирования в вычислительной гидродинамике	9
2. Пространственное описание и дискретизация объема	12
2.1. Определение области решения	12
2.2. Построение сетки	13
2.3. Создание сетки – основные подходы	14
2.3.1. Построение простых сеток.....	14
2.3.2. Экструзия	16
2.3.3. Создание двухмерной сетки с помощью шаблонов	18
2.3.4. Блочный метод построения	20
3. Задание параметров течения и свойств материала	25
3.1. Природа течения	25
3.2. Теплофизические свойства.....	26
3.3. Силовые поля и источники энергии	26
3.4. Задание свойств и термофизических моделей с помощью панелей STAR GUIde	27
3.4.1. Задание тепловых опций	30
3.4.2. Задание молекулярных свойств среды	31
3.4.3. Задание термофизической модели	37
3.4.4. Задание контрольных и опорных данных для модели ..	39
3.4.5. Задание свойств дополнительных скаляров.....	40
3.4.6. Задание свойств для среды – твердое тело.....	41
4. Начальные условия.....	43
5. Описание границ.....	45
5.1. Положение границы.....	45
5.2. Граничные условия	46
6. Контроль над численным решением.....	49
6.1. Выбор процедуры решения	49
6.2. Расчет переходных процессов с использованием алгоритма PISO	50
6.3. Расчеты устойчивых состояний с использованием алгоритма PISO (метод итераций).....	52
6.4. Расчеты устойчивых состояний с использованием алгоритма SIMPLE.....	53
6.5. Расчеты стационарных течений с использованием алгоритма SIMPISO	54
6.6. Влияние ошибок округления	55
6.7. Выбор решателя линейных уравнений.....	56

7. Мониторинг процесса решения.....	57
8. Проверка и оценка модели.....	59
9. Пост-процессинг данных (обработка результатов)	62
9.1. Введение	62
9.2. Загрузка данных и настройка их вывода.....	62
9.3. Пост-процессорная обработка изображений	68
9.4. Вывод изображения на экран.....	70
9.5. Действия с изображением	72
9.6. Операции с данными	73
9.7. Представление результатов для отчета.....	77
9.8. Отображение и копирование результатов.....	79
9.9. Представление результатов в виде графиков	81
10. Исследование течения жидкости в квадратной полости с подвижной стенкой.....	86
10.1. Введение	86
10.2. Теоретические основы исследования.....	87
10.3. Практическая часть	89
10.3.1. Подготовка к созданию модели.....	89
10.3.2. Создание сетки.....	89
10.3.3. Задание границ.....	90
10.3.4. Задание свойств среды	92
10.3.5. Задание граничных условий	94
10.4. Подготовка к решению модели.....	95
10.4.1. Управление решением задачи	95
10.4.2. Управление выводом.....	96
10.5. Проверка модели.....	96
10.6. Финальные действия.....	97
10.7. Обработка результатов расчета в PROSTAR.....	99
10.7.1. Подготовка	99
10.7.2. Загрузка файла с результатами расчета	99
10.7.3. Построение поля вектора скорости.....	99
10.7.4. Построение поля давления.....	101
10.7.5. Построение поля линий тока	102
10.7.6. Построение профиля скорости U	102
10.7.7. Построение профиля скорости V	111
10.7.8. Расчет комплекса f	118
10.8. Применение утилиты PLOT для оформления результатов расчета.....	122
10.9. Приложение.....	123

ВВЕДЕНИЕ

STAR-CD является мощным инструментом CFD теплогидравлических расчетов и был разработан для использования в САЕ среде. Перечислим основные атрибуты данного пакета:

- Независимый, полностью интегрированный пакет программ с удобным пользовательским интерфейсом, включающим возможности пре-процессинга, расчета и пост-процессинга.
- Полная функция моделирования геометрии, охватывающая даже самые сложные формы объектов, часто встречающихся в промышленности.
- Расширенные возможности автоматического наложения сетки для сложной геометрии либо при помощи встроенных инструментов (таких, как Pro*amTM), либо через связанные генераторы сетки, такие, как ICEM CFD TetraTM.
- Встроенные модели самого широкого и постоянного обновляющегося диапазона явлений в потоке, включая переходные процессы, сжимаемость, турбулентность, тепло- и массоперенос, химические реакции и многофазность потока.
- Быстрые и точные методики нахождения решения, повышающие достоверность и уменьшающие издержки при использовании вычислительной техники.
- Простые в использовании функции для создания и запуска даже очень больших CFD моделей с использованием внедренных методик параллельного расчета.
- Встроенные возможности соединения с наиболее распространенными CAD/CAE системами, включая PATRANTM, IDEASTM, ANSYSTM.

STAR-CD система разработана Computational Dynamics Limited. Система включает в себя основной код расчета, STAR (название STAR от Simulation of Turbulent flow in Arbitrary Regions), а также коды для пре-процессора и постпроцессора, PROSTAR.

STAR-CD был разработан инженерами для инженерных промышленных расчетов. Для работы с пакетом не требуется никаких специальных знаний по CFD, хотя желательно понимание общих основ возможностей и ограничений. Структура STAR-CD, включая его встроенные возможности соединения с основными CAD системами, позволяет свободно встраиваться в CAE среду. При работе в такой среде STAR-CD предоставляет такую же степень гибкости и удобства для пользователя, как и уже хорошо известные коды структурного анализа.

В настоящее время описываемые в STAR-CD типы явлений в потоках включают в себя:

- **Устойчивые и переходные процессы** – используются эффективные, оптимизированные конечно-объемные алгоритмы решения для каждого класса проблем.

- **Ламинарные и турбулентные течения** – в случае турбулентного течения имеется целый ряд моделей турбулентности, включая модели с низким числом Рейнольдса, двухслойные, нелинейные RNG и LES модели.

- **Неньютоновское и Ньютоновское течения** – с помощью базовых соотношений и возможностей пользовательского программирования альтернативных функций может рассматриваться неньютоновское течение.

- **Сжимаемые и несжимаемые потоки** – внутри сжимаемого режима алгоритмы решения позволяют вручную управлять всеми скоростями потока, включая около- и сверхзвуковые.

- **Теплоперенос (Конвекция, Теплопроводность и Радиация)** – все эти механизмы могут существовать индивидуально или вместе. Например, можно сочетать вопросы теплопереноса одновременно с конвекцией потока и теплопередачей твердого тела. Моделирование радиации воспроизводит эффект любой прозрачной твердой области внутри модели, а также учет

излучающих свойств промежуточной жидкой среды и каких-либо твердых частиц, присутствующих в ней.

- **Массоперенос** – программой могут рассматриваться смеси газов или жидкостей, состоящих из не более 50 химических веществ.

- **Химические реакции (включая горение)** – имеется несколько встроенных опций для расчета химически реагирующих потоков, включая и те, которые контролируются химической кинетикой или/и турбулентным смешением. В последнем случае, акцент делается на турбулентное горение и его самые последние модели. Также имеется ряд моделей для специального моделирования процессов горения угля.

- **Распределенное сопротивление (пористая среда)** – существует возможность моделирования сопротивления для объема или плоскости для представления потока в пористой среде, теплообменниках, химических реакторах и т.д. Сопротивление может быть и не изотропным.

- **Действие сил на поток (плаваемость) и Вращение** – программа имеет встроенные функции для расчета потоков с действием на них массовых сил, а также возможности написания пользователем программ для добавления сил. Опция вращения – одна из нескольких особенностей, которые делают удобным использование кода для применения в случае вращающихся машин и механизмов.

- **Течение со свободной поверхностью и Кавитация** – STAR может быть использован для вопросов, требующих одновременного CFD анализа областей с высоко- и низкомолекулярной жидкостью, а также их контакта. Моделирование касается вопросов сил натяжения поверхности жидкости и применяет специальную схему дискретизации, при которой исключены фазовые взаимодействия. Проблемы кавитации моделируются при помощи расширения алгоритмов со свободной поверхностью.

- **Множественные потоки** – STAR имеет возможность одновременного расчета множественных независимых потоков, каждый из которых может быть отдельной жидкостью, и все они могут взаимодействовать термически через разделяющие их стенки. Типичным примером применения таких потоков могут служить теплообменники.

- **Дисперсные многофазные потоки** – можно проводить расчет многофазных систем, содержащих частицы, пузырьки или капли в сплошной жидкой фазе, с учетом перехода тепла, массы и момента движения между фазами.

PROSTAR – это интерактивный, командно- и с помощью меню управляемый комбинированный пре-процессор и пост-процессор с функцией он-лайн помощи. Его основные функции включают в себя:

- Моделирование Геометрии и Создание Сетки
- Описание Проблемы (например, задание свойств жидкости, граничных условий, параметров контроля и т.д.)
- Вывод и Управление Результатами
- Управление Файлами
- Соединение с Внешними CAD/CAE системами
- Специальный графический интерфейс (STAR GUIde), направляющий пользователя от стадии к стадии при задании CFD модели.

В ряде случаев авторы пособия ссылаются на литературные источники, предоставленные представителями разработчика программного продукта STAR-CD, а именно книгу «Специализированный пакет прикладных программ вычислительной гидродинамики STAR-CD»:

Часть I. Методология применения пакета STAR-CD версия 3.15;

Часть II. Руководство пользователя пакета STAR-CD версия 3.15.

1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ CFD МОДЕЛИРОВАНИЯ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКЕ

Цель данного раздела – познакомить пользователя с наиболее важными вопросами, с которыми он столкнется при постановке и решении задач по термогидравлике с использованием CFD кода. Предполагается, что пользователь знаком с материалами, содержащимися в книге «Методология применения пакета STAR-CD».

Процесс компьютерного моделирования течения обычно не начинается непосредственно с использования CFD кода. Очень важно понимать, что STAR-CD – это всего лишь инструмент, призванный помочь инженеру в понимании физического явления. Успех или неудача при моделировании жидкой или газообразной среды зависит не только от возможностей программы, но и от исходных данных, таких, как:

- Геометрия области течения,
- Свойства жидкости или газа,
- Граничные условия,
- Параметры контроля за ходом решения.

Чтобы моделирование имело шансы на успех, эта информация должна быть физически реалистичной и в правильной форме представлена в программе.

Моделированию задачи по вычислительной гидродинамике должны предшествовать следующие шаги:

- Сформулируйте задачу в физических терминах.
- Определите объем имеющейся информации, ее достаточность и адекватность.
- Оцените возможности и средства CFD пакета, чтобы убедиться, что задача правильно сформулирована и может быть численно решена программой.
- Тщательно спланируйте стратегию моделирования, используя метод пошагового приближения к финальному решению.

Основной процесс моделирования

Процесс моделирования можно разделить на четыре основных этапа.

Этап 1 – Разработка стратегии моделирования

На этом этапе необходимо точно определить геометрию физической системы, свойств материалов и параметры потока, основываясь на хорошем понимании физики явления. Первый этап включает следующие задачи:

- Планирование вычислительной сетки (количество ячеек, распределение размеров ячеек и т.д.).
- Оценка численных величин для соответствующих физических параметров (например, плотность, вязкость, удельная теплоемкость и т.д.).
- Выбор моделирующей опции, наиболее подходящей для данного случая (например, турбулентная модель, модель горения и т.д.).

Пользователь также должен сопоставить требования физической и численной точности со стоимостью и затратами на моделирование и вычислительными возможностями своей системы. Стратегия моделирования должна представлять компромисс между этими двумя факторами.

Этап 2 – Задание модели течения с использованием PROSTAR

Основные задачи на данном этапе:

- Создание расчетной сетки для отображения области течения (модельная геометрия).
- Определение термо-физических свойств жидкостей, газов и/или твердых тел, участвующих в моделировании, и там, где нужно, – модели (или моделей) турбулентности, массовых сил и т. д.

- Установка параметров решения (выбор переменных решения, коэффициентов релаксации и т.д.) и форматов выходных данных.

- Определение расположения и описания границ, а для задач по моделированию неустановившихся течений – дальнейшее описание переходных граничных условий и шагов по времени.

- Подготовка соответствующих файлов в качестве выходных данных для аналитического расчета на следующем этапе.

Этап 3 – проведение анализа течения с использованием пакета STAR-CD

Этот этап состоит из:

- Чтения входных данных, созданных в PROSTAR, и при рестарте – результатов прошлых расчетов.

- Оценки прогресса расчетов, путем анализа различных данных и статистики решений, приведенных в STAR-CD.

Этап 4 – Пост-обработка результатов с использованием препроцессора PROSTAR

Этот этап включает отображение и обработку выходных данных, созданных пакетом STAR-CD, с использованием соответствующих функций препроцессора PROSTAR.

2. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ И ДИСКРЕТИЗАЦИЯ ОБЪЕМА

Один из основных шагов при подготовке CFD модели – описание геометрии задачи. Две ключевые составляющие этого описания следующие:

- Определение габаритных размеров и формы области течения, относительно которой и решаются все основные уравнения.
- Покрытие области сеткой, состоящей из дискретных, конечных и смежных объемных элементов, или ячеек.

Этот процесс называется дискретизацией объемов и является важной частью численного решения вышеупомянутых уравнений. В STAR-CD обе составляющие пространственного описания выполняются как часть одной операции – построения сетки конечных объемов, – но рассматриваются с различных позиций.

2.1. Определение области решения

Благодаря своему внутреннему строению и структуре, STAR-CD дает возможность широкого и гибкого определения того, что является областью решения. Это может быть:

- поле тока жидкости, газа и/или теплового потока, занимающее открытую область или пространство;
- жидкость, газ и/или тепловая энергия, текущие через пористую среду;
- тепловая энергия, текущая через твердое тело.

Можно также задать произвольную комбинацию этих трех основных видов переноса в рамках одной модели, как, например, при анализе сопряженного теплообмена. Поэтому первая задача пользователя – определить, какие участки моделируемой системы необходимо включить в область решения и какой средой заполнен каждый участок. Каким бы ни было сочетание, главное требование к области решения – это то, что она должна быть последовательна. Это означает, что пользователь должен тщательно изучить геометрию своей системы и точно определить положение границ.

2.2. Построение сетки

Построение сетки, состоящей из конечно-объемных ячеек, для представления области решения – это задача, которая обычно занимает больше всего времени при создании CFD модели. Этот процесс значительно облегчается использованием пакета STAR-CD, благодаря его способности

- генерировать широкий спектр базовых форм ячеек,
- использовать *неструктурированные сетки*.

Это значит, что всегда можно сделать так, чтобы сетка точно соответствовала форме области решения без необходимости генерирования «пассивных» или «пустых» ячеек.

При создании конечно-объемных сеток пользователь должен стремиться точно представить две следующие особенности объекта:

1. Полную *внешнюю геометрию* расчетной области, путем задания соответствующих размеров и форм пограничных ячеек. Наружные поверхности последних вместе составляют поверхность, которая адекватно представляет форму границ расчетной области. Могут возникать небольшие неточности из-за того, что все поверхности ячеек (включая прямоугольные поверхности) состоят из треугольных граней. Эти неточности уменьшаются при применении встроенной процедуры измельчения и повышения качества сетки.

2. *Внутренние свойства* режима течения. Это достигается путем тщательного контроля за разбивкой сетки внутри внутренней части расчетной области, таким образом, что сетка наиболее сгущена в местах, где параметры потока изменяются наиболее быстро. Пристеночные области очень важны, необходима высокая плотность сетки, чтобы получить течение вблизи стенки. Этот вопрос подробно рассматривается в гл. 3 *Руководства пользователя*.

2.3. Создание сетки – основные подходы

Существует три основных подхода к созданию сетки в PROSTAR:

- Простейшие геометрические структуры (геометрические примитивы)
- Экструзия (выдавливание) двумерных образов
- Блочный подход к созданию сетки

2.3.1. Построение простых сеток

Отдельные части сетки с регулярной структурой могут быть созданы с помощью всего одной операции. Форма сетки при этом определяется используемой системой координат.

Если геометрия задачи может быть разделена на такие простые области, то это самый быстрый способ создания сетки.

Простые сетки такого типа могут быть созданы с помощью STAR GUIde (**Create and Import Grids > Create Grids > Create 3-D Grids using Simple Shapes**).

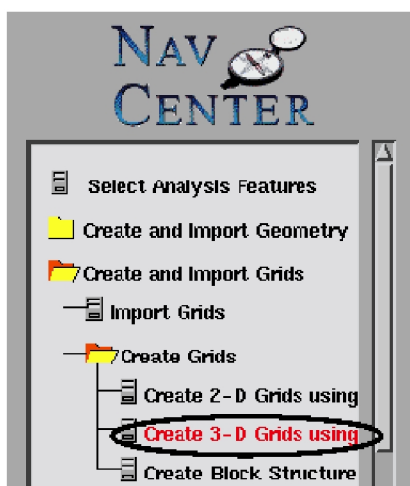


Рис. 2.1. Панель графического интерфейса пользователя для построения сеток

Соответствующая панель показана выше. Ей соответствует команда VC3DGEN. Помните, что команда создает блок сетки из ячеек того типа, который активен в данный момент, в активной системе координат (активный тип ячеек и активная система координат задаются командами `ctype` и `csys`).

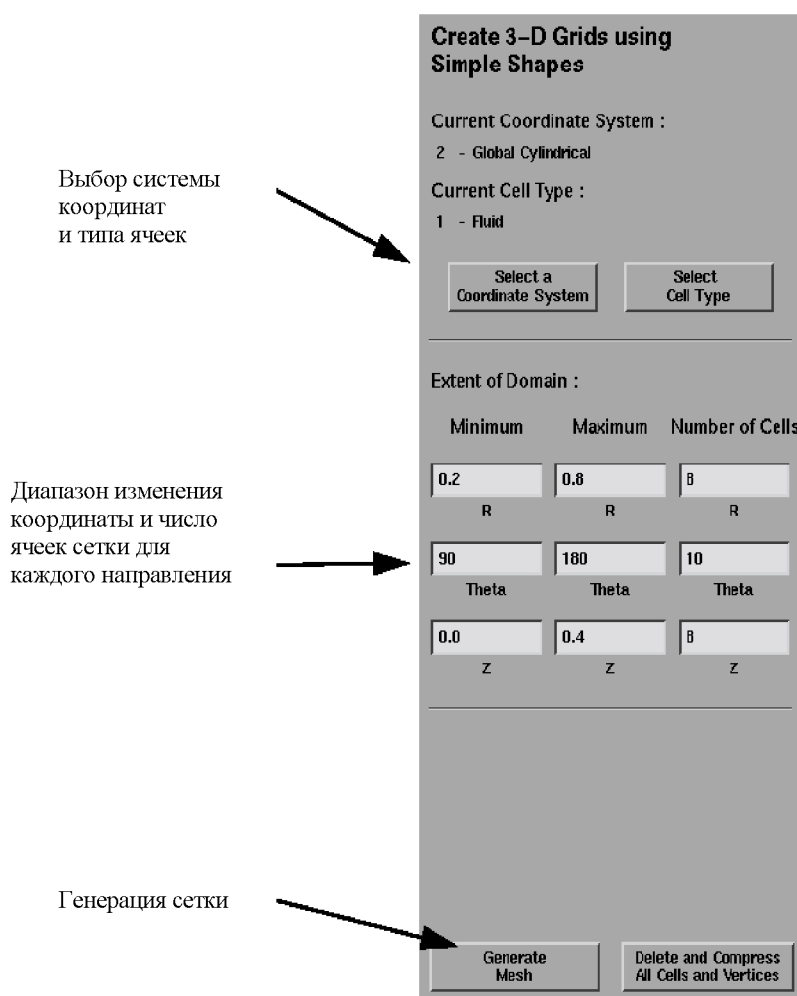


Рис. 2.2. Последовательность действий при построении сеток

2.3.2. Экструзия

Экструзия – это «выдавливание» двумерного образа сетки.

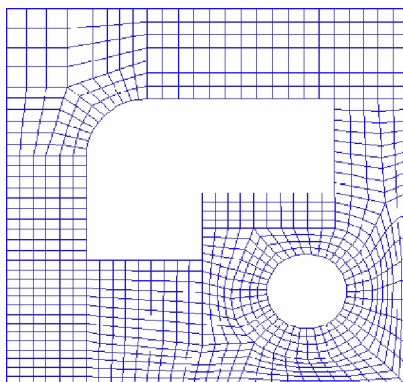


Рис. 2.3. Двухмерный образ сетки, созданный из плоских ячеек типа оболочка (shell)

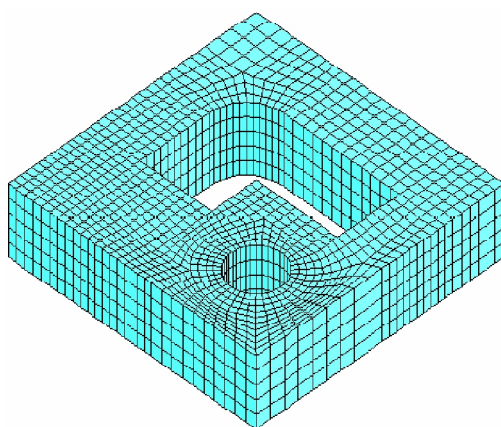


Рис. 2.4. Экструзия двумерной сетки для получения трехмерной сетки

Двумерная геометрия формируется из плоских ячеек типа оболочка (shell). В простейшем случае двумерные сетки создаются в STAR GUIde системе с помощью панели **Create and Import Grids > Create Grids > Create 2-D Grids using Simple Shapes** (или с помощью команды VC2DGEN).

2.3.3. Создание двумерной сетки с помощью шаблонов

В более сложных случаях, когда ребра расчетной области являются сложными кривыми или опорная двумерная поверхность не является поверхностью постоянного значения какой-либо координаты, можно воспользоваться командой `patch`, которая генерирует структурированную двумерную сетку – шаблон. Границы таких шаблонов описываются пространственными сплайнами, если сплайн содержит в себе излом (угловую точку), то одна из вершин генерируемой двумерной сетки обязательно будет совпадать с угловой точкой с целью максимально точного воспроизведения геометрии.

Вершины ячеек на границе двух двумерных областей автоматически не сливаются, т.е. для объединения двух областей сетки в единое целое необходимо дополнительно выполнить операцию объединения (*merge*) (**Creat and Import Grids > Assemble Grids**). Отдельные оболочки можно создавать с помощью команд `s` и `cdx`. Качество двумерной сетки можно улучшить с помощью операции сглаживания (*smooth*) (**Check and Fix Grid > Fix Grid Problems**) или непосредственных манипуляций вершинами, определяющими оболочки.

Двумерная сетка задается диапазоном изменения двух первых координат активной системы координат (например, X и Y для декартовой системы координат; R и θ для цилиндрической системы координат). Это значит, что сетка будет лежать в плоскости третьей координаты (например, Z). Примеры приведены на следующей странице.

Для решения двумерных (плоских или осесимметричных) задач генерируется пространственная сетка толщиной в одну ячейку, причем для плоской задачи сетка автоматически дополняется граничными условиями симметрии, а для осесимметричных – граничными условиями циклической симметрии. Ячейки и граничные условия генерируются после нажатия на кнопку

Generate 3-D mesh from 2-D Mesh на панели, показанной выше. При этом оболочки трансформируются в объемные ячейки толщиной в 10% от максимального линейного размера исходной двумерной сетки.

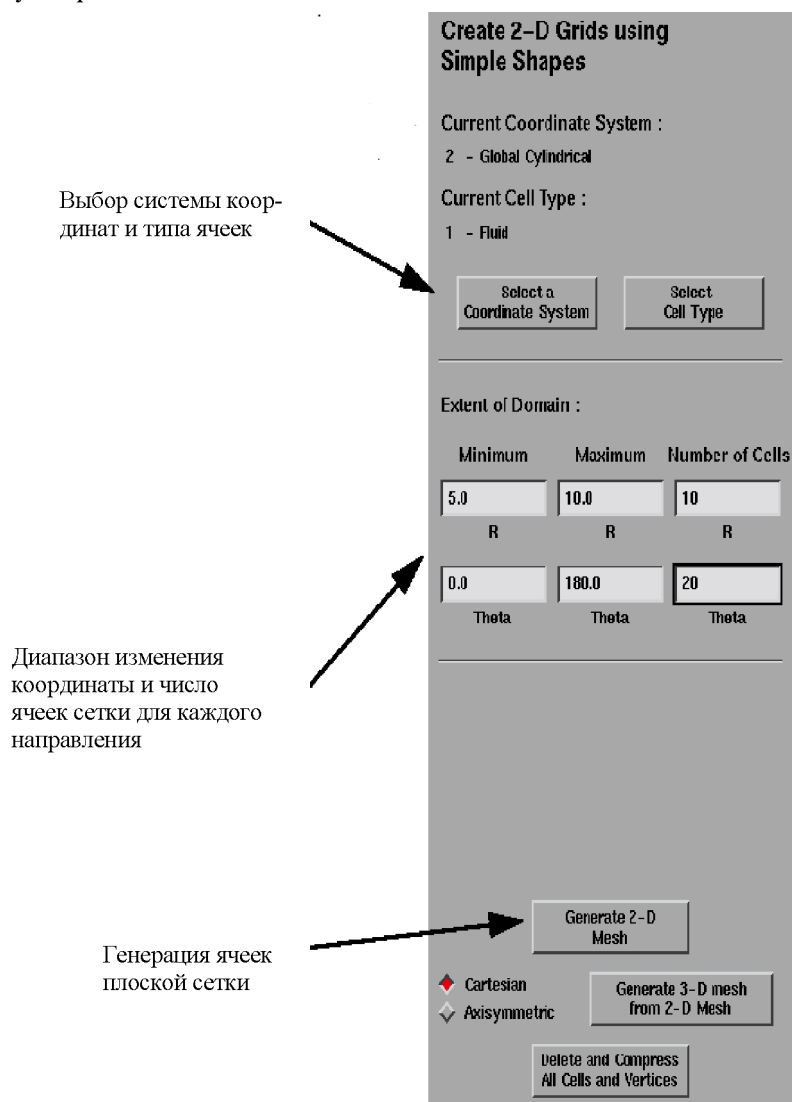


Рис. 2.5. Основные кнопки, используемые при создании сетки с помощью шаблонов

Участок структурированной сетки, сформированный с помощью команды patch

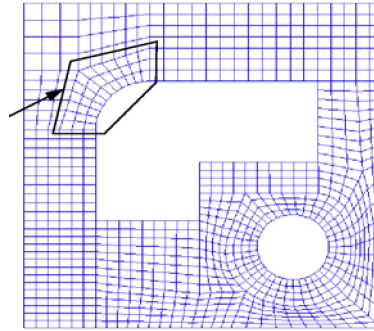


Рис. 2.6. Пример создания двумерной сетки с помощью шаблонов (patch)

Шаблоны задаются четырьмя вершинами, которые определяют его углы, а стороны определяются сплайнами, соединяющими угловые вершины. Дополнительные «углы» могут быть введены как точки излома сплайнов-сторон, как показано на рис. 2.6. Помимо номеров вершин, определяющих углы шаблона, для команды `patch` необходима информация о числе ячеек по каждому направлению. Отметим, что в общем случае шаблон представляет собой искривленную пространственную поверхность любой геометрической сложности и не обязан принадлежать какой-либо плоскости.

Созданный слой двумерных оболочек можно экструдировать (выдавить) в трехмерную объемную сетку. Это делается с помощью команды `vcxtrude`. Команда `vcxtrude` работает следующим образом: создается копия набора вершин, определяющих ячейки-оболочки опорной двумерной сетки. Номера вершин при этом отличаются от исходных на заданную величину. Затем созданные вершины смещаются на заданное расстояние. На основе двух наборов вершин создаются объемные ячейки. Затем процесс создания вершин и ячеек повторяется заданное число раз.

Тот факт, что номера соответствующих вершин в каждом слое отличаются на постоянную заданную величину можно использовать для модификации однородной сетки в неоднородную

по направлению выдавливания. Это можно сделать с помощью команды `vfill`. (Примечание: Начиная с версии 3.15 команда `vcxtrude` позволяет сразу создавать неоднородную сетку.)

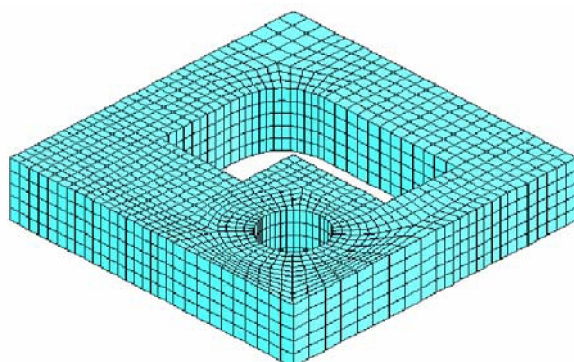


Рис. 2.7. Конечный вид получившейся сетки

2.3.4. Блочный метод построения

Использование *блочной технологии* предполагает разбиение расчетной области на несколько регулярных трехмерных блоков. Создание сетки с помощью блоков является достаточно эффективным и универсальным подходом. На рисунке приведен пример построения сетки вокруг профиля, расположенного над усеченным конусом (показаны два вида).

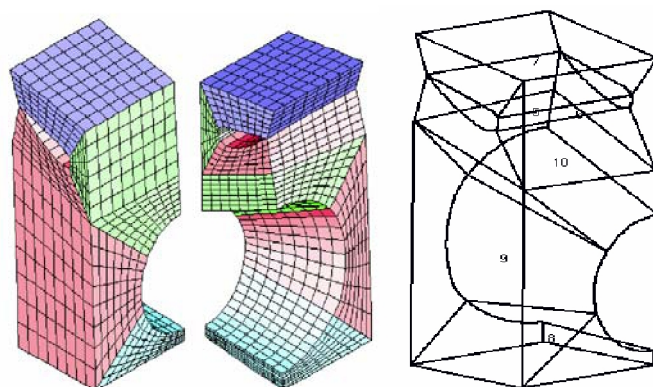


Рис. 2.8. Разбиение модели на блоки и нумерация блоков

Ячейки, принадлежащие шести различным блокам, имеют разный тип и окрашены в разный цвет. Контуры и нумерация блоков, на базе которых генерировалась сетка, показаны на рис. 2.8.

В PROSTAR блок является самостоятельным примитивом, так же как вершина, сплайн или ячейка. Свойства блоков во многом аналогичны ячейкам – каждый из них имеет свой номер и их можно группировать в наборы. При смещении вершины, задающей угол блока, а также при изменении формы сплайна между двумя углами форма блока изменяется. (*Примечание: Изменение формы блока после генерации сетки не влияет на сетку!*)

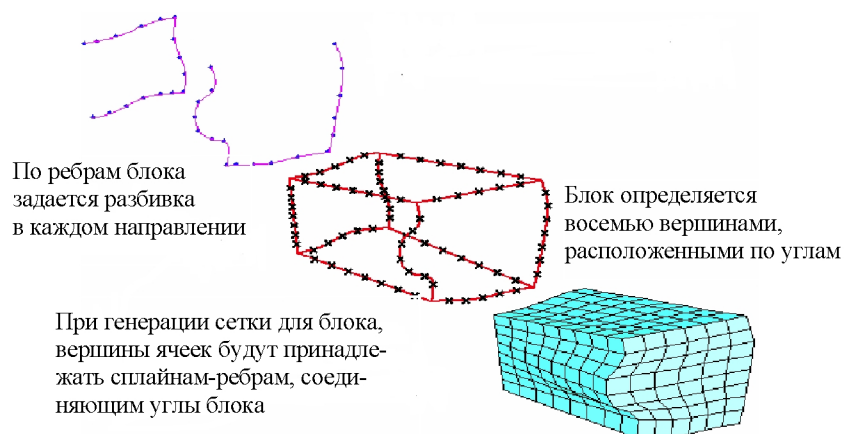


Рис. 2.9. Этапы построения блока

Для создания блоков и работы с ними удобно использовать STAR GUIde

На вкладке **Blocks** пользователь может воспользоваться следующими опциями:

Creat Block – создание блока, предлагается выбрать восемь угловых вершин блока;

Modify Block – изменить одну или несколько опорных вершин блока;

Delete Block – уничтожить блок;

Block Plot – отрисовать блок и его разбивку на ячейки, без выполнения генерации сетки.

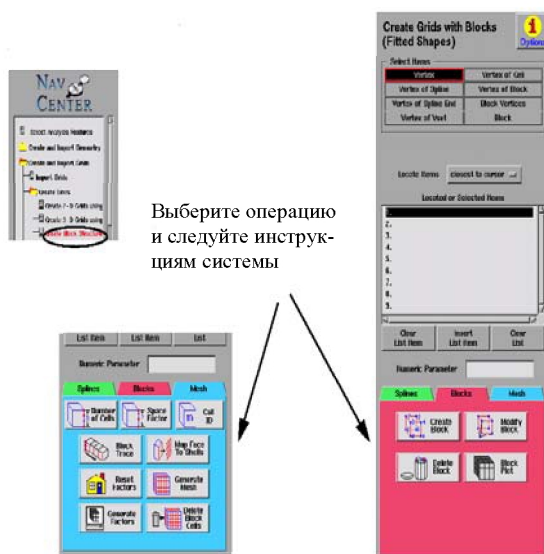


Рис. 2.10. Пример использования панели *Create Grids with Blocks*

Во вкладке **Mesh** пользователь может воспользоваться следующими опциями:

Number of Cell – задание числа разбиений на ячейки вдоль ребра блока;

Space Factor – задание коэффициента сгущения сетки вдоль ребра;

Block Trace – передача разбивки ребра блока всему текущему набору. Эта операция гарантирует полную совместимость в топологии сетки нескольких сопряженных блоков;

Map Face To Shell – совместить грань блока с заданным набором оболочек. При этом вершины генерируемых ячеек будут совпадать с поверхностью, определяемой оболочками;

Generate Factors – задание разбивки вдоль ребра блока посредством задания номинального размера ячейки для этого ребра;

Generate Mesh – генерация сетки по параметрам блока;
Delete Block Cells – уничтожение ячеек, сгенерированных для блока.

Помните, что список *Selected Items* изменяется в зависимости от выбранной операции.

Параметры блока можно проверить и изменить при помощи диалогового окна *Block List* из меню **List > Blocks**

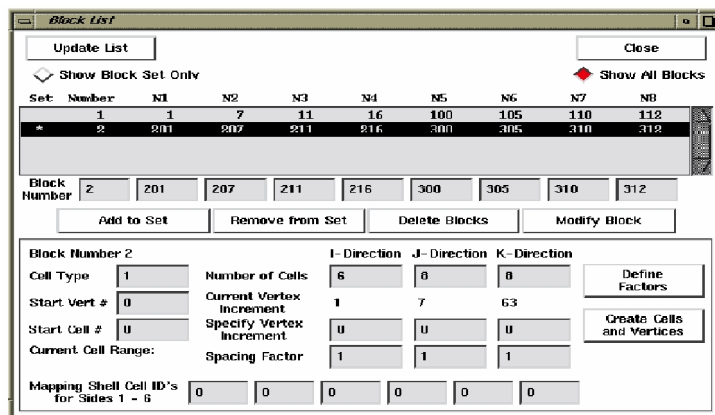


Рис. 2.11. Диалоговое окно *Block List* из меню **List > Blocks**

Кроме того:

- Вершины-углы, формирующие блок, перечисляются как N1, N2, ... N8.

- Помните, что существуют дополнительные опции, реализуемые через данное диалоговое окно, которые отсутствуют в системе STAR GUIde (как, например, начальный номер вершин *Start Vert #*, начальный номер ячеек *Start Cell #* и т.д.).

- Номер типа ячеек, которые будут созданы для блока, задается в поле *Cell Type*.

- По окончании изменения параметров блока необходимо нажать на кнопку *Define Factors*.

В процессе создания сетки пользователь может комбинировать все три способа.

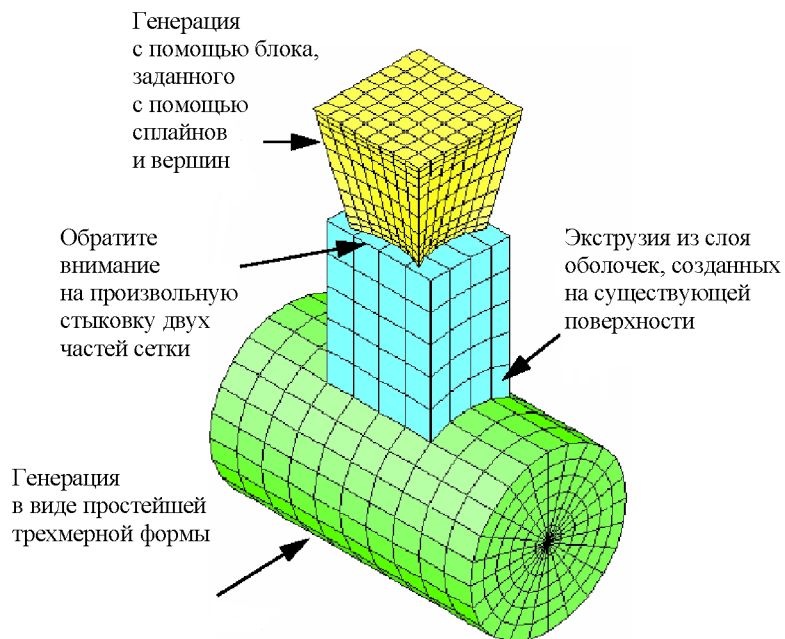


Рис. 2.12. Пример использования комбинации всех трех способов

Пользователю нет необходимости создавать сетку, используя только один из описанных подходов. Точно так же создаваемые в PROSTAR сетки могут свободно комбинироваться с сетками, которые созданы во внешних пакетах (таких, как ICEM Tetra, SAMM, IDEAS, PATRAN и т.д.).

3. ЗАДАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА

Правильное задание физических параметров течения и свойств материалов является важным условием получения правильного решения задачи или, точнее, получения вообще какого-либо решения. Это также важно, чтобы определить, может ли задача быть смоделирована пакетом STAR-CD. Поэтому, пользователь должен убедиться, что задача правильно задана относительно:

- природы течения (например, стационарная/неустановившаяся, ламинарная/турбулентная, несжимаемая/сжимаемая),
- термодинамических свойств (например, плотности, вязкости, удельной теплоемкости),
- внешних силовых полей (например, гравитационных и центробежных сил) и источников энергии, если таковые имеются,
- начальных условий для переходных течений.

3.1. Природа течения

Очень важно понимать природу анализируемого течения для того, чтобы выбрать подходящие математические модели и алгоритмы численных решений. Если выбор сделан неверно, то могут возникнуть проблемы, как в примерах, перечисленных ниже:

- Использование алгоритма итеративного, стационарного течения для задачи, которая в основе своей нестационарная, например «срыв» вихрей за плохо обтекаемым телом;
- Получение турбулентного течения без использования соответствующей модели турбулентности;
- Моделирование неустановившегося течения с использованием одной из моделей турбулентности, которая в настоящее время имеется в STAR-CD. Ни одна из них не может точно представить неустановившееся поведение.

3.2. Теплофизические свойства

Задание физических свойств, таких, как плотность, молекулярная вязкость, теплопроводность и т.п., зависит от природы рассчитываемых течений или твердых тел, а также от условий их использования. Например, STAR-CD содержит несколько встроенных уравнений состояния, из которых плотность можно вычислить как функцию одной или нескольких переменных:

- давления,
- температуры,
- состава жидкости или газа.

Во всех случаях, где используются сложные вычисления для определения свойств материала, рекомендуются следующие меры:

- должны быть определены относительные переменные поля, соответствующие приемлемым начальным и граничным величинам;
- где необходимо, свойства должны быть вычислены вместе с переменными поля как часть общего решения;
- в случае сильных зависимостей между свойствами и переменными поля пользователь должен учитывать значение коэффициента нижней релаксации, как описано в *Методологии* (гл. 7 «Скалярные уравнения переноса»);
- когда необходимо, можно использовать имеющуюся в STAR-CD возможность альтернативных функций, программируемых пользователем.

3.3. Силовые поля и источники энергии

Как уже отмечалось, пакет STAR-CD имеет встроенную функцию вычисления массовых сил, возникающих в результате:

- естественной конвекции,
- вращения.

Важно помнить, что, поскольку интенсивность массовых сил увеличивается относительно вязкостных сил (или турбулентных) напряжений, течение может быть физически неустойчивым. В этом случае рекомендуется переключиться в режим неустановившихся решений.

Также можно ввести дополнительные, внешние силовые поля и источники энергии посредством программируемых пользователем возможностей STAR-CD. В таких случаях важно понимать физический смысл и избегать задание условий, которые ведут к физической или численной неустойчивости. Примеры таких условий:

- Источники тепловой энергии, которые линейно увеличиваются с увеличением температуры, могут приводить к *физической неустойчивости*, называемой «тепловым убеганием».

- Задание коэффициента β_i в функции проницаемости $K_i = \alpha_i |v| + \beta_i$ таким образом, что его значение будет очень малым или равным нулю. Если локальная скорость жидкости или газа также станет очень малой, то результатом может явиться *неустойчивость численного решения*, когда небольшое возмущение давления влечет за собой большое изменение скоростей.

3.4. Задание свойств и термофизических моделей с помощью панелей GUIde

В подавляющем большинстве случаев CFD моделирования требуется задание только одного материала – жидкости. Тем не менее для задач сопряженного теплообмена (см. рис. 3.1), может встать необходимость в задании как минимум одного твердого тела, а возможно, и нескольких потоков. То есть потребуется задавать различные свойства расчетным ячейкам, в зависимости от того, из какого материала они состоят.

Панель *Thermophysical Models and Properties* предоставляет пользователю средства для задания моделей теплофизических свойств жидкостей и ввода констант, соответствующих тому или иному материалу. Так, например, для разных потоков в модели могут использоваться различные модели турбулентности. В связи с этим, перед заданием граничных условий, обязательным является определение теплофизической модели свойств жидкост(ей). В зависимости от модели жидкости, программа перестроится на запрос у пользователя дополнительной исходной информации, требуемой для формирования граничных условий и расчетной модели.

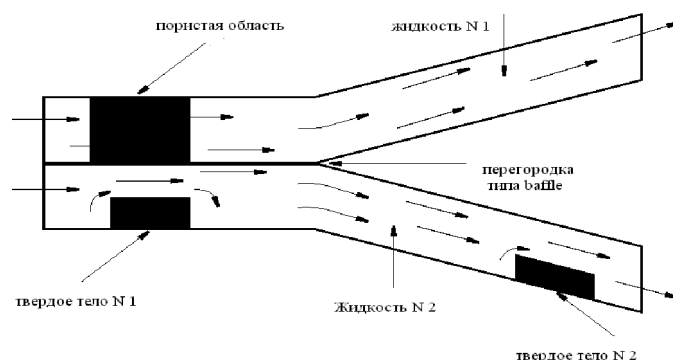


Рис. 3.1. Пример определения свойств среды для модели сопряженного теплообмена

Перед заданием свойств материалов необходимо просмотреть текущее состояние панели ячеек *Cell Table Editor* и убедиться в том, что в данный момент активизирован нужный набор (номер) ячеек. Номера свойств представлены в окне *Material Number*. К панели можно перейти через **Tool > Cell Tool... > Edit Types...** или нажав в главном окне на кнопку **СТАВ**.

Нужный материал может включать в себя ячейки нескольких типов. Однако в пределах одного потока возможна работа только с одним типом материала.

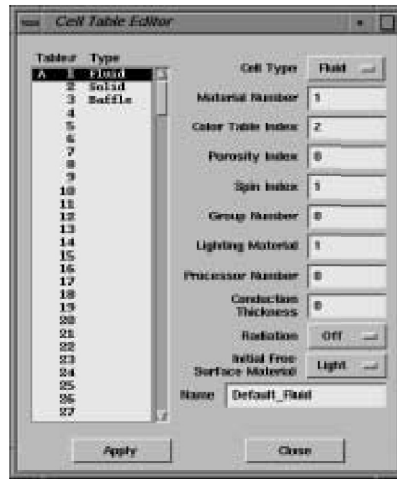


Рис. 3.2. Панель *Cell Table Editor*

Теплофизические модели и свойства материалов в программе задаются в разделе *Thermophysical Models and Properties*.

Раздел *Thermophysical Models and Properties* состоит из пяти папок-подразделов:

Thermal Options (тепловые опции) – подключает к решателю ряд специальных тепловых опций, необходимость активизации которых определяется задачей.

Liquids and Gases (жидкости и газы) – предоставляет пользователю возможность задания математических моделей свойств жидкости в сочетании с необходимыми константами.

Additional Scalars (дополнительные скаляры) – позволяет пользователю задавать скалярные переменные, которые дополняют глобальные установки.

Solids (твердые тела) – позволяет пользователю задавать физические свойства твердых материалов.

Porosity (пористость) – дает возможность задать пористые свойства ячейкам которые связаны с жидкостями, через соответствующие коэффициенты. По умолчанию эти коэффициенты равны нулю.

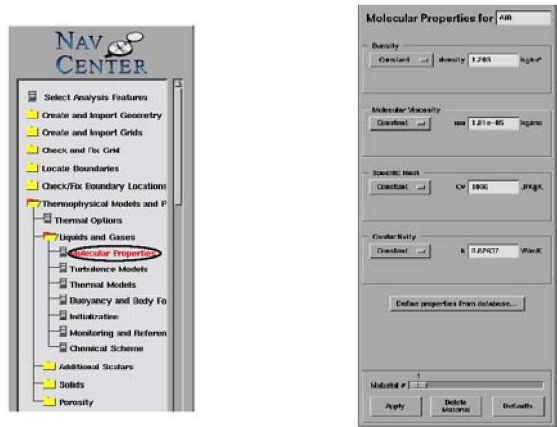


Рис. 3.3. Последовательность выбора панели *Thermophysical Models and Properties*

Свойства жидкости задаются применительно к материалам, которые состоят из ячеек жидкостного типа. То же самое касается и твердых тел. Для определения модели и свойств для каждого конкретного материала панель имеет переключатель бегункового типа – *Material #*, который позволяет пользователю в нужный момент осуществлять выбор.

3.4.1. Задание тепловых опций

С помощью панели *Thermal Options* пользователь может активизировать в процедуре расчета три дополнительных тепловых опции – тепловое излучение, солнечное излучение и сопряженный тепломассообмен.

Они активизируются глобально, т.е. применительно ко всей модели, а не к одному частному материалу. В рамках данного курса эти тепловые опции не рассматриваются, хотя более подробную информацию вы можете найти:

– по излучению: гл. 9 *Методологии*, гл. 11 *Руководства пользователя*,

– по сопряженному теплообмену: гл. 1, 14 *Методологии*, гл. 15 *Руководства пользователя*.

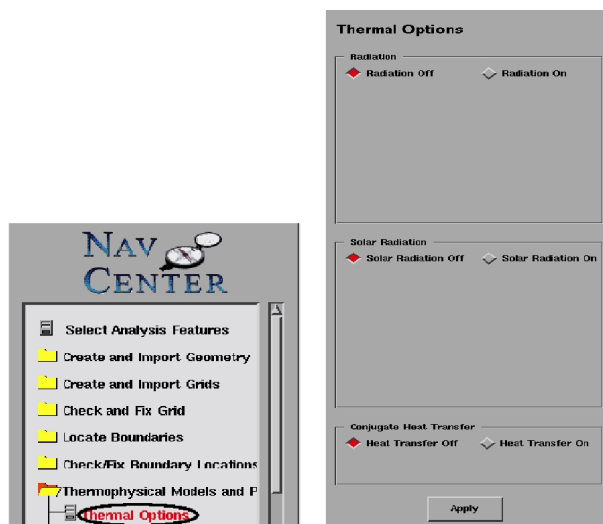


Рис. 3.4. Последовательность открытия панели *Thermal Options*

3.4.2. Задание молекулярных свойств среды

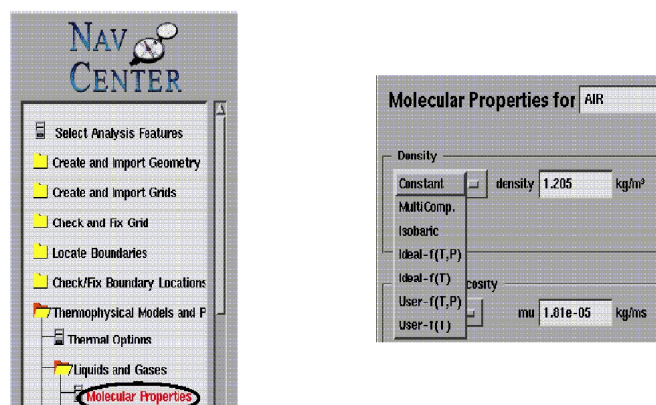


Рис. 3.5. Панели, используемые для задания плотности:
Liquids and Gases>Molecular Properties

Задание параметра «плотность». Математическая модель, описывающая закон изменения плотности жидкости может быть задана в следующей форме (см. уравнения гл. 1 *Методологии*):

- В виде постоянной величины – **Constant**.
- В виде функции от химического состава жидкости (при этом каждая компонента жидкости должна иметь постоянную плотность, и соответствующие им скаляры активизированы) – **MultiComp**. Величины описываются с помощью уравнения (1-32) гл. 1 *Методологии*.
- В виде функции от температуры при изобарическом законе изменения плотности – **Isobaric**. Эта формула включает в себя исходную плотность и коэффициент объемного расширения (уравнений (1-33), (1-34) гл. 1 *Методологии*).
- В виде функции идеального газа **Ideal-f(T,P)** или закона идеального газа без учета влияния давления **Ideal-f(T)**. Обе опции идеального газа будут учитывать присутствие эффекта изменения химического состава смеси, при этом обязательным условием является то, что скаляры являются активными. Опция **Ideal-f(T)** фиксирует давление идеального газа на уровне контрольной величины, задаваемой пользователем для данного материала (см. уравнение (1-35) гл. 1 *Методологии*).
- В виде функции от нескольких переменных, которая задается с помощью пользовательской подпрограммы – **User**.

Задание параметра «молекулярная вязкость». Математическая модель, описывающая закон изменения молекулярной динамической вязкости, может быть задана в одной из следующих форм (см. уравнения из гл. 1 *Методологии*):

- В виде постоянной величины – **Constant**.
- Ей можно пренебречь для проведения расчета без учета вязкости среды – **Inviscid**. Аналогичного результата можно добиться, если задать величину вязкости величиной в 1.0E-30.

В этом случае решатель автоматически перейдет на расчет невязкого потока для текущего материала.

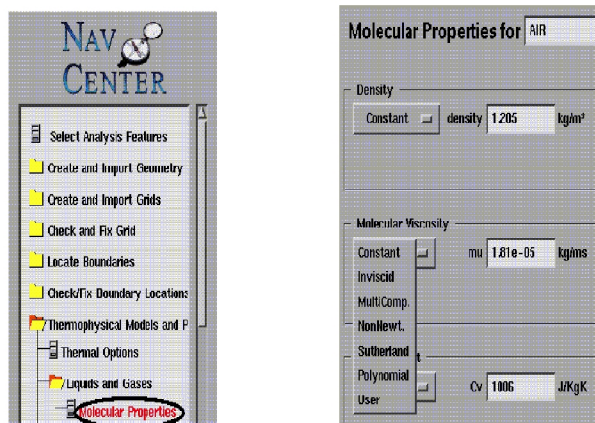


Рис. 3.6. Выбор панелей для задания свойств «плотность» и «молекулярная вязкость»

- Может варьироваться в зависимости от изменения химического состава жидкости (согласно уравнению (1-36) гл. 1 *Методологии* при обязательном наличии активных скаляров компонент **MultiComp**).

- Можно задать неньютоновский характер поведения в соответствии с моделью Оствальда-де Ваэле – **NonNewt**. Более полная информация – в гл. 14 *Методологии*.

- В виде функции температуры по закону Сазерленда (см. уравнения гл. 1 *Методологии*) – **Sutherland**.

- В виде функции температуры, задаваемой в виде полинома (см. уравнения гл. 1 *Методологии*) – **Polynomial**.

- В виде функции от нескольких переменных, которая задается с помощью пользовательской подпрограммы – **User**.

Если жидкость имеет переменную плотность, то задается параметр $C\rho$. Если плотность жидкости постоянна, то задается

параметр C_v . Теплоемкость жидкости может быть задана следующим образом (см. уравнения гл. 1 *Методологии*):

- В виде постоянной величины – **Constant**.
- В виде функции от химического состава жидкости (согласно уравнению 1-36) при условии наличия активных скаляров – **MultiComp**. Величины описываются с помощью уравнения (1-32).
- В виде функции температуры, задаваемой в виде полинома (см. уравнение (1-37)) – **Polynomial**.
- В виде функции от температуры и химического состава, задаваемой с помощью пользовательской подпрограммы – **User-Cp**.

Три ниже приводимые опции используются для изменения соотношения температуры и энтальпии:

- Энтальпия становится функцией температуры (и при необходимости активных скаляров), которая задается с помощью пользовательской подпрограммы – **User-H(T)**.
- Температура становится функцией энтальпии (и при необходимости активных скаляров), которая задается с помощью пользовательской подпрограммы – **User-T(H)**.
- Температура и энтальпия становятся функциями друг друга с помощью пользовательской подпрограммы – **User-Both**.

Теплопроводность жидкости может быть задана следующим образом (см. уравнения гл. 1 *Методологии*):

- В виде постоянной величины – **Constant**.
- В виде функции от химического состава жидкости (согласно уравнению 1-36) при условии наличия активных скаляров – **MultiComp**.
- В виде функции температуры, задаваемой в виде полиномиальной функции (уравнение 1-38) – **Polynomial**.
- В виде функции от произвольных переменных, задаваемых с помощью пользовательской подпрограммы – **User**.

PROSTAR имеет свою базу данных со свойствами наиболее часто моделируемых жидкостей. Данные внутренней базы данных хранятся в файле *props.dbs*. Для того чтобы воспользоваться имеющейся информацией, выберите нужную жидкость или газ из списка *Fluid Data Base* и нажмите на кнопку **Apply**.

Диалоговый список *Fluid Data Base* позволяет пользователю просматривать информацию в базе данных. Для просмотра данных пользователю необходимо выбрать интересующий его материал из списка, имеющегося на экране.

Если для описания какого-либо из свойств пользователь воспользуется опцией **Polynomial**, то это автоматически переключит работу на процесс задания аппроксимационного полинома с помощью панели *Polynomial Function Definition*.

Данная панель позволяет пользователю вводить коэффициенты аппроксимирующего полинома функций, описывающих свойства жидкости. Пользователю необходимо задать диапазон температур и соответствующие коэффициенты в специально предусмотренные для этого текстовые окна, а затем нажать на кнопку **Apply Coefficients**.

Для часто используемых материалов программа имеет свою внутреннюю базу данных коэффициентов теплоемкости – CHEMKIN и CEC.

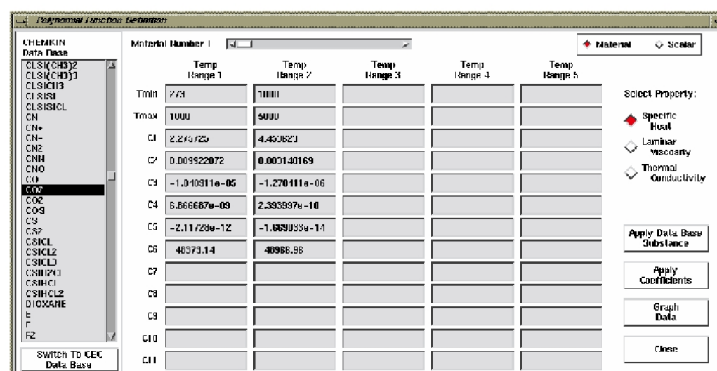


Рис. 3.7. Вид панели *Polynomial Function Definition*

Для того чтобы воспользоваться базой из списка *Data Base*, необходимо выбрать требуемый материал, после чего необходимо отжать кнопку на исполнение **Apply Data Base Substance**.

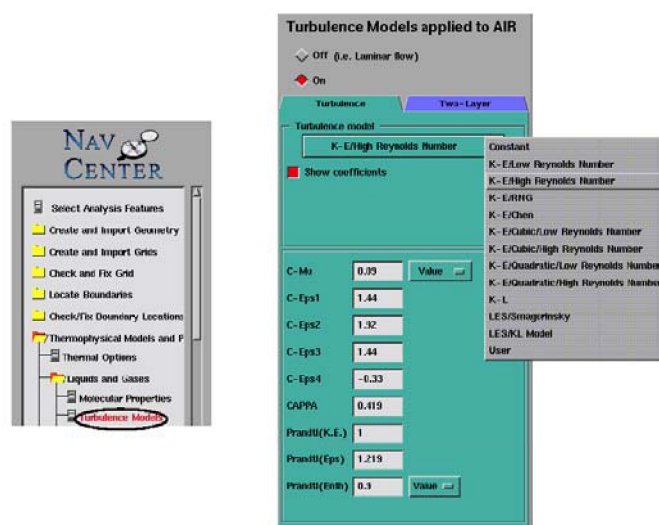


Рис. 3.8. Выбор модели турбулентности для среды

В случае необходимости использования в процессе моделирования жидкости одной из моделей турбулентности, последнюю активизируют для каждой жидкости по отдельности. Модель турбулентности выбирается из меню так, как это показано на приводимом выше рисунке. Специфика каждой модели обсуждается в гл. 2 *Методологии*. Пользователь может изменить любой из стандартных коэффициентов, задаваемых программой по умолчанию. Доступ к текстовым полям коэффициентов осуществляется выбором опции *Show Coefficients*. При этом следует проявлять крайнюю осторожность и четко представлять себе физический смысл производимых вами изменений.

Пользователю необходимо иметь в виду специфику пристеночных областей. Для них более предпочтительным является использование низкорейнольдсовых и LES моделей турбулент-

ности, так как в случае их использования может отпасть необходимость в дополнительной обработке. Для моделей с большими числами Рейнольдса такой тип расчета известен как «закон стенки» или «функция пристеночной области». Эти уравнения относятся к моделям нулевого уровня и описываются в гл. 6 *Методологии*. Вкладка *Two-Layer* позволяет пользователю подключить к расчету одну из многочисленных моделей нулевого уровня для описания пристеночной области. Список пристеночных функций, на выбор предлагаемых пользователю, включает в себя модели Норриса и Рейнольдса, Хассида и Пореха, Вольфштейна и Ван Драейста, а также любую пользовательскую модель задаваемую подпрограммой. Помните, что расчет по функциям стенки выполняется только для тех ячеек, которые принадлежат пристеночным областям. Таким образом, пользователь получает возможность в расчете использовать комбинацию пристеночной функции и двухуровневой модели для центральной высоко турбулизованной части потока.

Если турбулентность моделируется двухуровневой моделью, то в пристеночной области необходимо создать мелкую сетку (см. гл. 6 *Руководства пользователя*). Аналогичные соображения касаются LES и низкорейнольдсовых моделей, где может потребоваться еще более мелкая сетка. Хотя в виде опции LES модель можно комбинировать с пристеночной функцией для уменьшения плотности сетки.

3.4.3. Задание термофизической модели

При моделировании потоков, для которых крайне важным является изменение температуры (теплоперенос, процесс сжатия потока и т.д.), к решателю необходимо подключить уравнение сохранения энергии. Эта опция активизируется с помощью панели *Thermal Models* и изменяется в зависимости от используемого материала. Для переменной *Conservation* пользователь может реализовать несколько альтернатив (см. гл. 1 *Методологии*):

Static Enthalpy, *Total Enthalpy* и *Renthalpy* (т.е. статическая энтальпия, полная энтальпия и ротальпия). Опция *Static Enthalpy* предполагает, что вся энтальпия постоянна и однородна в пределах области расчета (область применения – высоко скоростные невязкие потоки).

Кроме того, пользователь имеет возможность переориентировать решатель на тепловую или термо-химическую энтальпию посредством выбора одной из опции в *Enthalpy*. Термо-химическую энтальпию часто используют для моделирования химического взаимодействия потоков с целью исключения крупных источников, которые представляют собой температуру, с которой идет химическая реакция.

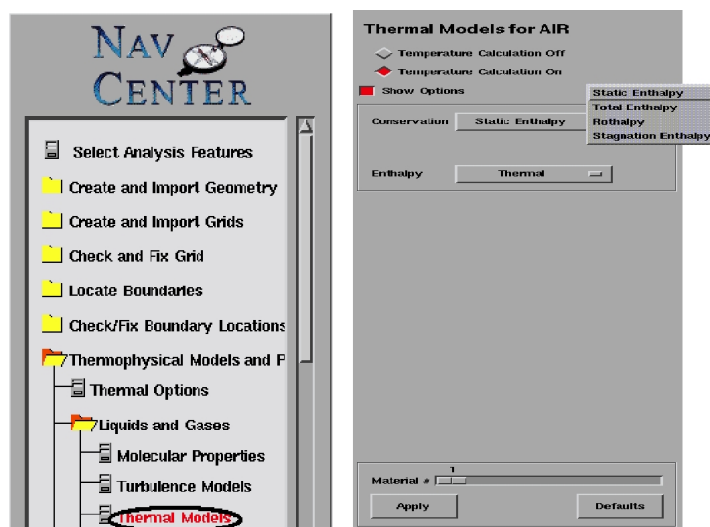


Рис. 3.9. Пример задания тепловой модели

Тем не менее для сложных химических реакций с высоко-уровневыми схемами дифференцирования использование тепловой энтальпии может оказаться более целесообразным.

3.4.4. Задание контрольных и опорных данных для модели

В процессе решения для каждого материала задается контрольная точка.

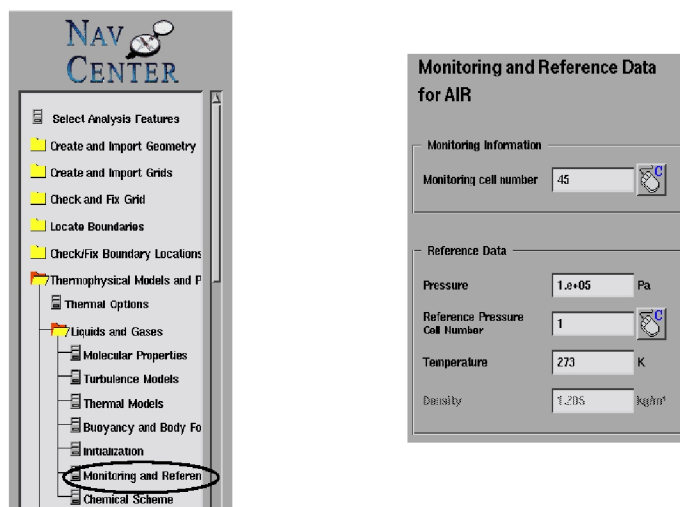


Рис. 3.10. Задание контрольной ячейки

Она представляет собой ячейку, применительно к которой искомые переменные будут выдаваться пользователю в процессе счета на дисплей и в файлы *.run и *.rsi с каждой итерации или шага по времени. В качестве контрольной ячейки, как правило, выбирают ту, в которой ожидается наиболее высокий уровень численной неустойчивости. Выбор ячейки осуществляется по номеру или с помощью мыши, после нажатия на кнопку с изображением мыши.

Значения действующего давления рассчитываются относительно опорного давления, действующего в одной из ячеек какого-либо материала, для каждого материала (константа интегрирования в выражении для давления). Для задания места приложения этого опорного давления выбирается грань одной из ячеек. Имейте в виду, что если ваша модель имеет граничное

условие по давлению, то значение опорного давления для модели становится не важным.

Помимо всего, через папку *Liquids and Gases* можно осуществить:

- ввод ускорения внешних потенциальных полей и внешние нагрузки на область потока,
- ввод начальных условий,
- задание химических компонент.

Пример задания параметров воздействия внешнего поля (земного тяготения) описан в *Методологии*, а алгоритм задания представлен в гл. 15 *Руководства пользователя*.

Программа STAR-CD использует свою внутреннюю интеллектуальную процедуру формирования начальных условий задачи, которая имеет достаточно высокий коэффициент сходимости с результатами стационарных расчетов. Но в ряде случаев, более целесообразным может оказаться задание начального поля расчетных переменных в виде постоянной для всей расчетной области величины или же задание неравномерного распределения поля расчетных величин по области потока. Все это реализуется через панель *Initialization* и более детально описывается в гл. 7 *Руководства пользователя*.

3.4.5. Задание свойств дополнительных скаляров

Дополнительные скаляры (химические добавки) задаются для всех потоков жидкости модели снова с использованием панели *Molecular Properties* Молекулярные свойства дополнительных скаляров задаются для каждого скаляра безотносительно материала, так как каждый скаляр может одновременно присутствовать как в одной, так и в нескольких жидкостях. Тем не менее начальное распределение и нагрузки, задаваемые через папки *Binary Properties* и *Initialization*, для каждого скаляра задаются в зависимости от материала.

В программе имеется база данных по химическим добавкам для нескольких наиболее часто используемых веществ. Если необходимо активизировать эти свойства, необходимо выбрать это вещество в просмотрном списке *Data Base* и щелкнуть по кнопке **Define Properties from database**. Если в расчете необходимо учесть влияние свойств скаляра на расчетные свойства жидкости, то в строке *Influence* необходимо состояние скаляра из пассивного перевести в активное – нажав **Active**. Стоящая по умолчанию опция **Passive** подразумевает, что скаляр является пассивным и его свойства никакого влияния на поток не оказывают.

Если свойства основной жидкости описывались с помощью полинома, то свойства каждого активного скаляра должны задаваться аналогично. Доступ к диалоговой панели *Polynomial Function Definition* осуществляется нажатием на кнопку **Define Polynomials**.

Если свойства задавались вручную, то их применение осуществляется с помощью кнопки **Define/Modify Scalar**.

3.4.6. Задание свойств для среды – твердое тело

Возможен вариант, когда материал расчетной области является не жидкостью а твердым телом, в таком случае для задания его свойств будет использоваться панель **Solids**. Для твердого тела необходимо задать следующие свойства: плотность, теплопроводность и теплоемкость. Так же имеется опция задания теплопроводности и теплоемкости с помощью пользовательской подпрограммы. Если для расчета необходимо принять во внимание процесс излучения через твердое тело, а так же радиационные свойства (поглощение и рассеяние), то опции для их активизации можно задать через панель **Solids > Radiative Properties**. После задания свойств необходимо нажать на кнопку **Apply**.

Как и для жидкостей, для твердых тел так же задается контрольная ячейка через панель **Solid > Monitoring and Reference**

Data. При этом следует убедиться в том, что эта ячейка действительно принадлежит области твердого материала. Температура в твердом теле рассчитывается так же относительно исходной температуры, задаваемой через эту же панель.

По аналогии с жидкостями, для твердых тел так же может быть задано начальное распределение расчетных величин. Панель **Solids> Initialization** предлагает опцию для задания начального распределения температурного поля. При этом поле может быть как постоянным, так и неравномерным по координатам области решения. Для задания неравномерного распределения поля начальных температур пользователь может воспользоваться просмотрной панелью или подпрограммой пользователя.

4. НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

Термин «начальные условия» относится к величинам, присываемым зависимым переменным во всех узлах сетки до начала расчётов. Их значение зависит от типа рассматриваемой задачи:

- При использовании *нестационарных течений* эта информация имеет явное физическое значение и будет влиять на ход решения. Поэтому ей необходимо уделить большое внимание. Иногда бывает так, что эффект начальных условий ограничивается этапом запуска, что не представляет интереса (как, например, в периодических во времени течениях). Тем не менее рекомендуется быть осмотрительным при задании начальных условий по причинам, пояснённым ниже.

- При расчёте стационарного течения итерационным способом начальные условия обычно не влияют на окончательное решение (за исключением редких случаев, когда решение имеет множество значений), но могут определять его успешность и скорость сходимости. Некорректное задание начального поля или, для переходных задач, резкие изменения граничных условий предъявляют жёсткие требования к численному алгоритму при подстановке в уравнения конечных объёмов. В результате могут понадобиться следующие особые *начальные меры*, чтобы обеспечить численную устойчивость:

- использование необычно малых временных шагов при расчётах неустановившихся течений;

- использование малых коэффициентов нижней релаксации в итерационных решениях.

Особые рекомендации относительно этих действий содержатся в разделе «Контроль за численным решением». В любом случае, увеличение времени расчётов может быть нежелательным побочным эффектом. Для установившихся и псевдонестационарных вычислений программа имеет встроенную про-

цедуру *инициализации (задания начальных условий)*, которая применяется при любой инициализации пользователем переменных течений. Более подробно это обсуждается в разделе «Инициализация потока» в гл. 7 *Методологии*. Большинство задач можно запустить полностью полагаясь на эту процедуру. Тем не менее необходимо уделить внимание задаваемым значениям характерных линейных размеров и максимальной ожидаемой скорости в поле течения, т.к. эти значения важны для инициализации. Пользователю рекомендуется рассчитать задачу при нулевой итерации, а затем уточнить поля начальных скоростей и давлений, прогнозируемые STAR-CD. После этого может понадобиться точная настройка значения характерного линейного размера. В особо сложных случаях придётся пренебречь инициализацией давления, или даже всем процессом инициализации, используя подходящие опции контроля решения. В этом случае пользователь должен надеяться на большую нижнюю релаксацию или очень малые шаги по времени, чтобы запустить решение.

5. ОПИСАНИЕ ГРАНИЦ

Как говорилось в разделе «Пространственное описание и дискретизация объёмов», определение и описание границы тесно связано с генерацией сетки конечных объёмов, т.к. геометрия границы определяется поверхностями внешних ячеек. Кроме того, правильное задание граничных условий часто представляет наибольшую трудность при создании модели. Проблемы часто возникают при выполнении следующих действий:

- определения соответствующего типа условия;
- задания соответствующего сочетания типов границ;
- задания соответствующих граничных величин.

Эти действия, в свою очередь, связаны с начальным заданием границ.

5.1. Положение границы

Трудности при определении положения границы обычно возникают, когда не полностью известны параметры потока, например на выходах. Рекомендуемое решение при снижении степени точности — размещать границы в следующих местах:

- а) в областях, где параметры известны, если это возможно;
- б) в таких местах, где может быть применена опция *Выход (Outlet)* или *Давление (Prescribed Pressure)* (см. гл. 5, 16 *Методологии*);

в) там, где мала вероятность того, что аппроксимации, при определении граничных условий, будут распространяться вверх по потоку.

Особенно важно стараться избегать следующих ситуаций:

1. Граница проходит через основную *зону рециркуляции*.
2. В переходных, околосвуковых или сверхзвуковых сжимаемых течениях выходная граница размещена в местах, где течение не является сверхзвуковым.

3. Неправильное сочетание граничных условий. Например:
- а) разнообразные границы на выходе – если не имеется дальнейшей информации о разделении течения на выходах;
 - б) заданные разделённые выходы потока с заданными выходными границами массы в том же потоке;
 - в) сочетание заданного давления с условиями разделения потока на выходе.

5.2. Граничные условия

Другой источник потенциальных трудностей – определение граничных величин, когда необходимо ввести уже известные граничные условия, например, на границе заданного входящего потока или на «входной» границе. Основные моменты, которые нужно помнить в данной ситуации:

- *Все* уравнения переноса, которые необходимо решить, включая уравнения переноса турбулентности, в случае их использования, требуют задания их граничных величин.
- *Неверное задание* граничных величин может привести к ошибочному результату или в крайнем случае к численной неустойчивости.

Следующие рекомендации могут быть сделаны относительно каждого типа границы:

1. *Заданное течение.* Здесь следует позаботиться о следующем:
 - а) Задавайте реалистичные значения всем зависимым переменным, включая параметры турбулентности, а также вспомогательным величинам, таким, как плотность.
 - б) Убедитесь, что если это единственный используемый тип границы, то выполняется условие общей непрерывности. (STAR-CD примет случайный дисбаланс массы до 5%, исправляя его путём подгонки параметров потока на выходе. Если дисбаланс превысит эту цифру, появится сообщение об ошибке.)

2. **Выход.** Основные моменты, которые необходимо учитывать для этого типа границы, следующие:

а) По возможности, необходимо задавать границы в областях, где течение направлено вовне; а также понимать, что если происходит втекание, оно может спровоцировать неустойчивость численного решения и/или ошибки.

б) Если задана более чем одна граница данного типа, необходимо задать либо разделение потока между ними, либо соотношение потока массы на выходе в каждом положении.

в) «Заданное разделение» выходов неприменимо к задачам, где потоки на входе не фиксированы, например:

- в сочетании с граничными условиями давления,
- в случае переходных сжимаемых течений.

3. **Заданное давление.** Основные меры предосторожности:

а) Лучше задавать *относительные*, а не абсолютные давления.

б) Если вероятен поток на входе, задать реалистичные граничные значения температуры и массовые доли. Также рекомендуется задавать параметры турбулентности косвенно, через интенсивность турбулентности и масштаб, или путём экстраполяции их из величин внутри расчётной области.

4. **Условия торможения.** Рекомендуется использовать для границ, лежащих внутри больших ёмкостей, где параметры потока в расчётной области не сильно влияют на свойства.

5. **Циклические границы.** Такие границы всегда появляются парами. Основные советы таковы:

а) Накладывайте эти условия только при соответствующих обстоятельствах. Двумерные осесимметричные течения с вихрями – хороший пример уместного применения этих условий.

б) для осесимметричных течений используйте разностные схемы CD/UD, чтобы использовать максимальный уровень центральных разностей в тангенциальном направлении (фактор перемешивания по умолчанию – 0,95 (см. тему “Miscellaneous

Controls” («Разнообразные средства управления») из раздела *Help* в STAR-CD).

6. *Плоскости симметрии*. Рекомендуется использовать это условие для двумерных осесимметричных течений без вихрей.

7. *Проходные границы свободного потока*. Это условие следует использовать только для моделирования сверхзвуковых свободных потоков.

8. *Переходные волновые проходные границы*. Это условие нужно использовать только в задачах, касающихся переходных сжимаемых потоков.

6. КОНТРОЛЬ НАД ЧИСЛЕННЫМ РЕШЕНИЕМ

Надлежащий контроль над процессом численного решения, применённый к уравнениям потока, очень важен для приемлемой эффективности вычислений, а иногда и для того, чтобы вообще получить решение. Иногда средства контроля над процессом решения сильно зависят от конкретных используемых численных методов, так что нельзя дать каких-либо универсальных инструкций. Таким образом, рекомендуемые установки различаются в каждом конкретном случае, в зависимости от выбранного алгоритма и условий его применения.

6.1. Выбор процедуры решения

Основной выбор должен основываться на правильной оценке природы потока, и процедура решения будет:

- или нестационарным расчётом, начиная с правильно определенных начальных и граничных условий и заканчивая новым состоянием через ряд дискретных шагов по времени,
- или установившимся решением, где модель не изменяющегося течения при заданном наборе граничных условий достигается путём ряда численных итераций.

PISO, SIMPLE и SIMPISO – три альтернативные процедуры решения, имеющиеся в пакете STAR-CD. PISO обязателен для нестационарных течений и может иногда использоваться для стационарных, в случаях, где существует сильное взаимодействие между зависимыми переменными, например течения, обусловленные естественной конвекцией. SIMPLE – алгоритм, настроенный по умолчанию для стационарных решений, и в большинстве случаев работает хорошо. Однако при особо сильном искажении сетки иногда для лучшего результата может использоваться SIMPISO.

Когда существуют сомнения относительно того, имеет ли рассматриваемая задача стационарное решение, или когда

сложно достичь сходимости на итерациях, лучше выполнять расчёты, используя опцию нестационарного расчёта.

6.2. Расчёт переходных процессов с использованием алгоритма PISO

Как говорится в разделе «Алгоритм PISO» в гл. 7 *Методологии*, на каждом шаге по времени (шаге итерации) PISO создаёт предиктор, вслед за которым создаётся ряд корректоров, при котором системы линейных уравнений решаются итерационно для каждой основной зависимой переменной. Решения относительно количества корректоров и внутренних итераций (далее называемых «свипами») во избежание путаницы с внешними итерациями, выполняемыми в режиме стационарного решения) принимаются внутренне, на основании ошибки при операторе расщепления и внутренних уровней невязок соответственно, согласно заданной точности и верхним пределам. Значения допустимых отклонений решателя, максимальных корректоров и «свипов», заданные по умолчанию, представлены в табл. 6.1. Как правило, настройка этих параметров пользователем требуется лишь в исключительных случаях, которые обсуждаются ниже.

Таблица 6.1. **Настройка стандартных контрольных параметров для расчёта неустановившихся течений с использованием PISO**

Параметр	Переменная				
	Скорость	Давление	Турбулентность	Энтальпия	Массовая доля
Допустимое отклонение решателя	0,01	0,001	0,01	0,01	0,01
Максимальное количество внутренних итераций («свипов»)	100	1000	100	100	100
Множитель релаксации для коррекции давления = 1,0					
Предел корректора = 20					
Допустимая невязка на шаге корректора = 0,25					

Оставшийся ключевой параметр в расчётах нестационарных течений с использованием PISO – это шаг по времени δt . Обычно он определяется посредством анализа точности и может варьироваться в процессе вычислений. В идеале шаг должен быть того же порядка величины, что и наименьшее характерное время δt_c для конвекции и диффузии, т. е. в большинстве случаев можно работать с $\delta t \approx 50\delta t_c$ и при этом получать приемлемую точность по времени. Величины, сильно превышающие это значение, могут привести к ошибкам и численной неустойчивости, тогда как меньшие значения приведут к увеличению времени счета.

В процессе расчётов могут быть достигнуты максимально допустимые значения величин, представленные в табл. 6.1, в этом случае появятся сообщения, касающиеся данного эффекта. Более вероятно, что подобные сообщения будут появляться на этапе запуска, однако это допустимо и позже, если в конечном итоге они будут появляться лишь иногда или перестанут появляться вовсе и прогнозы будут выглядеть обоснованно. Если тем не менее подобные предупреждения будут продолжать появляться, необходимо принять корректирующие меры.

Это могут быть:

- Уменьшение шагов по времени, скажем, на начальный множитель, равный 2, – если это исправит ситуацию, значит, причина была просто в чрезмерно большом δt .

- Увеличение максимально допустимых значений «свигов» – если первое средство не поможет. Стоит попытаться это сделать, но только применительно к переменным, чьи максимально допустимые значения были достигнуты. Напомним: будут умеренны изменения в 2 раза.

- Нижняя релаксация коррекции давления – значение 0,8 для этой величины, с использованием PISO, может быть полезно в некоторых трудных случаях (например, при сильном искажении сетки или для потоков с числом Маха, близким к единице).

- Допустимое отклонение шагов корректора – может быть установлено более низкое значение, но необходимо сначала проконсультироваться с представителями CD Adarco Group.

6.3 Расчёт устойчивых состояний с использованием алгоритма PISO (метод итераций)

Когда PISO работает в этом режиме, допустимые отклонения внутренних невязок уменьшаются, и для всех переменных, кроме давления, температуры и массовой доли вводится нижняя релаксация. Однако при расчетах течений, обусловленных естественной конвекцией, нижняя релаксация может понадобиться и для последних двух переменных. Стандартные значения для этих параметров, заданные по умолчанию, и предельные значения «свигов» те же, что при нестационарном режиме. Они даны в табл. 6.2.

Таблица 6.2. Настройка стандартных контрольных параметров для расчёта итерационных течений с использованием PISO

Параметр	Переменная				
	Скорость	Давление	Турбулентность	Энтальпия	Массовая доля
Допустимое отклонение решателя	0,1	0,05	0,1	0,1	0,1
Максимальное количество внутренних итераций («свигов»)	100	1000	100	100	100
Множитель релаксации	0,7	1,0	0,7	0,95	1,0
Предел корректора = 20					

Правильная настройка этих параметров приведёт к почти монотонному убыванию глобальных невязок в процессе вычислений, в зависимости от плотности сетки и других факторов. Если после этого одна или более глобальных невязок не умень-

шатся, необходимо принять меры по устранению причины. В некоторых случаях переменные, являющиеся причиной неполадки, можно определить по поведению глобальных невязок.

Основные меры, которые могут быть предприняты:

- Уменьшение множителя (множителей) релаксации. Уменьшение должно быть постепенным от 0,1 до 0,05 и применено к скоростям, если проблема заключается в импульсе и/или массовых невязках.

- Увеличение невязок решателя. Как и для неустановившегося течения, может оказаться полезным, особенно в отношении допустимых отклонений давления и его важности для решения потока. Двукратное уменьшение должно показать, будет ли эта мера действенной.

- Увеличение максимально допустимого количества «свигов». Если появляются предупреждающие сообщения о том, что предел «свигов» достигнут и меры 1 и 2 не помогают, стоит увеличить пределы переменных, являющихся причиной неполадки.

- Нижняя релаксация плотности и эффективной вязкости. Следует применять при больших вариациях, например в случае сжимаемых потоков, горения, смеси различных газов. Колебания эффективной вязкости могут привести к турбулентному течению и потоку неньютоновой жидкости, а могут быть таким образом ослаблены.

6.4. Расчёты устойчивых состояний с использованием алгоритма SIMPLE

Как отмечалось ранее, контрольные параметры, доступные в SIMPLE, похожи на те, что имеются в PISO, за исключением того, что всегда используется одна фаза корректора и нижняя релаксация давления. Стандартные настройки (задаваемые по умолчанию) представлены в табл. 6.3.

Если не удаётся получить решения со стандартными значениями, меры, которые необходимо предпринять для исправления ситуации, существенно не отличаются от тех, которые представлены в разд. 6.3 (для расчётов стационарных течений с PISO в итеративном режиме). Однако здесь уменьшение коэффициента релаксации для давления является дополнительным способом преодоления неустойчивости решения. Стоит отметить, что стандартное значение этого множителя уже низкое (0,3), поэтому рекомендуется дробное уменьшение не более чем на 50%. Если при сильном искажении сетки потребуются значения, меньшие 0,1, тогда следует либо смягчить ее искажение, либо использовать алгоритм SIMPISO.

Таблица 6.3. **Настройка стандартных контрольных параметров для расчёта итерационных течений с использованием SIMPLE**

Параметр	Переменная				
	Скорость	Давление	Турбулентность	Энтальпия	Массовая доля
Допустимое отклонение решателя	0,1	0,05	0,1	0,1	0,1
Максимальное количество внутренних итераций («свигов»)	100	1000	100	100	100
Множитель релаксации	0,7	0,3	0,7	0,95	1,0

6.5. Расчёт стационарных течений с использованием алгоритма SIMPISO

Процедура SIMPISO, как говорится в разделе «Алгоритм SIMPISO», в гл. 6 *Методологии*, содержит дополнительные меры для устранения эффекта неортогональности сетки при расчётах давления. Обычно он сопровождается дополнительным множителем нижней релаксации, как показано в табл. 6.4, кото-

рый при необходимости может быть снижен с декрементом $\approx 0,05$. Для ортогональных или почти ортогональных сеток, SIMPISO возвращается к SIMPLE.

Таблица 6.4. **Настройка стандартных контрольных параметров для расчёта итерационных течений с использованием SIMPISO**

Параметр	Переменная				
	Скорость	Давление	Турбулентность	Энтальпия	Массовая доля
Допустимое отклонение решателя	0,1	0,05	0,1	0,1	0,1
Максимальное количество внутренних итераций («свипов»)	100	1000	100	100	100
Множитель релаксации	0,7	0,3	0,7	0,95	1,0
Множитель релаксации для коррекции давления	-	0,8	-	-	-

6.6. Влияние ошибок округления

Были приложены большие усилия, чтобы снизить восприимчивость STAR-CD к влиянию машинных ошибок округления, но всё же могут возникать проблемы при работе на 32-битных машинах. Они обычно проявляются как ошибки итеративных решателей при конвергенции или в крайнем случае при дивергенции, ведущей к ошибке арифметического переполнения.

Если возникшие трудности связаны с подобными проблемами, настоятельно рекомендуется переключиться в режим расчётов с двойной точностью. Инструкции о том, как это сделать, содержатся в *Руководстве по установке*. Как правило, стоит избегать генерации очень малых значений объёмов и поверхно-

стей ячеек, работая с разумными единицами длины. Или же стоит задать другие единицы измерения при сохранении соответствующих безразмерных величин, таких, как Re и Gr .

6.7. Выбор решателя линейных уравнений

STAR-CD предлагает два типа прекодиционеров для решения линейных уравнений методом сопряжённых градиентов: один полностью векторизуется, второй численно превосходит первый, но векторизуется только частично. Поэтому первый (называемый «векторным» решателем) рекомендуется использовать, когда программа работает на векторных машинах (таких, как GRAY-CD), второй (называемый «скалярным» решателем) – когда STAR-CD работает на скалярных машинах (таких, как рабочие станции).

7. МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССА РЕШЕНИЯ

В гл. 8 *Руководства пользователя* в разделе, посвященном «Непрерывному выводу», дано подробное описание информации, получаемой при вычислениях на каждой итерации и шаге по времени и используемой для мониторинга и контроля. Она включает в себя:

- значения всех зависимых переменных на заданном пользователем участке мониторинга. Следует быть внимательным при выборе участка, особенно при расчётах стационарных течений. В идеале это должен быть чувствительный участок течения, где приближение к стационарному состоянию, вероятно, будет самым малым, например в зоне рециркуляции. При расчёте неустановившихся течений информация будет иметь другое значение и следует использовать другие критерии выбора. Например, участок может быть выбран для подтверждения ожидаемого периодического поведения переменных течения.

- нормализованные *глобальные невязки* R_ϕ для всех решаемых уравнений. Кроме невязок для коэффициента диссипации турбулентности (см. гл. 7, раздел «Завершающие тесты» *Методологии*), эти невязки используются для оценки хода процесса и сравнения итерационных вычислений для решения стационарных и псевдо-нестационарных течений. На начальных стадиях вычислений нелинейности и взаимозависимости уравнений могут явиться причиной немонотонного убывания невязок. Если эти колебания будут продолжаться после, скажем, 50 итераций, это может быть показателем наличия проблем.

- *глобальные скорости изменения* C_ϕ для всех решаемых уравнений. Они используются при расчётах неустановившихся потоков и не являются показателем незавершенности решения; они, скорее, просто показывают общие скорости изменения сохраняющихся величин (массы, импульса, энергии, и т.д.). Их

толкование и полезность будут в итоге зависеть от конкретных обстоятельств их применения.

Важно помнить, что доведение нормализованных невязок до предопределённого допустимого значения – необходимое, но недостаточное условие сходимости по двум причинам:

1) используемая практика нормализации (представленная в Приложении А *Методологии*) может не подходить для применения;

2) также необходимо, чтобы величины, представляющие интерес в решении, стабилизировались до приемлемого уровня. Если есть сомнения в отношении какой-либо причины, рекомендуется снизить допустимое отклонение и продолжить вычисления.

Из вышесказанного следует, что при оценке хода и завершённости итерационных расчётов стационарного течения большое внимание уделяется глобальным невязкам. Эти величины являются прямыми показателями степени сходимости отдельных систем уравнений и, следовательно, важны как для завершающих тестов, так и для выявления проблемных участков течения, в случае, когда сходимость не достигнута. Более того, они имеют явный физический смысл. Например, невязки энергии являются (нормализованным) показателем порядка, с которым преобладающие поля удовлетворяют сохранению энергии. Аналогичным образом можно объяснить и другие невязки.

8. ОЦЕНКА И ПРОВЕРКА МОДЕЛИ

STAR-CD предлагает набор средств, позволяющих оценить точность и эффективность всех аспектов процесса построения модели. При прохождении этапов моделирования, обсуждаемых ранее, пользователь должен воспользоваться этими возможностями и убедиться, что:

1. *Геометрия сетки* согласуется с тем, что предполагалось смоделировать. Это значительно облегчается встроенными графическими возможностями, которые позволяют:

- а) поворачивать,
- б) перемещать,
- в) уменьшать
- г) увеличивать сетку.

Это позволяет пользователю увидеть сетку с любой точки в правильной трехмерной проекции. Частые выведения сетки на экран на этапе генерации очень полезны для проверки её точности и поэтому очень рекомендуются, особенно для задач со сложной геометрией. Лучше, если такие геометрии разделяются на удобные части, для каждой из которых можно отдельно создать сетку, а потом проверить визуально.

2. Материалы с разными *физическими свойствами* правильно размещены в сетке. Это можно проверить визуально, используя встроенную схему дифференциации цвета. Или же можно отдельно нарисовать сетку для каждого материала. Точные значения заданных характеристик можно проверить через окно вывода информации.

3. Для проверки корректности задания *граничных условий* необходимо рассмотреть сетку с таких позиций, чтобы было видно:

- а) расположение границы,
- б) тип границы,
- в) схему использованных условий (например, скоростей на входе).

Более полную информацию по заданным граничным величинам можно получить в окне вывода информации.

4. Следует также проверить начальные условия, особенно для нестационарных задач и начальных полей, заданных через подпрограммы пользователя; для этого нужно запустить STAR для нулевых итераций/шагов по времени и нарисовать соответствующие поля переменных.

Проверка расчётов

Когда подготовка модели завершена, следующий шаг – это запуск решателя STAR и проверка численных расчётов. Результаты могут быть представлены различным образом, подробности содержатся в гл. 9 *Руководства пользователя*. Кратко, выходная информация и/или графики могут включать:

- **Значения полей** всех первичных переменных на внутренних и граничных узлах;
- **Значения** вышеуказанных величин, **полученные интерполяцией**, в случайных, задаваемых пользователем точках или поверхностях внутри расчётной области;
- Поверхностные **коэффициенты переноса тепла и массы**; а также силы; и, кроме того, значения безразмерной координаты u для пристеночных узлов сетки;
- **Глобальные величины**, такие, как суммарные компоненты силы (например, тормозящая или подъёмная сила), действующие на погружённые тела, и их безразмерные прототипы, общие энергобалансы и т.д.

Важно тщательно изучить эту информацию и убедиться, что расчёты правильно выполнены и дают разумные результаты. В частности, пользователь должен убедиться, что:

- Проверено правдоподобие **внутренних полей** и аналогичным образом проверены глобальные величины;

- Для расчётов турбулентных течений пристеночные значения y^+ лежат в рекомендуемом интервале (30–100) в участках, где это важно. В случае расчётов с участием двухслойной модели необходимо убедиться, что сетка в пристеночном слое достаточно густая;

- Величина *ошибок численной дискретизации* (пространственной и, где необходимо, временной) определена, и при необходимости приняты меры по их уменьшению до приемлемого уровня.

Из всех вышеперечисленных задач последняя наиболее сложна, т.к. её невозможно решить путём простых расчётов. Для этого требуется следующее:

- надёжный способ оценки ошибок дискретизации. В настоящее время для этого нужно повторить расчёты с более мелкими ячейками и меньшими шагами по времени (строго говоря, это должно быть сделано независимо) и обратить внимание на участки существенного изменения решения;

- стратегия для изменения сетки или шагов по времени, чтобы сократить ошибки. Эта корректировка выполняется вручную.

В идеале процесс исправления ошибок должен продолжаться до тех пор, пока изменения не достигнут приемлемого уровня. На практике такой подход может быть неосуществим, особенно для трёхмерных задач со сложной геометрией, в силу больших расходов на подготовку и вычисления.

Альтернативный способ обнаружить ошибки округления – изменить схему пространственной дискретизации и посмотреть, как это повлияет на решение. Опции второго порядка или их сочетания, доступные в STAR-CD, обычно выдают наименьшие численные ошибки.

9. ПОСТ-ПРОЦЕССИНГ ДАННЫХ (ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ)

9.1. Введение

Обработка результатов является важнейшей частью любого CFD расчета. Учитывая сложность и разную природу течений, исследуемых в STAR-CD, очень важно для пользователя иметь общее представление о доступных в PROSTAR средствах пост-процессорной обработки данных. Эти средства используются на обеих пре- и пост-процессорной стадиях процесса моделирования. Их можно разделить на три следующие категории:

1. *Операции с базой данных* для образования групп ячеек и узлов.

2. *Операции* для графического отображения ячеек, узлов или данных для стенок.

3. *Функции характеристик изображения*, которые определяют тип изображения, угол просмотра, опции изображения, режим работы дисплея и т.д.

Анализ результатов расчета, полученных из STAR, можно проводить двумя основными способами:

1. Путем просмотра распечатки результатов, получаемых в ходе вычислений, и сохранения их в выходной файл с расширением (.gup). Данные представляются в табличной форме;

2. Путем графического вывода результатов на экран, применяя средства постпроцессорной обработки, доступные в PROSTAR. Это делается в комбинации с уже упомянутыми функциями изображения выбором различных опций на одной из панелей STAR GUI. Доступны также дополнительные средства в меню *Post*, *Graph* или *Animation Module*.

9.2. Загрузка данных и настройка их вывода

Для проведения анализа результаты STAR-вычислений могут быть отображены на экране в виде следующих типов изображений:

- Векторное изображение поля скоростей
- Контурные изображения скалярных величин (см. рис. 9.1)
- Поверхности изолиний скалярных величин
- Контурные и векторные изображения данных стенок
- Траектории частиц
- Графики зависимостей $X-V$ (см. рис. 9.2)
- Средства анимации изображений

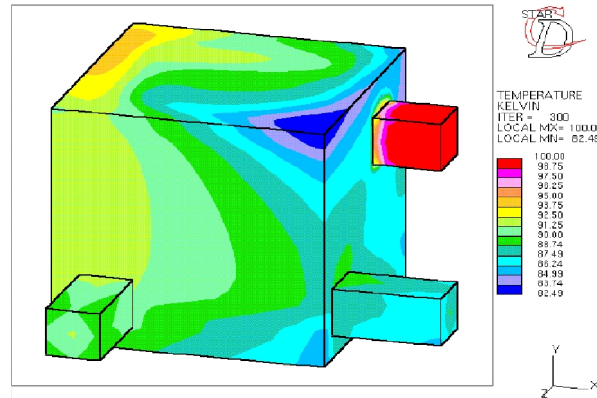


Рис. 9.1. Контурное распределение температур

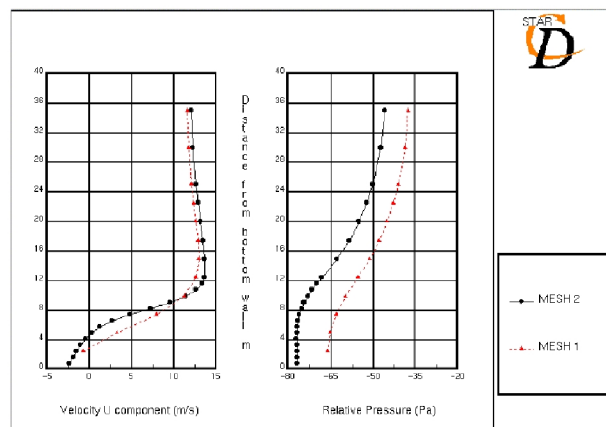


Рис. 9.2. Графическое сравнение результатов на разных сетках

Независимо от того, какая из вышеперечисленных опций будет выбрана, существует ряд операций, которые необходимо выполнить прежде, чем вывести графическую информацию на экран. В основном эти операции запускаются с панелей STAR GUIde и иногда в меню **Post**, расположенном в главном окне PROSTAR.

Для пост-процессорной обработки результатов необходимо выполнить следующие шаги:

Шаг 1

Пересмотреть всю основную информацию относительно вашей модели, «считывая» ее из файла PROSTAR данных модели (файл с расширением *.*mll*.) выбрать маршрут **File>Resume Model**.

Шаг 2

Загрузить результаты вычислений, выполненных STAR для этой модели:

– для стационарных задач результаты хранятся в файле решения с расширением *.*pst*;

– для нестационарных задач результаты обычно сохраняются через определенные интервалы времени в специальные файлы пост данных с расширением (*.*pstt*). PROSTAR позволяет осуществлять загрузку этих результатов в соответствии со временем их получения. Однако файл стандартного решения (*.*pst*) также остается доступным и содержит данные о состоянии области течения на конечном этапе нестационарного процесса.

Файл результатов *.*pst* содержит поля значений всех расчетных переменных. Кроме этого, в нем могут быть сохранены дополнительные величины, такие как коэффициенты теплопереноса, значения Y^+ и т.д. (все это задается с помощью панели *Analysis Controls>Output Controls > Analysis Output*).

Если выполняется нестационарный расчет, то файл *.*pst* содержит поля значений всех расчетных переменных с послед-

него шага по времени, а промежуточные значения сохраняются в отдельном файле с расширением *.pstt. Список переменных, подлежащих сохранению, а так же частота их записи в этот файл задается пользователем в процессе подготовки расчета.

Для загрузки данных стационарного или нестационарного расчета из файлов *.pst или *.pstt можно использовать NavCenter:

- Откройте папку *Post – Processing* и выберите *Load Data*;
- В меню *Analysis* выберите тип данных (стационарные – *Steady State*, нестационарные – *Transient*);
- Для загрузки файла данных нажмите **Open Post File**;
- Для выбора переменных перейдите на вкладку *Data*.

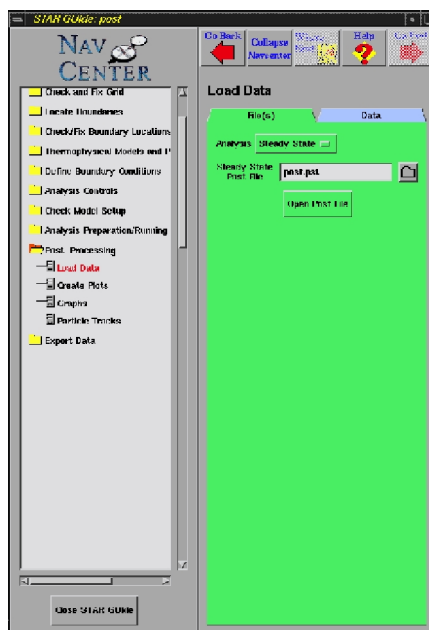


Рис. 9.3. Открытие панели *Load Data*

Шаг 3

Выберите часть модели, для которой будет проводиться пост-процессорная обработка данных. Это можно сделать, ис-

пользуя множество цветных кнопок для выбора. В процессе решения все величины рассчитываются в центрах ячеек. Именно эти данные и записываются в файлы результатов. Визуализация результатов может основываться как на значениях в центрах ячеек (пункт *Cell* в меню *Data Type*), так и на значениях в вершинах (соответствующий пункт в меню *Data Type* называется *Cell & Wall/Bound (Smooth)*), получаемых в результате интерполяции.

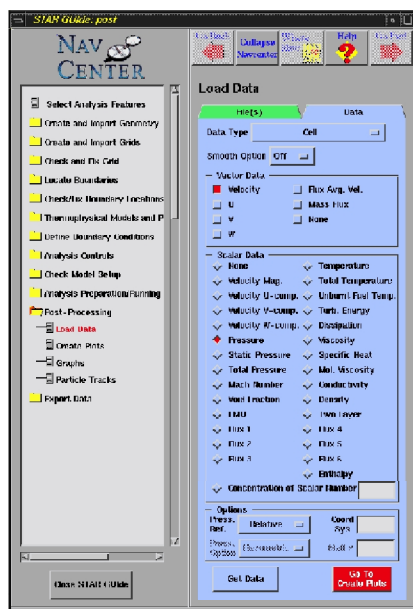


Рис. 9.4. Пример загрузки данных по давлению

Значения для граничных областей и стенок (пункты *Boundary* и *Wall*) отображаются на специальных двумерных ячейках-оболочках (shells), автоматически создаваемых PROSTAR. Для загрузки данных по давлению:

- В меню *Data Type* выберите опцию *Cell*.
- В списке скалярных переменных *Scalar Data* выберите переменную *Pressure* (Давление).
- Для загрузки данных нажмите **Get Data**.

- Для перехода к панели визуализации *Create Plots* нажмите красную кнопку **Go To Create Plots**.

Последнее действие эквивалентно выбору панели *Create Plots* непосредственно в NavCenter.

Шаг 4

Выбор вида отображения данных. Различные способы отображения результатов собраны на трех основных вкладках:

3-D Surface (*Трехмерное отображение*), **Section/Clipped** (*Сечения и разрезы*) и **IsoSurf** (*Изоповерхности*). Вкладки **Vectors** и **Options** содержат элементы настройки формата отображения.

- На вкладке **3-D Surface** в меню *Options* выберите **Contour (filled)** (контуры равных значений с заливкой между ними).
- В меню *Edge/Mesh* выберите **Grid** (*Отображение линий сетки*).
- Нажмите **Plot to Screen** (*Отобразить на экране*).

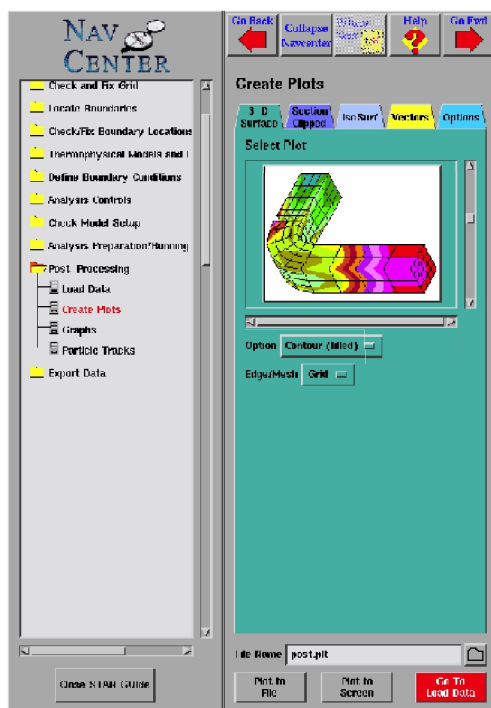


Рис. 9.5. Вывод панели *Create Plots*

Шаг 5

Выберите направление, откуда вы будете смотреть на модель, и общую ориентацию модели, как обсуждалось в гл. 5 *Руководства пользователя*.

Шаг 6

Загрузите соответствующие пост-процессорные данные в память компьютера, для выполнения дальнейших операций с ними, вывода графического изображения или печати. Данные могут включать:

- векторные величины, т. е. компоненты скорости или массовые потоки;
- скалярные величины, например, давление (пьезометрическое, статическое или общее), температуру, параметры стенок (например, коэффициенты теплопередачи), геометрическую информацию (например, координаты узлов для подвижных сеток) и так далее.

Средства, с помощью которых организуется доступ к вышеперечисленной информации, находятся на панели *Load Data* графического интерфейса STAR GUIde, расположенной в папке *Postprocessing*, и собраны в группу *Data tab*.

Помимо средств графического интерфейса STAR GUIde, существуют еще две дополнительные возможности по загрузке данных, которые реализуются в меню **Post**, расположенном в главном окне PROSTAR: **Get User Data**. С помощью данной диалоговой панели производится полная спецификация выводимых данных посредством ввода следующей информации: имени файла, места нахождения данных и типов регистров данных, в которых и будет храниться информация. Окончательно входной файл формируется при нажатии на кнопку **Apply**.

9.3. Пост процессорная обработка изображений

Спецификация изображений

В зависимости от типа данных, сохраненных с помощью операций, описанных в секции *Данные и настройка их вывода*, необходимо выбрать опцию **Plot option**. Соответствующий выбор осуществляется в выпадающем меню *Plot Options* с левой

стороны главного окна PROSTAR. Дополнительные опции можно также выбрать в ниспадающем списке на панели меню **Plot**, показанном ниже:

Ниспадающий список, открывающийся из пункта **Options**, предлагает следующие возможности выбора:

1. Опция **Geometry** является установкой по умолчанию и используется для графического вывода геометрии модели и сеточной структуры.

2. Опция **Vector** используется для графического отображения постпроцессорных данных, обладающих и абсолютным значением, и направлением (например, векторы скорости, векторы сил и др.).

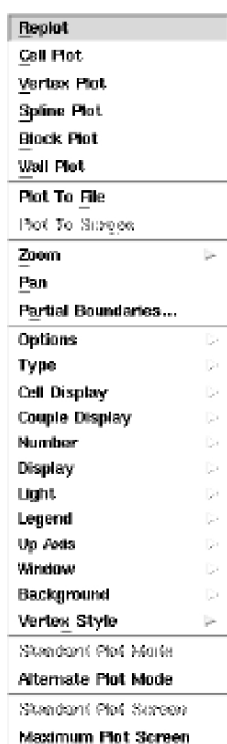


Рис. 9.6. Панель меню *Plot*

3. Опция **Contour** используется для изображения скалярных переменных величин (например, давления, температуры, плотности и т.д.).

4. Средства для получения контурных изображений скалярных величин с наложением векторных изображений доступны при использовании опции **Vect+Cont**.

5. Опция **Isosurface** используется для изображения поверхностей постоянных значений для заданных значений скалярных переменных величин. Численные значения для всех изображаемых изоповерхностей должны быть указаны в диалоговом окне, которое появится на экране при выборе этой опции. Изоповерхности могут быть в виде именных наборов оболочек или узлов, задаваемых с помощью команды PSCREATE.

Выбор графической опции также может зависеть от типа выбранного изображения. Это в дальнейшем будет проиллюстрировано на примере, приведенном ниже.

Пример 1

Изображение поля скоростей направленными векторами скорости.

1. Сохранить все компоненты вектора скорости (т. е. u , v , w) в базе данных программы, выбрав соответствующую опционную кнопку на диалоговой панели *Load Cell Post Data*.

2. Выбрать маршрут **Plot>Type>Normal** для отображения каркасного изображения модели (реберной структуры модели).

3. Выбрать маршрут **Plot>Options>Vector** для получения векторного поля скоростей.

Выбор такого вида изображения не всегда удобен, так как требует огромного количества одновременно выводимой на экран информации. В качестве альтернативы можно выбирать следующие возможные варианты получения изображений:

- Маршрут **Plot>Type>Qhidden** для получения графического изображения результатов только на видимых поверхностях сеточной модели.

- Маршрут **Plot>Type>Ehidden** заметьте, что стрелки скорости расцветаются на экране в полном соответствии с абсолютными значениями скорости (рис. 9.7, 9.8).

- Маршрут **Plot>Type>Section** для получения графического изображения результатов в указанном сечении модели.

9.4. Вывод изображения на экран

Следующим шагом ваших действий является реальное отображение заданного изображения на экране. Это выполняется с помощью графических опций меню следующим образом:

- **Cell Plot** – изображаются данные вычислительной сетки.

- **Wall Plot** – изображаются данные стенок на автоматически создаваемых на поверхностях стенок shell-ячейках. Новые shell-ячейки должны быть включены в определенное на текущий момент множество ячеек до использования этой функции. Использование маршрута **Options>Vector** для стенок позволяет получать изображения скорее компонент поверхностных сил, чем компонент скорости.

- **Vertex Plot** – изображает векторные величины поверх изображения узлов.

Пожалуйста, обратите внимание, что опция **Cell Plot** обычно используется для получения графических изображений узловых результатов, полученных в результате интерполяции данных. Опция **Vertex Plot** – это просто альтернативный способ отображения информации подобного рода,

Опция **Replot** может использоваться на этом этапе до тех пор, пока

- множество баз данных для ячеек, узлов, или shell-ячеек стенки остается неизменным при переходе от одного изображения к следующему;

- на экране имеется текущее изображение.

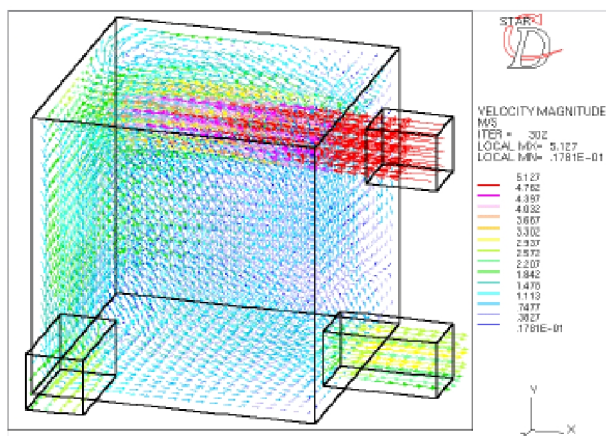


Рис. 9.7. Векторное поле скоростей на поверхности сеточной модели

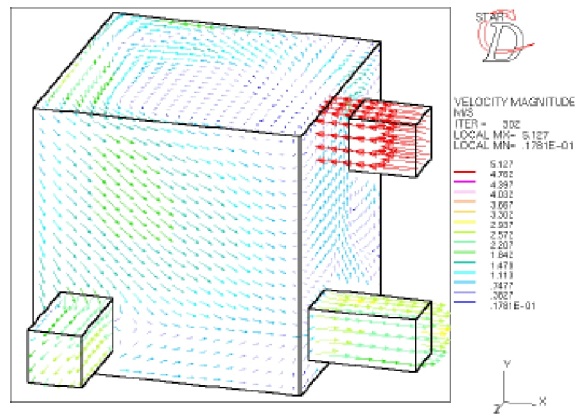


Рис. 9.8. Изображение изолинии давления на поверхности сеточной модели

9.5. Действия с изображением

С векторными изображениями поля скоростей потока можно выполнять различные действия, используя средства графического интерфейса STAR GUIde, доступ к которым осуществляется на панели *Create Plot*, расположенной в папке *Post-Processing*. Опции позиции *Vectors* на этой панели позволяют выполнять следующие операции:

- **Изменение размера** векторов скорости с помощью заданного коэффициента масштабирования (опции *Vector Scale*),
- **Изменение формы стрелок** представляющих векторы скорости (опции *Vector Arrows*),
- **Интерполяция (отображение)** векторов скорости на регулярную сетку (опции *Presentation Grid*),
- **Уменьшение** количества отображаемых векторов на заданный коэффициент.

С контурными изображениями скалярных пост-данных также можно выполнять ряд действий, например:

- **Уменьшение (разреживание)** используемых коэффициентов числа маркировочных знаков, используемых при изобра-

жении контурных линий, указывая коэффициент масштабирования, который устанавливается с помощью бегунка *Thin Vectors* в позиции *Vectors*.

- **Изменение цветовой палитры** и количества цветов, используемых для полностью окрашенных контурных изображений или для изображений контурных линий в зависимости от установок, заданных командой `TERMINAL` (см. «Функции вывода изображений» в гл. 2 *Руководства пользователя*). Выполнение этой операции осуществляется в другой позиции под названием *Options*.

Кроме того, PROSTAR позволяет изменять текущую таблицу основных цветов, корректируя значения RGB индексов в карте цветов (см. «Установка цвета» в гл. 5 *Руководства пользователя*). Стандартное сочетание цветов фона и переднего плана может быть также изменено на обратное выбором меню `Plot>Background>Reverse`.

9.6. Операции с данными

Утилита OPERATE. PROSTAR располагает служебной программой (утилитой) для выполнения различных операций с массивами данных для ячеек, узлов, границ и стенок, которая позволяет преобразовывать в алгебраическом смысле массивы результатов или геометрических данных, загружаемые из одного или более файлов данных. Для активизации этой утилиты необходимо выбрать маршрут на панели меню `Post>Operate`, в результате чего на экране отобразится диалоговая панель *Post Register Operations*.

Массивы геометрических данных или результатов (по полной сеточной модели) могут быть сохранены в так называемых запоминающих регистрах с номерами от 1 до 6; выбор регистров осуществляется в выпадающих списках позиций *Register*. По существу, эти регистры представляют собой не что иное, как

ячейки памяти. Однако данная утилита OPERATE к тому же позволяет выполнять с ними дальнейшие преобразования.

Обычный процесс выполнения операций с данными с использованием этой утилиты может быть разделен на три этапа следующим образом:

I. Сохранить данные ячеек и узлов в запоминающие регистры с 1 по 6. Обратите внимание, что:

1) По установленным правилам PROSTAR векторные параметры пост-данных сохраняются в регистры 1, 2, и 3, в соответствии с их компонентами в направлениях X , Y и Z . Скалярные параметры пост данных сохраняются в регистр 4. Это правило применяется, когда загрузка данных осуществляется с помощью обычных утилит загрузки, таких, как GETCELL.

2) Утилита OPERATE также содержит функции загрузки скалярных параметров, которые обладают большей гибкостью относительно действий с регистром(ами), в которые загружены данные. Ей доступны следующие функции:

Load Cell Data (Загрузка информации в ячейках). По своему функциональному назначению подобна операции GET-CELL – осуществляет загрузку координат центров тяжести ячеек (в локальной системе координат, если требуется), объемов и поверхностей (для shell- или baffle-ячеек).

Load Vertex Data (Загрузка информации в узлах).

Load Boundary Data (Загрузка информации на границах). Осуществляет загрузку координат центров тяжести границ (в специальной местной системе координат, если требуется) и поверхностей.

Load Wall Data (Загрузка информации на стенках). По своему функциональному назначению подобна операции GET-WALL; осуществляет загрузку координат центров тяжести стенок (в специальной местной системе координат, если требуется) и поверхностей.

Load User Data (Загрузка данных пользователя)

3) Обратите внимание, что, хотя выбор запоминающих регистров для хранения входных данных полностью подчинен пользователю, некоторые операции, выполняемые на следующих стадиях (например, получение изображений), предполагают, что правило, данное выше (см. п. I. 1), соблюдено.

II. Выполнить требуемую операцию с данными (векторное арифметическое, алгебраическое действие, тригонометрическое действие и т.д.). Операнды выбираются из выпадающих списков позиций *Register* с правой стороны от знака равенства «=». При нажатии на кнопку **Apply**, результат действия появится в регистре, выбранном в выпадающем списке позиции *Register* с левой стороны знака равенства, перезаписывая все данные, которые к тому времени могли в нем находиться. Доступные операции объединены в следующие группы:

Multi-Register. Действия производятся с данными, хранящимися в одном или нескольких регистрах, указанных с правой стороны знака равенства. Результат сохраняется в регистре, указанном с левой стороны знака равенства.

Single-Register. То же самое, за исключением того, что действия производятся с данными, хранящимися только в одном регистре (с правой стороны в списках появляется только один регистр).

Scalar/Vector. То же самое, за исключением того, что доступные действия требуют к спецификациям регистров приплюсовать постоянное значение. Последнее указывается в специально предназначенном текстовом окне.

III. Сохранить результат операции (по необходимости). Доступны следующие действия:

Put Cell Data. Выполняет действие, обратное действию операции **Load Cell Data**, т. е. текущие данные ячеек, сохранен-

ные на текущий момент в заданном регистре, записываются обратно в файл результатов в качестве указанных элементов ячеек.

Save to File. Сохраняет текущие данные, сохраненные на текущий момент в заданном регистре, в файл (*.usr*) в двоичном или закодированном формате.

Register Keys. Подготавливает pro-STAR к графическому отображению

– содержимого регистров 1–3 как векторных величин (опция **Vector**),

– содержимого регистров 1–6 как параметров потока (опция **Flux**). В этом случае, каждый регистр должен содержать значение параметра потока для каждой из шести граней заданной ячейки.

Задачей следующего этапа обычно является печать (получение текстовой информации), анализ или вывод графической информации по результатам вышеуказанных операций. Некоторые возможности проиллюстрированы на следующем примере:

Пример 1

Перенос векторов скорости из расчетной вращающейся системы отсчета в неподвижную систему.

1. Загрузить выходные данные STAR выбором маршрута с панели меню **Plot>Load Static Post File** и последующим выбором требуемого файла с расширением (*.pst*).

2. Активизировать диалоговую панель *Post Register Operations*. Загрузить вычисленную *X*-компоненту скорости в регистр 1, выбирая маршрут **Load Cell Data>Velocity U-component** из выпадающего меню позиции *Function*.

3. Повторить п. 2 для компонент скорости *Y* и *Z*, сохраняя их в регистры 2 и 3.

4. Полагая, что система вращается вокруг оси *Z* в локальной цилиндрической системе координат с номером 11 со скоростью 3000 оборотов в минуту, пересчитать компоненты скоро-

сти, хранящиеся на текущий момент в регистрах с 1 по 3, относительно неподвижной системы отсчета. Чтобы сделать это, выберите маршрут **Multi-Register>Reframe** (r^*w) из выпадающего меню позиции *Function* и затем введите значения для номера координатной системы (ICSYS) и скорости вращения (Ω) в специально предназначенных для этого текстовых окнах.

5. Построить графическое изображение заново рассчитанных векторов скорости:

а) настроить PROSTAR для вывода графической информации, находящейся в регистрах 1–3, как векторных величин выбрать **Register Keys>Vector** из выпадающего меню позиции *Function*.

б) выбрать маршрут на панели меню **Plot>Options>Vector**, и затем **Cell Plot**.

6. Скалярные параметры для контурного изображения могут храниться только в регистре 4. Поэтому, чтобы создать контурное изображение абсолютных значений скорости, необходимо активировать диалоговую панель *Post Register Operations* и выбрать маршрут **Multi-Register>Vmagnitude** из выпадающего меню позиции *Function*. При этом абсолютные значения скорости будут вычислены из данных, хранящихся в регистрах 1–3, а результат будет сохранен в регистр 4.

7. Для графического отображения данных выбрать маршрут на панели меню **Plot>Options>Vector** и затем сделать **Cell Plot**.

9.7. Представление результатов для отчета

Помимо графических возможностей, PROSTAR располагает средствами для обработки и представления выходных результатов для включения их в отчетный документ в текстовом виде (табличная форма численных значений результатов). Существуют следующие возможности:

1. *Отображение на экране* результатов в выбранных на текущий момент ячейках или узлах. Выбрать маршрут на пане-

ли меню **Lists>Post Registers** для активизации панели диалога *Post Register Data*. Содержимое всех пост-регистров отображается в прокручиваемом списке в порядке возрастания номеров ячеек. Существует также возможность выбора распечатки списка всех данных или только данных в текущих ячейках или текущих узлах (помеченных в списке звездочкой в колонке *Set*). Выбор осуществляется просто нажатием на кнопки **Show All Data** или **Show Set Data Only**, соответственно.

Обратите внимание, что кнопка **Update List** служит для того, чтобы можно было обновлять список результатов в случае, если изменения массивов данных или данных, находящихся в пост регистрах, сделаны вне диалоговой панели *Post Register Data*.

С панели диалога обеспечивается также доступ к операциям сортировки, которые позволяют организовать выдачу результатов в порядке убывания значений отдельных искомым величин. Имеется возможность сортировки по действительным значениям или по абсолютным значениям, по значениям (скалярных) величин, хранящихся в регистре 4. Кнопка **Unsort** отменяет действие операции сортировки результатов.

2. *Интерполяция* и отображение на экране выбранных текущих результатов в определенных пользователем точках расчетной области (команда **SENSOR**). Эти точки определяются в одном или в нескольких узлах, а значения в них получаются интерполяцией значений в ближайших ячейках. Узлы, используемые для этой цели, не должны быть связаны с какими-либо ячейками сеточной модели; они только должны находиться в пределах поля течения. Вычисленные таким образом значения могут быть полезны для сравнения численного расчета с экспериментальными результатами, полученными в этих точках.

3. *Отображение на экране численного* (полученного интерполяцией) *значения переменного параметра в некоторой точке*, указав ее местоположение на поверхности контурного

изображения с помощью графического. Выбрать опцию **PCross** в меню *Post*.

4. *Суммирование* и отображение на экране суммарных результатов, усредненных, минимальных и максимальных значений и их месторасположения. Применяется к массивам результатов, хранящихся на текущий момент в пост-регистрах.

5. *Отображение результатов, полученных интерполяцией* известных значений, в плоскости сечения команда *SPRINT*). Данные в ячейках считаются постоянными в пределах каждой ячейки, тогда как результаты в узлах интерполируются линейно на нужную плоскость.

6. *Интегрирование* результатов по определенной пользователем плоскости сечения.

7. *Вычисление аэродинамических коэффициентов* команда *ACOEFF*.

8. *Вычисление массы потока*, проходящего через грань индивидуальной ячейки или через грани множества ячеек. Выбрать маршрут на панели меню **Post>Flux Sum**, затем выбрать одну из опций в выпадающем списке. Требуемые грани можно указать индивидуально с помощью графического курсора (**Pick Cell**), или группой (**Zone**), рисуя полигон вокруг них.

Все графические изображения результатов можно также отсылать в файл, чтобы позже иметь возможность просматривать и анализировать их.

9.8. Отображение и копирование результатов

PROSTAR обеспечивает пользователя командами для отображения (*mapping*) и копирования массивов результатов из существующей сеточной модели (т. е. расчетной сеточной области) на любой произвольный объем или поверхность. Эти команды можно использовать как для представления результатов, так и экспорта данных на альтернативные сетки.

Команда DGENERATE используется для *генерации или копирования* пост-данных. Команда позволяет создавать новые массивы результатов из существующего массива результатов, вычисленных в ячейках или узлах. Это полезно для представления результатов расчета симметричной модели, где симметричность или периодичность характера течения используется для уменьшения объема и размерности сеточной модели. Сначала создаются ячейки и узлы, на которые затем будут копироваться результаты. Для образования новых массивов результатов используется команда DGENERATE. Обратите внимание, что сдвиги по номерам, которые задаются в команде DGENERATE, должны быть точно такие же, какие использовались при генерировании ячеек и узлов.

Отображение (Mapping) массивов результатов можно выполнять на произвольные поверхности или объемы. Команда PROSTAR для выполнения этой операции (PMAP) позволяет отображать (накладывая поверх) текущие сохраненные результаты на поверхность, состоящую из shell-ячеек, на объем, состоящий из ячеек или поперечное сечение, определенное командой PSCREATE. Для выполнения этой операции необходимо выполнить следующие шаги:

Шаг 1

Создать shell-ячейки, объемные ячейки или сечения, на которые будут отображаться (накладываться) результаты, и присвоить им уникальный индекс ячейки. Подходящий способ для создания shell-ячеек – воспользоваться командой LIVE.

Шаг 2

Выбрать (используя операцию CSET) множество ячеек, из которых будут извлекаться данные для отображения. Они должны охватывать объемные ячейки или shell-ячейки, предназначенные для отображения.

Шаг 3

Считать результаты, требуемые для выполнения отображения, используя опции на диалоговой панели *Load Cell Post Data*.

Шаг 4

Введите команду PMAP для отображения (наложения) сохраненных результатов для существующей модели на твердотельные объемные ячейки или плоские shell-ячейки. Например, чтобы отобразить значения давления из множества ячеек, заданного командой CSET, на ячейки, имеющие тип 5, надо ввести

```
GETC, P  
PMAP, 5, CSET
```

Также важно быть уверенным в том, что сетка, на которую отображаются данные: а) занимает такое же физическое пространство, что и сетка, из которой извлекаются данные, б) не имеет совместных узлов с сеткой, из которой извлекаются данные (если отображаются узловые данные).

9.9. Представление результатов в виде графиков

PROSTAR содержит широкий набор средств для представления результатов расчета в виде графиков. При построении графиков необходимо руководствоваться следующими основными правилами:

- Любой переменный параметр потока или другая физическая величина, имеющиеся в PROSTAR или полученные из внешних программ, могут быть представлены в виде функции любой другой величины.
- Прежде чем нарисовать график, ряд значений этой величины должны быть загружены в специальное место хранения, так называемый регистр для запоминания информации о графике – *graph register*.

- Построение графика осуществляется отображением на экране содержимого любого регистра как функции содержимого другого регистра в соответствии с инструкциями пользователя.

- Можно создать один уникальный графический объект, так называемый *frame*, объединяя вместе один или несколько графиков. Определение фрейма включает в себя и определения других важных элементов графика, таких, как оси, легенды и обозначения.

- Изображение графика может состоять из одного или более фреймов. В последнем случае необходимо описать, как будут располагаться фреймы в пределах комбинированного изображения.

Следовательно, для настройки начальных установок и получения графического изображения графиков на экране необходимо выполнить следующие шаги:

- а) выбрать и загрузить необходимые вам данные,
- б) указать тип и свойства графика(ов), в виде которого (ых) эти данные будут представляться,
- в) отобразить данные на экран.

Следующие несколько разделов будут посвящены описанию этих шагов. Средства графического интерфейса STAR, необходимые для выполнения этих действий, находятся на различных панелях, расположенных в под-папке *Graphs*. Некоторые из них дублируются опциями в меню *Graph*, находящегося внутри главного окна PROSTAR. Доступ к инструментам для построения графиков *Graph Tool* осуществляется выбором маршрута с панели меню **Tools>Graph Tool**, куда также включены инструменты для выполнения некоторых наиболее общепринятых операций.

Загрузка данных

На этом этапе пользователь указывает данные, которые необходимо загрузить в регистры для запоминания информации о

графиках – *graph registers*. Наиболее общепринятые операции выполняются на семи панелях STAR GUIde, сгруппированных в под-папке *Extract/Graph Data*. Они имеют дело со следующими типами данных:

- “Field Data”
- “External data”
- “Residual History data”
- “Engineering Data”
- “Analysis History Data”
- “Particle Data”
- “User Data”

В большинстве случаев, загружая данные, вы имеете возможность заодно и проверить эти данные, построив график по умолчанию.

Выбор графических данных

После того, как подходящие данные загружены в *graph registers*, пользователь может изобразить их на экране в виде графика, используя установки PROSTAR, принятые по умолчанию. В большинстве случаев, однако, перед тем, как вывести график в надлежащем виде на экран, пользователю необходимо заказать ряд установок. Это осуществляется на панели STAR GUIde “Customize Graphs”.

Панель разделена на ряд позиций; каждая из них предлагает различные функциональные настройки, которые пользователь может использовать или нет в зависимости от вида и сложности графика. Подробное описание назначения и режима выполнения операций для каждой позиции дается в интерактивной текстовой системе помощи Help на этой панели. Также существуют другие расширенные возможности обработки графика, такие как определение пользователем стрелок указателей и введение дополнительных специальных обозначений см. гл. 5 *Руководства пользователя*.

Отображение данных

Для реального отображения графика результатов на экране можно воспользоваться специальными текущими установками:

В рамках среды STAR GUIde (любая панель в подпапке *Graphs*) выбором маршрутов:

- **Draw Frame>Current** – нарисовать фрейм, выбранный на текущий момент.
- **Draw Frame>Overlay** – нарисовать фрейм поверх любого другого изображения, отображенного на текущий момент в графическом окне PROSTAR.
- **Draw All Frames** – нарисовать все фреймы, определенные на данный момент.

В меню *Graphs* выбором опций:

- **Locate** – изменить размеры и/или расположение фрейма в графическом окне.
- **Gdraw** – получить изображение фрейма.
- **Gredraw** – перерисовать последний отображенный на экране фрейм со всеми внесенными пользователем изменениями параметров изображения.
- **Gpick** – отобразить на экране значение в точке графика, указанной на выбранном фрейме, с помощью графического курсора. Альтернативно можно использовать команду GPICK. Обратите внимание, что эта операция незаконна для круговых диаграмм.
- **Gpan** – перенести (панорамировать) центр графика в положение, указанное курсором. Альтернативно можно использовать команду GPAN. Обратите внимание, что эта операция незаконна для круговых диаграмм и графиков в полярных координатах.
- **Gzoom, on** – зуммировать (т. е. увеличить масштаб) отдельную часть графика, выбранную с помощью графического курсора; при желании возможно многократное действие. Каждая установка ZOOM должна быть подтверждена нажатием на

кнопку **Yes** до выполнения перерисовки фрейма. Опции **Gzoom, back/Gzoom, off** отображают фрейм, используя предыдущие или первоначальные параметры масштаба изображения.

Во всех вышеперечисленных случаях нужный фрейм выбирается из выпадающего списка. Обычно PROSTAR оперирует 20 регистрами для хранения графиков, принятыми по умолчанию. Изменить количество регистров можно, нажав на кнопку **Change Number of Registers** на любой панели подпапки STAR GUIde *Graphs* и затем указав требуемое вам число регистров в специальном всплывающем при этом окне.

Обратите внимание, что если информация о графиках уже загружена в некоторые регистры, то сначала необходимо стереть информацию в этих регистрах и переустановить все графические параметры на значения, принятые по умолчанию. Это можно сделать нажатием на **Graph Reset** на панели STAR GUIde или выбрать маршрут **Graph>Greset** на панели меню.

10. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В КВАДРАТНОЙ ПОЛОСТИ С ПОДВИЖНОЙ СТЕНКОЙ

10.1. Введение

Течение жидкости в квадратной полости с подвижной стенкой относится к задачам, в которых присутствует явление отрыва потока от обтекаемого тела. Задачи подобного рода и другого типа привели к формированию научного направления, известного как вычислительная гидродинамика, основанная на математическом моделировании течений жидкости с помощью численных методов на ЭВМ. Данная задача отображает особенности отрывных течений и поэтому используется как «испытательный полигон» для изучения возможностей численных методов.

Одним из программных продуктов, реализующих численные методы, является STAR-CD. В данной лабораторной работе моделируется течение жидкости в квадратной полости с подвижной стенкой в пакете STAR-CD. Полученные результаты сравниваются с результатами из литературного источника.

Цель лабораторной работы – исследование течения жидкости в квадратной полости с подвижной стенкой в двухмерной постановке.

Работой предусматривается:

1. Определение поля скоростей, линий тока и давлений в расчетной области.
2. Определение профилей продольных и поперечных скоростей в вертикальном и горизонтальном сечениях.
3. Расчёт безразмерного комплекса:

$$f = \frac{2F}{\rho U^2 l},$$

где F – сила трения, которую испытывает движущая стенка, отнесенная к единице длины в направлении Y .

Исследуемая квадратная полость с движущейся верхней стенкой представлена на рис. 10.1. Течение жидкости считается стационарным, вязким и несжимаемым; теплофизические свойства жидкости постоянны и удовлетворяют соотношению:

$$Re = \frac{\rho U l}{\mu} = 100$$

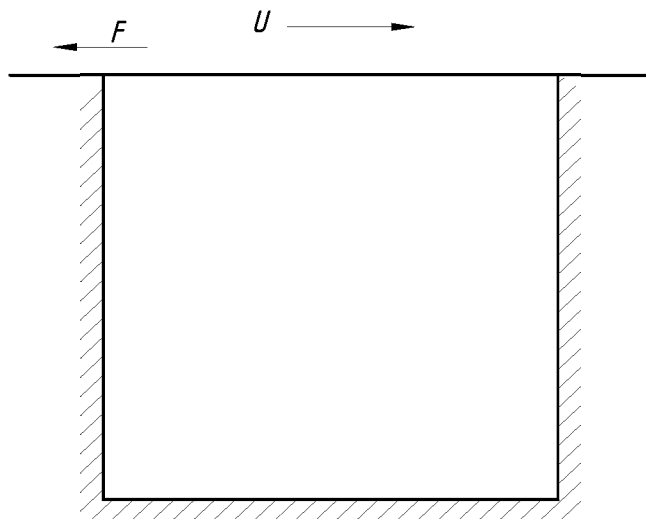


Рис. 10.1. Квадратная полость с движущейся верхней стенкой

При решении задачи использовать следующие данные:

$$l = 1 \text{ м}; \quad U = 5 \text{ м/с}; \quad \rho = 1 \text{ кг/м}^3; \quad \mu = 0,05 \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

10.2. Теоретические основы исследования

Решение данной задачи производилось с помощью дифференциальных уравнений Навье – Стокса с использованием ЭВМ. Одним из таких решений является решение, находящееся в [1].

Математической моделью является система уравнений (выраженная в векторном виде) [1]:

$$\frac{d\bar{W}}{dt} = \bar{J} - \frac{1}{\rho} \text{grad}(p) + \nu \Delta \bar{W} + \frac{1}{3} \text{grad}(\text{div}(\bar{W})),$$

где \bar{W} – полный вектор скорости частицы;

\bar{J} – полный вектор ускорения частицы;

ν – кинематический коэффициент вязкости;

Δ – оператор Лапласа.

Поскольку в начальных условиях было принято, что жидкость несжимаема, то последний член, выражающий скорость относительной объемной деформации, будет равен нулю $\text{div}(\bar{W}) = 0$. Учитывая отсутствие объемных сил $\bar{J} = 0$, можно переписать данное векторное уравнение в проекции на координатные оси x и y (так как было принято, что задача решается в двухмерной постановке):

$$\frac{du}{dt} + u \frac{du}{dx} + \nu \frac{du}{dy} = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \left(\frac{d^2u}{dx^2} + \frac{d^2u}{dy^2} \right);$$

$$\frac{d\nu}{dt} + u \frac{d\nu}{dx} + \nu \frac{d\nu}{dy} = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dy} + \nu \left(\frac{d^2\nu}{dx^2} + \frac{d^2\nu}{dy^2} \right).$$

В начальных условиях было принято, что течение жидкости считается стационарным, в этом случае нулю будут равны частные производные составляющих полной скорости по времени:

$$\frac{du}{dt} = 0; \frac{d\nu}{dt} = 0.$$

В соответствии с принятыми допущениями исходные уравнения будут иметь вид:

$$u \frac{du}{dx} + \nu \frac{du}{dy} = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \left(\frac{d^2u}{dx^2} + \frac{d^2u}{dy^2} \right);$$

$$u \frac{d\nu}{dx} + \nu \frac{d\nu}{dy} = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dy} + \nu \left(\frac{d^2\nu}{dx^2} + \frac{d^2\nu}{dy^2} \right).$$

Граничными условиями будет задание равенства нулю составляющих полной скорости на стенках квадратной полости:

$$x = 0 : u = 0, v = 0;$$

$$x = L : u = 0, v = 0;$$

$$y = 0 : u = 0, v = 0;$$

$$y = L : u = U, v = 0.$$

10.3. Практическая часть

10.3.1. Подготовка к созданию модели

Создаем директорию с номером вашей группы на диске D. В данной директории снова создаем директорию с названием Lab2.

Запускаем STAR-CD Launcher по ярлыку, расположенному на рабочем столе. Выбираем пункт меню **File> SetWorkingDirectory** и выбираем созданную директорию Lab2.

Запустим модуль STAR, для этого выбираем пункт меню **File>Pre/Post>Prostar**. В появившемся окне нажимаем *Continue*. Запускается пакет и появляются главное и командное окна.

10.3.2. Создание сетки

Запустите окно помощника, нажав на кнопку:



- В появившемся окне помощника выбираем папку *Create and Import Grids*;

- Выберите папку *Create Grids*;

- Нажмите на значок строки *Create 3-D Grids using Simple Shapes*.

Обычно в данный момент нужно определить тип создаваемых ячеек и вид текущей координатной системы, для этой задачи эти установки принимаются заданными по умолчанию, что соответствует глобальной декартовой системе координат и типу ячеек – **Fluid**. Для создания сетки необходимо заполнить соот-

ветствующие позиций диалога *Extend of Domain* так, как показано ниже:

Extent of Domain :		
Minimum	Maximum	Number of Cells
0	1	21
X	X	X
0	1	21
Y	Y	Y
0	0.05	1
Z	Z	Z

Рис. 10.2. Задание координат расчетной области

- Нажмите на кнопку **Generate Mesh**. В окне PROSTAR появится блок с размерами по осям X и Y от 0 до 1 и от 0 до 0,05 по оси Z , где число ячеек по осям X , Y , Z соответственно равно 21, 21 и 1. Координаты вершин и описание ячеек можно просмотреть помощью верхнего меню PROSTAR **Lists>Vertices** (координаты вершин, необходимо установить флажок *Show All Verts*) и **Lists>Cells** (описание ячеек). Для более удобного просмотра расчетной области изменим точку зрения.

- Нажмите на кнопку **View** в верхнем управляющем интерфейсе окна PROSTAR и выберите **View>Isometric>1, 1, 1**.

При этом должен быть установлен режим просмотра **Geometry Plot**, тип просмотра – **Hidden Surface**, тогда изображение расчетной области в окне PROSTAR будет соответствовать рис.10.3.

10.3.3. Задание границ

Следующим шагом будет задание границ расчетной области. В нашей модели граничные поверхности, нормальные осям X и Y , являются стенками, причем верхняя стенка ($Y+$) движется, а поверхности, нормальные оси Z , являются плоскостями сим-

метрии. По умолчанию предполагается, что все граничные поверхности имеют тип *Стенка (Wall)*.

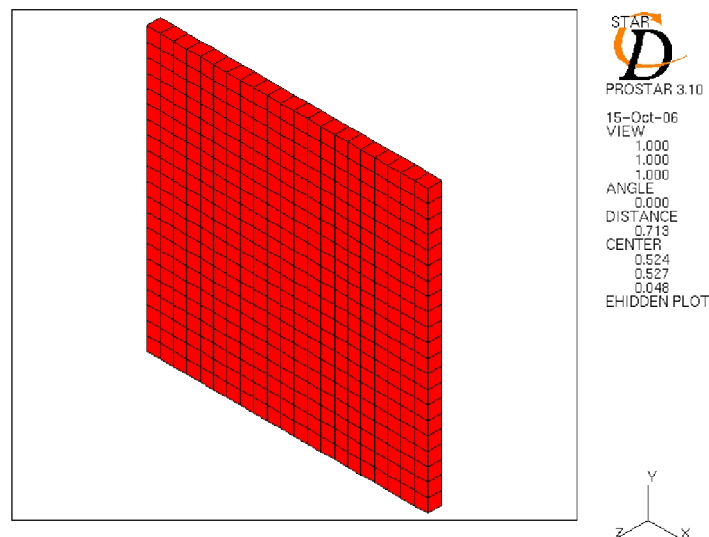


Рис. 10. 3. Полученная сетка

В этом случае нужно определить только плоскости симметрии и движущую стенку, а остальные оставить определенными по умолчанию. Для этого:

- Выберите в окне *Navigation Center (NavCentr)* папку *Locate Boundaries*, откройте ее и щелкните на значке, стоящем перед названием строки *Create Boundaries*. В правой части окна появится меню определения границ.
- Выделите курсором строчку номер один в окне *Boundary Regions* и, нажав на кнопку **Symmetry**, задайте тип границы для плоскости симметрии.
- Нажмите на кнопку **View** в верхнем управляющем интерфейсе окна PROSTAR и выберите **View>Axis>+Z**.
- Нажмите на кнопку **Surface Based on Edge** и, указав мышкой на видимую плоскость симметрии расчетной области,

показанной в окне PROSTAR, щелкните левой кнопкой мыши.

- Нажмите на кнопку **View** в верхнем управляющем интерфейсе окна PROSTAR и выберите **View>Axis>-Z**.

- Нажмите на кнопке **Surface Based on Edge** и выделите мышкой в окне PROSTAR оставшуюся плоскость симметрии, которая теперь стала видимой.

- В текстовом окне *Boundary Region Name* наберите название *SymPlane* и нажмите кнопку **Apply**.

- Выделите курсором строчку номер два в окне *Boundary Regions* и, нажав на кнопку **Wall**, задайте тип границы для движущейся верхней стенки.

- Нажмите на кнопку **View** в верхнем управляющем интерфейсе окна PROSTAR и выберите **View>Axis>+Y**.

- Нажмите на кнопке *Select a Zone* и нарисуйте произвольный многоугольник вокруг верхней поверхности.

- В текстовом окне *Boundary Region Name* наберите название *MuvWall* и нажмите кнопку **Apply**.

- Нажмите на кнопку **View** в верхнем управляющем интерфейсе окна PROSTAR и выберите **View>Isometric>1, 1, 1**. Нажмите кнопку **Bound** (*Отображение границ*) в меню **Cell Plot Display Options**.

- Нажмите на кнопку **Count All Boundaries** и в текстовом выводе данных в окне OUTPUT будет выведена обобщающая информация по граничным областям, а в окне PROSTAR будут показаны выделенные граничные поверхности (см. рис. 10.4).

10.3.4. Задание свойств среды

Задание физических свойств производится следующим образом:

- Выберите в окне Navigation Center (NavCentr) папку *Thermophysical Models and Properties*, откройте папку *Liquids and Gases* и, выбрав строчку *Molecular Properties*, щелкните на

значке, стоящем перед ее названием. В правой части окна появится меню определения физических свойств жидкости.

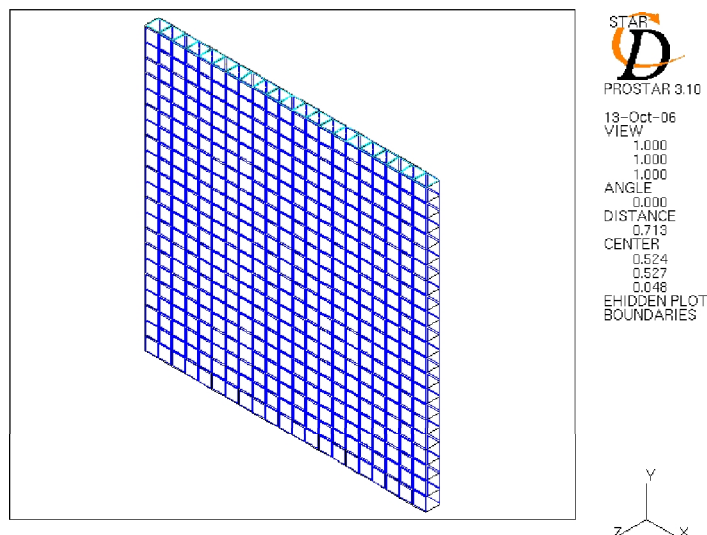


Рис. 10.4. Граничные поверхности модели


- В текстовом окне *Molecular Properties for* введите **Fluid**.
- В текстовом окне *Density* введите 1.
- В текстовом окне *Molecular Viscosity* введите 0?05.
- Нажмите кнопку **Apply**.


Выберем ячейку для вывода промежуточных данных в текстовый файл при решении задачи – *Monitoring Cell* и ячейку – *Reference Pressure Cell*, относительно которой будет определяться перепад давления. Выберем ячейки, расположенные соответственно в центре расчетной области и в левом нижнем углу. Для этого:

- Отжать кнопку **Bound** в блоке *Cell Plot Display Option* верхнего управляющего интерфейса окна PROSTAR (*Выключение режима показа граничных областей*).

- Нажмите на кнопку **View** в верхнем управляющем интерфейсе окна PROSTAR и выберите **View>Axis>+Z**.

- В окне Navigation Center (NavCentr) откройте последовательно папки *Thermophysical Models and Properties/Liquids and Gases*, выберите строчку *Monitoring and Reference Data for Fluid* и щелкните на значке, стоящем перед ее названием.

- В правой половине окна Navigation Center (NavCentr) в блоке *Monitoring Information* щелкните по кнопке  и выделите появившимся перекрестьем в окне PROSTAR центральную ячейку (ее номер 221).

- В блоке *Reference Data* в строке *Reference Pressure Cell Number* щелкните по кнопке  и выделите появившимся перекрестьем в окне PROSTAR левую нижнюю ячейку (ее номер 1).

- Нажмите кнопку **Apply**.

10.3.5. Задание граничных условий

Для задания граничных условий необходимо задать только значение скорости, с которой движется верхняя стенка полости. Все остальные граничные условия задаются по умолчанию с помощью типов заданных границ. Так, для типа *Wall* заданы условия прилипания, а тип *Symmplane* обеспечивает условия плоскости симметрии. Для задания скорости на верхней стенке:

- Выберите в окне Navigation Center (NavCentr) папку *Define Boundary Conditions* и, выбрав строчку *Define Boundary Regions*, щелкните на значке, стоящем перед ее названием. В правой части окна появится меню задания граничных условий по границам.

- Выделите курсором границу под номером два в окне *Boundary Regions* и в текстовом окне *U* введите 5.

- Нажмите кнопку **Apply**.

- Нажмите на кнопку **View** в верхнем управляющем интерфейсе окна PROSTAR и выберите **View>Isometric>1,1,1**.

- Нажмите кнопку **Bound** в блоке *Cell Plot Display Option* верхнего управляющего интерфейса окна PROSTAR.

- Нажмите кнопку **Cell Plot** и в окне PROSTAR будет показана расчетная область с поставленными граничными условиями, приведенная на рис. 10.5.

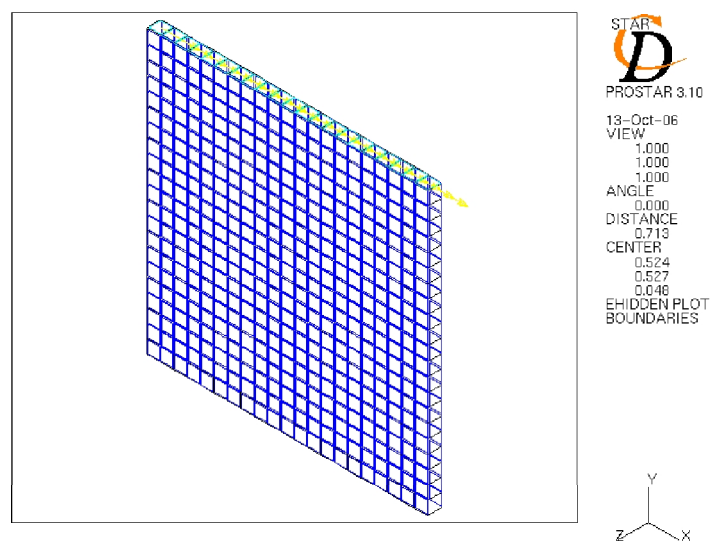


Рис. 10.5. Результат задания граничных условий модели

На данном этапе модель готова для решения поставленной задачи, поэтому её следует сохранить. Это можно сделать, выбрав в окне PROSTAR в выпадающем меню **File**:

File>Save Model

10.4. Подготовка к решению модели

10.4.1. Управление решением задачи

Данная задача является двумерной, но решается в трехмерной постановке. Для увеличения скорости сходимости численного решения задачи нужно отключить решение уравнения движения для W -компоненты вектора скорости. Для этого:

- Выберите в окне Navigation Center (NavCentr) папку *Analysis Controls* и последовательно откройте папки *Solution Controls* и *Equation Behavior*, в строке *Primary Variables* щелкните на значке, стоящем перед ее названием. В закладке *Primary Variables*, появившейся в правой части окна, отожмите кнопку рядом со строкой **W-mom**.

- Нажмите кнопку **Apply**.

10.4.2. Управление выводом

По умолчанию вывод результатов расчета в файл происходит с кратностью 100. Для изменения частоты вывода:

- Выберите в окне Navigation Center (NavCentr) папку *Output Controls*, откройте ее и в строке *Analysis Output*, щелкните на значке, стоящем перед ее названием. В закладке *Post*, в текстовом окне *Solution Output Frequency* наберите 30.

- Нажмите кнопку **Apply**.

Для расчета безразмерного комплекса требуется значение силы трения, которую испытывает движущая стенка. Получение значения возможно из файла *star.erd*, который будет создан в процессе решения модели. Укажем необходимость сохранения значения силы по итерациям в процессе решения в вышеназванном файле:

- Выберите в окне Navigation Center (NavCentr) в папке *Output Controls* папку *Monitor Engineering Behavior*, щелкните на значке, стоящем перед названием строки *Monitor Boundary Behavior*. В правой части окна выберите курсором границу "2-Wall" и для нее нажмите кнопку **Forces**.

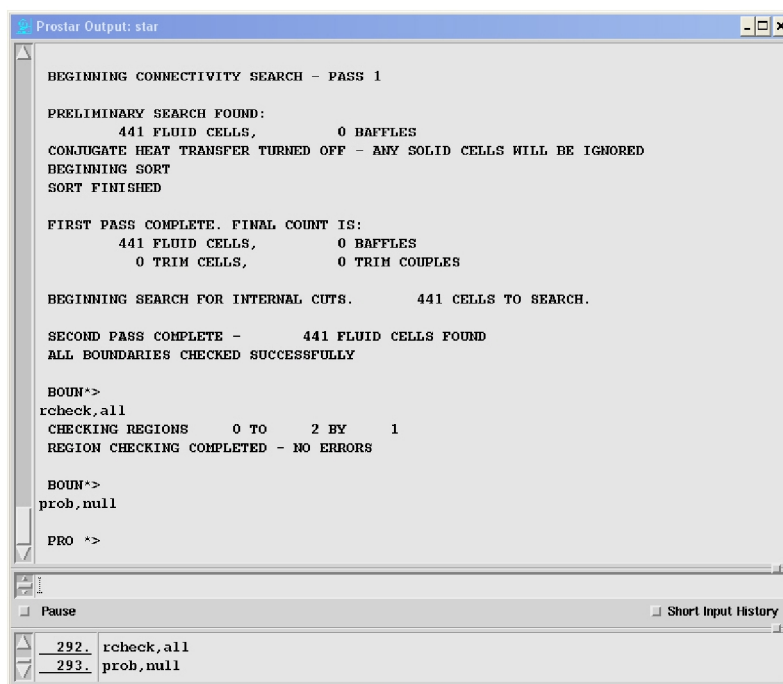
- Нажмите кнопку **Apply**.

10.5. Проверка модели

Теперь, когда модель задачи собрана, требуется провести проверку созданной модели.

Откройте в окне Navigation Center (NavCentr) папку *Check Model Setup* и щелкните на значке, стоящем перед строкой *Check Everything*. В панели *Check Everything*, появившейся в правой части, нажмите кнопку **All** под строкой *Check Everything*.

Результаты проверки модели будут в текстовом виде представлены в окне OUTPUT на рис. 10.6.



```
Prostar Output: star
BEGINNING CONNECTIVITY SEARCH - PASS 1
PRELIMINARY SEARCH FOUND:
  441 FLUID CELLS,      0 BAFFLES
CONJUGATE HEAT TRANSFER TURNED OFF - ANY SOLID CELLS WILL BE IGNORED
BEGINNING SORT
SORT FINISHED

FIRST PASS COMPLETE. FINAL COUNT IS:
  441 FLUID CELLS,      0 BAFFLES
  0 TRIM CELLS,        0 TRIM COUPLES

BEGINNING SEARCH FOR INTERNAL CUTS.      441 CELLS TO SEARCH.

SECOND PASS COMPLETE -      441 FLUID CELLS FOUND
ALL BOUNDARIES CHECKED SUCCESSFULLY

BOUN^>
rcheck,all
CHECKING REGIONS 0 TO 2 BY 1
REGION CHECKING COMPLETED - NO ERRORS

BOUN^>
prob,null

PRO ^>
```

292. rcheck,all
293. prob,null

Рис. 10.6. Результаты проверки модели, представленные в окне OUTPUT

10.6. Финальные действия

Откорректируем максимальное число итераций при численном решении задачи:

- Откройте в окне Navigation Center (NavCentr) папку *Analysis Preparation/Running* и щелкните на значке, стоящем перед строкой *Set Run Time Controls*. В панели *Set Run Time*

Controls, появившейся в правой части в текстовом окне *Number of Iteration*, наберите 500.

- Нажмите кнопку **Apply**.

Перед завершением работы с модулем PROSTAR сохраним модель в файле *star.mdl* и создадим файлы с описанием геометрии расчетной области и описанием условий однозначности задачи, необходимые для модуля STAR. Для этого в окне PROSTAR откроем выпадающее меню **File**:

- **File>Save Model**.
- **File>Write Geometry File>Apply>Close**.
- **File>Write Problem File>Apply>Close**.

В результате вышеописанных действий были созданы файлы, необходимые для запуска модуля STAR, – *star.geom* и *star.prob*. Для большей наглядности численного решения данной задачи применение модуля STAR будем проводить отдельно и независимо от PROSTAR. Для чего завершим работу с модулем PROSTAR: **File>Quit>Save&Quit**.

Проведение численного решения в модуле STAR

- Запустим модуль STAR в панели Star-CD Launcher: **Solve>Star**. В результате откроется окно Star – *Solver Settings*.

- Во вкладке *Executable Settings* в поле ввода **Casename** указывается имя решаемого файла (*star.mdl*).

- Переходим на вкладку *Run Solver*, нажимаем на кнопку **Start**, находящуюся в прямоугольной области с названием *Serial Star*. На экран выводится уведомляющее окно *Starlauncher*, которое говорит о том, что будет запущен модуль решения *Star* в консольном режиме. Нажать кнопку **OK**.

- По окончании расчетов консольном окне появится надпись «Для продолжения работы нажмите любую клавишу». Соответственно для его закрытия нажмите любую клавишу.

- Закройте окно *Star – Solver Settings*, нажав на кнопку **Close**.

10.7. Обработка результатов расчета в PROSTAR

10.7.1. Подготовка

Запустим модуль STAR. Для этого выбираем пункт меню **File>Pre/Post>Prostar**. На экране появится окно запуска PROSTAR, в которое нужно ввести следующее:

- Подтвердить имя задачи *star* в строке *Enter Case Name*
- Подтвердить опцию *Resume from Existing .mdl File?*
- Отменить опцию *Append to Previous .echo File?*
- Нажать **Continue**.

10.7.2. Загрузка файла с результатами расчетов

В открывшемся окне PROSTAR в верхнем управляющем интерфейсе:

- Отожмите кнопку **Bound** в блоке *Cell Plot Display Option*
- Нажмите кнопку **Cell Plot**.



Запустите окно помощника, нажав на кнопку:

- В открывшемся приложении выберите в окне Navigation Center (NavCentr) папку *Post-Processing*, откройте её и щелкните на значке, стоящем перед строкой *Load Data*. В правой части появится меню загрузки результатов численного решения.
- Проверьте имя файла *star.pst* в текстовом окне *Steady State Post File*.
- Нажмите на кнопку **Open Post File**.

10.7.3. Построение поля вектора скорости

Выполните следующие действия для построения поля вектора:

- В открытом меню *Load Data* окна Navigation Center (NavCentr) щелкните на закладке *Data*.
- Проверьте значения кнопки *Data Type* – **Cell**.
- Проверьте значения кнопки *Smooth Option* – **Off**.
- В блоке *Vector Data* должна быть нажата кнопка **Velocity**.
- В блоке *Scalar Data* должна быть нажата кнопка **None**.
- Нажмите на кнопку **Get Data**.
- Нажмите на кнопку **Go to Create Plots**.
- В открытой закладке появившегося окна *Create Plots* установите значение кнопки *Option* – **Vector**, а кнопки *Edge/Mesh* – **Edge**.
- Нажмите на кнопке **Plot to Screen** и в окне PROSTAR появится векторное поле, приведенное на рис. 10.7.
- Нажмите кнопку **Plot to File** для запоминания построенных результатов в нейтральном файле *star.plot*.
- Нажмите кнопку **Go to Load Data** для возвращения к окну *Load Data*.

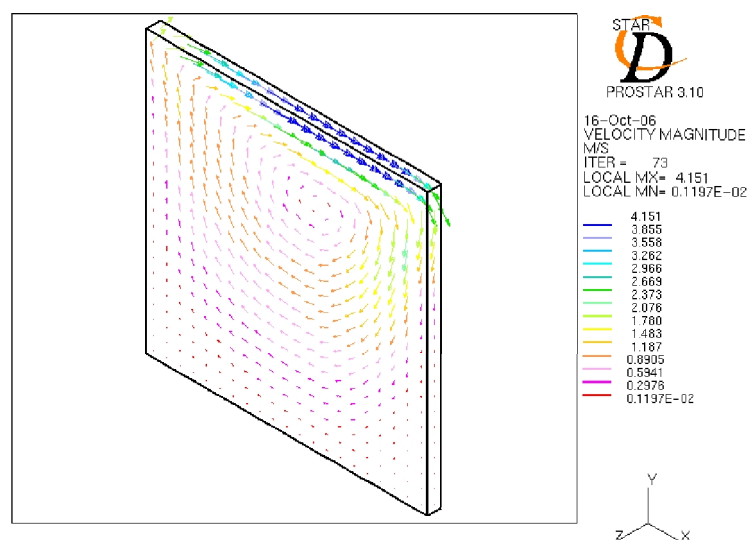


Рис. 10.7. Поле вектора скорости

10.7.4. Построение поля давления

Для построения в окне PROSTAR поля давления:

- В открытом меню Load Data окна Navigation Center (NavCentr) откройте закладку *Data*.
- Установите значения кнопки *Data Type* – **Cell &Wall/ Bound (Smooth)**.
- В блоке *Vector Data* должна быть нажата кнопка **None**.
- В блоке *Scalar Data* должна быть нажата кнопка **Pressure**.
- В блоке *Options* должно быть установлено значение кнопки *Pres. Ref* – **Relative**.
- Нажмите на кнопку **Get Data**.
- Нажмите на кнопку **Go to Create Plots**.
- В открытой закладке появившегося окна *Create Plots* установите значение кнопки *Option* – **Contour (filled)**, а кнопки *Edge/Mesh* – **Edge**.
- Нажмите на кнопке **Plot to Screen** и в окне PROSTAR появится поле давления, приведенное на рис. 10.8.

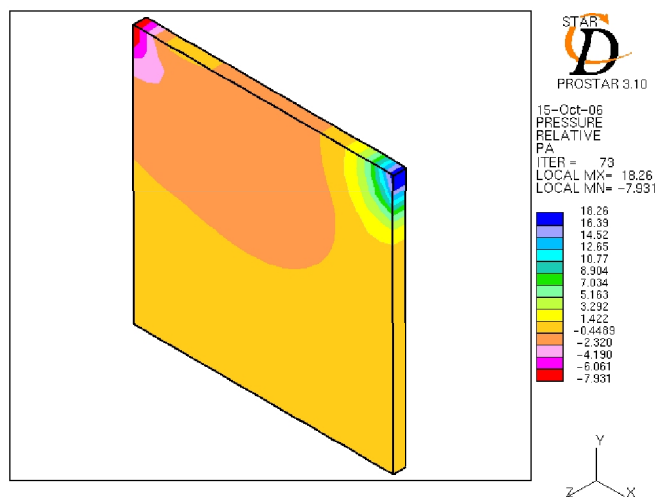


Рис. 10.8. Поле давления

- Нажмите кнопку **Plot to File** для запоминания построенных результатов в нейтральном файле *star.plot*.
- Нажмите кнопку **Go to Load Data** для возвращения к окну *Load Data*.

10.7.5. Построение поля линий тока

Для построения в окне PROSTAR поля линий тока:

- В меню **Load Data** окна **Navigation Center (NavCentr)** должна быть открыта закладка *Data*.
- Должно быть установлено значение кнопки *Data Type – Cell & Wall/Bound (Smooth)*.
- В блоке *Vector Data* должна быть нажата кнопка **None**.
- В блоке *Scalar Data* должна быть нажата кнопка **Stream**.
- Нажмите на кнопку **Get Data**.
- Нажмите на кнопку **Go to Create Plots**.
- В открытой закладке появившегося окна *Create Plots* установите значение кнопки *Option – Contour (line)*, а кнопки *Edge/Mesh – Edge*.
- Нажмите на кнопке **Plot to Screen** и в окне PROSTAR появится поле линий тока.
- Нажмите на кнопку **View** в верхнем управляющем интерфейсе окна PROSTAR и выберите **View>Axis>+Z**. Получившееся поле линий тока приведено на рис. 10.9.
- Нажмите кнопку **Plot to File** для запоминания построенных результатов в нейтральном файле *star.plot*.
- Нажмите кнопку **Go to Load Data** для возвращения к окну *LoadData*.

10.7.6. Построение профиля скорости U

Для построения профиля скорости в центральном вертикальном сечении полости воспользуемся выделением набора ячеек, через которые это сечение проходит:

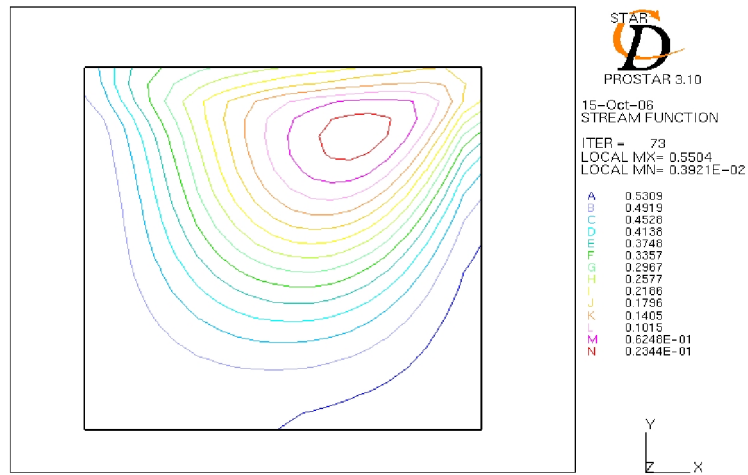




Рис. 10.9. Поле линий тока

- Измените значение в верхнем управляющем интерфейсе окна PROSTAR кнопки **Contour Plots** на **Geometry Plot**.
 - Отожмите кнопку  в боковом управляющем интерфейсе окна PROSTAR.
 - В меню *Plot* окна PROSTAR установите вывод на экран, вместо установленного вывода в файл – **Plot>Plot to Screen**.
 - Нажмите кнопку **Cell Plot** верхнего управляющего интерфейса окна PROSTAR.
 - Нажмите кнопку  в боковом управляющем интерфейсе окна PROSTAR и в открывшемся меню – **New>Zone...**
 - В окне PROSTAR постройте при помощи мыши многоугольник, охватывающий центральный вертикальный ряд ячеек.
 - Нажмите кнопку **Cell Plot** верхнего управляющего интерфейса окна PROSTAR. В окне PROSTAR будет изображен только выделенный ряд ячеек, как показано на рис. 10.10.
- Таким образом, была выделена подобласть, Y – координаты которой будут использоваться для построения графика. Сейчас

необходимо ввести значения U -компоненты скорости для выбранного набора ячеек. Для этого:

- В открытом меню *Load Data* окна *Navigation Center* (NavCentr) щелкните на закладке *Data*.
- Установите значение кнопки *Data Type* – **Cell**.
- Установите значение кнопки *Smooth Option* – **Off**.
- В блоке *Vector Data* должна быть нажата кнопка **None**.
- В блоке *Scalar Data* должна быть нажата кнопка **Velocity U-comp**.
- Нажмите на кнопку **Get Data**.

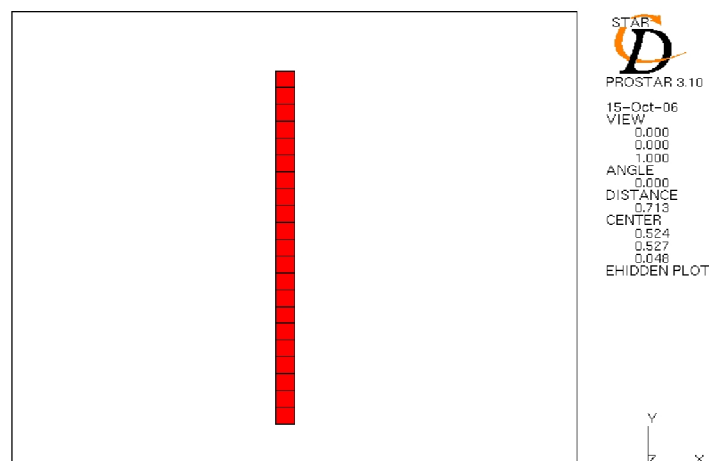
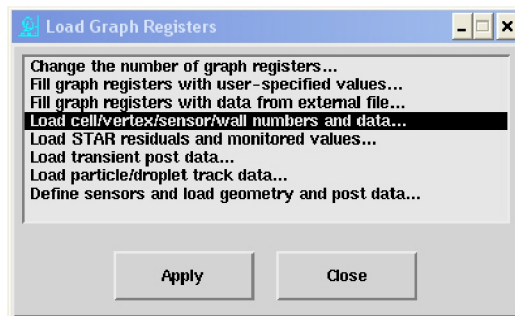


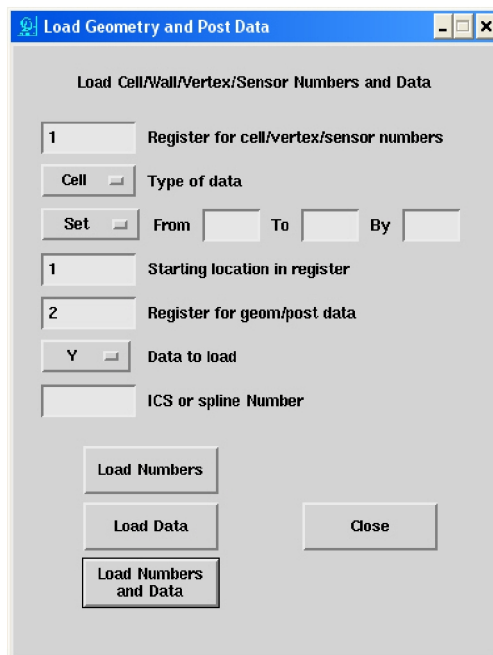
Рис. 10.10. Выделенный ряд ячеек

Введем отобранные результаты в графические регистры, которые затем используем для вывода графической информации:

- В меню *Graph* окна *PROSTAR* выберите строку *Load Graph Data - Graph>Load Graph Data...*
- В открывшемся окне *Load Graph Registers* нужно выбрать строку *Load cell/vertex/sensor/wall numbers and data* как показано ниже:



- Нажмите кнопку **Apply**.
- В появившемся окне *Load Geometry and Post Data* введите данные так, как показано ниже:



- Нажмите на кнопку **Load Numbers and Data** для ввода в графический регистр номеров, а во второй регистр значений координат по оси Y для центров отобранных ячеек.

- Измените значения номера графического регистра, куда вводятся данные, и значение кнопки **Data to load** так, как показано ниже:

- Нажмите на кнопку **Load Data**.
- Нажмите на кнопку **Close**.
- В меню Graph окна PROSTAR выберите строку **Graph Registers... – Graph> Graph Registers...**

В открывшемся окне *Graph Registers* будут заполнены первые 5 регистров:

1. Номера выбранных ячеек (CELL NUMBER).
2. Y -координаты центров ячеек (Numerical).
3. Значения U -компоненты вектора скорости (SU).

Для проведения сравнения результатов решения пакета STAR-CD с известным решением, приведенным в источнике [2], введем значения скоростей в поперечном сечении взятых из этого источника и приведенных в табл. 10.1.

Таблица 10.1. Значения скоростей в поперечном сечении по [2]

Значение Y координаты	Значение приведенной скорости U
0,127	-0,079
0,273	-0,152
0,385	-0,203
0,47	-0,209
0,579	-0,167
0,668	-0,089
0,749	0,018
0,884	0,332
0,94	0,574
0,974	0,789

Значения первого столбца необходимо ввести в 4-й регистр, следующим образом:

- Выделите четвертую строчку в списке *Registers*.
- Напишите название *Y calculate* для регистра в поле *Label for Register 4 (CR to enter)*, по окончании ввода нажмите клавишу **Enter** на клавиатуре.

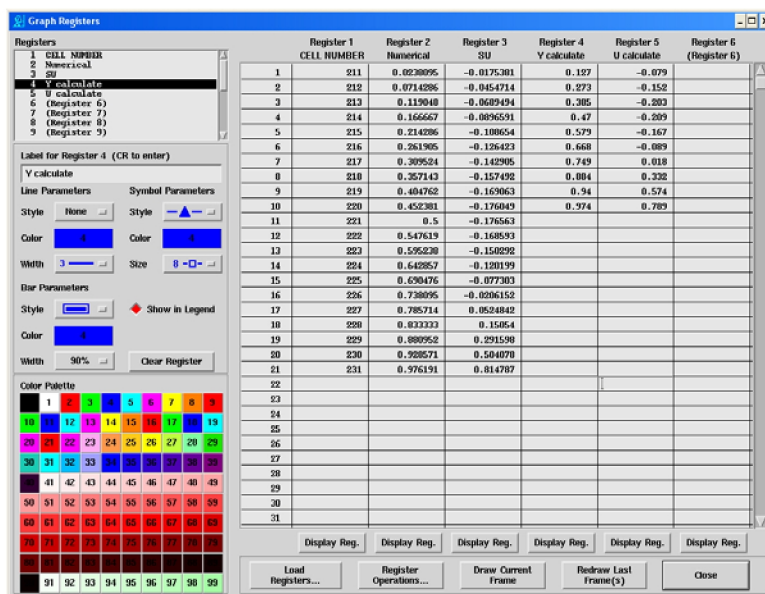


Рис. 10.11. Окно *Graph Registers*

- Введите все значения из первого столбца табл. 10.1 в столбец регистра 4, подтверждая нажатием на клавишу **Enter** на клавиатуре.

Введите таким же образом значения в 5-й регистр из второго столбца табл. 10.1, изменив название регистра на *U calculate*.

Для проведения сравнения необходимо перевести значения *U*-компоненты в третьем регистре в безразмерную форму, разделив на величину скорости, с которой движется верхняя стенка (в нашем случае 5 м/с).

Для модификации значений продольной скорости воспользуемся кнопкой **Register Operation...** окна *Graph Registers*.

- Нажмите на кнопку **Register Operation...**
- В открывшемся окне *Graph Register Operation...* измените регистр 3, умножив его на 0,2 (1/5), как показано на рис. 10.12.

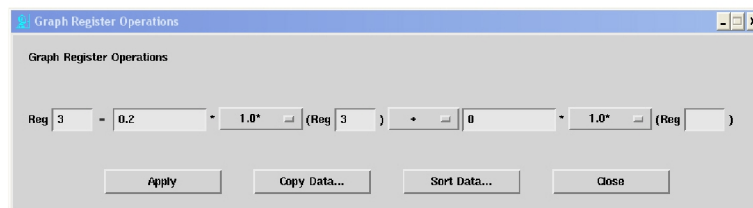



Рис. 10.12. Окно *Graph Register Operation...*

- Нажмите кнопку **Apply**.
- Нажмите кнопку **Close**.
- В окне *Graph Registers* выделите курсором название второго регистра в окне *Registers*.
 - Измените название регистра, набрав в текстовом окне *Label for Register 2 Numerical*.
 - Нажмите клавишу **ENTER** на клавиатуре.
 - В окне *Graph Registers* выделите курсором название четвертого регистра в окне *Registers*.
 - Установите значение кнопки **Style** блока *Line Parameters* – **None**.

- Установите значение кнопки **Style** блока *Symbol Parameters* – .

- Результирующий вид окна *Graph Registers*, после выполнения вышеприведенных операций, показан на рис. 10.11.

Для определения параметров оформления графического вывода:

- В меню *Graph* окна PROSTAR выберите строку **Graph Display... - Graph> Graph Display ...**

- В открывшемся окне *Graph Module* введите значения так, как показано на рис. 10.13.

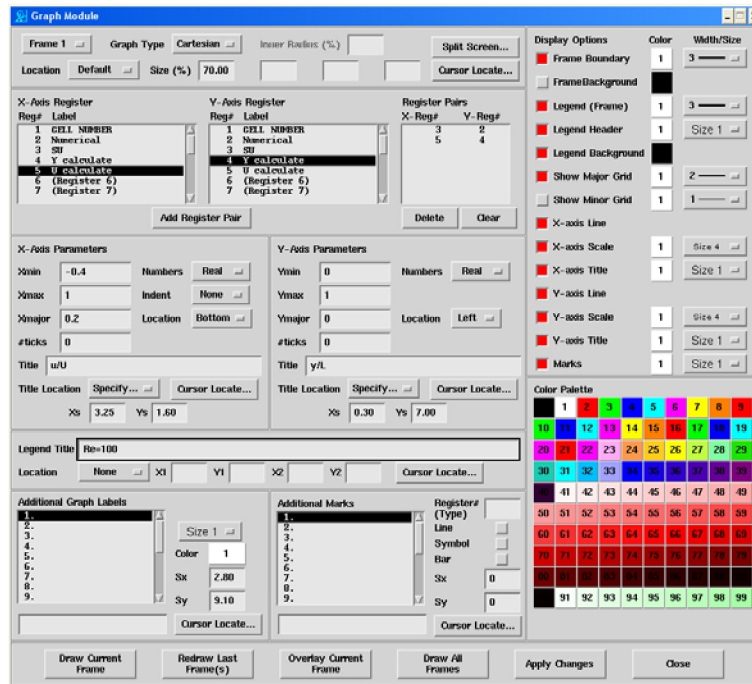


Рис. 10.13. Окно *Graph Module*

- Выделите 3-ю строку в списке *X-Axis Register*, 2-ю строку в списке *Y-Axis Register*, нажмите кнопку **Add Register Pair**.

- Выделите 5-ю строчку в списке *X-Axis Register*, 4-ю строчку в списке *Y-Axis Register*, нажмите кнопку **Add Register Pair**.

- Нажмите на кнопку **Apply Changes** окна *Graph Module*.

- Нажмите на кнопку **Draw Current Frame** окна *Graph Module*.

В окне PROSTAR появится фрейм, показанный на рис. 10.14, настройки которого определяются установками окна *Graph Module*.

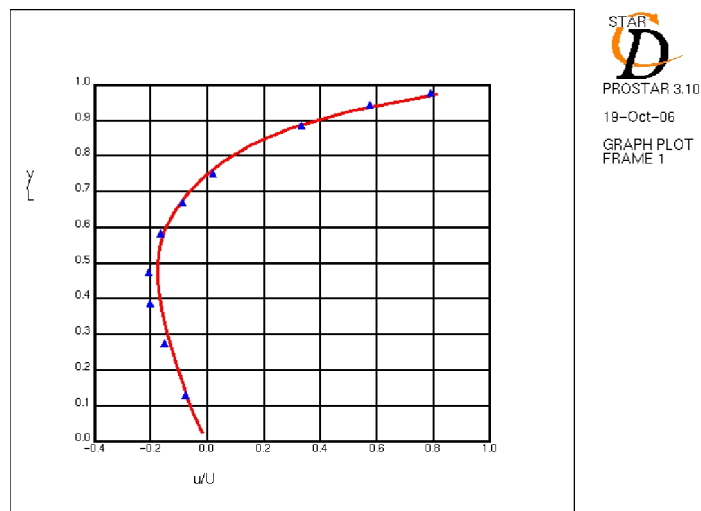


Рис. 10.14. Профиль безразмерной скорости в поперечном сечении


На рис. 10.14 линией показаны результаты расчета программы STAR-CD, а треугольниками отмечены значения в соответствии с табл. 10.1.

- В меню *Plot* окна PROSTAR установите вывод в файл, вместо установленного вывода на экран- **Plot>Plot to File**.

- Нажмите на кнопку **Draw Current Frame** окна *Graph Module*.

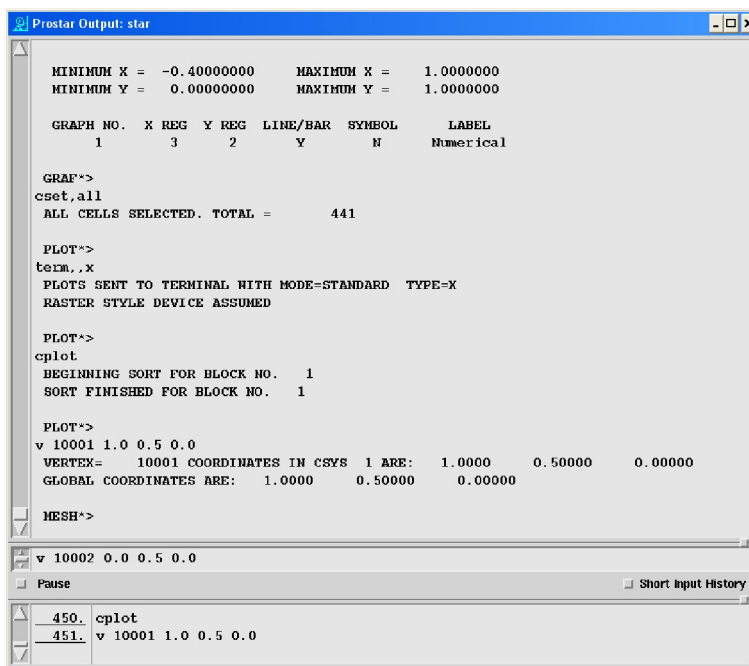
- Нажмите на кнопку **Close** окна *Graph Module*.

- Нажмите на кнопку **Close** окна *Graph Registers*.
- В меню *Plot* окна PROSTAR установите вывод на экран – **Plot>Plot to Screen**.

- Нажмите кнопку  в боковом управляющем интерфейсе окна PROSTAR и в открывшемся меню выберите – **All**.
- Нажмите кнопку **Cell Plot** верхнего управляющего интерфейса окна PROSTAR, для вывода расчетной области.

10.7.7. Построение профиля скорости V

Для построения профиля поперечной скорости в центральном горизонтальном сечении полости применим построение в сечении набора дополнительных узлов, лежащих в плоскости сечения и называемых сенсорами.



```

Prostar Output: star
MINIMUM X = -0.40000000    MAXIMUM X = 1.00000000
MINIMUM Y = 0.00000000    MAXIMUM Y = 1.00000000

GRAPH NO. X REG Y REG LINE/BAR SYMBOL LABEL
1 3 2 Y N Numerical

GRAF^>
cset,all
ALL CELLS SELECTED. TOTAL = 441

PLOT^>
term,,x
PLOTS SENT TO TERMINAL WITH MODE=STANDARD TYPE=X
RASTER STYLE DEVICE ASSUMED

PLOT^>
cplot
BEGINNING SORT FOR BLOCK NO. 1
SORT FINISHED FOR BLOCK NO. 1

PLOT^>
v 10001 1.0 0.5 0.0
VERTEX= 10001 COORDINATES IN CSYS 1 ARE: 1.0000 0.50000 0.00000
GLOBAL COORDINATES ARE: 1.0000 0.50000 0.00000

MESH^>

v 10002 0.0 0.5 0.0
Pause Short Input History

450. cplot
451. v 10001 1.0 0.5 0.0

```

Рис. 10.15. Ввод команд для создания крайних узлов набора сенсоров

В командной строке окна OUTPUT введите команды для создания крайних узлов набора сенсоров с координатами (1.0, 0.5, 0.0), (0.0, 0.5, 0.0) и номерами 10001 и 10002 соответственно.

- V 10001 1.0 0.5 0.0
- V 10002 0.0 0.5 0.0

Вид окна с результатом выполнения этих команд представлен на рис. 10.15.

Введем значения полей скорости в расчетной области. Для этого:

- В открытом меню *Load Data* окна Navigation Center (NavCentr) щелкните на закладке *Data*.
- Установите значение кнопки *Data Type* – **Cell**.
- Установите значение кнопки *Smooth Option* – **Off**.
- В блоке *Vector Data* должна быть нажата кнопка **Velocity**.
- В блоке *Scalar Data* должна быть нажата кнопка **None**.

Нажмите на кнопку **Get Data**.

Создадим набор из 20 сенсоров, лежащих между 10001 и 10002 узлами. Для этого:

- В меню *Graph* окна PROSTAR выберите строку **Load Graph Data... - Graph>Load Graph Data...**
- В открывшемся окне *Load Graph Registers* нужно выбрать строку *Define sensors and load geometry and post data...*

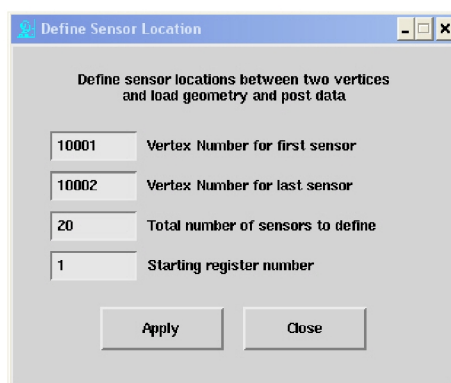



Рис. 10.16. Окно *Define Sensor Location*

- Нажмите кнопку **Apply**.
- В появившемся окне *Define Sensor Location* введите данные так, как показано на рис. 10.16.

- Нажмите кнопку **Apply**.
- Нажмите кнопку **Close**.
- Нажмите кнопку **Close** в окне *Load Graph Registers*.

Для изображения набора сенсоров окне PROSTAR:

- В меню Plot окна PROSTAR выберите строку *Vertex Style...* и установите размер символа для узла равный 4 – **Plot>Vertex Style. ...>Size>4**.

- Нажмите кнопку  в боковом управляющем интерфейсе окна PROSTAR и в открывшемся меню выберите **New>All Sensors**.

- Нажмите кнопку **Vertex** в блоке *Cell Plot Display Option* верхнего управляющего интерфейса окна PROSTAR.

- Нажмите кнопку **Cell Plot** верхнего управляющего интерфейса окна PROSTAR для вывода набора сенсоров, показанных на рис. 10.17.

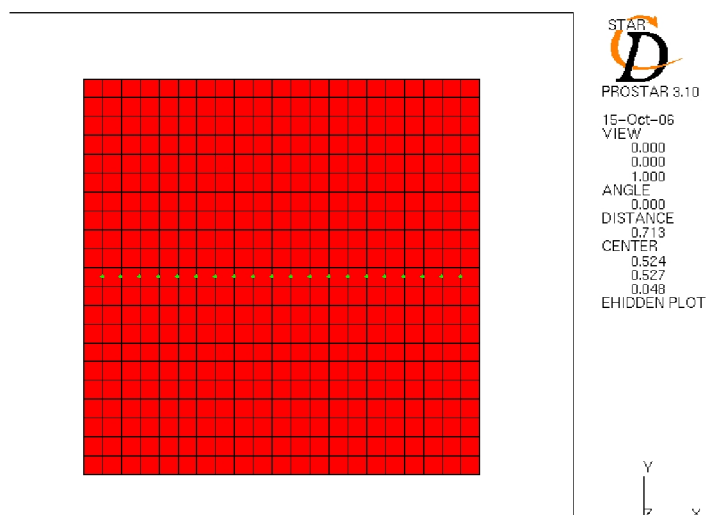


Рис. 10.17. Набор сенсоров

Для построения графического изображения профиля поперечной скорости:

- В меню *Graph* окна PROSTAR выберите строку **Graph Registers... – Graph> Graph Registers...**

В открывшемся окне *Graph Registers* будут заполнены первые 8 регистров:

1. Номера выбранных сенсоров.
2. Дистанция между сенсорами.
3. *X*-координаты сенсоров.
4. *Y*-координаты сенсоров.
5. *Z*-координаты сенсоров.
6. Значения *U*-компоненты вектора скорости.
7. Значения *V*-компоненты вектора скорости.
8. Значения *W*-компоненты вектора скорости.

Так как окно ограничено по ширине, то будет видно первые 6 регистров.

- Выведите значение седьмого регистра в четвертый столбец, выделив седьмой регистр в окне *Registers* и нажав на кнопку **Display Reg.** под четвертым столбцом.

- Измените название регистра, набрав в текстовом окне *Label for Register 7 – Numerical*, подтвердив нажатием клавиши **Enter** на клавиатуре.

- Нажмите на кнопку **Register Operation...** окна *Graph Registers*.

В открывшемся окне *Graph Register Operation* измените седьмой регистр, домножив его на величину, обратную значению скорости верхней стенки (то есть на 0,2), подобным образом, как в предыдущем пункте.

- Нажмите кнопку **Apply** окна *Graph Register Operation*.

- Выведите незаполненный девятый регистр в пятый столбец, выделив девятый регистр в окне *Registers* и нажав на кнопку **Display Reg.** под пятым столбцом.

- Выведите незаполненный десятый регистр в шестой столбец, выделив десятый регистр в окне *Registers* и нажав на кнопку **Display Reg.** под шестым столбцом.

Введем значения скоростей в продольном сечении, взятых из источника [2], приведенных в таблице 10.2.

Таблица 10.2. Значения скоростей в продольном сечении по [2]


Значение <i>X</i> -координаты	Значение приведенной скорости <i>V</i>
0,089	0,112
0,191	0,163
0,287	0,17
0,461	0,086
0,579	-0,018
0,633	-0,081
0,748	-0,226
0,848	-0,226
0,899	-0,162
0,95	-0,084

Значения первого столбца необходимо ввести в девятый регистр следующим образом:

- Выделите девятую строчку в списке *Registers*.
- Напишите название *X calculate* для регистра в поле *Label for Register 4 (CR to enter)*, нажмите клавишу **Enter** на клавиатуре.
- Введите все значения из первого столбца табл. 10.2 в пятый столбец, подтверждая нажатием на клавишу **Enter** на клавиатуре.

Введите таким же образом значения в десятый регистр из второго столбца табл. 10.2, изменив название регистра на *V calculate*.

Для корректировки параметров графического отображения введенных данных проведем следующие действия:

- В окне *Graph Register* выделите название десятого регистра.
 - Установите значение кнопки **Style** блока *Line Parameters* – **None**.
 - Установите значение кнопки **Style** блока *Symbol Parameters* – .
 - Установите значение кнопки **Color** блока *Symbol Parameters* – 4.
 - Нажмите на кнопку **Close** окна *Graph Register Operation*.
- Результирующий вид окна *Graph Registers* приведен на рис. 10.18.

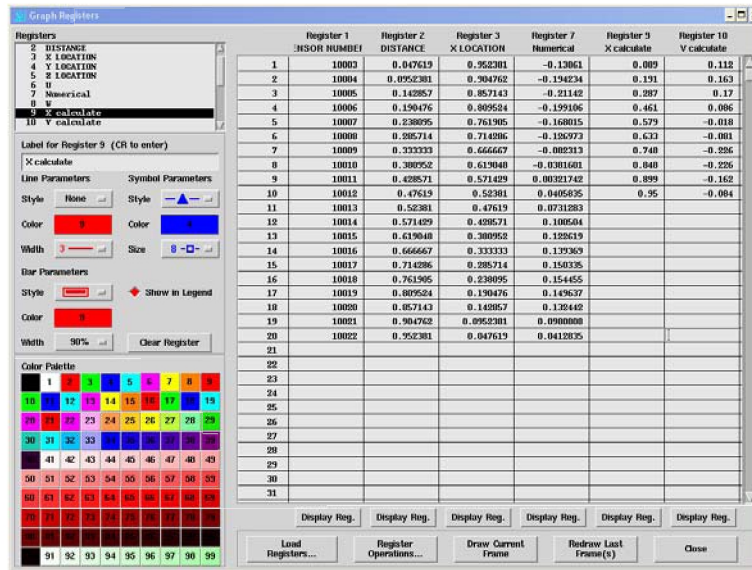


Рис. 10.18. Окно *Graph Registers*

Для определения параметров графического вывода:

- В меню **Graph** окна PROSTAR выберите строку **Graph Display... – Graph>Graph Display...**
- Очистите установленные значения от предыдущего построения в окне *Register Pairs* нажатием на кнопку **Clear**.

- В открывшемся окне *Graph Module* введите значения так, как показано на рис. 10.19.

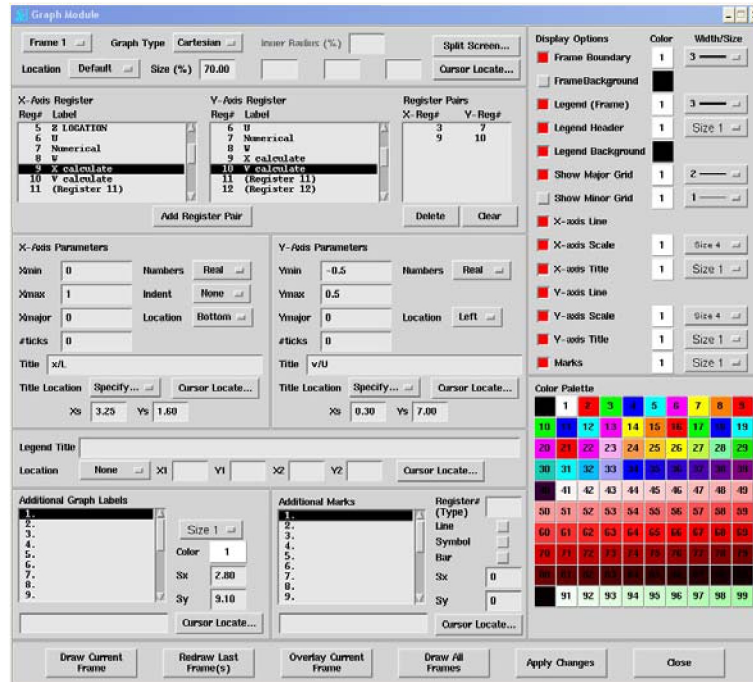


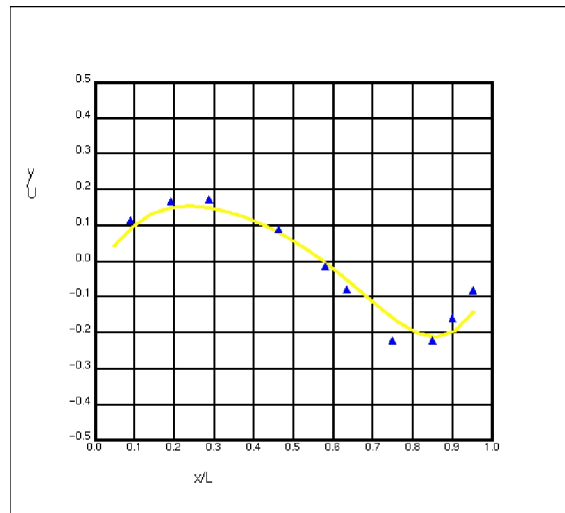
Рис. 10.19. Окно *Graph Module*

- Нажмите на кнопку **Apply Changes** окна *Graph Module*.
- Нажмите на кнопку **Draw Current Frame** окна *Graph Module*.

В окне PROSTAR появится фрейм, показанный на рис. 10.20.

Для вывода фрейма в файл:

- В меню *Plot* окна PROSTAR установите вывод в файл – *Plot>Plot to File*.
- Нажмите на кнопку **Close** окна *Graph Module*.
- Нажмите на кнопку **Close** окна *Graph Registers*.



STAR
D
PROSTAR 3.10
19-Oct-06
GRAPH PLOT
FRAME 1

Рис. 10.20. Профиль безразмерной скорости в продольном сечении

10.7.8. Расчет комплекса f

Для определения комплекса:

$$f = \frac{2F}{\rho U^2 l} = \frac{2Sxforce}{\rho U^2 l \Delta Z}$$

используем значение силы трения – **Sxforce** на верхней движущейся стенке, значение которой по итерациям выводилось при численном решении в файл *star.erd* (вывод которой был настроен в п. 3.2.).

В командной строке окна OUTPUT введите команду для построения графика изменения силы трения по итерациям:

- **Edgraph star.erd Sxforce 2.**

Результат действия команды представлен на рис. 10.21.

В окне PROSTAR появится фрейм, который нужно изменить следующим образом:

В меню Graph окна PROSTAR выберите строку **Graph Registers...** – **Graph> Graph Registers...**

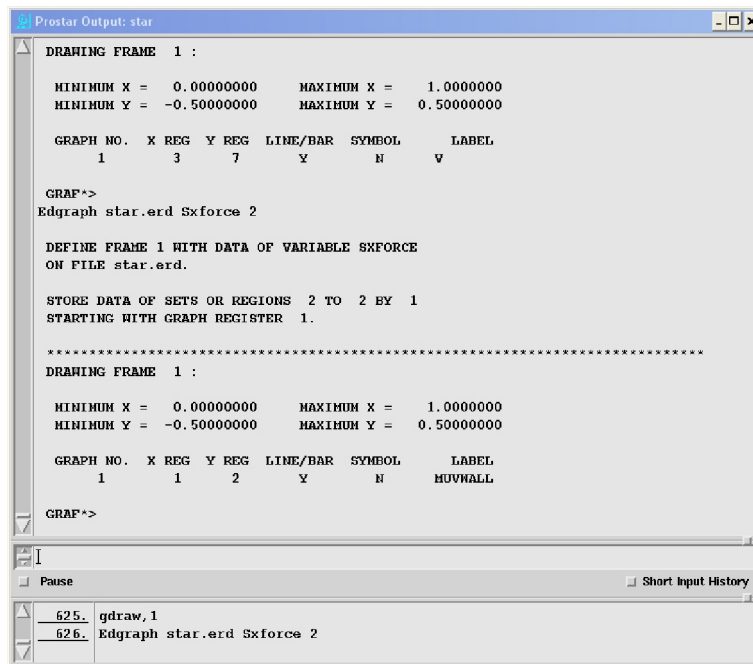


Рис. 10.21. Результат действия команды **Edgraph star.erd Sxforce 2**

В открывшемся окне *Graph Registers* нужно перевести значение силы трения в третьем регистре в безразмерную форму. Для этого воспользуемся кнопкой **Register Operation...** окна *Graph Registers*.

- Нажмите на кнопку **Register Operation...** окна *Graph Registers*.

В открывшемся окне *Graph Register* измените второй регистр, домножив его на величину следующего коэффициента:

$$\frac{2}{\rho U^2 l \Delta Z} = \frac{2}{1 \cdot 5^2 \cdot 0,05} = 1,6.$$

На рис. 10.22 представлено окно *Graph Registers Operations*.

- Нажмите на кнопку **Apply** окна *Graph Register Operation*.
- Нажмите на кнопку **Close** окна *Graph Register Operation*.

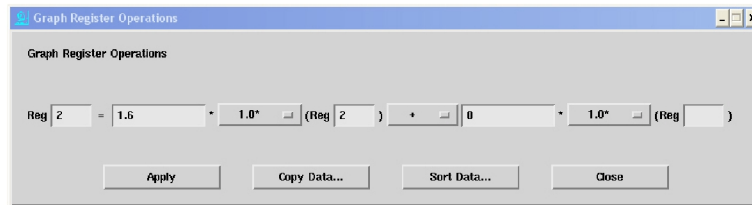


Рис. 10.22. Окно *Graph Registers Operations*

- Нажмите на кнопку **Close** окна *Graph Register*.
- В меню *Graph* окна PROSTAR выберите строку **Graph Display... - Graph> Graph Display...**
- В открывшемся окне *Graph Module* введите значения так, как показано ниже (рис. 10.23).

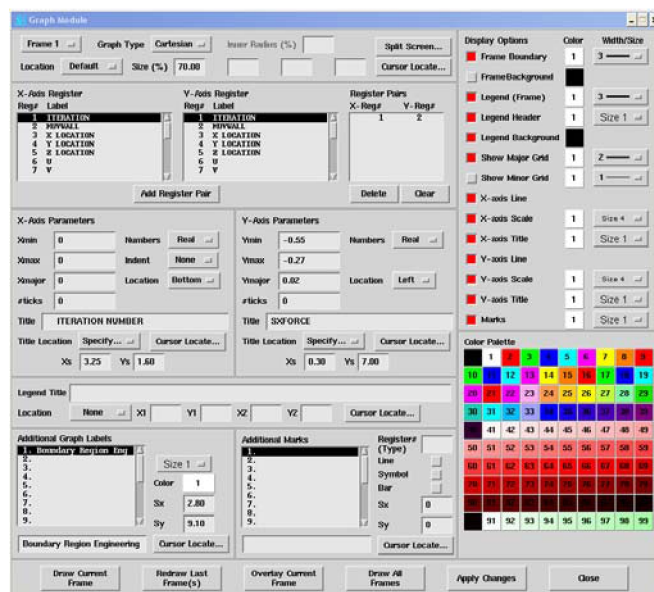


Рис. 10.23. Окно *Graph Module*

- Нажмите на кнопку **Apply Changes** окна *Graph Module*.
- Нажмите на кнопку **Draw Current Frame** окна *Graph Module*.

В результате в окне PROSTAR появится фрейм, показанный на рис. 10.24.

Для вывода фрейма, изображенного в окне PROSTAR, в файл:

- В меню *Plot* окна PROSTAR установите вывод в файл – **Plot>Plot to File**.
- Нажмите на кнопку **Draw Current Frame** окна *Graph Module*.
- Нажмите на кнопку **Close** окна *Graph Module*.
- Нажмите на кнопку **Close** окна *Graph Registers*. В меню *Plot* окна PROSTAR установите вывод на экран **Plot>Plot to Screen**.

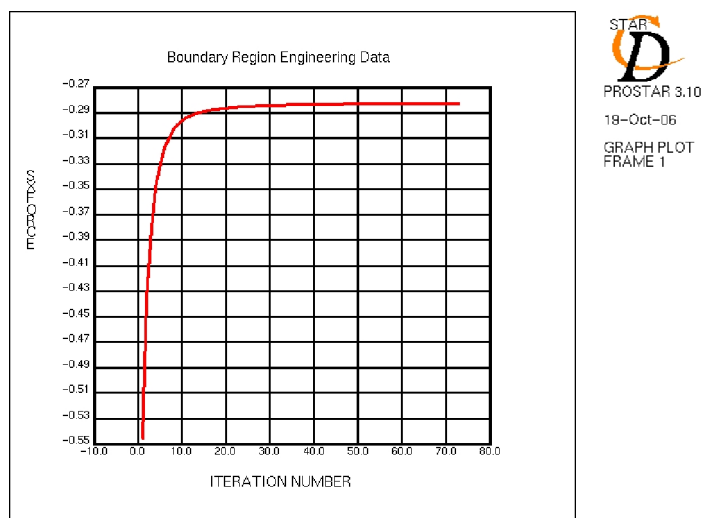


Рис. 10.24. Значение безразмерного комплекса f

Для завершения работы с модулем PROSTAR

- **File>Quit>Quit, Nosave**.

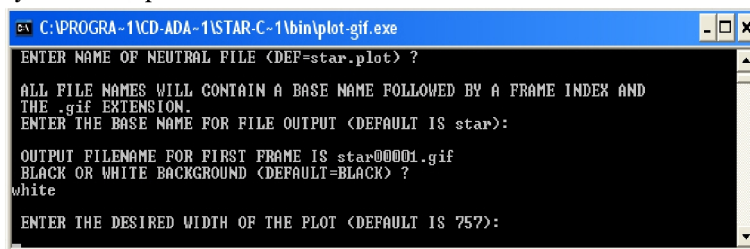
Все результаты обработки численного решения, которые перенаправлялись во внешний файл, сохранены в нейтральном графическом файле – *star.plot*.

10.8. Применение утилиты PLOT для оформления результатов расчета

Закройте или минимизируйте все запущенные приложения, чтобы на поверхности экрана было открыто только окно “Star-CD Launcher”.

- Выберите в окне “Star-CD Launcher” пункт меню: **Neutral Plot Utilities>Plot-GIF**, в результате появится терминальное окно утилиты для конвертации графических данных в GIF-формат.

Измените размеры окна, свернув так, как показано на рис. 10.25, и переместите его в левую верхнюю часть экрана, чтобы середина экрана монитора была освобождена для вывода преобразуемых кадров.



```
C:\PROGRA-1\CD-ADA-1\STAR-C-1\bin\plot-gif.exe
ENTER NAME OF NEUTRAL FILE (DEF=star.plot) ?
ALL FILE NAMES WILL CONTAIN A BASE NAME FOLLOWED BY A FRAME INDEX AND
THE .gif EXTENSION.
ENTER THE BASE NAME FOR FILE OUTPUT (DEFAULT IS star):
OUTPUT FILENAME FOR FIRST FRAME IS star@0001.gif
BLACK OR WHITE BACKGROUND (DEFAULT=BLACK) ?
white
ENTER THE DESIRED WIDTH OF THE PLOT (DEFAULT IS 757):
```

Рис. 10.25. Терминальное окно утилиты конвертации графических данных

Последовательно ответьте на следующие вопросы:

– ENTER NAME OF NEUTRAL FILE

- Нажмите клавишу **Enter** для оставления имени по умолчанию.

– ENTER THE BASE NAME FOR FILE OUTPUT

- Нажмите клавишу **Enter** для оставления имени по умолчанию.

– BLACK OR WHITE BACKGROUND

- Наберите *white* (предпочтительней).

- Нажмите клавишу **Enter**.

– ENTER THE DESIRED WIDTH OF THE PLOT

- Нажмите клавишу **Enter** для оставления имени по умолчанию.

На экран монитора будут последовательно выводиться кадры, которые затем будут сохраняться в GIF-формате в рабочей папке Lab2 с названиями StarXXXXX.GIF.

10.9. Приложение

Представим результаты расчетов в случае, если бы рабочая жидкостью была вода, при числах Рейнольдса, равных 400, 2500. Для проведения расчетов необходимо определить скорость движения верхней стенки, исходя из определения числа Re.

$$Re = \frac{\rho U l}{\mu},$$

где $\rho = 999,9 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды;

$\mu = 0,001006 \text{ кг/м} \cdot \text{с}$ – динамический коэффициент вязкости при температуре $T = 293 \text{ К}$;

$l = 1 \text{ м}$ – длина стенки.

Выразим U через Re, подставим значение числа Re:

$$U = \frac{Re \cdot \mu}{\rho l};$$

$$U_{Re=400} = \frac{400 \cdot 0,001006}{999,9 \cdot 1} = 0,0004024 \text{ м/с};$$

$$U_{Re=2500} = \frac{2500 \cdot 0,001006}{999,9 \cdot 1} = 0,002515 \text{ м/с}.$$

Проведя численный эксперимент в программе Star-CD, были получены следующие результаты (рис. 10.26 и 10.27).

Анализируя данные результаты можно сказать, что увеличение числа Re приводит к развитию центрального вихря, что согласуется с результатами, приведенными в [2]. В работе [2] приводится более подробный анализ течения в зависимости от числа Re, соотношения размеров поперечной и продольных сторон квадратной полости.

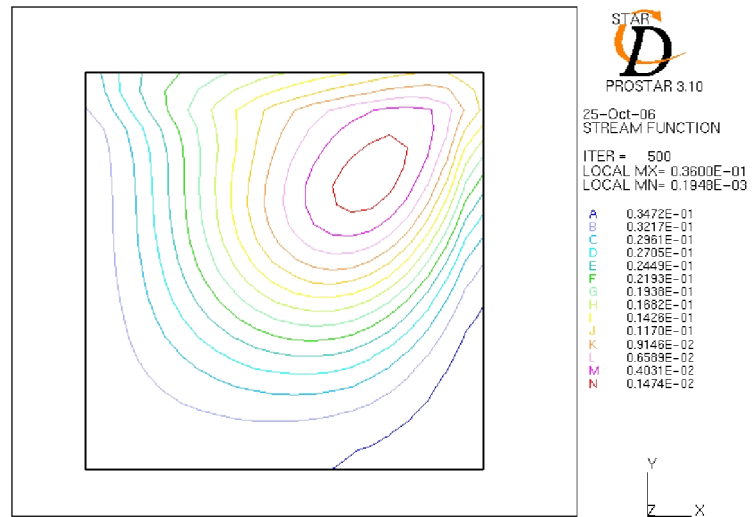


Рис. 10.26. Поле линий тока для $Re = 400$

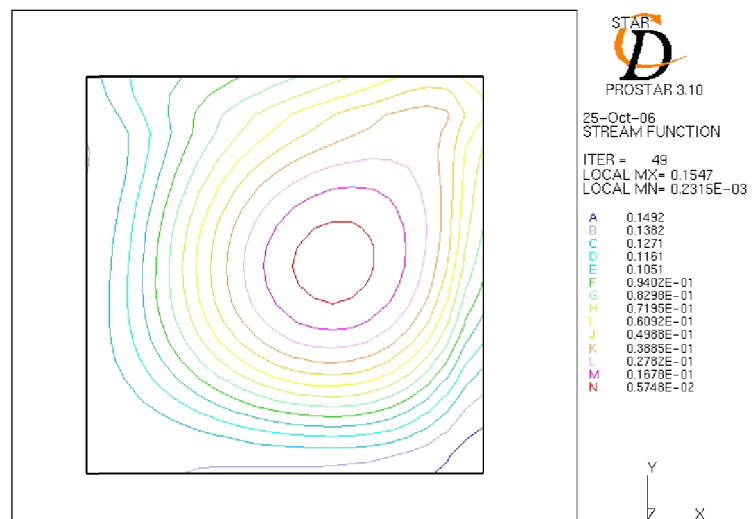


Рис. 10.27. Поле линий тока тока для $Re = 2500$

Список использованных источников

1. Сергель, О. С. Прикладная гидрогазодинамика : учебник для авиац. вузов / О. С. Сергель. – М. : Машиностроение, 1981. – 374 с.

2. Белов, И. А. Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости / И. А. Белов, С. А. Исаев, В. А. Коробков. – Л. : Судостроение, 1989. – 256 с.

Учебное издание

***Некрасова Светлана Олеговна,
Диденко Алексей Александрович,
Бирюк Владимир Васильевич***

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАКЕТА STAR-CD
В ЗАДАЧАХ ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ
ЧАСТЬ I. НАЧАЛЬНЫЙ КУРС

Учебное пособие

Технический редактор В. Н. Матвеев
Редакторская обработка Т. К. Кретьнина
Корректорская обработка Н. С. Куприянова
Верстка С. О. Некрасова
Доверстка В. С. Телепова, Т. К. Кретьнина

Подписано в печать Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 7,44. Усл. кр.-отг. 7,56. Печ. л. 8,0
Тираж 50 экз. Заказ ИП-78/2006

Самарский государственный аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34

Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34