

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА
(национальный исследовательский университет)»

О.В. БАТУРИН, Н.В. БАТУРИН, В.Н. МАТВЕЕВ

**РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ
С ПОМОЩЬЮ УНИВЕРСАЛЬНОГО
ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА *FLUENT***

Электронное учебное пособие

САМАРА
2010

Авторы: БАТУРИН Олег Витальевич,
БАТУРИН Николай Витальевич,
МАТВЕЕВ Валерий Николаевич

В данном электронном учебном пособии изложены основы работы в программе *Fluent*: задание граничных условий и физических моделей потока рабочего тела, способов решения уравнений газовой динамики и визуализации полученных результатов.

Пособие разработано на кафедре теории двигателей летательных аппаратов СГАУ и предназначено для магистров, обучающихся по направлению 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов» по дисциплинам «Газовая динамика авиационных двигателей и энергетических установок» и «Газовая динамика агрегатов и двигателей летательных аппаратов».

ОГЛАВЛЕНИЕ

Основные условные обозначения	5
Введение	7
1. Общие сведения о работе в программе <i>Fluent</i>	11
1.1. Главное меню программы <i>Fluent</i>	13
1.2. Работа с моделями: загрузка, запись, импорт и т.п.	16
2. Основные этапы подготовки расчетной модели	20
2.1. Проверка качества конечноэлементной сетки	20
2.2. Масштабирование расчетной сетки	21
2.3. Просмотр конечноэлементной сетки	22
2.4. Другие операции с расчетной сеткой	23
2.5. Выбор типа решателя и постановки задачи	26
2.6. Учет в расчете уравнения энергии	28
2.7. Задание справочного давления	28
2.8. Задание свойств рабочего тела	29
3. Задание граничных условий в программе <i>Fluent</i>	34
3.1. Граничное условие «полное давление на входе» (<i>Pressure inlet</i>)	36
3.2. Граничное условие «массовый расход на входе» (<i>Mass flow inlet</i>)	40
3.3. Граничное условие «статическое давление на выходе» (<i>Pressure outlet</i>)	41
3.4. Граничное условие <i>Outflow</i>	42
3.5. Условие периодичности	43
3.6. Граничные условия «стенка» (<i>Wall</i>)	44
3.7. Изменение размерности вводимых параметров	47
3.8. Копирование граничных условий с одной расчетной модели на другую	48
3.9. Описание свойств области течения	48
4. Моделирование турбулентности	51
4.1. Задание турбулентности в программе <i>Fluent</i>	51
4.2. Пристеночные функции	53
4.3. Задание дополнительных граничных условий для турбулентности	56
5. Настройка решателя и решение задач в программе <i>Fluent</i>	59
5.1. Установка параметров решателя	59
5.2. Отображение процесса решения и критерии сходимости	65
5.3. Установка начальных значений параметров	70
5.4. Запуск решения	71
5.5. Проверка баланса расходов	74

6. Обработка результатов расчета	75
6.1. Построение поверхностей, линий и точек, на которых будут отоб- ражаться результаты расчета	75
6.1.1. Построение вспомогательной точки	76
6.1.2. Построение вспомогательной линии	76
6.1.3. Построение вспомогательной поверхности	77
6.1.4. Построение вспомогательной изоповерхности	78
6.1.5. Построение вспомогательной геометрии копированием	80
6.1.6. Редактирование списка вспомогательной геометрии	81
6.2. Визуализация полей распределения параметров в расчетной об- ласти	81
6.3. Визуализация векторов скорости	84
6.4. Построение линий тока	86
6.5. Определение среднеинтегральных значений параметра	87
6.6. Построение графиков изменения параметров	88
6.7. Отображение периодических и симметричных элементов	92
6.8. Задание пользовательских переменных	93
6.9. Настройка параметров графического окна	95
7. Моделирование течения через подвижные элементы	99
7.1. Моделирование течения через подвижные элементы с помощью подхода <i>Single Reference Frame</i>	100
7.2. Моделирование течения через подвижные элементы с помощью подхода <i>Multiple Reference Frame</i>	106
7.3. Моделирование течения через подвижные элементы с помощью подхода <i>Mixing Plane</i>	108
7.4. Моделирование течения через подвижные элементы с помощью подхода <i>Sliding Mesh</i>	112
7.5. Стратегия получения решения при моделировании течения через подвижные элементы	117
8. Пример решения задачи в программе <i>Fluent</i>	119
Список использованных источников	146
Приложение 1	149

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

a	— скорость звука, м/с;
$a_{кр}$	— критическая скорость, м/с;
D	— диаметр, м;
F	— площадь проходного сечения, м ² ;
G	— массовый расход воздуха или газа, кг/с;
k	— показатель изоэнтропы, турбулентная кинетическая энергия, м ² /с ² ;
L	— удельная работа, Дж/кг;
m	— масса, кг;
M	— число Маха (отношение скорости потока к скорости звука); крутящий момент, Н·м;
n	— частота вращения, мин ⁻¹ ;
p	— давление, Па;
R	— удельная универсальная газовая постоянная, Дж/(кг·К);
S	— линия тока;
T	— температура, К;
t	— время, с;
u, v, w	— проекции вектора скорости на координатные оси, м/с;
w	— скорость в относительном движении, м/с;
x, y, z	— координаты, м;
α	— углы потока в абсолютном движении, град;
β	— углы потока в относительном движении, град;
ε	— скорость диссипации турбулентной кинетической энергии;
ζ	— коэффициент потерь;
ρ	— плотность, кг/м ³ ;
σ	— коэффициент восстановления полного давления;
η	— коэффициент полезного действия;
λ	— приведенная скорость;
μ	— динамическая вязкость, Па·с;
ω	— скорость рассеивания турбулентности, угловая скорость, рад/с

Индексы

<i>*</i>	— заторможенные параметры;
<i>a</i>	— осевая проекция;
<i>в</i>	— вход, воздух;
<i>г</i>	— газ;
<i>пр</i>	— профильный, приведенный;
<i>кр.</i>	— кромочный, критический;
<i>к</i>	— концевой, периферийный;
<i>лам</i>	— ламинарный;
<i>отр</i>	— отрывной;
<i>ср</i>	— средний;
<i>тр</i>	— трение;
<i>турб</i>	— турбулентный
<i>с</i>	— абсолютный;
<i>n</i>	— по нормали;
<i>r</i>	— радиальный;
<i>x, y, z</i>	— проекции на соответствующие координатные оси;
<i>w</i>	— относительный

Условные сокращения

<i>ВМ</i>	— верхнее меню программы <i>Gambit</i> ;
<i>ГДФ</i>	— газодинамические функции;
<i>ГМ</i>	— главное меню программ <i>Gambit</i> и <i>Fluent</i> ;
<i>ГУ</i>	— граничное условие;
<i>КЭ</i>	— конечные элементы;
<i>ОС</i>	— операционная система;
<i>ПД</i>	— поршневой двигатель;
<i>ПК</i>	— персональный компьютер;
<i>СК</i>	— система координат;
<i>ЦИАМ</i>	— Центральный институт авиационного моторостроения;
<i>CFD</i>	— <i>Computer Fluid Dynamics</i> (общепринятое сокращение «вычислительная газовая динамика»).

Остальные обозначения, индексы и условные сокращения объяснены в тексте.

ВВЕДЕНИЕ

Программный комплекс *Fluent* позволяет решать задачи:

- течения жидкостей и газов в каналах произвольной формы;
- внешнего обтекания;
- теплопередачи (вынужденная и свободная конвекция, теплопередача и лучистый теплообмен);
- течения со свободными поверхностями;
- течения многофазных сред;
- течения реагирующих потоков, включая горение;
- движения твердых частиц и капель жидкости в потоке;
- изменения фазового состояния вещества (плавление, кипение, кристаллизация, испарение, кавитация);
- течения в движущихся каналах (например, в смесительных устройствах и турбомашинах);
- моделирования течения в каналах с меняющейся в процессе решения геометрией (например, в цилиндрах ДВС);
- акустики.

Типичный процесс исследования потока с помощью программного комплекса *Fluent* показан на блок-схеме (рис. 1).

Первые три этапа решения задачи выполняются в программе *Gambit*, являющейся составной частью программного комплекса. Остальные этапы реализуются непосредственно в программе *Fluent*.

Данное методическое пособие посвящено работе в основной части комплекса – программе *Fluent* и охватывает пункты 4... ...7 на блок-схеме.

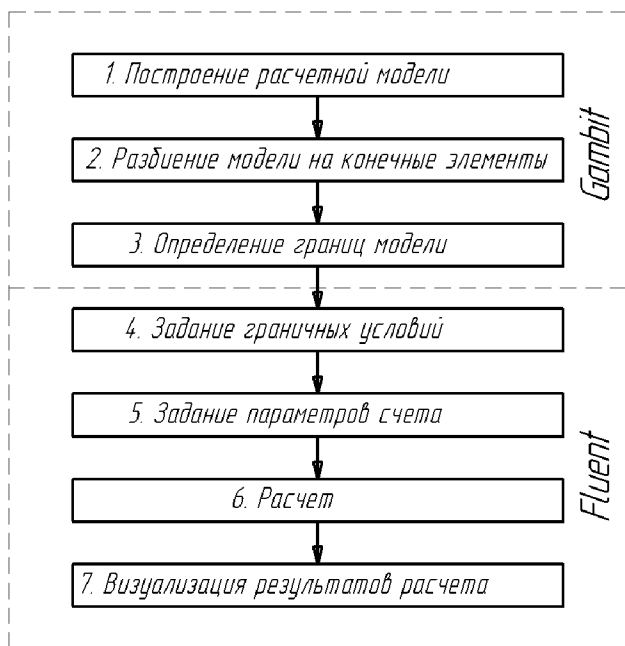


Рис. 1. Этапы решения газодинамических задач в программном комплексе *Fluent*

Программный код *Fluent* написан на модификации алгоритмического языка *Си*, и одинаково хорошо работает на всех известных платформах.

Программа *Fluent* позволяет решать двухмерные, осесимметричные и трехмерные задачи в стационарной или нестационарной постановках в большом диапазоне скоростей потока. Течение рабочего тела может рассматриваться как невязкое, ламинарное или турбулентное.

Программный комплекс *Fluent* использует неструктурированную сеточную технологию. Это значит, что он может решать задачи на конечно-элементных сетках, состоящих из элементов разнообразной формы: шестиугольников, четырехугольников и треугольников, гексэдеров и тетраэдеров, призм, пирамид и др.

Конечноэлементная сетка может адаптироваться (сгущаться или укрупняться) по результатам расчета. Это позволяет получить более точное решение для областей с большими градиентами параметров потока, например, для пограничных слоев и скачков уплотнения. Указанная

возможность снижает требования к качеству сетки, сокращает время ее создания и проведения расчета, а также позволяет снизить объем оперативной памяти.

Программа *Fluent* обладает большой базой данных свойств рабочих тел, которая включает в себя сведения о жидкостях, газах и твердых телах. Она может быть расширена за счет пользовательских баз. Параметры рабочего тела в расчете могут быть как постоянными, так и меняться в зависимости от параметров потока.

Программный комплекс использует для решения метод конечных объемов и позволяет проводить решение задач с помощью одного из трех алгоритмов:

- неявного алгоритма *Pressure Based* (в российской литературе его называют алгоритмом установления);
- явного алгоритма *Density Based* (в российской литературе - алгоритм расщепления);
- неявного алгоритма *Density Based*.

Решатель программного комплекса позволяет проводить решение на вложенных сетках. Исходные уравнения могут быть дискретизированы по первому, второму или частично третьему порядку точности. Решение может быть распараллелено и осуществляться на нескольких процессорах.

Во *Fluent* включены различные физические модели таких процессов, как: теплопередача, фазовые переходы, кавитация и др.

В программном комплексе доступны следующие модели турбулентности: Рейнольдса, Спаларта - Аламарса, $k-\omega$, $k-\varepsilon$, $V2F$, *LES*, *DES*. Повышение точности моделирования пограничных слоев достигается за счет использования пристеночных функций.

Программа *Fluent* позволяет использовать большое количество граничных условий на входе и выходе из расчетной области, моделировать подвижные стенки каналов.

В программе реализованы широкие возможности визуализации результатов решения. Возможно построение полей распределения параметров потока, векторов, линий тока, создание анимации, управление отображением модели и т.п. Результаты могут быть представлены в виде графиков, текстовых файлов или интегральных значений параметров.

К сожалению, объем данного издания не позволяет показать всех возможностей препроцессора и рассказать обо всех командах. Поэтому информация, приведенная в методическом пособии, дает представление лишь об основных и наиболее применимых командах, применяемых при решении задач течения жидкостей и газов.

Авторы выражают благодарность Рабкесову И.В., Шаблю Л.С., Попову Г.М., Ворошнину Д.В. и Беляеву В.В., оказавшим помощь при написании данной книги.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАБОТЕ В ПРОГРАММЕ *FLUENT*

Штатный запуск программы осуществляется нажатием на соответствующий ярлык на рабочем столе или из меню «Пуск» ОС «Windows»: *Пуск* → *Все программы* → *Fluent Inc Products* → *Fluent 6.3.23* → *Fluent 6.3.23*.

После этого появляется меню (рис. 1.1), предлагающее выбрать размерность задачи, которую предстоит решить. Всего возможно четыре варианта:

- *2d* – двумерная;
- *2ddp* – двумерная с двойной точностью;
- *3d* – трехмерная;
- *3ddp* – трехмерная с двойной точностью.

Поле выбора размерности нажимается кнопка *Run*. Это действие вызовет появление рабочего окна программы *Fluent* (рис. 1.2).

В последние несколько лет большое распространение получили многопроцессорные ПК. В настоящий момент почти вся новая вычислительная техника имеет по два процессора (ядра), все чаще встречаются четырехпроцессорные ПК. При описанном выше способе запуска программы *Fluent* будет при решении использовать только один процессор, не зависимо от их количества на компьютере. Это теоретически позволяет на многопроцессорном ПК запускать в разных окнах несколько задач отличающихся например, ГУ или настройками решателя.

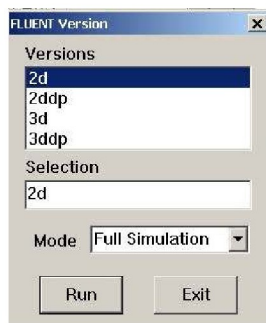


Рис. 1.1. Меню выбора размерности задачи

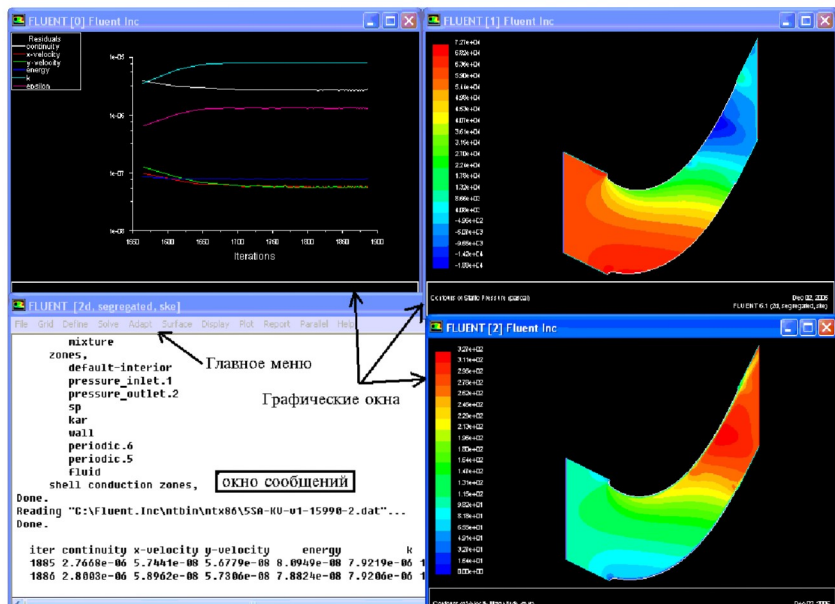


Рис. 1.2. Окно программы *Fluent*

Возможен также запуск программы таким образом, чтобы в решении были задействованы несколько процессоров, что существенно (практически пропорционально числу ядер) ускорит процесс решения. Для того, чтобы запустить *Fluent* с использованием нескольких процессоров необходимо сделать следующие манипуляции:

- Щелкнуть правой клавишей мыши на ярлыке программы *Fluent* на рабочем столе ОС «Windows» и в появившемся списке выбрать пункт «Свойства».

- В появившемся меню в поле «Объект» находится путь к файлу запускающему *Fluent* (например, `C:\Fluent.Inc\ntbin\ntx86\fluent.exe -r6.3.26`). В этом поле, после пути, следует дописать две дополнительные команды. Первая команда имеет вид «`-tX`» и указывает на то, что программа будет запущена на нескольких процессорах. В ней X – число используемых процессоров. Например, команда «`-t2`» указывает на запуск *Fluent* на двух процессорах.

При запуске *Fluent* в многопроцессорном варианте размерность задачи должна быть указана заранее. Поэтому вторая команда указывает на раз-

мерность ($2d$ или $3d$). Таким образом, для запуска программы для решения трехмерных задач с использованием двух процессоров многопроцессорного ПК в поле «Объект» в меню «Свойства» ярлыка программы на рабочем столе должно быть написано: *C:\Fluent.Inc\ntbin\ntx86\fluent.exe -r6.3.26-t2 3d*.

После этого следует запустить *Fluent*, дважды щелкнув левой клавишей мыши на ярлыке на рабочем столе. Программа запустится, минуя диалоговое окно на рис. 1.1.

Как видно из рис. 1.2, окно программы *Fluent* состоит из трех основных элементов:

- *Главного меню*, находящегося в верхней части основного окна. Через него осуществляется доступ к основным командам и меню программы;
- *Окна сообщений*, в котором находится командная строка, откуда можно получить доступ ко всем командам программы. Кроме того, в окне сообщений отображаются результаты выполнения команд и сообщения об ошибках;
- *Графических окон*, в которых отображаются результаты расчета и построений. Число графических окон может быть любым, но удобнее использовать не более четырех.

1.1. Главное меню программы *Fluent*

Главное меню программы *Fluent* функционально может быть разбито на пять основных секций.

1. Подменю работы с расчетной моделью (*File*) (рис. 1.3), которое включает в себя команды чтения, записи, импорта, экспорта моделей и баз данных результатов расчета, запись результатов в виде графических файлов и т.п.

2. Подменю подготовки расчетной модели (*Grid* и *Define*) (рис. 1.4), в которых сосредоточены команды проверки сетки, манипуляций с ней, задания физических моделей, граничных условий, моделей турбулентности и т.п.

3. Подменю *Solve* (рис. 1.5), которое включает в себя команды настройки решателя, инициализации начальных значений, запуска решения и управления отображением процесса решения и т.п.

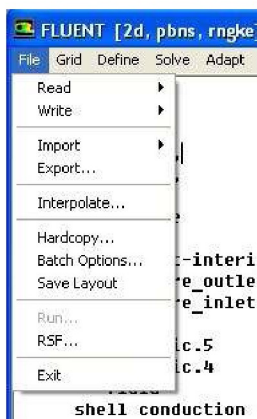


Рис. 1.3. Подменю работы с расчетной моделью (File)



Рис. 1.4. Подменю подготовки расчетной модели (Grid и Define)

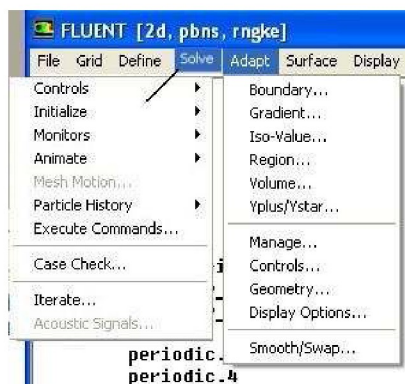


Рис. 1.5. Подменю настройки решателя (Solve) и адаптации (Adapt)

4. Подменю *Adapt* (рис. 1.5), которое предоставляет доступ к командам адаптации сетки по результатам решения.

5. Подменю отображения результатов расчета (*Surface*, *Display*, *Plot* и *Report*) (рис. 1.6), в которых сосредоточены команды отображение результатов расчета различными способами: в виде полей, векторов, графиков, интегральных значений параметров и т.д.

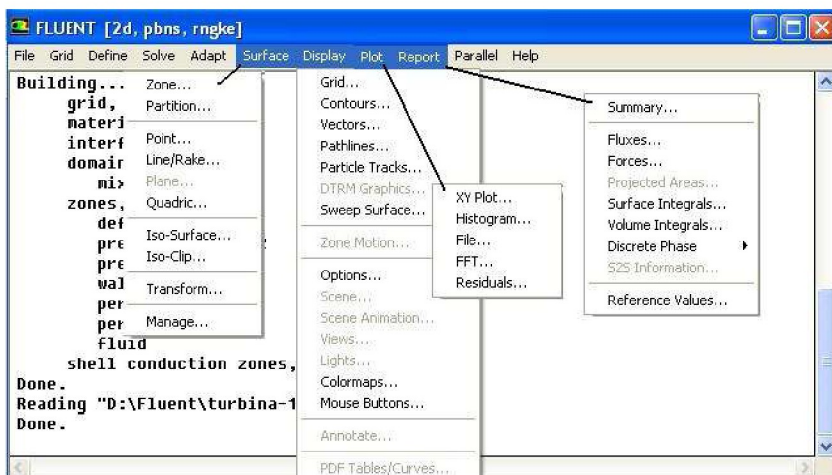


Рис. 1.6. Подменю отображения результатов расчета

В процессе знакомства с программой многие из перечисленных меню и подменю будут рассмотрены подробно.

Нужно отметить, что не все доступные в программе *Fluent* команды представлены в верхнем меню. Там приведены лишь наиболее часто используемые команды. На самом деле число команд программы *Fluent* заметно больше. Доступ ко всем командам осуществляется из командной строки окна сообщений. Правила работы с ней заключаются в следующем.

Если поставить курсор в окне сообщений *Enter*, то пользователю будет предоставлен весь список доступных команд и меню (названия меню имеют в конце знак «/»).

<i>adapt/</i>	<i>file/</i>	<i>report/</i>
<i>define/</i>	<i>grid/</i>	<i>solve/</i>
<i>display/</i>	<i>parallel/</i>	<i>surface/</i>
<i>exit</i>	<i>plot/</i>	<i>view/</i>

Как видно, на верхнем уровне список меню во многом совпадает с названиями подменю главного меню. Для того, чтобы войти в нужное подменю необходимо набрать его название в командной строке. Причем не обязательно вводить название полностью, достаточно набрать несколько первых букв (например, для меню *file* это *f ↵*). Для просмотра доступных команд и меню на текущем уровне также используется клавиша *Enter*. Для

меню *file* список доступных команд и меню выглядит следующим образом:

```
/file>
auto-save/      read-case-data      start-journal
binary-files?   read-field-functions  start-transcript
confirm-overwrite? read-journal      stop-journal
define-macro     read-macros         stop-macro
execute-macro     read-profile        stop-transcript
export/          read-transient-table write-cleanup-script
import/          set-batch-options   write-field-functions
read-case        show-configuration write-macros
```

Аналогично, набирая имя требуемой команды, меню полностью или начальные буквы, можно запустить ее.

Для того, чтобы перейти в меню высшего уровня (например, из *file* обратно в главное) необходимо в командной строке ввести букву «q» и нажать кнопку *Enter*.

1.2. Работа с моделями: загрузка, запись, импорт и т.п.

Работа с файлами в программе *Fluent* осуществляется в подменю *File*. С его помощью можно записывать, читать, импортировать и экспортировать модели и результаты расчетов.

Программа *Fluent* работает с тремя основными типами файлов:

- *.msh – файл обмена расчетными моделями с программой *Gambit*, содержит сетку и указание типов ГУ;
- *.cas – основной файл, содержащий расчетную модель *Fluent*;
- *.dat – файл с результатами расчета.

Рассмотрим наиболее часто используемые команды меню *File*.

Подменю Read (рис. 1.7.) позволяет читать расчетные модели, результаты расчетов и журнальные файлы. В нем представлены следующие основные команды:

Case – чтение базы данных расчетной модели. С ее помощью могут быть загружены модели, созданные в программах *Gambit* и *Fluent* (с расширением *.cas и *.msh соответственно).

Data – чтение результатов расчетов (с расширением *.dat), записанных в программе *Fluent*.

Case & Data – одновременное чтение базы данных расчетной модели (с расширением *.cas) и результатов расчета в случае, если они имеют одинаковое имя.

Journal - чтение журнала.

Работа с этими командами схожа с работой в проводнике ОС «Windows» и не представляет сложностей.

Подменю Write (рис. 1.8.) позволяет записывать расчетные модели, результаты расчетов и журнальные файлы и т.п.

В меню представлены следующие основные команды:

Case – запись текущей расчетной модели в файл с расширением *.cas.

Data – запись текущих результатов расчетов в файл с расширением *.dat.

Case & Data – одновременная запись расчетной модели и результатов расчета. При этом файл модели и результатов расчета имеют одинаковые имена.

Start Journal – запуск записи журнала. После того, как запущена данная команда, в текстовый журнальный файл записываются все действия, выполненные в программе. Для того, чтобы остановить запись журнала необходимо выбрать команду *Stop Journal*.

В дальнейшем сделанные записи могут быть использованы для ускоренной автоматизированной настройки расчетных моделей.

Autosave – команда позволяет автоматически записывать расчет-

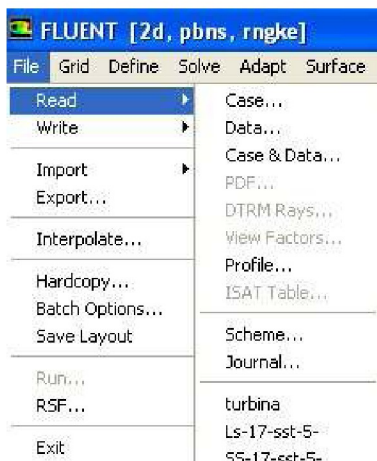


Рис. 1.7. Подменю File→Read

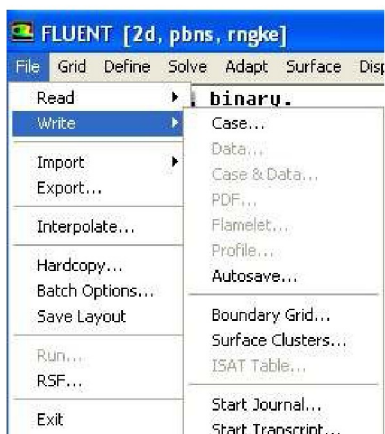


Рис. 1.8. Подменю File→Write

ную модель и/или результаты расчета через заданное число итераций или шагов по времени (для нестационарных задач). После ее вызова появляется диалоговое окно, изображенное на рис. 1.9, в котором настраиваются параметры автосохранения.

В поле *Autosave Case File Frequency* (1 на рис. 1.9) указывается число итераций, через которое будет сохраняться модель. В поле *Autosave Data File Frequency* (2 на рис. 1.9) указывается число итераций, через которое будет сохраняться результаты расчета. Если решение происходит в нестационарной постановке, то вместо числа итераций указывается число шагов по времени. В поле *File Name* (3 на рис. 1.9) указывается место и имя сохраняемого файла. Следует отметить, что имена файлов, полученных в результате автосохранения, будут состоять из двух частей: заданного имени и номера итерации (шага по времени).

Команда *File* → *Hardcopy* позволяет сохранять изображения, находящиеся в графических окнах, в виде графического файла в форматах *JPG*, *TIFF* и др. Внешний вид меню команды показан на рис. 1.10.

В этом окне в поле *Format* (1 на рис. 1.10) выбирается графический формат, в котором будет сохранено изображение.

В поле *Coloring* (2 на рис. 1.10) определяется цветовая гамма сохраняемого изображения: *Color* – цветное; *Cray Scale* – в оттенках серого; *Monochrome* – монохромное (двухцветное).

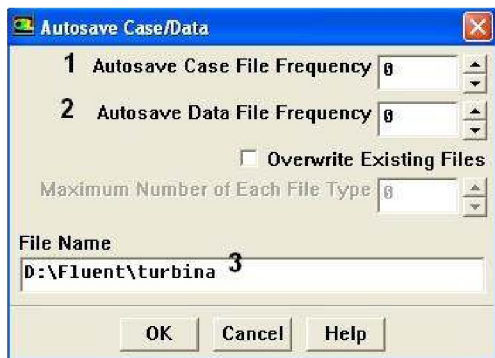


Рис. 1.9. Окно команды
File→*Write*→*Autosave*

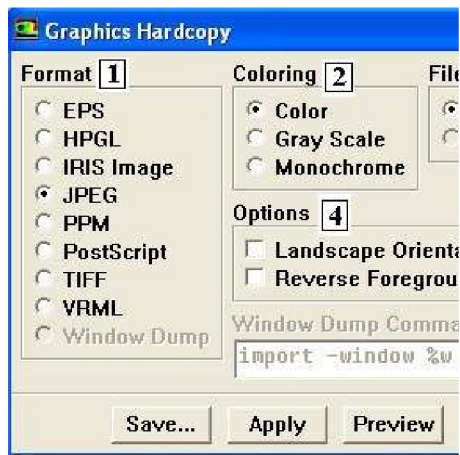


Рис. 1.10. Меню *File* →
Hardcopy

В поле *Resolution* (3 на рис. 1.10) настраивается разрешение получаемого изображения отдельно по ширине и высоте картинки. Чем оно больше, тем выше качества изображения, но тем больше размер графического файла. По опыту авторов неплохое сочетание разрешения изображения и размера файла будет иметь место в случае, если в поле *Width* указать 4000, а в поле *Height* – 2500.

В поле *Options* (4 на рис. 1.10) находятся настройки изображения записываемого в файл. Опция *Reverse Foreground/Background* позволяет сохранить требуемую картинку с заменой стандартного для *Fluent* черного фона графического окна на белый.

Из других команд подменю *File* следует отметить *File→Import* и *File→Export*, с помощью которых осуществляется обмен расчетными моделями и результатами с другими *CAE* программами.

2. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ПОДГОТОВКИ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Как отмечалось выше, первой задачей, решаемой в программе *Fluent*, является подготовка и настройка расчетной модели. Она состоит из следующих основных этапов:

- проверки качества и редактирования (при необходимости) конечно-элементной сетки;
- масштабирования сетки (при необходимости);
- выбора типа решателя и постановки задачи;
- задания свойств рабочих тел;
- выбора физических моделей, используемых в расчете;
- выбора модели турбулентности;
- задания ГУ.

При подготовке расчетной модели в программе *Fluent* пользователь обязательно проходит все эти этапы независимо от решаемой задачи. В более сложных постановках, например в многофазных течениях, наличии горения и т.д., к приведенному выше списку могут добавляться новые операции, но перечисленные выше действия присутствуют всегда.

Ниже подробно будут рассмотрены основные этапы настройки расчетной модели за исключением задания ГУ и выбора моделей турбулентности, которым будут посвящены отдельные разделы.

2.1. Проверка качества конечноэлементной сетки

Проверка расчетной сетки на наличие ошибок осуществляется с помощью команды:

GM: Grid → Check.

После ее запуска в окне сообщения появятся полные сведения о сетке: размеры, количество и тип конечных элементов и т.п. Если будет найдена

ошибка, то будет выдано соответствующее сообщение. В этом случае необходимо вернуться в программу *Gambit*, найти ошибку и исправить ее.

2.2. Масштабирование расчетной сетки

По умолчанию размеры расчетных моделей в программе *Fluent* должны быть заданы в метрах. Построение моделей зачастую же удобнее проводить в миллиметрах. В этом случае построенную сетку необходимо уменьшить в 1000 раз. Для этого в программе есть удобная команда масштабирования *Scale Grid* (рис. 2.1):

ГМ: *Grid* → *Scale*.

В нем в поле *Domain Extents* меню приведены максимальные и минимальные координаты модели. Если она была создана в миллиметрах, то до масштабирования эти цифры запредельны.

В меню *Scale Grid* в поле *Grid was created in* (сетка была создана в ...)

нужно выбрать пункт миллиметры *mm* (или другую единицу измерения, в которой была создана расчетная модель), а затем нажать кнопку *Scale*. Модель будет автоматически смасштабирована. Следует обратить внимание на то, что в поле *Domain Extents* размеры модели примут реальные значения. Отменить масштабирование в случае ошибки можно с помощью кнопки *Unscale*.

После завершения операции меню необходимо закрыть с помощью кнопки *Close*.

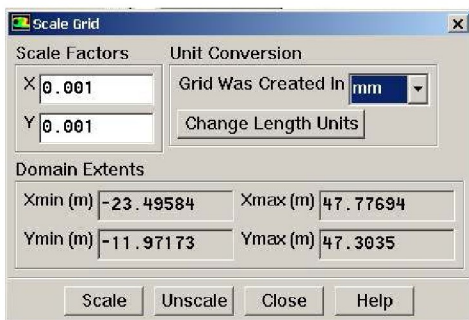


Рис. 2.1. Меню *Scale Grid*

2.3. Просмотр конечноэлементной сетки

Просмотреть конечно-элементную сетку загруженной модели можно с помощью команды:

ГМ: *Display* → *Grid*.



Рис. 2.2. Меню *Grid Display*

В появившемся меню *Grid Display* (рис. 2.2) в окне *Surfaces* требуется выбрать все граничные поверхности, которые пользователь хочет просмотреть. Следует обратить внимание на то, что имена в списке совпадают с именами ГУ, заданных при построении модели в *Gambit*. Для просмотра выбранных элементов сетки нужно нажать кнопку *Display*.

В результате выполнения команды появится графическое окно, в котором будет изображена расчетная сетка или выбранные элементы модели.

В окне *Surfaces* имеется пункт *default – interior*, который позволяет просмотреть расчетную сетку модели в целом. Однако ее просмотр оправдан только для двухмерных моделей. Просмотр трехмерной сетки требует значительного времени и компьютерных ресурсов. Поэтому в 3D задачах пункт *default – interior* выбирать не рекомендуется.

В поле *Edge Type* выбирается вид отображения выбранных границ:

- *All* – показываются все элементы, принадлежащие элементам геометрии выбранным в списке *Surfaces*;
- *Feature* – показывается общий вид элементов, выбранных в поле *Surfaces*;
- *Outline* – показывается контур элементов, выбранных в поле *Surfaces*.

В поле *Options* выбирается то, что будет отображаться в графическом окне:

Nodes – показываются узлы конечноэлементной сетки, принадлежащие элементам геометрии, выбранным в поле *Surfaces*;

Edges – показываются линии, принадлежащие элементам геометрии, выбранным в поле *Surfaces*;

Faces - показываются поверхности, принадлежащие элементам геометрии, выбранным в поле *Surfaces*.

Для того, чтобы в графическом окне детально изучить конечноэлементную сетку или результаты расчетов ее можно вращать, перемещать и масштабировать с помощью мыши. Движение мыши с нажатой левой кнопкой вызывает сдвиг модели. Движение мыши с нажатой средней кнопкой вызывает рамку, с помощью которой можно приблизить (если ее вытягивать слева направо) выделенный фрагмент модели или наоборот отдалить (если рамку вытягивать справа налево). Настроить действия, выполняемые с помощью клавиш мыши можно с помощью команды:

ГМ: Display→Mouse Buttons.

В этом меню (рис. 2.3.) из списков, находящихся напротив названий клавиш мыши, можно выбрать действие, которые они выполняют.

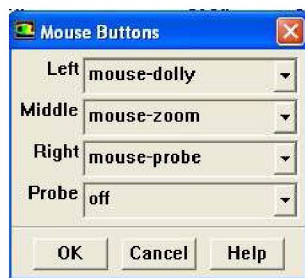


Рис. 2.3. Меню Mouse Buttons

2.4. Другие операции с расчетной сеткой

Описанные выше операции с расчетной сеткой являются наиболее употребимыми и применяются при решении любой задачи. Однако возможности программы *Fluent* по работе с сеткой не оканчиваются ими. Рассмотрим некоторые другие команды работы с сетками. Они сосредоточены в подменю *Grid* главного меню.

ГМ: Grid→Info

Команда позволяет получать информацию о расчетной сетке: размеры, число зон и т.п.

ГМ: Grid→Polyhedral

Эта команда появилась в последней версии программы *Fluent* и позволяет преобразовывать тетраэдральные (на основе треугольного элемента) сетки в полиэдральные (рис. 2.4). Построение полиэлементов происходит

за счет объединения нескольких треугольных. Команда доступна только для трехмерных моделей.

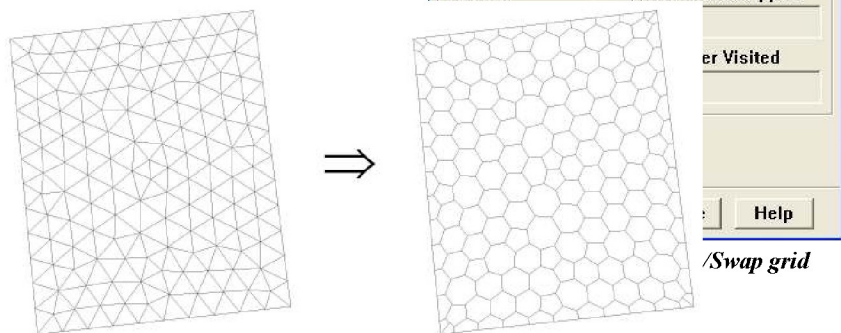


Рис. 2.4. Преобразование тетраэдральной сетки в полиэдральную

При преобразовании тетраэдральной сетки в полиэдральную число элементов расчетной области уменьшается примерно в 6 раз. Количество узлов новой сетки увеличивается примерно в 5 раз. Поэтому полиэдральная сетка позволяет значительно точнее рассчитывать градиенты изменения параметров по сравнению с тетраэдральной за счет того, что на один конечный элемент приходится больше узловых точек. Огромное количество связей между центром полиэдрической ячейки и узлами на ее гранях обеспечивает большую гибкость при описании движения потока с неизвестной траекторией. Благодаря переменному размеру ячейки сетка лучше вписывается в сложную геометрию расчетной области. Кроме того, считается, что связывание сеток различных областей производится более равномерно при использовании на границе полиэдральной сетки.

При преобразовании тетраэдральной сетки, состоящей из 2 млн. ячеек, в полиэдральную, время расчета модели в 32-разрядной операционной системе сократится примерно вдвое. При этом потеря качества решения, вызванная укрупнением сетки, будет незначительной.

ГМ: Grid $\rightarrow$ Smooth/Swap grid.

Команда позволяет провести улучшение конечно-элементной сетки за счет ее сглаживания.

В меню команды нужно нажимать кнопку *Smooth* (рис. 2.5) (Сглаживание) и затем *Swap* до тех пор, пока *Number faces swapped* (Число Заменённых поверхностей) не станет равным 0.

Если *Fluent* не может улучшить расчетную сетку, то ни одна поверхность заменена не будет.

ГМ: Grid→Translate

Команда позволяет линейно переместить расчетную область на требуемое расстояние в направлении любой из трех координатных осей. В нижней части меню приведены текущие координаты крайних точек модели.

ГМ: Grid→Rotate

Команда позволяет повернуть область на требуемый угол относительно выбранной оси. Меню команды показано на рис. 2.6. Ось вращения задается направляющим вектором в поле *Rotation Axis*. В поле *Rotation Origin* задается положение точки, через которую проходит ось. В поле *Rotation Angle* указывается угол поворота. Как и в меню *Grid→Translate* в нижней части рассматриваемого меню приведены текущие координаты крайних точек модели.

2.5. Выбор типа решателя и постановки задачи

Первым шагом при описании расчетной модели является выбор решателя, с помощью которого будет проводиться решение, а также определения типа задачи (стационарная или нестационарная).

Выбор решателя осуществляется с помощью команды *Solver*:

ГМ: Define → Models → Solver.

В меню *Solver* (рис. 2.7) нужно обратить внимание на следующие пункты.

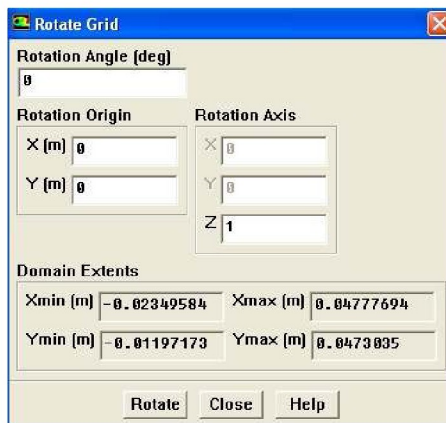


Рис. 2.6. Меню *Grid→Rotate*

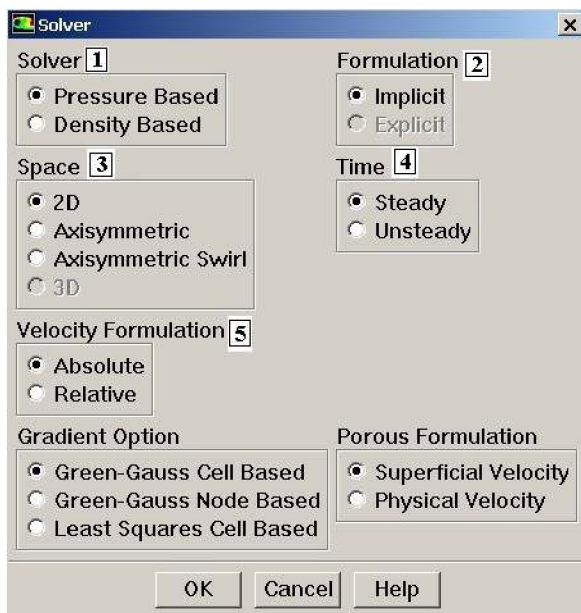


Рис. 2.7. Меню *Solver*

В поле *Solver* (1 на рис. 2.7) следует выбрать алгоритм решения. Программа *Fluent* позволяет использовать четыре алгоритма решения:

- *Pressure Based Implicit* (в российской литературе его называют неявный алгоритм установления);
- *Density Based Implicit* – неявный алгоритм расщепления;
- *Density Based Explicit* – явный алгоритм расщепления;
- *Pressure-based coupled* – алгоритм, появившейся в последней версии программы. В нем для поиска полей скоростей и давления используется алгоритм расщепления, а для остальных параметров – алгоритм установления.

Выбор последнего типа решателя осуществляется в меню *Solve* → *Controls* → *Solution*. Для того чтобы *Pressure-based coupled* алгоритм стал доступен в указанном месте, в меню *Define* → *Models* → *Solver* в поле *Solver* нужно выбрать пункт *Pressure Based*.

Алгоритм *Pressure Based* изначально разрабатывался для низкоскоростных потоков (до $0,8M$). *Density Based* алгоритмы создавались для расчетов высокоскоростных транс - и сверхзвуковых потоков. В дальнейшем

границы применения решателей расширились и в настоящий момент они оба одинаково хорошо решают широкий круг задач. Однако для задач со скачками уплотнения рекомендуется использовать *Density Based Explicit*. Кроме того ряд специальных задач, например двухфазное течение, может быть решено только с помощью *Pressure Based*.

Явная (*Explicit*) или неявная (*Implicit*) схемы выбираются в поле *Formulation* (2 на рис. 2.7).

В поле *Space* (3 на рис. 2.7) выбирается размерность задачи:

- $2d$ – двумерная;
- *Axisymmetric* – осесимметричная;
- *Axisymmetric Swirl* – осесимметричная с вращением;
- $3d$ – трехмерная.

В поле *Time* (4 на рис. 2.7) описывается, будет ли решение стационарным *Steady* или нестационарным *Unsteady*. Строго говоря, всякое течение в природе является нестационарным. Стационарная постановка – это допущение, принимаемое для сокращения времени расчетов и потребных ресурсов компьютера.

В поле *Velocity Formulation* (5 на рис. 2.7) определяются система координат, в которой будут задаваться вектора скорости: абсолютной (*Absolute*) или локальной, связанной с область потока (*Relative*). Этот выбор актуален для расчетных областей с подвижными элементами.

2.6. Учет в расчете уравнения энергии

При решении большинства задач газодинамики, особенно при исследовании течения в элементах двигателя, нужно обязательно учитывать изменение температуры потока и тепловые явления (теплообмен и теплопередачу). Для этого необходимо подключить к решению уравнение энергии с помощью команды:

GM: Define → Models → Energy.

В появившемся окне нужно поставит галочку в строке *Energy Equation* и нажать *OK*.

2.7. Задание справочного давления

Особенность программы *Fluent* состоит в том, что давление, получаемое и задаваемое в расчете, является избыточным. То есть для того,

чтобы получить истинное значение давления необходимо прибавить к нему так называемое «справочное давление». По умолчанию в качестве него используется атмосферное давление в САУ – 101325 Па . Если в качестве «справочного давления» принять 0, то результаты расчета и исходные данные будут представлены в абсолютных значениях. Изменить значение «справочного давления» можно в меню (рис. 2.8), которое появится в результате выполнения команды:

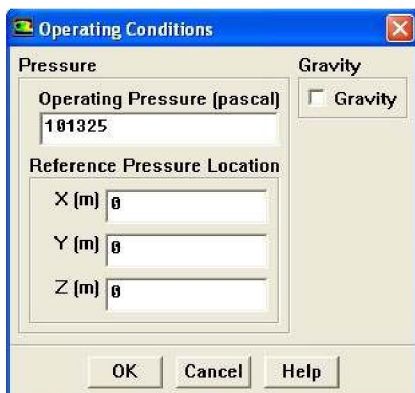


Рис. 2.8. Меню *Operating Condition*

ГМ: Define → Operating Condition.

Значение справочного давления задается в поле *Operating pressure*.

Если поставить галочку в поле *Gravity*, то задача будет рассчитываться с учетом действия массовых сил. Необходимость учета гравитации зависит от типа решаемой задачи. Например, для задач течения высокоскоростных потоков действие гравитации ничтожно по сравнению с другими силами. При активации опции *Gravity* появится дополнительное поле *Gravitational Accelerating*, в котором будет необходимо задать проекции вектора ускорения свободного падения.

2.8. Задание свойств рабочего тела

Следующим важным этапом описания расчетной модели является задание свойств рабочего тела. Этот этап необходимо выполнить при решении любой задачи. При этом может быть описано одно или несколько рабочих тел (в случае решения задач многофазного течения, сопряженного теплообмена и т.п.)

Задание свойств рабочего тела осуществляется в меню *Materials* (рис.2.9), которое вызывается командой:

ГМ: Define → Materials.

По умолчанию в качестве рабочего тела используется воздух с постоянными параметрами.

Программа позволяет работать с двумя типами веществ: твердыми (*Solid*) и жидкостью или газом (*Fluid*). Выбор типа вещества осуществляется в списке *Material Type* (1 на рис. 2.9).

Программа *Fluent* содержит достаточно большую базу данных веществ, которые можно использовать в расчетах. Доступ к базе осуществляется нажатием кнопки *Fluent Database* (2 на рис. 2.9).

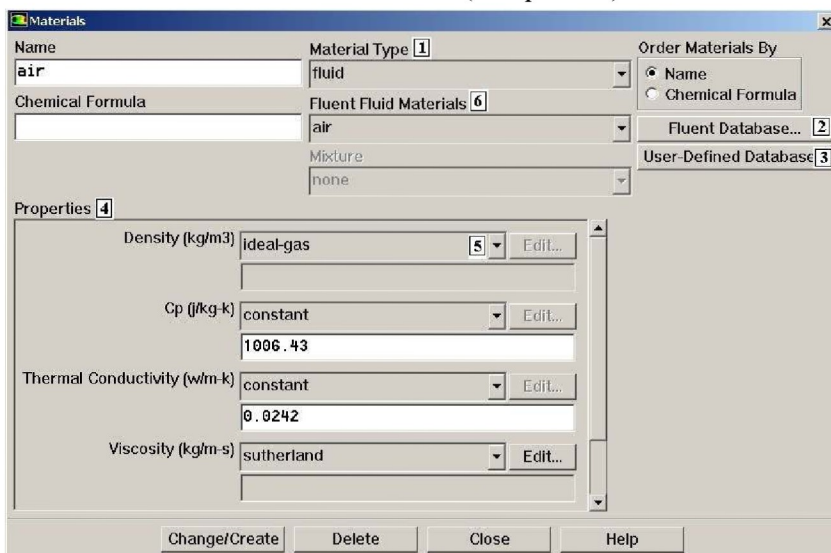


Рис. 2.9. Меню *Materials*

В окне базы данных материалов (рис. 2.10) в списке *Material Type* выбирается тип вещества *Fluid/Solid*. В зависимости от этого выбора в поле *Materials* будет отображен соответствующий список доступных веществ. Требуемое рабочее тело может быть выбрано как по названию, так и по химической формуле. Нужное рабочее тело выбирается и копируется в текущую расчетную модель нажатием кнопки *Copy*.

Свойства веществ, которых нет в базе данных программы, могут быть записаны в пользовательскую базу данных. Доступ к ней осуществляется с помощью кнопки *User-Defined Database* (3 на рис. 2.9). После ее нажатия появится окно, запрашивающее имя базы данных. Там следует выбрать

имя существующей или новой базы и нажать кнопку *OK*. Копирование текущих свойств рабочего тела в базу осуществляется с помощью кнопки *Copy Materials from Case* (рис. 2.11).

Изменения в пользовательской базе данных материалов осуществляется нажатием кнопки *Save*.

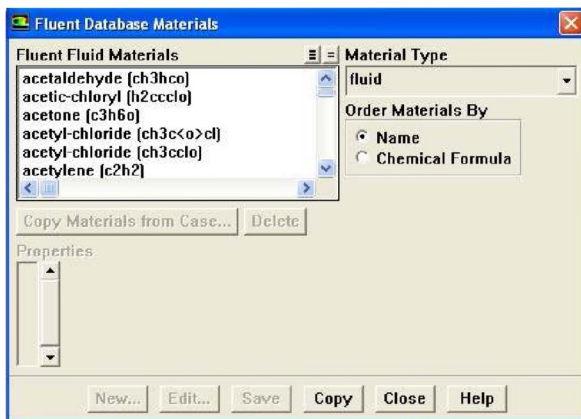


Рис. 2.10. Меню встроенной базы данных рабочих тел во *Fluent*

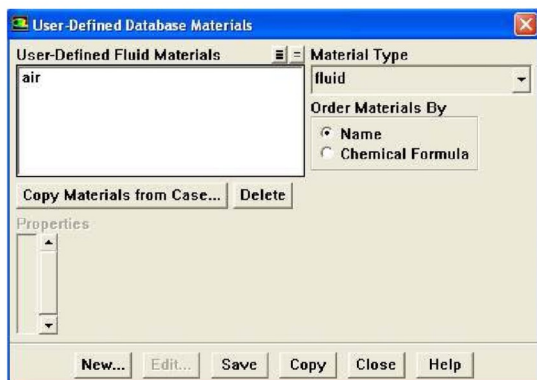


Рис. 2.11. Меню пользовательской базы данных материалов

Самую большую часть меню задания свойств рабочих тел занимает поле *Properties* (4 на рис. 2.9). В нем определяются свойства рабочего тела и закономерности их изменения в зависимости от параметров потока. Список доступных в этом поле свойств рабочего тела зависит от подклю-

ченных физических моделей. При решении задач течения жидкостей и газов обычно задаются:

- *Density* – плотность;
- *C_p* – изобарная теплоемкость;
- *Thermal Conductivity* – теплопроводность;
- *Viscosity* – вязкость;
- *Molecular weight* – молекулярный вес.

Обратите внимание, что рядом с названием каждого параметра в скобках указана размерность, а еще правее список (5 на рис. 2.9), в котором выбираются закономерности изменения свойств рабочего тела от параметров рабочего процесса. Наиболее часто используются следующие закономерности:

Constant – параметр не зависит от параметров процесса (установлен по умолчанию);

Piecewise-linear – кусочно-линейное задание. Зависимость свойств рабочего тела от параметров потока задается в табличном виде меню, изображенном на рис. 2.12. В нем в поле *Points* вводится число точек зависимости.

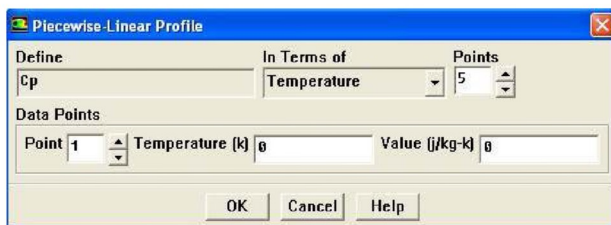


Рис 2.12. Меню задания изменения параметра в виде кусочно-линейной функции

Значение параметра потока, чаще всего температуры, и соответствующее ему значение свойства потока вводится в поле *Data points* для каждой точки.

Piecewise polynomial – зависимость свойства рабочего тела от параметров потока задается в виде полинома n -ой степени $y = A_1 + A_2x + A_3x^2 + \dots + A_nx^{n-1}$. Меню *Piecewise polynomial* показано на рис. 2.13.

В этом меню в поле *Coefficients* отмеченном цифрой 1 вводится число коэффициентов A_i . В поле *Coefficients* отмеченном цифрой 2 вводятся соответствующие значения коэффициентов.

Ideal gas – устанавливает изменение плотности от параметров потока в соответствии с уравнением состояния идеального газа Менделеева- Клайперона.



Рис. 2.13. Меню Piecewise polynomial

Sutherland – зависимость устанавливает связь вязкости с температурой потока с помощью уравнения Сатерленда:

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{273 + S}{T + S}, \text{ где}$$

S , T , μ_0 – константы, зависящие от вещества. Меню *Sutherland* показано на рис. 2.14.

В этом меню в поле *Reference Viscosity* вводится параметр μ_0 , в поле *Reference Temperature* – T , а поле *Effective Temperature* – S . Для воздуха коэффициенты уравнения Сатерленда заданы по умолчанию и в корректировке не нуждаются.

Список описанных в расчетной модели рабочих тел



Рис. 2.14. Меню настройки зависимости вязкости от температуры с помощью уравнения Сатерленда

показан в списке *Fluent Fluid/Solid Materials* (6 на рис. 2.9).

Для сохранения изменения свойств рабочего тела необходимо обязательно нажать кнопку *Change/Create*. После завершения операции меню необходимо закрыть с помощью кнопки *Close*.

3. ЗАДАНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ В ПРОГРАММЕ *FLUENT*

Важной составляющей успешного решения системы уравнений Навье – Стокса является корректное задание ГУ. Этот процесс значительно осложняется тем фактом, что до сих пор нет их математического обоснования [5].

Задание ГУ на непроницаемых стенках не представляет собой значительных затруднений. В этом случае на стенке задается условие равенства нулю всех компонентов вектора скорости и температура стенки или тепловой поток через нее (тепловое ГУ первого или второго рода).

В отношении числа и вида ГУ на проницаемых границах нет ясности. Для расчета невязких течений с помощью нестационарных уравнений движения в форме Эйлера для m – мерного течения ($m=1,2,3$) на границе, через которую поток входит в расчетную область с дозвуковой скоростью, необходимо задать $m+1$ условий. На выходной границе требуется задать только одно условие. В случае сверхзвукового течения на входе следует задавать $m+2$ условия, а на выходной границе ни одного [3].

Система уравнений Навье – Стокса смешанная гиперболически – параболического типа относительно времени и описанный выше подход формально к ней неприменим. Однако при решении уравнений Навье – Стокса в приближении тонкого слоя, по-видимому, должно быть достаточно условий, соответствующих уравнениям Эйлера [5].

Выбор величин, используемых в качестве ГУ, произволен. Для дозвуковых внутренних течений чаще всего, на входе в расчетную область задаются полное давление и температура, а также направляющий вектор скорости. На выходной границе задается статическое давление. В случае, когда на входе в расчетную область скорость потока сверхзвуковая, то на

входной границе дополнительно задается статическое давление, а на выходе ГУ вообще не задаются [3,5].

Меню задания ГУ в программе *Fluent* (рис. 3.1) вызывается командой:

ГМ: *Define* → *Boundary Condition*.

В нем в поле *Zone* находится список всех ГУ, определенных в препроцессоре (*Gambit* или другом). Если выбрать имя одного из них, например *pressure_inlet.3* (рис. 3.1), то в окне *Type* синим цветом будет указан тип ГУ установленный в препроцессоре. В случае необходимости в окне *Type* тип ГУ можно поменять. Обратите внимание, что граничным поверхностям, не описанным в препроцессоре, автоматически присваивается граничное условие стенки (*Wall*).

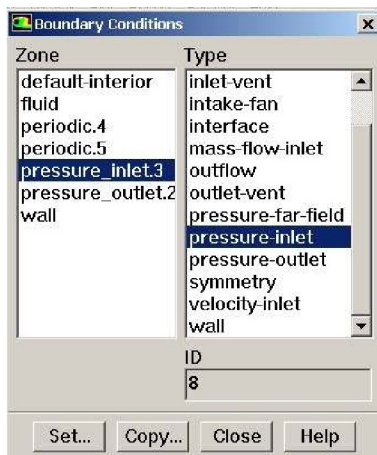


Рис. 3.1. Меню *Boundary Condition*

Чтобы задать ГУ в окне *Zone* необходимо выбрать нужную границу, убедиться, что в окне *Type* его тип указан верно, и нажать кнопку *Set*.

Как видно из меню *Boundary Condition* (рис. 3.1) программа *Fluent* позволяет использовать достаточное количество разновидностей ГУ. Наиболее часто используются следующие:

- *Pressure inlet* – задание полного давления и температуры на входе в расчетную область;
- *Velocity inlet* – задание вектора скорости и температуры на входе в расчетную область. Данное ГУ неприменимо для сжимаемых потоков;
- *Mass flow inlet* – задается массовый расход и полная температура потока на входе в расчетную область;
- *Pressure outlet* – выходное ГУ, определяющее статическое давление на выходе;
- *Outflow* – выходное ГУ, показывающее какая доля расхода выходит через данную границу;

- *Wall* – ГУ стенки;
- *Periodic* – периодическое ГУ;
- *Symmetry* – симметрия;
- *Axis* – ось для осесимметричных задач;
- *Pressure far field* – задет постоянное давление и направление потока на удалении от объекта. Применяется для решения задач внешнего обтекания.

Остальные ГУ применяются при решении специализированных задач и редко применяются. ГУ *Velocity inlet* и *Outflow* можно использовать только при исследовании несжимаемых потоков. Использование их в задачах с учетом сжимаемости некорректно.

Параметры, которые необходимо ввести в меню ГУ зависят от подключенных физических моделей.

При исследовании течения газов в элементах двигателей наиболее часто на входе задаются ГУ *Pressure inlet* или *Mass flow inlet* (предпочтительнее использовать первое), а на выходе *Pressure outlet*.

Внимание! При вводе числовых значений в программе *Fluent* десятичная и дробная часть числа обязательно разделяются точкой.

3.1. Граничное условие «полное давление на входе» (*Pressure inlet*)

Меню задания ГУ «полное давление на входе» (*pressure-inlet*), показано на рис. 3.2.

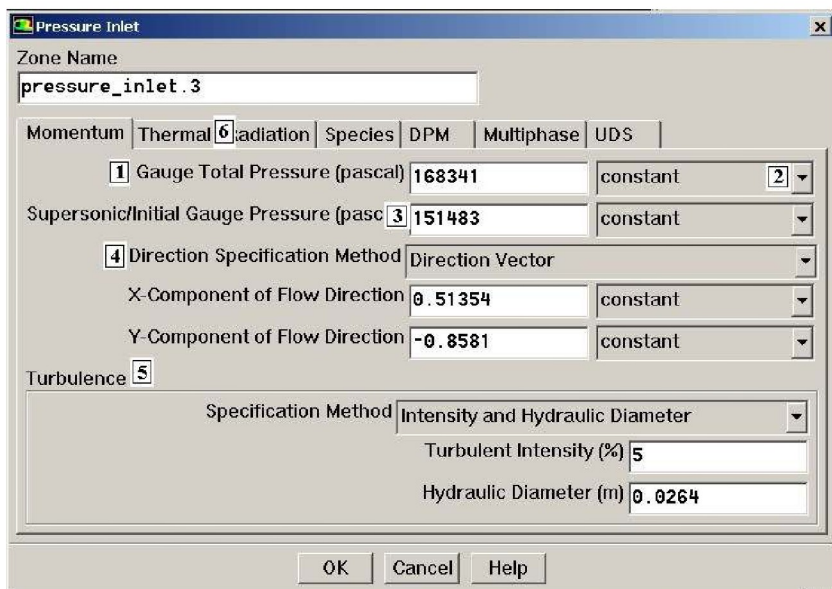


Рис. 3.2. Меню *Pressure inlet*

Входное граничное условие описывается в следующей последовательности.

В поле *Gauge Total Pressure* (1 на рис. 3.2) вводится значение полного давления на входе в расчетную область. Необходимо помнить, что в программе *Fluent* задается избыточное, относительно заданного в меню *Operating Condition*, давление. Если справочное давление равно нулю, то вводится абсолютное значение давления. Если справочное давление отличается от нулевого, то вводится значение $p_{0изб}^* = p_0^* - p_{ср}^*$ где

$p_{0изб}^*$ - значение давления, которое необходимо задать в поле *Gauge Total Pressure*;

p_0^* - абсолютное значение давления;

$p_{ср}$ - справочное давление.

Значение параметра может быть задано постоянным по рассматриваемой границе, либо переменным в зависимости от координат в декартовой или цилиндрической системе координат. Выбор типа распределения параметров осуществляется в выпадающем списке, находящемся правее поля, в котором вводится значение параметра (2 на рис. 3.2). По умолчанию там

установлена опция *constant*, что говорит о том, что значение параметра не меняется на границе.

Зависимость параметра от координат называется профилем (*Profile*) и задается в виде текстового файла. Профиль описывает изменение одной или нескольких переменных №2...№Z от другой №1. Файл профиля является обычным текстовым файлом с любым расширением (или без него). Профиль может быть создан на основе проведенных ранее предварительных расчетов с помощью команды *File → Write → Profile* или вручную в текстовом файле.

Синтаксис файла, определяющего изменение параметров, следующий:

((имя профиля латинскими буквами <пробел> n - число точек профиля)

(название переменной №1

значения переменной №1 в столбик друг под другом. Их число равно n

)

(название переменной №2

значения переменной №2 в столбик друг под другом. Их число равно n

)

... (название переменной №Z

значения переменной №Z в столбик друг под другом. Их число равно n

))

Например, профильный файл, описывающий изменение полной температуры по радиусу по 6 точкам, выглядит следующим образом:

((profile 6)

(r

0.099000

0.099612

0.100224

0.100837

0.101449

)

(total-temperature

708.179993

750.420044

792.442261

832.731567

872.273865

911.032532

))

Меню *File* → *Write* → *Profile* показано на рис. 3.3. В нем для записи профиля необходимо в поле *Surfaces* выбрать границу, профиль на которой необходимо сохранить, а в поле *Values* выбрать параметры, распределение которых необходимо внести в файл профиля.

Перед использованием профиля в качестве ГУ его необходимо прочитать с помощью команды *Define* → *Profiles* или *File* → *Read* → *Profile*. В этом случае в списке правее вводимого параметра (2 на рис. 3.2) появится перечень загруженных профилей, из которых нужно выбрать требуемый.

В поле *Supersonic Gauge Pressure* (3 на рис. 3.2) задается статическое давление потока для случая сверхзвукового течения на входе. При дозвуковом течении на входе в данном поле можно оставить нулевое значение. Однако для стабильности решения в нем целесообразно вводить значение давления, близкое к статическому на данной границе.

В поле *Direction Specification Method* (4 на рис. 3.2), в меню *Pressure inlet*, определяется направление вектора скорости на входной границе. Вектор скорости может быть задан двумя способами:

- *Normal to Boundary* – перпендикулярно границе;
- *Direction Vector* – по направляющим косинусам.

При выборе второго способа появятся поля *X-Component*, *Y-Component* и *Z-Component*, в которых задаются направляющие косинусы угла входа потока α (для двумерной задачи *X-Component* *Y-Component* равны косинусу и синусу

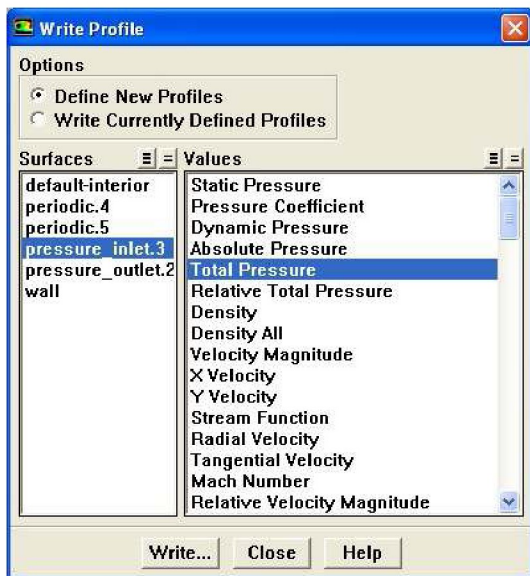


Рис. 3.3. Меню записи профиля
File→*Write*→*Profile*

угла соответственно). При определении знака косинуса необходимо учитывать направление потока. Если направление проекции скорости потока совпадает с направлением координатной оси, то направляющий косинус положителен. В противном случае – отрицателен.

Использование уравнений, описывающих турбулентность, приводит к тому, что в дополнение к перечисленным ГУ необходимо задавать дополнительные параметры в поле *Turbulence* (5 на рис. 3.2). Об этом будет рассказано ниже в разделе 4, посвященном заданию турбулентности в программе *Fluent*.

Для задания полной температуры потока на входе нужно в верхней части меню *Pressure inlet* нажать на закладку *Thermal* (6 на рис. 3.2) и, в ставшем доступном поле *Total Temperature*, ввести значение температуры.

3.2. Граничное условие «массовый расход на входе» (*Mass flow inlet*)

Меню ГУ *Mass flow inlet* (рис. 3.4) во многом подобно меню *Pressure inlet* (рис. 3.2) и отличается только тем, что поле *Gauge Total Pressure* заменено полем *Mass flow Rate*, куда вводятся значения массового расхода на границе.

Если расчетная модель периодическая и является одной из n частей, составляющих область течения, то вводимая величина расхода должна быть уменьшена в n раз.

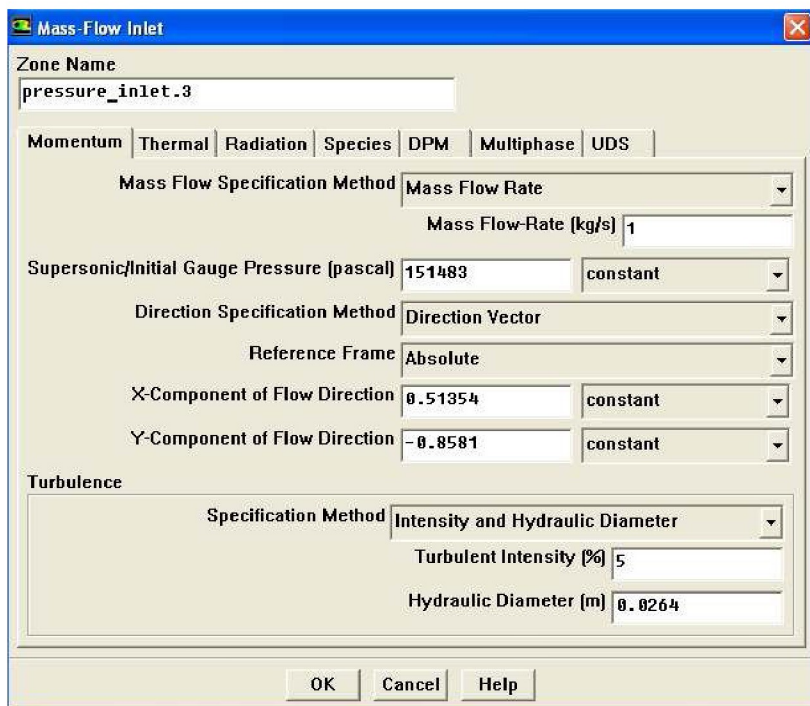


Рис. 3.4. Меню *Mass flow inlet*

3.3. Граничное условие «статическое давление на выходе» (*Pressure outlet*)

Меню описания ГУ «статическое давление на выходе» *Pressure outlet* показано на рис. 3.5. В нем, в поле *Gauge Pressure* (1 на рис. 3.5), необходимо ввести статическое давление на выходе из расчетной области (если справочное давление не равно нулю, то давление - избыточное). Это единственное необходимое для решения выходное ГУ.

При решении задач течения газов в каналах достаточно часто наблюдается втекание потока через выходную границу вследствие, например, вихревых течений вблизи нее. Параметры втекающего воздуха (направление потока, температура и параметры турбулентности) для таких случаев необходимо определить. Это делается в меню *Pressure Outlet* аналогично тому, как задаются соответствующие параметры на входной границе. Обратные течения на границах отрицательно влияют на сходимость. Поэтому

конфигурацию расчетной области следует выбирать так, чтобы их избегать. Если исследуемая расчетная область заведомо не имеет обратных втеканий, то параметры втекающего потока можно задать приближенно.

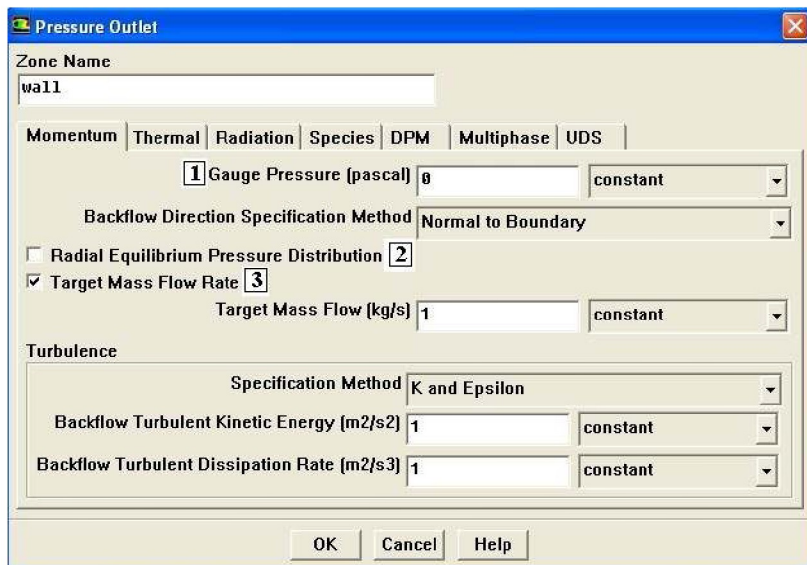


Рис. 3.5. Меню *Pressure Outlet*

Опция *Radial Equilibrium Pressure Distribution* (2 на рис. 3.5) позволяет учесть распределение давления по высоте канала с помощью уравнения радиального равновесия, что повышает точность моделирования течения в турбомашинах и в осесимметричных каналах с закруткой потока.

Опция *Target Mass Flow Rate* (3 на рис. 3.5) позволяет дополнительно задать расход рабочего тела на выходе.

3.4. Граничное условие *Outflow*

Для несжимаемых течений на выходной границе может быть установлено ГУ *Outflow*. Меню его задания показано на рис. 3.6.

Это ГУ показывает, какая доля расхода выходит из расчетной области через данную границу. Значение доли расхода вводится в поле *Flow Rate Weighting*. Она изменяется от 0 до 1. Если существует несколько границ с

таким ГУ (рис. 3.7), то сумма долей расходов через них должна равняться единице.



Рис. 3.6. Меню граничного условия
Outflow

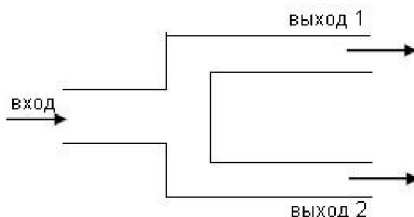


Рис. 3.7. Расчетная область с
несколькими выходами

3.5. Условие периодичности

Меню задания периодического ГУ (*Periodic*) показано на рис. 3.9. В нем необходимо указать, как образованы периодические границы: вращением модели относительно оси (*Rotational*) (рис. 3.8, а) или линейным перемещением *Translational* (рис. 3.8, б).

При использовании периодических границ, полученных вращением при описании области течения (раздел 3.9), обязательно необходимо описать ось, относительно которой вращается граница.

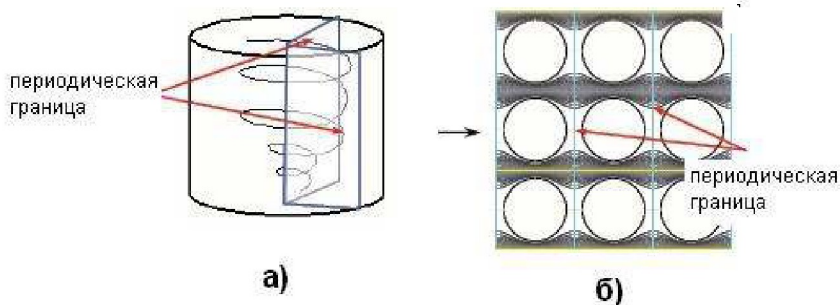


Рис. 3.8. Периодическое граничное условие: а – полученное вращением; б – полученное линейным перемещением

3.6. Граничное условия «стенка» (*Wall*)

Меню задания ГУ «непроницаемая стенка» показано на рис. 3.10.

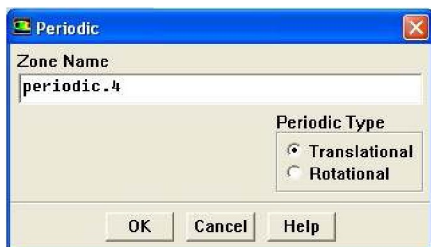


Рис. 3.9. Меню задания периодического граничного условия

Данное условие описывает взаимодействие стенки с потоком. Оно в основном определяет движение стенки и тепловой поток, проходящий через нее к потоку или от него.

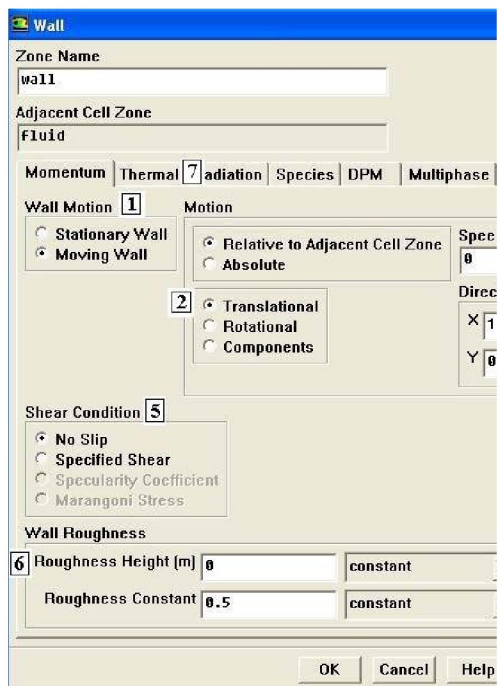


Рис. 3.10. Меню граничного условия «непроницаемая стенка»

Движение стенки задается в поле *Wall Motion* (1 на рис. 3.10). Возможны два варианта движения:

- *Stationary Wall* – стенка неподвижна относительно области течения, к которой она принадлежит;
- *Moving wall* – стенка подвижна относительно своей зоны потока.

При выборе последнего пункта в поле *Motion* появляется дополнительное поле (2 на рис. 3.10), в котором задаются тип движения стенки:

- *Translation* – поступательное;
- *Rotational* – вращательное;
- *Components* – комбинированное.

В случае выбора поступательного движения в поле (*Speed*) (3 на рис. 3.10) задается скорость движения. В поле (*Direction*) (4 на рис. 3.10) с помощью направляющего вектора определяется направление движения стенки.

В случае выбора вращательного движения *Rotational* (2 на рис. 3.10) необходимо задать скорость вращения и направление оси вращения с помощью направляющих косинусов (*Rotation Axis Origin*).

В поле *Shear condition* (5 на рис. 3.10) определяется поведение потока у стенки. Чаще всего задается условие не прилипания (*no slip*) - равенство нулю скорости на стенке.

В программе *Fluent* имеется возможность учета влияния шероховатости стенки на течение. Величина шероховатости вводится в поле *Roughness Height* (6 на рис. 3.10).

Для того, чтобы описать тепловое взаимодействие стенки с потоком нужно нажать на закладку *Thermal* в верхней части меню *Wall* (7 на рис. 3.10). В результате меню задания ГУ стенки примет вид, показанный на рис. 3.11.

Тепловой поток от стенки к рабочему телу может быть задан несколькими способами:

- *Heat Flux* – задается непосредственно тепловой поток;
- *Convection* – задаются условия, описывающие конвекцию: температура потока вблизи стенки и коэффициент теплопередачи α ;
- *Temperature* – задается температура стенки;
- *Radiation* - задаются параметры, характеризующие излучение тепла стенкой;
- *Mixed* – комбинированное задание.

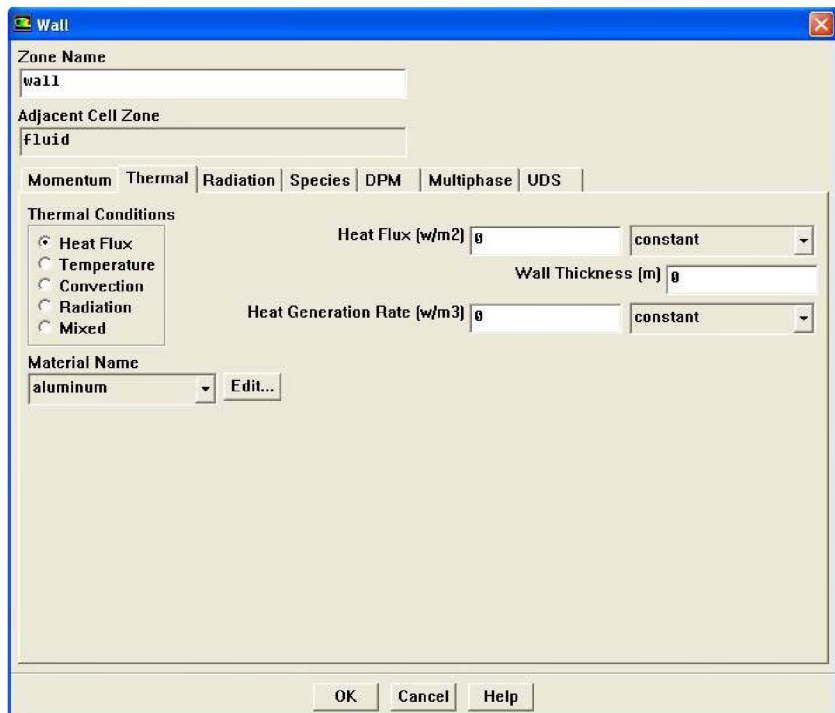


Рис. 3.11. Подменю задания теплового потока через стенку

Чаще всего применяются первые три условия. Для определения теплового взаимодействия стенки и потока необходимо задать материал стенки. Для этого из списка *Material Name* надо выбрать нужный материал. Предварительно его следует описать в меню *Define* → *Materials*, как это было показано в п. 2.8.

3.7. Изменение размерности вводимых параметров

Обратите внимание на то, что в полях, в которых требуется вводить численные значения параметров, рядом с его названием в скобках указана размерность.

Например, на рис. 3.11 можно увидеть над-



Рис. 3.12. Меню *Define*→*Units*

пись *Heat Flux* (w/m^2). По умолчанию все переменные в программе *Fluent* вводятся в системе СИ. Однако в ряде случаев пользоваться размерностью в системе СИ неудобно. Например, угловую скорость на практике проще задавать в об/мин, а не в рад/сек. При вводе зависимостей свойств рабочих тел от параметров потока в кусочно-линейном виде, температуру удобнее вводить в градусах Цельсия, так как в таком виде эта информация чаще всего приводится в справочниках.

Изменить размерность вводимых параметров можно с помощью команды *Define* → *Units*. Внешний вид меню этой команды показан на рис. 3.12.

В этом меню в списке *Quantities* выбирается название параметра (на английском языке), размерность которого нужно изменить. После этого в поле *Units* появится список доступных вариантов размерностей параметра. Из них выбирается требуемый. После выполнения данной команды, введенные ранее значения данной переменной, будут автоматически пересчитаны в установленной размерности.

В поле *Set All to* можно выбрать систему измерений, в которой будут вводиться все параметры по умолчанию (СИ, кгс или британская).

Примечание. В случае выбора другой размерности температуры, перед расчетом ее следует изменить обратно на Кельвины, так как расчет в других единицах температуры не поддерживается.

3.8. Копирование граничных условий с одной расчетной модели на другую

Иногда возникает ситуация, когда необходимо скопировать ГУ из одной расчетной модели на другую. Например, такая необходимость может возникнуть при исследовании влияния расчетной сетки на получаемые результаты. В этом случае несколько расчетных моделей имеют одинаковую конфигурацию, ГУ, но различную сетку.

Команда копирования ГУ вызывается из командной строки. Для того, чтобы скопировать ГУ необходимо набрать *file* (↵ - Enter) (переход в подменю *file*), затем набрать команду *write-bc* (↵). В ответ на появившийся запрос следует задать имя файла, в который будут записаны наложенные ГУ. Он будет сохранен в рабочей папке. Для чтения созданного ранее файла с ГУ необходимо, находясь в подменю *file* (↵), набрать команду *read-bc* (↵). В ответ на появившийся запрос нужно ввести имя файла, содержащего ГУ.

3.9. Описание свойств области течения

В меню *Boundary Condition* (рис. 3.1) в списке *Zones* кроме ГУ, описанных в препроцессоре, имеются условия, определяющие свойства области течения (рабочее тело, система координат и т.п.). Если область не была заранее описана в препроцессоре, то ей автоматически присваивается имя *Fluid* и тип *Fluid* (жидкость или газ). Если описывалась, то имя и тип области течения соответствуют назначенным в препроцессоре. Меню редактирования свойств области течения на примере области *fluid* показано на рис. 3.13.

В поле *Motion* → *Motion Type* описывается тип движения рассматриваемой области. Всего возможны три варианта движения:

- *Stationary* – область неподвижна;
- *Moving Reference Frame* – течение в области течения рассматривается в подвижной системе координат;
- *Moving Mesh* – сетка в рассматриваемой области течения движется.

В случае, если рассматриваемая область течения подвижна или находится в подвижной системе координат, параметры движения задаются

аналогично тому, как задавалось перемещение подвижной стенки в меню *Wall*.

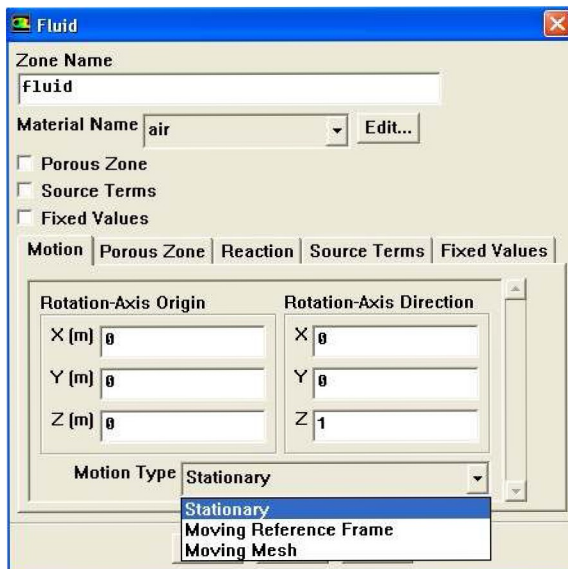


Рис. 3.13. Меню редактирования свойств области течения

Примечание. В случае если модель имеет периодические граничные условия, полученные вращением, то при описании области течения обязательно нужно задать ось вращения. Для этого в поле *Rotation Axis Direction* описывается ось вращения в виде проекций вектора, а в поле *Rotation Axis Origin* определяется точка, через которую ось проходит.

Если поставить галочку в поле *Porous*, то область течения будет рассматриваться как пористое вещество. Эта опция используется при необходимости исследования течения через фильтры, песок и т.п.

Меню настройки свойств твердотельной области выглядит аналогично.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

В настоящем разделе будет показано, как реализовать моделирование турбулентности непосредственно в программе *Fluent*.

4.1. Задание турбулентности в программе *Fluent*

Задание модели турбулентности осуществляется с помощью команды *Define* → *Models* → *Viscous*. Меню этой команды показано на рис. 4.1.

Главным его элементом является поле *Model*, в котором осуществляется выбор модели турбулентности. В программе доступны следующие модели:

- *Inviscid* – невязкий поток;
- *Laminar* – ламинарный поток;
- *Spalart* – *Allmars* – однопараметрическая модель Спаларта Алмарса;
- *k-epsilon* – двухпараметрическая модель турбулентности $k-\epsilon$;
- *k-omega* – двухпараметрическая модель турбулентности $k-\omega$;
- *Reynolds Stress* – модель напряжений Рейнольдса;
- *Detached Eddy Simylation* – модель отдельных вихрей (*DES* модель);
- *Large Eddy Simylation* – *LES* модель.

Приведенный выше список содержит не все доступные в программе модели турбулентности. Большинство из перечисленных моделей имеют несколько модификаций, выбор которых происходит в поле опций моделей турбулентности. В частности, для модели $k-\epsilon$ можно выбрать одну из трех модификаций (стандартную, *RNG* или *Realizable*), а для модели $k-\omega$ две модификации (стандартную модель и *SST k- ω*).

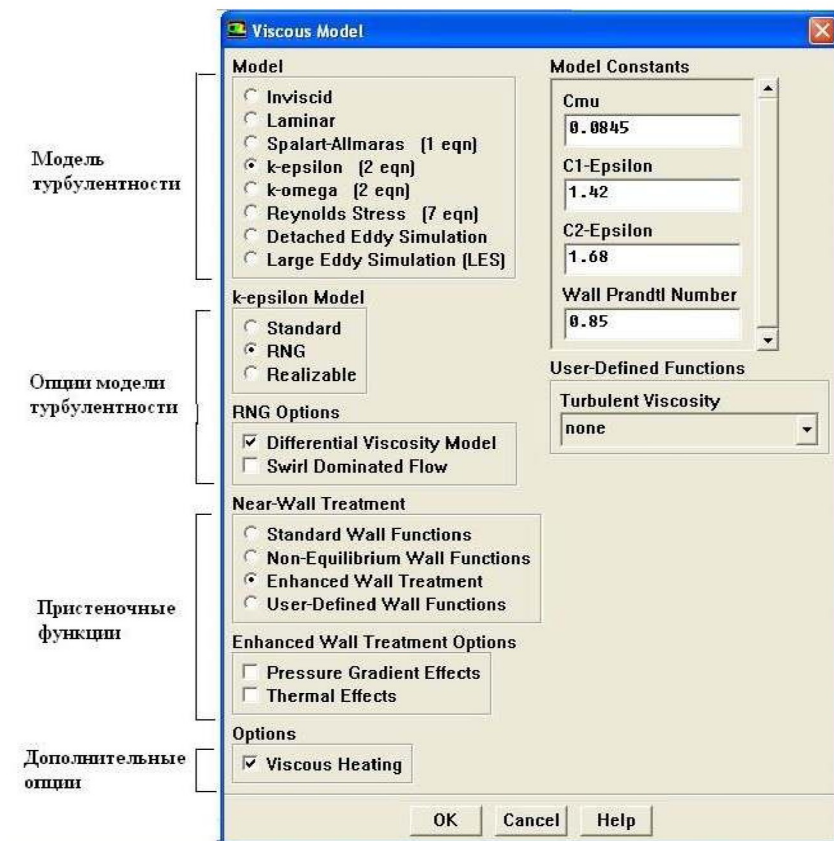


Рис. 4.1. Меню выбора модели турбулентности

После выбора модели турбулентности появляются поля настройки параметров выбранной модели. Их можно разделить на группы, показанные на рис. 4.1.

Ниже области выбора модели турбулентности находится поле выбора пристеночных функций. О них будет рассказано ниже.

В нижней части меню выбора модели турбулентности имеется опция *Viscous Heating*. Активация опции позволяет учитывать тепло вязкого трения при решении уравнения энергии.

В поле *Model Constants* представлены константы уравнений выбранной модели турбулентности. Изменяя их можно задать пользовательские

модели турбулентности. Однако большинству рядовых пользователей, не имеющих высокой квалификации в области моделирования турбулентности, этого делать не стоит.

4.2. Пристеночные функции

Как известно любой поток можно разделить на две принципиальные зоны: пограничный слой и ядро потока [15]. Пограничный слой может быть ламинарным или турбулентным. Турбулентный погранслой в свою очередь состоит из ламинарного подслоя, турбулентного слоя и переходной зоны (рис. 4.2).

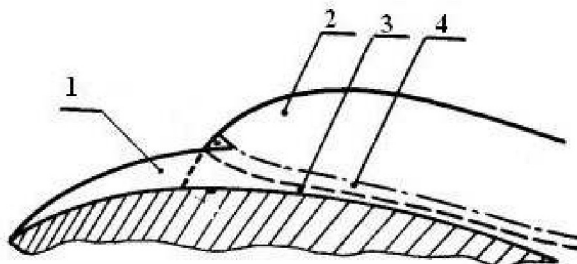


Рис. 4.2. Структура пограничного слоя: 1 – ламинарное течение; 2 – турбулентный погранслой; 3 – ламинарный подслой, 4 – переходная зона

На рис. 4.3 показано изменение безразмерной скорости по величине безразмерного расстояния до стенки в логарифмической системе координат.

Под безразмерным расстоянием до стенки понимается величина $y^+ = yU_\tau / \nu$, где

$U_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho}$ - скорость потока, осредненная по касательным напряжениям;

ν - кинематическая вязкость;

y - расстояние от стенки.

Пограничный слой занимает область потока, для которой величина y^+ составляет от 0 до 300. Причем в области с y^+ находящемся в диапазоне от 0 до 5 находится вязкий подслой. От 5 до 60 – переходная зона и свыше 60 – турбулентный погранслой.

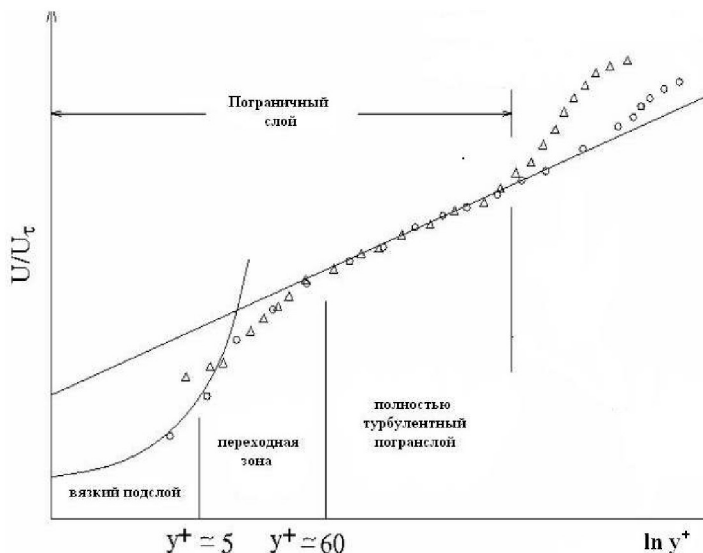


Рис. 4.3. График изменения безразмерной скорости потока от безразмерного расстояния от стенки y^+

Величина $y^+ = 1$ примерно соответствует случаю, когда вязкий подслой укладывается в первые 1...3 пристеночные ячейки конечноэлементной сетки.

Модели турбулентности семейства $k-\varepsilon$ и Рейнольдса не позволяют в полной мере смоделировать эффекты, происходящие вблизи стенок. Модели семейства $k-\omega$ и Спаларта Алламарса способны хорошо описывать явления вблизи стенок только при высоком качестве расчетных сеток там. Поэтому для качественного моделирования течения в погранслоях в программе *Fluent* используются пристеночные функции. Всего доступно три основных пристеночных функции:

- *Standard Wall Functions* – стандартная пристеночная функция;
- *Non Equilibrium Wall Functions* – неравновесная пристеночная функция;
- *Enhanced Wall treatment* – расширенное пристеночное моделирование.

Используемые пристеночные функции можно разделить на две группы. При использовании первых двух полагается, что толщина пограничного равна толщине первого от стенки ряда ячеек. В нем не рассчитываются эффекты вязкости, а профиль скорости и других параметров определяется по эмпирическим зависимостям. При расширенном пристеночном моделировании погранслоем моделируется сеткой высокого качества. В погранслое располагается несколько сеточных слоев. Причем вязкий подслой занимает не менее трех ячеек. Точность моделирования обеспечивается применением модифицированных уравнений для различных областей погранслоя, решения которых сшиваются с помощью сложной демпфирующей функции, что позволяет получать монотонно изменяющиеся поля параметров.

Стандартная пристеночная функция (*Standard Wall Functions*) применяется для описания изменения параметров потока полей эмпирические уравнения. Они плохо описывают сложные трехмерные потоки, течения с низкими числами Рейнольдса, отрывные явления, течения с большими градиентами и т.п.

Неравновесная пристеночная функция (*Non Equilibrium Wall Functions*) дает лучшие результаты при моделировании трехмерных течений, течений с отрывами и большими градиентами за счет использования улучшенных уравнений.

Эти две пристеночные функции рекомендуется использовать с моделями турбулентности Рейнольдса и моделями семейства $k-\varepsilon$. При этом величина y^+ должна находиться в интервале от 30 до 300. Уменьшить величину y^+ можно за счет сгущения сетки в пристеночной области. Разряжение сетки наоборот увеличивает y^+ .

При расширенном пристеночном моделировании (*Enhanced Wall treatment*) для разных областей погранслоя используются разные зависимости. Границы применимости уравнений для разных зон слоя определяются по величине y^+ . Для решения турбулентного слоя применяется модель турбулентности для больших чисел Рейнольдса. Для вязкого подслоя используется упрощенная модель. Эта пристеночная функция применяется для моделей семейства $k-\omega$ и модели Спаларта Алламарса. При использовании расширенного пристеночного моделирования величина y^+ должна быть примерно равна единице.

Модели турбулентности, используемые в программе *Fluent* (кроме $k-\varepsilon$) обладают свойством масштабируемости. Они имеют специальные процедуры, которые позволяют их использовать на сетках, у которых величина y^+ находится в интервале от 1 до 30. Однако масштабирование происходит с некоторой потерей точности расчета.

4.3. Задание дополнительных граничных условий для турбулентности

При использовании двухпараметрических моделей турбулентности на проницаемых границах типа «вход» требуется дополнительно задавать две величины, характеризующие турбулентность входящего потока.

В программе *Fluent* возможно 4 варианта задания ГУ турбулентности входящего потока:

- *K end Epsilon* – непосредственное задание параметров турбулентной кинетической энергии k , скорости диссипации турбулентной кинетической энергии ε , скорости рассеивания турбулентности ω . Как правило, при решении инженерных задач эти параметры неизвестны и трудно осязаемы физически. Поэтому при решении прикладных задач этот способ применяется редко;
- *Intensity and Hydraulic Diameter* - задание интенсивности турбулентности и гидравлического диаметра;
- *Intensity and Length Scale* - задание интенсивности турбулентности и длины турбулентного смешения;
- *Intensity and Viscosity Ratio* - задание интенсивности турбулентности и коэффициента вязкости.

Тип ГУ для турбулентности выбирается в списке *Speciation Method* в поле *Turbulence* в меню задания входного условия (5 на рис. 3.2)

Систематизированных сведений о численных значениях степени турбулентности в характерных сечениях проточной части ГТД не имеется. Встречаются лишь различные данные об измерениях термоанемометрами и косвенных оценках степени турбулентности в конкретных условиях в аэродинамических трубах или турбинах. Как правило, масштаб турбулентности не превышает 20%, но в большинстве случаев находится в интервале от 1 до 10%. При масштабе турбулентности $E=5\%$ поток считается полностью турбулентным. Наиболее часто встречающиеся в научно-

технической литературе приближенные значения степени турбулентности в каналах ГТД [7] приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Приближенные значения степени турбулентности потока в элементах ГТД

Элемент ГТД	Степень турбулентности
Непосредственно за жаровой трубой КС	15.....20%
После сборного коллектора, перед СА первой ступени	3.....4%
За сопловой решеткой, перед РК первой ступени	4.....5%
За рабочим колесом, на входе в СА второй ступени	4.....8%
Перед решетками лопаток воздушных аэродинамических стенов с плавным входом	0,3.....0,6%
При установке перфорированных успокоительных решеток	1.....2,5%
При специальных турбулизирующих сетках	До 12%
В горле сопловых решеток (независимо от степени турбулентности на входе)	0,5.....0,8%

При решении других задач примерное значение масштаба турбулентности можно определить с помощью следующего соотношения:

$$E = \frac{\sqrt{\frac{2k}{3}}}{U} < 20, \text{ где}$$

k – турбулентная кинетическая энергия;

U – осредненная скорость потока.

Гидравлический диаметр находится по формуле:

$$d_z = \frac{4F}{\Pi}, \text{ где}$$

Π – периметр сечения;

F – его площадь.

Длина смешения может быть принята равной $\delta_c = 0,4\delta$, где δ - толщина вытеснения пограничного слоя.

Коэффициент вязкости представляет собой отношения турбулентной вязкости к ламинарной μ_t / μ . В большинстве случаев эта величина находится в интервале от 1 до 10.

Для решения задач течения жидкостей и газов в каналах наиболее предпочтительным ГУ для турбулентности является задание масштаба турбулентности и гидравлического диаметра (*Intensity and Hydraulic Diameter*).

При исследовании течения вблизи пристенных зон предпочтительным является задание интенсивности турбулентности и длины турбулентного смещения (*Intensity and Length Scale*).

Для решения задач внешнего обтекания больше подходит задание интенсивности турбулентности и коэффициента вязкости (*Intensity and Viscosity Ratio*).

При моделировании турбулентности с помощью алгебраических моделей турбулентности дополнительные ГУ не требуются.

5. НАСТРОЙКА РЕШАТЕЛЯ И РЕШЕНИЕ В ПРОГРАММЕ *FLUENT*

Настройка параметров решателя является важнейшим этапом решения газодинамической задачи в *CFD* программах. От корректности настройки решающего модуля зависит возможность получения решения, его точность и время счета.

В программе *Fluent* настройка решающего модуля состоит из нескольких этапов:

- выбор типа решателя, размерности задачи и ее постановки;
- настройка решателя: выбор схем дискретизации, параметров релаксации и т.п.;
- инициализация – назначение значений параметров потока на первой итерации;
- выбор условия завершения решения;
- настройка отображения процесса решения;
- непосредственно расчет.

Большинство действий решателем производится в подменю *Solve*, за исключением выбора типа решателя, размерности задачи и ее постановки, которые осуществляются в меню *FM: Define → Models → Solver* и было описано в разделе 2.5.

5.1. Установка параметров решателя

Установка параметров решателя осуществляется с помощью команды:

FM: Solve → Controls → Solution

Вид этого меню зависит от выбранного алгоритма решения. Меню *Solution Controls* для *Pressure Based* решателя показано на рис. 5.1.

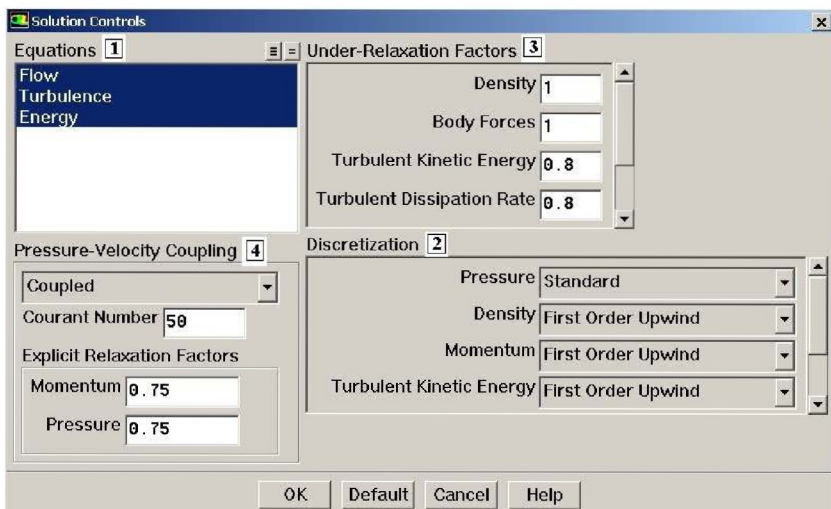


Рис. 5.1. Вид меню *Solution Controls* для алгоритма решения *Pressure Based*

Это меню условно можно поделить на четыре части:

- *Equations*;
- *Under-Relaxation Factors*;
- *Discretization*;
- *Pressure-Velocity Coupling*.

В поле *Equations* (1 рис. 5.1) приводится список решаемых в данной задаче уравнений. Их выбор и количество зависит от типа решаемой задачи. При исследовании течения жидкости или газа в этом списке могут находиться следующие уравнения:

- *Flow* - уравнение движения;
- *Volume Fraction* - уравнения, определяющее фазовый состав;
- *Turbulence* – уравнения описывающие турбулентность;
- *Energy* - уравнение энергии и др.

По умолчанию все уравнения, доступные в списке, выделены синим цветом. Если снять выделение с названия какого-либо уравнения, то оно будет выключено из расчета. Выключение некоторых уравнений из расчета может быть использовано в случаях, когда не удастся запустить решение уравнения. При данном подходе вначале стремятся получить

устойчивое решение с помощью уравнений движения, затем подключается одно или несколько других уравнений и расчет продолжается дальше.

В поле *Discretization* (2 рис. 5.1) находятся названия решаемых уравнений, напротив которых расположены списки доступных для них схем дискретизации. Эти схемы описывают алгоритм построения дискретного аналога дифференциального уравнения вокруг узла конечно-элементной сетки.

В программе *Fluent* для различных уравнений могут применяться следующие схемы дискретизации:

- *First Order Upwind* – схема дискретизации первого порядка точности, является наиболее грубой и не годится для точных расчетов, особенно на крупных сетках. Она отличается повышенной устойчивостью в решении, поэтому используется для запуска решения и поиска предварительных полей изменения параметров, на основе которых производятся расчеты на высших порядках дискретизации;
- *Body Force* - схема внешних массовых сил;
- *Second Order Upwind* – схема дискретизации второго порядка точности. Она неприменима для исследования течения в пористых средах и при наличии скачков давления. Для решения этих задач применяется схема внешних массовых сил;
- *Power Law* – схема одномерного конвективного диффузионного переноса, применяется при малых числах Рейнольдса ($Re < 100$);
- *Linear* – линейная схема дискретизации;
- *QUICK* - схема локально третьего порядка точности. Применяется для ортогональных сеток и при высоком их качестве позволяет получить дискретизации третьего порядка точности вдоль линии тока;
- *Third Order MUSCL* – схема локально третьего порядка точности для произвольных сеток. Сочетает в себе метод центрально - разностной схемы и второго порядка точности;
- *PRESTO!* – схема локально второго порядка точности. Применяется для расчета сильно закрученных потоков и течения через пористые среды.

Для получения точных решений, необходимо использовать дискретизацию второго и выше порядков точности. Однако, на первых итерациях такое решение неустойчиво. Поэтому первые несколько десятков итера-

ций следует проводить на первом порядке дискретизации, затем его повышать.

В зоне *Under-Relaxation Factors* (3 рис. 5.1) задаются коэффициенты релаксации при решении соответствующих уравнений. Они применяются для повышения устойчивости решения и накладывают ограничение на изменение переменной в течение итерации.

Изменение некоторой переменной в течение итерации может быть записано в виде:

$$\varphi^i = \varphi^{i-1} + \alpha \Delta \varphi,$$

где φ^i – значение переменной на i -ой итерации;

φ^{i-1} – значение переменной на предыдущей итерации;

α – коэффициент релаксации;

$\Delta \varphi$ – изменение переменной в течении итерации.

Коэффициент релаксации находится в интервале от 0 до 1 (обратите внимание, что он не должен равняться нулю, иначе переменная по итерациям меняться не будет). При α близком к нулю, скорость достижения сходимости будет маленькой, но при этом расчет протекает более стабильно, вероятность сбоев заметно уменьшается. Уменьшение коэффициентов релаксации улучшает сходимость, но значительно увеличивают время счета. Снижение коэффициента релаксации широко применяется при проблемах с запуском процесса решения.

При α равном единице скорость счета максимальна, по процесс решения может проходить нестабильно, особенно в сложных задачах.

Выбор коэффициентов релаксации требует определенного опыта. Поэтому по возможности их следует оставлять заданными по умолчанию и прибегать к их коррекции только при невозможности получения устойчивого процесса счета.

В зоне *Pressure-Velocity Coupling* (4 рис. 5.1) выбирается алгоритм решения связки уравнения движения и неразрывности. При решении группы этих уравнений определяются поля давлений и скоростей. Всего возможно четыре алгоритма:

- *SIMPLE* – простейшая схема увязки полей скоростей и давлений. Поле давлений определяется с помощью уравнения неразрывности. Оно подставляется уравнение Навье – Стокс. Получаемые в резуль-

тате его решения скорости автоматически удовлетворяют уравнению неразрывности;

- *SIMPLEC* – алгоритм увязки полей, применяемый при исследовании для медленных ламинарных потоков;
- *PISO* – применяется при решении нестационарных задач и в случае, если расчетные области имеют подвижные элементы;
- *COUPLED* – этот алгоритм появился в последней версии программы и считается отдельным видом решателя (*Pressure-based coupled*). Для поиска полей скоростей и давления используется алгоритм расщепления, а для остальных параметров – алгоритм установления. Этот алгоритм позволяет получать качественные устойчивые решения практически для всех классов задач. Для улучшения устойчивости решения число Куранта (*Courant number*) рекомендуется уменьшить до 25.....50.

После проведения настроек следует нажать кнопку *OK* для принятия изменений.

Возвращение к настройкам по умолчанию осуществляется нажатием кнопки *Default*.

Вид меню *Solution Controls* для *Density Based* решателя показан на рис. 5.2.

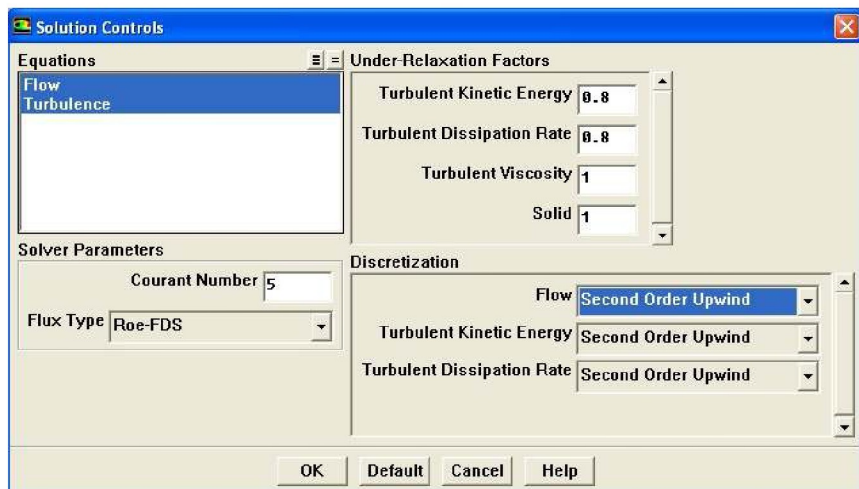


Рис. 5.2. Вид меню *Solution Controls* для *Density Based* решателя

При использовании *Density Based* решателя структура этого меню и работа принципиально не меняются по сравнению с *Pressure Based* решателем. Единственное существенное отличие состоит в том, что в левом нижнем углу вместо выбора увязки полей скоростей и давлений находится поле выбора числа Куранта. Оно подобно коэффициентам релаксации выполняет функцию регулирования решения по критериям «стабильность-скорость». Чем оно меньше, тем устойчивее решение и тем больше время расчета и наоборот. Рекомендуемые значения числа Куранта находятся в следующем диапазоне:

- для *Density Based Implicit* решателя - 120;
- для *Density Based Explicit* решателя - 14;
- для *Pressure-based coupled* решателя - 20... ...200.

Начальные значения числа Куранта следует выбирать из нижней части диапазонов. В случае получения устойчивого решения оно может быть увеличено, за счет чего процесс решения может быть ускорен, однако принимать значения числа Куранта свыше предлагаемых значений не рекомендуется.

Для повышения устойчивости решения при использовании *Density Based Explicit* решателя вычисления могут проводиться на вложенных сетках. Суть этого метода состоит в следующем. Исходная сетка из m элементов заменяется укрупненными сетками:

- из $m/2$ элементов для вложенной сетки первого уровня;
- из $m/4$ элементов для вложенной сетки второго уровня;
- из $m/8$ элементов для вложенной сетки третьего уровня;
- из $m/16$ элементов для вложенной сетки четвертого уровня;
- из $m/32$ элементов для вложенной сетки пятого уровня.

Расчет начинается на самой грубой сетке. Решение на редкой сетке получается во много раз быстрее и устойчивее, чем на исходной сетке. Оно далеко от точного, но отражает общие закономерности изменения полей параметров в расчетной области. Они используются в качестве начальных данных для расчетов на более густых сетках. Результаты расчета на них используются в качестве начальных данных в сетках более высокого уровня. Этот прием позволяет значительно ускорить процесс решения и увеличить его стабильность.

Выбор числа уровней вложенной сетки осуществляется в поле *Multi-grid level*, которое появится ниже поля *Courant Number* при применении *Density Based Explicit* решателя.

5.2. Отображение процесса решения и критерии сходимости

Уравнения Навье - Стокса решаются численным методом. При этом дифференциальные уравнения в области произвольного узла сетки заменяются алгебраическими уравнениями-аналогами, описывающими изменение переменной между несколькими соседними точками. Решение аналога осуществляется итерационным методом. После каждой итерации находятся некоторые значения переменных. Они подставляются в исходные уравнения, выраженные в виде $f(p, T, \rho, x, y, z, v, w, \dots) = 0$. Поскольку решение является приближенным (так как решается алгебраический аналог, а не дифференциальное уравнение), то при подстановке результата расчета получается, что $f(p, T, \rho, x, y, z, v, w, \dots) = R$. Величина R называется невязкой и является критерием, по которому судят о процессе решения. Очевидно, что, чем ближе значение R к нулю, тем ближе найденное решение дискретного аналога к решению исходного дифференциального уравнения.

В качестве дополнительного критерия сходимости можно использовать изменение в процессе решения какого-либо параметра потока в произвольном месте расчетной области (далее по тексту – «сигнальный параметр»). Его неизменность также говорит о достижении предельной точности расчета.

Решение задачи можно считать законченным при выполнении следующих условий:

- разность расходов рабочего тела между входной и выходной границей стремится к нулю и мало меняется от итерации к итерации;
- невязки по всем уравнениям в процессе решения достигают значения меньше рекомендуемого предела;
- невязки по всем уравнениям в процессе решения не меняются существенно.

Для задач, связанных с течением газов, невязка по всем уравнениям, кроме уравнения энергии не должна превышать $R = 0,001$. Для случаев

исследования течений жидкости – невязка не должна быть больше $R = 0,0001$. Для уравнения энергии невязка не должна быть больше $R = 1 \cdot 10^{-6}$.

Достаточно часто возникает ситуация, когда требуемого уровня невязок добиться не удастся или же они достигли предельного значения, а разность расходов рабочего тела между входом и выходом составляет значительную величину (более 1% от расхода) или же сигнальный параметр по итерациям меняется существенно.

В этой связи более надежным критерием сходимости является неизменность невязок и сигнального параметра от итерации к итерации. Постоянство невязок говорит о том, что достигнута предельная точность расчета, и ее повышение можно добиться только улучшением конечно-элементной сетки. В этом случае нижнюю границу невязок, после которой решение будет остановлено, следует сознательно выбрать существенно заниженной.

Для того, чтобы отображать изменение невязок в процессе расчета, а также задать предельное их значение, после достижения которого решение остановится необходимо вызвать меню *Residual Monitors* (рис. 5.3) с помощью команды:

FM: Solve → Monitors → Residual.

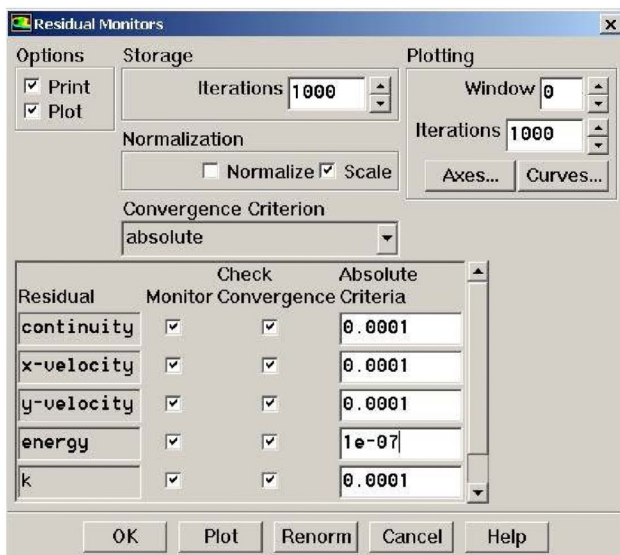


Рис. 5.3. Меню *Residual Monitors*

В этом меню в поле *Option* необходимо поставить галочки напротив опций *Plot* и *Print*. Они означают то, что значения невязок на каждой итерации по всем уравнениям будут выводиться в окне сообщения (*Print*) и отображаться в виде графиков в графическом окне (*Plot*).

В полях *Residual* друг над другом перечислены все решаемые уравнения, а напротив каждого из них в столбце *Convergence Criteria* установлены предельные значения невязок. Когда невязки по всем уравнениям окажутся меньше заданных значений, процесс вычисления будет автоматически остановлен.

Изменение сигнального параметра или разности расходов между входной и выходной границей в процессе решения визуализируется с помощью команды.

ГМ: Solve → Monitors → Surface.

Меню этой команды изображено на рис. 5.4.

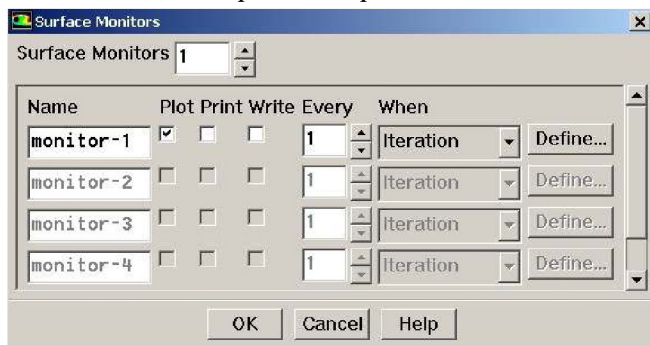


Рис. 5.4. Меню *Surface Monitors*

В нем в поле *Surface Monitors* выбирается число параметров, которые планируется отображать в процессе решения. После этого в поле, расположенном ниже, станут активны несколько строк, в количестве равном числу, введенному в поле *Surface Monitors*.

Каждая строка состоит из названия отображаемого процесса, нескольких опций и кнопки *Define*, которая осуществляет доступ к меню выбора отображаемого параметра.

В случае если активировать опцию *Plot*, то изменение указанного параметра по итерациям будет представлено в виде графика. Если активировать опцию *Print*, то значение выбранного параметра будет выводиться в процессе решения в окне сообщения. При активации опции *Write* изменение переменной по итерациям будет записываться в текстовый файл.

Правее опций находится окно *Every* и выпадающий список *When*. С их помощью можно настроить частоту отображения параметра. В первом окне выбирается число процессов, через которые отображается результат, а в списке *When* описывается, что это за процесс (итерация или шаг по времени). Например, если в поле *Every* указано число 10, а в списке выбрано *Iteration*, то это указывает на то, что значение указанной переменной будет выводиться через каждые 10 итераций. Для нестационарной задачи вывод значения параметра может осуществляться через заданное в поле *Every* число шагов по времени *Time Step*.

Для того, чтобы выбрать изменение какого параметра будет отображаться, необходимо нажать кнопку *Define*. В результате появится меню, изображенное на рис. 5.5.

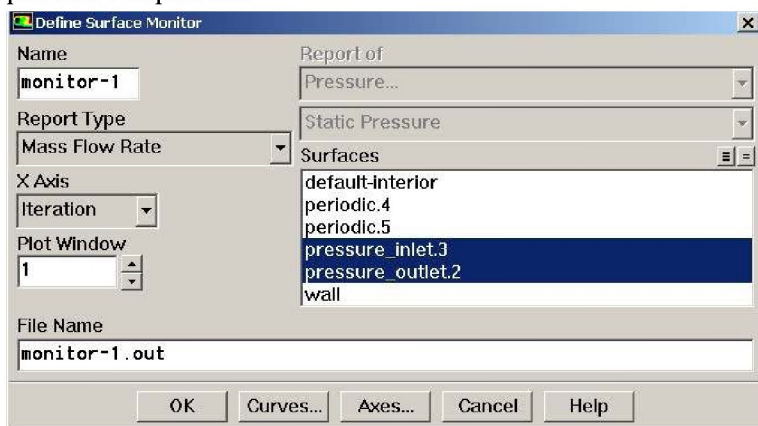


Рис. 5.5. Меню *Define Surface Monitor*

В этом меню в поле *Report Type* выбирается тип выводимого параметра. Основные из них:

- *Mass Flow Rate* – массовый расход;
- *Integral* – интегральное значение параметра;

- *Area-Weighted Average* – параметр, осредненный по площади сечения;
- *Mass-Weighted Average* – параметр, осредненный по расходу.

В списке *Surfaces* выбираются граница, на которой рассчитывается значение параметра. Если будет выбрано несколько границ, то будет выведено среднее арифметическое значение параметра на них.

Параметр, изменение которого требуется отобразить, выбирается в поле *Contours of*. Оно состоит из двух выпадающих списков (рис. 5.5). В верхнем из них выбирается группа, к которой принадлежит нужный параметр (например, скорость). В нижнем списке уточняется, какой именно параметр группы требуется определить (например, осевая скорость). Это типовая и часто используемая процедура выбора отображаемого параметра в программе *Fluent*. Аналогичным образом, например, определяется параметр при подсчете среднеинтегральных значений. Наиболее часто используемые параметры приведены в Приложении 1. Если в поле *Report Type* выбран пункт *Mass Flow Rate* поле *Contours of* будет не активно.

Если необходимо визуализировать разность расходов между входной и выходной границей в поле *Report Type* следует выбрать *Mass Flow Rate*, а в поле *Surfaces* все входные и выходные границы.

5.3. Установка начальных значений параметров

При решении задач газовой динамики численными методами перед запуском решения необходимо установить значения параметров в расчетной области в начальный момент решения. Правильный выбор этих параметров может существенно улучшить устойчивость и сходимость, что существенно ускорит получение решения. Меню установки начальных условий (рис. 5.6) вызывается командой:

GM: Solve → Initialize → Initialize.

Установку начальных значений параметров потока можно вести двумя способами:

- ввести ожидаемые значения параметров потока в расчетной области в соответствующих полях меню вручную. Однако зачастую эти значения не известны;

- рассчитать значения начальных параметров средствами программы по параметрам на одной из границ расчетной области. Чаще всего расчет ведется по па-

раметрам на входе или выходе. Выбор границы осуществляется в поле *Compute From*. Однако этот способ не гарантирует получения корректных начальных полей, поэтому к ним нужно относиться критически и вручную скорректировать значения параметров.

Для применения начальных условий к расчетной области обязательно следует нажать кнопку *Init*.

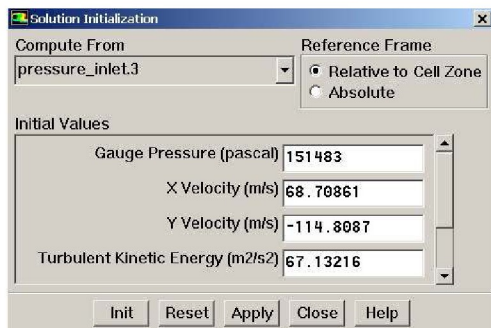


Рис. 5.6. Меню установки начальных значений параметров

5.4. Запуск решения

Запуск решения осуществляется с помощью команды ГМ: *Solve* → *Iterate*, вид меню которой для стационарных задач показано на рис. 5.7.

В этом меню в поле *Number of Iteration* нужно ввести число итераций. В программе *Fluent* потребное число итераций составляет, как правило, несколько сотен. В поле *Report Interval* вводится число итераций, через которое выводятся значения невязок. Если в поле *Report Interval* введено 1, то это значит, что невязки будут отображаться каждую итерацию.

В поле *UDF Profile Update Interval* вводится число итераций, через которое корректируется пользовательская функция *UDF*. В случае если она не применяется, то в указанном окне нужно ввести цифру 0.

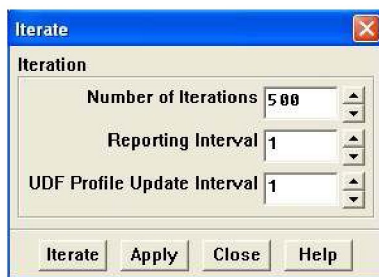


Рис. 5.7. Меню запуска решения при стационарной постановке задачи

Запускается решение нажатием кнопки *Iterate*.

После запуска решения в графическом окне появится зависимость невязок от номера итерации для каждого уравнения (рис.5.8), а также окно, показывающее изменение сигнального параметра по итерациям (если это было описано в меню *Surface Monitors*). Обратите внимание, что для каждого уравнения значения невязок различны.

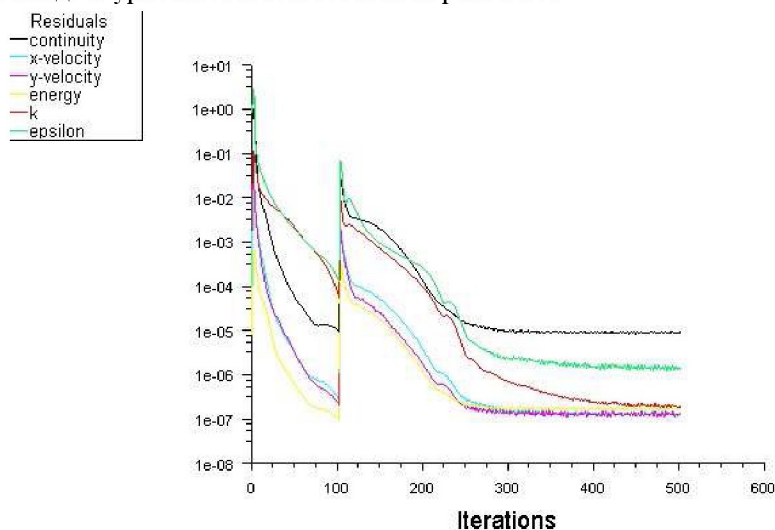


Рис. 5.8. Изменение невязок по итерациям

Если условие сходимости будет достигнуто, то процесс счета остановится сам. В этом случае в окне сообщений появится уведомление *solution is converged*. Если заданного числа итераций будет недостаточно для получения решения, то процесс решения можно продолжить.

Решение может быть остановлено в любой момент нажатием на кнопку *Cancel* и вновь запущено с места остановки, нажатием кнопки *Iterate* в меню запуска решения. В ходе паузы могут быть просмотрены предварительные результаты решения, внесены изменения в ГУ или настройки решателя.

Запуска расчета после внесения изменений в расчетной модели сопровождается, как правило, скачком невязок (рис. 5.8).

При решении задач в нестационарной постановке меню *Solve* → *Iterate*, имеет вид, изображенный на рис 5.9.

В этом меню, в поле *Time step size* вводится величина шага по времени. Шаг зависит от конкретной задачи, но, как правило, составляет достаточно малую величину, исчисляемую десятymi или сотыми долями секунды. Величина шага по времени может быть постоянной или переменной. Выбор типа шага осуществляется в поле *Time Stepping Method*.

В поле *Number Time Steps* вводится число шагов по времени. Эта величина определяется длительностью интересующего процесса и величиной шага по времени.

В поле *Iteration* настраиваются параметры решения в течение одного шага по времени. Работа с этим полем не отличается от настройки процесса решения стационарной задачи. Единственная особенность - число итераций внутри временного шага существенно меньше, чем в стационарной задаче и исчисляется десятками (как правило, находится в интервале 20... ..50).

5.5. Проверка баланса расходов

После остановки расчетов рекомендуется проверить баланс расходов – разности массовых расходов на входе и выходе из расчетной области. Очевидно, что, согласно уравнению неразрывности, втекающая масса рабочего тела должна быть равна вытекающей. Разность расходов должна быть не больше 0,1% от расхода на входной границе. Если это условие выполняется, то расчет выполнен успешно. Для проверки баланса расходов необходимо вызвать команду *ГМ: Report → Fluxes*.

В появившемся меню (рис. 5.10) в окне *Boundaries* необхо-

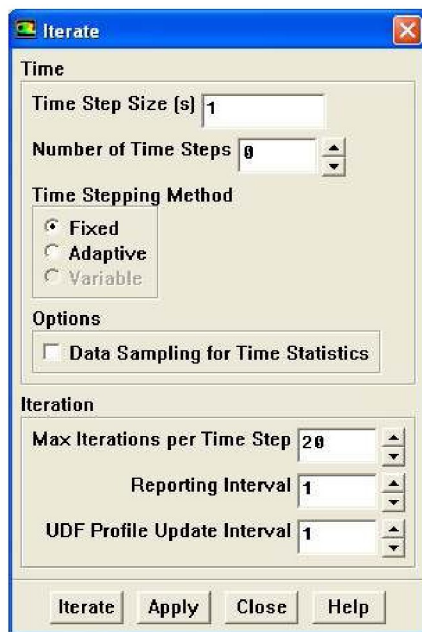


Рис. 5.9. Меню запуска решения при нестационарной постановке задачи

димом выбрать все входные и выходные границы (на рис. 5.10 *pressure_inlet.1* и *pressure_outlet.2*) и нажать кнопку *Compute*.

В результате в поле *Results* будут показаны значения расходов через выбранные границы, а в поле *kg/s* будет приведена разность расходов. Обратите внимание, что значение расхода имеет знак. Если рабочее тело втекает, то расход положительный, а если вытекает – отрицательный.

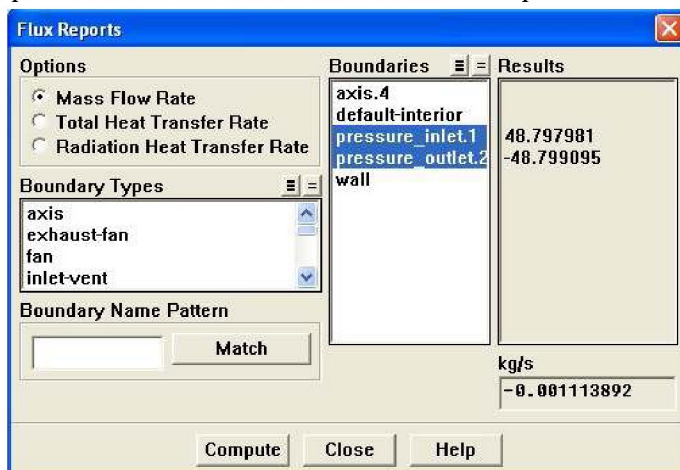


Рис. 5.10. Меню проверки массового баланса

6. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

Последним этапом решения газодинамических задач с помощью *CFD* программ является обработка результатов расчета. Грамотное использование постпроцессора позволяет оценить адекватность сделанных расчетов, увидеть структуру потока и собрать исчерпывающие сведения о нем. Умение правильно и полно представить полученные результаты позволяет существенно облегчить анализ картины течения и поиск путей ее улучшения.

Постпроцессор программы *Fluent* по своим возможностям схож с аналогичными модулями других *CFD* программ и позволяет строить поля распределения параметров потока, векторов, линий тока, создавать анимацию, управлять отображением модели и т.п. Результаты могут быть представлены в виде графиков, текстовых файлов или интегральных значений параметров. Рассмотрим основные команды постпроцессора программы *Fluent*.

6.1. Построение поверхностей, линий и точек, на которых будут отображаться результаты расчета

Поля распределения параметров или векторов скорости могут быть отображены только на поверхностях, находящихся в поле *Surface* в меню соответствующих команд (например, в меню на рис. 2.2). Изначально при загрузке модели из препроцессора в поле *Surface* находятся только граничные поверхности. В практике решения газодинамических задач часто возникает необходимость построить распределение параметра, график по некоторой поверхности или линии, не являющейся граничной. Для того, чтобы это сделать требуемую поверхность, линию или точку нужно сначала построить с помощью подменю *Surface* главного меню.

6.1.1. Построение вспомогательной точки

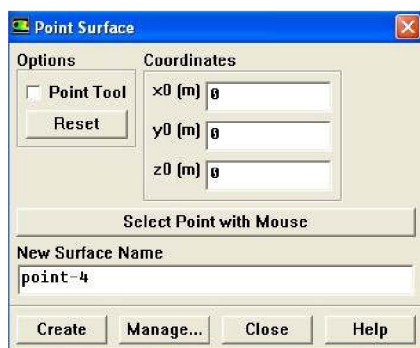


Рис. 6.1. Меню построения
вспомогательной точки

Построение вспомогательной точки осуществляется с помощью команды ГМ: $\rightarrow$ Surface $\rightarrow$ Point. Внешний вид ее меню показан на рис. 6.1.

В нем в поле *Coordinates* вводятся координаты требуемой точки. Ее положение также может быть выбрано указанием положения точки в графическом окне с помощью мыши. Для этого нужно нажать кнопку *Select Point with Mouse*

и щелкнуть правой клавишей мыши в требуемом месте.

В поле *New Surface Name* вводится имя создаваемой точки. Для того, чтобы создать точку с заданными координатами необходимо обязательно нажать кнопку *Create*. Кнопка *Manage* открывает доступ к команде ГМ: Surface $\rightarrow$ Manage, с помощью которой возможно редактирование списка построенных поверхностей (они могут быть переименованы, удалены, сгруппированы и т.п.). Работа с этой командой будет рассмотрена ниже.

6.1.2. Построение вспомогательной линии

Построение вспомогательной линии осуществляется с помощью команды ГМ: $\rightarrow$ Surface $\rightarrow$ Line/Rake. Вид ее меню показан на рис. 6.2. Работа с ним мало отличается от работы с меню построения точки. В поле *End Points* вводятся координаты точек концов отрезка. Они также могут быть выбраны с помощью мыши в графическом окне. Для этого нужно нажать кнопку *Select Point with Mouse* и щелкнуть правой клавишей мыши в местах расположения концов отрезка.

С помощью данной команды также можно построить линию с заданным количеством точек на ней (*Rake*). Она применяется при построении линии тока. Из нее будет выходить заданное в описываемом меню число струек. Для этого в поле *Type* выбирается пункт *Rake*, а в поле *Number of Points* выбрать необходимое число точек на линии. Для принятия сделанных настроек и построения линии необходимо нажать кнопку *Create*.

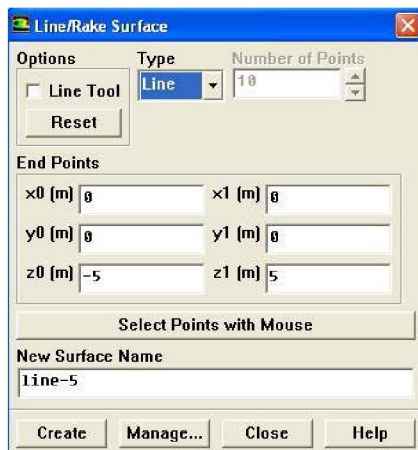


Рис. 6.2. Меню построения вспомогательной линии

6.1.3. Построение

вспомогательной поверхности

Построение вспомогательной плоскости осуществляется с помощью команды ГМ: $\rightarrow \text{Surface} \rightarrow \text{Plane}$. Вид меню показан на рис. 6.3.

По умолчанию плоскость определяется тремя точками, принадлежащим ей. Их координаты вводятся в поле *Points* или же точки выбираются с помощью мыши.

Кроме того, плоскость может быть задана следующими способами:

- по направлению нормального вектора и точке - для этого нужно активировать опцию *Point and Normal*;
- по направлению взгляда на модель и точке - для этого нужно активировать опцию *Aligned with View Plane*;
- параллельная существующей поверхности. Положение новой плоскости определяется заданием точки, через которую она проходит. Для такого способа описания поверхности нужно активировать опцию *Aligned with Surface*.

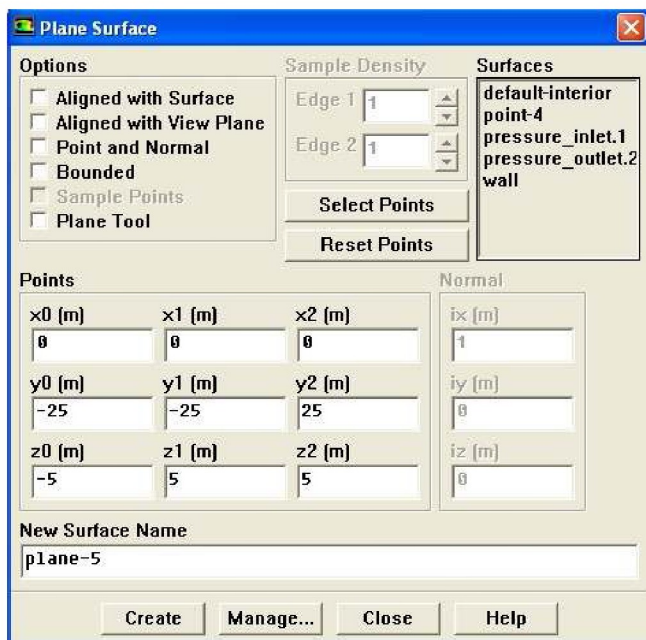


Рис. 6.3. Меню построения вспомогательной плоскости

Для принятия сделанных настроек и построения поверхности необходимо нажать кнопку *Create*.

6.1.4. Построение вспомогательной изоповерхности

Несмотря на большое число способов построения поверхностей, на которых требуется отобразить поля распределения параметров, наиболее часто применяется построение изоповерхностей. Под ними понимается поверхность произвольной формы, на которой значение произвольно выбранного параметра равно конкретной величине. Например, при отображении результатов часто приходится пользоваться поверхностями с постоянными координатами x , y , z , a , φ или r . В экологических исследованиях можно визуализировать поверхность с предельным значением концентрации какого-то опасного вещества.

Для построения таких поверхностей используется команда ГМ: *→ Surface → Iso-Surface*. Ее меню показано на рис. 6.4.

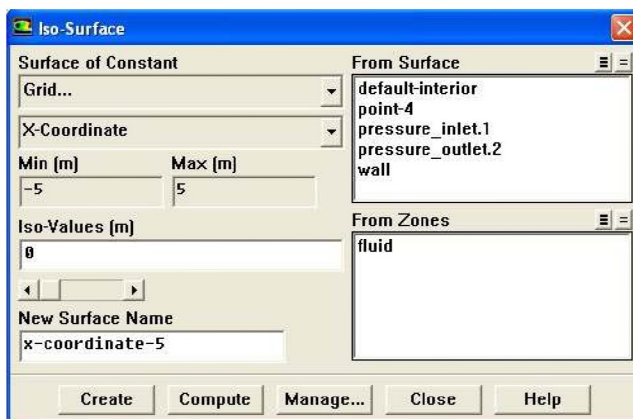


Рис. 6.4. Меню построения изоповерхности

В меню построения изоповерхности в поле *Surface of Constant* выбирается параметр, который будет постоянным. Оно состоит из двух выпадающих списков. В верхнем из них выбирается группа, к которой принадлежит нужный параметр (например, скорость). В нижнем списке уточняется, какой именно параметр группы требуется определить (например, осевая скорость). Наиболее часто используемые параметры приведены в Приложении 1.

Для того, чтобы построить поверхность с одинаковой координатой в верхнем списке необходимо выбрать пункт *Grid*, а в нижнем название соответствующей координаты:

- *X-coordinate* – координата X ;
- *Y-coordinate* – координата Y ;
- *Z-coordinate* – координата Z ;
- *Axial coordinate* – осевая координата;
- *Tangential coordinate* – угловая координата;
- *Radial coordinate* – радиальная координата.

Само же значение параметра, поверхность с постоянным значением которого будет строиться, вводится в поле *Iso-Values*.

Ниже поля *Surface of Constant* находятся окна *Max* и *Min*, в которых после нажатия кнопки *Compute* выводятся максимальное и минимальное значения установленного параметра. Это удобно, поскольку наглядно

видно, в каком диапазоне должно находиться значение параметра, вводимого в поле *Iso-Values*.

Если в поле *Surface* выбрать одну из граничных или уже созданных вспомогательных поверхностей, то в результате выполнения команды *Iso-Surface*, будет построена только та часть изоповерхности, которая является общей с выбранной. Аналогично в поле *From Zones* можно выбрать область потока, в которой строится изоповерхность. Если в поле *Surface* и *From Zones* не выбрать ничего, то изоповерхность будет построена по всей расчетной области.

Для принятия сделанных настроек и построения изоповерхности необходимо нажать кнопку *Create*.

6.1.5. Построение вспомогательной геометрии копированием

Вспомогательная поверхность может быть построена путем копирования существующего вспомогательного объекта или граничной поверхности.

Копирование может быть осуществлено линейным перемещением или вращением вокруг выбранной оси. Указанные действия производятся с помощью команды *ГМ: → Surface → Transform*. Ее меню показано на рис. 6.5.

В этом меню, в поле *Transform Surface*, выбирается граничная или вспомогательная поверхность, которая будет копироваться. В поле *Translate* вводится расстояние по координатным осям, на которое осуществляется

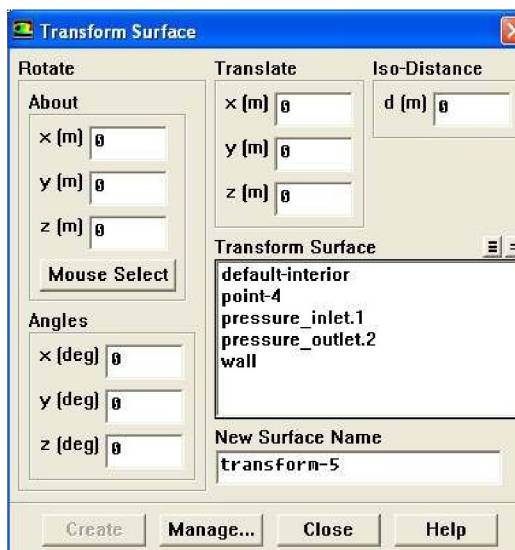


Рис. 6.5. Меню построения вспомогательной поверхности смещением существующей

линейное копирование.

В поле *Rotate* вводятся параметры копирования вращения. В поле *About* задается смещение оси вращения относительно заданной при описании области потока, а в поле *Angles* - углы поворота относительно координатных осей.

Для копирования поверхности согласно сделанным настройками необходимо нажать кнопку *Create*.

6.1.6. Редактирование списка вспомогательной геометрии

Редактировать список *Surface* можно с помощью команды ГМ: *Surface* → *Manage*. Ее меню показано на рис. 6.6. Доступ к нему также осуществляется нажатием кнопки *Manage* во всех рассмотренных разделе 6.1 меню. С помощью этой команды можно группировать поверхности, удалять ошибочно созданные или не нужные (кнопкой *Delete*), переименовывать их. Работа с данным меню сложностей не вызывает.

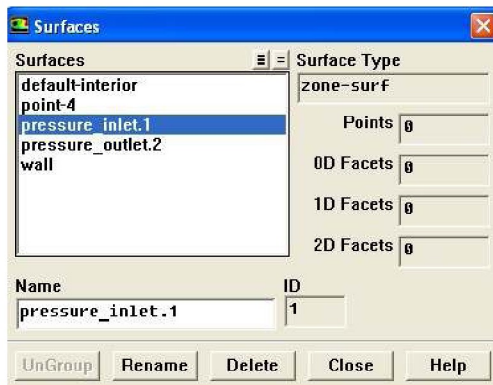


Рис. 6.6. Меню *Manage*

6.2. Визуализация

полей распределения параметров в расчетной области

Просмотр полей распределения параметров в произвольном сечении осуществляется с помощью команды ГМ: *Display* → *Contours*. Ее меню показано на рис. 6.7.

Параметр, изменение которого требуется отобразить, выбирается в поле *Contours of* (1 рис. 6.7). Оно состоит из двух выпадающих списков. В верхнем из них выбирается группа, к которой принадлежит нужный параметр (например, скорость). В нижнем списке уточняется, какой именно параметр группы требуется определить (например, осевая скорость). Наиболее часто используемые параметры приведены в Приложении 1.

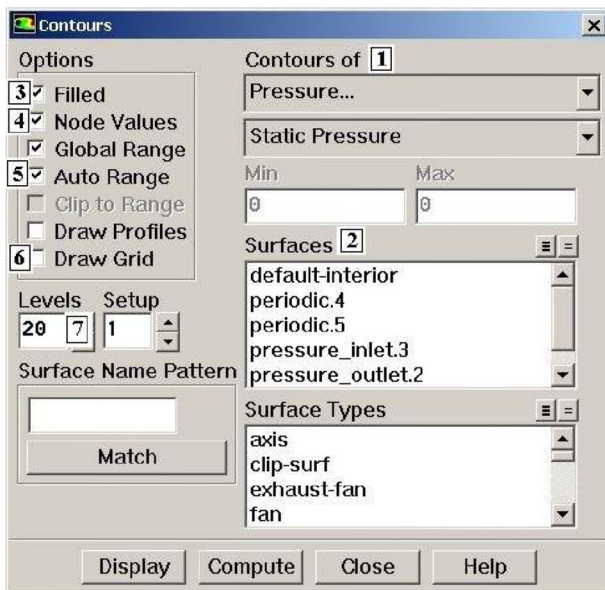


Рис. 6.7. Меню *Contours*

В поле *Surfaces* (2 рис. 6.7) задаются граничные или вспомогательные поверхности (их нужно предварительно задать, как это было описано в предыдущем разделе), на которых строятся поля распределений параметров. Если рассматриваемая задача является двухмерной, то в этом списке можно не выбирать ничего. В этом случае поле будет построено по всей расчетной области. Если рассматриваемая задача трехмерная, то в поле *Surfaces* обязательно нужно выбрать какую-либо поверхность. При этом нужно избегать выбора сеточной области *default – interior*. Построение полей на ней требует больших компьютерных ресурсов и, как правило, занимает очень много времени (от нескольких минут до часов в зависимости от числа конечных элементов). Причем полученные поля не обладают большой информативностью.

В меню *Contours* доступны ряд опций. Наиболее часто применяются следующие.

Filled (3 рис. 6.7) – если опция активна, то распределение параметров отображается в виде полей. В противном случае распределения параметров будут изображаться с помощью изолиний. Причем изолинии выделя-

ются только цветом и в отчетах (особенно черно-белых) они не информативны. Действие опции показано на рис. 6.8.

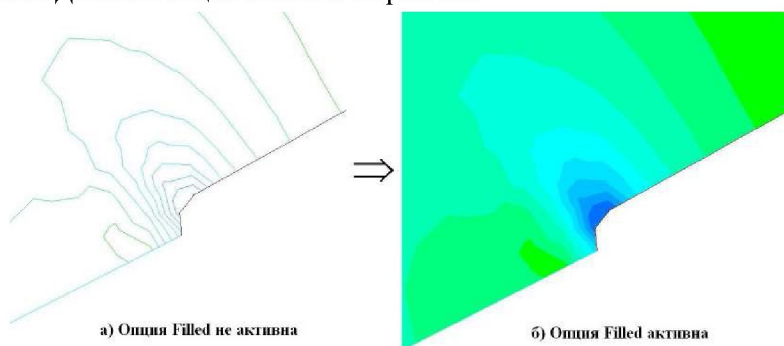


Рис. 6.8. Действие опции *Filled*

Node Values (4 рис. 6.7) – если опция неактивна, то всей ячейке присваивается значение параметра в ее центре. Если опцию *Node Values* активировать, изменение параметров рассчитывается по значению параметров в узлах сетки. В результате изменение параметров на полях получается плавными и более физичными. Действие опции показано на рис. 6.9.

Опция *Auto Range* (5 рис. 6.7) определяет диапазон изменения отображаемого параметра. Если она активна, то поле строится по всему диапазону изменения параметра: от минимального до максимального значения. Если опция не активна, то в полях *Max* и *Min* можно ввести максимальное и минимальное значение переменной, поле распределения которого строится. Если при этом активна опция *Clip to Range*, то области поля, где значение рассматриваемого параметра выходит за определенный диапазон, не будут окрашиваться.

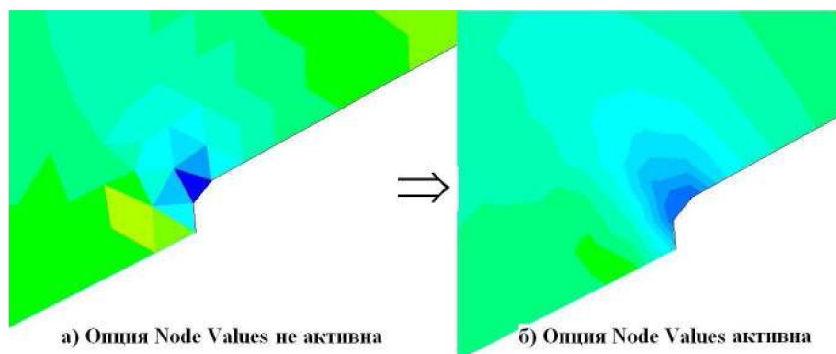


Рис. 6.9. Действие опции *Node Values*

Опция *Draw Grid* (6 рис. 6.7) позволяет отобразить сетку в одном окне с полем изменения параметра. При активации опции появится меню *Display Grid*, работа в котором была рассмотрена ранее в разделе 2.3.

В окне *Levels* (7 рис. 6.7) производится выбор числа диапазонов, на который будет разделен глобальный диапазон изменения параметров. Например, если в этом окне выбрано число 20, то это значит, что диапазон изменения рассматриваемого параметра будет разделен на 20 частей и поле будет окрашено в 20 разных цветов в зависимости от значения параметра. Максимально возможное число диапазонов – 100.

При выводе полей давлений обратите внимание на то, что если справочное давление в меню *Operation Condition* задано не равным нулю, то давление является избыточным относительно справочного.

6.3. Визуализация векторов скорости

Для отображения векторов скоростей используется команда ГМ: *Display* → *Vectors*. Ее меню показано на рис. 6.10. Работа в нем похожа на работу с меню построения полей.

В поле *Surfaces* нужно выбрать граничную или вспомогательную (которую нужно создать заранее) поверхность, где требуется отобразить векторы скорости.

В списке *Vectors of* определяется векторы той скорости, которые будут отображаются: относительной (*Relative velocity*) или абсолютной (*velocity*)

В поле *Color by* задается закономерность окраски векторов. Цвет вектора в каждой точке расчетной области будет соответствовать величине параметра, определенного в зоне *Color by*.

Если вектора окажутся маленькими или чрезмерно большими, их размер можно изменить, скорректировав значение коэффициента в поле *Scale*. С его увеличением масштаб увеличится, со снижением – уменьшится.

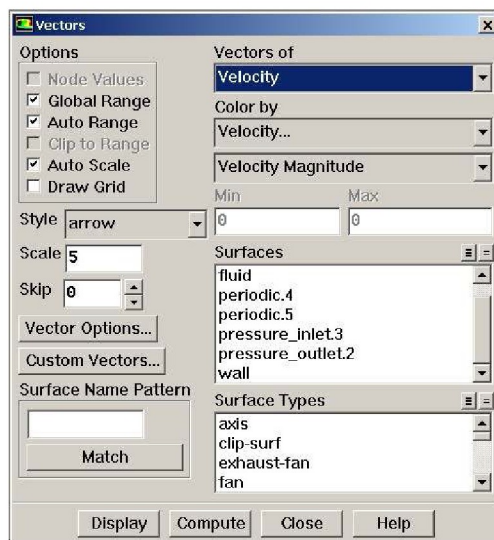


Рис. 6.10. Меню *Vectors*

Начало вектора помещается в центре конечноэлементной ячейки. По этой причине в местах со сгущенной сеткой векторов будет изображено много, что может мешать анализу полученных результатов. Вектора можно проредить, задав в поле *Skip* число отличное от нуля. Оно определяет, сколько векторов не будет отображаться. Например, если в поле *Skip* стоит число 2, то это значит, что два из трех векторов не будут показаны в графическом окне.

В списке *Style* определяется способ изображения вектор скорости. Он может быть изображен в виде конуса (*cone*), стрелки (*arrow*), гарпуна (*harpoon*) и др.

Настроить параметры вектора можно в меню, вызываемом нажатием кнопки *Vector Options*. Оно изображено на рис. 6.11.



Рис. 6.11. Меню настройки

движение на простые составляющие.

Опции, расположенные в левой верхней части меню *Vectors* аналогичны опциям в меню построения полей.

6.4. Построение линий тока

Для отображения линий тока используется команда *ГМ: Display → Pathlines*. Ее меню показано на рис. 6.12.

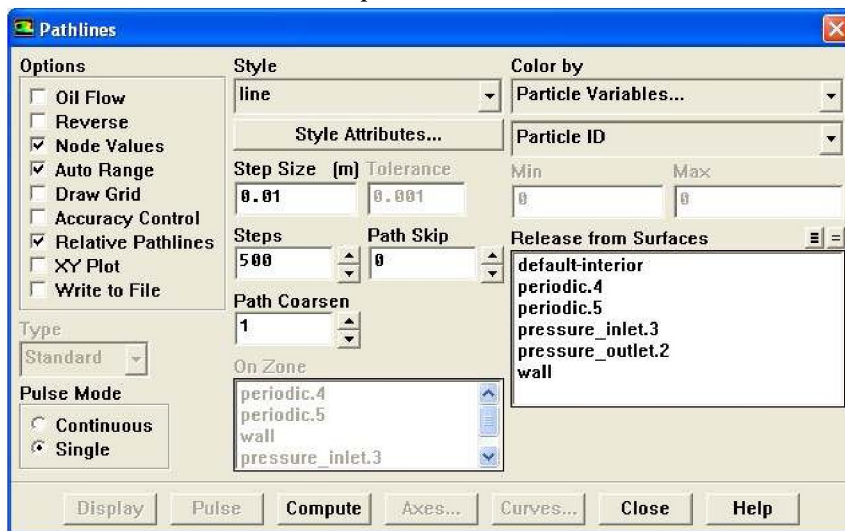


Рис. 6.12. Меню отображения линий тока

Основные настройки состоят в следующем.

В поле *Release from Surface* выбирается граничная или вспомогательная поверхность, линия или точка, из которой выходят интересные пользователя линии тока.

В поле *Color by* задается закономерность окраски линии тока. Цвет линий в каждой точке расчетной области будет соответствовать величине параметра, определенного в зоне *Color by*.

В поле *Style* выбирается вид линий тока. Они могут быть изображены в виде линий (*line*), стрелок (*line-arrows*), точек (*point*), сфер (*sphere*), лент (*ribbon*), треугольников (*triangle*) и др. Настроить вид линий тока (длину линий, размер сфер, длину стрелок и т.п.) можно в меню, доступ к которому осуществляется нажатием кнопки *Style Attributes*.

В поле *Step Size* вводится размер шага, а в поле *Steps* - число шагов. В случае, если линии тока расположены слишком густо и мешают анализу картины течения, их можно проредить, задав в поле *Path Skip* число пропусков.

Построение линий тока по сделанным настройкам осуществляется нажатием кнопки *Display*. Для наглядности течение можно посмотреть в анимированном виде. Для этого нужно нажать кнопку *Pulse*. Отображение анимированных линий тока может быть осуществлено в двух вариантах:

- непрерывное движение частиц рабочего тела (*continuous*);
- показывается движение небольшой дозы рабочего тела, вошедшего через указанную поверхность (*single*).

Выбор режима отображения анимированных линий тока осуществляется в поле *Pulse Mode*.

6.5. Определение среднеинтегральных значений параметра

При решении газодинамических задач часто возникает необходимость знать среднеинтегральное значение какого-либо параметра в некотором сечении. Например, для определения коэффициента восстановления полного давления в исследуемом канале нужно знать значение

полного давления на входной и выходной границе. Среднеинтегральное значение параметра можно найти с помощью команды: *ГМ: Report* → *Surface Integrals*. Ее меню показано на рис. 6.13.

В его верхней части необходимо выбрать тип осреднения искомой величины (в поле *Report Type*). Наиболее часто применяются следующие: *Area-Weighted Average* (осреднение по поверхности) и *Mass-Weighted Average* (осреднение по расходу). Первый вариант соответствует осреднению, применяемому при обработке результатов эксперимента и поэтому он используется чаще. Если в поле *Report Type* выбрать пункт *Mass Flow Rate*, то с помощью данной команды можно будет вычислить расход через поверхность, выбранную в поле *Surface*.

В поле *Field Variable* выбирается параметр, значение которого необходимо знать, а в поле *Surface* выбирается граничная или вспомогательная поверхность, на которой необходимо определить значение переменной. Чтобы получить значение параметра, нужно нажать кнопку *Compute*. Значение параметра будет продублировано в окне сообщений. Если в поле *Surface* было выбрано несколько поверхностей, то в окне сообщений будет выведена величина переменной на каждой из них, а в меню *Surface Integrals* показано их среднее арифметическое.

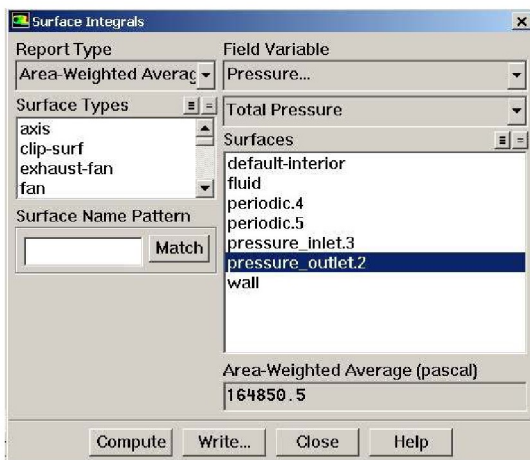


Рис. 6.13. Меню *Surface Integrals*

6.6. Построение графиков изменения параметров

Программа *Fluent* позволяет строить графики распределения любого рассчитанного параметра вдоль произвольной поверхности или линии. Меню построения графиков (рис. 6.14) вызывается командой:

ГМ: *Plot* → *XY-plot*.

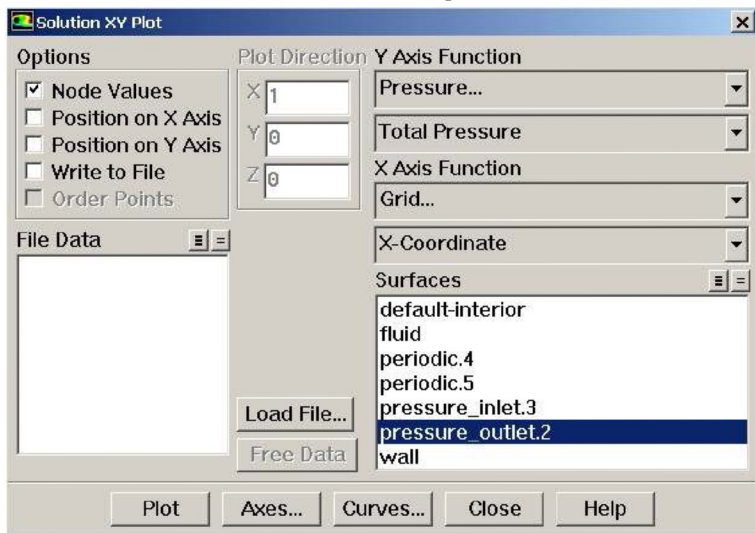


Рис. 6.14. Меню построения графиков

В меню *XY-plot* необходимо убрать галочку в окошке *Position on X Axis*. В результате станут доступны поля *Y Axis Function* и *X Axis Function* – параметры, откладываемые по оси *y* и *x* соответственно. В поле *Surfaces* задается поверхность или линия, изменение параметров на которой отображаются на графике.

Например, чтобы построить изменение полного давления вдоль оси *x* на некоторой границе необходимо в качестве параметра на оси *y* выбрать полное давление (*Pressure* → *Total Pressure*), а в качестве параметра по оси *x* – координату *x* (*Grid* → *X-Coordinate*). В поле *Surfaces* выбирается граница вдоль которой интересуется изменение параметра. Аналогичным образом могут быть построены любые другие зависимости.

Для построения графика по сделанным настройкам нужно нажать кнопку *Plot*. Пример графической зависимости, построенной в программе *Fluent* показан на рис. 6.15.

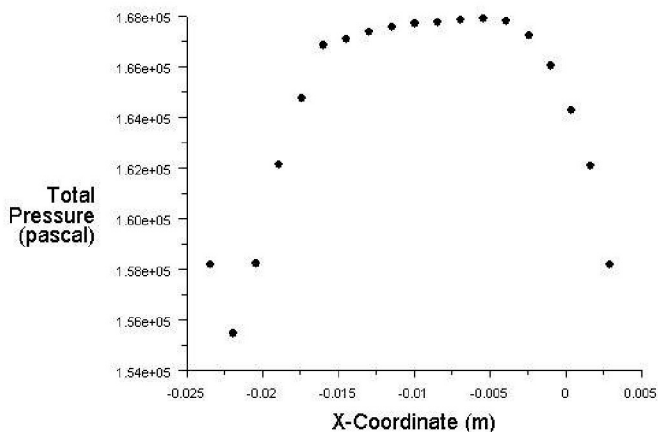


Рис. 6.15. Пример графической зависимости, полученной в программе *Fluent*

Если в *Options* активировать опцию *Write to file*, то полученный график будет записан в текстовый файл, который в дальнейшем может быть использован как в программе *Fluent*, так и в других программах, например *Excel*. Записанная в файл подобным образом графическая зависимость загружается нажатием кнопки *Load File*, находящейся в нижней центральной части меню. Это позволяет отображать в одном графическом окне несколько зависимостей и сравнивать, например, результаты расчетов с разными ГУ.

В меню *XY-plot* имеется возможность настраивать вид линий на графиках.

Для этого используется меню, вызываемое нажатием кнопки *Curves* (рис. 6.16).

В этом меню в поле *Marker Style* настраивается вид маркера, обозначающего точку на графике. Символ, которым он обозначается (*symbol*), его цвет (*color*) и размер (*size*).



Рис. 6.16. Меню настройки вида графиков

В поле *Line Style* настраивается вид линии, соединяющей точки: тип линии (*pattern*), цвет (*color*) и толщину (*weight*).

Номер зависимости (в случае, если их в графическом окне несколько) выбирается в поле *Curve*.

Примерный вид графической зависимости, соответствующий сделанным настройкам, показан в поле *Simple*.

Настройка вида области построения графика и его осей осуществляется в меню, вызываемого нажатием кнопки *Axis* (рис. 6.17).

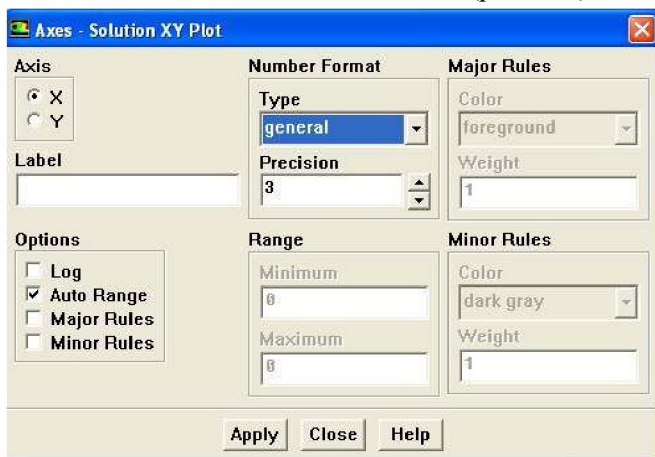


Рис. 6.17. Меню настройки вида области построения графика и его осей

В данном меню в поле *Axis* выбирается ось графика, для которой делаются настройки. Для каждой оси необходимо проводить настройки отдельно.

В поле *Label* можно ввести название оси (латинским шрифтом). Если его оставить пустым, то ось будет автоматически названа по названию переменной.

В поле *Number Format* настраиваются параметры цифровых подписей выбранной оси. В поле *Type* выбирается тип числа: *general* – общий, *float* – с плавающей точкой, *exponential* – экспоненциальный. В поле *Precision* выбирается необходимое число знаков после запятой.

Активация опции *Major Rules* приведет к появлению основных линий сетки, а активация опции *Minor Rules* вызывает появление вспомогательных линий сетки (рис. 6.18). При этом становятся активными соответст-

вующие поля в правой части меню, в которых настраивается цвет линий сетки и их толщина.

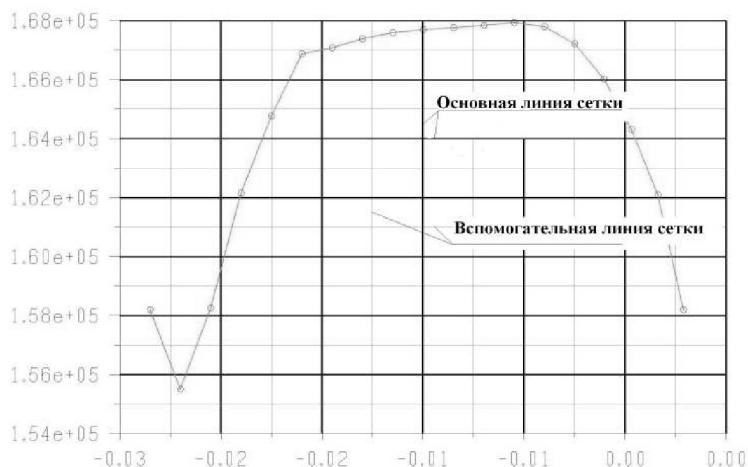


Рис. 6.18. Действие опций *Major Rules* и *Minor Rules*

6.7. Отображение периодических и симметричных элементов

Если расчетная модель имеет периодические границы или условие симметрии, то при обработке результатов расчета можно отобразить недостающие элементы рассматриваемой области и тем самым увидеть структуру течения в ней в целом. Отобразить периодические и симметричные элементы можно с помощью команды *ГМ: Display → Views*. Меню команды показано на рис. 6.19.

Если необходимо отобразить периодические элементы, то в поле *Periodic Define* в данном меню следует нажать кнопку *Define*. В результате откроется доступ к окну *Graphics Periodicity* (рис 6.20), в котором нужно задать параметры отображения периодичной модели. Там определяется тип периодичности: окружная

(*Rotational*) или линейная (*Translational*), расстояние (линейное или угловое), на котором одна периодичная граница отстоит от другой, и число копий *Number of Repeats*.

В случае, если модель имеет поверхности симметрии, то их названия будут приведены в окне *Mirror Planes*. В нем выбирается симметричное условие, относительно которого нужно построить недостающую часть. После этого следует нажать кнопку *Apply*. Действие команды *Views* показано на рис. 6.21.

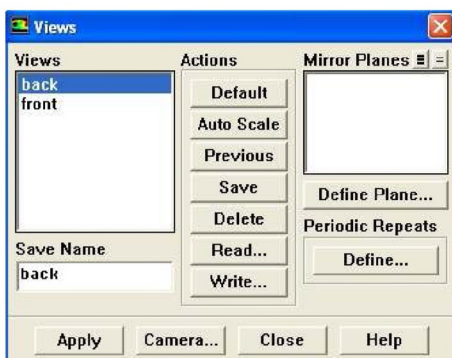


Рис. 6.19. Меню *Views*

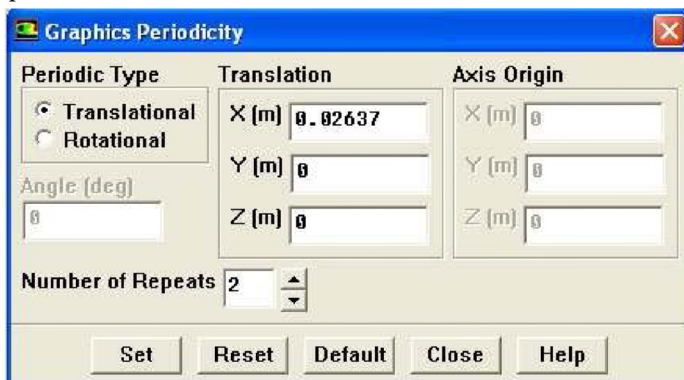


Рис. 6.20. Меню настройки отображения периодичных элементов

6.8. Задание пользовательских переменных

Как видно из приложения 1 программа позволяет рассчитать и вывести в виде полей, графиков или интегральных значений больше количество переменных. Тем не менее, при решении прикладных инженерных задач достаточно часто возникает ситуация, когда необходимо рассчитать какой-либо параметр, недоступный в программе по умолчанию. Например, в стандартном списке параметров нет приведенной скорости λ , которая широко применяется в двигателестроении и т.п.

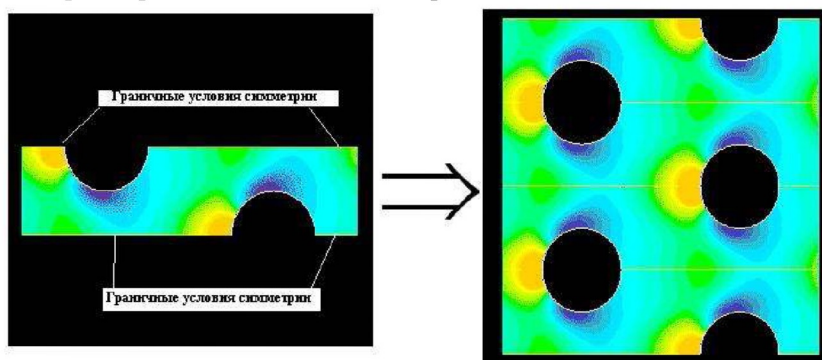


Рис. 6.21. Действие команды Views

Для таких случаев в программе предусмотрена команда *GM: Define* → *Custom Field Function*. Меню команды показано на рис. 6.22.

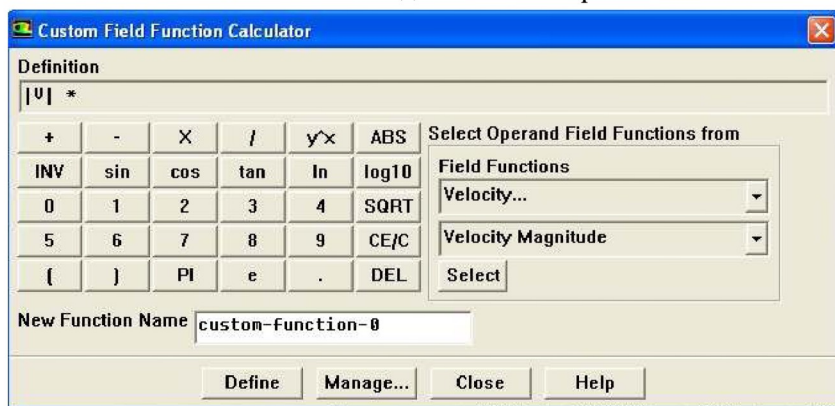


Рис. 6.22. Меню Custom Field Function

В этом меню в поле *New Function Name* вводится имя переменной.

Формула, описывающая новую переменную, задается с помощью кнопок, расположенных в меню. Клавиатура при наборе не используется. Работа с меню напоминает работу с калькулятором *Windows*. Цифры, арифметические действия, функции набираются с помощью кнопок в левой части меню. Если в формулу необходимо ввести какой-либо параметр потока, то он выбирается в окне *Select Operand Field Function from*, подобно тому, как выбирались переменные при построении полей распределения параметров (Приложение1). Запускает создание новой функции нажатие кнопки *Define*.

После этого в парных списках, в которых производится выбор переменной при построении полей, векторов, осредненных значений и т.п. в верхнем списке появится раздел *Custom Field Function*, а в нижнем списке – название новой переменной.

Для примера рассмотрим, как описать с помощью данной команды описать переменную $\rho \cdot V/2$. Для этого в поле *Select Operand Field Function from* нужно выбрать пункты *Density* $\rightarrow$ *Density* (плотность), затем нажать кнопку «*» (умножение) в меню, затем выбрать переменную *Velocity* $\rightarrow$ *Velocity Magnitude* (скорость). Далее нужно нажать в меню кнопки «/» (деление) и «2». Для сохранения набранной функции нужно нажать кнопку *Define*.

6.9. Настройка параметров графического окна

Типичный вид графического окна программы *Fluent* показан на рис. 6.23.

Как видно оно состоит из трех принципиальных частей: графического отображения результата расчета (в центральной части), заголовка (в нижней части) и легенды (слева). По умолчанию они имеют такой вид, как показано на рис. 6.23.

Настроить вид графического окна, сделать его более зрелищным, информативным и удобным в анализе можно с помощью команды *FM: Display* $\rightarrow$ *Options*. Вид меню показан на рис. 6.24.

С его помощью можно выполнить следующие настройки.

В поле *Line Width* задается толщина линий, ограничивающих расчетную область. Это позволяет сделать их заметнее.



Рис. 6.23. Типичный вид графического окна программы

Опция *Double Buffering* улучшает отображение в графическом окне. Особенно хорошие результаты дает использование этой опции при проигрывании анимации, для сглаживания смены кадров.

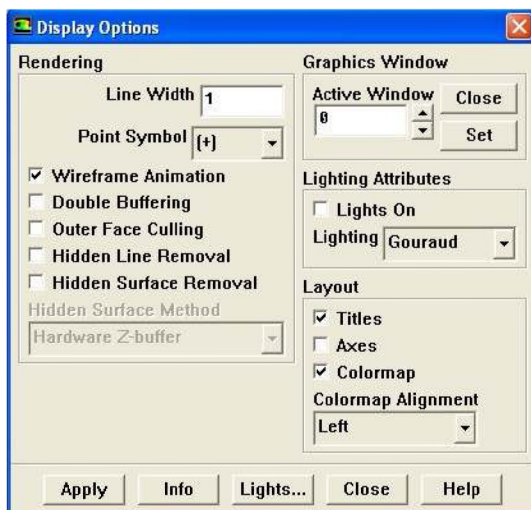


Рис. 6.24. Меню *Options*

Опции *Hidden line Removal* и *Hidden Surface Removal* позволяют скрыть невидимые линии и поверхности.

В поле *Lighting Attributes* происходит управление источником света, освещающим модель. Если опция *Lights on* активна, то источник света включен. Настройка его

положения относительно модели осуществляется в меню, доступ к которому осуществляется нажатием кнопки *Lights*.

В поле *Layout* осуществляется настройка отображения элементов рабочего окна:

- опция *Title* управляет отображением заголовка в нижней части графического

окна. Если она активна, то он отображается. В большинстве случаев заголовок не нужен и эту опцию стоит отключить;

- опция *Axis* отображает в графическом окне положение осей системы координат;
- опция *Colormap* управляет отображением легенды в графическом окне. Если опция не активна, то легенда не показывается. Ниже опции *Colormap* находится список *Colormap Alignment*, с помощью которого задается расположение легенды в окне: справа, слева, сверху, снизу.

Более детально настроить параметры легенды можно с помощью команды ГМ: *Display* → *Colormaps*. Вид ее меню показан на рис. 6.25.

В этом меню можно определить формат цифровых подписей. Для этого в поле *Type* нужно выбрать требуемый формат числа: *general* – общий, *float* – с плавающей точкой, *exponential* – экспоненциальный. В поле *Precision* выбирается необходимое число знаков после запятой.

Как видно из рис. 6.23, каждому цвету соответствует свое значение переменной. По умолчанию каждый цвет легенды соответствует определенному диапазону изменения параметра, величина которого указана рядом с разноцветной шкалой. В ряде случаев, особенно если число цветов велико, подписи на легенде накладываются друг на друга, затрудняя ее чтение. Если опцию *Show all* в меню *Colormaps* сделать не

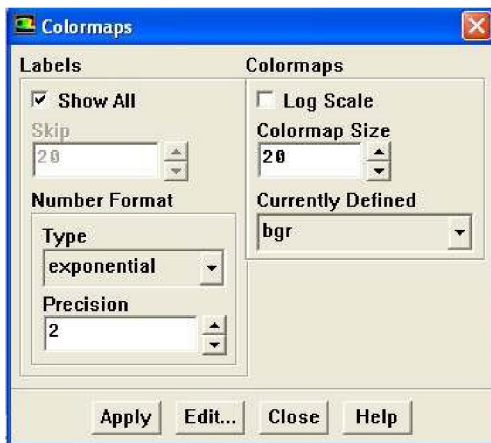


Рис. 6.25. Меню *Colormaps*

активной, то в списке *Skip* можно выбрать число пропусков подписей на легенде.

В списке *Currently Defined* выбирается цветовая гамма, в которой отображается изменение параметра. По умолчанию там установлена палитра *bgr* в которой синий цвет соответствует минимальному значению переменной, а красный - максимальному. В этом списке можно выбрать другие гаммы, например в оттенках серого, голубого или серого цвета.

7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ПОДВИЖНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

При решении инженерных задач достаточно часто встречается ситуация, когда расчетная зона включает в себя подвижные элементы. Они могут перемещаться линейно, вращаться вокруг некоторой оси или совершать сложное движение. Типичными примерами таких случаев могут служить турбомашин, всевозможные смесительные устройства и т.п.

В программе *Fluent* доступны четыре подхода к моделированию течения через подвижные элементы.

1. *Single Reference Frame* – течение через движущийся элемент рассчитывается в подвижной СК, перемещающейся со скоростью элемента. При этом все исходные уравнения записываются и решаются в относительном виде. Этот метод применим только в том случае, когда вся расчетная область движется с одной скоростью. Для моделей, содержащих одновременно подвижные и неподвижные части или несколько элементов перемещающихся с разными скоростями, он неприменим.
2. *Multiple Reference Frame* – этот подход позволяет рассчитывать течения через области имеющие несколько элементов движущихся друг относительно друга. Это достигается за счет разделения модели на зоны. Каждая из них включает в себя элементы, перемещающиеся с одинаковой скоростью. Для каждой зоны вводится своя подвижная СК. В частном случае некоторые из СК могут быть неподвижными.
3. *Mixing Plane* – основная идея данного подхода - введение поверхности на границе между зонами, движущимися друг относительно друга с различными скоростями, и осреднении на этой поверхности

значений параметров в направлении движения. Параметры, осредненные на выходе из одной зоны, используются в качестве входного ГУ в зоне, расположенной ниже по течению.

4. *Sliding Mash* – при этом подходе конечно-элементные сетки разных зон физически движутся друг относительно друга.

Первые три способа используются при решении задач в стационарной постановке, четвертый – только в нестационарной. Подход *Single Reference Frame* предназначен для случаев, когда вся расчетная область перемещается с одной скоростью. Остальные подходы используются в случаях, когда обтекаемый объект состоит из нескольких элементов, движущихся друг относительно друга с разными скоростями. При использовании второго и третьего подходов происходит осреднение потока на границах между зонами, что не позволяет моделировать эффекты взаимодействия между элементами, движущимися с разными скоростями. Корректное моделирование такого взаимодействия может осуществляться только при использовании подхода *Sliding Mash*.

7.1. Моделирование течения через подвижные элементы с помощью подхода *Single Reference Frame*

Подход *Single Reference Frame* применяется только в случае, когда вся расчетная зона движется с одинаковой скоростью. При этом она содержит одну зону потока и одну СК. Стенки, перемещающиеся со скоростью системы координат, могут иметь любую форму. Стенки неподвижные в абсолютной СК или перемещающиеся с другой скоростью относительно подвижной СК должны иметь форму поверхности вращения, если движение системы вращательное, или плоскости, если движение системы поступательное. На этих стенках не должно быть выступающих элементов. Движение стенки относительно расчетной области задается с помощью опции *Moving Wall* в ГУ *Wall*.

Типичным примером использования подхода *Single Reference Frame* является задача перемешивания нескольких веществ с помощью вращающейся крыльчатки (рис. 7.1). Расчетная область состоит из одной зоны. Движение крыльчатки учитывается решением задачи в подвижной СК, вращающейся с угловой скоростью крыльчатки. С помощью рассматриваемого подхода задача может быть решена только тогда, когда

неподвижная стенка, ограничивающая расчетную область, является поверхностью вращения (рис. 7.1, а). Если она содержит выступающие элементы как, например, на рис. 7.1, б, то подход *Single Reference Frame* неприменим. В этом случае нужно использовать другие способы решения задачи.

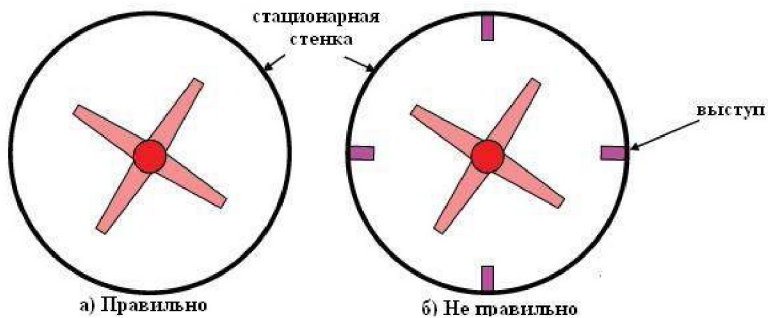


Рис. 7.1. Применение подхода *Single Reference Frame* для исследования течения в смесительном устройстве

Подход *Single Reference Frame* применим как в двухмерной, так и трехмерной постановке. При использовании этого подхода в двухмерной постановке ось вращения может совпадать с осью oz (рис. 7.2, а) или осью ox (рис. 7.2, б). В последнем случае расчетная модель является осесимметричной. При исследовании течения через вращающиеся элементы в осесимметричной постановке в меню *Define*→*Solver* в программе *Fluent* необходимо активировать опцию *Axisymmetric Swirl* (осесимметричная задача с вращением).

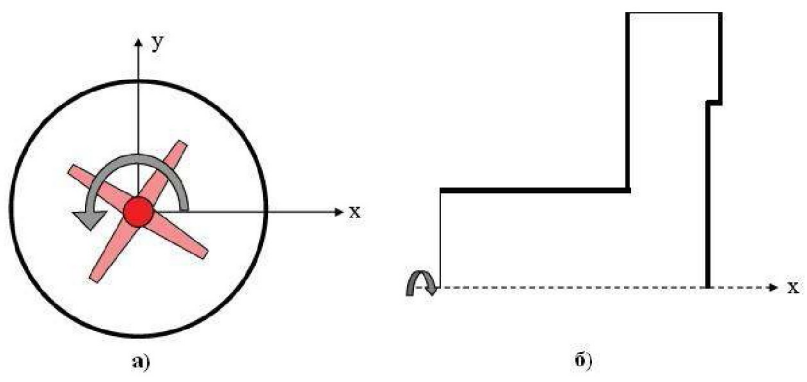


Рис. 7.2. Решение задачи с помощью подхода *Single Reference Frame* в двухмерной постановке: а) – ось вращения oz ; б) – ось вращения oz

При исследовании течения через подвижный элемент, совершающий вращательное движение, целесообразно моделировать только сектор расчетной области, а на боковых поверхностях сектора использовать ГУ периодичности (рис. 7.3). Число периодических элементов определяется геометрией подвижного элемента. Например, при исследовании течения через решетку турбомшины один периодический элемент содержит, как правило, один или несколько межлопаточных каналов.

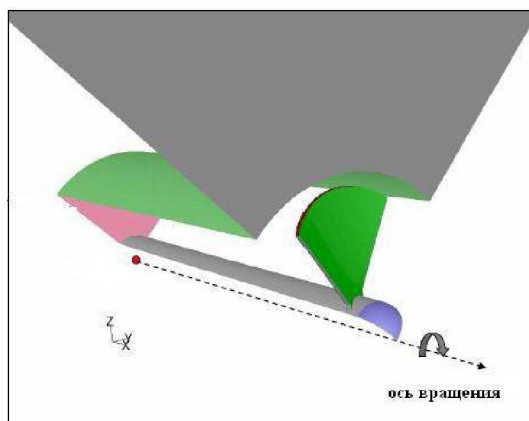


Рис. 7.3. Расчетная модель для исследования течения жидкости через корабельный винт

Для того, чтобы описать движение расчетной области с помощью подхода *Single Reference Frame* в программе *Fluent* необходимо выполнить следующие действия:

1. В меню *Boundary Condition* описывается подвижная СК. Для этого в поле *Zones* необходимо выбрать область течения (если в *Gambit* не дела-

лось никаких действий с областями течения, то она, как правило, называется *Fluid*) и нажать кнопку *Set*. В появившемся меню редактирования свойств области течения (рис. 7.4), в списке *Motion Type* следует выбрать пункт *Moving Reference Frame*. Тем самым будет определено, что данная область течения находится в подвижной СК. После этого ниже упомянутого списка появится несколько полей, в которых нужно задать параметры движения.

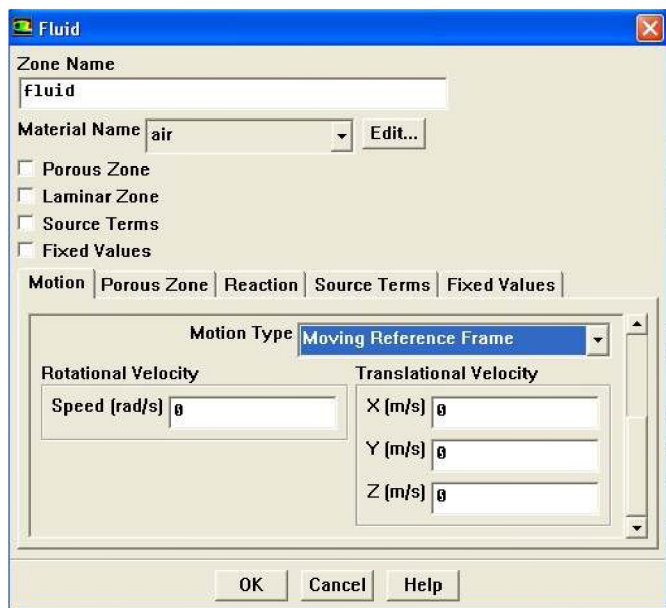


Рис. 7.4. Меню Zones

Если элемент вращается, то в поле *Rotation Speed* вводится скорость вращения. В случае линейного перемещения, в поле *Transnational Velocity* задаются проекции вектора скорости. Одновременное определение поступательного и вращательного движения позволяет задать сложное движение.

Ось вращения задается в полях *Rotation Axis Origin* (точка оси) и *Rotation Axis Direction* (направление оси) (рис. 7.5), находящихся выше списка *Motion Type*. **Внимание:** ось вращения должна быть обязательно описана при использовании угловой периодичности, не зависимо от типа движения СК.

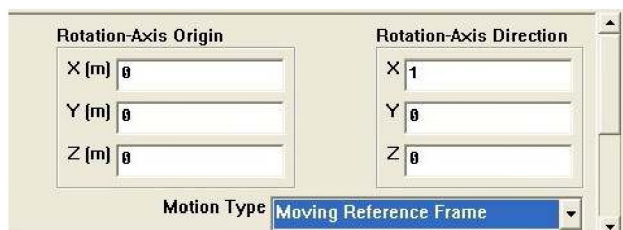


Рис. 7.5. Поле, в котором определяется положение оси вращения

2. Описывается движение стенок, ограничивающих расчетную область. Оно определяется в поле *Wall Motion* в меню задания ГУ стенки *Define* → *Boundary Condition* → *Wall* (рис. 7.6). Если при описании движения элементов в поле *Wall Motion* выбрана опция *Stationary Wall* (позиция 1 на рис. 7.6), то это значит, что стенка неподвижна относительно СК, в которой находится зона потока и к которой принадлежит стенка. Таким образом, если зона находится в подвижной СК, то стенка движется относительно абсолютной СК со скоростью подвижной.

Если стенка неподвижна в абсолютной СК или движется со скоростью отличной от скорости движения подвижной системы, то она считается подвижной. В этом случае, в ГУ *Wall* следует задать параметры движения стенки (в поле *Wall Motion* выбирается опция *Moving Wall* (рис. 7.6)). Скорость движения стенок задается подобно тому, как задавалось движение СК.

Опция *Relative to Adjacent Cell Zone* (позиция 2 на рис. 7.6) определяет то, что скорость движения стенки будет задаваться в подвижной СК.

Опция *Absolute* (позиция 2 на рис. 7.6) определяет то, что скорость движения стенки будет задаваться в абсолютной СК.

Если стенка неподвижна в абсолютной СК, то следует выбрать опцию *Absolute* (позиция 2 на рис. 7.6) и в поле *Speed* ввести скорость равную нулю.

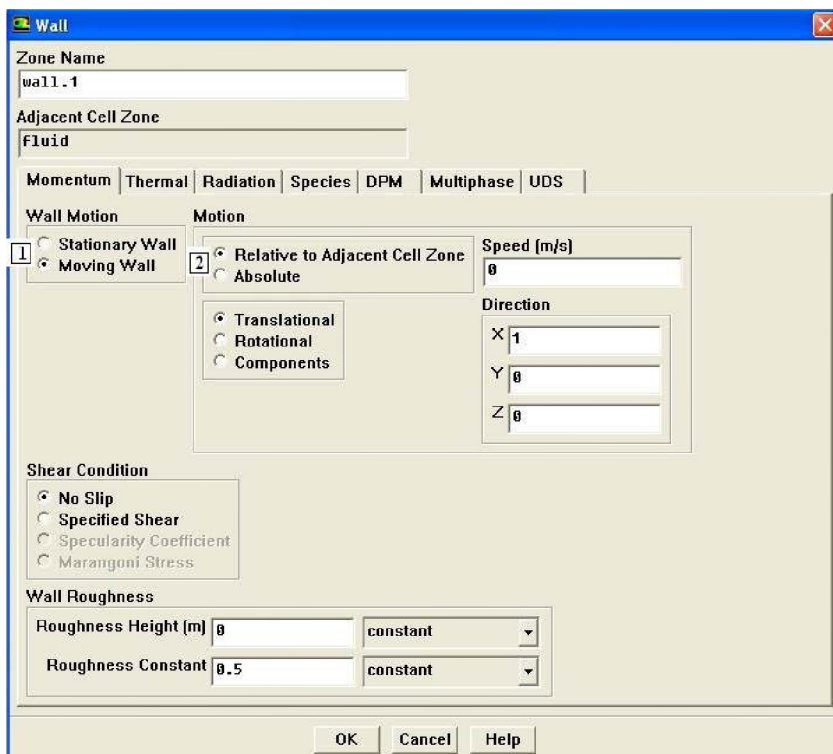


Рис. 7.6. Меню задания граничного условия стенки

3. При исследовании течения через вращающиеся элементы в ГУ «давление на выходе (*pressure outlet*)» можно активировать опцию *Radial Equilibrium Pressure Distribution*. Она позволяет рассчитать распределение давления по высоте канала с помощью уравнения радиального равновесия:

$$\frac{\partial p}{\partial \rho} = \rho \frac{V^2}{R}.$$

Учет распределения давления по уравнению радиального равновесия особенно актуален для турбомашин.

7.2. Моделирование течения через подвижные элементы с помощью подхода *Multiple Reference Frame*

Подход *Multiple Reference Frame* применяется в случае, когда расчетная область содержит элементы, перемещающиеся друг относительно друга с различными скоростями или в случае, когда в ней имеются подвижные и неподвижные элементы. В этом случае модель потока делится на области течения соответствующие подвижным и неподвижным элементам: одна или несколько областей на неподвижные зоны и по одной на каждый элемент, движущийся с определенной скоростью.

В качестве иллюстрации на рис. 7.7. представлено схематическое изображение двухступенчатой осевой турбины.

Она состоит из двух ступеней, рабочие колеса которых двигаются с различными скоростями U_1 и U_2 . В данном случае вся расчетная область потока через турбину делится на 4 области течения разделительными поверхностями, которые проходят примерно через середины осевых зазоров между элементами, движущимися друг относительно друг друга с разными скоростями. Поскольку сопловые аппараты неподвижны, то области 1 и 3 могут принадлежать одной области течения. Области 2 и 4 будут иметь свои подвижные системы координат, которые будут двигаться со скоростями U_1 и U_2 соответственно. Области течения определяются в программе *Gambit* на этапе определения граничных поверхностей.

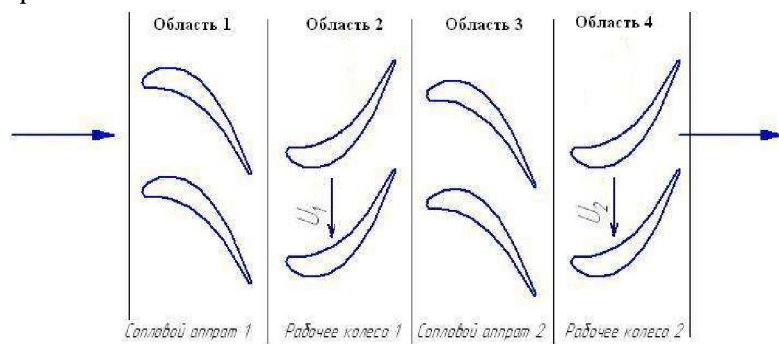


Рис. 7.7. Схема расчетной модели осевой турбины

При использовании подхода *Multiple Reference Frame* области течения разделяются ГУ типа «стенка». Причем, при чтении модели во *Fluent*, в

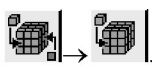
месте сопряжения двух областей создается две стенки: первая принадлежит одной, вторая - «экран» (*shadow*) – другой. «Экраны» создаются в программе *Fluent* всегда, когда стенка имеет области течения с обеих сторон. Эти границы используются генератором сеток для разделения зон течения. В дальнейшем ГУ *Wall* (стенка) преобразуются в ГУ *Interior* (внутренняя граница).

К границе между областями предъявляются те же требования, что и при подходе *Single Reference Frame* – она должна быть поверхностью вращения или плоскостью и не содержать выступающих элементов.

При использовании подхода *Multiple Reference Frame* все области течения, составляющие модель, должны иметь одинаковую периодичность. Это требование создает неудобства при решении некоторых задач. Например, необходимо провести исследование течения в ступени турбомашины, в одном венце которой 15 лопаток, в другом – 29. Очевидно, что в этом случае невозможно создать области течения, соответствующие разным венцам с одинаковой периодичностью. Эту проблему можно решить, если изменить число лопаток в венце на несколько штук. В частности, в рассматриваемом примере в одном венце можно взять 15 лопаток, а в другом вместо 29 – 30. В результате шаг второго венца незначительно изменится, что мало скажется на результатах расчета. При этом обе области потока будут иметь одинаковую периодичность и к рассматриваемой задаче можно применить подход *Multiple Reference Frame*. Часть модели, соответствующая первому венцу, будет содержать одну лопатку, а область второго венца – две. Уточнить результаты такого расчета можно с помощью поправочных коэффициентов, поскольку влияние шага на параметры турбомашины достаточно хорошо изучено.

Для того, чтобы рассчитать течение через подвижные элементы с помощью подхода *Multiple Reference Frame* необходимо выполнить следующие действия.

1. В программе *Gambit* необходимо описать области течения, соответствующие подвижным и неподвижным элементам в меню *Zones→Specify*

continuum type 

2. На границе, разделяющей области, необходимо ввести поверхность и установить на ней ГУ типа «стенка» (*Wall*).

3. В программе *Fluent* в меню *Boundary Condition* следует изменить тип ГУ у стенок, разделяющих разные области течения, с *Wall* на *Interior*. ГУ *Interior* никаких дополнительных настроек не требует.

4. Для каждой области течения задаются параметры движения и ГУ (в первую очередь на ограничивающих стенках) подобно тому, как это делалось при подходе *Single Reference Frame*.

В ряде случаев неизвестно какое название имеет конкретная область потока. Для того, чтобы установить соответствие имени конкретной сеточной области можно воспользоваться командной: `/display> zone-grid`, набираемой в командной строке. После ее запуска программа выдаст запрос `zone id/name(1) [0]`, в ответ на который необходимо ввести *ID* номер ГУ. Его можно узнать в меню *Boundary Condition*. Для этого в нем в поле *Zones* нужно выбрать интересующее имя области. *ID* номер будет высвечен в поле *ID* в нижней правой части меню. После выполнения команды ГУ или область течения появится в графическом окне.

7.3. Моделирование течения через подвижные элементы с помощью подхода *Mixing Plane*

Подход *Mixing Plane* применяется в тех же случаях, что и подход *Multiple Reference Frame*. Принципиальным отличием от него является то, что на поверхности, разделяющей разные области течения, вводится так называемая поверхность смешения (*Mixing Plane*). На ней параметры на выходе из области, расположенной выше по течению, осредняются в окружающем направлении и используются в качестве входного ГУ для области, расположенной ниже по течению. Другим отличием от подхода *Multiple Reference Frame* является то, что при использовании поверхности смешения не требуется соблюдения одинаковой периодичности в разных расчетных областях течения (рис. 7.8).

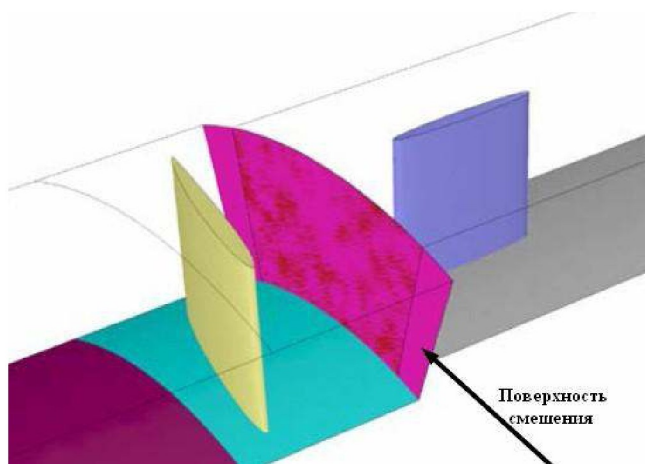


Рис. 7.8. Применение поверхности смешения при исследовании течения в вентиляторе

Поверхность смешения должна быть поверхностью вращения в случае вращательного движения одной области относительно другой, или плоскостью в случае плоскопараллельного перемещения. Поверхность смешения может быть перпендикулярной оси вращения, либо параллельна ей. Это позволяет использовать поверхность смешения для исследования течения как в осевых, так и радиальных турбомашинах (рис. 7.9).

Однако подходу *Mixing Plane* присущи и недостатки. Во-первых, при осреднении параметров потока на поверхности смешения вносится дополнительная погрешность. Во-вторых, при разной периодичности зон потока происходит нарушение баланса расходов, энергии и импульса в расчетной области, что также вносит неточность в расчет. Правда, следует отметить, что эта погрешность относительно не велика и, как правило, не превышает 1%.

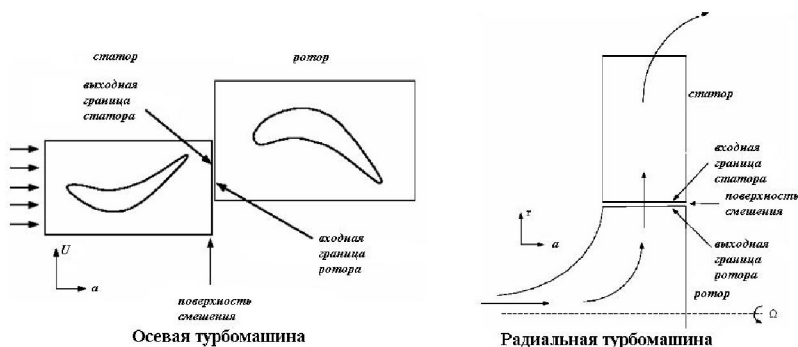
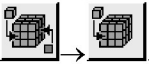


Рис. 7.9. Расположение поверхности смешения при осевых и радиальных течениях

В-третьих, при осреднении происходит «размывание» следов обтекаемых тел, что не позволяет моделировать их влияние на обтекание элементов, расположенных ниже по потоку или распространение возмущений выше по потоку. Например, это делает невозможным учет влияния закруточного следа или скачков уплотнения на работу последующего венца в турбомашинах.

Для того, чтобы исследовать течение через подвижные элементы с помощью подхода *Mixing Plane* необходимо выполнить следующие действия.

1. В программе *Gambit* необходимо описать области течения, соответствующие подвижным и неподвижным элементам в меню *Zones* → *Specify*

continuum type 

2. На входе в каждую область течения устанавливается входное ГУ (*pressure inlet* или *mass flow inlet*), а на выходе потока из нее – выходное ГУ (*pressure outlet*). Таким образом, на каждой поверхности, разделяющей области течения, будет задано по два ГУ, принадлежащие разным областям (рис. 7.10).

3. В программе *Fluent* описываются области течения, параметры их движения, настраиваются параметры движения стенок расчетных областей подобно тому, как это делалось при подходах *Single Reference Frame* и *Multiple Reference Frame*.

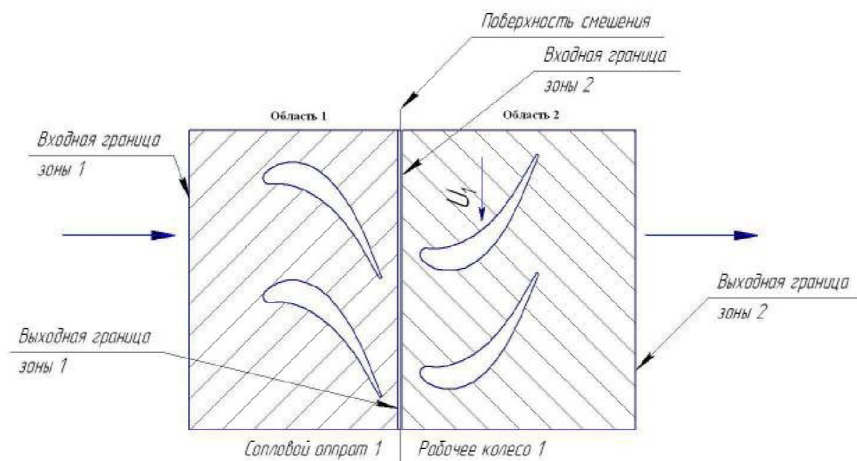


Рис. 7.10. Расположение граничных условий при определении поверхности смещения

4. Поверхность смещения описывается с помощью команды *Define* → *Mixing Plane*. Внешний вид ее меню показан на рис. 7.11.

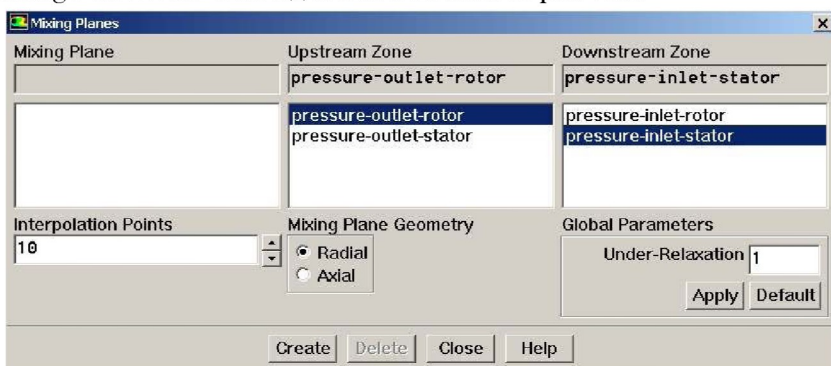


Рис. 7.11. Меню задания поверхности смещения *Define* → *Mixing Plane*

Это меню состоит из трех основных полей: в первом поле *Mixing Plane* отражается список уже созданных поверхностей смещения. В поле *Upstream Zone* приведен список всех выходных ГУ модели. Из этого списка необходимо выбрать то условие, которое является выходным для области течения, стоящей выше по потоку относительно поверхности смещения. Здесь происходит выбор границы, на которой будет

происходить осреднение в окружном направлении. В поле *Downstream Zone* находится список всех входных ГУ модели. В нем необходимо выбрать входное условие области, расположенной ниже по потоку, чем поверхность смещения. На эту границу будут передаваться осредненные параметры с поверхности, выбранной в списке *Upstream Zone*.

В рассматриваемом меню существует ряд опций.

В поле *Interpolate Points* выбирается число сечений, в которых будет происходить осреднение.

В поле *Mixing Plane Geometry* выбирается тип течения через поверхность смещения. Если течение осуществляется вдоль оси вращения, то следует выбирать опцию *Axial*, а если перпендикулярно – *Radial*.

В поле *Under – Relaxation* устанавливается параметр релаксации, который изменяется в интервале от 0 до 1.

Для создания поверхности смещения необходимо нажать кнопку *Create*.

После этого действия в меню настройки параметров входного и выходного ГУ, находящихся на поверхности смещения, поля ввода параметров потока станут неактивными. В списках рядом с ними появятся названия файлов полей параметров, из которых будут читаться значения, соответствующих параметров потока (рис. 7.12).

7.4. Моделирование течения через подвижные элементы с помощью подхода *Sliding Mash*

Как отмечалось ранее, рассмотренные выше подходы к моделированию подвижных зон имеют существенный недостаток. Вследствие осреднения потока на границе между зонами и решения задачи в стационарной постановке невозможно корректно моделировать взаимодействие подвижных и неподвижных элементов. В частности, не возможно учесть взаимодействие элементов со следами тел, находящихся выше по течению, или со скачками уплотнения.

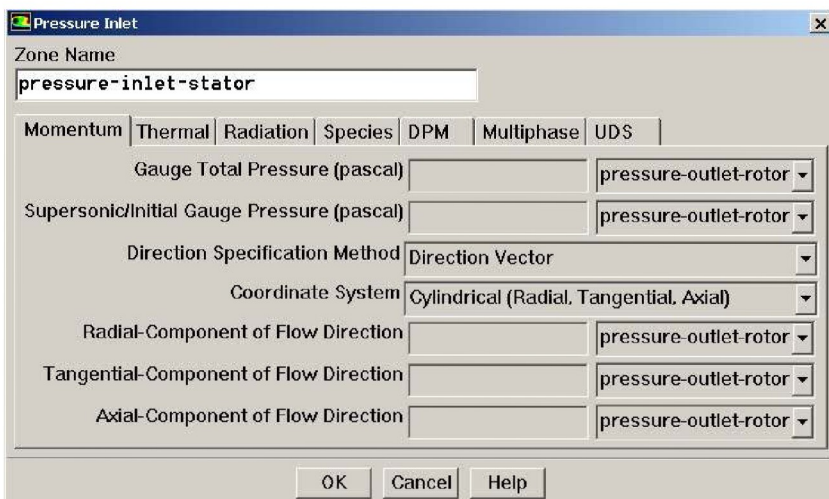


Рис. 7.12. Вид меню задания граничного условия, находящегося на поверхности смешения

Моделировать эти явления в программе *Fluent* можно с помощью подхода *Sliding Mash*. Он принципиально отличается от рассмотренных ранее тем, что при его использовании происходит перемещение сетки одной зоны относительно другой (рис. 7.13). Из-за этого задача с таким подходом может быть решена только в нестационарной постановке.

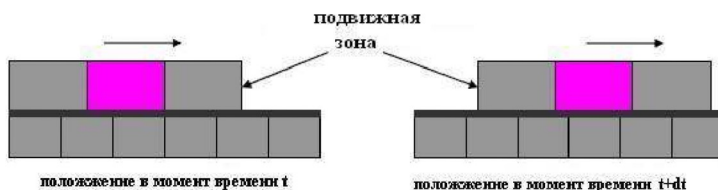


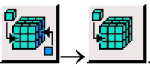
Рис. 7.13. Моделирование движения элементов расчетной зоны с помощью подхода *Sliding Mash*

Основным недостатком подхода *Sliding Mash* является, то, что для его использования требуются значительно большие ресурсы компьютера и время расчета. Кроме того, в случае использования периодических ГУ для корректного решения, как и в подходе *Multiple Reference Frame*, требуется, чтобы периоды разных областей потока совпадали. Поверхность, разде-

ляющая две области должна быть плоскостью или поверхностью вращения.

Для того, чтобы исследовать течение через подвижные элементы с помощью подхода *Sliding Mesh* необходимо выполнить следующие действия.

1. В программе *Gambit* необходимо описать области течения, соответствующие подвижным и неподвижным элементам в меню *Zones*→*Specify*

continuum type 

2. В *Gambit*, как и при подходе *Mixing Plane* на входе и выходе из каждой расчетной области описываются входные и выходные ГУ. В программе *Fluent* на поверхностях, находящихся на границе двух областей течения, необходимо изменить тип ГУ на *Interface* (проницаемая граница). Для этого нужно вызвать команду *Define*→*Boundary Condition*. В ее меню в левом окне следует выбрать нужное ГУ, а в правом - поменять его тип на *Interface* (рис. 7.14). После этого появится запрос на подтверждение выполнения команды. ГУ *Interface* дополнительных настроек не требует.

3. В программе *Fluent* описываются области течения, параметры их движения, настраиваются параметры движения стенок расчетной области подобно тому, как это делалось при использовании других подходов.

Единственное отличие заключается в том, что в появившемся меню редактирования свойств области течения (рис. 7.4) в списке *Motion Type* вместо *Moving Reference Frame* выбирается пункт *Moving Mash* (подвижная сетка).

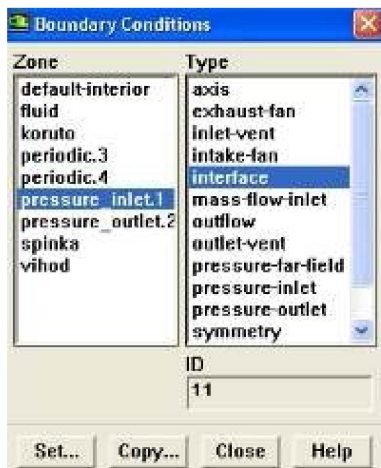


Рис. 7.14. Изменение типа граничного условия на *Interface*

4. Для каждой границы между областями течения создается поверхность пересечения с помощью команды *Define*→*Grid Interface*. Ее меню показано на рис. 7.15. В нем, как и в рассмотренном выше меню задания поверхности смещения *Define* → *Mixing Plane*, имеется три

основных поля. В левом поле *Grid Interface* вводится имя поверхности смещения. Ниже этого поля находится список уже имеющихся разделительных поверхностей. В центральном и правом поле (*Interface Zone 1* и *2*) находятся одинаковые списки ГУ типа *Interface*. В этих списках нужно выбрать границы, примыкающие к поверхности раздела двух подвижных областей течения: в центральном принадлежащий области расположенной выше по течению, а в правом – ниже по течению рабочего тела.

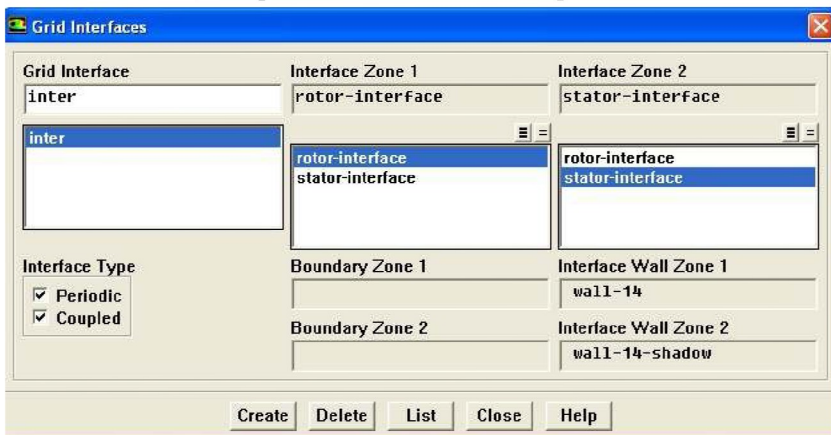


Рис. 7.15. Меню *Define*→*Grid Interface*

В этом меню доступны ряд опций.

Опцию *Periodic* следует активировать, если решаемая задача периодическая.

Активация опции *Couple* приведет к тому, что на поверхности сопряжения двух областей будет учитываться теплоперенос.

Для принятия сделанных настроек необходимо нажать кнопку *Create*, после чего в левом списке появится имя созданной поверхности пересечения.

4. В меню *Define* → *Models* → *Solver* задается, что решение задачи будет в нестационарной постановке (*Unsteady*).

5. Величина шага по времени может быть найдена по соотношению:

$$\Delta t = \frac{\Delta S}{\omega R}, \text{ где}$$

ΔS - средний размер ячейки, мм;

ω - угловая скорость, рад/сек;

R – радиус, мм.

При этом за один шаг по времени сетка одной области течения сместится относительно другой на одну ячейку.

6. Перед решением задачи можно просмотреть, как будет двигаться одна область течения относительно другой. Перед выполнением этой операции следует сохранить расчетную модель. Визуализация движения областей друг относительно друга происходит с помощью команды *Solver*→*Mesh Motion*. Ее меню показано на рис. 7.16.

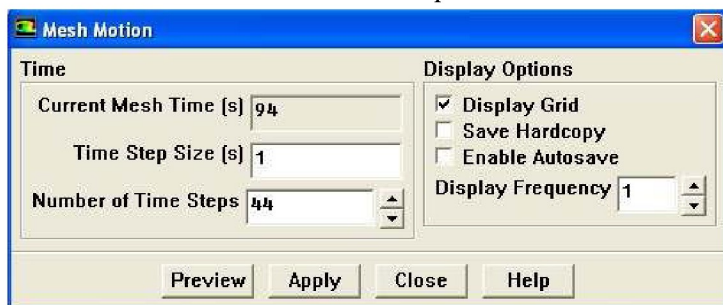


Рис. 7.16. Меню *Solver*→*Mesh Motion*

В этом меню в поле *Time Step* задается шаг по времени, а в поле *Numbers of Time Steps* задается интересующее пользователя число шагов по времени. После этого нажимается кнопка *Preview*.

После работы с этой командой следует вновь загрузить расчетную модель, сохраненную ранее, для того, чтобы вернуть сетку в исходное положение.

7. Запускается расчет. Решение можно считать законченным, когда невязки по итерациям будут меняться периодически, например, так, как изображено на рис 7.17.

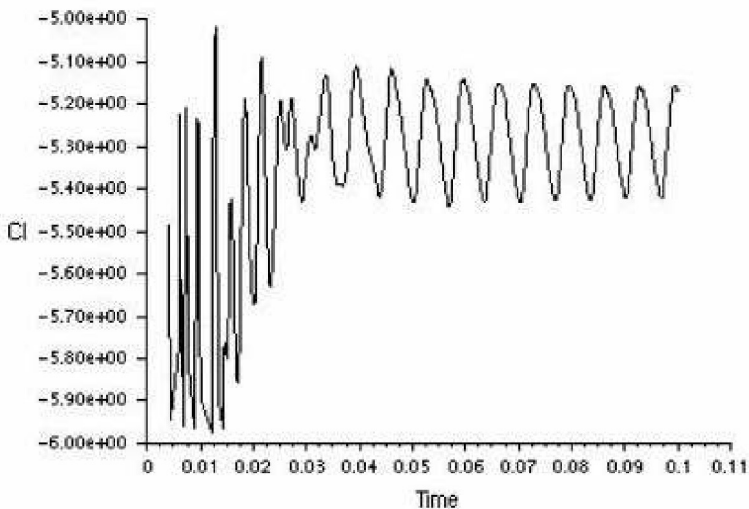


Рис. 7.17. Изменение невязок по итерациям при установившемся решении в нестационарной постановке

7.5. Стратегия получения решения при моделировании течения через подвижные элементы

При решении задач с подвижными элементами независимо от подхода, используемого при моделировании, не всегда удастся запустить процесс решения. Во многом это связано с тем, что на него в начальной стадии сильно влияет начальное поле распределения параметров, задаваемое в процессе инициализации. Чем сложнее задача, тем сложнее решателю найти нужное распределение параметров, отталкиваясь от начального приближенного поля. Чем сложнее задача, тем ближе должно быть начальное поле к реальному. Очевидно, что задать такое поле на начальном этапе довольно трудно, поскольку зачастую оно неизвестно. Для того, чтобы преодолеть эти проблемы применяются несколько подходов. Наиболее часто поступают следующим образом.

1. Исследование течения через расчетную модель, содержащую подвижные элементы, на первом этапе проводится без учета движения. Расчет начинается с неподвижными элементами. Затем, после получения устойчивого решения, подключается движение областей потока и стенок.

2. Расчет начинается с первым порядком точности дискретизации, затем, после получения устойчивого решения, порядок точности меняется на более высокий.

3. При расчете течения через турбомашину, расчет начинается с менее нагруженных режимов вблизи расчетной точки или при пониженном перепаде давления. Затем, после получения устойчивого решения, перепад давления постепенно изменяется в несколько приемов до требуемого значения. После каждого изменения ГУ необходимо дождаться получения устойчивого решения, затем менять требуемые режимные факторы.

4. При расчете с использованием *Pressure Based* решателя, в качестве метода дискретизации по давлению следует выбирать схему *PRESTO*.

8. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ В ПРОГРАММЕ *FLUENT*

В данном примере рассматривается течение вязкого, сжимаемого, однофазного потока в лопаточном венце осевой турбины. Процесс создания расчетной модели, нанесения сетки на нее и предварительное назначение граничных условий были подробно описаны в работе [2] (разделы 2.9.2, 3.6.2, 4). Внешний вид модели показан на рис. 8.1.

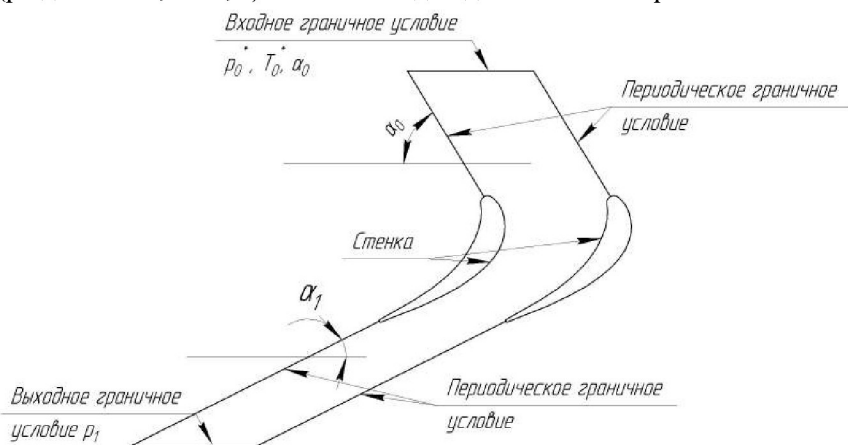


Рис. 8.1 Схема расчетной модели для исследования течения газа в элементарном венце турбины

На расчетном режиме поток в рассматриваемом элементарном ЛВ имеет следующие параметры:

- угол входа потока $\alpha_{0p}=59,1^\circ$,
- угол выхода потока $\alpha_{1p}=27,1^\circ$,
- приведенная изэнтропическая скорость на выходе из решетки на расчетном режиме $\lambda_{c1sp}=0,77$.

В расчете моделируется продувка элементарного ЛВ на экспериментальном стенде. При этом полагается, что на входе в решетку подается воздух с давлением, величина которого определяется требуемой приведенной изэнтропической скоростью λ_{1s} . Отвод воздуха осуществляется в атмосферу.

Таким образом, основываясь на сказанном выше, в расчете можно принять, что рабочее тело в канале – воздух. Давление на выходе из решетки и температура на входе равны атмосферным ($p_1=101325\text{Па}$, $T_0^*=288\text{К}$).

Параметры рабочего тела считаются подчиняющимися закону идеального газа. Задача будет решаться в стационарной постановке. Используемая модель турбулентности - *RNG k-ε*.

Расчетная модель имеет следующие граничные условия (рис. 8.1):

- на входной границе - полные давление и температура потока, направляющие косинусы вектора скорости и граничные условия турбулентности;
- на выходной границе – статическое давление;
- на боковых поверхностях - периодическое граничное условие;
- на стенках лопатки - условие непроницаемости рабочей среды.

Давление на входе в решетку турбины p_0^* принимается в зависимости от требуемой приведенной скорости λ_{1s} . Зная величину λ_{1s} , можно найти

ГДФ $\pi(\lambda_{1s}) = \frac{p_1}{p_0^*}$. Тогда полное давление на входе в элементарный венец

будет равно:

$$p_0^* = p_1 / \pi(\lambda_{1s}).$$

Шаг. 1. Запуск программы *Fluent*.

Запуск программы осуществляется нажатием на соответствующий ярлык на рабочем столе или из меню «Пуск» ОС «*Windows*»:

Пуск → Все программы → *Fluent Inc Products* → *Fluent 6.3.23* → *Fluent 6.3.23*.

Перед открытием рабочего окна программы появится меню (рис. 1.1), предлагающее выбрать тип решаемой задачи из четырех предложенных вариантов:

2d – двухмерная;

2ddp – двухмерная с двойной точностью;

3d – трехмерная;

3ddp – трехмерная с двойной точностью.

В рассматриваемом случае задача является двухмерной. После выбора нужно нажать кнопку *Run*. Это действие вызовет появление рабочего окна программы *Fluent* (рис. 1.2).

Шаг. 2. Чтение расчетной модели, созданной в программе Gambit.

Чтобы прочитать созданную расчетную модель, необходимо в главном меню выбрать:

ГМ: File → Read → Case.

В появившемся стандартном окне проводника ОС «Windows» нужно найти место, где был сохранен файл обмена, выбрать его и подтвердить выбор кнопкой *OK*.

При чтении файла в окне сообщений *Fluent* появятся полные сведения о модели, содержащейся в читаемом файле: размеры, количество, и тип конечных элементов и т.п.

Шаг. 3. Проверка конечно-элементной сетки на наличие ошибок.

Проверка расчетной сетки на наличие ошибок осуществляется с помощью команды:

ГМ: Grid → Check.

После ее запуска программа проверит конечно-элементную сетку, а в окне сообщения появятся полные сведения о конечно-элементной сетке. Если будет найдена ошибка, то будет выдано соответствующее сообщение. В этом случае необходимо вернуться в программу *Gambit*, найти ошибку и исправить ее.

Шаг. 4. Масштабирование конечно-элементной сетки.

Размеры расчетных моделей в программе *Fluent* должны быть обязательно заданы в метрах. Построение же моделей удобнее проводить в миллиметрах. Так, рассматриваемая модель межлопаточного канала была создана в миллиметрах. Поэтому построенную сетку нужно уменьшить в 1000 раз. Для этого в программе есть удобная команда масштабирования *Scale Grid* (рис. 2.3). Она вызывается из главного меню командой:

ГМ: Grid → Scale.

В поле *Domain Extents* меню приведены максимальные координаты модели. Поскольку она создана в миллиметрах, то до масштабирования эти цифры запредельны (47,77 м).

В меню *Scale Grid* в поле *Grid was created in* (сетка была создана в ..) нужно выбрать миллиметры *mm* (или другую единицу измерения, в которой была создана расчетная модель), а

затем нажать кнопку *Scale*. Модель будет автоматически смасштабирована. Следует обратить внимание на то, что в поле *Domain Extents* размеры модели примут правильные значения. Отменить масштабирование в случае ошибки можно с помощью кнопки *Unscale*.

После завершения операции меню необходимо закрыть с помощью кнопки *Close*.

Шаг. 5. Просмотр конечно-элементной сетки.

Просмотреть конечно-элементную сетку загруженной модели можно с помощью команды:

ГМ: Display → Grid.

В появившемся меню *Grid Display* (рис. 8.2) в окне *Surfaces* требуется выбрать все граничные поверхности, которые пользователь хочет просмотреть. Следует обратить внимание на то, что имена в списке совпадают с именами граничных условий, заданных в *Gambit*. Для просмотра выбранных элементов сетки нужно нажать кнопку *Display*.

В результате выполнения команды появится графическое окно, в котором будет изображена расчетная сетка или выбранные элементы модели (рис.8.3).

Для того, чтобы изучить конечно-элементную сетку внимательнее, нужно использовать мышь. Движение мыши с нажатой левой кнопкой вызывает сдвиг модели. Движение мыши с нажатой средней кнопкой

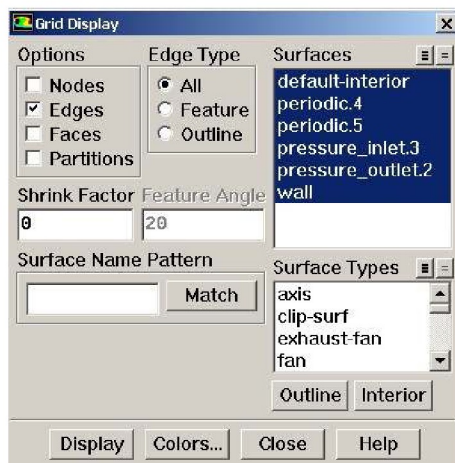


Рис. 8.2. Меню *Grid Display*

вызывает появление рамки, с помощью которой можно приблизить (если рамку вытягивать слева направо) выделенный фрагмент модели или, наоборот, отдалить (если рамку вытягивать справа налево).

Если в окне *Surfaces* снять выделение с пункта *default – interior*, то в окне можно будет увидеть только контур модели, без расчетной сетки.

Шаг 6. Задание опций решателя.

В качестве первого действия при описании расчетной модели следует выбрать решатель, с помощью которого будет проводиться решение, а также определить стационарность или нестационарность задачи. Этот выбор осуществляется с помощью команды *Solver*:

ГМ: Define → Models → Solver.

В меню *Solver* (рис.2.7) нужно обратить внимание на следующие пункты:

- для решения рассматриваемой задачи целесообразно выбрать *Pressure Based*;
- в поле *Space* выбирается двухмерная задача *2d*;
- в поле *Time* - стационарная задача *Steady*.

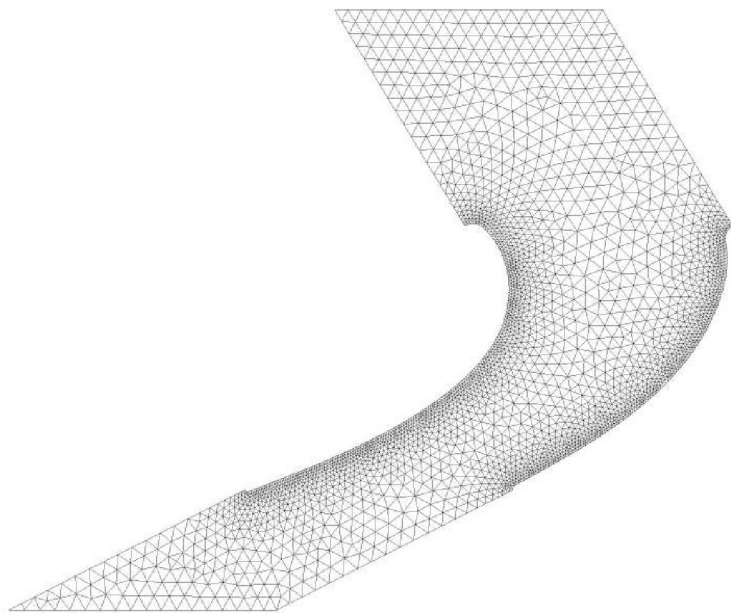


Рис. 8.3. Результат отображения расчетной сетки

Шаг 7. Учет в расчете уравнения энергии.

При решении задач газодинамики в элементах двигателя нужно обязательно учитывать изменение температуры потока и тепловые явления (теплообмен и теплопередачу). Для этого необходимо подключить к решению уравнение энергии с помощью команды:

ГМ: *Define* → *Models* → *Energy*.

В появившемся окне нужно поставить галочку в строке *Energy Equation* и нажать *OK*.

Шаг. 8. Определение модели турбулентности.

Поток газа в ПЧ турбомашин характеризуется наличием *турбулентности* – беспорядочного движения вихревых масс. При этом на основное направление скорости накладываются поперечные составляющие, вызывающие сильное перемешивание жидкости/газа.

Для задания модели турбулентности необходимо выбрать команду:

ГМ: *Define* → *Models* → *Viscous*.

В появившемся списке моделей турбулентности нужно выбрать модель турбулентности *k-ε* (*k-epsilon*). В появившемся меню отмечается модель *RNG* и ставится галочка в графе *Viscous Heating*, что позволит учитывать тепло, выделяющееся от вязкого трения слоев газа.

Шаг. 9. Задание свойств рабочего тела.

Задание свойств рабочего тела осуществляется в меню *Materials* (рис. 2.9), которое вызывается командой:

ГМ: *Define* → *Materials*.

В рассматриваемой задаче в качестве рабочего тела используется воздух. Он установлен в программе *Fluent* по умолчанию. При решении задач течения газов в решетках турбомашин и каналах двигателя обязательно нужно учитывать сжимаемость рабочего тела. Поэтому следует задать зависимость плотности газа от параметров потока. Чаще всего для этого пользуются уравнением состояния идеального газа (Менделеева – Клайперона).

Для того, чтобы осуществить эту установку, в меню *Materials* в списке *Density* нужно выбрать пункт *Ideal-gas*.

Зависимость вязкости от температуры задается в виде уравнения Сатерленда (см. п. 2.8). Чтобы это описать в программе, в меню *Materials* в списке *Viscosity* нужно выбрать пункт *Sutherland*.

Для сохранения изменения свойств рабочего тела необходимо нажать кнопку *Change/Create*. После завершения операции меню необходимо закрыть с помощью кнопки *Close*.

Шаг. 10. Задание справочного давления.

Особенность программы *Fluent* состоит в том, что давление, получаемое и задаваемое в расчете, является избыточным. То есть для того, чтобы получить истинное значение давления необходимо прибавить к нему так называемое «справочное давление». По умолчанию в его качестве используется атмосферное давление в САУ – 101325 Па . Если в качестве «справочного давления» принять 0, то результаты расчета и исходные данные будут задаваться в абсолютных значениях. Изменить значение «справочного давления» можно в меню, которое появится в результате выполнения команды:

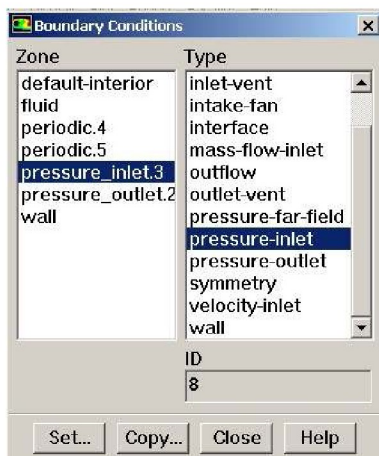
GM: Define → Operating Condition.

Для упрощения обработки результатов в решаемой задаче целесообразно принять «справочное давление» равным нулю, и ввести его значение в поле *Operating pressure*.

Шаг. 11. Задание граничных условий.

Меню задания граничных условий (рис. 8.4) вызывается командой:

GM: Define → Boundary Condition.



В поле *Zone* находится список всех граничных условий, определенных в *Gambit*. Если выбрать имя одного из них, например *pressure_inlet.3*, то в окне *Type* будет указан тип граничного условия. В случае необходимости в этом окне тип граничных условий можно поменять.

Чтобы приступить к заданию граничных условий, необходимо в окне *Zone* выбрать нужное

Рис. 8.4. Меню *Boundary Condition*

граничное условие, убедиться, что в окне *Type* тип граничного условия указан верно, и нажать *Set*.

Как отмечалось выше, в рассматриваемой задаче будут заданы следующие условия:

- на выходной границе задается статическое давление p_1 , равное атмосферному $p_1 = 101325 \text{ Па}$;
- на входной границе задается полное давление p_0^* и температура T_0^* потока, а также направляющие косинусы вектора скорости, определяемые в зависимости от требуемой величины приведенной скорости λ_{1s} и угла входа потока α_0 . Для примера расчета выбирается точка со значениями $\lambda_{1s} = 0,9$ и $\alpha_0 = \alpha_{op} = 59,1^\circ$. Для данного значения приведенной скорости λ_{1s} полное давление на входе в решетку равно $p_0^* = 168341,9 \text{ Па}$. Температура входного воздуха принимается равной атмосферной $T_0^* = 288 \text{ К}$;
- на боковых границах задается условие периодичности.

Меню задания граничного условия «полное давление на входе» (*pressure-inlet*) показано на рис. 8.5.

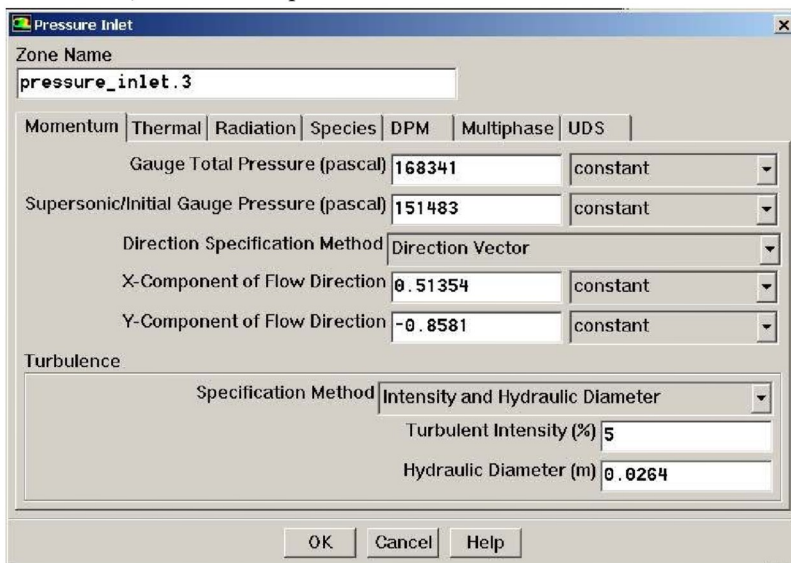


Рис. 8.5. Меню *Pressure inlet*

Входное граничное условие задается в следующей последовательности.

В поле *Gauge Total Pressure* вводится значение полного давления на входе в расчетную область. Необходимо помнить, что в программе *Fluent* давление задается избыточным относительно заданного в шаге 10. Если справочное давление равно нулю, как в рассматриваемом примере, то вводится абсолютное значение давления. Если справочное давление отличается от нулевого, то вводится значение $p_{0изб}^* = p_0^* - p_{cm}^*$ где

$p_{0изб}^*$ - значение давления, которое необходимо задать в поле *Gauge Total Pressure*;

p_0^* - абсолютное значение давления;

p_{cm} - справочное давление.

В рассматриваемой задаче нужно задать $p_{0изб}^* = p_0^* = 168341,9 \text{ Па}$.

В поле *Supersonic Gauge Pressure* задается статическое давление потока для случая сверхзвукового течения на входе. Скорость потока на входе в турбину, как правило, дозвуковая. Поэтому в данном поле можно поставить нулевое значение. Однако для стабильности решения в этом поле целесообразно вводить значение, близкое к статическому давлению. Для случая течения газа в решетке турбины приведенная скорость на входе в решетку приблизительно равна $\lambda_0 = 0,4$. В результате статическое давление на входе в венец можно найти по формуле

$$p_0 = p_0^* \cdot \pi(\lambda_0) = 0,9 p_0^*.$$

При $\lambda_{1s} = 0,4$ $p_0 = 151483,05 \text{ Па}$.

В поле *Direction Specification Method* определяется направление вектора скорости на входной границе. Чтобы указать направление вектора по направляющим косинусам, в списке нужно выбрать пункт *Direction Vector* (направляющий вектор). В появившихся полях *X-Component* и *Y-Component* задаются косинус и синус угла входа потока α_0 соответственно. При определении знака косинуса необходимо учитывать направление потока. Если направление проекции скорости потока совпадает с направлением координатной оси, то направляющий косинус положителен. В противном случае – отрицателен. В рассматриваемом примере проекция скорости потока на ось *OY* противоположна направлению оси *OY*, поэтому знак у *Y-Component* будет отрицательным.

Для рассматриваемой задачи:

$X\text{-Component}=\cos 59,1^\circ=0,5135,$

$Y\text{-Component}=-\sin 59,1^\circ=-0,858.$

В случае, когда входящий поток направлен нормально к входной границе, в поле *Direction Specification Method* выбирается пункт *Normal to Boundary* (перпендикулярно границе).

Для решения задачи течения газа с помощью двухпараметрической модели турбулентности типа $k-\varepsilon$ или $k-\omega$ необходимо определить дополнительные граничные условия. Тип граничных условий для турбулентности задается в поле *Speciation Method*.

Наиболее простым типом граничных условий турбулентности является задание масштаба турбулентности и гидравлического диаметра – *Intensity and Hydraulic Diameter*. В этом случае в поле *Turbulent Intensity* задается интенсивность турбулентности из диапазона 1... ..10%. В поле *Hydraulic Diameter* вводится гидравлический диаметр. Он находится по формуле

$$d_z = \frac{4F}{\Pi},$$

где Π – периметр сечения;

F – его площадь.

Для случая двухмерного течения в решетке турбомшины гидравлический диаметр равен шагу решетки. В рассматриваемом примере $t=26,37\text{мм}$.

Для задания полной температуры потока на входе нужно в верхней части меню нажать на закладку *Thermal*, а в ставшем доступном поле *Total Temperature* ввести значение температуры. Для рассматриваемого примера $T_0^*=288\text{K}$.

Для задания граничного условия на выходной границе в меню *Boundary Condition* нужно выбрать имя данной границы и нажать кнопку *Set*. Это вызовет появление меню *Pressure Outlet* (рис. 8.6).

Для задания выходного граничного условия в этом меню необходимо в поле *Gauge Pressure* установить статическое давление на выходе из расчетной области (в случае, если справочное давление не равно нулю, то задается избыточное давление). В рассматриваемом примере

$p_1=101325\text{Па}$. Это единственное необходимое выходное граничное условие на выходе из модели.

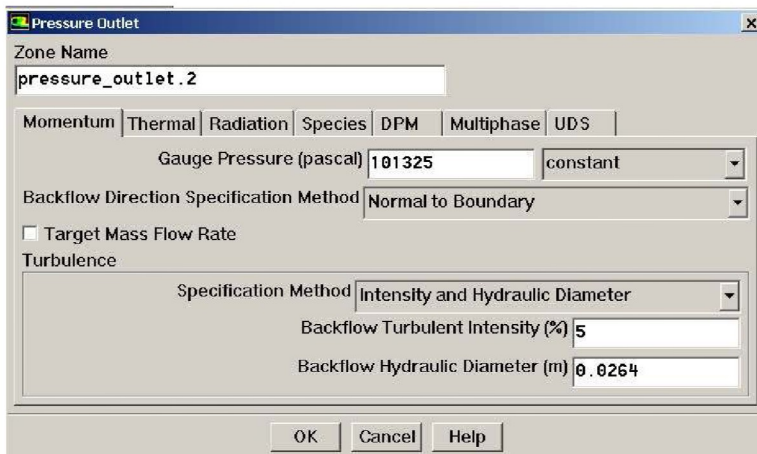


Рис. 8.6. Меню *Pressure Outlet*

При решении задач течения газов в каналах достаточно часто наблюдается затекание потока через выходную границу вследствие, например, вихревых течений. Параметры втекающего воздуха (направление потока, его температуры и параметры турбулентности) необходимо определить. Это делается в меню *Pressure Outlet* аналогично тому, как задаются соответствующие параметры на входной границе.

При решении задачи в двумерной постановке периодическое граничное условие задается корректно с помощью установок по умолчанию и в дополнительных настройках не нуждается.

Кроме перечисленных выше граничных условий в решаемой задаче присутствует граничное условие стенки (*wall*). По умолчанию в программе *Fluent* стенка считается адиабатной, что и требуется в решаемой задаче. Поэтому граничное условие *Wall* настраивать также не нужно.

На этом процесс задания граничных условий закончен и необходимо закрыть окно *Boundary Condition*.

Шаг 12. Установка параметров счета.

Доступ к меню установки параметров счета осуществляется с помощью команды:

ГМ: Solve → Controls → Solution.

В результате появится меню *Solution Controls* (рис. 8.7).

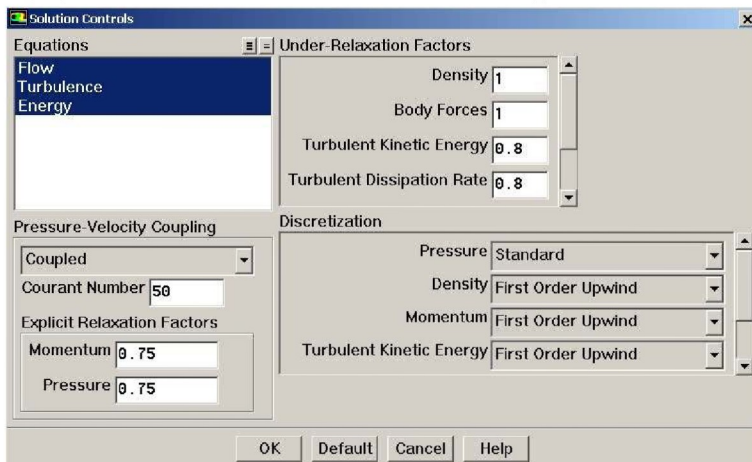


Рис. 8.7. Меню *Solution Controls*

В этом меню в зоне *Pressure-Velocity Coupling* выбирается алгоритм решения связки уравнения движения и неразрывности для корректного определения полей давления и скорости. Для решения задач течения в решетках турбомашин целесообразно выбирать алгоритм *Coupled* (он сходен с алгоритмом расщепления), а для улучшения устойчивости и сходимости число Куранта (*Courant number*) уменьшить до 50. Остальные настройки остаются без изменения.

Шаг 13. Установка начальных значений параметров.

При решении задач газовой динамики численными методами перед запуском решения необходимо установить начальные значения параметров в расчетной области. Правильный выбор этих параметров может существенно улучшить устойчивость и сходимость, что ускорит получение решения. Меню установки начальных условий (рис. 8.8) вызывается командой:

ГМ: Solve → Initialize → Initialize.

В этом меню в поле *Compute From* необходимо выбрать входную границу. В результате рекомендуемые значения начальных параметров будут рассчитаны по входным граничным условиям.

Для их принятия следует нажать *Init*.

Шаг 14. Настройка отображения процесса решения.

Для того, чтобы отображать невязки в процессе расчета, а также задать критерий остановки решения, необходимо вызвать меню *Residual Monitors* (рис. 5.3) с помощью команды:

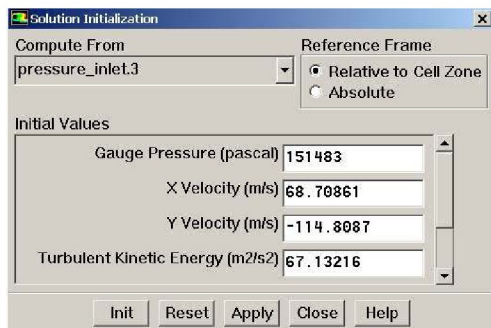


Рис. 8.8. Меню установки начальных значений параметров

ГМ: Solve → Monitors → Residual.

В поле *Option* необходимо поставить галочки напротив слов *Plot* и *Print*. Это приведет к тому, что невязки по всем уравнениям будут печататься в окне сообщения (*Print*) и отображаться в виде графиков в графическом окне (*Plot*).

В полях *Residual* друг над другом перечислены все решаемые уравнения, а напротив каждого из них в столбце *Convergence Criterion* установлены предельные невязки. Задача считается решенной, когда невязки по всем уравнениям окажутся меньше заданных значений. В этом случае процесс вычисления будет автоматически остановлен. Считается, что для получения точного решения достаточно достижения невязок 10^{-3} по всем уравнениям (кроме 10^{-7} по уравнению энергии).

Изменение разности расходов между входной и выходной границей в процессе решения можно визуализировать. Для этого нужно вызвать команду:

ГМ: Solve → Monitors → Surface.

Появится меню, изображенное на рис. 5.4.

В этом меню в поле *Surface Monitors* необходимо набрать цифру 1. Чтобы изменение выбранного параметра в процессе решения отображалось в виде графика в отдельном окне, необходимо поставить галочку в столбце *plot*. Чтобы в окне сообщения прописывалось значение параметра в каждой итерации, нужно поставить галочку в столбце *print*.

Для того, чтобы выбрать отображаемый параметр, необходимо нажать кнопку *Define*. Это вызовет появление меню, изображенного на рис. 8.9.

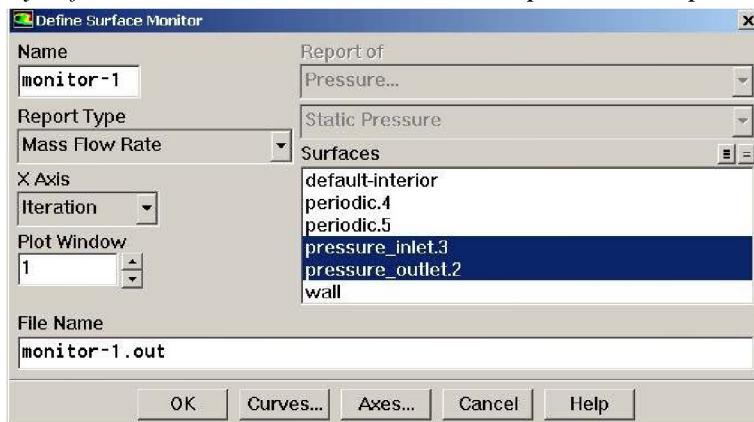


Рис. 8.9. Меню *Define Surface Monitor*

В этом меню в поле *Report Type* выбирается пункт *Mass Flow Rate* (массовый расход), а в списке *Surfaces* выбираются входная и выходная границы. С помощью этого меню также можно визуализировать в отдельном окне изменение любого параметра в процессе решения.

Шаг 15. Сохранение расчетной модели.

Для сохранения расчетной модели и всех сделанных настроек решателя необходимо вызвать команду:

ГМ: File → Write → Case.

В появившемся окне проводника необходимо выбрать место, где будет сохранена модель и ее имя. После нажатия кнопки *OK* в указанном месте появится файл модели с расширением **.cas*.

Шаг 16. Запуск решения.

Для запуска решения нужно выбрать команду:

ГМ: Solve → Iterate.

Появится окно, показанное на рис. 5.7.

Для запуска решения в поле *Number of Iteration* нужно ввести число итераций (например, 500) и нажать кнопку *Iterate*. Число итераций можно назначить произвольно. Оно, как правило, исчисляется сотнями.

Если условие сходимости будет достигнуто, то процесс счета остановится сам. Если заданного числа итераций будет недостаточно для получения решения, то процесс решения можно продолжить.

Решение может быть остановлено в любой момент нажатием на кнопку *Cancel* и вновь запущено с места остановки нажатием кнопки *Iterate* в меню запуска решения. В ходе паузы могут быть просмотрены предварительные результаты решения, внесены изменения в граничные условия или настройки решателя.

После запуска решения в графическом окне появится зависимость невязок от номера итерации для каждого уравнения (рис.8.10), а также окно, показывающее изменение разности расходов (рис 8.11).

Как видно из рис. 8.10, для тестовой задачи примерно на сотой итерации значения невязок по каждому из уравнений достигли заданных величин. В этом случае программа *Fluent* остановит решение и в окне сообщений выдаст сообщение *solution is converged*. Как видно из рис. 8.11, разница расходов между входом и выходом стремится к нулю. Таким образом есть можно считать, что решение получено.

Шаг 17. Увеличение порядка дискретизации.

Достигнутое решение было получено при первом порядке точности дискретизации. Для того, чтобы получить более точные с физической точки зрения решения, необходимо порядок дискретизации увеличить до второго. Для этого нужно вновь вызвать меню *Solution Controls* (рис. 8.12):

ГМ: Solve → Controls → Solution.

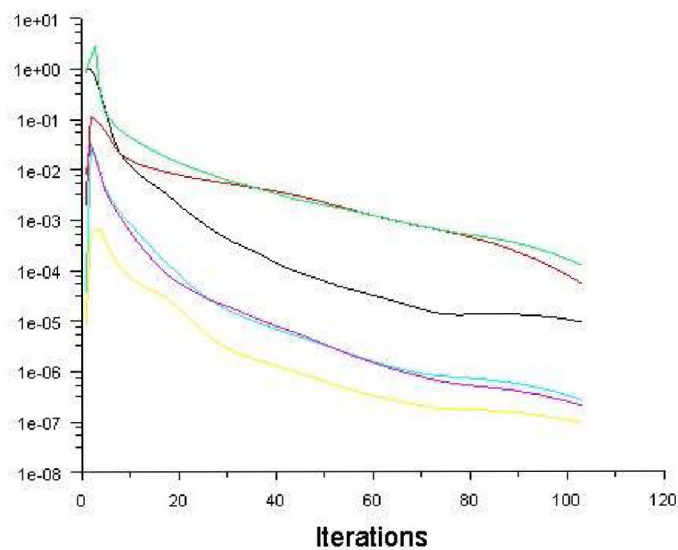


Рис. 8.10. Изменение невязок по итерациям

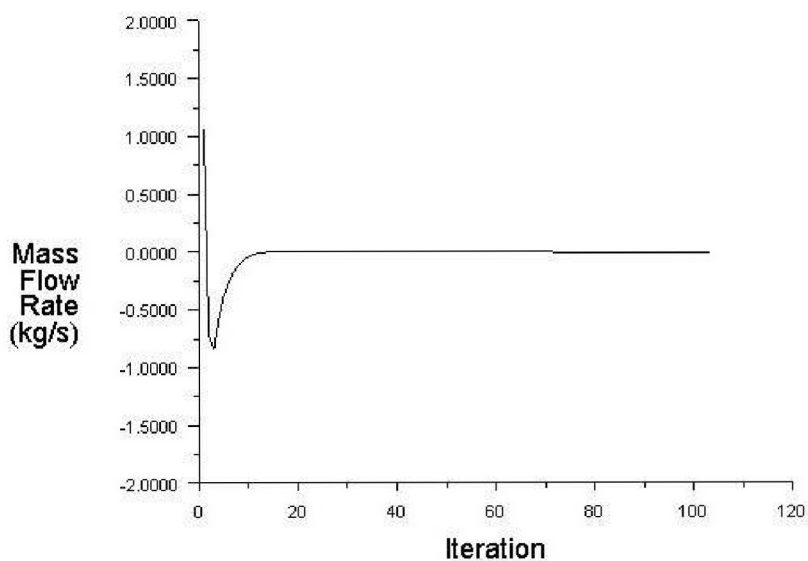


Рис. 8.11. Изменение разности расходов между входом и выходом по итерациям

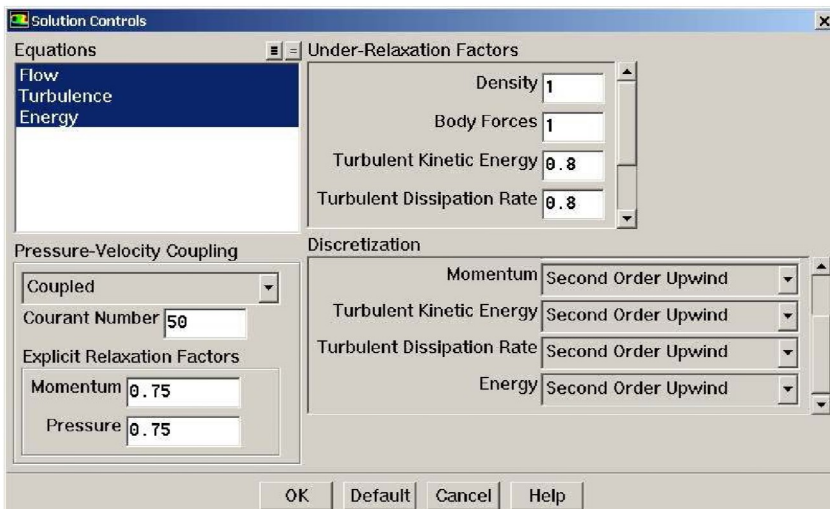


Рис. 8.12. Меню *Solution Controls*

В нем в поле *Discretization* напротив всех решаемых уравнений необходимо выбрать второй порядок дискретизации (*Second Order Upwing*).

Затем расчет запускается вновь. Расчет возобновляется с места, с которого был остановлен, но с новыми настройками решателя, используя достигнутые результаты в качестве первого приближения.

Невязки (рис. 8.13) скачкообразно увеличатся, но достаточно скоро уменьшатся до прежнего уровня. Однако в этом случае заданный уровень невязок не будет достигнут, и решатель сделает установленное число итераций. Тем не менее, оба условия достижения решения (близость к нулю разности расходов и неизменность по итерациям невязок) были выполнены. Решение получено.

Шаг 18. Визуализация полей распределения параметров в расчетной области.

Для просмотра полей распределения параметров необходимо запустить команду:

FM: Display → Contours.

В результате ее выполнения появится меню *Contours* (рис. 2.50).

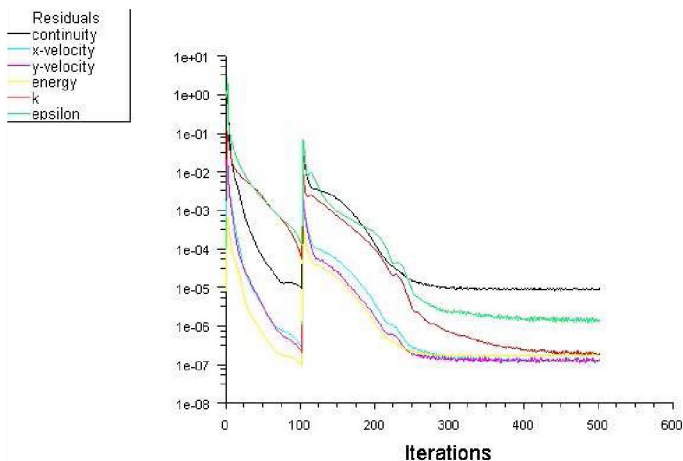


Рис.8.13. Изменение невязок по итерациям после повышения порядка дискретизации

Чтобы распределение параметров отображалось в виде полей, необходимо в окошке *Filled* поставить галочку. В противном случае распределения параметров будут изображаться в виде изолиний.

Параметр, изменение которого требуется отобразить, выбирается в поле *Contours of*. Оно состоит из двух выпадающих списков (рис. 6.7). В верхнем из них выбирается группа, к которой принадлежит нужный параметр (например, скорость). В нижнем списке уточняется, какой именно параметр группы требуется определить (например, осевая скорость).

В поле *Surfaces* задаются поверхности, на которых строятся поля распределений параметров. В случае, если в этом окне ничего не выбирать, то поле будет построено по всей расчетной области.

Для иллюстрации ниже приведены полученные в расчете распределения полного и статического давления, температуры и числа Маха по расчетной области (рис. 8.14.....8.17).

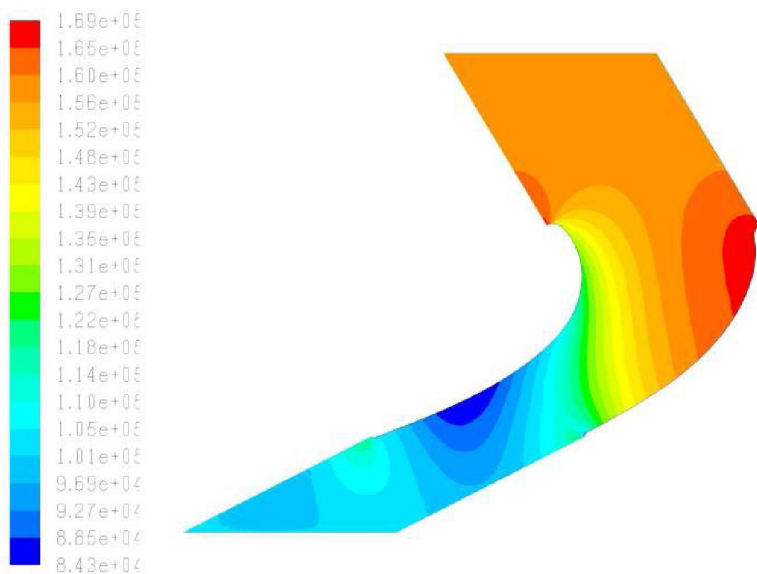


Рис. 8.14. Поле статических давлений в межлопаточном канале

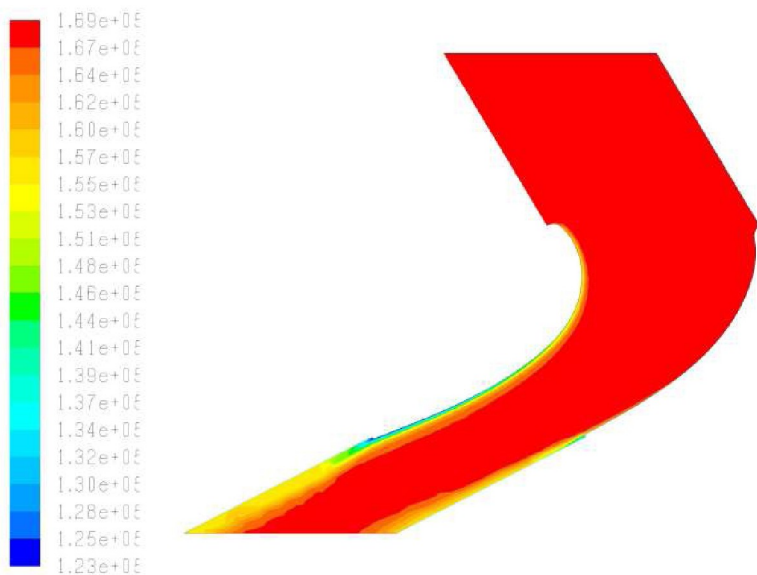


Рис. 8.15. Поле полных давлений в межлопаточном канале

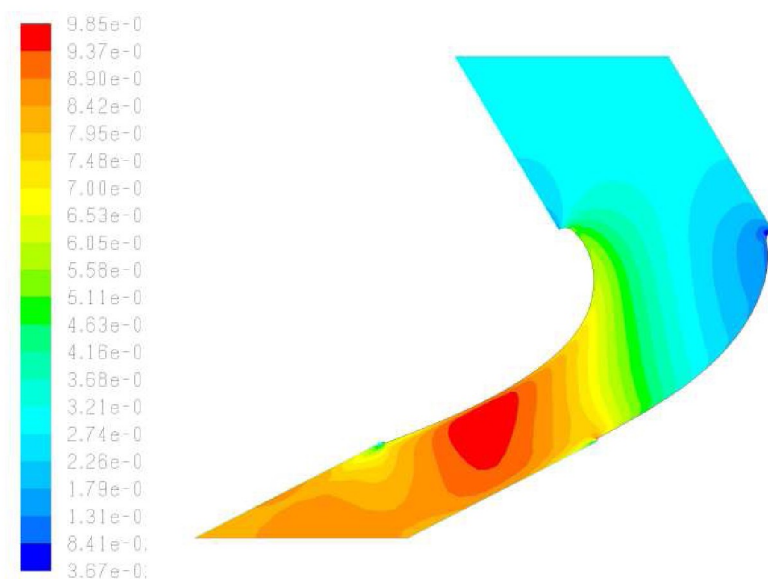


Рис. 8.16. Поле чисел Маха в межлопаточном канале

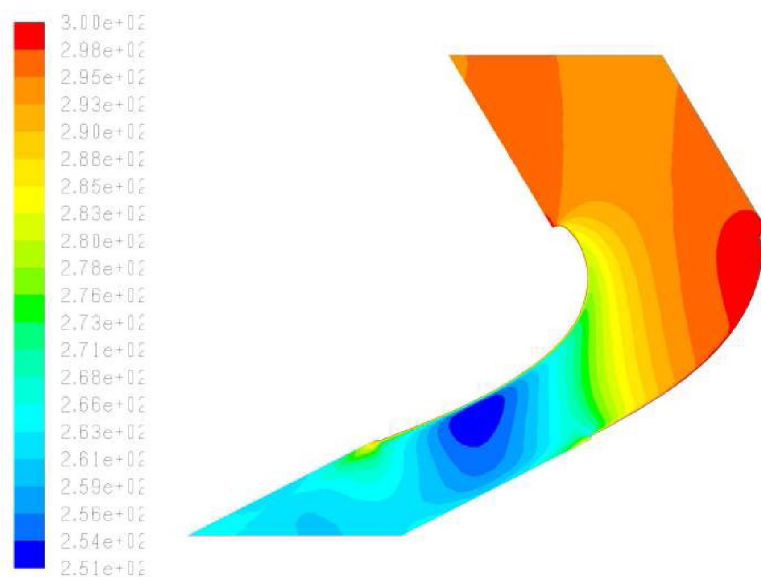


Рис. 8.17. Поле статических температур в межлопаточном канале

Обратите внимание на то, что если справочное давление в меню *Operation Condition* задано не равным нулю, то давление является избыточным относительно справочного (в рассматриваемом примере давление абсолютное).

Рассматриваемая расчетная модель является периодичной. Если со стороны одной из периодичных границ отобразить несколько копий расчетной модели, то можно увидеть структуру течения в решетке в целом. Это можно сделать с помощью команды:

ГМ: Display → Views.

В появившемся меню (рис. 8.18) в поле *Periodic Define* следует нажать кнопку *Define*. В результате откроется доступ к окну *Graphics Periodicity*, в котором нужно задать параметры отображения периодичной модели. Там определяется тип периодичности: окружная (*Rotational*) или линейная (*Translational*), расстояние (линейное или угловое), на котором одна периодичная граница отстоит от другой, и число копий *Number of Repeats*.

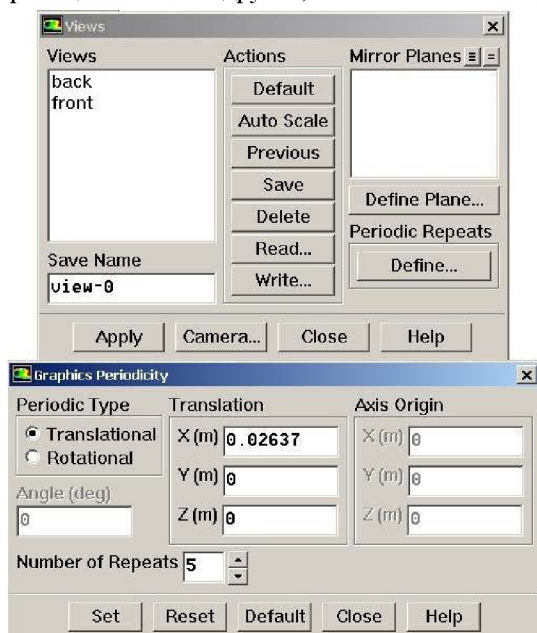


Рис. 8.18. Меню *Views*

Результат выполнения команды показан на рис. 8.19. Сравните его с рис.8.14.

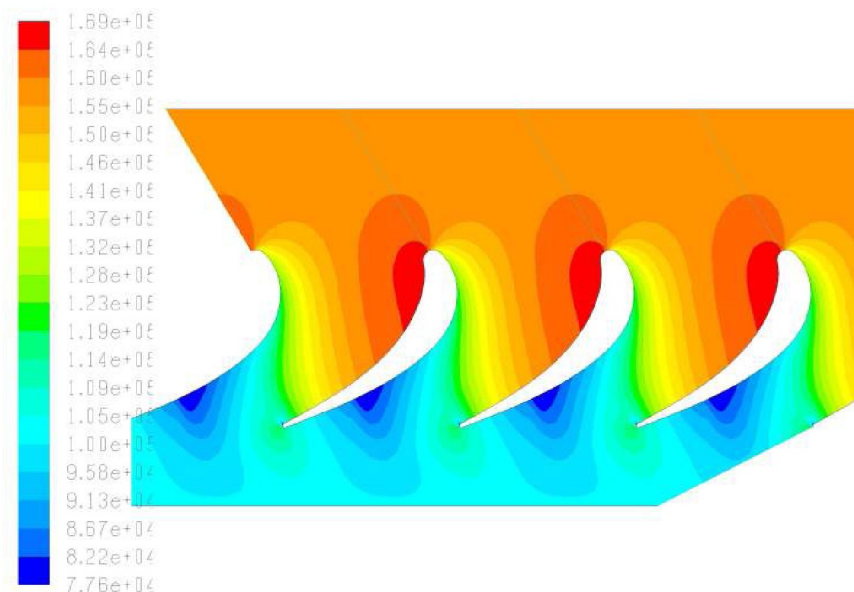


Рис. 8.19. Поле статических давлений в исследуемой решетке профилей

Шаг 19. Визуализация векторов скорости.

Для отображения векторов скоростей в расчетной области необходимо запустить команду:

GM: Display → Vectors.

В результате ее выполнения появится меню *Vectors* (рис. 6.10).

В этом меню в поле *Surfaces* нужно выбрать поверхность или границу, где необходимо отобразить векторы. Если ничего не выбирать, то векторы будут отображены по всей расчетной области.

В зоне *Color by* задается закономерность окраски векторов. Цвет вектора в каждой точке расчетной области будет соответствовать величине параметра, определенного в зоне *Color by*.

Если векторы окажутся маленькими, их можно увеличить, задав большее число в поле *Scale*. Если векторов будет слишком много и они будут мешать анализу результатов, то их можно проредить, задав в поле *Skip* число, отличное от нуля. Это число определяет, сколько векторов не

будет отображаться. Например, если в поле *Skip* стоит число 2, то это значит, что два из трех векторов не будут показаны в графическом окне.

В качестве иллюстрации на рис. 8.20 приведено распределение векторов у входной кромки лопатки.

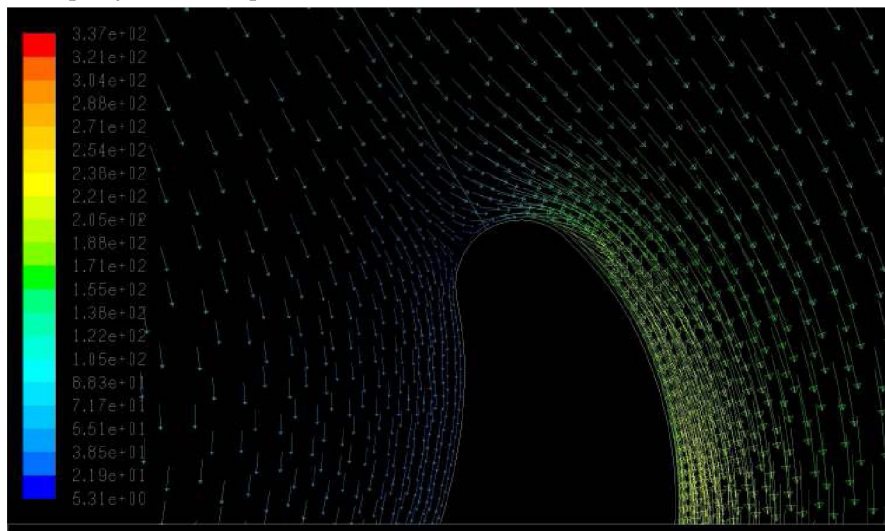


Рис. 8.20. Распределение векторов вблизи входной кромки профиля

Если в меню *Vectors* поставить галочку в поле *Grid*, то откроется доступ к меню отображения сетки. Это дает возможность одновременно отображать сетку и поля распределения параметров (рис. 8.21). Как видно из рис. 8.21, начало вектора помещается в центре конечного элемента.

Шаг 20. Построение графиков изменения параметров.

Программа Fluent позволяет строить графики распределения любого рассчитанного параметра вдоль произвольной поверхности или линии. Меню построения графиков (рис. 6.14) вызывается командой

ГМ: Plot → XY-plot.

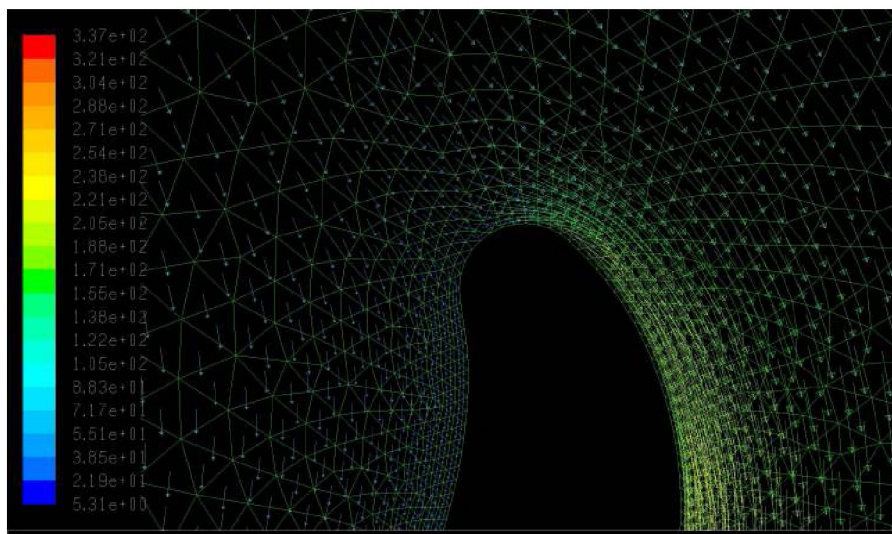


Рис. 8.21. Одновременное изображение векторов и расчетной сетки

В меню *XY-plot* необходимо убрать галочку в окошке *Position on X Axis*. В результате станут доступны поля *Y Axis Function* и *X Axis Function* – параметры по оси *y* и *x* соответственно. Чтобы построить, например, изменение полного давления на выходной границе, необходимо в качестве параметра на оси *y* выбрать полное давление (*Pressure* → *Total Pressure*), а в качестве параметра по оси *x* – координату *x* (*Grid* → *X-Coordinate*). В поле *Surfaces* задается поверхность или линия, на которой строится распределение (в рассматриваемом примере – выходное граничное условие). Для построения графика по сделанным настройкам нужно нажать кнопку *Plot*. Результат действия показан на рис. 8.22. Зависимости изменения других параметров строятся аналогично.

Если в окошке *Write to file* поставить галочку, то полученный график может быть записан в текстовый файл, который в дальнейшем может быть использован как в программе *Fluent*, так и в других программах, например *Excel*.

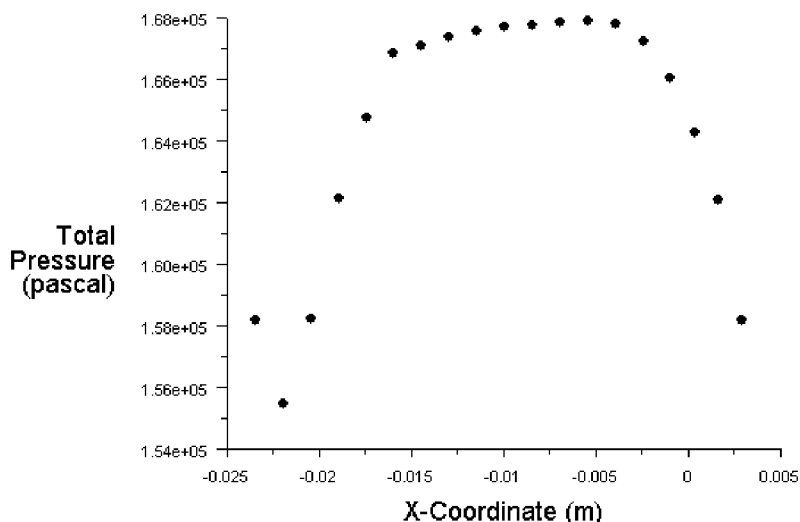


Рис. 8.22. Зависимость изменения полного давления вдоль выходной границы

Шаг 21. Определение среднеинтегральных значений параметра

Очень часто необходимо знать среднеинтегральное значение какого-либо параметра в некотором сечении. Например, для определения потерь в решетке турбомшины нужно знать значение полного давления на выходной границе. Значение параметра можно найти с помощью команды:

FM: Report → Surface Integrals.

В появившемся окне (рис. 6.13) в поле *Report Type* нужно выбрать тип осреднения. Наиболее часто применяются *Area-Weighted Average* (осреднение по поверхности) и *Mass-Weighted Average* (осреднение по расходу). Первый вариант соответствует осреднению, применяемому при обработке результатов эксперимента, и поэтому он используется чаще всего.

В поле *Field Variable* выбирается параметр, значение которого необходимо знать, а в поле *Surface* выбирается поверхность, на которой необходимо определить значение переменной. Чтобы получить значение параметра, нужно нажать кнопку *Compute*. Например, для того, чтобы

определить значения коэффициента профильных потерь ζ_{np} , необходимо найти значения следующих параметров:

- полное давление на входной границе p_0^* ;
- полное давление на выходной границе p_1^* ;
- статическое давление на выходе p_1 .

Кроме того, для построения характеристик необходимо найти угол выхода потока из решетки α_1 .

Для рассматриваемого примера значения этих параметров приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Значения параметров в рассматриваемом примере

p_0^*	168341	p_1	101325
p_1^*	165328	α_1	25,5

Примечание. При расчете угла выхода потока обратите внимание на то, что в поле *Field Variable* угол вектора скорости α_{va} (*Velocity - Velocity Angle*) представляет собой угол между вектором и положительным направлением оси x и имеет знак плюс или минус (рис. 8.23). В рассматриваемом примере угол выхода смежен с ним и равен $\alpha_1 = 180 - \alpha_{va}$. Это же замечание касается и угла входа потока (рис. 8.23).

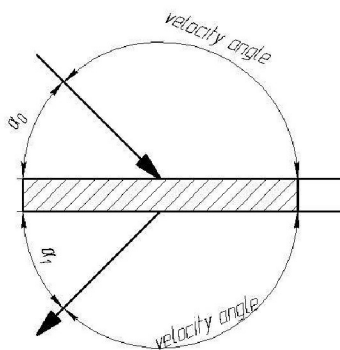


Рис. 8.23. К определению значения угла входа/выхода потока в программе *Fluent*

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Андерсон Д., Таннехил Дж., Плетчер Р.* Вычислительная гидромеханика и теплообмен. В 2-х томах. – М.: «Мир», 1990. - 384с.
2. *Батурин О.В.* Построение расчетных моделей в препроцессоре *Gambit* универсального программного комплекса *Fluent*: учеб. пособие/ *О.В. Батурин, Н.В. Батурин, В.Н. Матвеев* – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009. - 172с.: ил.
3. *Бойко А.В., Говорущенко Ю.И., Еришов С.В.* Аэродинамический расчет и оптимальное проектирование проточной части турбомашин. - Харьков: НТУ "ХПИ", 2002. – 341с.
4. *Гардзиевич А., Еришов С.В., Русанов А.В., Лампарт П.* Повышение эффективности ступени турбины высокого давления с помощью сложного навала лопаток статора // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: Тр. международ. науч.-техн. конф./НАН Украины и др. – Харьков: Ин-т проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного НАН Украины, 1997. – С. 170 – 174.
5. *Еришов С.В., Русанов А.В.* Комплекс программ FlowER[®] для расчета трехмерных вязких течений в многоступенчатых турбинах и компрессорах // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: Тр. международ. науч.-техн. конф./НАН Украины и др. – Харьков: Ин-т проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного НАН Украины, 1997. – С. 158 – 164.
6. *Зенкевич О., Морган К.* Конечные элементы и их аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 178с.
7. *Иванов В.Л., Леонтьев А.И., Манушин Э.П., Осипов М.И.* Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок: Учебник для вузов/ Под ред. А.И. Леонтьева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003 –592с.
8. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 150с.
9. *Пирумов У. Г., Росляков Г. С.* Численные методы газовой динамики. – М.:Мир, 1987. – 186с.

10. Рейнольдс А. Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях: Пер. с англ. – М.: Энергия, 1979. – 408 с.
11. Турбулентность. Принципы и применение. Под ред. У. Фроста и Т. Моудлена. – М.: Мир, 1980. – 220с.
12. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей в 2-х т. – М.: Мир, 1991. – 1056с.
13. Шу Д. Численные методы в задачах теплообмена: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 544 с.
14. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 711с.
15. Daly, B.J., and Harlow, F.H. Transport equations in turbulence, *Phys. Fluids*, 13(11), 1970. pp. 2634-2649.
16. *Gambit 2.3.16 users guide.*
17. Ferziger J. H., Peric M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. - 3., rev. ed. - Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2002
18. *Fluent 6.3.26 users guide.*
19. Lampart P., Yershov S. 3D shape optimisation of turbomachinery blading // *CFD for Turbomachinery Application: Seminar/Summer School*, Sept. 01-03, 2001, Gdansk, Poland, p. 224.
20. Launder, B.E., and Spalding, D.B. The numerical computation of turbulent flows, *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng.*, 3, 1974. pp. 269-289.
21. Lien, F.-S., and Leschziner, M.A. A pressure-velocity solution strategy for compressible flow and its application to shock/boundary-layer interaction using second-moment turbulence closure', *J. Fluids Eng.*, 115, 1993. pp. 717-725.
22. L. Prandtl. Über ein neues formelsystem für der ausgebildeten turbulenz, *Nachr. Akad. Wiss. Goettingen*, pp. 6-19, 1945.
23. Wilcox, D.C. 1998. "Turbulence Modelling for CFD". 2nd edition, DCW Industries, Inc.
24. www.ansysolutions.ru.
25. <http://fluent.com>.
26. <http://fluentusers.com>.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

К выбору отображаемых параметров в программе *Fluent*

параметр	обозначение	1 список	2 список
1	2	3	4
Статическое давление	p	<i>Pressure</i>	<i>Static Pressure</i>
Полное давление	p^*	<i>Pressure</i>	<i>Total Pressure</i>
Статическая температура	T	<i>Temperature</i>	<i>Static Temperature</i>
Полная температура	T^*	<i>Temperature</i>	<i>Total Temperature</i>
Энтальпия	i	<i>Temperature</i>	<i>Enthalpy</i>
Полная энтальпия	i^*	<i>Temperature</i>	<i>Total Enthalpy</i>
Энтропия	S	<i>Temperature</i>	<i>Entropy</i>
Модуль скорости	c	<i>Velocity</i>	<i>Velocity Magnitude</i>
Проекция скорости на ось x	c_x	<i>Velocity</i>	<i>X Velocity</i>
Проекция скорости на ось y	c_y	<i>Velocity</i>	<i>Y Velocity</i>
Радиальная проекция скорости	c_r	<i>Velocity</i>	<i>Radial Velocity</i>
Осевая проекция скорости	c_a	<i>Velocity</i>	<i>Axial Velocity</i>
Тангенциальная проекция скорости	c_t	<i>Velocity</i>	<i>Tangential Velocity</i>
Угол между вектором скорости и осью x	α	<i>Velocity</i>	<i>Velocity Angle</i>
Число Маха	M	<i>Velocity</i>	<i>Mach Number</i>
1	2	3	4

Плотность	ρ	<i>Density</i>	<i>Density</i>
Коэффициент теплопроводности	λ	<i>Properties</i>	<i>Thermal Conductivity</i>
Теплоемкость	c_p	<i>Properties</i>	<i>Specific Heat</i>
Скорость звука	a	<i>Properties</i>	<i>Sound Speed</i>
Координата x	x	<i>Grid</i>	<i>X - Coordinate</i>
Координата y	y	<i>Grid</i>	<i>Y - Coordinate</i>
Осевая координата	a	<i>Grid</i>	<i>Axial Coordinate</i>
Тангенциальная координата	u	<i>Grid</i>	<i>Tangential Coordinate</i>
Радиальная координата	r	<i>Grid</i>	<i>Radial Coordinate</i>
Y^+	Y^+	<i>Turbulence</i>	<i>Wall Y plus</i>