

А.М. Зиганшин



**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ГИДРОДИНАМИКА.
Постановка и решение задач в процессоре Fluent**

Методическое пособие для учебной и научной
работы студентов направления «Строительство»
(квалификация «бакалавр» и «магистр»)
и аспирантов специальности 05.23.03

Казань 2013

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
**КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

А.М. Зиганшин

**Вычислительная гидродинамика. Постановка и решение задач
в процессоре Fluent**

Методическое пособие для учебной и научной
работы студентов направления «Строительство»
(квалификация «бакалавр» и «магистр»)
и аспирантов специальности 05.23.03

Казань
2013

УДК 697.1; 697.9
ББК 24.54
359

359

Вычислительная гидродинамика. Постановка и решение задач в процессоре Fluent: Методическое пособие для учебной и научной работы студентов направления «Строительство» (квалификация «бакалавр» и «магистр») и аспирантов специальности 05.23.03/ А.М. Зиганшин. – Казань: Изд-во Казанск. гос. архитект.-строит. ун-та, 2013. – 79 с.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Казанск. гос. архитект.-строит. ун-та.

Пособие содержит методические указания по компьютерному моделированию теплогидродинамических процессов при помощи программного комплекса вычислительной гидродинамики Fluent.

Методические указания предназначены для студентов направления «Строительство» и аспирантов специальности 05.23.03 в их самостоятельной работе над курсами «Гидравлика», «Тепломассообмен», «Механика жидкости и газа», «Отопление», «Вентиляция», «Процессы и аппараты пылегазоочистки» и других, а также в научной работе при моделировании теплогидродинамических процессов: при постановке, решении задачи и визуализации полученных результатов.

Рецензент:

д.ф-м.н., проф. каф. Аэрогидромеханики КФУ
Д.В. Маклаков

УДК 697.1; 697.9
ББК 24.54

- © Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2013
- © Зиганшин А.М., 2013

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1. Запуск программы и установка основных моделей.....	5
1.1. Модели.....	7
1.1.1. Решатель (Solver).....	7
1.1.2. Энергия.....	8
1.1.3. Модели вязкости	8
1.1.4. Модели излучения.....	9
1.2. Рабочие условия.....	10
1.3. Материалы.....	12
2. Установка граничных условий (ГУ).....	13
2.1. Скорость на входе (Velocity Inlet).....	14
2.2. Массовый расход на входе (Mass Flow Inlet)	15
2.3. Давление на входе (Pressure Inlet).....	16
2.4. Давление на выходе (Pressure Outlet)	17
2.5. Задание турбулентных параметров на входных и выходных границах	18
2.6. Определение турбулентных параметров для задания ГУ	18
2.6.1. Интенсивность турбулентности (Turbulence Intensity)	19
2.6.2. Отношение турбулентной вязкости (Turbulent Viscosity Ratio). 19	
2.6.3. Турбулентный масштаб длины (Turbulence Length Scale) и гидравлический диаметр (Hydraulic Diameter).....	20
2.6.4. Вычисление значений турбулентных параметров на границах . 20	
2.7. Выход потока (Outflow)	21
2.8. Стенка (Wall).....	21
2.8.1. Модель тонкой стенки (Thin Wall Model)	24
2.8.2. Модель двухсторонней стенки (Two-Sided Wall).....	25
2.9. Симметрия (Symmetry)	26
2.10. Ось (Axis).....	26
2.11. Пристеночное моделирование	26
2.11.1. Требования для сетки в пристеночной области.....	28
2.12. Инструмент Profile.....	28
2.12.1. Типы задания профиля	28
2.12.2. Формат файла для задания профиля	29
2.12.3. Создание файла профиля	29
2.12.4. Использование инструмента Profile	30
2.12.5. Проверка и удаление профилей.....	32
3. Проведение решения.....	33
3.1. Настройка проведения решения (Controls Solution)	33
3.1.1. Дискретизация (Discretization).....	34
3.1.2. Алгоритмы связывания полей скорости и давления (Pressure-Velocity Coupling Method)	36

3.2.	Визуализация хода решения.....	37
3.2.1.	Монитор невязок.....	37
3.2.2.	Анимация решения.....	39
3.3.	Инициализация решения.....	41
3.4.	Запуск итераций.....	42
4.	Адаптация сетки.....	43
4.1.	Статическая адаптация.....	44
4.1.1.	Адаптация с висячими узлами.....	44
4.1.2.	Конформная адаптация.....	45
4.1.3.	Выбор между конформной адаптацией и адаптацией с висячими узлами.....	46
4.2.	Адаптация по границе (Boundary Adaption).....	47
4.3.	Градиентная адаптация (Gradient Adaption).....	48
4.4.	Динамическая адаптация.....	50
4.5.	Адаптация по изозначению (Isovalue Adaption).....	52
4.6.	Адаптация области (Region Adaption).....	52
4.7.	Адаптация по заданному объему (размеру) ячейки (Volume Adaption).....	54
4.8.	Адаптация по значениям y^+ и y^* (Yplus/Ystar Adaption).....	54
4.9.	Геометрическая адаптация (Geometry-based adaption).....	55
4.10.	Управление адаптацией сетки (Grid Adaption Controls).....	58
5.	Пользовательские функции (UDF).....	59
5.1.	Моделирование свойств веществ.....	60
5.2.	Моделирование граничного условия.....	63
5.2.1.	Замечания.....	67
6.	Постпроцессинг.....	67
6.1.	Создание зон для отображения и представления данных.....	67
6.1.1.	Точка (Point Surfaces).....	67
6.1.2.	Линия или набор точек (Line and Rake Surfaces).....	68
6.1.3.	Управление зонами представления данных.....	68
6.2.	Визуализация.....	69
6.2.1.	Контуры.....	69
6.2.2.	Векторы.....	71
6.2.3.	Построение траекторий.....	72
6.2.4.	XУ график.....	73
7.	Проведение исследований.....	75
7.1.	Общий порядок проведения компьютерного моделирования.....	75
7.1.1.	Подготовка модели и препроцессинг.....	75
7.1.2.	Решение.....	77
7.2.	Порядок проведения исследования.....	77
	Список литературы.....	79

ВВЕДЕНИЕ

Как и в случае с первой частью – «Вычислительная гидродинамика. Построение расчетных сеток в препроцессоре Gambit» – данное методическое пособие преследует цель описать основные приемы работы с интерфейсом расчетной части комплекса (солвера) – программы Fluent, не претендуя на полноту охвата всех возможностей вычислительного комплекса. Разобраны основные установки для решения задач о течении воздуха под действием архимедовых сил, а также при изотермическом течении приточных струй, как ограниченных, так и свободных. Описаны основные приемы, позволяющие наиболее рационально и методично проводить численные исследования и далее обрабатывать полученные результаты. Нужно отметить, что в пособии ведется описание работы в солвере Fluent версии 6.3 – последней отдельной версии Fluent, на момент написания пособия существует версия Ansys Fluent 12, несколько отличающаяся интерфейсом.

В пособии, по возможности, все англоязычные термины интерфейса программы переведены на русский язык.

Более подробное описание всех возможностей программного комплекса приведено в руководстве пользователя [1], которое, в том числе, можно найти в свободном доступе в сети Интернет.

При проведении любого численного исследования нужно начинать с решения тестовой задачи, т.е. такой задачи, решение которой уже хорошо известно из более ранних и достоверных исследований (натурных или аналитических). При решении тестовой задачи проводится настройка и верификация (проверка на физическую адекватность) численной схемы решения – комплекса, включающего граничные условия, физические модели и предположения, а также наиболее подходящие математические алгоритмы, приводящие к наиболее быстрому сходимости итерационного процесса решения.

После решения тестовой задачи и успешной верификации численную схему решения можно с определенной долей уверенности распространить на решение других, сходных с тестовой, но ранее не исследованных задач.

1. ЗАПУСК ПРОГРАММЫ И УСТАНОВКА ОСНОВНЫХ МОДЕЛЕЙ

После подготовки (построения) геометрии и расчетной сетки в препроцессоре следующим этапом является импорт геометрии в солвер (процессор). Затем следует установка граничных условий, выбор используемых при решении физических моделей и математических алгоритмов (дискретизация, аппроксимация и т.д.) – составление так

называемой «численной схемы» исследуемого явления. И далее непосредственно сам итерационный процесс – решение задачи.

После запуска программы (файл запуска находится обычно по следующему пути: C:\Fluent.Inc\ntbin\ntx86\fluent.exe) необходимо выбрать одну из следующих версий солвера: двухмерные – 2d (обычной точности) и 2ddp (двойной точности) или трехмерные – 3d и 3ddp. Как показывает практика, использование версии двойной точности не оказывает большого влияния на скорость выполнения итераций в ходе решения, но увеличивает точность получаемых результатов.

Далее открывается основное окно, в котором в текстовом виде будут отображаться команды, выполняемые солвером. Над окном имеется панель выпадающих меню. Для импорта созданной в программе Gambit геометрии в выпадающем меню необходимо выбрать следующую команду: File→Read →

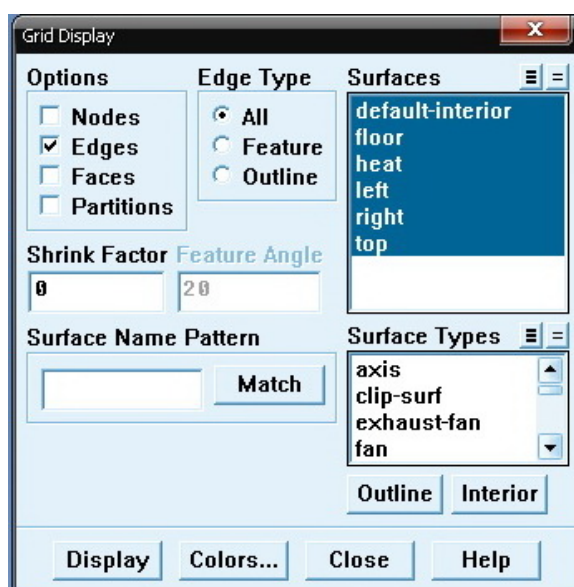


Рис. 1. Диалог отображения расчетной сетки

Case... Далее в стандартном диалоге открытия файла необходимо найти файл, экспортированный из препроцессора (файл с расширением msh), и нажать Ok. На этом этапе уже можно просмотреть импортированную геометрию и расчетную сетку: Display →Grid... (рис. 1) и нажать в диалоге кнопку Display. Появившаяся в окне модель должна соответствовать созданной в Gambit. Кроме того, в открывшемся диалоге Grid Display (Отображение сетки) в списке Поверхности (Surfaces) должны быть отображены все те границы, которые были установлены ранее в Gambit, и еще одна область – default-interior – обозначающая внутреннюю область смоделированной геометрии (непосредственно саму расчетную сетку). Если в списке появились дополнительные границы (с названиями типа wall, wall1 и т.п.), это означает, что при назначении границ в Gambit одна или несколько границ были пропущены. В этом случае имеет смысл выяснить, какие границы не были учтены на этапе построения сетки (путем последовательного включения и выключения видимости этих границ), затем вернуться к этапу построения сетки в Gambit и обозначить недостающие границы.

Практически все течения в вентиляционной и отопительной технике турбулентны. Поэтому далее пойдет речь о моделировании турбулентных течений. О численном моделировании турбулентных течений сказано очень

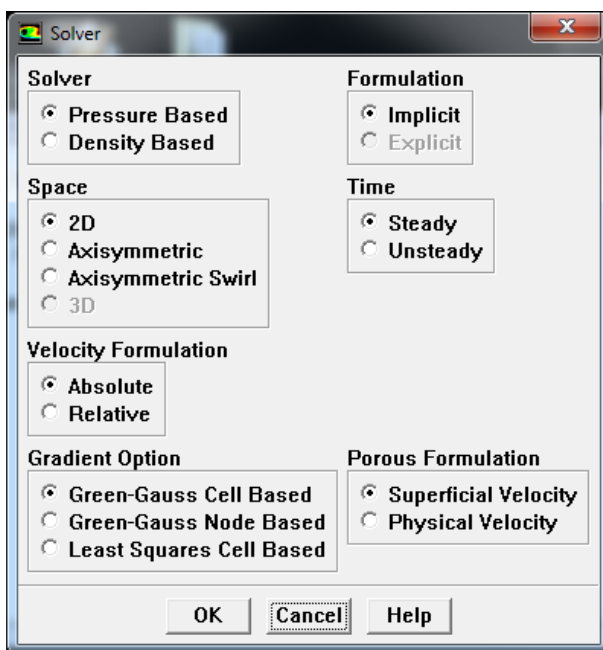
много, но на сегодняшний день еще не существует универсальной модели турбулентности, одинаково хорошо описывающей любые течения. Поэтому, в идеале, при решении конкретной задачи необходимо иметь результаты экспериментальных исследований такого течения, с помощью которых можно было бы «настроить» численную модель – подобрать необходимые граничные условия, различные модельные предположения и т.д.

Для установки всех параметров задачи существует пункт меню Define (Определение).

1.1. Модели

Fluent имеет довольно большие возможности для моделирования различных видов течений – турбулентные и ламинарные, изотермические и неізотермические, многофазные потоки, горение и т.д. Для моделирования того или иного течения необходимо соответствующим образом настроить солвер.

1.1.1. Решатель (Solver)



Окно настройки вызывается командой меню: Define-> Models->Solver... При выборе версии солвера: 2d или 2ddp – диалоговое окно будет иметь вид (рис. 2).

Для выбора между 2D (двухмерной) или Axisymmetric (осесимметричной) моделями – переключатель в группе опций Space (пространство). Кроме того, задача может решаться в Steady (стационарной) и Unsteady (нестационарной) постановке – группа опций Time (время). Обычно остальные параметры можно оставить по умолчанию.

Рис. 2. Диалог установки параметров солвера

Замечания

При решении задач в осесимметричной постановке нужно иметь в виду, что в расчетной области обязательно должно присутствовать ГУ Axis (ось). И эта граница обязательно должна быть горизонтальной.

Кроме того, если расчетная область содержит горизонтальную границу с координатой по $y=0$, то она и должна быть осью, в противном случае при первой же итерации выходит следующее сообщение:

! 1 solution is converged

1 1.#QNBe+00 1.#QNBe+00 1.#QNBe+00

При этом решение останавливается.

В тех случаях, когда в области все координаты положительные или отрицательные: разницы, какая именно горизонтальная граница будет осью – нет.

В случае если в осесимметричной постановке решается задача с учетом гравитации (например, со свободной конвекцией), которая должна быть направлена вдоль оси симметрии области, вектор ускорения свободного падения (опция Gravity пункта меню Define->Operating Conditions...) также должен быть направлен вдоль оси x .

1.1.2. Энергия

При решении неизотермических задач необходимо включить галочку Energy Equation (уравнение энергии) в панели Energy (энергия): Define -> Models->Energy... В этом случае при решении в общую систему уравнений будет включено и уравнение переноса энергии.

1.1.3. Модели вязкости

При расчете течений в двухмерной (2d) Fluent версии 6.3 имеется 6 основных моделей вязкости: Inviscid (невязкая); Laminar (ламинарная); Spalart-Allmaras (Спаларта – Аллмараса); k-epsilon (двухпараметрическая $k-\epsilon$); k-omega (двухпараметрическая $k-\omega$); Reynolds Stress (рейнольдсовых напряжений). Последние четыре модели предназначены для расчета турбулентных течений. Кроме этого, при решении трехмерных задач имеются модели Detached Eddy Simulation (DES, модель отсоединенных вихрей) и Large Eddy Simulation (LES, модель крупных вихрей). Диалоговое окно настройки модели турбулентности вызывается командой меню Define->Models->Viscous... Вид диалогового окна настройки зависит от выбранной модели.

К сожалению, на сегодняшний день нет универсальной модели турбулентности, и выбор конкретной модели из множества существующих является сложной задачей сам по себе. В руководстве к солверу Fluent имеются указания по использованию или скорее по ограничениям к использованию той или иной модели реализованных в программе.

Все модели турбулентности, кроме DES и LES, относятся к моделям RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes, осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса). Такие модели могут описывать только осредненное турбулентное движение и работают даже при использовании

довольно грубой (по сравнению с размерами турбулентных вихрей) сеткой. Поэтому по сравнению с моделями DES и LES они менее требовательны к вычислительным ресурсам. Модели RANS довольно хорошо изучены, описаны их области применения, и их можно применять для моделирования как двух, так и трехмерных течений.

В отличие от RANS – моделей в DES– и LES – моделях с различной степенью точности моделируются и основные турбулентные вихри (обычно крупные), что позволяет с их помощью проводить исследования и турбулентных характеристик течения. Поскольку реальная турбулентность всегда трехмерна, их применение возможно лишь в трехмерном солвере. Требования к вычислительным ресурсам при использовании этих моделей существенно выше, чем для RANS.

В руководстве к Fluent указаны примерные соотношения компьютерного времени, затрачиваемого на решение задач с использованием различных моделей турбулентности. Далее на рисунке показано примерная диаграмма затраты компьютерного времени (CPU time) в процентах. За 100% принят расчет при помощи стандартной k-ε – модели турбулентности. Модель Спаларта – Аллмараса отнимает несколько меньше (разработчики не уточняют, насколько меньше), а DES и LES – больше чем самая требовательная к ресурсам RANS модель – RSM.

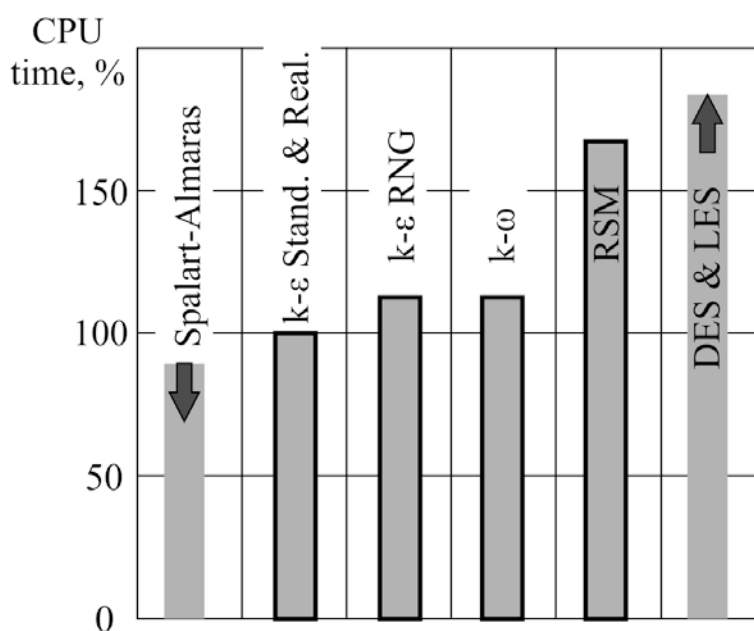


Рис. 3. Сравнение моделей турбулентности по использованию компьютерных ресурсов

1.1.4. Модели излучения

Имеется 5 моделей переноса энергии излучением: Rosseland Radiation Model (модель Россланда), P-1 Radiation Model (модель P-1), Discrete Transfer

Radiation Model (DTRM) (модель дискретного переноса), Surface-to-surface (S2S) Radiation Model (модель поверхность – поверхность), модель Discrete Ordinates (DO) Radiation Model (дискретных ординат).

При выборе модели необходимо учитывать следующее [1]:

- Оптическую толщину: $a \cdot L$, здесь a – коэффициент поглощения излучения средой (absorption coefficient, 1/м), L – характерный размер области, м. Для $a \cdot L \gg 1$ лучше использовать модель Россланда и P-1. Причем P-1 используется для $a \cdot L > 1$, при $a \cdot L > 3$ – модель Россланда. Модели DTRM и DO работают в широком диапазоне оптических толщин, но требуют более высоких вычислительных затрат. Таким образом для уменьшения объема вычислений в оптически «толстых» средах возможно использование моделей Россланда и P-1. Для оптически «тонких» ($a \cdot L < 1$) возможно использование только DTRM и DO.
- Рассеивание и излучение: P-1–, Rosseland–, и DO– модели учитывают рассеивание, в то время как DTRM не учитывает. Поскольку модель Россланда использует условие скольжения температуры на стенке, она нечувствительна к излучению стенки.
- Эффекты частиц: только P-1 и DO модели учитывают теплообмен излучением между газом и частицами.
- Полупрозрачные среды и зеркальные границы: только модель DO позволяет учесть зеркальное отражение, а также рассчитать излучение сквозь полупрозрачные среды.
- Не серое излучение: только модель DO позволяет рассчитать излучение не серой поверхности.
- Локальные источники тепла: в таких задачах модель P-1 может неправильно определять потоки тепла. Наиболее подходящей в этом случае является модель DO. Модель DTRM тоже приемлема, если установлено достаточное количество трассирующих лучей.
- Лучистый перенос в замкнутых областях, с прозрачной средой: в этом случае наиболее эффективной является модель S2S.

Далее в меню Define->Models... расположены пункты для моделирования задач с реагирующими средами, горения и т.д.

1.2. Рабочие условия

После определения моделей необходимо определить рабочие условия, при которых будет происходить исследуемое явление: Define->Operating Conditions..

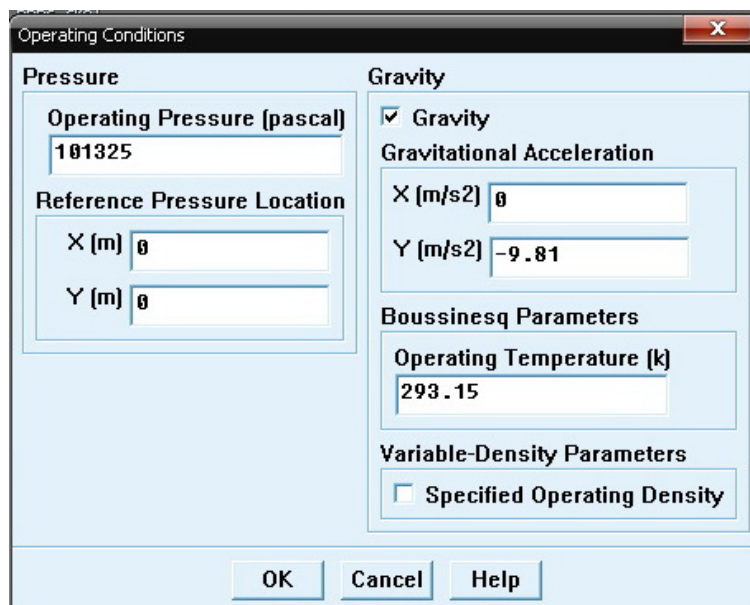


Рис. 4. Диалог установки рабочих условий

В этом диалоговом окне настраиваются:

- Operating Pressure (рабочее давление, Па) – устанавливается рабочее давление задачи, которое будет использоваться для определения абсолютного давления путем прибавления к нему избыточного давления, последнее рассчитывается при решении задачи на каждой итерации.
- Reference Pressure Location (расположение точки давления) – устанавливаются координаты точки (ячейки), которая используется для настройки поля избыточного давления.
- Gravity (гравитация) – галочка включает настройку гравитации. Здесь настраивается величина и направление гравитационного ускорения (Gravitational Acceleration).
- Boussinesq Parameters (параметры Буссинеска) – устанавливаются параметры, необходимые для настройки модели Буссинеска: Рабочая температура (Operating Temperature) – нулевая температура от которой отсчитывается приращение температур, при определении изменения плотности в модели Буссинеска.
- Variable-Density Parameters (параметры для переменной плотности) – параметры, необходимые для моделирования переменной плотности: Operating Density (рабочая плотность) – устанавливает значение рабочей плотности (ρ_0 – в уравнении модели Буссинеска), поле для введения этого параметра появляется при включении галочки Specified Operating Density (установить рабочую плотность).

1.3. Материалы

После настройки моделей, которые будут в дальнейшем использоваться при расчете, необходимо определить вещества (материалы), участвующие в исследуемой задаче, и их физические свойства. Для этого служит пункт меню Define->Materials...

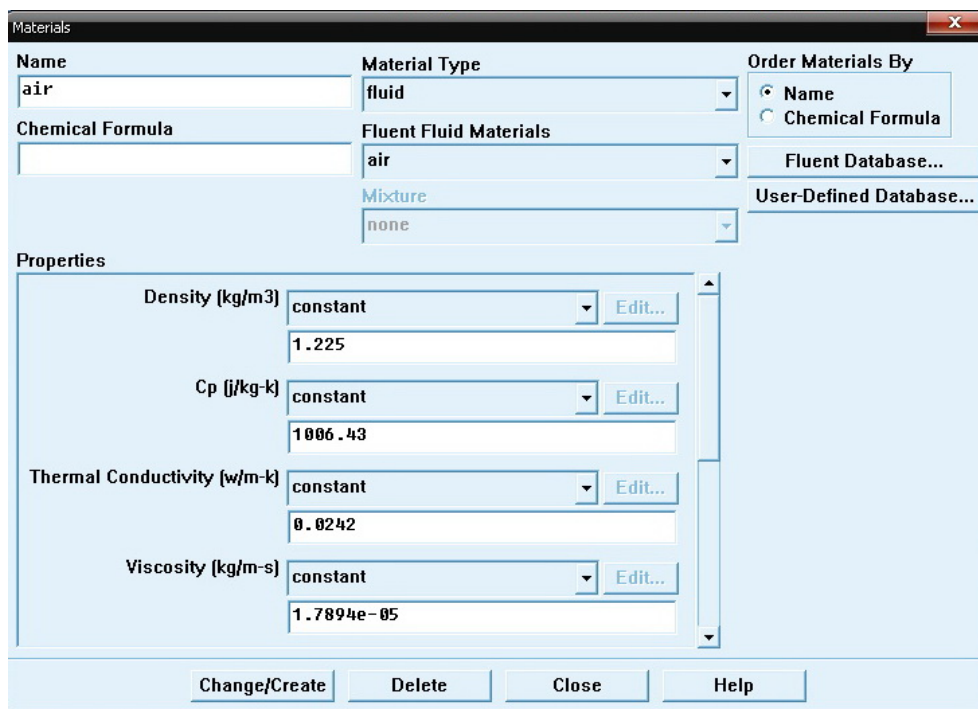


Рис. 5. Диалог установки свойств материалов веществ

Вид диалогового окна, описывающего физические свойства материалов, зависит от ранее установленных моделей. В случае если включена энергия (Define->Models->Energy..), появляются теплофизические свойства – Cp (теплоемкость) и Thermal Conductivity (теплопроводность). Если включена модель радиации (Define->Models->Radiation..) дополнительно появляются свойства материала, связанные с лучистым переносом – Absorption Coefficient (коэффициент поглощения), Scattering Coefficient (коэффициент рассеивания), Scattering Phase Function (фазовая функция рассеивания) и Refractive Index (показатель преломления). Каждое свойство может быть постоянным, с выбранным по умолчанию значением либо скорректированным пользователем. Кроме этого, при решении задачи может быть необходимо, чтобы определенное свойство материала менялось в зависимости от параметров. В этом случае путем выбора соответствующего закона изменения в выпадающем меню постоянное значение физического свойства быть изменено. К примеру, при моделировании задач, в которых значительную роль играют термогравитационные силы (естественная

тепловая конвекция, истечение неизотермических струй с невысокой скоростью и т.п.), необходимо учитывать изменение плотности жидкости в зависимости от температуры. В строке Density (плотность), кроме постоянного значения, имеется возможность выбрать законы изменения плотности от параметров задачи – Ideal Gas (идеальный газ), polynomial, piecewise-linear или piecewise-polynomial (полиномиальные законы), или Boussinesq model (модель Буссинеска).

Также каждое свойство может быть смоделировано при помощи пользовательских функций (User Defined Functions).

По умолчанию, в качестве жидкости установлен воздух, в качестве твердого тела – алюминий. Все физические свойства материалов, по умолчанию, считаются постоянными.

2. УСТАНОВКА ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ (ГУ)

В распоряжении Fluent имеется ряд стандартных ГУ, которые подразделяются на следующие классы:

- границы для входа и выхода потока: Pressure Inlet (давление на входе), Velocity Inlet (скорость на входе), Mass Flow Inlet (массовый расход на входе), Inlet Vent (входное отверстие), Intake Fan (приточный вентилятор), Pressure Outlet (давление на выходе), Pressure Far-Field (поле давлений вдали), Outflow (выход потока), Outlet Vent (выходное отверстие), Exhaust Fan (вытяжной вентилятор).
- стенки, оси: wall (стенка), symmetry (симметрия), periodic (периодическая граница), axis (ось).
- внутренние зоны: Fluid (жидкость), Solid (твердое тело).
- внутренние границы: Fan (вентилятор), Radiator (радиатор), Porous Jump (пористая мембрана).

Далее будет показана установка ГУ, наиболее часто используемых автором при моделировании задач аэродинамики и теплообмена в системах ТГВ. При этом рассмотрено заполнение только некоторых полей диалоговых окон соответствующих ГУ, значения остальных полей в данном случае нужно оставить без изменения (оставить те значения, которые предложены по умолчанию).

2.1. Скорость на входе (Velocity Inlet)

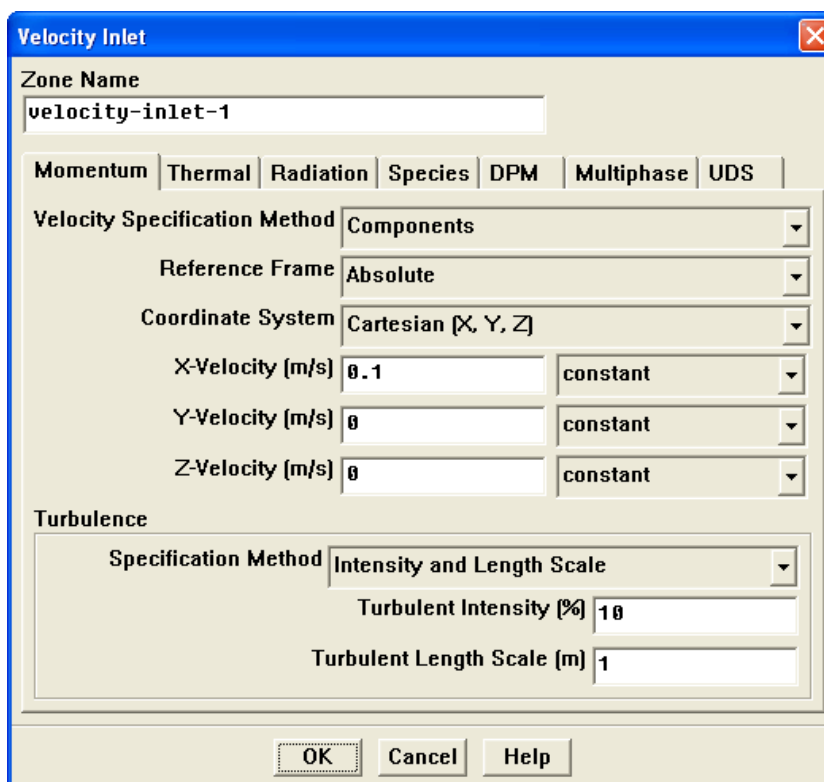


Рис. 6. Диалог ГУ скорость на входе

Во вкладке Momentum (импульс) задается скорость и турбулентность входящего через границу потока. Скорость может задаваться разными способами (в падающем меню Velocity Specification Method – Метод задания скорости): Magnitude and Direction (модуль и направление), Components (компоненты), или Magnitude, Normal to Boundary (модуль, скорость направлена по нормали к границе).

Если граница, прилегающая к моделируемой границе Velocity Inlet, движется, то в меню Reference Frame можно выбрать, как будет отсчитываться задаваемая на границе скорость – Absolute (абсолютно) или Relative to Adjacent Cell Zone (относительно прилегающей зоны). В случае если прилегающая зона неподвижна, то оба варианта будут эквивалентны.

Если моделируется трехмерная задача, то возникает выпадающее меню Coordinate System (координатная система), где нужно выбрать тип координатной системы для описания компонентов вектора скорости или направления из предложенных вариантов: Cartesian (X, Y, Z) (декартова); Cylindrical (цилиндрическая), у которой задаются три компоненты: Radial (радиальная), Tangential (касательная) и Axial (осевая); и Local Cylindrical (локальная цилиндрическая: Radial, Tangential, Axial).

Далее в зависимости от метода задания скорости необходимо задать значения компонент или модуля скорости. Это может быть равномерное

распределение, тогда в текстовом поле задается величина, а рядом в выпадающем списке значение – constant. Кроме того, здесь может быть задан профиль скорости, созданный либо с использованием инструмента Profile, либо при помощи пользовательских функций (UDF) (подробнее об этом см. раздел 5). В случае если задача неизотермическая, на следующей вкладке (Thermal) задается температура втекающего потока.

2.2. Массовый расход на входе (Mass Flow Inlet)

Задание массового расхода на входе означает, что давление на этой границе будет зависеть от решения, полученного в расчетной области – от ее геометрии, т.е. гидравлического сопротивления. Это ГУ является противоположным ГУ Pressure Inlet (давление на входе), где фиксируется давление на границе и тем самым уже расход массы через границу зависит от решения в расчетной области – ее геометрии и сопротивления.

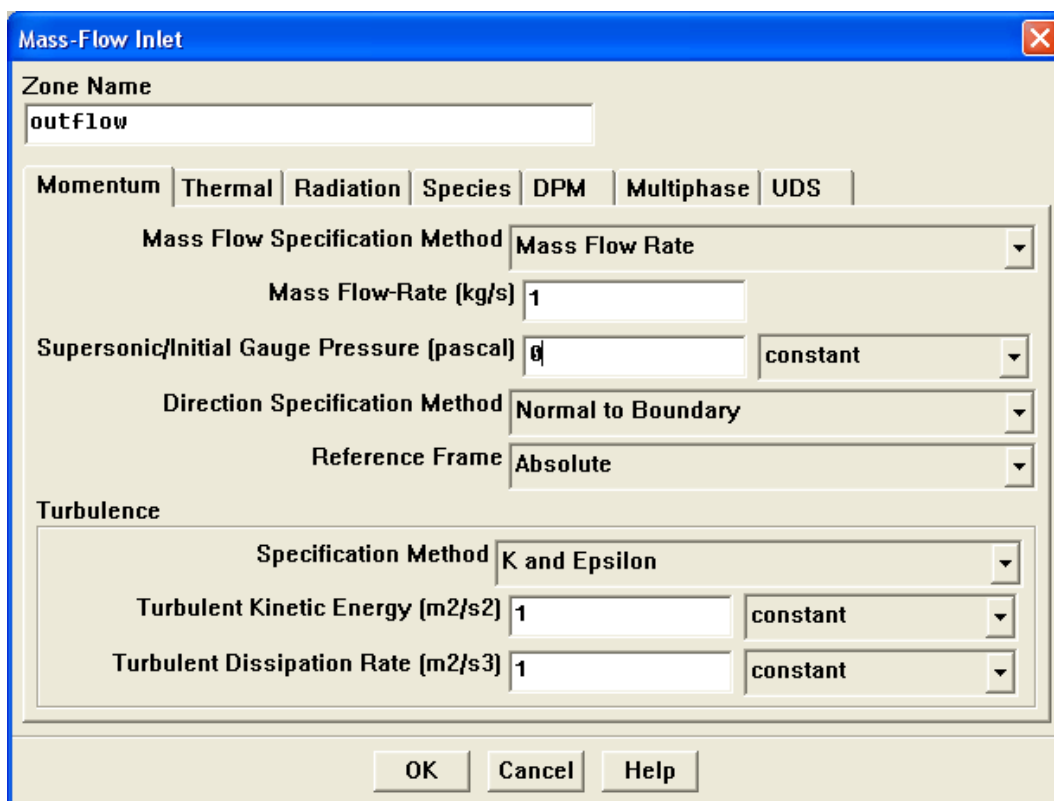


Рис. 7. Диалог ГУ массовый расход на входе

Во вкладке Momentum (импульс) первоначально нужно выбрать способ задания потока массы – поле Mass Flow Specification Method: Mass Flow Rate (расход массы, кг/с), Mass Flux (поток массы кг/с·м²), Mass Flux with Average (поток массы со средним). В первом случае в текстовом поле Mass Flow Rate задается массовый расход, который Fluent сам, при решении, переведет в

равномерное распределение потока массы по заданной границе, путем деления на ее площадь. Также можно напрямую задать поток массы, выбрав Mass Flux в выпадающем меню Mass Flow Specification Method. После чего в поле Mass Flux задать постоянное значение потока массы, либо с использованием инструментов Profile или UDF – требуемый неравномерный профиль. В некоторых случаях, при задании профиля потока массы, может понадобиться изменить средний расход (например, при установленном профиле средний расход – 4,7, а нужно – 5), в этом случае нужно выбрать опцию Mass Flux with Average. При этом Fluent сам пересчитает значения потока массы в связи с новым средним расходом, оставив форму профиля без изменения.

Выпадающее меню Direction Specification Method (метод задания направления) позволяет задать направление потока массы либо при помощи компонент (Components), либо по нормали к границе (Normal to Boundary). Задание вектора направления аналогично ГУ Velocity Inlet (скорость на входе). В случае если задача неизотермическая, на следующей вкладке (Thermal) задается температура втекающего потока.

2.3. Давление на входе (Pressure Inlet)

Это ГУ используется в том случае, когда известно давление на входной границе, но не известен расход жидкости через нее.

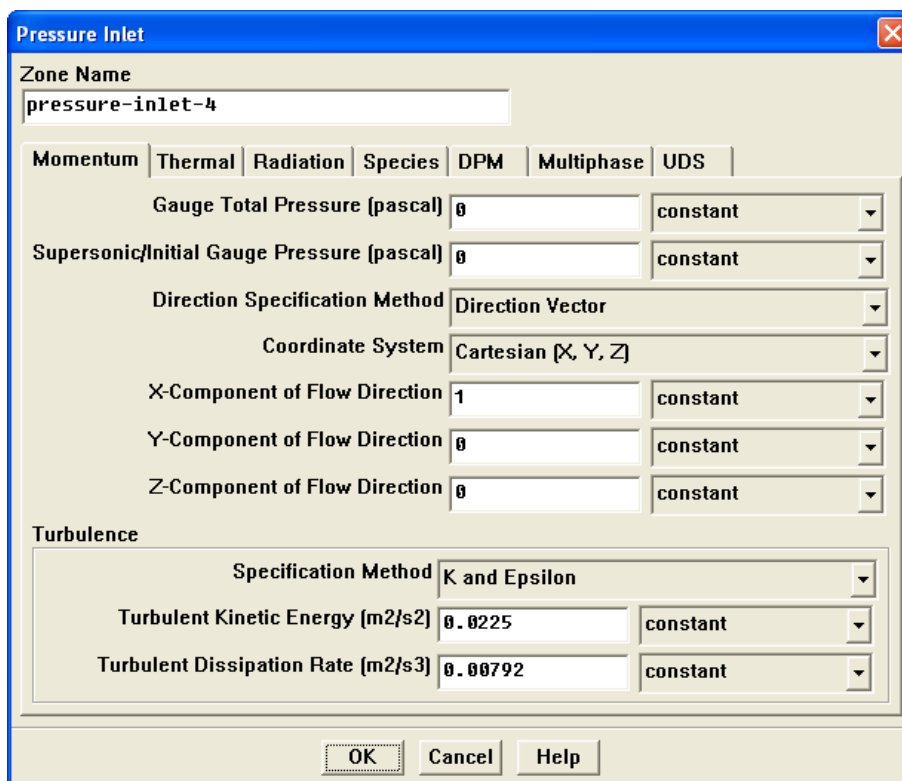


Рис. 8. Диалог ГУ давление на входе

Во вкладке Momentum (импульс) в поле Gauge Total Pressure (полное избыточное давление) устанавливается значение полного избыточного давления (выше атмосферного). Далее, аналогично ГУ, рассмотренным ранее, задается направление потока (поле «метод задания направления» (Direction Specification Method) и других относящихся к нему), а также температура потока во вкладке Thermal.

2.4. Давление на выходе (Pressure Outlet)

Аналогично предыдущему ГУ здесь задается Gauge Pressure (избыточное давление), но, кроме того, и параметры возвратного потока (Backflow), который может возникнуть, если в результате решения поток начнет втекать через границу.

При задании направления возвратного потока (выпадающее меню Backflow Direction Specification Method), помимо обычных способов задания при помощи компонент и нормальным к границе, имеется опция – From Neighboring Cells (из прилежащих ячеек). При выборе этого пункта меню Fluent будет устанавливать направление для втекающего через границу потока согласно направлению потока, найденного при решении в прилежащих к границе ячейках расчетной сетки.

В случае если ожидается возникновение возвратного потока, важно установить наиболее реалистичные его параметры, чтобы обеспечить наилучшее схождение численного расчета.

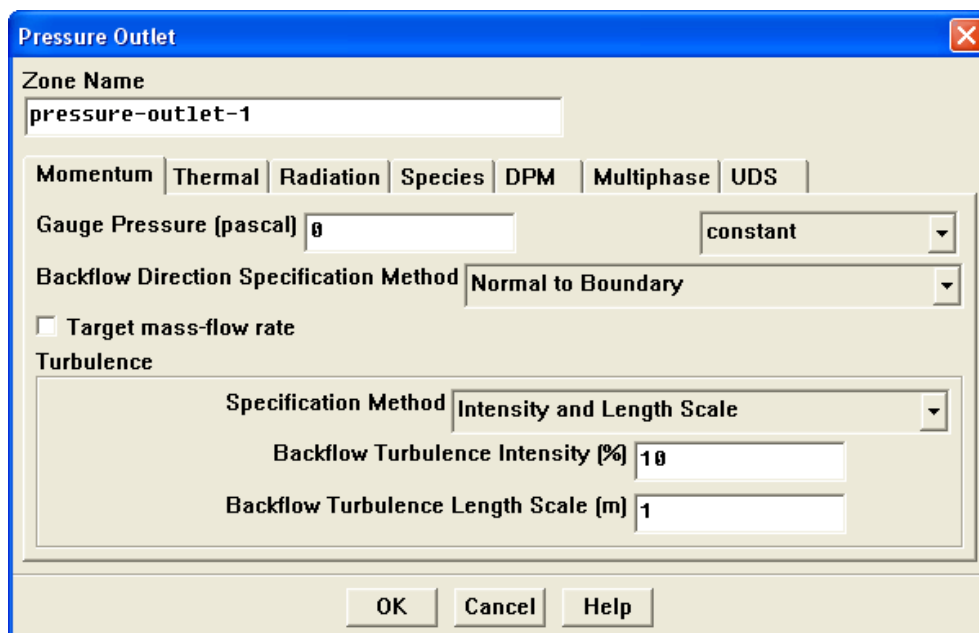


Рис. 9. Диалог ГУ «давление на выходе»

При помощи этого ГУ можно моделировать свободную удаленную границу – при установке избыточного давления равным нулю.

2.5. Задание турбулентных параметров на входных и выходных границах

При задании ГУ входных – Velocity, Mass Flow, Pressure Inlet и выходных границ – Pressure Outlet, в случае когда при решении используется модель турбулентности, имеется группа опций Turbulence (турбулентность).

Первая опция – Specification Method (метод задания) имеет несколько возможных вариантов и зависит от принятой модели турбулентности:

- модель Спаларта – Аллмараса (Spalart-Allmaras model – SAM) – задается модифицированная турбулентная вязкость $\tilde{\nu}$ (Modified Turbulent Viscosity), которая затем используется в SAM для вычисления турбулентной вязкости;
- модели k- ϵ – задаются k и ϵ ;
- модели k- ω – задаются k и ω ;
- модели рейнольдсовых напряжений (Reynolds Stress Models – RSM) – задаются либо k и ϵ (в выпадающем списке Reynolds-Stress Specification Method выбрать пункт K or Turbulent Intensity), либо компоненты тензора рейнольдсовых напряжений UU, VV, WW и UV (в выпадающем списке Reynolds-Stress Specification Method выбрать пункт Reynolds-Stress Components).

Кроме того, общей для любой модели является возможность задания турбулентных параметров в виде:

- интенсивности турбулентности (Turbulence Intensity, %) и масштаба длины (Length Scale, м);
- отношения турбулентной вязкости (Turbulent Viscosity Ratio);
- интенсивности турбулентности и гидравлического диаметра (Hydraulic Diameter, м).

Все вышеописанные параметры можно задавать либо равномерными по границе, либо имеющими определенный профиль. В последнем случае необходимо воспользоваться либо UDF, либо инструментом Profile.

2.6. Определение турбулентных параметров для задания ГУ

Если для решения задачи достаточно задать равномерный профиль турбулентных параметров, и нет данных (экспериментальных или полученных из других расчетов) об их величине – можно воспользоваться следующими рекомендациями.

2.6.1. Интенсивность турбулентности (Turbulence Intensity)

Интенсивность турбулентности I определяется как отношение среднеквадратичной пульсации скорости u' к ее осредненному значению \bar{u} :

$$I = u' / \bar{u},$$

где $u' = \sqrt{\frac{1}{3}(u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2)}$, $\bar{u} = \sqrt{\frac{1}{3}(\bar{u}_x^2 + \bar{u}_y^2 + \bar{u}_z^2)}$, u'_i – пульсация i -й компоненты скорости, \bar{u}_i – среднее значение i -й компоненты скорости.

В идеале при задании на границе I ее значение нужно брать из экспериментальных данных. Считается, что если I имеет значения:

- 5–20% – течение сильно турбулентное – высокоскоростное течение внутри каналов со сложной геометрией (теплообменники, турбины, компрессоры и т.д.);
- 1–5% – течение со средней турбулентностью – течение с не очень высокой скоростью, в каналах не сложной геометрии (трубы, вентиляционные воздуховоды и т.д.);
- менее 1% – низкотурбулентные течения – внешние течения (обтекания крупных препятствий), течения в аэродинамических трубах.

Для ядра полностью развитого турбулентного течения в трубе можно использовать следующую эмпирическую зависимость:

$$I = 0,16 \cdot \text{Re}_{d_h}^{-1/8},$$

где Re_{d_h} – число Рейнольдса, рассчитанное по гидравлическому диаметру (при числе $\text{Re}=50000$ $I \sim 4\%$). Гидравлический диаметр – это отношение площади поперечного сечения канала к его периметру, для круглого канала равен диаметру, а для прямоугольного – размерами ($a \times b$): $d_h = \frac{2ab}{a+b}$.

2.6.2. Отношение турбулентной вязкости (Turbulent Viscosity Ratio)

Это отношение турбулентной вязкости к ламинарной (молекулярной) μ :

$\beta' = \mu_t / \mu$ (μ_t и μ – динамическая турбулентная и молекулярная вязкость) или $\beta = \nu_t / \nu$ (ν_t и ν – кинематическая турбулентная и молекулярная вязкость).

Считается, что для внутренних течений β зависит от Re . Для развитого течения в трубе:

Re	3000	5 000	10 000	15 000	20 000	>100 000
β	11,6	16,5	26,7	34,0	50,1	100

Для внешних течений турбулентная вязкость свободного потока имеет порядок ламинарной, поэтому можно использовать значения $\beta = 0,1-1$.

2.6.3. Турбулентный масштаб длины (Turbulence Length Scale) и гидравлический диаметр (Hydraulic Diameter)

Турбулентный масштаб длины l – это физическая величина, связанная с размером наибольших энергосодержащих вихрей турбулентного потока. В полностью развитом внутреннем течении (течении в канале) l ограничен размерами канала. Часто пользуются следующей эмпирической зависимостью:

$$l=0,07 \cdot L,$$

где L – определяющий размер. Для некруглых каналов $L = d_h$. Нужно иметь в виду, что эта зависимость не универсальна, но годится для большого числа течений. Если турбулентность появляется в результате обтекания препятствия в канале, то более правильно использовать в качестве определяющего размера – размер препятствия, а не канала.

Для внутренних течений:

- для полностью развитых внутренних течений нужно выбрать метод задания (Specification Method) интенсивность и гидравлический диаметр и в качестве гидравлического диаметра ввести в соответствующее поле значение $L = d_h$;
- для пристенных течений, в которых входные границы включают турбулентный погранслой, нужно выбрать метод задания интенсивность и масштаб длины и использовать толщину погранслоя δ для расчета масштаба длины: $l=0,4 \cdot \delta$.

Для внешних течений обычно нельзя определить хороший характерный размер. Рекомендуется применять следующие далее в параграфе «Вычисление значений турбулентных параметров на границах» формулы, в которых не используется характерный размер l . При этом подставлять значения β и I , для внешних потоков – $\beta = 0,1 \div 1$, для аэродинамических труб несколько большие – $\beta = 1 \div 10$.

2.6.4. Вычисление значений турбулентных параметров на границах

Практически все модели турбулентности позволяют задавать на границах турбулентные параметры в виде пары: турбулентная интенсивность и масштаб длины (или гидравлический диаметр). Однако в некоторых случаях бывает полезно знать, как связаны эти турбулентные параметры с основными турбулентными величинами – k , ϵ и ω .

Для модели Спаларта – Аллмараса:

модифицированная турбулентная вязкость: $\tilde{\nu} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \bar{u} \cdot I \cdot l$.

Для k-ε моделей:

турбулентная кинетическая энергия: $k = \frac{3}{2} (\bar{u} \cdot I)^2$;

скорость диссипации турбулентности: $\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l}$ или $\varepsilon = \rho C_\mu \frac{k^2}{\mu \cdot \beta'}$.

Для k-ω моделей:

удельная скорость диссипации: $\omega = \frac{\rho k}{\beta' \mu}$ или $\omega = \frac{\varepsilon}{k}$ или $\omega = \frac{k^{1/2}}{C_\mu^{1/4} \cdot l}$.

Здесь $C_\mu=0,09$.

2.7. Выход потока (Outflow)

Это ГУ используется для моделирования границы выхода потока, в случае если заранее не известны распределения скорости или давления по границе. Для этого ГУ не нужно задавать никаких условий – Fluent экстраполирует значения всех рассчитываемых величин из расчетной области. Это ГУ не может использоваться:

- если расчетная область имеет ГУ – Pressure Inlet (давление на входе), в этом случае для выходных границ нужно использовать ГУ Pressure Outlet (давление на выходе);
- если моделируется сжимаемое течение;
- если моделируется нестационарная задача с переменной плотностью, даже если поток несжимаемый, в этом случае также нужно использовать ГУ Pressure Outlet (давление на выходе);
- для мультифазных потоков.

2.8. Стенка (Wall)

Это ГУ обычно описывается как условие прилипания ($u_\tau=0$ – касательная составляющая скорости на границе) и непроницания ($u_n=0$ – нормальная составляющая скорости на границе) [2].

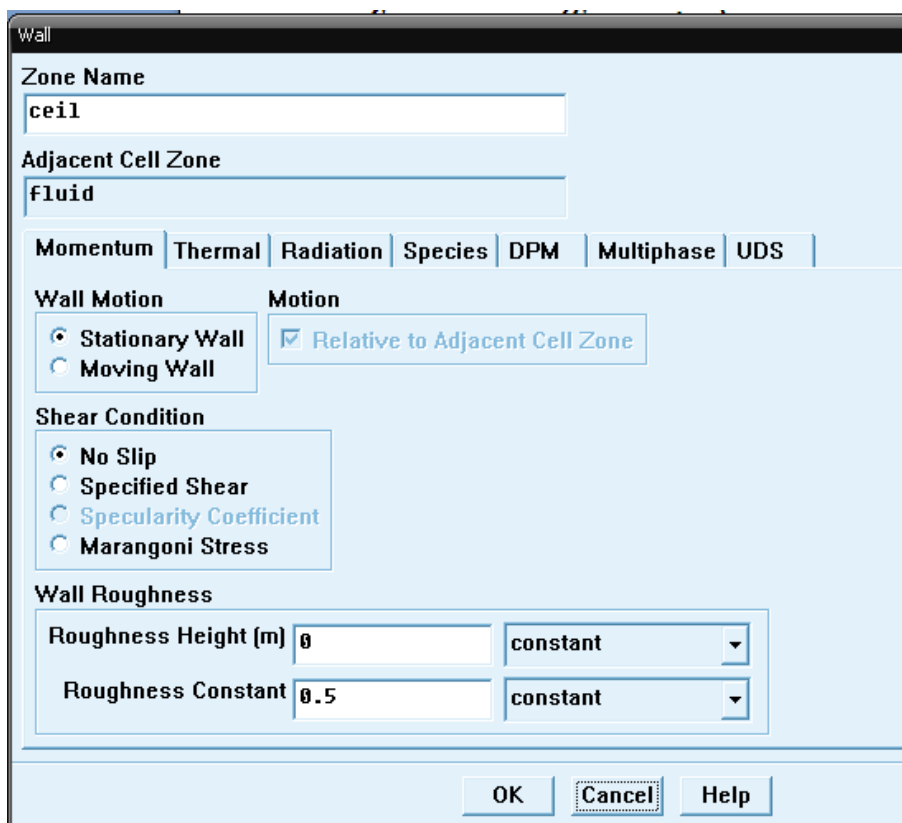


Рис. 10. Диалог ГУ «стенка». Вкладка Momentum

Во вкладке Momentum (импульс) устанавливаются – условия подвижности границы (Wall Motion), в случае если стенка не движется, необходимо оставить включенной опцию по умолчанию – Stationary Wall (стационарная стенка). В следующей группе опций на этой вкладке определяются условия сдвига на стенке (Shear Conditions). Здесь возможны следующие варианты: No Slip (условие прилипания или непроскальзывания), Specified Shear (заданный сдвиг) или Marangoni Stress (сдвиг согласно модели Марангони). По умолчанию установлено условие прилипания, которое обычно и используется. При использовании стандартных и неравновесных пристеночных функций (Standard and Nonequilibrium Wall Functions) имеется группа опций – Wall Roughness (шероховатость стенки). Здесь нужно установить значения Roughness Height (абсолютная высота шероховатости) и Roughness Constant (константа шероховатости). Высота шероховатости задается в метрах, и зависит от материала стенки. Причем если шероховатость стенки равномерная песочная, то ее значение и устанавливается в поле Roughness Height. В случае неравномерно-зернистой шероховатости в это поле следует устанавливать значение эквивалентной шероховатости. По умолчанию установлено условие гладкой стенки – высота шероховатости равна нулю.

По поводу установки значения константы шероховатости в руководстве к Fluent сказано следующее: выбор этого значения диктуется, в основном, типом шероховатости стенки. Значение, установленное в этом поле по умолчанию (0,5), выбрано так, чтобы при использовании k-ε модели турбулентности сопротивление трубы соответствовало данным Никурадзе для плотноупакованной равномерной песочной шероховатости. Для неравномерной песочной, ребристой, сетчатой шероховатости значение этого коэффициента больше и изменяется от 0,5 до 1. К сожалению, ясного руководства по выбору этого коэффициента нет. Там же указывается, что для наилучшего результата нужно, чтобы расстояние от стенки до центра первой прилежащей к стенке расчетной ячейки было больше, чем высота шероховатости.

Во вкладке Thermal устанавливаются условия для расчета теплообмена границы (Thermal Conditions) (рис. 11).

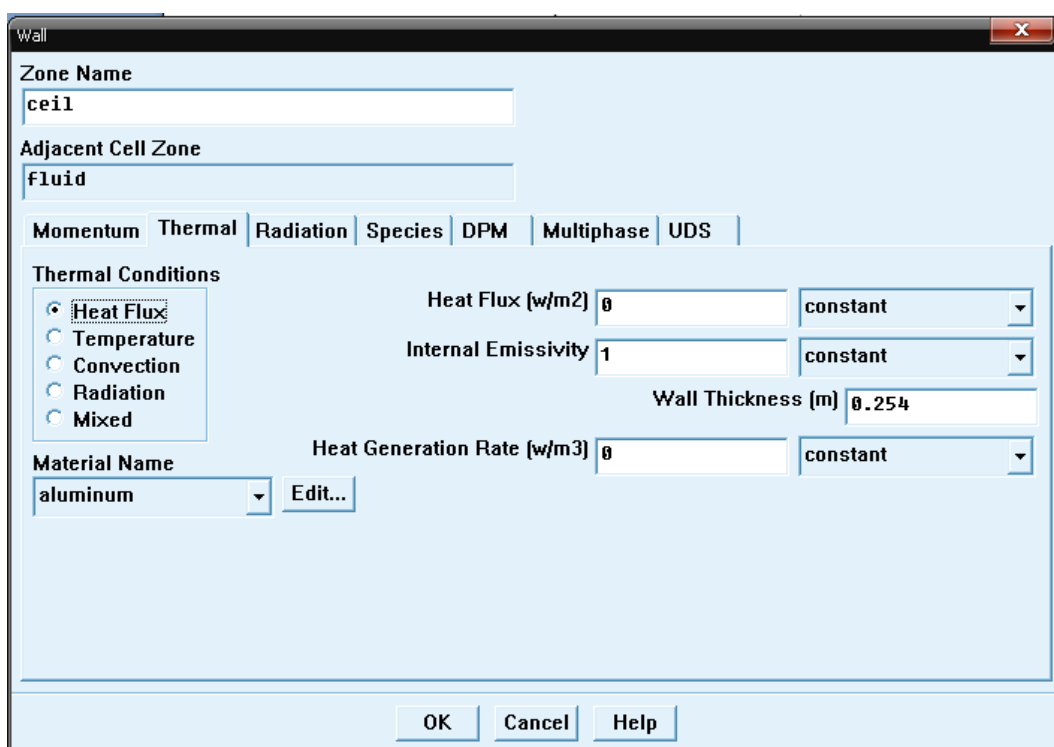


Рис. 11. Диалог ГУ «стенка». Вкладка Thermal

Возможны следующие варианты:

- Heat Flux (тепловой поток), устанавливается:
 - тепловой поток (Heat Flux) Вт/м² (в случае двухмерной задачи – размер границы направленный по нормали к плоскости задачи, равен 1 м);
- Temperature (температура), устанавливается:
 - температура (Temperature);

- Convection (наружная конвекция), устанавливается:
 - Heat Transfer Coefficient – коэффициент конвективной теплоотдачи снаружи от рассматриваемой границы (вовне расчетной области);
 - Free Stream Temperature (температура на бесконечности);
- Radiation (наружное излучение), устанавливается:
 - External Emissivity – излучательная способность поверхности рассматриваемой границы наружу;
 - External Radiation Temperature – температура тел, окружающих рассматриваемую границу снаружи;
- Mixed (смешанное условие) – смешанная наружная конвективная и лучистая теплоотдача, устанавливаются все параметры, указанные выше, для обоих типов задания границы (Convection и Radiation).

Кроме этого, для всех типов условий теплообмена устанавливаются:

- Internal Emissivity – излучательная способность внутрь расчетной области;
- Wall Thickness (толщина стенки) – если установлен не ноль, то Fluent решает одномерные уравнения теплопроводности сквозь эту границу, с коэффициентом теплопроводности материала, установленного в поле Material Name (имя материала) этой вкладки. Такая модель называется Thin Wall (модель тонкой стенки).
- Heat Generation Rate (поток выделения тепла) – выделение тепла внутри стенки, такое ГУ может использоваться, например, для моделирования полупроводниковых микросхем с внутренним выделением тепла.

2.8.1. Модель тонкой стенки (Thin Wall Model)

Использование такой модели полезно в том случае, если толщина стенки мала по сравнению с геометрией расчетной области или если не нужно знать распределение температур по толщине стенки. В противном случае необходимо моделировать толщину стенки как область, заполненную расчетной сеткой.

Для моделирования тонкой стенки нужно установить ненулевую толщину границы в панели установки параметров ГУ «стенка», а также выбрать материал.

Термические параметры ГУ в этом случае задаются для «внутренней» (inner) поверхности, т.е. той, которая обращена в обратную от расчетной области сторону. Та поверхность, которая обращена к расчетной области, называется «внешней» (outer).

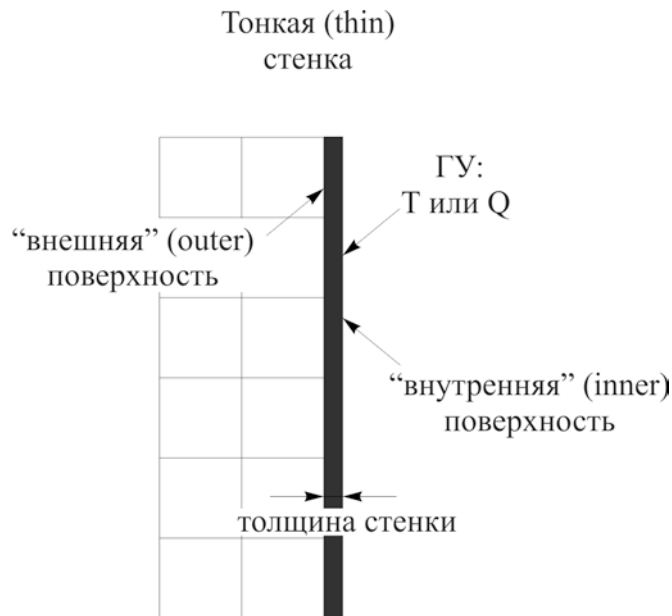


Рис. 12. Модель тонкой стенки

Параметры на «внешней» поверхности вычисляются из одномерных уравнений теплопроводности.

2.8.2. Модель двухсторонней стенки (Two-Sided Wall)

В случае если граница с ГУ «стенка» находится не на краю расчетной области, т.е. с обеих сторон от стенки находятся ячейки расчетной сетки, такая стенка называется двухсторонней (two-sided). В этом случае при загрузке расчетной сетки Fluent вдоль такой двухсторонней границы автоматически создает дополнительную границу, которая называется Shadow (тенивая), и ее название состоит из названия этой границы с добавлением слова «shadow». Пользователь может выбрать два варианта задания термических условий для такой границы – отдельные или спаренные (Coupled).

- Для объединения двух сторон стенки, нужно выбрать опцию Coupled (спаренные) в термических условиях (Thermal Conditions). Эта опция появляется только в случае, если рассматривается двухсторонняя стенка. Никаких дополнительных условий для теплообмена в этом случае задавать не нужно. Солвер сам рассчитает теплообмен, исходя из решения задачи в расчетной области. Однако можно задать толщину стенки и ее материал, а также поток тепла для источника внутри стенки.
- Не включая опцию Coupled, можно задать различные условия теплообмена для каждой стороны стенки. При этом доступны ГУ – температура и тепловой поток. Здесь, как и во всех других случаях, можно задавать ненулевые толщины стенок и их материалы. В этом случае задаваемые на границе температура или тепловой поток будут

относиться к «внутренним» поверхностям стенок (рис. 13). На рисунке расстояние между двумя тонкими стенками показано условно.

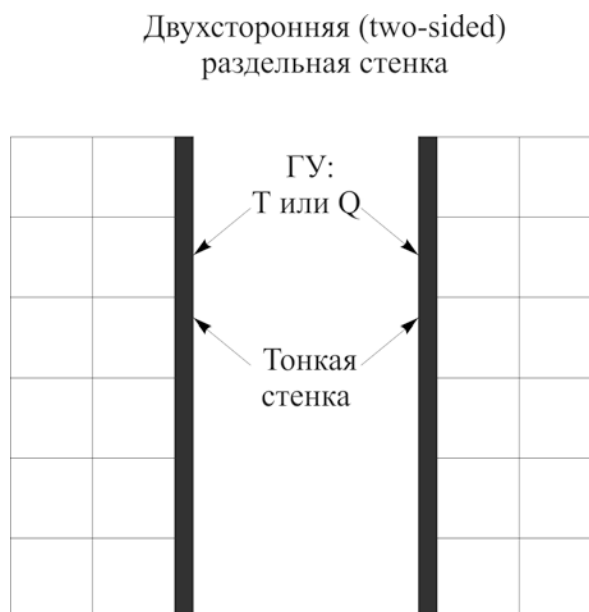


Рис. 13. Модель двухсторонней стенки

2.9. Симметрия (Symmetry)

ГУ используется, когда половина геометрии задачи, и ожидаемой картины исследуемого явления, имеет зеркальную симметрию. Кроме того, может использоваться при моделировании стенки с проскальзыванием (нулевым сдвигом). Fluent не считает никаких потоков (конвективных, диффузионных, потоков жидкости и т.д.) сквозь эту границу. То есть скорость по нормали к этой границе равна нулю, и градиенты всех величин к этой границе также равны нулю – $u_n=0$ и $\partial u_n/\partial x=0$. Кроме того, поскольку скорость симметрична относительно этой границы – $\partial u_\tau/\partial y=0$ [2].

Никаких условий для этой границы не задается.

2.10. Ось (Axis)

ГУ используется для определения границы, выполняющей роль оси в осесимметричных задачах. Никаких условий для этой границы не задается.

2.11. Пристеночное моделирование

При моделировании вязкого пограничного слоя у стенки во Fluent используется два подхода – Wall Functions (пристеночные функции) и Enhanced Wall Treatments (EWT, расширенное пристеночное моделирование).

В первом подходе в области вязкого пограничного слоя вблизи стенки решаются специальные полуэмпирические уравнения – пристеночные функции. В другом подходе используемые при решении модели турбулентности модифицируются специальным образом, чтобы учесть влияние стенки. Соответственно, в первом случае пристеночная область не должна быть хорошо разрешена мелкой сеткой. Более того, чересчур мелкая сетка в пристенной области может привести к неправильному результату. При использовании EWT, наоборот, расчетная сетка в пристеночной области должна быть достаточной мелкой, поскольку в этой области также решаются уравнения Рейнольдса.

Пристеночные функции используются в случае, когда исследуется течение, на которое присутствие стенки не оказывает существенного влияния, например, для высокорейнольдсных течений. Во Fluent имеются пристеночные функции двух типов: стандартные (Standard Wall Functions – SWF) и неравновесные (Non-Equilibrium Wall Functions – NWF). SWF можно использовать, в основном, если для исследуемого течения можно использовать допущение локального равновесия турбулентности (производство турбулентности совпадает с ее диссипацией). Допущение о локальном равновесии нарушается, если в течении существуют: большие градиенты давления; большие массовые силы; изменение свойств жидкости у стенки; впрыскивание через стенку. NWF расширяет область применения пристеночных функций за счет частичного учета градиентов давления, возникающих вблизи стенки, и эти пристеночные функции можно использовать для расчета течений с отрывом потока.

Тем не менее, для сложных течений, в которых могут наблюдаться существенные трехмерные потоки, низкорейнольдсные течения, пристеночные эффекты (высокая вязкость потока или очень малая скорость в пристеночной области), большие градиенты давления, приводящие к отрывам потоков, большие поверхностные силы (течение у вращающегося тела, свободно-конвективные потоки), необходимо использовать пристеночное моделирование (EWT) и соответствующую мелкую сетку вблизи стенки.

Нужно отметить, что выбор вида пристеночного моделирования и мелкости пристеночной сетки, как и выбор модели турбулентности, является одним из пунктов при настройке (и дальнейшей верификации) численной схемы конкретной задачи. Поэтому наиболее правильным является проверка влияния пристеночного моделирования на результаты численного исследования и, конкретно, на характеристики изучаемого течения и выбор наиболее адекватного путем сравнения результатов решения тестовой задачи с ранее известными данными.

2.11.1. Требования для сетки в пристеночной области

Для правильного расчета турбулентного течения в целом необходимо как можно более точное определение всех характеристик течения в областях, где они сильно изменяются, а также напряжений сдвига на стенках. Для этого расчетная сетка в этих областях должна быть достаточно мелкой. Для проверки пристеночной сетки существуют величины y^* и y^+ , значения которых можно узнать командой построения контуров (см. раздел 6.2 Постпроцессинг. Визуализация), выпадающее меню Contours of...->Turbulence.

При использовании пристеночных функций нужно, чтобы величина y^+ была около 30 и в погранслое находилось несколько ячеек. Следует избегать сильного растягивания ячеек в направлении нормальном к стенке.

При использовании расширенного пристеночного моделирования значение $1 < y^+ < 4\div 5$.

При использовании модели турбулентности Спаларта – Аллмараса (низкорейнольдской модели турбулентности) пристеночное моделирование не используется. При этом если для расчета используется грубая сетка (нужно чтобы $y^+ \sim 30$), а в случае использования мелкой сетки $y^+ \sim 1$.

Также и обе используемые в Fluent $k-\omega$ являются низкорейнольдскими. При включенной опции Transitional Flows требования к сетке как при EWT, а при выключенной – как для пристеночных функций.

При использовании LES- модели турбулентности для моделирования граничных условий применяется специальный подход, тем не менее, для лучшего результата рекомендуется использовать более мелкую сетку ($y^+ \sim 1$).

2.12. Инструмент Profile

Этот инструмент позволяет использовать в качестве ГУ любой величины профиль, прочитанный из файла и полученный в результате эксперимента, расчета другой программой или другого расчета в программе Fluent с использованием команды меню File->Write->Profile...

2.12.1. Типы задания профиля

Доступно пять типов задания профиля.

Point (точечный) профиль задается в виде неупорядоченного ряда из n точек: (x_i, y_i, v_i) для 2d задач или (x_i, y_i, z_i, v_i) для 3d, $1 \leq i \leq n$. Профили, записанные из Fluent (команда File -> Write -> Profile...) или созданные на основе экспериментальных данных, имеют этот тип.

Для определения значений величин в узлах расчетной сетки Fluent, при решении, интерполирует значения величин, заданные в профиле. Причем используется так называемая интерполяция нулевого порядка, т.е. в качестве значения в узле сетки принимается значение заданного профиля в точке наиболее близко расположенной к искомой точке расчетной сетки. Поэтому

для более точного расчета нужно, чтобы количество точек в задаваемом профиле соответствовало количеству узлов в расчетной сетке на этой границе.

Кроме этого, доступно еще 4 типа задания профиля: Line (линейный), Mesh (сеточный), Radial (радиальный) и Axial (осевой), описание которых имеется в руководстве к Fluent.

2.12.2. Формат файла для задания профиля

Файл может содержать произвольное количество профилей. Каждый профиль может содержать произвольное количество определяемых параметров. Каждый профиль состоит из заголовка, который определяет имя профиля (profile name), тип профиля – profile type (point, line, mesh, radial, axial), и цифры, означающей количество точек в профиле – n. Затем следуют поля – наборы значений, обозначающих координаты точек, сначала, например, для случая декартовой системы и 2d задачи следуют подряд все координаты x, потом y, а далее следуют значения определяемых в профиле параметров (например, x и y компоненты скорости – x_velocity, y_velocity).

Скобки в файле служат разделителем профилей между собой, а также полей внутри профиля. Любая комбинация пробелов, табуляций и знака перевода каретки служат разделителем для элементов полей.

2.12.3. Создание файла профиля

Файл может быть создан на основе заранее известного распределения величин по границе, в любом текстовом редакторе, с использованием правил, приведенных выше.

Пример записи файла профиля, состоящего из 5 точек для x и y, составляющих скорости по вертикальной границе, имеющей координаты: $x=0$, $0 < y < 0,25$, с названием «left»:

```
((left point 5)
(x 0 0 0 0)
(y 0 0.0625 0.125 0.1875 0.25)
(x_velocity 0.05 0.1 0.2 0.1 0.05)
(y_velocity 0.02 0.01 0 -0.01 -0.02))
```

Кроме того файл может быть создан на основании расчета проведенного в Fluent. В этом случае необходимо выбрать пункты меню: File->Write->Profile... После чего в открывшемся окне в списке Surfaces (поверхности) (слева) выбрать границу, распределение величин по которой будет записано в файл.

В списке Values (величины) (справа) выбрать те параметры которые необходимо выгрузить в файл профиля, и затем нажать на кнопку Write... (запись), и выбрать место и имя для сохраняемого файла.

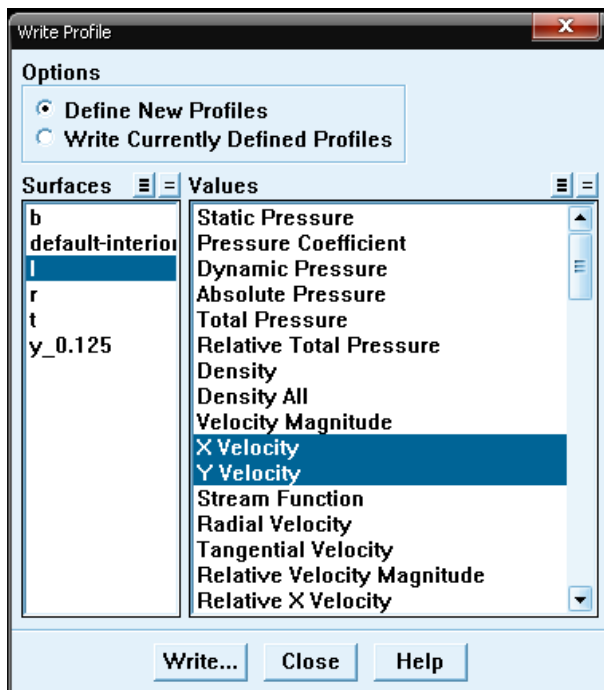


Рис. 14. Диалог записи профиля в файл

2.12.4. Использование инструмента Profile

Последовательность использования такого ГУ следующая:

- создать файл с профилем;
- прочитать файл с профилем в Fluent: File->Read->Profile...;

если чтение файла профиля прошло успешно, то в основном окне Fluent появится надпись о параметрах профиля. Например, при загрузке рассмотренного выше профиля выдается следующее сообщение:

Reading profile file...

5 "left" point-profile points, x, y, x_velocity, y_velocity.

- установить ГУ. В окне установки ГУ параметры, определенные в профиле, становятся доступными в выпадающем списке справа от каждого параметра.

К примеру, для задачи о течении воздуха в плоском канале шириной 0,25м и 20 м в длину установка для левой границы (с названием «l») в качестве ГУ соответствующих профилей будет выглядеть так:

Define-> Boundary Conditions...

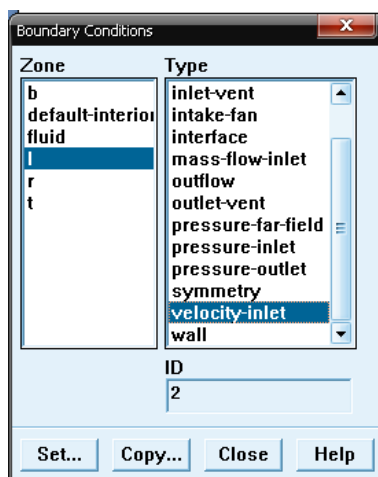


Рис. 15. Диалог выбора ГУ для границы «1»

И далее

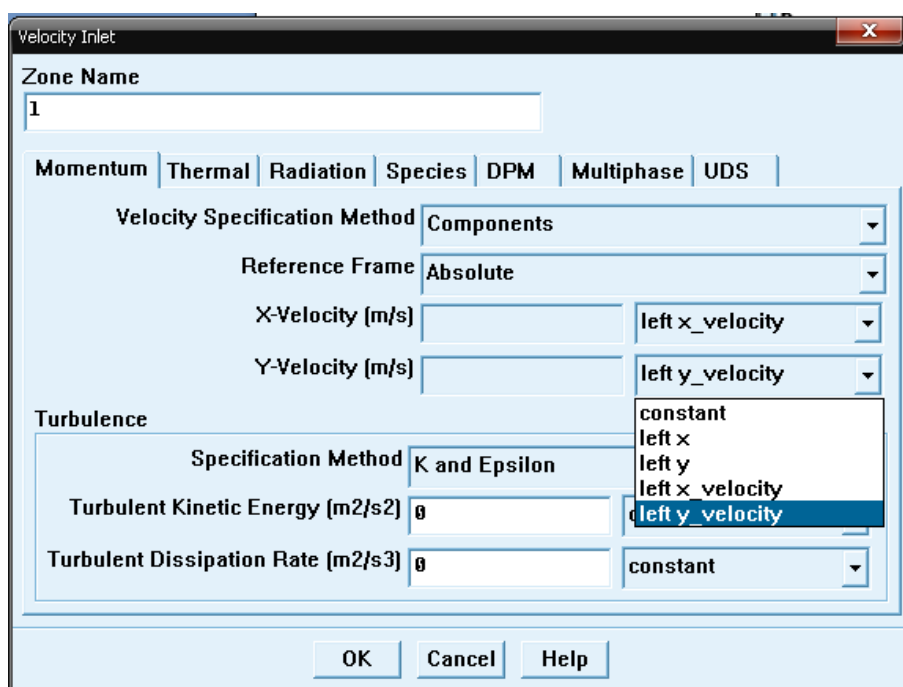


Рис. 16. Диалог настройки ГУ Velocity Inlet

После решения этой задачи для входной границы получается следующая картина векторов скорости (рис. 17). Здесь можно увидеть пять участков границы с заданными в файле профилями скоростями – как по модулю, так и по направлению.

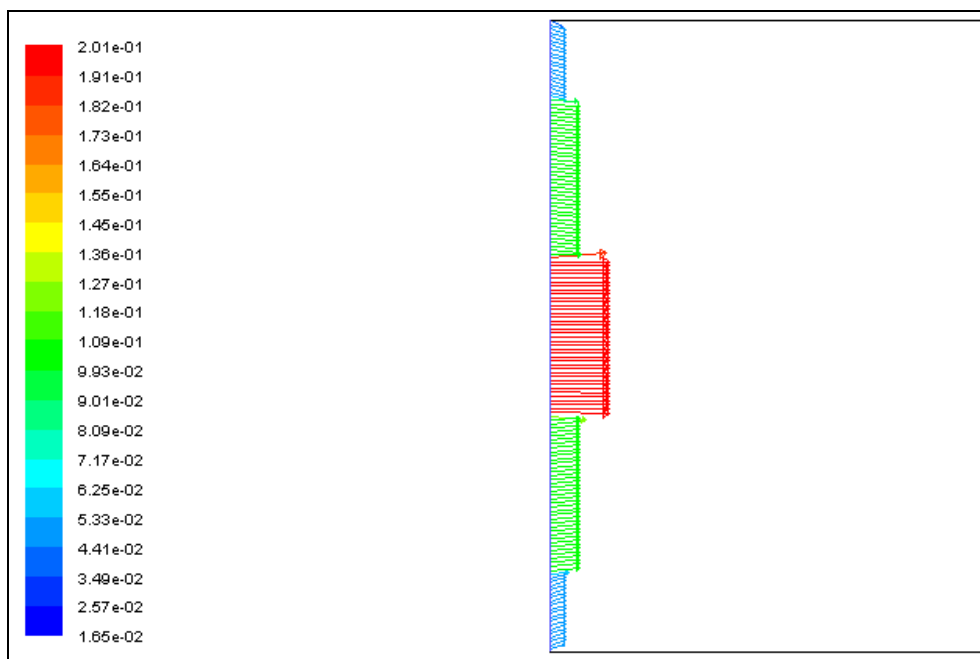
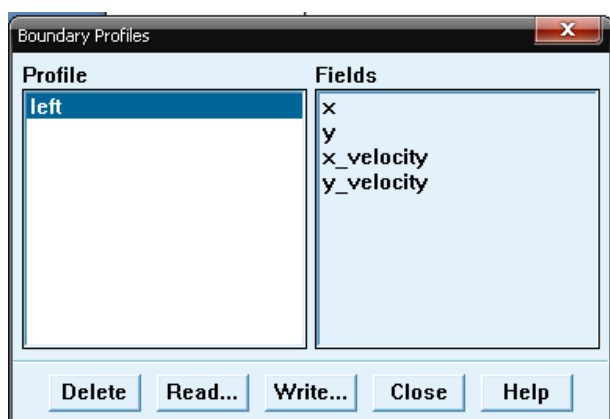


Рис. 17. Векторы скорости на входной границе при использовании инструмента Profile

2.12.5. Проверка и удаление профилей

Инструмент для управления уже загруженными профилями:
Define-> Profiles...



В левой части диалога – Profile указаны загруженные профили, в правой (Fields) – имеющиеся в этом профиле поля величин. Кнопки Read... и Write... позволяют загружать и сохранять профили, а кнопка Delete – удалять загруженный профиль.

Рис. 18. Диалог управления загруженными профилями

3. ПРОВЕДЕНИЕ РЕШЕНИЯ

3.1. Настройка проведения решения (Controls Solution)

Перед началом решения задачи необходимо установить основные параметры проведения решения в диалоговом окне Solution Controls:

Solve->Controls->Solution...

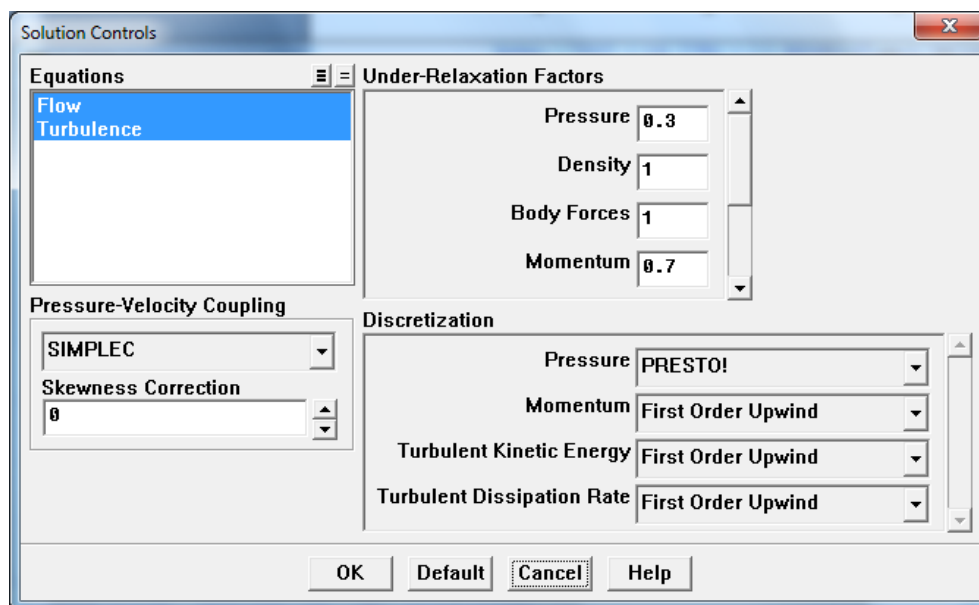


Рис. 19. Диалог настройки проведения решения

Здесь в списке Equations (уравнения) показываются те уравнения, которые будут участвовать в решении. Для временного отключения уравнений из расчета в этом списке нужно убрать выделение с нужного уравнения. При надобности далее можно опять включить решение данного уравнения, выделив нужный пункт в списке. Более подробно о пошаговой процедуре решения можно узнать из руководства к Fluent.

Список Under-Relaxation Factors содержит коэффициенты релаксации (к.р.) для всех уравнений, решаемых в отдельном решателе (Segregated Solver), в поле напротив названия каждого уравнения можно установить необходимое значение. Установленные по умолчанию значения к.р. обычно позволяют добиться хорошей сходимости решения. В некоторых случаях, когда в процессе итераций имеется ярко выраженное отличие в скорости сходимости различных уравнений, которая в итоге приводит к неустойчивости итерационного процесса (или его расхождению), имеет смысл уменьшить значения к.р. у уравнений, сходящихся быстрее остальных.

Правильной стратегией подбора к.р. является проведение первых нескольких итераций решения с к.р., установленными по умолчанию. В случае если невязки растут, необходимо уменьшить соответствующие к.р.,

предварительно сохранив файлы задачи. Также возможен вариант, который рекомендует руководство к Fluent: уменьшить к.р. для уравнений давления (Pressure), импульса (Momentum), k и ε от их, установленных по умолчанию значений, до значений 0,2; 0,5; 0,5 и 0,5 соответственно. Кроме того, в задачах, у которых сильно связаны изменения плотности и температуры (задачи о свободной конвекции, с высоким числом Ra), может быть полезно уменьшить и к.р. для энергии (Energy) и плотности (Density).

Часто уменьшение к.р. приводит вначале к некоторому увеличению невязок, но в дальнейшем ведет к общему уменьшению невязок и более устойчивому итерационному процессу. В некоторых же случаях невязки могут резко увеличиться и привести к расхождению итерационного процесса. В этом случае необходимо остановить задачу, вернуться к последнему успешному варианту решения задачи (ранее сохраненному файлу) и выбрать другой вариант изменения к.р.

Для того чтобы вернуть значения к.р. к значениям по умолчанию, нужно нажать кнопку Default (по умолчанию), если же затем понадобится вернуться к установленным ранее значениям к.р., нужно нажать кнопку Reset (восстановление), которая появится вместо кнопки Default.

3.1.1. Дискретизация (Discretization)

При решении Fluent сохраняет значения найденных в результате решения системы уравнений величин в центрах ячеек расчетной сетки. В то же время для определения конвективных членов солверу необходимы значения этих величин в узлах и на гранях расчетных ячеек. Для определения этих значений выполняется интерполяция, которая производится «вверх по потоку» (upwind). Это означает, что для определения нужного значения на границе расчетной ячейки выбираются значения в центрах ячеек, находящихся вверх по потоку, с учетом нормальной скорости потока в этих ячейках.

Fluent дает возможность пользователю выбирать схему дискретизации конвективных членов каждого уравнения основной системы уравнений – First Order Upwind (первого порядка точности вверх по потоку), Second Order Upwind (второго порядка точности вверх по потоку), Power Law (степенного закона), QUICK, MUSCL третьего порядка. Также необходимо выбрать (для решателя на основании уравнения коррекции давления – Pressure-based Solver) схему интерполяции уравнения коррекции давления (Standard, PRESTO!, Linear, Second Order).

По умолчанию для всех уравнений в Fluent установлены схемы дискретизации первого порядка точности, использование которых обычно приводит к более быстрому схождению итерационного процесса. Такая схема точна, в случае если поток направлен по расчетной сетке (например, ламинарное течение в прямоугольном канале, с четырехугольной или

гексагональной сеткой). В случае если поток направлен не по сетке, применение схемы первого порядка увеличивает ошибку численной дискретизации (увеличивает численную диффузию). При использовании треугольных и тетраэдрических сеток поток никогда не направлен вдоль расчетной сетки, поэтому более точные результаты будут получаться при использовании схемы второго порядка. Для прямоугольных и гексагональных сеток также можно получить более точный результат, если использовать схему второго порядка, особенно для сложных течений.

Обычно, особенно если начальное течение (нулевое приближение) сильно отличается от итогового решения, имеет смысл несколько первых итераций решить с использованием схемы первого порядка, а затем продолжать решение задачи, включив схему второго порядка. Но если имеются проблемы со сходимостью итерационного процесса при использовании схемы второго порядка, нужно использовать схему первого порядка точности.

Кроме рассмотренных, в Fluent имеются схема QUICK (Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinematics) и схема третьего порядка MUSCL (Monotone Upstream-centered Schemes for Conservation Laws). Схема QUICK применима для четырехугольных и гексагональных сеток, в то время как MUSCL – для любых. В общем схема второго порядка достаточна и какого-либо существенного увеличения точности применение схемы QUICK обычно не приносит. Еще имеется степенная (Power Law) схема, но она обычно имеет тот же порядок точности, что и схема первого порядка.

При использовании моделей турбулентности LES и DES используются схемы – bounded central differencing (BCDS) и central differencing (CDS). По умолчанию используется BCDS, а CDS должна использоваться только в случае, если сетка достаточно мелкая, такая, что величина локального числа Пекле меньше 1.

По умолчанию, в качестве схемы интерполяции уравнения коррекции давления, установлена Standard (стандартная схема). Эта схема хорошо работает, когда изменение давления между центрами расчетных ячеек происходит плавно. Когда у течения имеются скачки или большие градиенты импульса, профиль давления на гранях расчетных ячеек имеет большой градиент и не может интерполироваться с использованием этой схемы. Неадекватность получаемого решения в этом случае проявляется в резких скачках скорости в расчетных ячейках. Обычно это потоки с большими объемными силами, сильно закрученные потоки, естественно-конвективные потоки с высоким числом Ra и т.п. В этих случаях необходимо измельчать расчетную сетку в местах больших градиентов давления.

Другой источник ошибок – это предположение о том, что градиент давления по нормали к стенке равен нулю. Это предположение верно для пограничных слоев, но не при наличии завихрений или объемных сил.

В Fluent имеется несколько альтернативных схем интерполяции для случаев, когда стандартная схема неприменима.

Linear – линейная схема, схема второго порядка – несколько более улучшенная, по сравнению со стандартной и линейной, но может приводить к некоторым проблемам в сходимости итерационного процесса, если использовать ее с самого начала расчета или на грубой сетке.

Body-Force-Weighted (взвешенных объемных сил) работает хорошо, когда объемные силы известны заранее и заданы в уравнении импульсов.

Схема PRESTO! (PREssure STaggering Option).

Альтернативные схемы рекомендуются:

- для течений с большими объемными силами – Body-Force-Weighted Scheme;
- для сильно закрученных потоков, свободно-конвективных с большим числом Ra , потоков в пористых средах, и потоков в сильно изогнутых областях – PRESTO!;
- для течений сжимаемой жидкости – Second Order Scheme;
- для всех случаев, когда неприменимы другие схемы, рекомендуется использование – Second Order Scheme.

3.1.2. Алгоритмы связывания полей скорости и давления (Pressure-Velocity Coupling Method)

Fluent для разделенного решателя (Segregated Solver) предоставляет несколько алгоритмов – SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations), модификация SIMPLER (SIMPLE-Consistent), PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) и FSM (Fractional Step Method) для нестационарных течений при использовании схемы NITA (Non-Iterative Time Advancement). Обычно для стационарных течений используются SIMPLE и SIMPLER- алгоритмы, а для переходных – PISO. Также PISO может использоваться и для стационарных течений при решении на сильно скошенных сетках.

При решении относительно несложных течений (например, ламинарных потоков, без включения дополнительных моделей), в которых сходимость ограничена из-за связки полей давления и скорости, можно добиться более быстрой сходимости при использовании SIMPLER-алгоритма, при этом коэффициент релаксации уравнения коррекции давления можно установить равным 1, что приведет к увеличению скорости сходимости итерационного процесса. Однако в некоторых задачах увеличение этого коэффициента релаксации может привести к потере устойчивости итерационного процесса из-за сильной скошенности сетки. В этом случае нужно использовать схемы коррекции скошенности (Skewness Correction), меньшие значения коэффициента релаксации (например 0,7) или использовать алгоритм SIMPLE.

Алгоритм PISO со схемой Neighbor Correction (местной коррекции) рекомендуется для всех задач о течениях в переходных (неустановившихся) режимах, особенно если планируется использовать большой шаг по времени. Для решения задач с использованием LES- модели турбулентности (обычно используется малый шаг по времени) рекомендуется использовать алгоритмы SIMPLE или SIMPLEC. При этом возможно использование релаксационных коэффициентов уравнений импульса и давления равных единице. При решении стационарных задач алгоритм PISO с местной коррекцией не дает сколько-нибудь значимых преимуществ перед алгоритмами SIMPLE и SIMPLEC с оптимально настроенными коэффициентами релаксации.

При использовании алгоритма PISO с местной коррекцией рекомендуемые значения коэффициентов релаксации для всех уравнений – единица или значения близкие к единице. Если же алгоритм PISO используется только с коррекцией скошенности (Skewness Correction), но при этом сетка сильно искажена, необходимо устанавливать коэффициенты релаксации по давлению и импульсу так, чтобы их сумма была равна единице (например, по давлению 0,3, а по импульсу 0,7). Если используются оба метода коррекции, то нужно пользоваться рекомендациями для местной коррекции.

Для большинства течений нет необходимости выключать опцию Skewness-Neighbor Coupling (связывание методов коррекции), однако для сильно искаженных сеток эту опцию рекомендуется выключить.

3.2. Визуализация хода решения

Во время проведения итерационного процесса нужно наблюдать за процессом схождения, а также за картиной течения.

3.2.1. Монитор невязок

Процесс схождения контролируется путем наблюдения за изменением величины невязок в ходе итерационного процесса. Настройка окна вывода невязок вызывается командой меню Solve->Monitors->Residual...

Здесь в группе Options (опции) опция Print (печать) включает вывод значений невязок в основное окно программы, а опция Plot (график) включает вывод значений в виде графика. Удобнее включить обе эти опции. В группе Plotting (построение) в поле Window (окно) указывается номер окна, в котором будет производиться построение невязок в виде графика (оставить по умолчанию 0). В группе Normalization (нормализация) опция Scale (масштабировать) представляет невязки в виде отношения абсолютной величины невязки к коэффициенту нормализации (масштабирования). По умолчанию этот коэффициент равен максимальному значению невязки, взятому из первых пяти итераций. По умолчанию данная опция включена. Опция Normalize (нормализовать) позволяет вручную ввести коэффициенты

нормализации или взять их из n -й итерации, значение n также можно ввести вручную. При $n=5$ опции Scaled и Normalize эквивалентны.

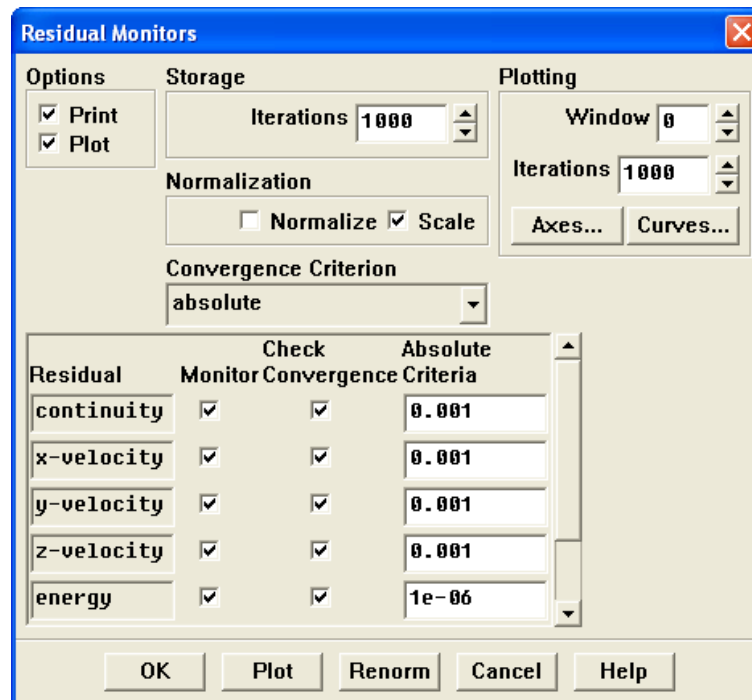


Рис. 20. Диалог настройки монитора невязок

В выпадающем списке Convergence Criterion (критерии схождения) указывается тип проверки решения на схождение:

- absolute (абсолютные критерии). Это значение по умолчанию. В случае решения стационарной задачи для выбора доступен тип absolute и none (без проверки). Невязки каждого уравнения (масштабированные или/и нормализованные) на каждой итерации сравниваются с заданным пользователем значением (поле Absolute Criteria). Если невязка меньше, то решение уравнения считается сошедшимся.

- relative (относительные критерии). Невязка уравнения в каждой итерации каждого шага по времени сравнивается со значением невязки вначале текущего шага по времени. Если отношение двух невязок меньше заданной пользователем величины, решение уравнения считается сошедшимся.

- relative or absolute (относительные или абсолютные критерии). В этом и предыдущем случае появляется колонка для задания значений относительных невязок. Если любой из этих критериев достигнут решение уравнения считается сошедшимся.

- none (без проверки). Проверка схождения отключена.

Во многих случаях использование абсолютного критерия сходимости может приводить к излишне большому количеству итераций внутри шага по

времени. К примеру масштабирование уравнения неразрывности производится по первым пяти итерациям. Масштабный коэффициент может быть низким, если с самого начала итераций невязки очень низкие. В этом случае использование абсолютного критерия приведет к невозможности схождения решения внутри шага по времени. С использованием относительного критерия такая проблема исчезает. Использование типа критерия – относительный и относительный или абсолютный – полезно, когда невязки уже вначале шага по времени имеют низкие значения. Использование этих типов возможно только при решении нестационарных задач.

После установки критериев сходимости (обычно для стационарных задач устанавливается абсолютный критерий со значением 0,0001 для всех уравнений, кроме уравнений энергии и лучистого теплообмена, для них оставляется значение по умолчанию – $1 \cdot 10^{-6}$) необходимо нажать кнопку Plot (построить) для включения окна, где будут отображаться невязки, и далее кнопку Ok для закрытия окна диалога.

3.2.2. Анимация решения

При решении задач, чтобы оценить адекватность получающегося в результате решения течения, возникает необходимость видеть, каким образом изменяются поля величин уже во время итерационного процесса. Это осуществляется при помощи диалога Solution Animation (анимация решения), который вызывается следующей строкой в меню:

Solve->Animate->Define...

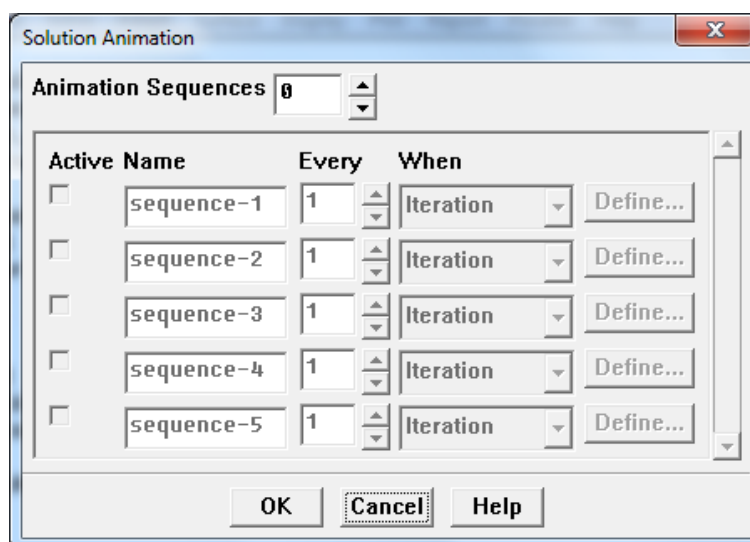


Рис. 21. Диалог анимации решения

В этом диалоге нужно установить Animation Sequences (количество анимационных картин), а также частоту обновления картины – поле Every. Картину можно обновлять каждые несколько (от 1 и более) итераций

(Iteration) или шагов по времени (Time Step) в случае решения нестационарной задачи. Для настройки анимации напротив соответствующей анимационной картины нужно нажать кнопку Define. Появится диалоговое окно (рис. 22) настройки анимационных картин – Animation Sequence.

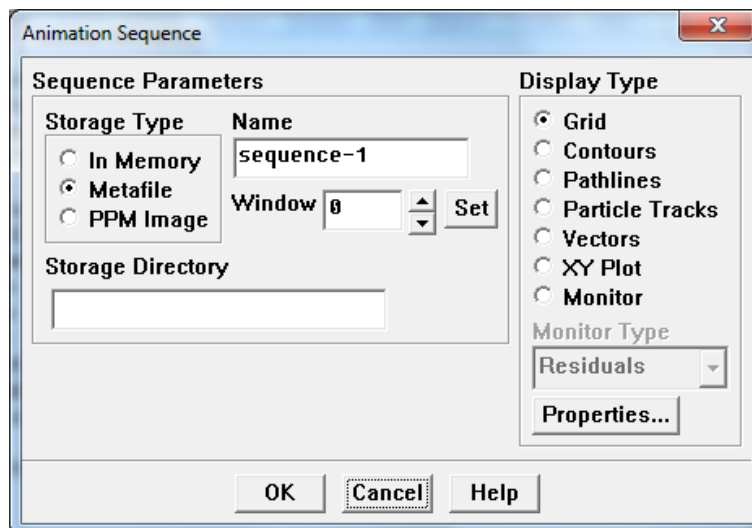


Рис. 22. Диалог настройки анимационных картин

Группа параметров анимационных картин – Sequence Parameters: Storage Type (тип хранения получаемой картины) – In Memory (в памяти компьютера) – не рекомендуется, так как изображения хранятся в оперативной памяти, которая может через некоторое время работы переполниться; Metafile (в виде метафайла) и PPM Image (в виде растрового изображения). В двух последних случаях необходимо в поле Storage Directory указать путь для хранения получающихся файлов.

Для того, чтобы иметь возможность наблюдать за анимацией, но не сохранять полученные файлы ни в оперативную память, ни на жесткий диск, нужно выбрать один из двух последних вариантов и в поле Storage Directory указать путь с несуществующим на компьютере диском (например «X:\», если на компьютере нет диска X). В этом случае Fluent будет пытаться записать файл и будет выдавать ошибку, но на решение задачи это никак не повлияет. В случае же если будет указан реальный путь, в эту папку будут сохраняться соответствующие кадры анимационных картин, которые после остановки решения можно будет просмотреть с помощью диалогового окна Playback, вызываемого по команде меню Solve-> Animate->Playback... Кроме того, файлы типа PPM легко распознаются основными графическими редакторами, а также могут быть использованы для создания видеофайла. Видеофайл может быть также создан и при помощи диалогового окна Playback.

В поле Window (окно) указывается номер окна, в которое будет выводиться изображение. Обычно ранее настроенное отображение невязок (Residuals) показывается в окне номер 0, поэтому анимационные картины нужно отображать в окнах номер 1 и более.

В группе опций Display Type (тип отображения) нужно выбрать тип отображаемой информации: Grid (сетка); Contours (контуры); Vectors (векторы) и др. При выборе одного из типов открывается соответствующее окно настройки отображения (рассматриваются в разделе 6.2 «Визуализация»). После настройки в диалоге настройки отображения нужно нажать кнопку Display или Plot для инициализации окна отображения.

Если настройка уже произведена, то для повторного вызова диалога настройки отображения нужно нажать кнопку Properties (свойства).

После настройки анимации нужно нажать кнопку Ok (рис. 22). И далее опять Ok (рис. 21).

3.3. Инициализация решения

После установки схемы численного решения – ГУ, физических моделей, методов дискретизации и т.д., а также настройки визуализации хода решения, необходимо провести инициализацию – задание начальных условий (нулевого приближения).

Для обеспечения сходимости итерационного процесса важно задавать начальные условия как можно ближе к итоговому решению. Поскольку оно заранее не известно, здесь важно указать наиболее адекватные значения величин.

Здесь возможно два подхода – задание начальных условий для всей расчетной области или для отдельных областей. При первоначальном решении задают начальные условия для всей расчетной области:

Solve->Initialize->Initialize...

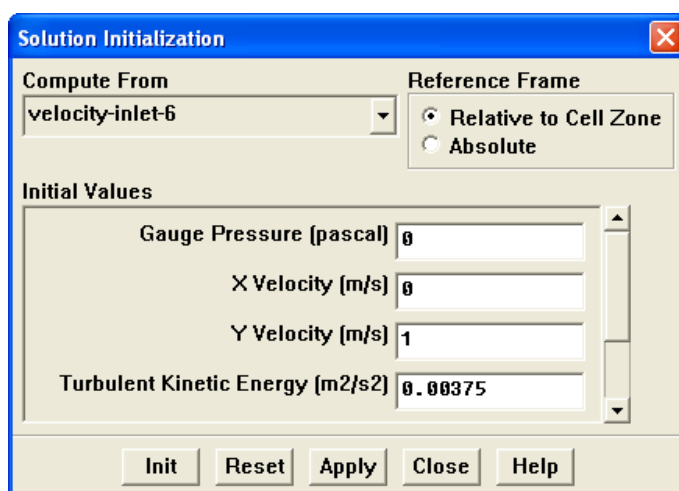


Рис. 23. Диалог инициализации решения

Здесь в группе Initial Values (начальные значения) указываются значения всех входящих в решаемые уравнения величин. Причем задавать их можно тремя способами: вводить значение для каждой величины вручную в соответствующее поле, определить начальные значения из значений на какой-либо границе области, либо определить начальные значения из средних значений по всем границам расчетной области. В двух последних случаях необходимо воспользоваться выпадающим списком Compute From (рассчитать из), где указать либо конкретную границу, значения которой будут выбраны в качестве начальных, либо выбрать пункт all-zones (все зоны) для расчета средних значений.

В случае подвижных зон нужно указать: введенные начальные скорости имеют абсолютное значение или относительное (группа опций Reference Frame).

Для проведения процедуры инициализации нужно нажать кнопку Init, при этом также сохраняются все введенные в этом диалоговом окне значения. Кнопка Apply сохраняет введенные значения без инициализации. Кнопка Reset позволяет вернуть все исходные значения.

После инициализации (при первоначальной настройке решения) необходимо сохранить задачу: File->Write-> Case&Data... Этот пункт меню становится активным сразу после инициализации задачи. В файле Case хранится геометрия, расчетная сетка, ГУ, параметры решения и настройки графики и интерфейса. В файле Data хранятся значения всех рассчитываемых в процессе решения задачи величин во всех узлах расчетной сетки, а также история итерационного процесса (невязки). При инициализации во все узлы расчетной сетки записываются начальные значения всех величин.

3.4. Запуск итераций

После инициализации можно приступить непосредственно к итерационному процессу: Solve->Iterate... При расчете стационарного течения диалог выглядит следующим образом: рис. 24.

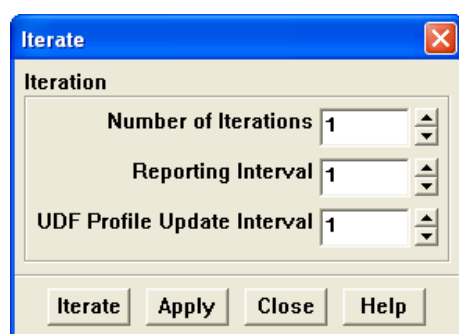


Рис. 24. Диалог Iterate

В поле Number of Iterations (число итераций) нужно указать количество итераций (можно указать заранее большое число, например, 100000). Если расчет производится первый раз, то солвер начнет с первой итерации и в качестве нулевого, приближения примет значения величин введенных при инициализации. В случае если расчет задачи уже проводился, то Fluent продолжит

расчет с последней итерации, взяв в качестве начальных значений результаты предыдущего решения.

По умолчанию Fluent будет выводить результаты расчетов невязок каждую итерацию, увеличить этот интервал можно задав соответствующее значение в поле Reporting Interval (интервал отчета). Нужно иметь в виду, что и следить за сходимостью итерационного процесса Fluent будет тоже согласно установленному интервалу. К примеру, если решение достигло сходимости за 40 итераций, а интервал отчета установлен 50, то и решение остановится лишь на 50-й итерации.

Итерационный процесс запускается нажатием кнопки Iterate, после которой появляется окно с надписью Working... и кнопкой Cancel (отмена). Нажатием кнопки отмена можно оборвать итерационный процесс до достижения сходимости. В случае достижения невязок, заданных в диалоге настройки невязок значений, процесс будет остановлен, а в основном окне программы будет выведено сообщение – Solution Converged (решение сошлось).

Если при расчете используются UDF, то по умолчанию Fluent на каждой итерации пересчитывает пользовательские функции, в случае если это не нужно, можно увеличить интервал в поле UDF Profile Update Interval.

4. АДАПТАЦИЯ СЕТКИ

Солвер Fluent позволяет адаптировать – измельчать или укрупнять сетку, основываясь на заданных пользователем геометрических данных или основываясь на данных, полученных в ходе итерационного процесса.

Вообще использование адаптации при решении задачи позволяет сильно уменьшить вычислительные затраты, но и имеет определенные сложности. Имеется несколько общих правил:

- сетка на поверхности должна быть достаточно мелкой, чтобы правильно описывать все ее геометрические особенности;
- начальная сетка должна быть достаточно мелкой, чтобы отразить основные особенности рассчитываемого течения;
- перед проведением адаптации, предварительно на начальной сетке необходимо получить физически адекватное решение;
- перед проведением адаптации нужно сохранить файлы задачи (case и data), в случае если проведенная адаптация не приведет к улучшению решения – будет возможность вернуться к предыдущему варианту расчетной сетки;
- при проведении градиентной адаптации нужно выбирать величины, наиболее характеризующие исследуемое явление. Выбор нужно проводить после изучения картин распределения всех основных величин в расчетной области;

- нельзя сильно измельчать одну часть расчетной области, оставляя другую более грубой. Большой градиент в размерах расчетных ячеек может привести к потере точности численного решения.

4.1. Статическая адаптация

Процесс адаптации состоит из двух отдельных этапов.

1. Ячейки маркируются для измельчения или укрупнения, в соответствии с настройками.
2. Ячейки измельчаются или оставляются для укрупнения согласно ранее предоставленным маркерам.

После первого этапа имеется возможность просмотреть ячейки, отмеченные для адаптации, и в случае необходимости изменить настройки.

Fluent имеет два типа адаптации: *Hanging node adaption* (адаптация с висячими узлами) – тип используемый по умолчанию и *Conformal adaption* (конформная адаптация) – может использоваться только для треугольных и тетраэдральных сеток.

4.1.1. Адаптация с висячими узлами

Каждая грань ячейки, помеченной для измельчения, делится узлом на две равные части. У сетки, полученной в процессе такого измельчения, появляются так называемые «висячие» узлы, т.е. узлы, которые не являются вершинами у всех граней, которые из этих узлов выходят: рис. 25.

Здесь сплошной линией показаны расчетные ячейки до адаптации, а пунктирной – дополнительные ячейки, получающиеся в процессе измельчения.

Укрупнение происходит в результате обратного процесса – объединение дочерних ячеек, полученных ранее путем деления родительской ячейки. Причем этот процесс происходит только в том случае, если все дочерние ячейки помечены для укрупнения. При использовании адаптации с висячими узлами возможно укрупнение ячеек только до размеров ячеек в исходной сетке. Конформная адаптация позволяет укрупнять и исходные ячейки.

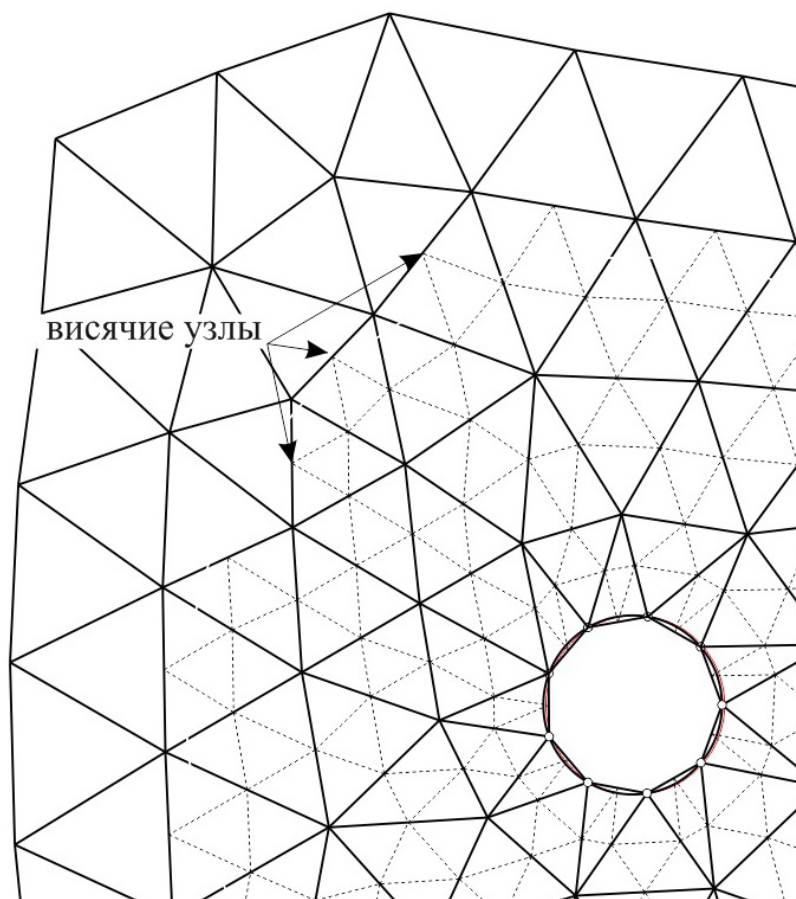


Рис. 25. Сетка при использовании адаптации с «висячими узлами»

4.1.2. Конформная адаптация

В результате измельчения при такой адаптации не возникает висячих узлов. В процессе такого измельчения у треугольной ячейки, помеченной для адаптации, находится самая длинная сторона, и по ней ячейка разбивается. Чтобы не возникло висячего узла, соседняя ячейка также разбивается.

В результате может быть измельчено еще несколько прилегающих ячеек, не отмеченных для адаптации.

При укрупнении происходит удаление узлов и ретриангуляция ячейки.

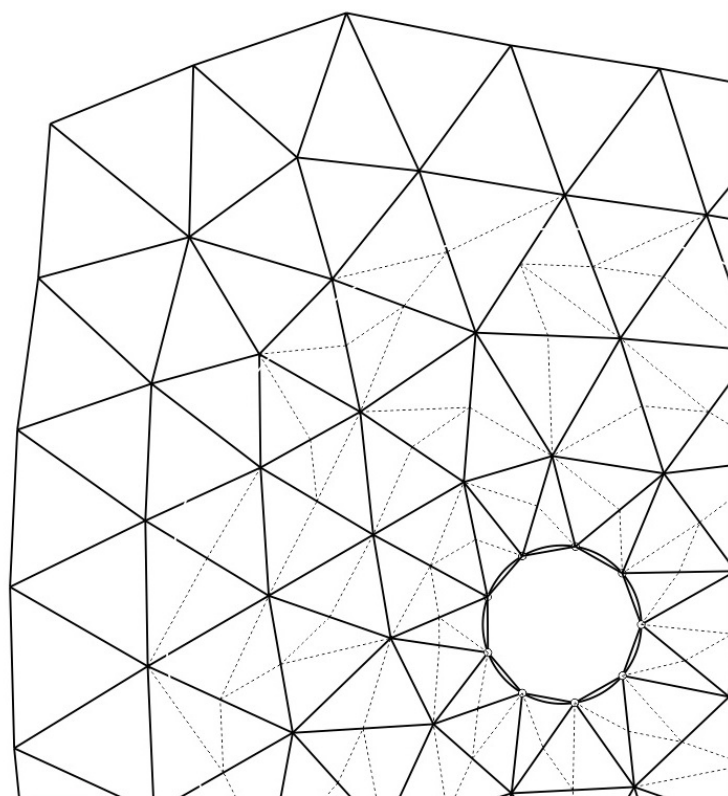


Рис. 26. Сетка при использовании конформной адаптации

4.1.3. Выбор между конформной адаптацией и адаптацией с висячими узлами

По умолчанию во Fluent установлена адаптация с висячими узлами, обычно это наиболее подходящий вид адаптации, тем более что он подходит для любого типа сеток, в то время как конформная – только для треугольных и тетраэдрических. Имеется еще несколько замечаний по поводу этих двух типов адаптации.

- Адаптация с висячими узлами действует более локально, чем конформная. В некоторых случаях сеток (с удлиненными ячейками) при конформной адаптации (измельчении) возможно распространение зоны измельчения далеко за требуемые пределы.
- Конформное укрупнение может быть использовано для укрупнения и исходной сетки (только 2D).
- При адаптации с висячими узлами сохраняется связность исходной сетки, в то время как при конформной адаптации эта связность модифицируется, что может сказаться на точности решения (особенно нестационарных задач) при получении решения с последовательными адаптациями (измельчениями) расчетной сетки.

- Адаптация с висячими узлами имеет дополнительные затраты вычислительных ресурсов, связанные с хранением временной информации.
- Нельзя использовать конформную адаптацию вместе с динамической адаптацией.

4.2. Адаптация по границе (Boundary Adaption)

Часто возникает необходимость в измельчении сетки около твердых границ (при их наличии), поскольку именно в этой области происходит основное изменение характеристик течения.

Настройка адаптации по границе производится в диалоговом окне, вызываемом командами меню Adapt-> Boundary...

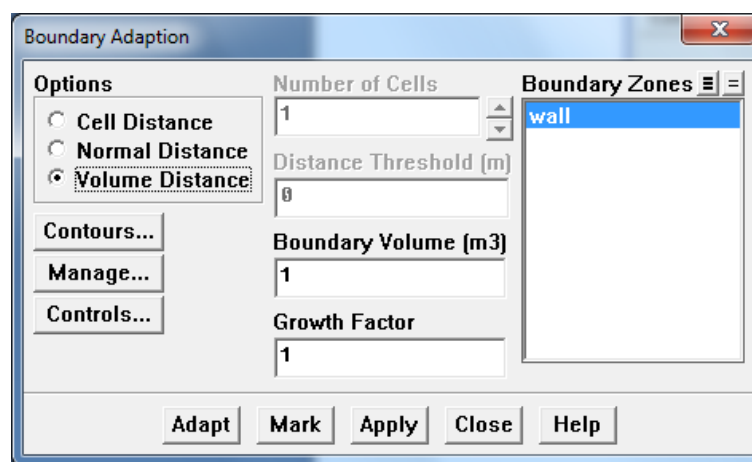


Рис. 27. Диалог настройки Boundary Adaption

При этом имеется три варианта настройки адаптации (группа Options).

- Cell Distance. В поле Number of Cells указывается количество ячеек (слоев ячеек), прилегающих к указанной границе, которое будет адаптировано;
- Normal Distance (расстояние по нормали). Задается расстояние (Distance Treshold, м) отмеряемое по нормали от заданной границы. Ячейки будут адаптированы в пределах этой полосы;
- Volume Distance (расстояние объемами). Задаются требуемый объем ячейки у границы (Boundary Volume, м³), а также степень увеличения (Growth Factor). При этом ячейки будут проадаптированы с экспоненциальным уменьшением (увеличением) размера с удалением от выбранной границы.

Граница, относительно которой будет проводиться адаптация, выбирается из списка Boundary Zones (граничные зоны). Может быть выбрано несколько границ.

После настройки всех параметров можно нажать кнопку Mark, после чего просмотреть выделенные для адаптации ячейки (Manage...). Дополнительное управление производится при помощи кнопок: Contours..., Manage..., Controls... (подробнее см. пункт 4.10. Управление адаптацией сетки (Grid Adaption Controls)).

Далее производится адаптация (кнопка Adapt). После чего необходимо сохранить файлы задачи с именем, отличным от исходного, чтобы при необходимости (неудачном решении на новой сетке) можно было вернуться к предыдущей адаптации. Наиболее простым и хорошо зарекомендовавшим себя способом является добавление в конце имени файла после знака «нижнее подчеркивание» – «_» номера адаптации (см. пункт 7. Проведение исследований).

4.3. Градиентная адаптация (Gradient Adaption)

Хотя определение ошибки численного расчета очень сложная задача, можно считать, что измельчая сетку в областях с наибольшими градиентами величин, характеризующих протекание исследуемого процесса, можно получить более точное решение. Градиентная адаптация позволяет измельчать или укрупнять сетку согласно градиентам – первым производным (gradient), изозначениям (isovalue) или вторым производным – кривизне (curvature) любых величин, получающихся в результате численного расчета. При этом адаптируется только определенная (обычно небольшая) часть расчетной области, что в свою очередь позволяет экономить вычислительные ресурсы.

Диалог градиентной адаптации вызывается командой меню: Adapt -> Gradient... Далее в появившемся диалоговом окне производится настройка:

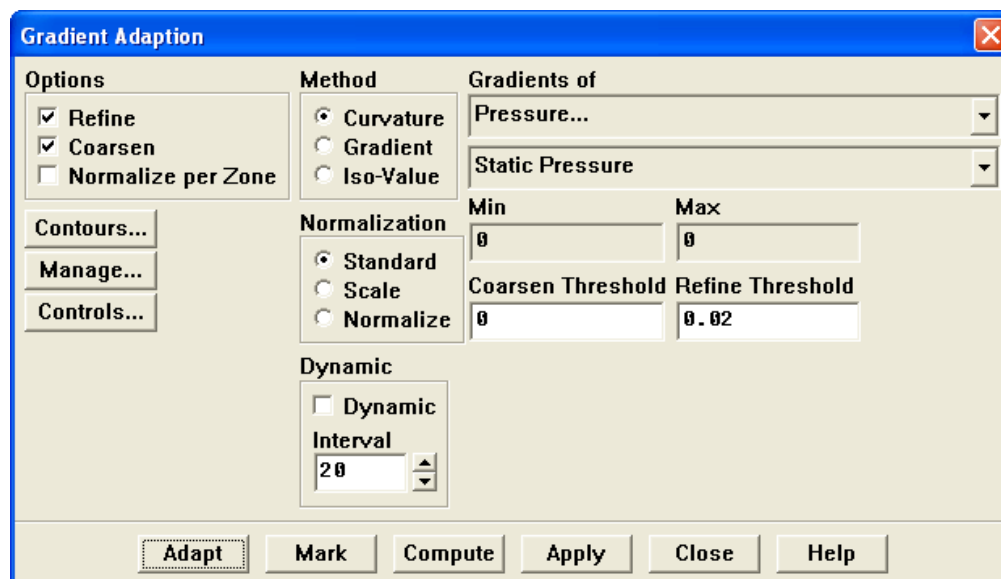


Рис. 28. Диалог настройки Gradient Adaption

Здесь в группе Options отмечаются галочками производимые программой действия: Refine (измельчение), Coarsen (укрупнение) и Normalize per Zone (зональная нормализация). Далее выбирается метод (Method):

- Curvature – метод, используемый по умолчанию, он рекомендуется для задач с гладким (плавным) решением – с нерезким изменением характеристик течения;
- Gradient – рекомендуется для задач с сильными ударами (например, для сверхзвуковых невязких течений);
- Isovalue – используется в тех случаях, когда характерными являются картины самих величин, а не их производных. Здесь также можно использовать величины, определенные самим пользователем (User Defined Functions).

Затем выбирается метод нормализации (Normalization):

- Standard (стандартный) – нормализация градиентов и кривизны не производится;
- Scale (масштабируемый) – когда градиенты и кривизна будут нормализованы по среднему значению в расчетной области;
- Normalize (нормализованный) – используется масштабирование по максимальному значению в расчетной области.

Использование метода масштабирования или нормализации позволяет устанавливать пределы измельчения или укрупнения гораздо проще и практически без зависимости от конкретной задачи или в ходе ее решения. Это особенно важно при использовании автоматической динамической адаптации.

Далее в выпадающем списке Gradients of (градиенты) выбирается величина, по градиентам которой будет проводиться адаптация. После чего нажимается кнопка Compute (вычислить), и в окнах Min и Max появятся минимальные и максимальные значения этой величины во всей расчетной области.

Для определения порога измельчения (Refine Threshold) можно посмотреть значения этой величины в расчетных клетках, следующим образом:

- нажать кнопку Compute (рассчитать);
- дальше нажать кнопку Contours (контуры);
- в открывшемся диалоговом окне контуры включить галочку Filled (заливка), выключить Node values (значения в узлах), выбрать в выпадающих списках Adaptation (адаптацию) и Existing value (существующее значение);
- нажать кнопку Display (показать).

В графическом окне отобразится расчетная область с ячейками, раскрашенными согласно выбранной для градиентной адаптации величине. При нажатии на ячейку правой кнопкой мыши в основном (текстовом) окне Fluent отобразятся значения (минимальное и максимальное для выбранной ячейки) величины. Эти величины можно использовать для выбора ячеек для адаптации. Для этого выбранное значение порога измельчения нужно занести в текстовое поле Refine Threshold диалога настройки градиентной адаптации (рис. 28). Для укрупнения ячеек необходимо ввести соответствующее значение величины в поле Coarsen Threshold (порог укрупнения). И нажать кнопку Mark. Ячейки, имеющие значение градиента выбранной величины больше (меньше) введенного значения, будут отмечены для измельчения (укрупнения). Нужно иметь в виду, что при использовании метода с «висячими узлами» (Hanging node adaption) ячейки укрупняются только до размеров исходной сетки, импортированной из генератора сеток.

Если в расчетной области имеются как большие, так и не очень большие градиенты, при использовании градиентной адаптации маленькие градиенты могут быть не учтены. При включении опции зональной нормализации адаптация будет проводиться по максимальному градиенту в каждой зоне.

Далее имеется возможность просмотреть отмеченные для адаптации расчетные ячейки (см. раздел 4.2. Адаптация по границе Boundary Adaption). Для адаптации нажать кнопку Adapt.

4.4. Динамическая адаптация

В Fluent имеется возможность производить градиентную адаптацию динамически, т.е. автоматически во время процесса решения, без дополнительного ввода значений. Динамическая адаптация включается галочкой Dynamic в диалоговом окне градиентной адаптации (рис. 28).

Хотя все основные настройки градиентной адаптации подходят и для динамической, имеется несколько рекомендаций.

В диалоговом окне настройки градиентной адаптации (рис. 28):

- включить опции Refine (измельчить) и Coarsen (укрупнить);
- включить Normalize per Zone (зональная нормализация);
- для нормализации использовать опции Scale (масштабировать) или Normalize (нормализовать).

Ненормализованные значения градиентов величин (при использовании опции Standard) обычно сильно зависят от решения и таким образом требуют дополнительной переустановки значений порогов адаптации (Coarsen Threshold и Refine Threshold) во время решения.

- При динамической адаптации масштабирование более рекомендуемая опция, чем нормализация, в случае если необходимо учесть области со слабыми градиентами, одновременно с областями, где

имеются большие градиенты величин. Масштабирование не принимает в расчет очень большие значения градиентов величин, в отличие от нормализации.

- Начальные значения порогов адаптации – 0 (для укрупнения) и $1 \cdot 10^{10}$ (для измельчения). То есть при решении будут укрупняться все ячейки, имеющие размер менее нуля (но при использовании обычного метода – с висячими узлами, сетка не укрупнится более исходной), и будут измельчаться все ячейки крупнее $1 \cdot 10^{10}$.

- Нужно установить интервал (Interval) между двумя последовательными автоматическими адаптациями. В зависимости от того, решается стационарная или нестационарная задача, выбирается интервал или в количестве итераций, или в количестве шагов по времени.

В диалоговом окне настройки управляющих опций градиентной адаптации (Gradient Adaption Controls Panel, рис. 29):

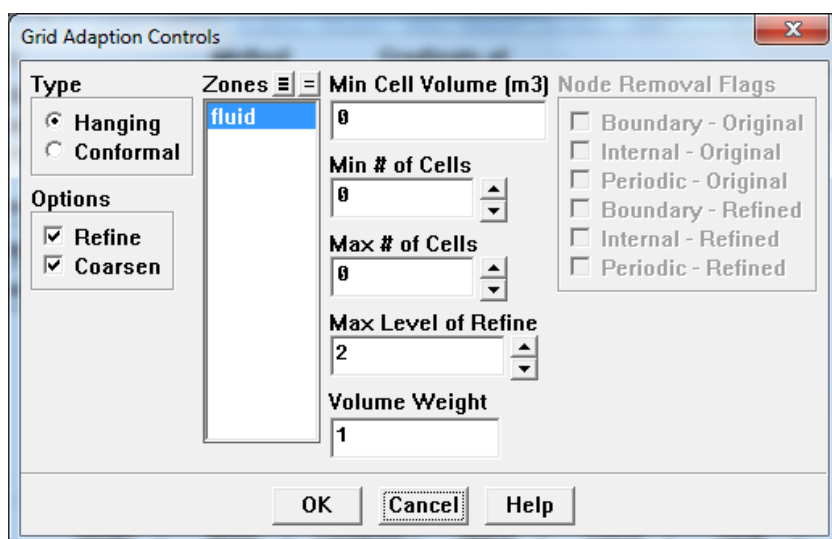


Рис. 29. Настройка управления при динамической адаптации

- всегда использовать только метод адаптации с висячими узлами (Hanging method);
- установить значения для Min # of Cells, Max # of Cells, (минимальное или максимальное количество ячеек) Max Level of Refine (максимальный уровень измельчения) или Min Cell Volume (минимальный объем ячейки). Границы Min # of Cells и Max # of Cells могут влиять на значения порогов адаптации (Coarsen Threshold и Refine Threshold);
- значение Max Level of Refine (максимальный уровень измельчения) по умолчанию – 2, обычно подходит для всех типов задач. Если при нажатии кнопки Mark или Adapt в основном окне

Fluent указывается, что для измельчения отмечено 0 ячеек (0 cells marked for refinement), можно это значение увеличить.

4.5. Адаптация по изозначению (Isovalue Adaption)

При решении некоторых задач можно однозначно определить область, в которой происходит основное течение и изменение всех интересующих и влияющих на явление величин. Поскольку основное изменение всех величин происходит в одной области, которую в свою очередь можно ограничить значением какой-либо характерной величины, то вместо адаптации по градиенту величины можно использовать Isovalue Adaption (адаптация по изозначению). В этом случае адаптируются ячейки, попадающие (или наоборот не попадающие) в область, ограниченную изолинией выбранной величины с заданным значением.

Диалог адаптации вызывается командой меню: Adapt -> Isovalue...

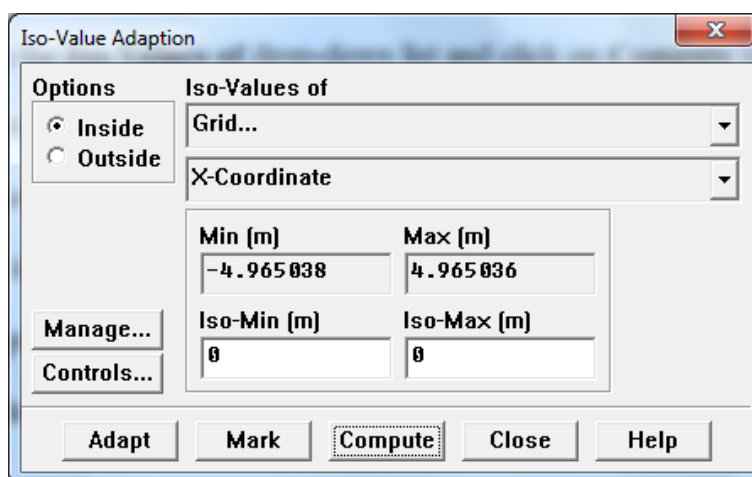


Рис. 30. Диалог настройки Iso-Value Adaption

В диалоговом окне (рис. 30), в группе переключателей Options, нужно выбрать: внутри выбранной области будет производиться адаптация (Inside) или снаружи (Outside). Из выпадающего списка Iso-Values of (изозначения) нужно выбрать необходимую величину. После чего по нажатию кнопки Compute заполнятся окна Min (минимального) и Max (максимального) значения этой величины во всей расчетной области. Далее, в полях Iso-Min и Iso-Max, нужно установить минимальное и максимальное изозначения величины.

4.6. Адаптация области (Region Adaption)

Этот вид адаптации используется, когда точно известна область, которую нужно адаптировать. Координаты области вводятся вручную в

соответствующие поля или указываются мышью на экране. Диалог адаптации вызывается командой меню:

Adapt -> Region...

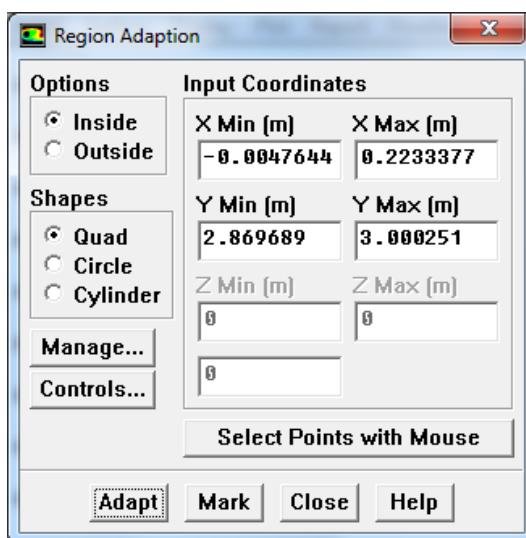


Рис. 31. Диалог настройки Region Adaption

На первом этапе в блоке Options (Опции) выбирается, каким образом – снаружи (Outside) или внутри (Inside) определяемой области будет производиться адаптация.

Далее указывается вид адаптируемой области (Shapes) и в зависимости от этого вводятся соответствующие координаты (в поля Input Coordinates):

- Quad(rilateral) (четырёхугольник) в 2d или Hex(ahedron) (шестигранник) в 3d определяется вводом координат двух точек, находящихся по диагонали;
- Circle (круг) или Sphere (сфера) определяется вводом координаты центра и значения радиуса;
- Cylinder (цилиндр) определяется путем указания координат точек оси цилиндра и радиуса его основания. В случае 3d таким образом определяется цилиндрическая область, а в случае 2d – произвольно ориентированный прямоугольник с длиной равной длине оси цилиндра и шириной равной радиусу основания. Прямоугольник, полученный таким образом, отличается от получаемого по первому способу тем, что может быть произвольно ориентирован, в то время как при определении четырехугольника по первому способу он будет ориентирован по осям координат.

Координаты могут быть введены непосредственно в соответствующие поля, либо указанием области в графическом окне мышью. Во втором случае наиболее удобно вызвать в графическом окне отображение сетки (Display ->Grid...). Далее в диалоге адаптации (рис. 31) нажать кнопку – Select Points

With Mouse (выбрать точки мышью), после чего в графическом окне, при помощи центральной кнопки мыши (обычно с роликом), последовательно указать необходимые точки.

После указания координат можно нажать кнопку Mark, тогда все ячейки, центры которых попали в указанную область, будут помечены для адаптации, либо сразу произвести адаптацию нажатием кнопки Adapt.

4.7. Адаптация по заданному объему (размеру) ячейки (Volume Adaption)

Для получения наиболее адекватных решений, а также для улучшения сходимости решения нужно, чтобы изменение размеров ячеек в расчетной области было плавным, т.е. чтобы размеры соседних ячеек не отличались сильно между собой. Если в процессе адаптации могли возникнуть области, в которых это условие не соблюдается, можно провести адаптацию, основываясь на размере ячейки или его изменении (шага).

Диалоговое окно вызывается командой меню Adapt->Volume...

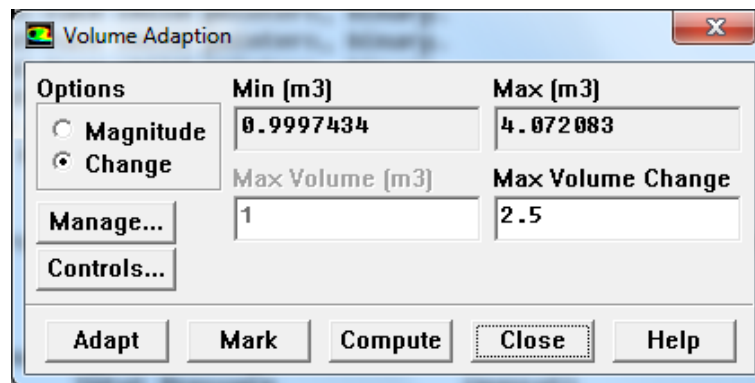


Рис. 32. Диалог настройки Volume Adaption

Адаптация Magnitude (основанная на размере ячейки) позволяет отметить для измельчения и адаптировать все ячейки, имеющие размер менее указанного в поле Max Volume. При этом максимальный и минимальные размеры ячеек во всей расчетной области можно увидеть в полях Max и Min, нажав кнопку Compute.

При адаптации Change (по изменению (шагу) размера ячейки) отмечаются для измельчения и адаптируются все ячейки, отношение размеров которых к размерам соседних превышает заданный порог (Max Volume Change).

4.8. Адаптация по значениям y^+ и y^* (Yplus/Ystar Adaption)

При решении задач о пристеночных течениях важно правильно адаптировать сетку вблизи твердых границ. Для оценки размеров ячеек расчетной сетки используются величины y^+ и y^* . Для наиболее корректной

адаптации в пристенной области можно пользоваться адаптацией по значениям y^+ и y^* .

Этот вид адаптации вызывается командой меню: Adapt->Yplus/Ystar...

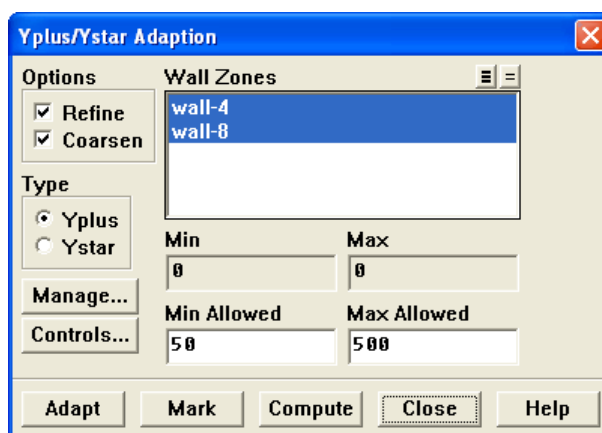


Рис. 33. Диалог настройки Yplus/Ystar Adaption

В группе опций отмечается необходимый вид адаптации – Refine (измельчение) и/или Coarsen (укрупнение). Далее выбирается тип: по значениям Yplus (y^+) – рекомендуется при использовании расширенного пристеночного моделирования (Enhanced Wall Treatments – см. раздел «Пристеночное моделирование»), и по значениям Ystar (y^*) – рекомендуется при использовании всех пристеночных функций (Wall Functions). В списке Wall Zones (пристенные зоны) выбираются твердые границы вблизи которых нужно провести адаптацию сетки. При нажатии на кнопку Compute в полях Min и Max отображаются, соответственно, минимальное и максимальное значение величины y^+ или y^* во всех пристенных зонах расчетной области. В полях Min Allowed и Max Allowed нужно ввести минимально и максимально допустимые значения величины y^+ или y^* . После нажатия кнопки Mark или Adapt программа отметит для адаптации или адаптирует те ячейки, для которых значения y^+ или y^* будут меньше введенного минимально допустимого (если включена опция «измельчить») и больше максимально допустимого значения (если включена опция «укрупнить»).

4.9. Геометрическая адаптация (Geometry-based adaption)

Геометрическая адаптация – это опция, позволяющая реконструировать геометрию расчетной области при ее адаптации. Эта возможность может использоваться, в случае если исходная геометрия была искажена из-за слишком грубой сетки, например, круг в препроцессоре при создании сетки отображается в виде многоугольника. Если сетка недостаточно мелкая, количество углов у многоугольника слишком мало и полученная область не

будет иметь всех необходимых геометрических свойств (а кроме того будет иметь множество дополнительных ненужных – например, рис. 34а). При выключенной опции геометрической адаптации программа будет просто измельчать сетку, оставляя исходную геометрию (т.е. многоугольник):

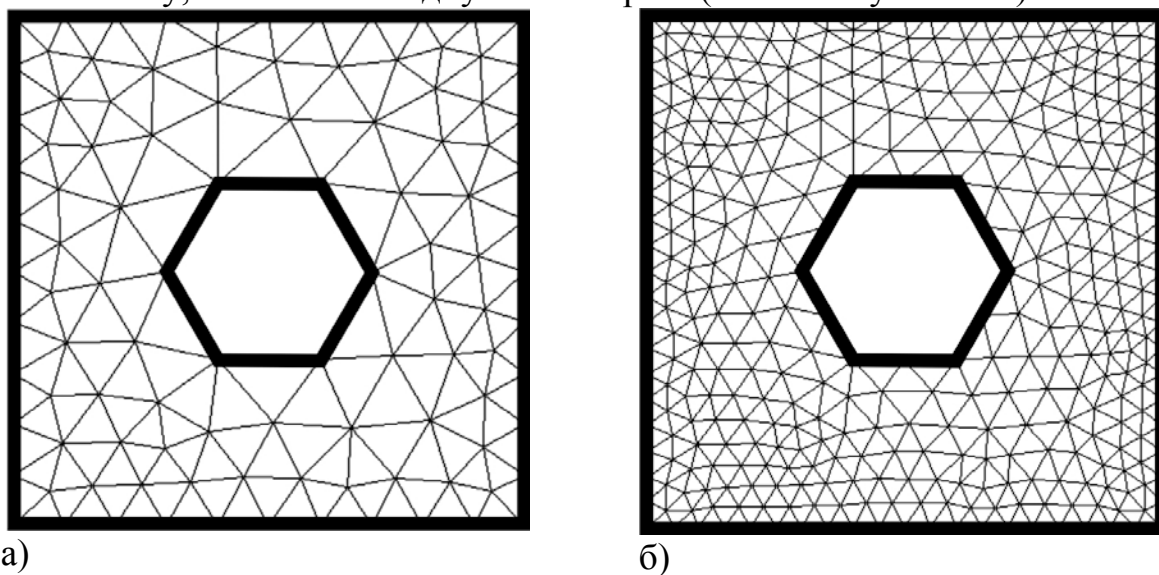


Рис. 34. Примеры сетки: а) до адаптации, б) после адаптации с выключенной опцией геометрической реконструкции

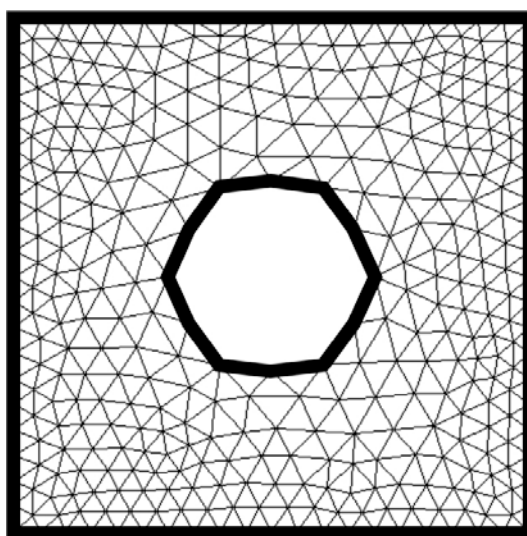


Рис. 35. Сетка после адаптации с включенной опцией геометрической реконструкции

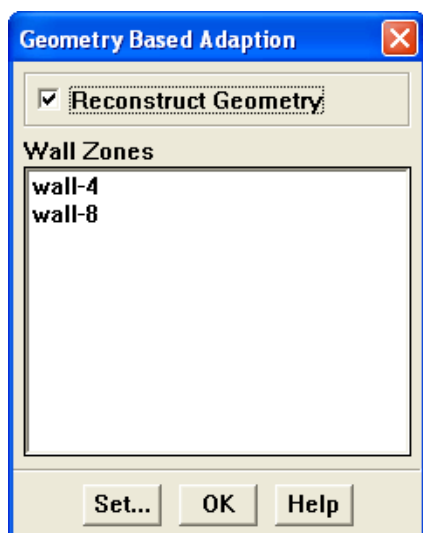


Рис. 36. Диалог включения геометрической адаптации

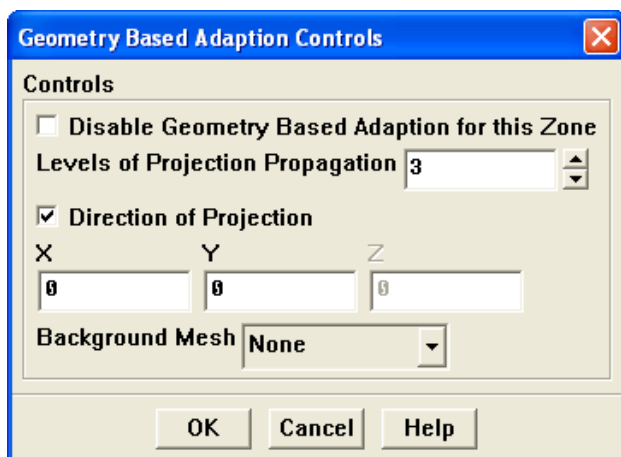


Рис. 37. Диалог настройки реконструкции при геометрической адаптации

границы, описывающей цилиндр, а для внешней (прямоугольной) границы она должна быть отключена.

Уровни распространения проекции (Levels of Projection Propagation) показывают, на сколько слоев ячеек будет распространяться реконструкция. Если в этом поле установлено значение 1, значит, будет сдвинут только тот узел, который непосредственно находится на этой границе, если же это значение будет равняться, например, 3, значит, реконструкция коснется трех (в глубину) узлов. Причем самое большое отклонение будет у первого узла (на границе), а самое меньшее – у последнего (рис. 38).

При включении опции геометрической адаптации Fluent будет пытаться восстановить искривленные границы области.

Реконструкция области происходит путем установки нового узла (получающегося в результате адаптации) не строго на линии соединяющей соседние существующие узлы, а на проектируемую линию, которая находится ближе к оригинальной (восстанавливаемой) границе (рис. 35).

Вызов диалогового окна опции производится командой меню Adapt-> Geometry..., где включается опция Reconstruct Geometry (рис. 36). Выбрав соответствующую границу в списке Wall Zones, можно вызвать диалог настройки реконструкции геометрии для этой границы, нажав кнопку Set... (рис. 37). Включение опции Disable Geometry Based Adaption for this Zone позволяет не использовать геометрическую адаптацию для выбранной зоны. Например, для геометрии, приведенной на рис. 35 нужно использовать геометрическую адаптацию только для

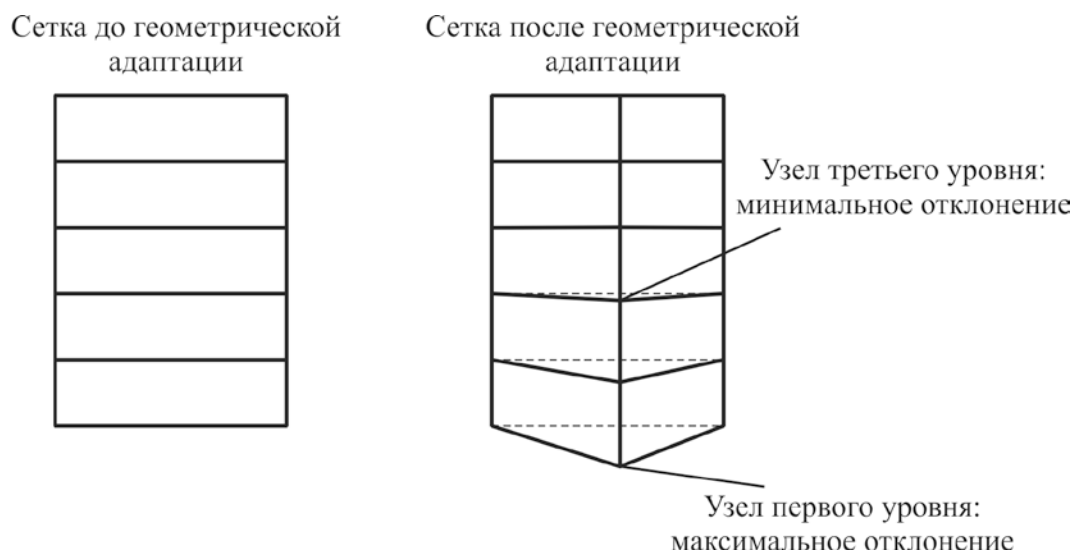


Рис. 38. Уровни распространения проекции (Levels of Projection Propagation)

Можно установить направление проекции: опция Direction of Projection. Если она отключена, реконструкция будет производиться в сторону ближайшей ячейки. Опция Background Mesh (фоновая сетка) позволяет при реконструкции, в качестве основы, использовать другую сетку.

4.10. Управление адаптацией сетки (Grid Adaption Controls)

Диалоговое окно вызывается командой меню из основного окна программы: Adapt->Controls... Кроме этого, в диалоговом окне любого типа адаптации имеется кнопка Controls..., вызывающая это же окно настройки (рис. 39).

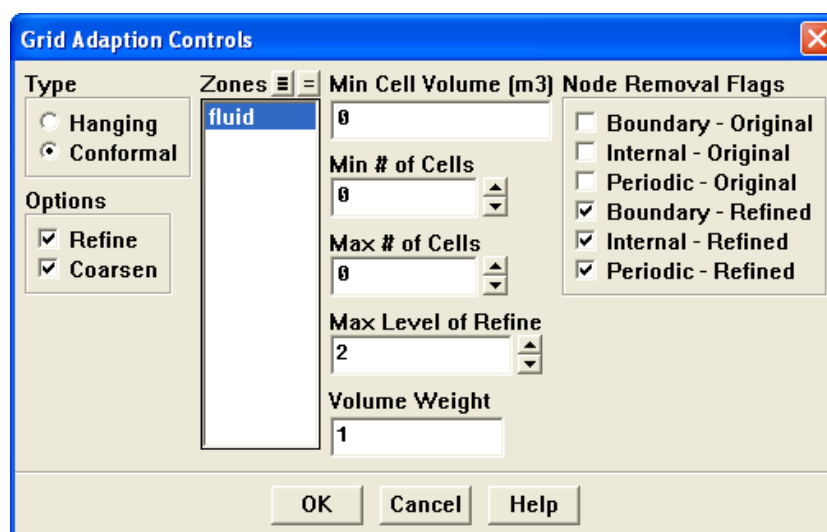


Рис. 39. Диалог Grid Adaption Controls

В этом окне можно изменить тип адаптации (Hanging или Conformal). Установить опции: только измельчение (Refine) или укрупнение (Coarsen) или и то и другое. Установить, для каких зон будет производиться адаптация – список Zones. Это бывает полезно, если в расчетной области имеется несколько расчетных зон, например, для области, где течет жидкость, нужна одна стратегия адаптации, а для областей, моделирующих твердые массивы – другая.

Можно установить ограничение на минимальный размер измельчаемых ячеек (Min Cell Volume). Ячейки, попавшие в область адаптации, но имеющие размер меньше указанного в этом поле, измельчаться не будут.

Поля Min# of Cells и Max# of Cells позволяют задать, соответственно, минимальное и максимальное количества ячеек в адаптированной сетке. В поле Max Level of Refine устанавливается максимальный уровень измельчения при адаптации. Обычное значение этого параметра (2) хорошо подходит для первоначальных этапов адаптации. В дальнейшем, если при адаптации количество отмеченных для адаптации ячеек будет недостаточно, эту величину нужно увеличить.

При использовании конформной адаптации можно настроить возможности по удалению узлов при укрупнении сетки (Node Removal Flags).

5. ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЕ ФУНКЦИИ (UDF)

В некоторых случаях при работе в вычислительном комплексе Fluent возникает необходимость в добавлении новых возможностей моделирования. В Fluent такая возможность реализуется при помощи так называемых пользовательских функций (User-Defined Functions – UDFs). Пользовательские функции позволяют адаптировать существующие возможности солвера, к примеру, создавать новые граничные условия, вводить новые слагаемые в решаемую систему уравнений и т.д.

При решении задач о неизотермических течениях может возникнуть необходимость учета непостоянства зависимости теплофизических характеристик жидкости от температуры. У Fluent имеются некоторые штатные модели, учитывающие это изменение, но в некоторых случаях может потребоваться использовать зависимости, полученные аппроксимацией справочных данных. Наиболее удобно внедрить такую зависимость в солвер при помощи пользовательских функций UDF.

Пользовательские функции (User-Defined Functions – UDFs) – функции, которые могут быть написаны самим пользователем, а затем внедрены в солвер.

UDF пишется на языке программирования C в любом текстовом редакторе, созданный файл сохраняется с расширением *.c (например, myudf.c). Один файл может содержать как одну пользовательскую функцию,

так и несколько. Основной частью UDF является макрос DEFINE, который и обеспечивает доступ к функциям Fluent.

5.1. Моделирование свойств веществ

В качестве примера приводится использование UDF при моделировании молекулярных теплопроводности и динамической вязкости воздуха, зависящих от температуры согласно уравнениям (получены аппроксимацией справочных данных [3]):

$$\lambda = 7,7847 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0,0027926,$$
$$\eta = 4,7631 \cdot 10^{-8} \cdot T + 4,0401 \cdot 10^{-6}.$$

Приведенные зависимости хорошо описывают изменение свойств в интервале температур $200 \div 400 \text{ K}$, отличие от справочных данных не превышает 2,1% в начале диапазона и 0,7% – в середине.

Для работы со свойствами веществ в Fluent используется макрос DEFINE_PROPERTY.

Согласно вышеприведенным зависимостям в текстовом редакторе создаем пользовательские функции, как указано на рис. 40.

Здесь в первой строке указывается директива включить в процесс обработки обязательный заголовочный файл udf.h. Далее следует непосредственно само определение функций.

```
1 #include "udf.h"
2 DEFINE_PROPERTY(mvvc_mv_apx, c, t)
3 {
4     real mol_visc;
5     real temp = C_T(c, t);
6
7
8     mol_visc=4.7631e-8*temp+4.0401e-6;
9     return mol_visc;
10 }
11 DEFINE_PROPERTY(mvvc_tc_apx, c, t)
12 {
13     real t_cond;
14     real temp = C_T(c, t);
15
16
17     t_cond=7.7847e-5*temp+0.0027926;
18     return t_cond;
19 }
```

В языке C все используемые переменные должны быть объявлены явно, поэтому в строках 4, 5 и 13, 14 объявляются используемые в коде переменные как данные с плавающей запятой (real). Кроме стандартных типов данных языка C, имеется несколько дополнительных типов данных, связанных с использованием солвера: Node – структурный тип, хранящий данные, связанные с узлом расчетной сетки; face_t – целочисленный тип, который идентифицирует отдельную грань в группе граней; cell_t – целочисленный

Рис. 40. Листинг программы UDF

тип, который идентифицирует отдельную ячейку в группе ячеек; Thread – структурный тип, который хранит данные, общие для группы ячеек или

граней; Domain – структурный тип, который хранит данные, ассоциированные с коллекцией групп узлов, ячеек и граней расчетной сетки.

При определении пользовательской функции (строка 2 и 11) в скобках в качестве аргументов указываются: переменная в которой будут возвращаться полученные в функции значения (имя переменной задается пользователем самостоятельно), а также индексные переменные, через которые будет осуществляться ссылка на структурные элементы расчетной сетки – ячейки (c) и группы сеток (t). Индексные переменные в определении функции остаются без изменения. Описание синтаксиса использования функций макроса DEFINE приведено в заголовочном файле udf.h, который обычно находится по адресу: C:\Fluent.Inc\fluentXXX\src\. Здесь XXX – номер версии Fluent. Кроме того, полное руководство по созданию и использованию UDF содержится в «Справочном руководстве Fluent».

В переменных mol_visc и t_cond будут храниться значения молекулярной вязкости и теплопроводности, получаемые в процессе выполнения программы. В переменной temp будет храниться текущее значение температуры, причем ее значение получается путем вызова макроса C_T(c, t), где в качестве аргументов выступают индексные переменные, определяющих текущую ячейку (c) и группу ячеек (t).

Далее в строках 8 и 17 вводятся сами функции для определения вязкости и теплопроводности в зависимости от температуры. Нужно иметь в виду, что все операции в пользовательских функциях, по умолчанию, производятся в единицах измерения СИ.

В строках 9 и 18 при помощи оператора return полученное значение передается (возвращается) как результат выполнения пользовательской функции, которое далее используется солвером при решении.



Рис. 41. Диалог загрузки UDF для интерпретации

В Fluent имеется два варианта использования UDF – интерпретированные и компилированные. При компиляции на основе файла программного кода создается библиотека – дополнительный файл, который затем и подключается к солверу при решении. Поскольку при компиляции происходит преобразование программы на языке C в машинный код – такой код выполняется быстрее, что сказывается в дальнейшем и на скорости решения задачи. Однако для компиляции необходимо наличие дополнительного программного обеспечения, поэтому этот способ здесь не рассматривается.

Второй вариант – непосредственное использование программного кода на C. При этом сам солвер Fluent, в

процессе чтения файла производит его интерпретацию – т.е. перевод в машинные коды, что несколько замедляет работу. Также имеются и некоторые другие ограничения при программировании. Преимуществом же такого способа является отсутствие необходимости в компиляторе, а также независимость UDF от операционной системы, версии солвера и архитектуры процессора.

Для внедрения UDF в солвер необходимо в меню Fluent выбрать команду: Define→User-Defined→Functions→Interpreted.

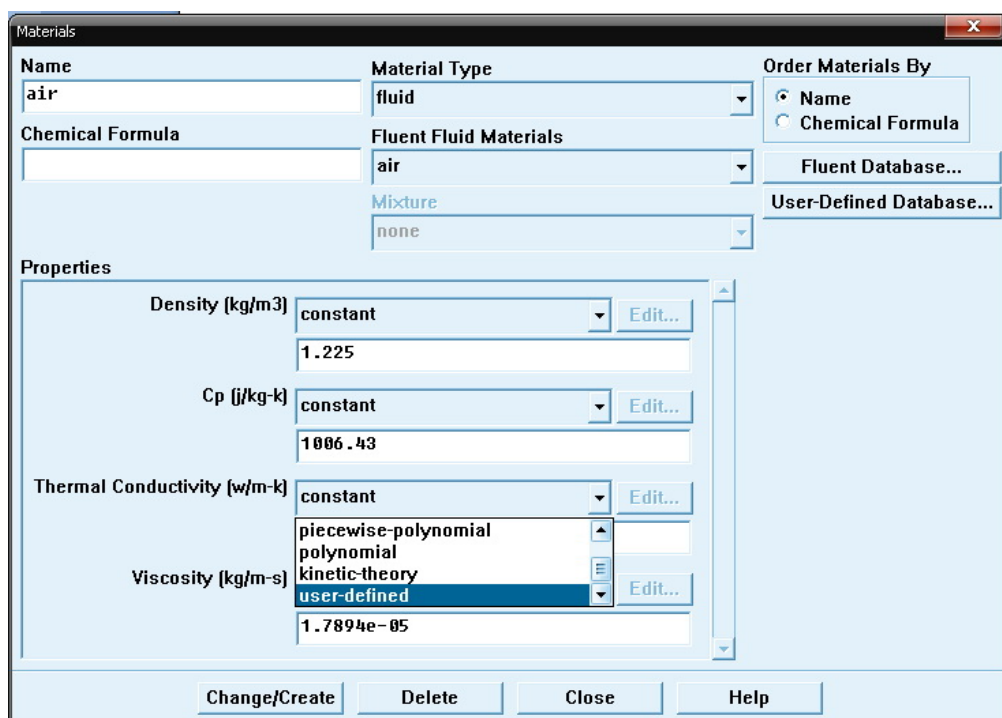


Рис. 42. Диалог выбора свойств материала

В появившемся окне (рис. 41) необходимо указать путь к файлу UDF, это производится нажатием кнопки Browse...

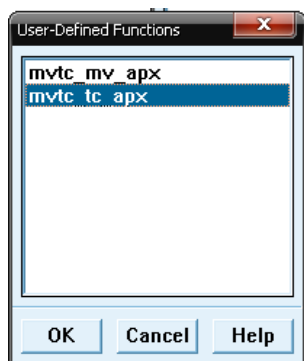


Рис. 43. Диалог выбора UDF

В пункте Display Assembly Listing нужно поставить галочку. И нажать кнопку Interpret. Тогда процесс интерпретации будет показываться в основном окне Fluent, и в случае ошибки будет выведено сообщение, начинающееся со слова Error, а также будет указано, при интерпретации какой строки файла UDF эта ошибка произошла. Если в основном окне Fluent в результате интерпретации не появилось строк, начинающихся со слова Error – значит интерпретация прошла успешно и можно пользоваться загруженными UDF.

Далее в диалоговом окне настройки свойств веществ (Define →Materials...), напротив требуемого свойства, нужно из выпадающего списка выбрать пункт user-defined (рис. 42), и в появившемся окне (рис. 43) выбрать требуемую функцию. После установки всех необходимых свойств веществ, для того чтобы изменения вступили в силу, нужно нажать Change/Create.

5.2. Моделирование граничного условия

При помощи UDF также возможно создание своих собственных вариантов распределения параметров в качестве граничного условия (ГУ). Для этого используется макрос DEFINE_PROFILE. В качестве примера приведена задача о течении в плоском горизонтальном канале высотой 250 мм (h) и длиной 20 м (80 калибров). На правой границе (метка «r») задается условие «Выход» («Outflow»). На левой границе «l» – разные варианты распределения продольной скорости v_x – прямоугольное (ГУ «Входящая скорость», «Velocity Inlet»), а также два варианта с использованием UDF – параболический профиль v_x (пример программного кода на рис. 44), и распределение скорости по закону «степени 1/7» (пример программного кода на рис. 45). Остальные границы (верх – «t» и низ канала – «b») моделируются непроницаемыми – ГУ «Wall»).

```

1 #include "udf.h" /* must be at the beginning of every UDF you write */
2 #define v_mean 68
3 #define h 0.25
4 DEFINE_PROFILE(x_velocity,thread,index)
5 {
6     real x[ND_MD]; /* this will hold the position vector */
7     real y, v_max,ax;
8     face_t f;
9
10    begin_f_loop(f,thread) /* loops over all faces in the thread passed
11                            in the DEFINE macro argument */
12    {
13        F_CENTROID(x,f,thread);
14        y = x[1];
15        v_max=1.5*v_mean;
16        ax=h/2;
17        F_PROFILE(f,thread,index) = v_max-(v_max/(ax*ax))*(y*y-2*y*ax+ax*ax);
18    }
19    end_f_loop(f,thread)
20 }

```

Рис. 44. Листинг UDF для параболического профиля


```

1  #include "udf.h"
2
3  #define YMIN 0.0                               /* constants */
4  #define YMAX 0.250
5  #define UMEAN 68.0
6  #define B 1./7.
7  #define DELOVRH 0.5
8
9
10
11 /* profile for x-velocity */
12
13
14 DEFINE_PROFILE(x_vel,t,i)
15 {
16     real y, del, h, x[ND_ND], ufree;          /* variable declarations */
17     face_t f;
18
19     h = YMAX - YMIN;
20     del = DELOVRH*h;
21     ufree = UMEAN*(B+1.);
22
23     begin_f_loop(f,t)
24     {
25         F_CENTROID(x,f,t);
26         y = x[1];
27
28         if (y <= del)
29             F_PROFILE(f,t,i) = ufree*pow(y/del,B);
30         else
31             F_PROFILE(f,t,i) = ufree*pow((h-y)/del,B);
32     }
33     end_f_loop(f,t)
34 }

```

Рис. 45. Листинг UDF для профиля «1/7»

При построении параболического распределения скорости используется уравнение:

$$v_x = v_{\max} - v_{\max} \left(\frac{y - h/2}{h/2} \right)^2,$$

здесь $v_{\max} = 1,5 \cdot v_{\text{cp}}$ – максимальная скорость на оси канала, м/с; v_{cp} – среднерасходная скорость, м/с.

При построении профиля по закону «степени 1/7»:

$$v_x = v_{\max} \left(\frac{y}{h/2} \right)^{1/7} \Bigg|_0^{h/2};$$

$$v_x = v_{\max} \left(\frac{h-y}{h/2} \right)^{1/7} \Bigg|_{h/2}^h,$$

здесь $v_{\max} = (8/7) \cdot v_{\text{cp}}$.

У макроса DEFINE_PROFILE первый аргумент – имя UDF (“x_velocity”), которое будет затем использоваться в диалоговом окне задания граничных условий интерфейса Fluent. Два остальных аргумента используются, чтобы передать значения из Fluent в программу UDF. Thread – указатель на тип границы, к которой будет применено граничное условие. Index – индекс параметра, который будет использоваться в граничном условии. Он определяется пользователем при выборе типа граничного условия в графическом интерфейсе Fluent. В данном случае при установке ГУ пользователем будет выбрано граничное условие “Velocity Inlet”, что и будет передано в UDF, и будет означать, что формула в функции F_PROFILE – 14 строка (рис. 44) и 29, 31 строки (рис. 45) записывается и далее используется процессором для входной скорости.

С использованием оператора #define определяются константы, а далее уже в теле программы (отделенные фигурными скобками) определяются переменные. Здесь можно отметить массив x[ND_ND], в котором будет храниться вектор координат, константа ND_ND зависит от размерности используемого солвера Fluent – в случае двухмерного, константа равна 2, а трехмерного – 3. Таким образом, при использовании этой константы при определении размерности массива UDF будет работать и для двухмерных задач и для трехмерных. Далее функция f определяется как функция структурного типа данных, которая будет хранить указатель на поверхность (face_t), обрабатываемую в UDF. Используемая далее функция F_CENTROID (x, f, t) или F_CENTROID (x, f, thread) возвращает значение координаты центраида (в массив x)

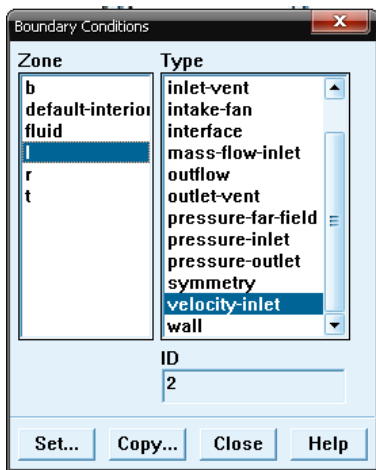


Рис. 46. Диалог Boundary Condition

поверхности, определяемой указателем поверхности f в группе t (или thread). Данная функция работает внутри цикла, организованного оператором begin_f_loop(f,t) или begin_f_loop(f,thread) по поверхности f в группе t (или thread). Значение одной (первой) координаты (x[1]) центраида поверхности далее передается переменной u и используется для построения профиля.

Загрузка (интерпретация) UDF производится аналогично описанному ранее, только загруженные пользовательские функции используются далее в панели установки граничных условий:

Define->Boundary Conditions...и для границы с меткой «l» устанавливается ГУ “Velocity Inlet” (рис. 46).

В открывшемся при этом диалоговом окне в выпадающем списке параметра Velocity Magnitude появится, кроме одного варианта Constant, второй – с названием UDF: udf x_velocity (рис. 47).

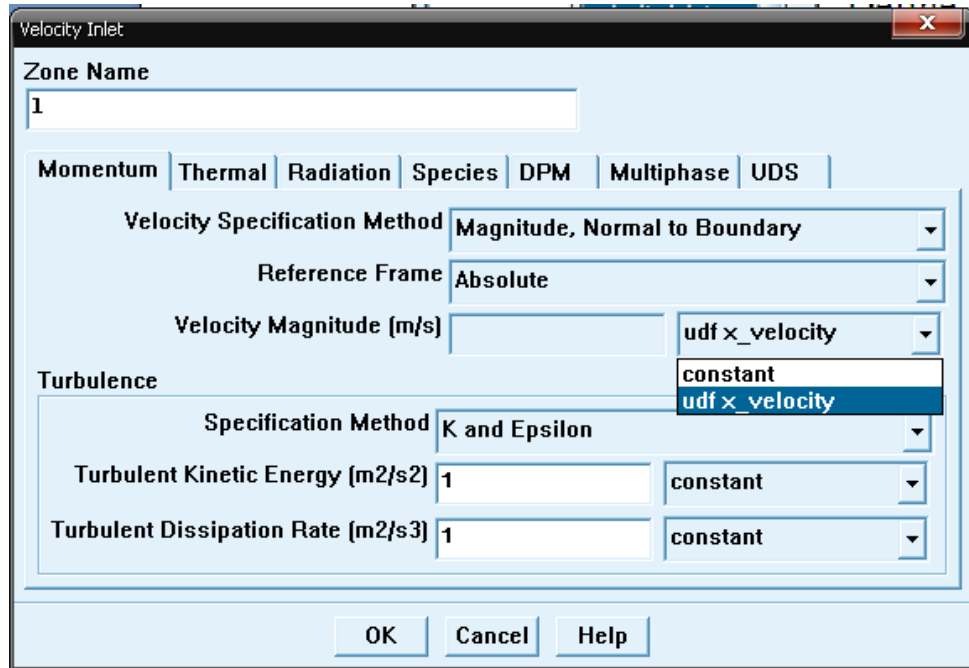


Рис. 47. Диалог ГУ Velocity Inlet

На рис. 48 показаны профили продольной скорости на входной границе, получившиеся в результате применения разных ГУ.

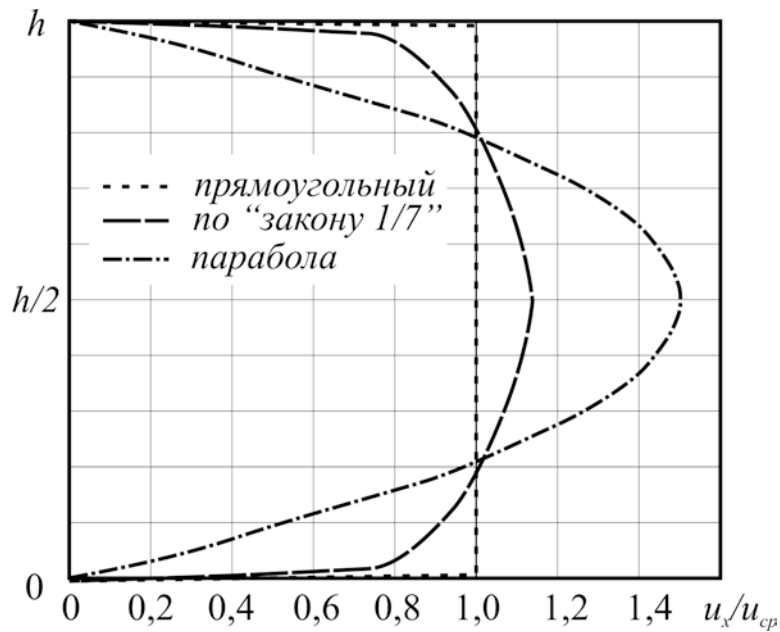


Рис. 48. Профили продольной скорости на входной границе

5.2.1. Замечания

При работе с UDF могут возникнуть проблемы при интерпретации. При работе в среде ОС Windows 7 x64 возникла следующая ошибка:

“error: udf compiler: cannot execute cpr...” и далее путь к файлам. Эта ошибка возникает из-за отсутствия в настройках ОС путей к рабочей папке Fluent. Настройка производится следующим образом: Панель управления-> Система -> Дополнительные параметры системы... Далее во вкладке Дополнительно -> Переменные среды и далее в окне Системные переменные необходимо найти строчку Path и, нажав на нее два раза, войти в режим редактирования (или нажать кнопку Изменить). В конце строки, уже существующей в этой системной переменной, **через точку с запятой**, необходимо добавить путь к основной папке, где установлена программа Fluent (обычно это C:\Fluent.Inc\ntbin\win64\).

6. ПОСТПРОЦЕССИНГ

6.1. Создание зон для отображения и представления данных

Для получения информации о распределении рассчитанных величин удобно пользоваться инструментом зона (Surfaces), который выделяет часть из всей расчетной области и представляет распределение указанной величины по этой зоне.

В Fluent имеются следующие виды зон – точка (Point Surface), линия/ряд точек (Line/Rake Surfaces), плоскость (Plane Surface) и др. Для их создания нужно вызвать соответствующий диалог из меню Surfaces.

6.1.1. Точка (Point Surfaces)

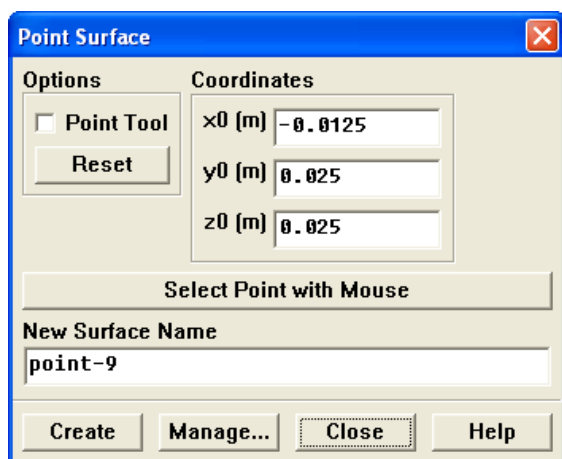


Рис. 49. Диалог Point Surface

Диалоговое окно вызывается командой Surface->Point...

В полях Coordinates (координаты) вводятся соответствующие (x, y, z) координаты точки. Кроме этого имеется возможность указать ее положение при помощи мыши (Select Point with Mouse). После нажатия этой кнопки нужно в графическом окне (в котором предварительно была отображена расчетная область) указать нужную точку щелчком правой кнопки мыши. После чего в полях координаты появятся координаты указанной точки. В поле имя новой

зоны (New Surface Name) вводится ее имя. Для создания точки нажать кнопку Create. Кнопка управление (Manage) позволяет управлять уже существующими зонами (см. разд. 6.1.3. Управление зонами представления данных).

6.1.2. Линия или набор точек (Line and Rake Surfaces)

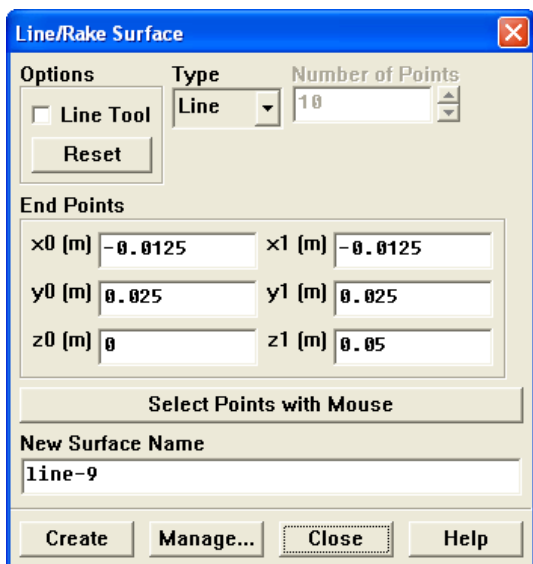


Рис. 50. Диалог Line and Rake Surfaces

Диалоговое окно вызывается командой Surface->Line/Rake... (рис. 50).

В соответствующих полях (x_0 , y_0 , z_0 и x_1 , y_1 , z_1) вводятся координаты начальной и конечной точек линии, если выбран тип Line, и еще дополнительно количество точек (Number of Points), если выбран тип Rake. В поле New Surface Name вводится имя создаваемой линии. Для удобства дальнейшей работы линии нужно именовать понятно и однообразно. К примеру, вертикальные линии (сечения) поперек исследуемого прямого горизонтального канала

лучше всего будет называть как x_XXX , где XXX – координата данного сечения (если координата не целая, в качестве разделителя десятичной части нужно использовать точку). После именования линии нужно нажать кнопку Create.

6.1.3. Управление зонами представления данных

Для переименования и удаления существующих зон необходимо вызвать диалоговое окно командой меню Surface->Manage... или кнопкой Manage... из диалогового окна создания любой зоны (рис. 51). В списке Surfaces выбрать нужную зону, ее имя появится в поле Name, где можно его исправить и нажать кнопку Rename для переименования или Delete для удаления.

Со способами построения других типов зон можно ознакомиться в Help по Fluent.

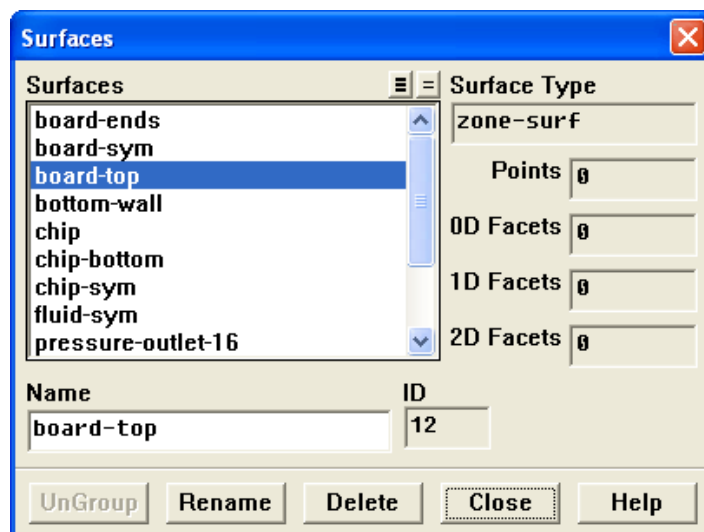


Рис. 51. Диалог Surfaces

6.2. Визуализация

Для визуализации результатов решения в Fluent имеется несколько инструментов находящихся в пункте меню Display:

- Contours (Контуры) – поля (контуры, изолинии) величин в расчетной области, полученные в результате численного решения;
- Vectors – векторы расчетных величин;
- Pathline – линии траекторий виртуальных частиц, движущихся в потоке (как бы молекул вещества);
- XY Plot – позволяет строить двухмерные графики величин в декартовых координатах.

Кроме этого, имеется еще ряд инструментов, а также настройки отображения (свет, виды, цвета и т.п.), с которыми более подробно можно ознакомиться в руководстве.

6.2.1. Контуры

Этот тип визуализации обычно может пригодиться при качественном анализе результатов решения, поскольку довольно сложно построить изолинии с заданными значениями величины. Если же все-таки это необходимо, то нужно воспользоваться отдельным постпроцессором, например, программой Tecplot.

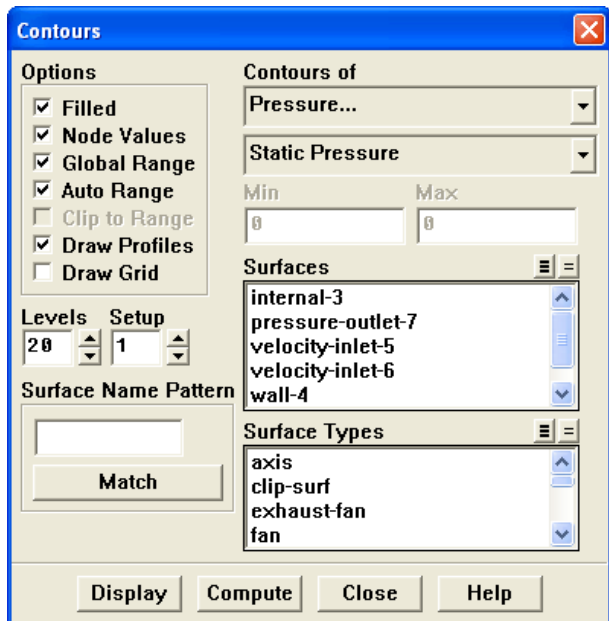


Рис. 52. Диалог Contours

выбранном диапазоне (см. опции Global Range и Auto Range). А Levels – количество уровней, максимально можно установить 100 уровней контуров.

Группа Options позволяет настроить основные параметры отображения:

- Filled (залито) – при выключенной опции показывает отдельные изолинии величины, раскрашенные в зависимости от ее значения, при включении – на графике сплошной заливкой определенного цвета закрашивается вся область, имеющая соответствующее значение.
- Node Values – переключает отображение между вариантами, когда величины для отображения берутся из узлов расчетной ячейки (опция включена) или из центров ячеек (опция выключена).
- Global Range – переключает отображение между вариантами, когда контуры выбранной величины строятся по максимальному и минимальному значениям во всей области (опция включена) или когда используется максимальное и минимальное значения в выбранных зонах (список Surfaces).
- Auto Range – переключает отображение между вариантами автоматического определения диапазона Min-Max (опция включена) и ручным определением (опция выключена). В последнем случае становятся активными окна Min и Max, а также опция Clip to Range (вырезать диапазон). При включенной опции Auto Range можно узнать значения Min и Max нажатием кнопки Compute.
- Clip to Range – позволяет при ручном режиме установки диапазона (выкл. Auto Range) и включенной заливке (Filled) не отображать цветом область, выходящую из указанного в полях Min/Max диапазона.

Вызов инструмента Contours производится командой меню Display-> Contours...(рис. 52). В выпадающих списках Contours of выбирается величина для отображения. В верхнем выпадающем списке выбирается основной раздел, в нижнем – уже конкретная величина, например, Pressure и далее Static Pressure.

В окне Levels (уровни) устанавливается количество показываемых контуров. Показываются те контуры (изолинии), значения величин на которых вычисляется как $(Max-Min)/Levels$, где Max и Min – соответственно максимальное и минимальное значения величины в

- Draw Grid – вызывает появление диалога настройки отображения расчетной сетки, после чего уже выбранные контуры отображаются в графическом окне поверх расчетной сетки.

Список Surfaces служит для определения зон, на которых будут отображаться контуры выбранных величин. По умолчанию в этом списке не выбрана ни одна зона, т.е. контуры будут отображаться во всей расчетной области.

После настройки всех параметров нажать кнопку Display.

6.2.2. Векторы

Инструмент вызывается командой из меню: Display->Vectors...(рис. 53) и позволяет отображать векторы скоростей в расчетной области.

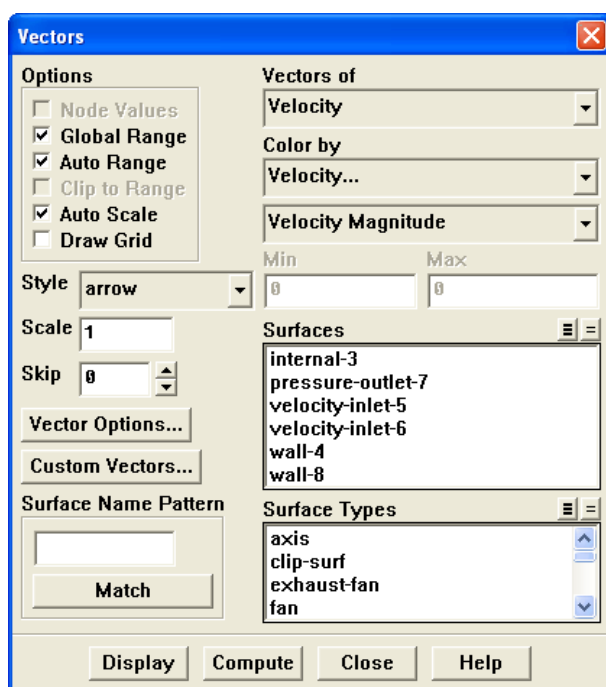


Рис. 53. Диалог Vectors

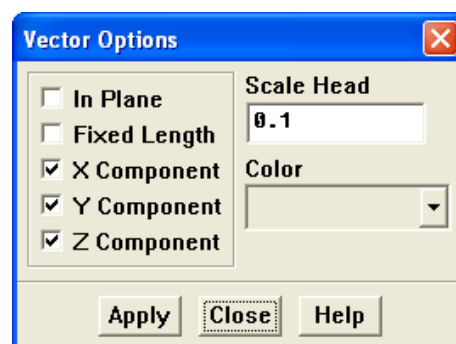


Рис. 54. Диалог Vector Options

Векторы показываются по умолчанию по одному в каждой расчетной ячейке. Начало вектора в ее центре, а длина пропорциональна величине скорости. Основные элементы управления аналогичны диалогу настройки отображения контуров. Дополнительно имеется возможность настроить вид стрелки вектора (Style), а также его масштаб (Scale). В поле Skip (пропустить) можно установить количество ячеек, которые пропускаются при отображении поля векторов. Если в этом поле установлено нулевое значение, будут отображаться все векторы (во всех n расчетных ячейках), если 1, то при отображении будет пропущен каждый второй вектор (общее количество векторов будет равно n/2), если значение Skip равняется 2, то будут пропущены два из трех векторов (n/3) и т.д. При нажатии на кнопку

Vector Options... появляется окно настройки свойств отображения векторов (рис. 54). Здесь, в том числе, можно настроить и отображение векторов с постоянной длиной (не зависящей от значения скорости) – опция Fixed Length.

Чтобы увидеть распределение векторов по какой-либо границе, нужно выделить ее в списке Surfaces основного диалога (рис. 53). Если в этом списке не будет выделено ни одной границы, в графическом окне отобразятся векторы во всей расчетной области.

После настройки всех параметров отображение нажать кнопку Display.

6.2.3. Построение траекторий

Инструмент Pathlines (траектории) позволяет строить траектории движения потока. Имитируется выпуск частиц из выбранной пользователем границы, частицы не имеют массы и движутся вместе с потоком. Выпуск частиц производится из центров ячеек расчетной сетки, т.е. максимальное количество строящихся траекторий равняется количеству ячеек на выбранной границе. Диалог настройки вызывается командой меню: Display->Pathlines... (рис. 55).

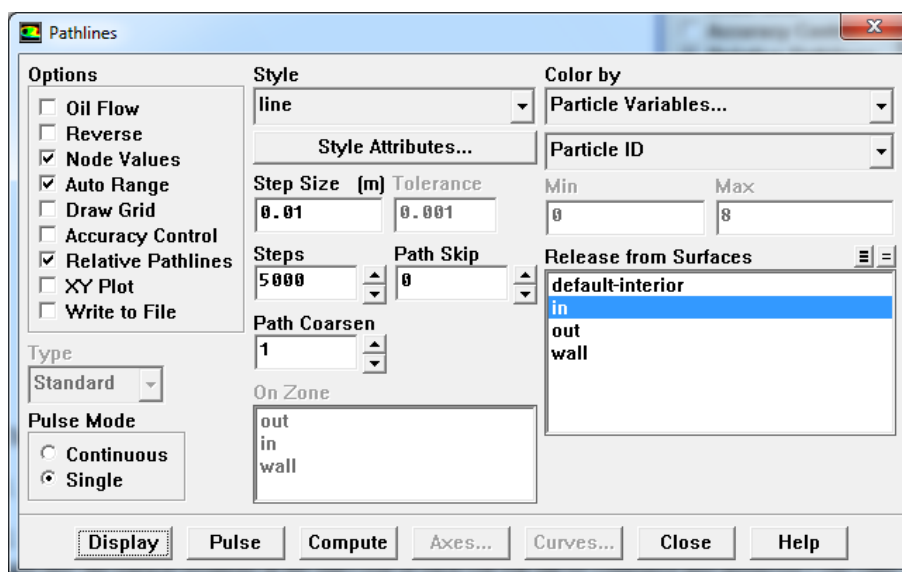


Рис. 55. Диалог Pathlines

Вначале нужно выбрать границы, из которых будут выпущены частицы – список Release from Surfaces, далее устанавливается размер шага (Step Size) – шаг траектории, с которым будут рассчитываться координаты частицы. Нужно иметь в виду, что нет смысла задавать этот параметр очень маленьким (меньше размера ячейки), поскольку координаты частицы все равно рассчитываются с точностью до размера ячейки. Кроме того, чем меньше шаг, тем дольше строится траектория. Задание этого значения слишком

большим приведет к более грубому расчету траектории. Поэтому оптимальным является задание этой величины близкой, но большей чем размер ячейки. Далее необходимо задать количество шагов (Steps), которое должна пройти частица. Траектория частицы строится по количеству указанных шагов, либо пока частица не выйдет из расчетной области. Если необходимо проследить траекторию частицы во всей области, нужно, чтобы произведение Step Size и Steps было заведомо большим, чем предполагаемый путь частицы в моделируемой области.

Также как и при настройке отображения векторов, можно настроить вид отображаемой траектории (выпадающий список Style и кнопка Style Attributes...). Аналогично опции Skip при отображении векторов здесь можно разрядить количество отображаемых траекторий при помощи опции Path Skip. Опция Path Coarsen (огрубление траектории) служит для уменьшения количества точек, через которое будет проведена рассчитанная траектория. Значение 1, установленное по умолчанию, означает что траектория будет проведена через каждую рассчитанную точку, 2 – через одну и т.д.

В случае если необходимо построить траектории частиц, покидающих расчетную область через определенную известную границу, нужно дополнительно включить опцию Reverse (развернуть).

При построении траектории бывает полезно посмотреть на движение частицы по траектории, для этого имеется кнопка Pulse и опции настройки такого анимированного отображения: Continuous (сплошное) – траектории отображаются штриховой линией на всю свою длину, и по ним «бегут» пропуски штриха по направлению движения; и Single (одиночное) – производится одинарный «выпуск» штрихов, которые «бегут» по траекториям.

6.2.4. XY график

Этот инструмент позволяет строить графики рассчитанных величин в декартовых координатах.

Вызов инструмента производится командой меню Plot-> XY Plot... (рис. 56).

В этом диалоге нужно выбрать величины, которые будут отображаться на графике по осям координат, и границу (поле Surfaces), по которой будет построено изменение величины. При этом нужно заранее решить, на какой оси будет отображаться искомая величина, а на какой оси будет отображаться координата. В приведенном на рис. 56 примере координаты будут отложены по оси абсцисс (включена опция Position on X Axis), а статическое давление будет отложено по оси ординат (см. выпадающий список Y Axis Function). В поле функции для другой координаты можно выбрать Direction Vector или Curve Length.

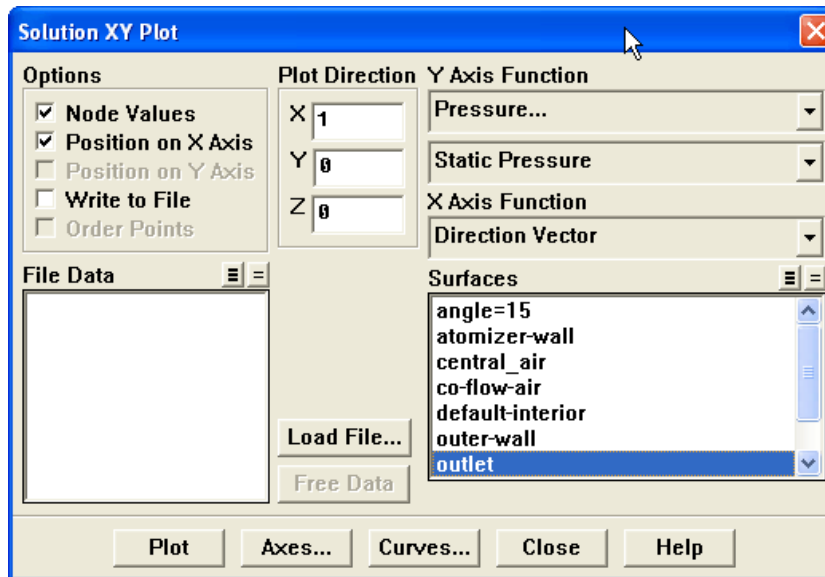


Рис. 56. Диалог XY Plot

Если нужно построить зависимость одной величины от другой (а не от координаты), нужно выключить обе опции Position on X Axis и Position on Y Axis. В этом случае появится возможность выбрать расчетные величины в обоих выпадающих списках: и для оси абсцисс, и для оси ординат.

Далее нужно выбрать направление построения. Можно построить величину в зависимости от координаты в направлении, указанном заданным вектором – в поле функции для координаты выбрать Direction Vector. Вектор задается компонентами в полях X, Y, Z группы Plot Direction (направление построения). В этом случае координаты построенных на графике точек будут определяться как произведение соответствующей координаты величины и компоненты вектора построения – Plot Direction. Если, к примеру, при заданных на рис. 56 настройках вектора построения, граница, по которой строится график (outlet), расположена горизонтально, то график будет построен верно. В случае же если вектор построения будет иметь компоненты (0; 1; 0), все точки статического давления лягут в одну линию, поскольку имеют одинаковые у-координаты.

Кроме этого, можно построить изменение величины вдоль самой границы, это бывает полезно, если граница имеет криволинейные очертания. Для этого в поле функции для координаты нужно выбрать Curve Length. Имеются ограничения к границе – она должна быть кусочно-линейной и не должна содержать более одной замкнутой кривой (например, круг). Чтобы построить величину в зависимости от длины в направлении увеличения координаты, нужно оставить значение опции Plot Direction – Default, а если в сторону уменьшения – Reverse (опции Plot Direction изменятся при выборе опции Curve Length). Для проверки направления построения величины можно нажать кнопку Show (появляется при выборе опции Curve Length), и в

графическом окне отобразится выбранная граница, а также начало линии, вдоль которой будет производиться построение графика (синей точкой), и конец линии – красной точкой.

После настройки, для построения графика, – нажать кнопку Plot.

Имеется возможность сохранить построенные величины в файл. Для этого нужно включить опцию Write to File, при этом кнопка Plot превратится в кнопку Write. Полезным бывает включить опцию Order Points (упорядочить точки). После нажатия кнопки Write нужно выбрать место сохранения файла, а также его имя. Сохраненный файл имеет обычный текстовый формат, что позволяет открыть его, например, в табличном процессоре Excell и дальнейшую обработку, построение и оформление графиков проводить в нем.

Кроме этого, все графики построенные в графическом окне можно скопировать в виде изображения в буфер обмена Windows следующим образом: нужно нажать правой кнопкой мыши на иконке графического окна (находится слева сверху – см. рис. 57) и в выпавшем меню выбрать Copy to Clipboard, в меню Page Setup имеются дополнительные настройки.

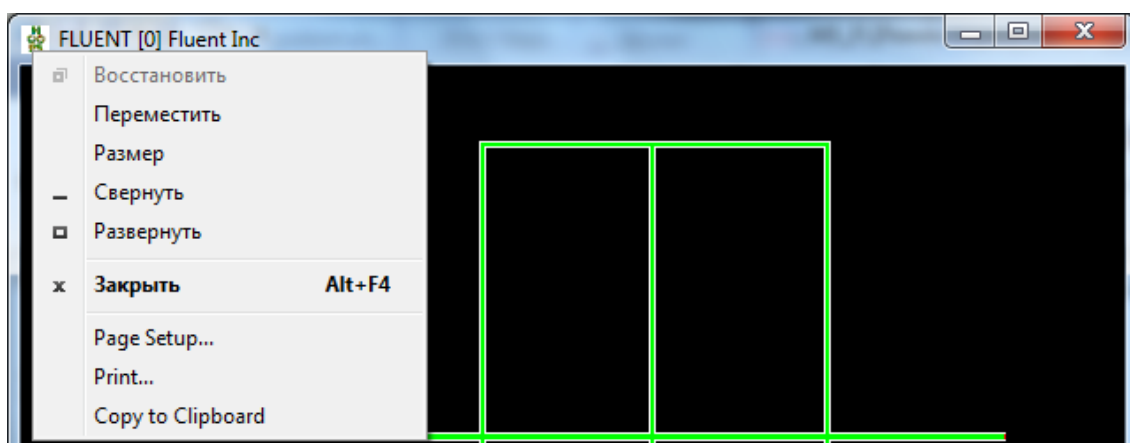


Рис. 57. Копирование изображения в буфер

7. ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

7.1. Общий порядок проведения компьютерного моделирования

7.1.1. Подготовка модели и препроцессинг

На этапе подготовки модели необходимо перейти от исследуемого физического явления к его математической (компьютерной) модели. Для этого нужно определить:

- конкретную конечную цель исследования (что нужно найти – распределение давления по определенной границе, среднюю скорость на выходе из аппарата и т.п.);

- особенности модели:
 - какие нужно использовать физические модели – например, турбулентность, лучистый теплообмен и т.д.;
 - упрощения, которые необходимо сделать, поскольку реальную ситуацию смоделировать невозможно – например, упрощенная геометрия, равномерные ГУ и т.п.;
 - упрощения, которые можно сделать, не уменьшив при этом адекватность модели, – например, двухмерность или осесимметричность и т.д.;
 - необходимость использования уникальных возможностей – нестандартные ГУ, модели и т.д. (возникает необходимость в программировании – UDF);
- уровень точности получаемого результата;
- время, за которое нужно получить результат.

Последние два пункта взаимосвязаны: чем точнее необходимо получить результат, тем дольше исследования, в том числе за счет более мелкой сетки, соответственно, более долгий итерационный процесс.

После чего необходимо определить геометрию компьютерной модели. Для этого нужно следующее.

- Изолировать часть исследуемой физической системы. То есть выделить из всего комплекса область, в которой будет полностью происходить исследуемое явление, и исключить области, явления в которых не будут оказывать сильного влияния. К примеру, при исследовании теплообмена и гидродинамики у нагретой пластины исследуемую область можно ограничить некоторой областью, границы которой достаточно удалены от пластины. Причем на входе и выходе из области мы можем установить граничные условия (распределение давлений, скоростей, температур и турбулентных характеристик), наиболее близко отвечающие физической модели, например, смоделировать удаленную свободную границу.
- Определить ГУ для границ области – найти физические данные, найти стандартные ГУ Fluent или запрограммировать при помощи UDF.
- Определить мерность задачи (2D, осесимметричная, 3D).

Далее производится построение сетки (описание программы-препроцессора Gambit для построения сеток, а также пошаговые примеры можно найти в [4]). При этом важно определить следующее.

- Используемую форму ячейки – четырехугольная/гексаэдральная (quad/hex), треугольная/тетраэдральная (tri/tet) или гибридная (hybrid): зависит от сложности геометрии и необходимости наличия неконформных границ. Обычно при построении в препроцессоре уже становится ясно, какой тип сетки получится использовать. Наиболее рекомендуемая – регулярная quad/hex сетка, однако сам препроцессор

не всегда может сделать такую сетку для сложной области, в этом случае необходимо попытаться сделать гибридную (подробнее в [4]).

- Степень измельчения сетки для каждой области:
 - важность мелкой сетки для каждого региона области;
 - предварительное знание регионов с большим градиентом величин;
 - возможность использования адаптации для измельчения сетки.
- Необходимую вычислительную мощность компьютера:
 - количество ячеек расчетной области;
 - количество и тип используемых при расчете моделей.

7.1.2. Решение

Решение задачи в программе (процессоре, решателе, солвере) состоит из следующих этапов.

- Загрузка и проверка исходной сетки – раздел 1 данного пособия.
- Выбор моделей – раздел 1 данного пособия:
 - физические модели (сжимаемость, излучение, химические реакции и т.п.);
 - модели турбулентности;
 - свойства веществ.
- Установка граничных условий (ГУ) – раздел 2 данного пособия.
- Настройка процессора – раздел 3 данного пособия:
 - установка управляющих элементов (solver controls);
 - настройка установок сходимости;
 - установка начальных значений;
 - запуск задачи на решение (итерации).
- Адаптация расчетной сетки – раздел 4 данного пособия.
- Анализ и визуализация результатов решения – раздел 6 данного пособия.

7.2. Порядок проведения исследования

Для упорядочивания исследования рекомендуется завести электронный документ, в котором отображать все этапы проводимого решения.

Первый параграф должен содержать постановку решаемой задачи, включая графическое отображение геометрии исследуемой области, с указанием всех параметров устанавливаемых граничных условий, с пояснениями относительно их выбора.

Второй параграф должен содержать результаты проверки задачи на «сеточную зависимость».

При решении задач (как тестовых, так и исследовательских) в первую очередь необходимо избавиться от так называемой «сеточной зависимости»,

т.е. зависимости получаемого решения от степени измельчения расчетной сетки. Для этого выбирается один или несколько параметров (контрольный параметр), наиболее характерно описывающих исследуемое течение, и контрольная точка (или сечение), где будет контролироваться этот параметр. Затем выбирается алгоритм измельчения сетки, который зависит от исследуемого течения – измельчать (адаптировать) расчетную сетку следует в областях наиболее сильного изменения основных параметров течения.

Обычно следует производить последовательную адаптацию части расчетной области с проведением решения на каждом этапе адаптации. В этом случае в качестве нулевого приближения для следующего этапа адаптации будет принято решение, полученное на данном этапе. Такой алгоритм часто позволяет быстрее получить сходящееся решение. Все это справедливо, если уже на грубой сетке получается физически адекватное течение, которое затем просто уточняется.

Поскольку Fluent не имеет возможности произвести откат (отмену) сделанных действий, а в некоторых случаях имеется необходимость вернуться к предыдущему этапу адаптации, каждый этап адаптации необходимо сохранять в отдельном файле. Для однообразия можно воспользоваться следующим правилом именования файлов: *названиефайла_x*. Здесь *названиефайла* – понятное название, наиболее однозначно описывающее исследуемую задачу, *x* – номер адаптации, причем в нулевой адаптации рекомендуется сохранять задачу с неадаптированной сеткой, импортированную из препроцессора (например, Gambit).

Результаты проверки на сеточную зависимость удобно представлять в табличной форме:

№ адаптации	Название (путь) файла	Характеристики сетки	Способ адаптации	Контрольный параметр

Характеристики сетки можно получить нажав: Grid → Check. В этом случае в основном окне программы будет выведена информация о размерах ячеек расчетной сетки – minimum face area (m2) и maximum face area (m2) – это минимальная и максимальная сторона двухмерной ячейки (в двухмерной задаче) или минимальная площадь грани трехмерной ячейки (в трехмерной задаче). Количество расчетных ячеек (Cells) и узлов (Nodes) можно получить, выбрав Grid->Info->Size.

В графе «Способ адаптации» необходимо указать, какой способ используется: Boundary, Gradient, Iso-Value, Region, и параметры – например, для Region – координаты адаптируемого региона, а для Boundary – название границы, по которой производится адаптация, и глубина адаптации (расстояние или количество ячеек).

В случае если решается задача, в которой важно правильно воспроизвести течение около твердых границ, адаптацию необходимо проводить у этих твердых границ (наиболее рационально – способом Boundary Adaption) и при проверке на сеточную зависимость ввести еще один контрольный параметр – безразмерное расстояние y^* или y^+ . Более подробно требования к величине этого параметра обсуждаются в разделе 2.11 «Пристеночное моделирование».

После проверки задачи на сеточную зависимость можно приступить к непосредственному численному исследованию поставленной задачи.

В случае решения тестовой задачи далее нужно проверить, как изменение численной схемы влияет на получаемое решение (например влияние использования разных моделей турбулентности или способа задания граничных условий и т.д.). При этом, так же как и в случае с проверкой на сеточную зависимость, рекомендуется выбрать контрольные параметры и проверять их изменение, сравнивая друг с другом и с уже известными (достоверными экспериментальными, аналитическими или численными данными) – опорными результатами. При этом отмечая, какие именно изменения в численную схему были внесены и как они повлияли на конечный результат. Численная схема настроена верно (верифицирована) в том случае, если данные, полученные с ее помощью, хорошо совпадают с опорными результатами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fluent 6.3 HELP – руководство к программному комплексу.
2. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980. – 618 с.
3. Hilsenrath, et al. “Tables of Thermal Properties of Gases.” National Bureau of Standards Circular 564 (1955).
4. Зиганшин А.М. Вычислительная гидродинамика. Построение расчетных сеток в препроцессоре Gambit. – Казань: КГАСУ, 2011. – 34 с.

