

2. Быстрое начало

2.1. Введение

Добро пожаловать в FEMLAB! Цель этого Быстрого Начала состоит в том, чтобы помочь Вам начать знакомство с преимуществами этой современной версии пакета программ. Здесь приведён пример, показывающий общую технологию моделирования в FEMLAB. Подробности раскрыты в документации, перечень которой дан в п. 2.1.1. Можно также пользоваться справочной системой по пакету FEMLAB.

2.1.1. Состав документации

Полная документация состоит из следующих больших разделов:

- Руководство по инсталляции - здесь рассматриваются не только порядок и параметры инсталляции, но и системные требования, некоторые проблемы с машинной графикой, консольные параметры запуска приложения, лицензионное соглашение.
- Быстрое начало - книга, содержащая краткий обзор возможностей FEMLAB, а также некоторые приёмы их использования.
- Руководство пользователя - охватывает функциональные возможности FEMLAB от моделирования геометрии до постпроцессорной обработки. Этот документ может служить как самоучитель и краткий справочник по использованию FEMLAB.
- Руководство по моделированию - содержит подробное описание прикладных режимов программного пакета и способы использования их для моделирования различных классов физических явлений. Здесь рассматриваются физические и "уравнение-основанные" прикладные режимы, базирующиеся прямо на PDE и их системах.
- Библиотека моделей - достаточно обширный набор готовых к решению моделей из различных областей науки и техники. Эти модели имеют две цели: показать многосторонние возможности FEMLAB для широкого диапазона приложений; дать пользователю учебные примеры работы с FEMLAB, позволяющие также понять основы физики моделируемых процессов.
- Руководство по MATLAB-программированию в системе FEMLAB - показывает, как использовать все возможности FEMLAB в среде программирования системы MATLAB.
- Справочник по функциям пакета FEMLAB - описание всех наиболее важных функций пакета FEMLAB, работающих в среде MATLAB.
- Замечания по версии FEMLAB 3.0.

Вся перечисленная документация относится к ядру FEMLAB. Фирма Comsol поставляет также три необязательных модуля расширения: Модуль Химических технологий, Модуль Структурной механики, Модуль Электромагнетизма. Каждый из этих модулей снабжается двумя большими разделами документации: Руководство пользователя и Библиотека моделей.

Электронная версия полной документации поставляется фирмой Comsol в двух форматах - PDF и HTML. Всё это становится доступным после инсталляции FEMLAB.

2.1.2. Предисловие к системе FEMLAB 3.0

Система FEMLAB - первый инженерный инструментарий, позволяющий выполнять моделирование мультифизики на основе уравнений математической физики в интерактивной среде. С момента выпуска первой версии система FEMLAB всё время совершенствовалась: добавлялись новые возможности моделирования разнообразных физических полей в доступной для научных работников форме. Выпуск FEMLAB 3.0 - главный шаг эволюции этого программного обеспечения.

FEMLAB разработан таким образом, чтобы моделирование физических полей и связей между ними выполнялось наиболее просто. Есть возможность решать заданную систему дифференциальных уравнений в частных производных или использовать специализированные физические прикладные режимы. Эти физические режимы состоят из predetermined шаблонов и интерфейсов пользователя, уже установленных с уравнениями и переменными для специфических областей физики. Далее, объединяя (комбинируя) любое число этих прикладных режимов в единое прикладное описание, можно моделировать проблему мультифизики. Подробности см. в п. 4.1.2 раздела "Руководство по моделированию".

Библиотека моделей - очень важная часть пакета. Она содержит законченные модели из различных областей техники. Каждая модель снабжена обширной документацией, включающей техническую основу, технологию моделирования и обсуждение результатов. Поскольку в моделях есть готовая сетка конечных элементов и решение, пользователь сразу же может экспериментировать с различными параметрами постпроцессорной обработки. Есть возможность изменять геометрические и физические параметры каждой модели, чтобы удовлетворить индивидуальные потребности моделирования. Исходная информация в каждой модели Библиотеки может служить отправной точкой для создания собственных моделей пользователя.

FEMLAB первого и второго поколения версий был обычным пакетом расширения (Toolbox-ом) MATLAB. Следовательно, он вообще не мог работать без MATLAB. Начиная с версии 3.0, FEMLAB - независимый программный пакет и работает как независимое программное приложение непосредственно под управлением операционной системы. Это привело к существенному ускорению выполнения вычислительных алгоритмов программного обеспечения. Но интерфейс связи с системой MATLAB сохранён. FEMLAB остаётся полностью интегрированным с MATLAB, но теперь может работать совсем без MATLAB. Основной способ моделирования - работа в графическом интерфейсе пользователя. Но есть также возможность работы в режиме MATLAB-программирования. В системе MATLAB функции FEMLAB выполняются через специальную библиотеку связи, которая написана на языке C++. Поэтому и функции среды MATLAB, и команды интерфейса FEMLAB фактически выполняют одни и те же процедуры системы FEMLAB. Благодаря этому, модели, выполненные средствами графического интерфейса и средствами MATLAB-программирования, практически одинаково эффективны с вычислительной точки зрения.

В FEMLAB 3.0 реализована клиент-серверная архитектура. Клиент и сервер графического интерфейса пользователя FEMLAB полностью написаны на языке JAVA. При работе клиента процедуры FEMLAB вызываются с сервера через TCP/IP подключение. При работе в режиме MATLAB-программирования действует этот же клиент-серверный механизм.

FEMLAB 3.0 создан таким образом, чтобы он мог служить основой для дальнейшего развития программного обеспечения на много лет вперёд. Сейчас Comsol ведёт работу по созданию новых сеточных алгоритмов и решателей в новых версиях FEMLAB. Идут работы по совершенствованию интерфейсов связи с CAD-системами и другим программным обеспечением.

Желаю всем пользователям большой высокопроизводительной работы с системой FEMLAB. Буду рад ответить на любые ваши вопросы и дать любые комментарии по возникающим перед вами проблемам. С этими вопросами лицензионные пользователи могут обращаться в Comsol по E-mail suggest@comsol.com.

Наслаждайтесь!

15 декабря 2003 года.

Здесь был представлен пересказ обращения вице-президента по развитию Comsol Ларса Лангемира к пользователям FEMLAB. Обращение посвящено выходу в свет версии с номером 3.0.

2.1.3. Коротко о системе FEMLAB

FEMLAB - мощная интерактивная среда для моделирования, дающая возможность решать все виды научных и технических задач, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных (PDE). В системе FEMLAB можно легко расширять обычные модели для одного типа физических явлений в модели мультифизики, которые решают связанные явления физики, и делают это одновременно. Доступ к этой возможности не требует глубокого знания математики или числового анализа. Используя встроенные физические прикладные режимы, возможно формировать модели, задавая необходимые параметры материальных свойств, нагрузок, ограничений, источников, и потоков, не определяя явно основные уравнения. FEMLAB в этих режимах внутренними средствами формирует систему PDE, представляющих полную модель. Вы обращаетесь средствам моделирования FEMLAB в рамках независимого программного приложения через гибкий графический интерфейс пользователя (GUI), или путём программирования сценария на языке MATLAB.

Как отмечено, основная математическая структура в FEMLAB - система дифференциальных уравнений в частных производных. Обеспечивается три пути описания PDE через следующие математические ("уравнение-основанные") прикладные режимы:

- Коэффициентная форма, подходящая для линейных или почти линейных моделей;
- Генеральная форма, подходящая для нелинейных моделей;
- Ослабленная проекционная форма - для моделей с PDE на границах, рёбрах, или точках либо для моделей, использующих члены со смешанными производными по времени и по пространственным координатам. (Ослабленная проекционная форма обеспечивает много дополнительных выгод, и обзор их в контексте определенных моделей дан в других разделах документации).

Используя эти прикладные режимы, можно исполнять различные типы анализа, включая:

- Анализ на собственные частоты и моды;
- Стационарный и нестационарный (зависящий от времени) анализ;

- Линейный и нелинейный анализ (в т.ч. и параметрический).

При решении PDE система FEMLAB использует давно проверенный метод конечных элементов (FEM) (в данной документации мы это будем называть конечноэлементной технологией, поскольку в строгом смысле FEM - большой класс методов математического моделирования). Программное обеспечение выполняет конечноэлементный анализ вместе с адаптивным построением сетки, используя целый ряд численных решателей. Более детальное описание этой математической и численной основы дано в "Руководстве пользователя" и в "Руководстве по моделированию".

Законы науки базируются на PDE, которые обеспечивают основу для моделирования в широком диапазоне научных и технических явлений. Поэтому можно использовать FEMLAB во многих прикладных областях, таких как:

- Акустика
- Биология
- Химические реакции
- Диффузия
- Электромагнетизм
- Динамические потоки
- Топливные элементы и электрохимия
- Геофизика
- Перенос тепла
- Микро-электромеханические системы (MEMS)
- Микроволновые разработки
- Оптика
- Фотоника
- Потоки пористых сред
- Квантовая механика
- Радиочастотные компоненты
- Полупроводниковые устройства
- Структурная механика
- Явления переноса вещества
- Распространение волн

Если FEMLAB-модель включает в себя несколько связанных между собой прикладных режимов, то такая модель называется мультифизической. Система FEMLAB сама внутренними средствами строит из этих прикладных режимов систему связанных PDE. В качестве примера можно привести изменение удельного электрического сопротивления при изменении температуры. А температура изменяется вследствие выделения тепла проводником, по которому протекает электрический ток. В этом случае совместное решение тепловой и электромагнитной задачи является связанной мультифизикой. Данный раздел документации посвящен описанию мультифизической модели свободной конвекции. Раздел "Руководство по моделированию" описывает методы мультифизического моделирования (п. 4.10.1. "Создание мультифизических моделей"). В разделе "Библиотека моделей" в подразделе 5.9 "Мультифизические модели" также есть описание технологии мультифизического моделирования на примерах.

В системе FEMLAB, кроме элементарной предусмотрена ещё и расширенная мультифизика. Такая мультифизика позволяет объединять в одной модели несколько систем PDE, определённых на нескольких разных геометриях, причём размерности пространств в этих геометриях могут быть различными. Связь между геометриями может

быть организована в системе FEMLAB при помощи так называемых переменных связи. Это представляет первый шаг к моделированию системного уровня.

Ядро FEMLAB предоставляет пользователю возможность моделирования и анализа во многих прикладных областях. Для некоторых из наиболее важных областей созданы модули расширения FEMLAB: Модуль Химических технологий, Модуль Электромагнетизма, Модуль Структурной механики.

Наконец, для большей гибкости в системе FEMLAB предусмотрен интерфейс связи с MATLAB. Такая интеграция этих двух расчётных систем позволяет сохранять модели FEMLAB как m-файлы MATLAB и выполнять их в среде MATLAB. Это позволяет объединять моделирование в FEMLAB с другими технологиями моделирования. В частности, возможен экспорт модели FEMLAB в Simulink. Результатом этого экспорта является представление модели FEMLAB в виде блока структурной схемы динамической системы (например, системы управления), моделируемой в Simulink.

2.1.4 Среда FEMLAB

В этом подразделе перечислены главные компоненты среды FEMLAB.

При запуске FEMLAB раскрывается диалоговое окно Навигатора моделей (рис. 2.1.4.1). Главное назначение Навигатора моделей - выбор прикладных режимов и готовых моделей, а также мультифизическое комбинирование. С Навигатора моделей начинается весь процесс моделирования в системе FEMLAB.

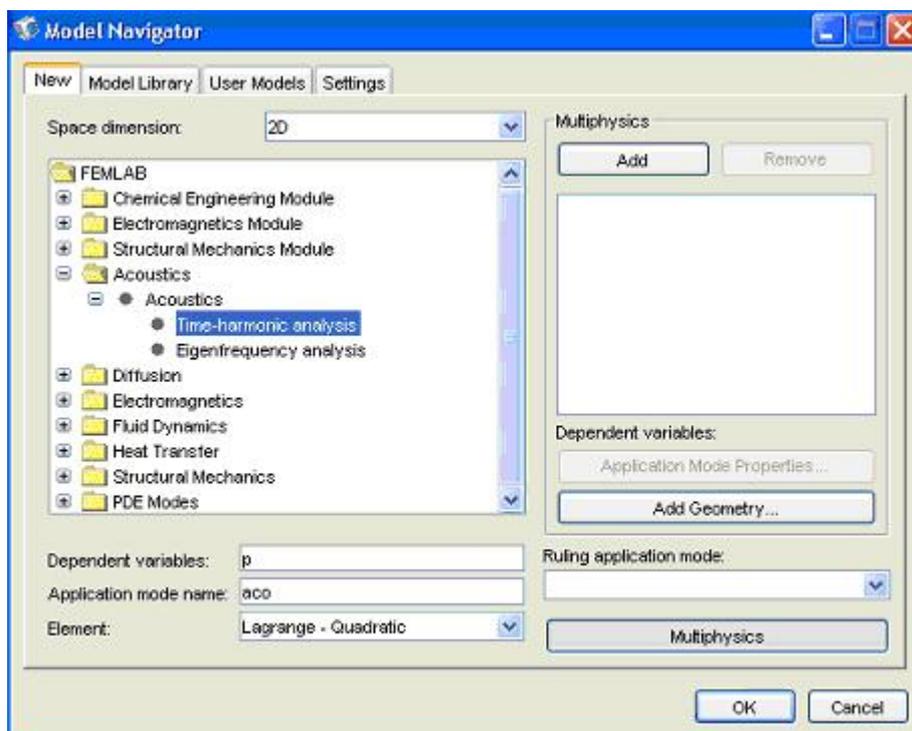


Рис. 2.1.4.1. Окно Навигатора моделей с раскрытыми средствами мультифизического комбинирования

Состав среды FEMLAB представим сначала в виде простого перечисления его компонентов. Компоненты этой среды сгруппируем по функциональному назначению, чтобы получилась некоторая структура подчинённости. Точного соответствия между

компонентами этой структуры и элементами графического интерфейса выдерживать не будем.

1. Навигатор моделей

1.1. Прикладные режимы ядра системы FEMLAB

Здесь перечислим только группы прикладных режимов.

- Акустика
- Диффузия (конвекция и диффузия, только диффузия)
- Электромагнетизм (электрическое поле постоянного тока, электростатика, магнитостатика, переменное гармоническое электромагнитное поле (2D))
- Динамические потоки (несжимаемый поток Навье-Стокса)
- Теплопередача (конвекция и теплопередача, только теплопередача)
- Структурная механика (солидное (твердотельное) моделирование, план напряжений, план деформаций)
- Уравнение-основанные" прикладные режимы (классические PDE, обобщённое PDE в коэффициентной форме, обобщённое PDE в генеральной форме, ослабленная проекционная формулировка для солидной области, то же для границ, то же для рёбер, то же для точек)

1.2. Прикладные режимы модулей расширения системы FEMLAB

В каждом модуле расширения перечислим группы прикладных режимов.

1.2.1. Модуль Химических технологий

- Баланс энергии (конвекция и теплопередача, только теплопередача)
- Баланс масс (конвекция и диффузия, только диффузия, электрокинетические потоки, диффузия Максвелла-Стефана и конвекция, уравнение Нернста-Планка)
- Баланс моментов (уравнение Бринкмана, закон Дарси, несжимаемый поток Навье-Стокса, поток неизотермической жидкости, поток не-Ньютоновской жидкости, сжимаемый поток Эйлера (2D), K-Epsilon модель турбулентности (2D))

1.2.2. Модуль Электромагнетизма

- Статика (электрическое поле постоянного тока, электростатика, обобщённая электростатика, магнитостатика, магнитостатика без электрических токов)
- Квазистатика
- Квазистатика, малые токи
- Электромагнитные волны (пространственно-частотное моделирование, анализ на собственные частоты)

1.2.3. Модуль Структурной механики

- Солидное (твердотельное) моделирование (статика, нелинейная статика, статика с эласто-пластическими материалами, анализ на собственные частоты, переходные процессы (пространственно-временной анализ), пространственно-частотный анализ, параметрический анализ, квазистатический анализ)
- Оболочки (те же наименования прикладных режимов)
- Балки и фермы Эйлера (те же наименования прикладных режимов)

1.3. Средства редактирования параметров прикладных режимов

- Ниспадающее меню Space dimension (размерность пространства): 1D, 2D, 3D, Axial symmetry (1D), Ax-ial symmetry (2D)
- Строки редактирования имён зависимых переменных (Dependent variables) и имени прикладного режима (Application mode name)
- Ниспадающее меню выбора типа конечных элементов (Element)

1.4. Средства мультифизического комбинирования

- Кнопка и диалоговое окно создания геометрий
- Кнопки добавления и удаления прикладных режимов

1.5. Библиотека моделей

В ядре FEMLAB в Библиотеке моделей содержатся следующие группы модельных примеров:

- Акустические - 5 моделей
- Образцовые (Benchmarks) - 9 моделей
- Химические технологии - 2 модели
- Диффузия - 1 модель
- Электромагнетизм - 7 моделей
- "Уравнение-основанные" - 8 моделей
- Динамические потоки - 4 модели
- Геофизические - 2 модели
- Перенос тепла - 4 модели
- Мультифизические - 9 моделей
- Квантово-механические - 2 модели
- Полупроводниковые устройства - 1 модель
- Структурная механика - 3 модели
- Распространение волн - 1 модель
- Библиотека моделей Модуля Химических технологий (группы моделей):
- Электрохимические - 2 модели
- Электрофорез и хроматография - 4 модели
- Перенос энергии - 5 моделей
- Перенос вещества - 8 моделей
- Микропотоки - 4 модели
- Перенос импульса - 8 моделей
- Реакции и реакторы - 5 моделей
- Библиотека моделей Модуля Электромагнетизма (группы моделей):
- Мультифизические - 4 модели
- Квазистатические - 10 моделей
- Волны - 8 моделей
- Библиотека моделей Модуля Структурной механики (группы моделей):
- Осесимметричные - 2 модели
- Балки и конструкции из них - 2 модели
- Двумерные - 17 моделей
- Мультифизические - 2 модели
- Пьезоэлектричество - 2 модели
- Пластины - 1 модель
- Солидные (3D) - 3 модели

1.6. Средства управления библиотеками пользовательских моделей

- Закладка User Models Навигатора моделей
- Кнопка и диалоговое окно настройки пути доступа к директории Библиотеки моделей пользователя
- Браузер пользовательских моделей
- Средства редактирования и показа описаний моделей

2. Средства конструирования моделей

2.1. Общий блок редактирования и настроек

- Стандартные команды выделения, удаления, копирования и вставки объектов, команды работы с буфером отмены действий
- Команды настройки режимов визуализации, общих для всех этапов моделирования

2.2. Средства геометрического моделирования

- Команды меню создания, редактирования свойств и удаления геометрических объектов
- Инструментальные панели геометрических операций
- Команды управления координатными системами
- Команды экспорта-импорта геометрических объектов в систему MATLAB и обратно
- Команды импорта файлов форматов DXF, IGES, STL, VRML (файлов CAD-систем)

2.3. Средства задания физических параметров

- Диалоговые окна задания и редактирования определяющих выражений для параметров материальных свойств (коэффициентов PDE) в солидных подобластях (зонах) расчётной области, включая начальные условия, типы конечных элементов и термы ослабленной проекционной формулировки
- Диалоговые окна задания и редактирования определяющих выражений для граничных условий
- Диалоговые окна задания и редактирования дополнительных условий для рёбер и точечных объектов FEMLAB-модели
- Команды и диалоговые окна создания и редактирования дополнительных переменных FEMLAB-модели: именованных констант, expressions-переменных, определяемых на геометриях и подобластях различной размерности, переменных связи интегрирующего, проекционного и экструзионного типов
- Средства работы с библиотеками материальных свойств

2.4. Средства выполнения сеточных операций

- Команда генерации (инициализации) сетки
- Команды измельчения (переопределения) сетки
- Команды показа количественных показателей качества сетки
- Диалоговое окно настройки параметров генератора сетки

2.5. Система решателей

2.5.1. Решатели по типам задач

- Стационарный линейный решатель
- Стационарный нелинейный решатель
- Нестационарный (Time dependent) решатель (он решает линейные и нелинейные задачи)
- Решатель задач на собственные значения
- Линейный параметрический решатель
- Нелинейный параметрический решатель

2.5.2. Решатели больших разреженных систем линейных уравнений

- Прямые: UMFPACK, SPOOLES
- Итерационные:
 - Обобщённый метод минимальной невязки GMRES
 - Метод сопряжённых градиентов
 - Алгебраический многосеточный решатель
 - Решатели SSOR, SOR, SORU
- Система предобусловливателей
- Средства настройки параметров прямых и итерационных решателей
- Симметричная и несимметричная технология разреженных матриц

2.5.3. Система настроек нелинейных, нестационарных и адаптивных решателей

- Средства адаптивного переопределения конечноэлементной сетки
- Средства настройки адаптивных решателей
- Средства настройки параметров нелинейных итераций
- Средства настройки решателей время-зависимых (нестационарных) задач
- Средства настройки параметрических решателей
- Дополнительные средства настройки решателей

2.6. Средства управления и анализа хода решения

- Менеджер решения: средства установки начальных значений и начальных приближений, средства блокировки и разрешения выполнения отдельных прикладных режимов, средства блокировки и разрешения вычисления отдельных зависимых переменных FEMLAB, средства блокировки и разрешения обновления выходных данных FEMLAB-модели
- Окно показа прогресса решения и текущих показателей сходимости
- Протокол сообщений генератора сетки и решателя
- Общий протокол сообщений FEMLAB

3. Средства визуализации решения и постпроцессинга

Для визуализации предусмотрена система фигур FEMLAB. Глобальная визуализация может выполняться непосредственно в поле axes графического интерфейса.

3.1. Средства глобальной визуализации

- Визуализация функции решения в виде обычного графика (1D) с возможностью его раскраски
- Визуализация функции решения в виде цветового или поверхностного графика (2D)
- Построение цветового графика функции решения на границах (2D)
- Построение изолиний функции решения (в т.ч. и цветных) (2D)
- Построение цветового графика функции решения в последовательности параллельных плоских сечений расчётной области (3D)
- Построение изоповерхностей функции решения (в т.ч. и цветных) (3D)
- Построение цветового графика функции решения в конечных элементах (тетраэдрах) (3D)
- Построение цветового графика функции решения на границах и рёбрах (3D)
- Построение векторного поля в виде стрелочек (2D, 3D)
- Построение векторного поля в виде линий тока (2D, 3D)
- Показ на графике маркеров максимума и минимума функции решения (1D, 2D, 3D)
- Построение деформированной формы расчётной области (2D, 3D)
- Команды и инструментальные кнопки быстрой визуализации

3.2. Средства визуализации в сечениях расчётной области

- Построение цветового графика функции решения в плоском сечении, задаваемом по трём точкам (3D)
- Построение криволинейного графика функции решения в прямолинейном сечении, задаваемом по двум точкам
- Построение поверхностного графика функции решения в прямолинейном сечении, задаваемом по двум точкам, если одна из осей графика - время
- Построение криволинейного графика функции решения в произвольной точке, задаваемой координатами

3.3. Средства визуализации в подобластях расчётной области

- Построение цветового графика функции решения на граничной поверхности (3D)
- Построение цветового графика функции решения в зоне расчётной области (2D)
- Построение криволинейного графика функции решения на ребре (3D) или на границе (2D) или в зоне (1D)
- Построение поверхностного графика функции решения на ребре (3D) или на границе (2D) или в зоне (1D), если одна из осей графика - время
- Построение криволинейного графика функции решения в точечном объекте (1D, 2D, 3D)

3.4. Средства вычисления интегральных параметров рассчитанного поля

- Вычисление интеграла функции решения по одной или нескольким зонам расчётной области (1D, 2D, 3D)
- Вычисление интеграла функции решения по одной или нескольким граничным поверхностям (3D)
- Вычисление интеграла функции решения по одному или нескольким граничным сегментам (2D)
- Вычисление интеграла функции решения по одному или нескольким рёбрам (3D)

4. Средства интеграции с системой MATLAB, экспорт - импорт

4.1. Пакет функций MATLAB, вызывающих через DLL java-процедуры FEMLAB

- Команда запуска графического интерфейса FEMLAB
- Функции вызова решателей
- Геометрические функции
- Конструкторы геометрических объектов
- Функции вызова сеточных процедур
- Функции вызова утилит FEMLAB
- Функции вызова постпроцессорных процедур
- Функции нижнего уровня
- Классы функций формы
- Математические функции
- Функции, устаревшие в FEMLAB 3.0

4.2. Объектовые и структурные типы MATLAB, определённые в пакете FEMLAB

- Структурный тип данных fem
- Структурный тип данных aprl
- Классы геометрических объектов
- Объектовый тип данных femsol

4.3. Средства экспорта

- Экспорт fem-структуры в рабочую область MATLAB
- Экспорт геометрических объектов в рабочую область MATLAB
- Экспорт картинки в виде графического файла
- Экспорт постпроцессорных данных в файл
- Экспорт текущего графика в текстовый файл

4.4. Средства импорта

- Импорт fem-структуры из рабочей области MATLAB
- Импорт геометрических объектов из рабочей области MATLAB
- Импорт DXF-файлов (2D) (см. п. 2.2)
- Импорт IGES, STL, VRML-файлов (3D) (см. п. 2.2)

4.5. Средства загрузки и сохранения моделей FEMLAB

- Загрузка и сохранение моделей в формате MATLAB (файлы типа m)
- Загрузка и сохранение моделей в формате FEMLAB (файлы типа fl)

Для наглядности данный список компонентов представим в сокращённом виде на рис. 2.1.4.2.



Рис. 2.1.4.2. Компоненты среды FEMLAB с точки зрения пользователя

2.1.5 Обзор прикладных режимов FEMLAB

Прикладной режим - режим моделирования, соответствующий некоторой технической или научной дисциплине либо некоторому стандартному виду PDE и граничных условий. В системе FEMLAB реализованы "физические" и "уравнение-основанные" прикладные режимы. Последние предназначены для решения классических и обобщённых PDE без привязки к физическим явлениям. "Физические" прикладные режимы привязаны к конкретным техническим или научным дисциплинам, уравнения в них записываются в терминах этих дисциплин, здесь имеются предопределённые шаблоны и интерфейсы пользователя. Несмотря на привязку к специфическим областям науки и техники, в этих прикладных режимах есть средства просмотра и редактирования обобщённых PDE. Это особенно полезно в тех случаях, когда прикладной режим не совсем точно соответствует моделируемому процессу, а также при изучении технической или научной дисциплины.

Система FEMLAB состоит из ядра и модулей расширения. **Ядро FEMLAB** - главная лицензируемая единица пакета FEMLAB, в которой имеется базовый набор прикладных режимов и функций. **Модуль расширения FEMLAB** - дополнительная лицензируемая

единица пакета FEMLAB, в которой имеется усовершенствованный набор прикладных режимов из области науки и техники, соответствующей названию модуля. Фирма Comsol поставляет три модуля расширения. Каждый из этих модулей расширения может работать только в комплекте с ядром.

В табл. 2.1.5.1 дан перечень прикладных режимов ядра с указанием возможности их выбора в одномерном, двумерном и трёхмерном режимах моделирования.

Прикладной режим	1D	2D	3D
Акустика			
Акустика		Да	Да
Диффузия			
Конвекция и диффузия	Да	Да	Да
Диффузия	Да	Да	Да
Электромагнетизм			
Переменное гармоническое электромагнитное поле		Да	
Электрическое поле постоянного тока		Да	Да
Электростатика		Да	Да
Магнитостатика		Да	Да
Теплопередача			
Конвекция и кондукция	Да	Да	Да
Кондукция	Да	Да	Да
Динамические потоки			
Несжимаемые потоки, описываемые уравнениями Навье-Стокса		Да	Да
Структурная механика			
План деформаций		Да	Да
План напряжений		Да	Да
Трёхмерное солидное (твердотельное) моделирование			Да
"Уравнение-основанные" прикладные режимы			
Коэффициентная форма	Да	Да	Да
Генеральная форма	Да	Да	Да
Ослабленная проекционная форма, определённая на подобластях максимальной размерности (зонах)	Да	Да	Да
Ослабленная проекционная форма, определённая на границах	Да	Да	Да
Ослабленная проекционная форма, определённая на рёбрах			Да
Ослабленная проекционная форма, определённая на точечных объектах		Да	Да
Классические PDE			
Уравнение конвекции - диффузии	Да	Да	Да
Уравнение Лапласа	Да	Да	Да
Уравнение теплопроводности	Да	Да	Да
Уравнение Гельмгольца	Да	Да	Да
Уравнение Пуассона	Да	Да	Да
Уравнение Шрёдингера	Да	Да	Да
Волновое уравнение	Да	Да	Да

В системе FEMLAB есть **простые** и **составные** прикладные режимы. В табл. 2.1.5.1 представлены простые прикладные режимы. Составные прикладные режимы представляют собой совокупность простых прикладных режимов, которые могут быть взаимосвязаны. Составные прикладные режимы иначе называют **мультифизическими**. Составление прикладных режимов осуществляется средствами мультифизического комбинирования. Взаимосвязи организуются средствами конструирования моделей при помощи системы (механизма) переменных FEMLAB.

Когда моделируется реальная система, часто приходится учитывать взаимосвязи между различными физическими явлениями и физическими полями. Например, электрофизические свойства материала могут изменяться в зависимости от температуры. А объёмная плотность мощности тепловых источников зависит от плотности тока в веществе. В такой системе наблюдается двусторонняя взаимосвязь между электромагнитными и тепловыми явлениями. Моделирование такого рода взаимосвязанных явлений начинается с комбинирования двух прикладных режимов: Электрическое поле постоянного тока и Кондукция. Далее после построения геометрии расчётной области переходим в режим задания физических параметров. В этом режиме в строки редактирования удельной электрической проводимости и объёмной плотности мощности тепловых источников нужно вписать определяющие выражения, содержащие зависимые и др. переменные обоих прикладных режимов. Пусть в электромагнитном прикладном режиме зависимой переменной является скалярный электрический потенциал V , а в тепловом - температура T . Градиент потенциала определяется через переменные FEMLAB выражением векторного анализа $\text{grad } V = 1_x * V_x + 1_y * V_y + 1_z * V_z$. Тогда определяющие выражения для названных двух физических величин могут быть записаны в виде:

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{1 + \alpha \cdot (T - T_0)}, \quad Q = c \cdot (V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)$$

где σ - удельная электрическая проводимость вещества, σ_0 - то же при температуре T_0 , α - температурный коэффициент сопротивления, Q - объёмная плотность мощности тепловых источников.

Более подробно технология моделирования изложена в п. 4.10.2.

2.1.6. Internet-ресурсы системы FEMLAB от фирмы Comsol

Для получения дополнительной информации о FEMLAB, включая лицензирование и техническую информацию, пользователям доступен целый ряд ресурсов Internet. Ниже представим наиболее полезные из них.

Web-сайты Comsol

Главный web-сайт: <http://www.comsol.com/>

Страница с контактной информацией: <http://www.comsol.com/contact/>

Техническая поддержка: <http://www.comsol.com/support/>

Имеется база знаний поддержки FEMLAB. Вы можете получить ответы на любые вопросы по FEMLAB, посетив страницу <http://www.comsol.com/support/knowledgebase/>

Обновления программных продуктов: <http://www.comsol.com/support/updates/>

Контакты с Comsol по E-Mail

Для общей информации: info@comsol.com

Техническая поддержка: support@comsol.com

Ваши предложения насчёт будущих разработок направляйте по адресу: suggest@comsol.com.

2.2. Быстрое знакомство с технологией моделирования в FEMLAB

В этом подразделе дан краткий обзор основных процедур FEMLAB и показан пример моделирования. Изложение постепенно охватывает полный процесс моделирования, включая много важных аспектов пакета FEMLAB:

- Использование предопределенных физических прикладных режимов
- Определение проблемы мультифизики
- Возможность задания физических свойств, которые непосредственно зависят от решения
- Использование инструментальных средств постпроцессорной обработки и решения

В дополнение к названным возможностям FEMLAB, будет показан пример, охватывающий общую технологию моделирования:

- Приведение трёхмерной задачи к двумерному виду
- Проверка результатов моделирования на точность

Моделирование в системе FEMLAB включает в себя следующие шаги:

1. Создание или импорт геометрии
2. Генерация сетки конечных элементов
3. Задание параметров материальных свойств в зонах расчётной области и на границах
4. Решение модели
5. Постпроцессорная обработка
6. Параметрический анализ модели

Перечисленным шагам моделирования соответствуют операционные режимы FEMLAB.

2.2.1. Базовые процедуры

Запуск FEMLAB

Запуск FEMLAB в Windows описан в [подразделе 1.4](#), а в системе UNIX / Linux - в [подразделе 1.6](#).

Создание и загрузка моделей

Как было сказано в [п. 2.1.4](#), работа программного приложения FEMLAB начинается с развёртывания диалогового окна Навигатора моделей. Ещё раз покажем общий вид этого окна (закладка New, рис. 2.2.1.1).

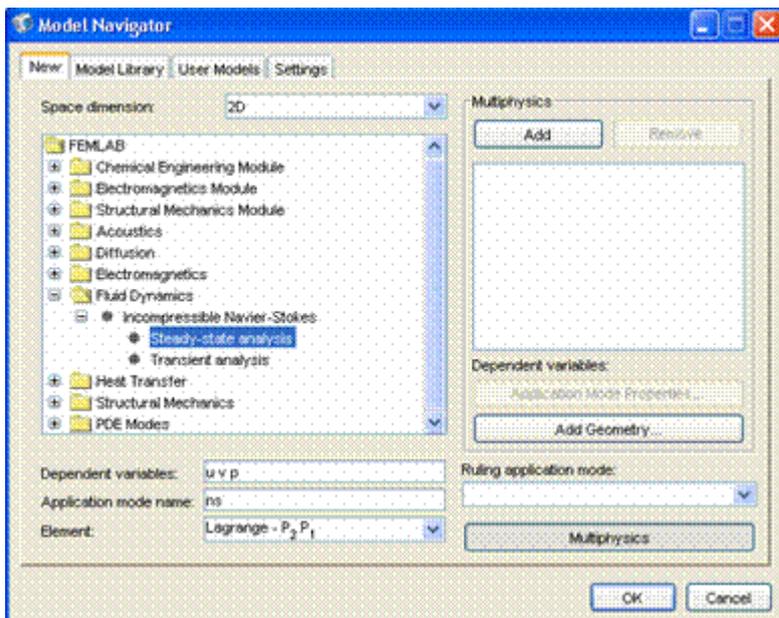


Рис. 2.2.1.1. Общий вид закладки New Навигатора моделей

Для инициализации простого прикладного режима достаточно в ниспадающем меню Space dimension выбрать нужную размерность пространства, в браузере прикладных режимов выбрать нужный и нажать кнопку ОК, чтобы закрыть окно Навигатора моделей. Если надо скомбинировать мультифизический прикладной режим, то после выбора размерности пространства и простого прикладного режима нужно нажать кнопку Add. В браузер включенных прикладных режимов будет добавлена геометрия выбранной размерности и выбранный прикладной режим. Далее в браузере прикладных режимов выбираем другой прикладной режим и опять нажимаем кнопку Add. В браузер включенных прикладных режимов добавится ещё один режим. Так повторяем до тех пор, пока вся мультифизика не будет скомбинирована. На рис. 2.2.1.2 показана закладка New Навигатора моделей, в которой скомбинирован мультифизический прикладной режим. Нажатие кнопки ОК приведёт к закрытию диалогового окна и развёртыванию графического интерфейса FEMLAB.

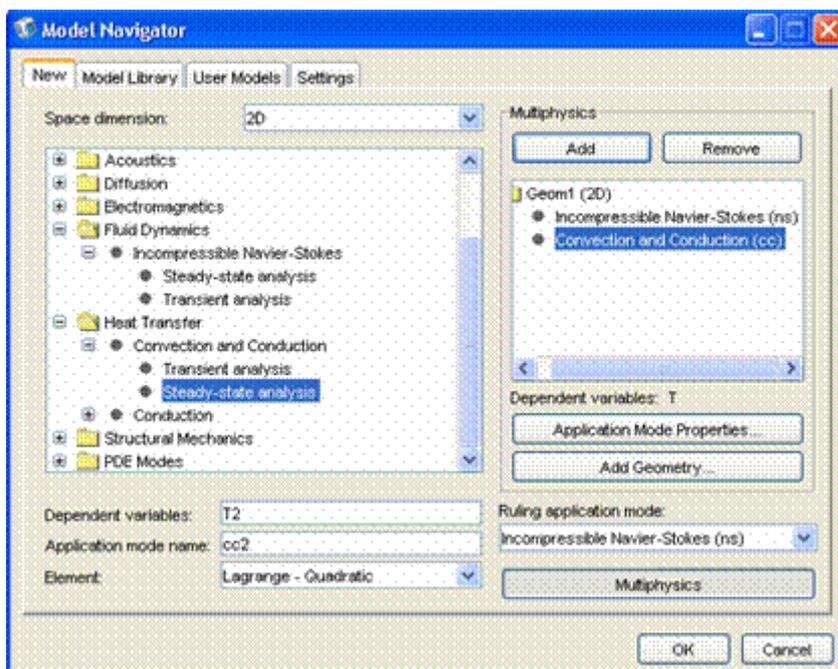


Рис. 2.2.1.2. Общий вид закладки New Навигатора моделей со сформированным мультифизическим режимом

Использование команд меню и диалоговых окон

В графическом интерфейсе FEMLAB для каждой задачи доступны для использования команды меню, инструментальные панели и диалоговые окна.

Отмена действия и восстановление после отмены.

Для отмены и восстановления нескольких команд предусмотрены команды меню Edit/Undo и Edit/Redo. Им соответствуют горячие клавиши Ctrl+Z и Ctrl+Y. Во многих случаях есть возможность отменять и восстанавливать несколько шагов моделирования.

Выбор команд из меню.

В графическом интерфейсе FEMLAB имеется развитая система команд меню. В окне FEMLAB есть горизонтальная строка главного меню. При нажатии мышью на любой из пунктов разворачивается вертикальное подменю. В некоторых случаях возможно развёртывание подменю второго уровня. Некоторые команды меню дублируются горячими клавишами. Они бывают показаны справа от соответствующих пунктов подменю. Применение горячих клавиш позволяет ускорить работу пользователя в системе FEMLAB. При выполнении некоторых команд развёртываются диалоговые окна. Остальные команды выполняются непосредственно при нажатии мышью. Пункты подменю, для которых имеются подменю более глубокого уровня, отмечены справа чёрным треугольником. Команды меню, приводящие к развёртыванию диалоговых окон, отмечены справа многоточием. Видно, что система команд меню и горячих клавиш организована таким образом, что её легко изучать даже при отсутствии документации.

Использование диалоговых окон.

Большинство диалоговых окон могут оставаться открытыми при работе с FEMLAB-моделью. Как правило, в каждом из этих окон имеется, кроме всего прочего, три кнопки для принятия или отмены произведённого в них ввода:

Общий вид окна одномерного графического интерфейса FEMLAB похож на то, что изображено на рис. 2.2.1.3. Отличие заключается в том, что в одномерном режиме в поле axes только одна ось, и панель рисования содержит меньше инструментов.

Трёхмерный графический интерфейс.

Главные отличия трёхмерного графического интерфейса от двумерного заключаются в том, что в поле axes три ортогональные оси, геометрические объекты отображаются в виде проекций на плоскость наблюдения, имеются более развитые способы визуализации объектов, а также их выбора и выделения. На рис. 2.2.1.4 показан общий вид окна GUI FEMLAB в трёхмерном режиме моделирования.

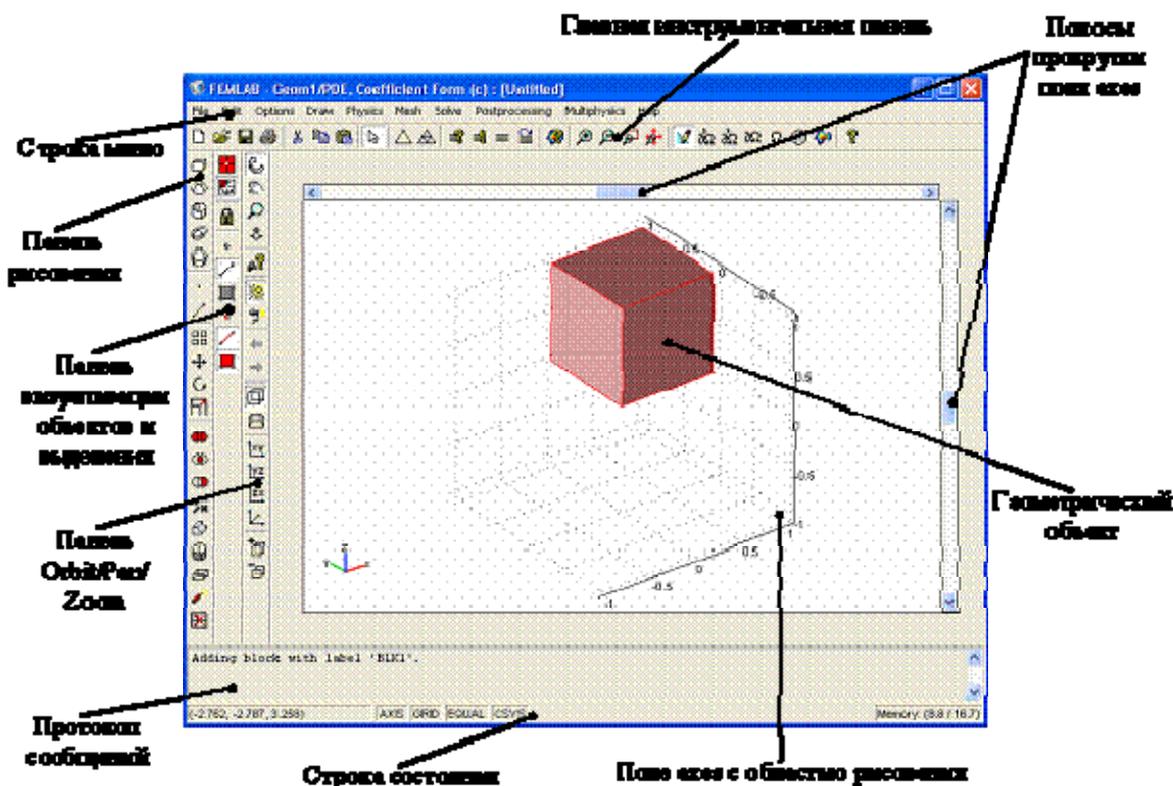


Рис. 2.2.1.4. Окно трёхмерного графического интерфейса FEMLAB

Главные компоненты графического интерфейса пользователя (GUI).

- Строка меню - с помощью неё можно выполнить любую команду меню для любого действующего режима моделирования.
- Главная инструментальная панель позволяет быстро выполнять некоторые операции с моделью.
- Панель рисования содержит инструментальные средства CAD для рисования и редактирования геометрических объектов.
- Инструментальная панель Plot обеспечивает быстрый доступ к наиболее простым методам визуализации решения.

- Панель визуализации объектов и выделения работает в трёхмерном режиме моделирования и управляет отображением граней, рёбер и вершин, а также режимами выделения объектов.
- Панель Orbit/Pan/Zoom работает в трёхмерном режиме моделирования или в режиме постпроцессорной обработки двумерных моделей и управляет направлением проецирования на экран монитора, подсветкой, прозрачностью и др.
- Поле axes предназначено для показа различных объектов модели, глобальной визуализации решения и др. Мышью можно выделять объекты и выполнять над ними некоторые операции.
- Цветовые шкалы отображают соответствие между цветом точек графика и значением визуализируемой физической величины.
- Протокол сообщений содержит сообщения о выполнении различных операций с моделью.
- Строка состояния показывает текущие значения координат указателя мыши, а также некоторые параметры текущей настройки; изменить их можно двойным щелчком мыши.

Переключение между операционными режимами.

Перечислим операционные режимы, т.е. режимы, соответствующие различным этапам моделирования:

- Режим рисования (прорисовки геометрии) (Draw Mode)
- Режим задания условий на точках (Point Mode) (2D, 3D)
- Режим задания условий на рёбрах (Edge Mode) (только 3D)
- Режим задания граничных условий (Boundary Mode)
- Режим задания материальных свойств или коэффициентов PDE (Subdomain Mode)
- Режим работы с сеткой (Mesh Mode)
- Режим визуализации решения и постпроцессорной обработки (Postprocessing Mode)

Кнопки главной инструментальной панели, с помощью которых можно переключаться между операционными режимами, показаны на рис. 2.2.1.5.

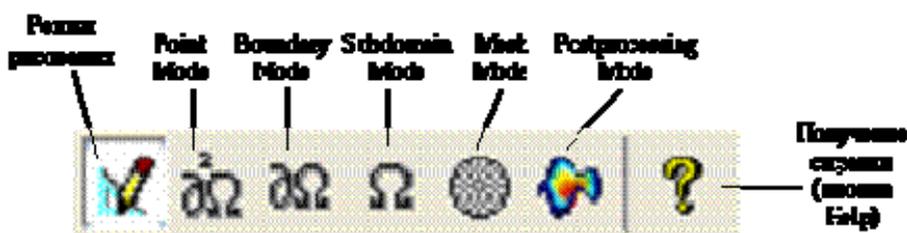


Рис. 2.2.1.5. Кнопки переключения операционных режимов на главной инструментальной панели

Переключаться между операционными режимами можно и командами меню: Physics/ Selection Mode/ Point Mode, Physics/ Selection Mode/ Edge Mode, Physics/ Selection Mode/ Boundary Mode, Mesh/ Mesh Mode, Postprocessing/ Postprocessing Mode. Переключиться в режим рисования можно, щёлкнув мышью по имени геометрии в группе команд меню Draw.

Получение справки

В системе FEMLAB есть своя справочная система. Предусмотрено три способа её запуска:

- Команда меню Help/ FEMLAB Help;
- Горячая клавиша F1;
- Кнопка Help на главной инструментальной панели (рис. 2.2.1.5).

Есть также команда меню, позволяющая просматривать документацию по FEMLAB в форматах HTML и PDF. Выполнение команды меню Help/ Help Desk (HTML/PDF) приводит к запуску программы Internet Explorer с показом главной страницы HTML-документации. Там есть гиперссылки на все разделы документации как в формате HTML, так и в формате PDF. Такой способ получения справки является наиболее удобным и экономичным.

Есть команды меню Help/ Online Support, Help/ Online Resources. Они осуществляют непосредственный выход на Internet-ресурсы, указанные в [п. 2.1.6](#).

Сохранение моделей

Можно сохранять модели в различных форматах:

- Файл модели в формате FEMLAB (расширение fl). Это стандартный формат, который содержит и текстовые данные, и двоичные машинные коды.
- Файл модели в формате MATLAB (расширение m). При сохранении и загрузке требуется совместная работа FEMLAB с MATLAB. Такой способ сохранения существенно облегчает программирование FEMLAB-моделей в системе MATLAB с использованием функций пакета.

Сохранение в этих форматах осуществляется командой меню File/ Save или горячей клавишей Ctrl+S. Если сохранение происходит первый раз, то развернётся диалоговое окно Save As. Надо ввести нужное имя файла, в ниспадающем меню выбрать требуемый формат и затем нажать кнопку Save.

2.2.2. Моделирование в FEMLAB

Описание всех моделей в этой документации будет представлено в едином формате. Данный подраздел посвящён описанию такого формата.

Соглашение о стилях описания моделей

Основной поток действий в ходе моделирования обозначен порядком следования кнопок на главной инструментальной панели и пунктов в строке меню (слева направо, см. рис. 2.2.1.3, 2.2.1.4). Такой порядок примерно определяет структуру заголовков большинства описаний. Они не будут всегда точно соответствовать тем заголовкам, которые здесь будут перечислены с некоторыми пояснениями, зато всегда они будут соответствовать реальным этапам моделирования.

Навигатор моделей

Этот раздел будет содержать описание последовательности действий в окне Навигатора моделей (выбор прикладных режимов, мультифизическое комбинирование и др.).

Режимы и настройки

Здесь будет содержаться описание предварительных режимов и настроек, связанных с группой команд меню Options.

Геометрическое моделирование

Здесь описывается технология создания геометрических объектов в расчётной области с использованием инструментальных средств CAD и панели рисования.

Физическое моделирование

На этом шаге моделирования производится ввод всех физических параметров модели и коэффициентов уравнений в зонах расчётной области, на границах, рёбрах и вершинах. Кроме того, в этой части будут описываться константы, expressions-переменные и переменные связи для всей модели и её подобластей различной размерности (несмотря на то, что для выполнения этих операций в GUI предусмотрена группа команд меню Options; следует учитывать, что эти команды доступны для выполнения только после геометрического моделирования). Эта часть описания может содержать один или несколько следующих подразделов.

Установка параметров зон расчётной области

Здесь описываются материальные свойства, источники моделируемого поля и коэффициенты PDE в зонах расчётной области. В зонах можно задать также начальные условия и выбрать типы конечных элементов.

Граничные условия

Здесь задаются параметры и уравнения граничных условий.

Условия на рёбрах

Здесь задаются параметры и уравнения условий на рёбрах (только в трёхмерных режимах моделирования).

Установка параметров модели в точках

Здесь описываются точечные источники моделируемого поля и другие параметры, относящиеся к отдельным точкам. Все эти параметры могут задаваться для вершин расчётной области.

Скалярные переменные прикладного режима

Некоторые прикладные режимы используют дополнительные скалярные переменные, которые являются независимыми от геометрии, например, частота. Для задания их значений предусмотрена команда меню Physics/ Scalar Variables.

Дополнительные переменные модели

Здесь будут описываться константы, expressions-переменные и переменные связи различных типов, которые необходимы или полезны для конструирования FEMLAB-

модели. Будет описываться также технология их задания с помощью команд меню группы Options.

Построение сетки конечных элементов

Здесь создаётся сетка конечных элементов. Обычно всё сводится к нажатию кнопок главной инструментальной панели, связанных с сеточными операциями. В некоторых случаях нужно задавать параметры настройки генератора сетки, чтобы сетка получилась нужного качества. Для выполнения этих операций в GUI предусмотрена группа команд меню Mesh.

Вычисление решения

В большинстве случаев для этого достаточно просто выполнить команду меню Solve/Solve Problem. В некоторых случаях требуется изменение выбора решателя или параметров его настроек. Может также потребоваться изменение параметров Менеджера решения (способы определения начальных условий и начальных приближений, блокировка отдельных прикладных режимов в мультифизике, блокировка вычисления отдельных зависимых переменных и др.).

Постпроцессорная обработка и визуализация

Здесь описывается вся технология постпроцессорной обработки результатов решения. В основном выполняется работа с диалоговым окном Plot Parameters. При необходимости применяются и другие средства визуализации: в фигурах FEMLAB и MATLAB, в сечениях расчётной области, в подобластях различной размерности. Если надо, описывается вычисление интегральных параметров рассчитанного поля. Могут описываться также операции экспорта и сохранения данных, операции постпроцессорной обработки средствами MATLAB.

2.2.3. Модель свободной конвекции

Эта модель проходит через все шаги моделирования и анализа теплопередачи в системе FEMLAB. Большинство шагов этой модели применимо и для других моделей FEMLAB, так что её можно использовать как отправную точку для вашего собственного моделирования и анализа.

Введение

В этом примере описывается задача расчёта потока жидкости с теплопередачей в жидкости. Ряд нагревающих труб погружён в канале с потоком жидкости, которая втекает в нижнее основание. На рис. 2.2.3.1 схематично показана эта теплообменная установка.

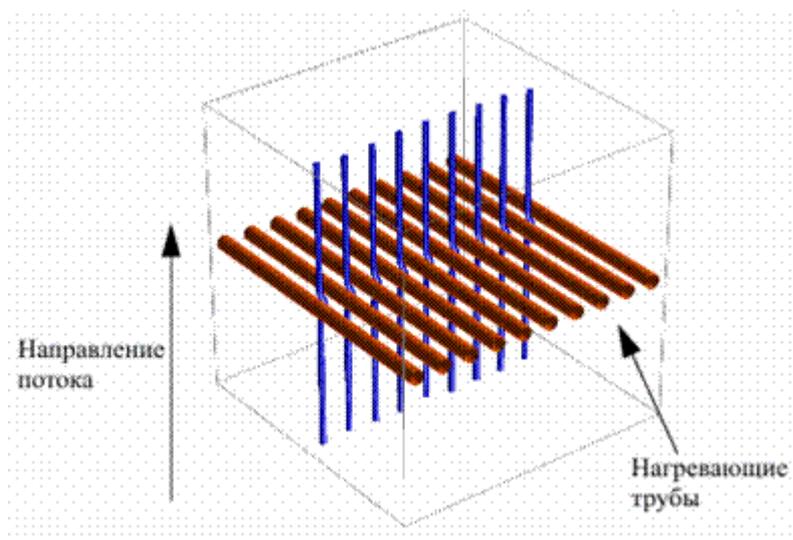


Рис. 2.2.3.1 Схематичное изображение теплообменной установки

Определение модели

Во-первых, если пренебречь краевыми эффектами, то во всех поперечных сечениях системы (по отношению к нагревающим трубам) распределения температур и скоростей одинаковы. Это означает, что моделируемое поле является плоскопараллельным (двумерным) и может описываться двумерными PDE.

Моделируемое поле симметрично. Это означает, что расчётную область модели можно ограничить плоскостями симметрии, следы которых показаны на рис. 2.2.3.2.

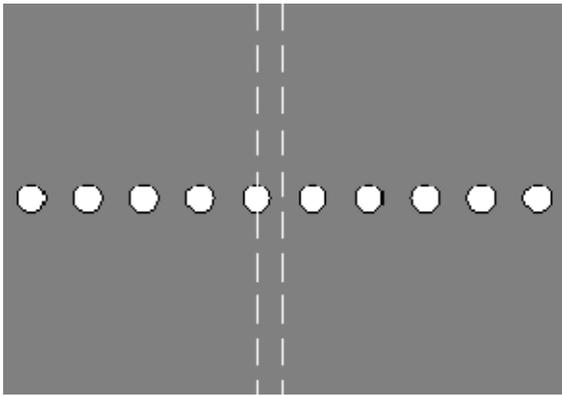


Рис. 2.2.3.2. Поперечное по отношению к нагревающим трубам сечение системы

Основополагающие уравнения

Данная модель является мультифизической, поскольку здесь анализируется более одного физического явления. Здесь надо совместно решать уравнения Навье-Стокса для несжимаемых потоков и уравнение теплообмена. Есть четыре неизвестные полевые переменные (в терминологии FEMLAB их иначе называют зависимыми переменными):

- Декартовы компоненты векторного поля скоростей: u и v ;
- Давление p ;
- Температура T .

Названные физические величины связаны друг с другом двусторонними связями.

Уравнения Навье-Стокса для несжимаемых потоков состоят из баланса количества движения (импульса) при выполнении закона сохранения масс и условия несжимаемости. Уравнения имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\text{grad } p - \text{div}(\eta \cdot (\nabla \otimes \mathbf{u} + \text{grad } \mathbf{u})) + \mathbf{F} \\ \text{div } \mathbf{u} = 0 \end{array} \right\}, (2.2.3.1)$$

где ρ - плотность вещества, \mathbf{u} - векторное поле скоростей, причём в декартовой системе координат $\mathbf{u} = 1_x u + 1_y v$, $1_x, 1_y$ - единичные векторы системы координат, p - давление, η - динамическая вязкость, \mathbf{F} - векторное поле объёмной плотности силы, ∇ - векторный

$$\nabla = 1_x \frac{\partial}{\partial x} + 1_y \frac{\partial}{\partial y}$$

пространственный дифференциальный оператор первого порядка,

Система уравнений (2.2.3.1) записана в векторно-тензорной форме. Из тензорного анализа известно, что любой вектор в пространстве является тензором первой валентности, а скаляр - тензором нулевой валентности. \otimes - знак внешнего произведения тензоров. Внешним произведением двух тензоров является тензор, валентность которого равна сумме валентностей сомножителей. Внешним произведением двух векторов является тензор второй валентности. Градиент векторного поля - это тензорное поле второй валентности, получаемое путём формального внешнего умножения векторного поля на ∇ , причём операции дифференцирования применяются к компонентам этого векторного поля. Матрица декартовых компонентов тензора $\text{grad } \mathbf{u}$ является транспонированной по отношению к соответствующей матрице тензора $\nabla \otimes \mathbf{u}$. Дивергенция тензорного поля второй валентности является векторным полем, которое получается путём формального

внутреннего умножения ∇ на тензорное поле. Внутреннее произведение тензоров первой валентности - это обычное скалярное произведение векторов.

Уравнение теплопередачи - это закон сохранения тепловой энергии в дифференциальной форме:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}(-k \text{grad } T + \rho c_p T \mathbf{u}) = Q, \quad (2.2.3.2)$$

c_p - удельная теплоёмкость жидкости, ρ - её плотность, T - температура, k - коэффициент теплопроводности, \mathbf{u} - векторное поле скорости движения жидкости, Q - объёмная плотность мощности тепловых источников. В уравнении (2.2.3.2) выражение в скобках представляет собой плотность потока тепловой мощности. Она состоит из двух составляющих: кондуктивной и конвективной. Конвективная составляющая (второе слагаемое) пропорциональна вектору скорости, которая определяется решением уравнения (2.2.3.1). Таким образом, здесь уже проявляется односторонняя связь между несжимаемым потоком жидкости и теплопередачей.

Моделирование в FEMLAB

Чтобы встроить в FEMLAB-модель уравнения (2.2.3.1) и (2.2.3.2), нужно использовать два прикладных режима: 1) Несжимаемые потоки Навье-Стокса и 2) Конвекция и Кондукция. Мультифизические связи задаются при вводе физических параметров модели в названных прикладных режимах.

В этой модели связь между уравнениями прикладных режимов осуществляется через термы Q и F . Здесь упрощённо предполагается, что плотность вещества не зависит от температуры, однако, температурные градиенты вызывают появление сил плавучести. На этапе физического моделирования в прикладном режиме Навье-Стокса в диалоговом окне Subdomain Settings в строку редактирования терма F надо вписать нужную зависимость, ссылаясь на переменные функций формы теплового прикладного режима. В данной модели эта функциональная зависимость представлена в форме аппроксимации Буссинеску.

В прикладном режиме Конвекция и Кондукция в диалоговом окне Subdomain Settings в строки редактирования компонентов скорости нужно вписать скоростные зависимые переменные прикладного режима Навье-Стокса. Теперь двусторонняя мультифизическая связь установлена и задана в модели.

Результаты

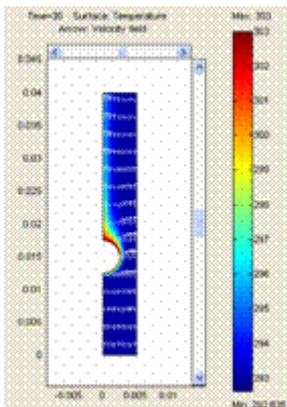


Рис. 2.2.3.3. Распределение температуры и скорости в расчётной области

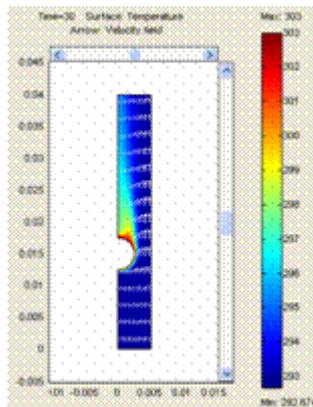


Рис. 2.2.3.4. Распределение температуры и скорости при отсутствии эффекта плавучести

Решение поставленной здесь задачи записано в Библиотеку моделей (FEMLAB/ Multiphysics/ free_convection). Если эту решённую модель загрузить в FEMLAB, то в поле axes будет показано распределение температуры жидкости и скорости её движения (рис. 2.2.3.3). На этой картинке отчётливо видно влияние эффекта плавучести нагретой жидкости на распределение скорости. На выходе потока с левой стороны канала составляющая скорости больше, чем с правой стороны. Если бы этого эффекта не было, то справа скорость была бы больше (рис. 2.2.3.4).

Используя команды интегрирования в постпроцессорной обработке, можно, например, вычислять средние температуры в различных подобластях (в зонах и на границах). Например, средняя температура на выходе канала составила 293.513229 градуса, а при отсутствии эффекта плавучести - 293.868854.

Ниже будет показана технология моделирования в установившемся режиме, а в п. 2.2.4 - в переходном режиме.

Моделирование с использованием графического интерфейса FEMLAB

Процесс моделирования начинается запуском системы FEMLAB.

Навигатор моделей

Формирование нужного нам мультифизического прикладного режима достаточно подробно показано в п. 2.2.1 (Создание и загрузка моделей). Итоговый вид окна Навигатора моделей показан на рис. 2.2.1.2. Нажатие кнопки ОК приведёт к закрытию окна Навигатора моделей и развёртыванию окна графического интерфейса FEMLAB.

Режимы и настройки

Для упрощения ввода в модель физических свойств воды, температуры и скорости потока на входе, температуры на поверхности нагревающей трубы целесообразно создать и ввести константы. Все физические величины будем задавать и рассчитывать в единицах СИ. В таблице 2.2.3.1 представлены константы модели: назначения, имена и значения.

Таблица 2.2.3.1

Константы модели

Физическая величина	Имя константы	Выражение или значение
Плотность жидкости (воды)	rho0	1E3
Динамическая вязкость воды	mu	1E-3
Удельная теплоёмкость воды	cp	4.2E3
Коэффициент теплопроводности	kc	0.6
Коэффициент объёмного расширения	alpha0	0.18E-3
Ускорение свободного падения	g0	9.8
Скорость на входе	vin	5E-3
Температура на входе	Tin	293
Температура нагревающей трубы	Theat	303

Выполним команду меню Options/ Constants. Развернётся диалоговое окно Constants. В ячейки (строки редактирования) впишем имена констант и определяющие выражения, как показано на рис. 2.2.3.5. Нажатие кнопки Apply приведёт к вычислению констант, заполнению колонки Value и принятию всего ввода без закрытия диалогового окна (рис. 2.2.3.5). Нажатие кнопки ОК приведёт к тем же действиям и закрытию окна.

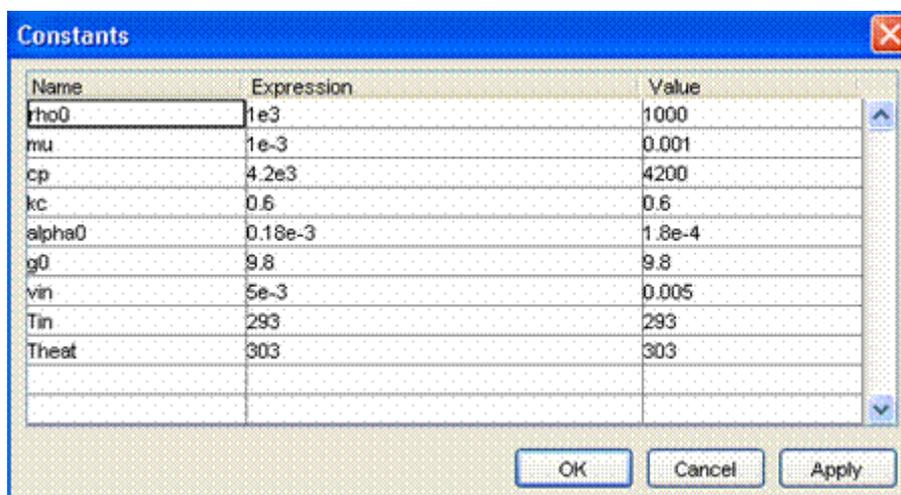


Рис. 2.2.3.5. Диалоговое окно ввода и редактирования констант

Теперь нужно настроить пределы координатных осей в поле axes. Для этого нужно выполнить команду меню Options/ Axes/Grid Settings. Развернётся диалоговое окно Axes/Grid Settings. В строки редактирования закладки Axis введём значения, показанные на рис. 2.2.3.6. А в строки редактирования закладки Grid введём значения, показанные на рис. 2.2.3.7. Нажатие кнопки ОК приведёт к принятию ввода и закрытию диалогового окна. Теперь можно приступать к построению геометрии.

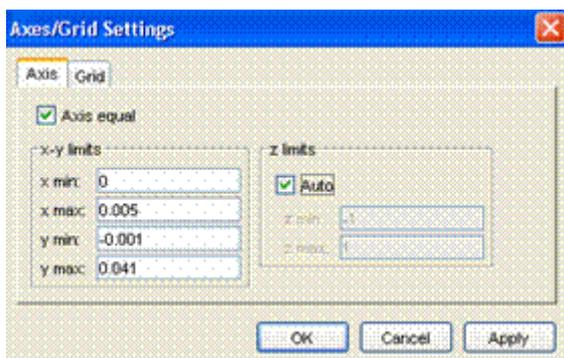


Рис. 2.2.3.6. Закладка Axis диалогового окна Axes/Grid Settings

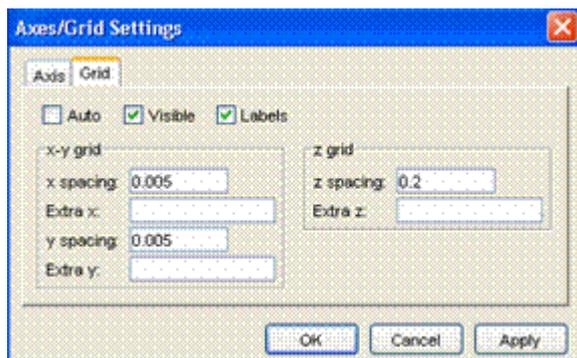


Рис. 2.2.3.7. Закладка Grid диалогового окна Axes/Grid Settings

Геометрическое моделирование

Наиболее простой способ нарисовать геометрию расчётной области - создать геометрический объект прямоугольник и объект круг, затем создать из них композиционный объект, выполнив операцию вычитания множеств.

Выполним команду меню Draw/ Draw Objects/ Rectangle/Square. Щёлкнем мышью в точке с координатами (0, 0.04), потом в точке (0.005, 0). В поле axes появится прямоугольник, как показано на рис. 2.2.3.8. Теперь выполним команду меню Draw/ Specify Objects/ Circle. Развернётся диалоговое окно Circle. Введём в него параметры создаваемого круга, как показано на рис. 2.2.3.9. Нажатие кнопки ОК приведёт к созданию круга (рис. 2.2.3.10) и закрытию диалогового окна.

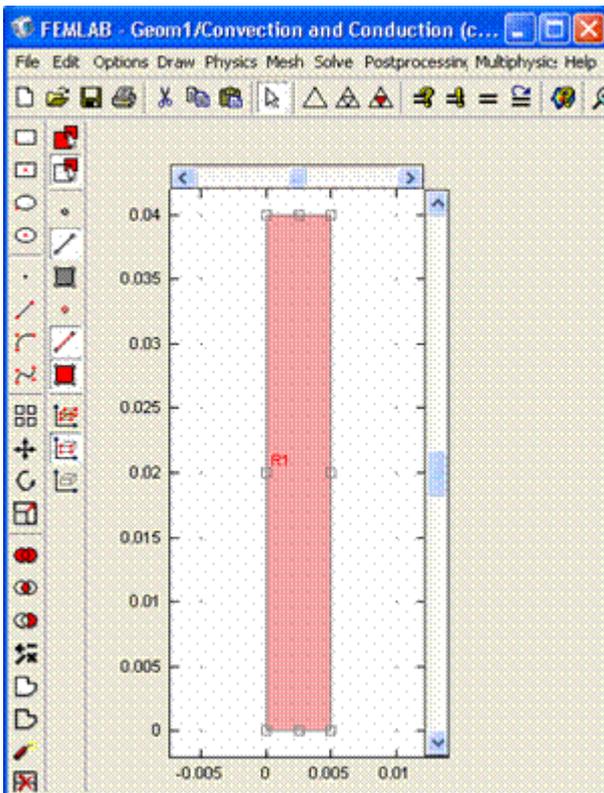


Рис. 2.2.3.8. Построенный прямоугольник в поле axes

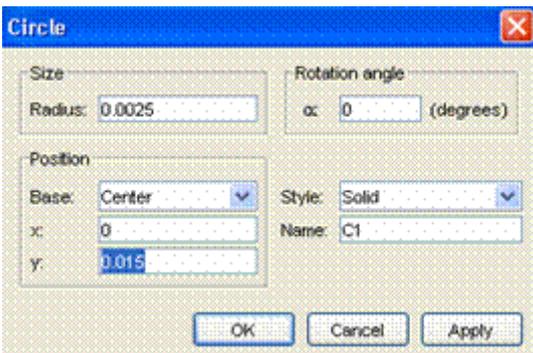


Рис. 2.2.3.9. Диалоговое окно создания и редактирования свойств круга

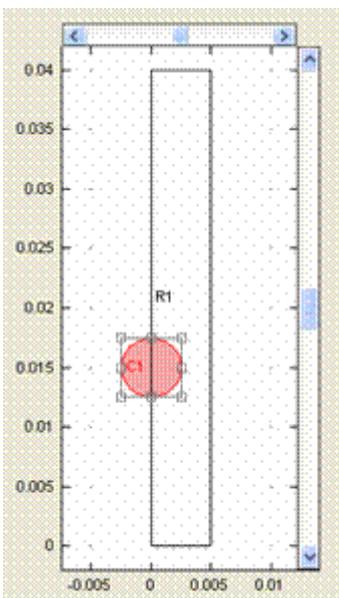


Рис. 2.2.3.10. Прямоугольник и круг в поле axes

Нажмём клавишу Ctrl+A, чтобы выделить все геометрические объекты. Выделенные объекты закрашиваются красным цветом. Для выполнения операции вычитания множеств нажмём кнопку  (Difference) инструментальной панели рисования. В результате получится композиционный объект (рис. 2.2.3.11), который и будет представлять геометрическую модель расчётной области.

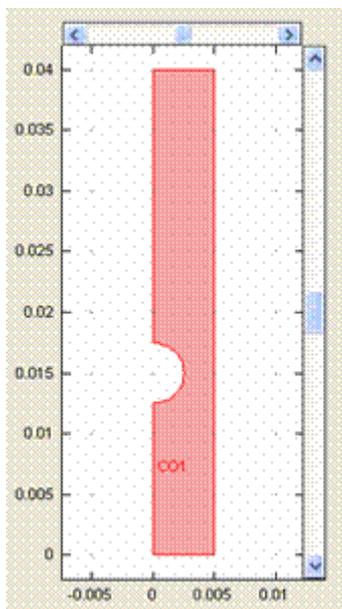


Рис. 2.2.3.11. Созданный композиционный объект

Физическое моделирование

Теперь, когда геометрия готова, можно начинать задавать физические параметры. Граничные условия и коэффициенты уравнений вводятся в модель независимо для двух прикладных режимов.

Граничные условия

Выполним команду меню Physics/ Boundary Settings. FEMLAB перейдёт в операционный режим ввода и редактирования граничных условий. Попутно раскроется диалоговое окно Boundary Settings (рис. 2.2.3.12 - 2.2.3.14). По умолчанию для всех граничных сегментов бывает принято условие полной теплоизоляции (Thermal insulation). В нашей модели такими участками границы являются сегменты 1, 3, 5. В соответствии с условиями задачи на входе в поток (сегмент 2) температура равна константе T_{in} (рис. 2.2.3.12). На выходе потока (сегмент 4) кондуктивной составляющей плотности потока тепловой мощности можно пренебречь. Это означает, что имеет место только неизвестная конвективная составляющая. Задаётся это условие так, как показано на рис. 2.2.3.13. По условию задачи на поверхности нагревающей трубы задана температура, равная константе T_{heat} (рис. 2.2.3.14). На этих рисунках кроме диалогового окна Boundary Settings показано также поле осей с граничными сегментами и их номерами. Номера показаны при помощи команды меню Options/ Labels/ Show Edge Labels.

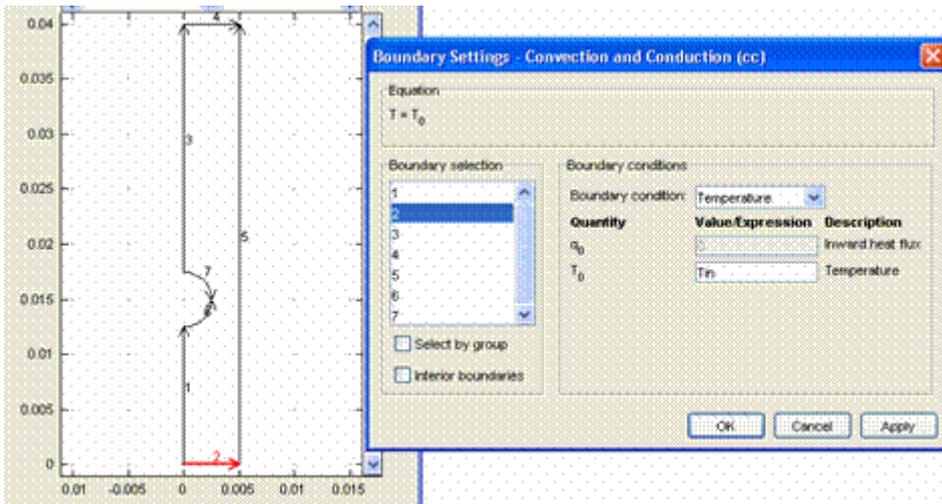


Рис. 2.2.3.12. Тепловое граничное условие на входе в поток

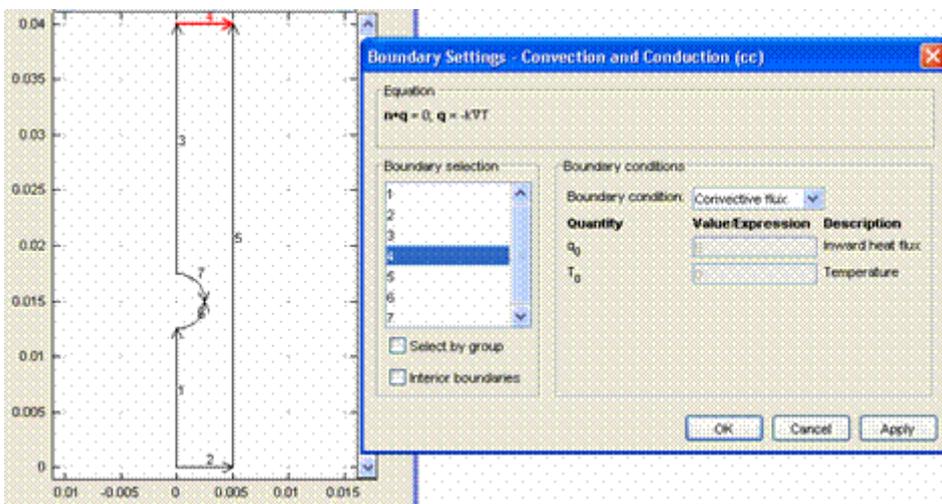


Рис. 2.2.3.13. Тепловое граничное условие на выходе потока

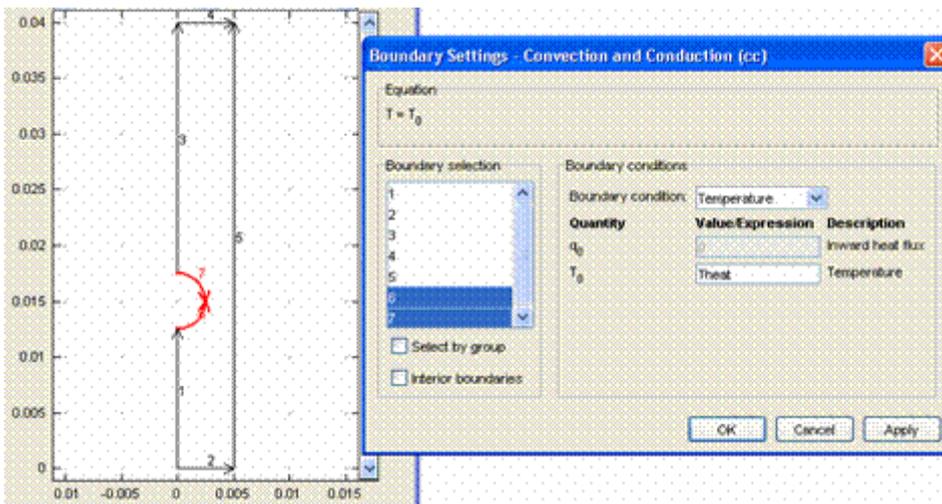


Рис. 2.2.3.14. Тепловое граничное условие на поверхности нагревающей трубы

Нажатие кнопки ОК приведёт к принятию всего ввода и закрытию окна Boundary Settings. Граничные условия для прикладного режима Конвекция и Кондукция полностью заданы. Теперь их надо задать для прикладного режима Несжимаемые потоки Навье-Стокса. Переключиться в этот режим можно командой меню Multiphysics/ Incompressible Navier-Stokes.

Опять раскроем окно Boundary Settings. Клавишей Ctrl+A выделим все сегменты. В выпадающем меню Boundary condition выберем пункт Slip/Symmetry. В сегменте 2 зададим u-составляющую скорости, равную константе с именем vin (рис. 2.2.3.15). В сегменте 4 зададим давление, равное нулю и тангенциальную составляющую скорости, равную нулю (Normal flow/Pressure) (рис. 2.2.3.16). В сегментах 6, 7 зададим условие нулевой скорости (No slip) (рис. 2.2.3.17).

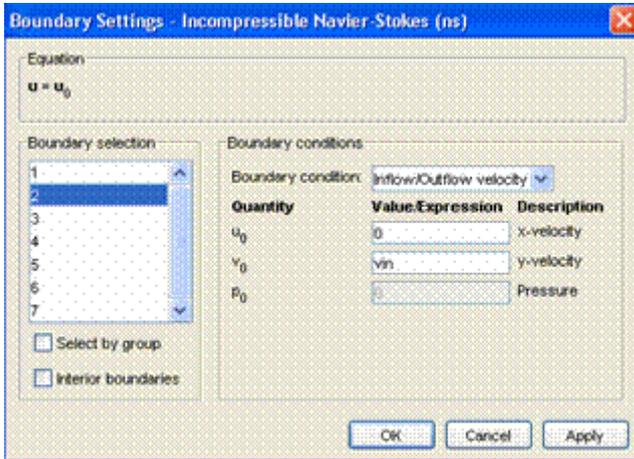


Рис. 2.2.3.15. Задание вектора скорости на входе потока

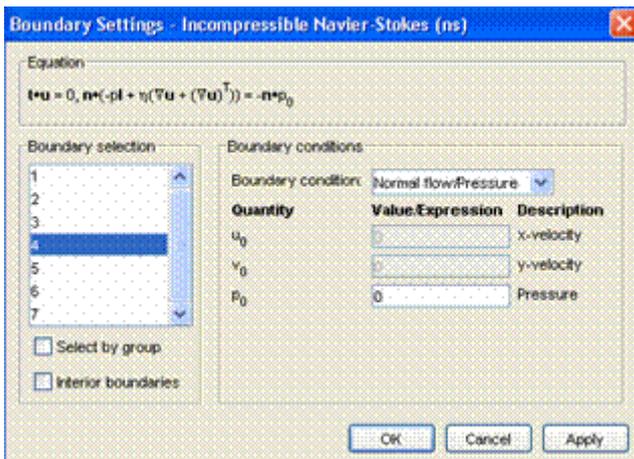


Рис. 2.2.3.16. Граничное условие на выходе потока

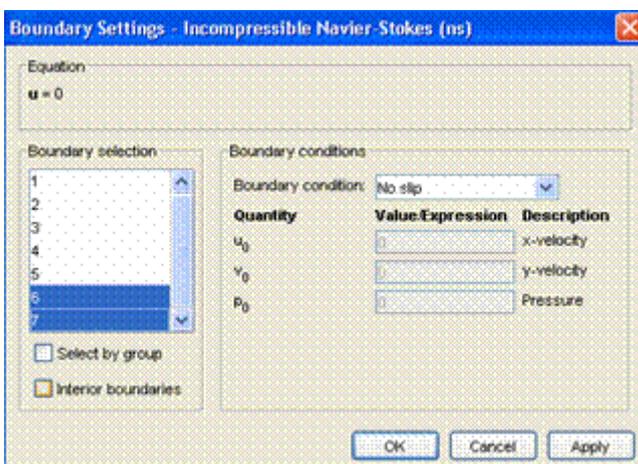


Рис. 2.2.3.17. Нулевая скорость на поверхности нагревающей трубы

Нажатие кнопки ОК приведёт к принятию всего ввода и закрытию окна Boundary Settings. Граничные условия для обоих прикладных режимов полностью заданы. Можно переходить к заданию материальных свойств и коэффициентов PDE.

Установка параметров зон расчётной области

В зависимости от прикладного режима, коэффициенты в управляющих уравнениях могут интерпретироваться как материальные свойства, силы и источники. Вы определяете все из них в диалоговом окне Subdomain Settings, которое раскрывается командой меню Physics/Subdomain Settings. Вид этого диалогового окна со всеми установленными параметрами для прикладного режима Incompressible Navier-Stokes показан на рис. 2.2.3.18.

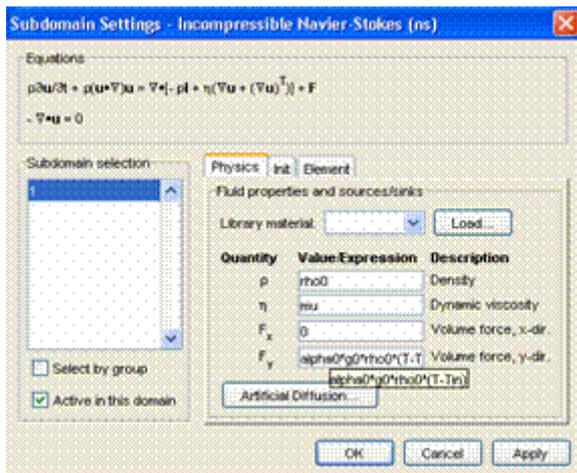


Рис. 2.2.3.18. Окно Subdomain Settings для прикладного режима Incompressible Navier-Stokes

В диалоговом окне Subdomain Settings можно также устанавливать начальные значения. Для этого надо переключиться на закладку Init. Задание начальных значений необходимо, т.к. уравнения Навье-Стокса нелинейные, а нелинейный решатель использует начальные значения в качестве начального приближения для нелинейных итераций. Нестационарные решатели используют их в качестве начальных условий задачи. Вид этой закладки с установленным начальным условием показан на рис. 2.2.3.19. Нажатие кнопки ОК приведёт к принятию ввода и закрытию диалогового окна.

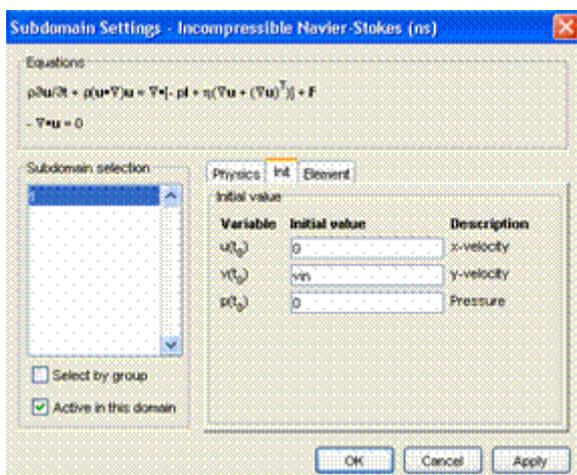


Рис. 2.2.3.19. Закладка начальных условий для прикладного режима Incompressible Navier-Stokes

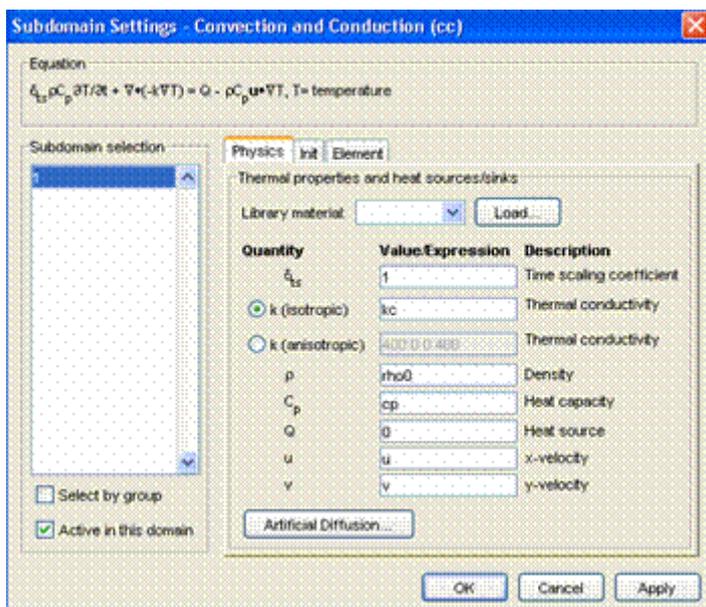


Рис. 2.2.3.20. Окно Subdomain Settings для прикладного режима Convection and Conduction

Выполним команду меню Multiphysics/ Convection and Conduction. Раскроем диалоговое окно Subdomain Settings. Вид этого диалогового окна со всеми установленными параметрами для прикладного режима Конвекция и Кондукция показан на рис. 2.2.3.20. В закладке Init в строку редактирования $T(t_0)$ впишем имя константы Tin. Нажатие кнопки ОК приведёт к принятию ввода и закрытию диалогового окна. На этом ввод физических параметров заканчивается.

Построение сетки конечных элементов

Чтобы создавать заданную по умолчанию сетку, выполните команду меню Mesh/ Mesh Mode или Mesh/ Initialize Mesh. Если нужна различная разрешающая способность сетки или требуется, чтобы сетка была более плотной в некоторых местах расчётной области, то можно использовать параметры настройки в диалоговом окне Mesh Parameters и других командах меню группы Mesh.

Если Вы доверяете параметрам по умолчанию, Вы можете непосредственно переходить к решению модели. FEMLAB тогда создаёт сеть, когда Вы нажимаете на кнопку Solve главной инструментальной панели. Однако, желательно осмотреть сетку перед решением, потому что её плотность и качество влияют на время решения, сходимости и точность.

В этой модели целесообразно использовать predeterminedную установку Fine для сетки:

- Выполните команду меню Mesh/ Mesh Parameters.
- В диалоговом окне Mesh Parameters, выберите пункт Fine в ниспадающем меню Predefined mesh sizes.
- Щелкните ОК.
- Инициализируйте сетку, щёлкнув кнопкой мыши по кнопке Initialize Mesh на главной инструментальной панели.

Использование этих параметров настройки сети создает относительно удачную сетку. Позже можно совершенствовать сеть, чтобы далее улучшить точность решения. Если при

повторном решении использование более тонкой сетки даёт подобные результаты, то разрешающая способность сетки достаточна для достижения приемлемой точности, иначе нужно совершенствовать (измельчать) сетку снова.

Вычисление решения

Требуемый нелинейный решатель - это заданный по умолчанию решатель, так что достаточно щёлкнуть по кнопке Solve главной инструментальной панели. Следует обратить внимание на окно прогресса решения (рис. 2.2.3.21), которое позволяет контролировать и останавливать процесс решения. Решение сходится быстро при данных настройках решателя. На компьютере с процессором Athlon 950 решение длится 8.022 с (если параллельно ещё работает музыкальное приложение).

Как только решение готово, FEMLAB отображает заданный по умолчанию график. В данном случае получится цветовой график поля скоростей (вектор скорости будет взят по модулю).

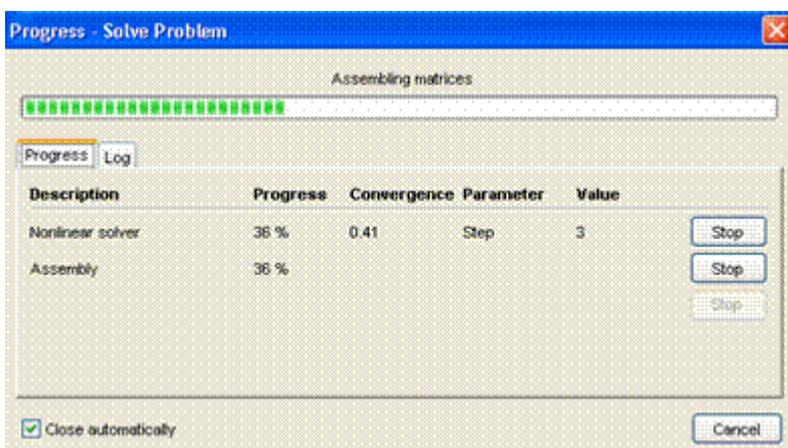


Рис. 2.2.3.21. Окно прогресса решения

Постпроцессорная обработка и визуализация

FEMLAB обладает развитой системой постпроцессорной обработки. Здесь предусмотрено достаточно много способов визуализации решения. Можно строить графики не только решения, но и его пространственных и временных производных, пространственных координат и т.д. Здесь можно использовать механизм переменных FEMLAB. Для любого допустимого выражения, составленного из этих переменных, можно построить график. Также для любого прикладного режима предусмотрены predefined списки наиболее интересных переменных для визуализации (в диалоговом окне Plot Parameters). Чтобы получить график, показанный на рис. 2.2.3.3, нужно выполнить следующую последовательность действий:

- Раскрыть диалоговое окно Plot Parameters командой меню Postprocessing/ Plot Parameters.
- В закладке General установить флаги Surface и Arrow (рис. 2.2.3.22).
- В закладке Surface в выпадающем меню Predefined quantities выбрать пункт Temperature (cc).
- В закладке Arrow в выпадающем меню Predefined quantities выбрать пункт Velocity field (ns).
- В строки редактирования Number of points вписать значения x points: 10, y points: 15.
- Нажать кнопку Color и в развернутом окне выбрать, например, белый цвет.
- Кнопкой OK закрыть диалоговое окно Plot Parameters.

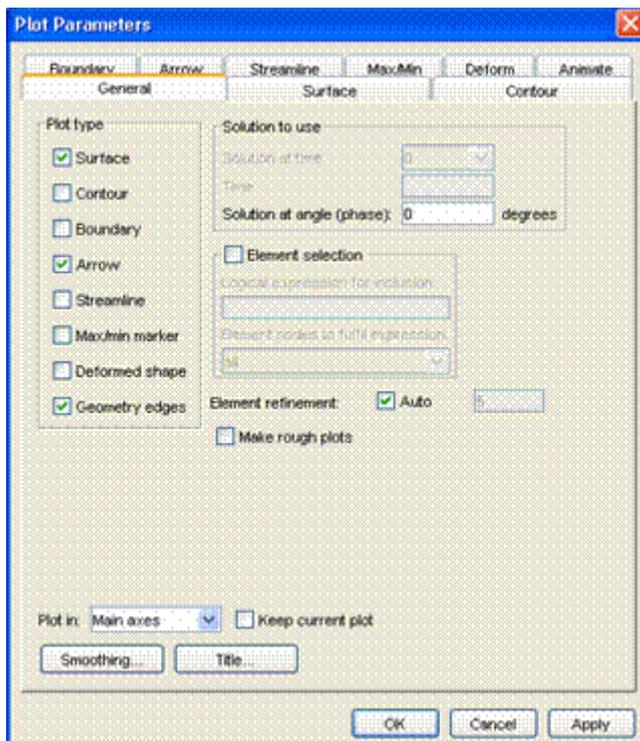


Рис. 2.2.3.22. Закладка General диалогового окна Plot Parameters

Дополнительная постпроцессорная обработка. Операция интегрирования

По результатам решения попытаемся определить среднюю температуру на выходе потока. Математически она определяется следующим соотношением:

$$T_{\Phi} = \frac{\int T dx}{\int dx}, \quad (2.2.3.3)$$

средневзвешенная по скорости температура:

$$T_{\Phi v} = \frac{\int T v dx}{\int v dx}. \quad (2.2.3.4)$$

В данной модели знаменатель выражения (2.2.3.3) представляет собой ширину выхода потока, которая задана равной 0.005. Поэтому для вычисления средней температуры на выходе (граничный сегмент 4) нужно выполнить команду меню Postprocessing/ Boundary Integration. Раскроется диалоговое окно Boundary Integration, вид которого с необходимыми настройками показан на рис. 2.2.3.23.

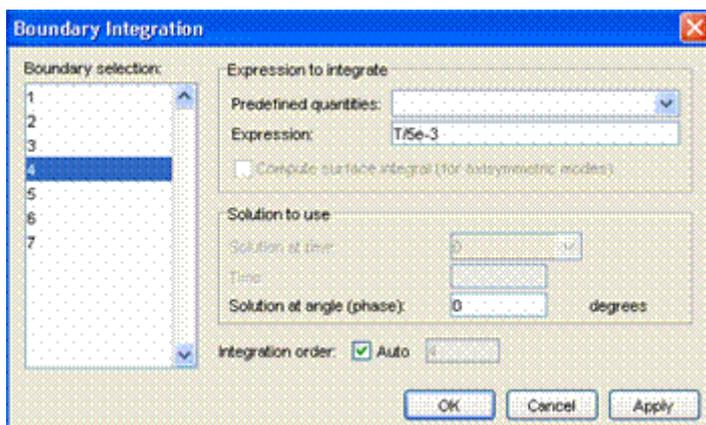


Рис. 2.2.3.23. Диалоговое окно Boundary Integration

Нажатие кнопки Apply приведёт к выдаче в протокол сообщений следующей записи:

Value of integral: 293.508869, Expression: T/5e-3, Boundary: 4.

Чтобы вычислить знаменатель выражения (2.2.3.4), нужно в строку редактирования Expression вписать имя переменной v . Опять жмём Apply и получаем:

Value of integral: 2.5e-5, Expression: v , Boundary: 4.

Значит, для вычисления средневзвешенной температуры по формуле (2.2.3.4) нужно в строку редактирования Expression вписать выражение $T*v/2.5e-5$. Жмём OK и получаем в протоколе сообщений:

Value of integral: 293.749699, Expression: $T*v/2.5e-5$, Boundary: 4.

Сохранение модели

Для сохранения предусмотрена команда меню File/ Save (горячая клавиша Ctrl+S). Если сохранение происходит первый раз, то раскрывается браузер, с помощью которого можно ввести имя сохраняемого файла. Сохранение происходит в формате FEMLAB (файл с расширением fl). Есть ещё команда File/ Save As. Она позволяет сохранять модели в виде fl и m- файлов.

Работа со связанной системой уравнений

Физические прикладные режимы не требуют непосредственной работы с PDE. Однако, работая в любом прикладном режиме можно переключиться в режим работы с системой PDE. Для этого есть группа команд меню Physics/ Equation System. В этой группе две команды в 1D, три команды в 2D, четыре команды в 3D: Subdomain Settings, Boundary Settings, Edge Settings, Point Settings. Каждая из этих команд приводит к развёртыванию диалогового окна, которое очень похоже на аналогичное окно прикладного режима группы PDE Modes. Вид показываемых уравнений зависит от формы представления краевой задачи: коэффициентной, генеральной или ослабленной проекционной. Это окно имеет ещё одну закладку: Variables. Эта закладка содержит таблицу переменных прикладных режимов с именами, определяющими выражениями и описаниями. Для примера покажем эту закладку окна Subdomain Settings для рассмотренной модели свободной конвекции (рис. 2.2.3.24).

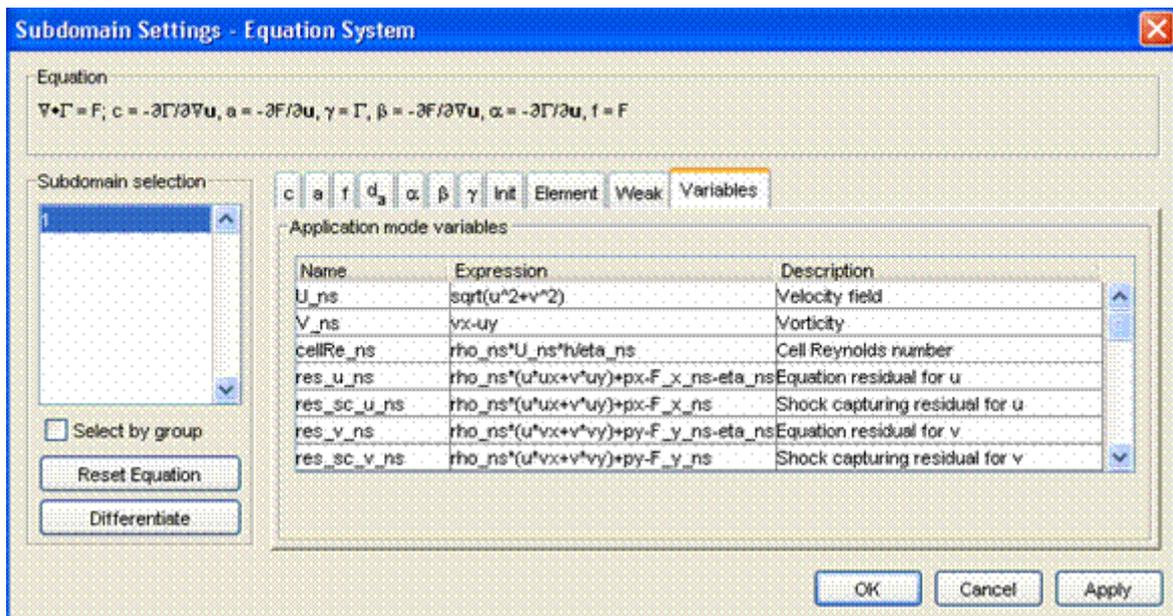


Рис. 2.2.3.24. Закладка описания переменных прикладного режима в окне Subdomain Settings - Equation System

3.2 Графическое моделирование и инструменты CAD

Инструментальные средства автоматизированного проектирования (CAD) в FEMLAB обладают большими возможностями для создания геометрических фигур и моделей. Моделирование осуществляется как сплошными геометрическими объектами (solid modeling), так и граничными (boundary modeling). Здесь рассматривается создание одно-, двух- и трехмерных геометрических конструкций. Кроме того, в этом разделе представлена информация об использовании графических данных, полученных из других CAD-программ.

3.2.1 Среда создания моделей геометрических объектов и CAD

Краткий обзор концепций моделирования геометрических объектов

В FEMLAB можно моделировать цельными геометрическими фигурами (*solid modeling*) или использовать граничное моделирование (*boundary modeling*) (моделирование контуров геометрических объектов). Оба вида моделирования могут применяться в 1D, 2D и 3D (одно-, двух- и трехмерных геометрических конструкциях). Геометрическая модель может сочетать в себе оба вида моделирования (гибридное моделирование).

При моделировании цельными геометрическими объектами (*solid modeling*) можно создавать геометрическую фигуру, используя комбинацию простых цельных фигур. Простыми фигурами служат элементарные шары, эллипсоиды, цилиндры, кубы и др. Комбинация фигур осуществляется с помощью *булевых операций*. Эти операции

включают объединение (логическое суммирование) , пересечение (общая часть, логическое произведение) , и вычитание . Объекты, образованные комбинацией булевых операций, называются сложными объектами (*composite solid objects*).

Граничное моделирование - это процесс создания геометрической модели объекта посредством определения его границ.

Также возможно наложение несплошных (нецельных) объектов поверх цельных для управления распределением сетки и улучшения постпроцессной обработки. Например, для изменения размеров фрагментов сетки вдоль криволинейной поверхности можно добавить к геометрии криволинейный объект или добавить точку, чтобы переместить в неё вершины треугольников сетки.

Имеется возможность импортировать двухмерные фигуры из DXF - файлов и трехмерные конфигурации из IGES, STL и VRML - файлов (см 3.2.5. Импорт CAD-файлов и геометрических объектов).

В справочной системе MATLAB и Справочнике команд детально описаны следующие возможности:

- изображения и MRI-данные могут быть конвертированы в геометрию FEMLAB через язык программирования FEMLAB;
- пользуясь интерфейсом MATLAB Вы можете создавать 2D и 3D сплайновые кривые и поверхностную вставку (интерполяцию) данных, полученных в результате измерений, и вставлять указанные объекты в FEMLAB.

Установки осей и сетки

В FEMLAB можно устанавливать пределы осей моделируемого пространства и корректировать линии сетки. Сетка и параметры настроек осей помогают получить правильные пропорции для моделирования геометрии. Чтобы изменять параметры настройки, используйте диалоговое окно **Axes/Grid Settings**, которое открывается в меню **Options**. Кроме того, существует возможность изменять пределы осей с применением масштабных функций изображения. При этом, масштабируя геометрическую фигуру, вы масштабируете и оси.

Параметры настроек осей

Пользуясь **Axes/Grid Settings** из меню **Options** на закладке **Оси (Axis)** можно устанавливать пределы для всех осей в координатной системе.

2-D параметры настройки осей



Рис. 3.2.1.1. Закладка **Axis** при двухмерном моделировании

Установка флага **Axis equal** (рис. 3.2.1.1) обозначает выравнивание масштабов осей X и Y на экране монитора. Выбор **Auto** заставляет FEMLAB автоматически определить масштаб пределов оси Z. Не смотря на то, что геометрия модели не включает третье пространственное измерение, масштаб оси Z может участвовать в создании высоты построения, например, в постобработке.

3D параметры настройки осей



Рис. 3.2.1.2. Закладка **Axis** при трехмерном моделировании

В 3D моделировании при установленном флаге **Auto** оси автоматически корректируются для отображения полной геометрии на экране. Убирая этот флаг, можно вручную устанавливать пределы осей. Флаг **Axis equal**, выбранный по умолчанию, масштабирует оси одинаково. Если **Axis equal** выключен, FEMLAB масштабирует данные параметры так, как это задано пользователем. Установленный флаг **Box** приводит к тому, что оси изображаются по всем граням отображаемого пространства, замыкаясь в единый блок.

1D параметры настройки оси

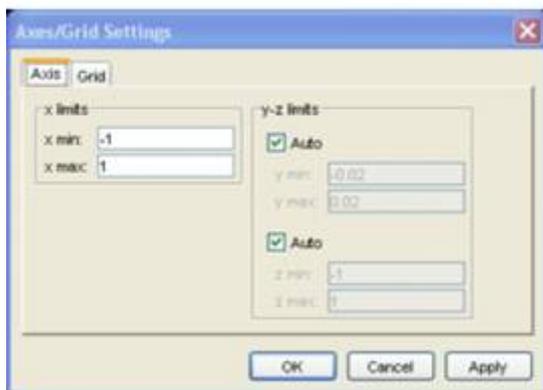


Рис. 3.2.1.3. Закладка **Axis** при одномерном моделировании

Закладка **Axis** в 1D подобна закладке в 2D. Различие состоит в том, что автоматическое масштабирование является доступным и для Y-, и для оси Z, а равное масштабирование недоступно.

Параметры настройки сетки

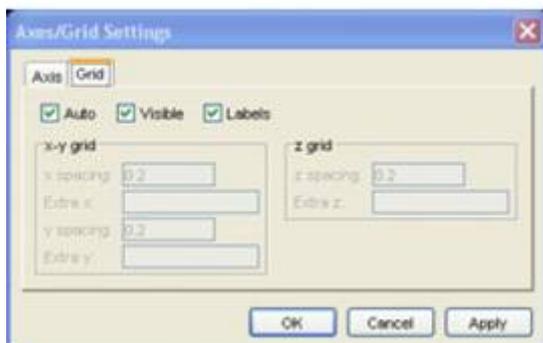


Рис. 3.2.1.4. Параметры настройки Сетки в диалоговом окне Axes/Grid Settings

На закладке Grid можно установить свойства сетки. Эта закладка отличается от закладок для 1D и 3D геометрий, но функции одни и те же для всех пространственных измерений.

Автоматический интервал сетки - устанавливается соответствующим флагом Auto, который обеспечивает линейный интервал в ячейках сетки.

Изменение интервала сетки вручную - выполняется следующим образом. Уберите флаг **Auto**, чтобы получить доступ к полям редактирования линейного интервала сетки и возможность установить дополнительные метки на сетку. Затем установите линейный интервал, вводя скалярные числа. Обратите внимание на то, что распространение сетки всегда начинается с нуля. Для удобства формирования геометрических фигур, прибавьте дополнительные метки на сетку, используя пробелы, запятые или точки с запятой, для разделения их между собой.

Примеры задания дополнительных штрихов на шкалу

- pi;
- 2/3, 0.78, 1.1;
- -0.123; pi/4.

Управление отображением сетки осуществляется в такой последовательности:

- установить флаг **Visible** для отображения сетки;
- установить флаг **Labels** для отображения меток сетки.

Создание декартовых и цилиндрических систем координат

FEMLAB использует общие декартовые или цилиндрические (осесимметричные) системы координат. При старте FEMLAB и создании новой модели в диалоговом окне Навигатора моделей делается выбор размерности геометрии и системы координат. По умолчанию задаются имена переменных: x, y, и z - для декартовых координат и r, phi, и z - для цилиндрических координат. Пространственные переменные (вместе со временем для время-зависимых моделей) представляют независимые переменные в моделях FEMLAB.

Системы координат и размерности пространства

Заданные по умолчанию имена переменных для систем координат имеют следующие размерности:

- модели, которые создаются с применением 1D, 2D, и 3D размерностей используют декартовы координаты x , y , и z ;
- в 1D осесимметричной (1D axisymmetric) геометрии заданная по умолчанию координата r - радиальное направление. При этом Ось X представляет r ;
- в 2D осесимметричной геометрии ось X представляет r - радиальное направление, а ось Y - z , координату высоты.

Для осесимметричных задач модели геометрий должны лежать на половине плоскости $r \geq 0$.

Чтобы выбирать системы координат и размерности пространства, выберите 1D, 2D, 3D, Axial symmetry (1D) или Axial Symmetry (2D) из списка размерностей (Space dimension) в окне Навигатора моделей. Вы можете делать это перед началом создания новой модели или кнопкой Add Geometry в процессе моделирования с созданием множества конфигураций.

Обратите внимание на то, что не все прикладные режимы доступны для всех координатных систем и пространственных измерений.

Для осесимметричных моделей красная вертикальная линия (Рис. 3.2.1.5) указывает линию симметрии $r=0$ при подготовке изображения и предварительной обработке модели.

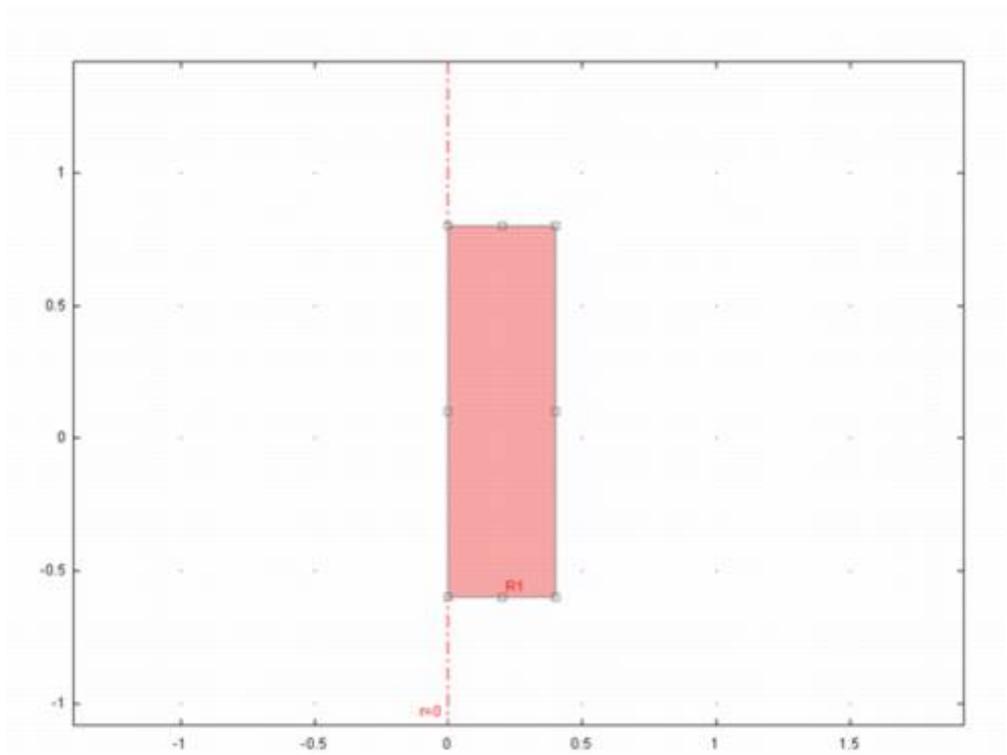


Рис. 3.2.1.5. Интерфейс пользователя показывает линию симметрии для осесимметричных моделей. Конечная геометрия должна использовать только половину плоскости $r \geq 0$.

Обратите внимание на то, что Модуль структурной механики использует локальные координатные системы в дополнение к глобальной координатной системе. Для получения подробной информации о местных координатных системах см. Руководство пользователя в Модуле *Структурной механики* (**Structural Mechanics Module User's Guide**).

Изменение названий пространственных координат

Декартовы координаты представленные независимыми переменными x , y и z .

Осесимметричные или цилиндрические координаты представлены - r , ϕ и z . Имеется возможность изменять заданные по умолчанию независимые переменные, например, когда используются независимые переменные для представления времени. Для замены координатных переменных, выполняйте следующие действия в Навигаторе Моделей:

1. Нажмите кнопку **Multiphysics**.
2. Нажмите кнопку **Add Geometry**.
3. Выберите размерность из списка размерностей (**Space dimension**). Это необходимо для предварительного определения независимых переменных.
4. Замените предварительно определенные имена переменных (координат), вводя имена, которые необходимы в ячейке независимых переменных (**Independent variables**). Каждое имя должно быть отделено пробелом, и число переменных должен равняться числу пространственных измерений. Третье пространственное измерение используется во многих 2D прикладных режимах для представления другой информации, такой как время. Поэтому всегда предполагаются три различные пространственные координаты. Если не определять третьей пространственной координаты, FEMLAB использует заданные по умолчанию названия (z для декартовых и ϕ для осесимметричных конфигураций).
5. Нажмите **OK**.
6. Если Вы не хотите работать только с геометрией и сеткой, выберите один или более прикладных режимов и нажмите **Add**, чтобы добавить физическую систему или уравнения к геометрии.

Обратите внимание! Переменные, зависящие от пространственных координат, такие как полевые компоненты и пространственные производные, используют независимые имена переменных для геометрий, где они определены. Например, если зависимая переменная в модели - давление p , обращаясь к производной давления относительно x , необходимо набирать p_x в поле для редактирования. Эти имена переменных изменяются в соответствии с именами, которыми Вы называете независимые переменные. Более подробная информация находится в документации к Femlab предлагаемой фирмой COMSOL в разделе "Variable Naming Conventions" на стр. 150.

Строка состояния

Строка состояния (рис. 3.2.1.6), находящаяся в нижней части графического пользовательского интерфейса FEMLAB, отражает текущую информацию и содержит кнопки для изменения некоторых свойств интерфейса. Содержание зависит от размерности пространства текущей геометрии модели.

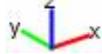


Рис. 3.2.1.6. Строка состояния

Двойное нажатие кнопок строки состояния переключает их из состояния включено в - отключено и наоборот. Компоненты строки состояния (слева направо):

- информационная область отображает текущую позицию курсора. При редактировании и создании объектов в 2D режиме рисования (Draw) эта область показывает перемещение и размеры геометрических фигур. В 3D - эта область отображает при изменении позиций обзора текущие операции (панорамный обзор - pan, изменение масштаба - zoom и т.д.);
- **AXIS** включает и отключает изображение осей (доступно только в 3D);
- **GRID** включает и отключает изображение линий сетки;
- **EQUAL** указывает на состояние, при котором изображение на экране по всем осям имеет равный масштаб (доступно только в 2D и 3D);
- **SNAP** осуществляет округление отображения текущей позиции курсора. Округление осуществляется до координат ближайшей точки сетки (доступно только в 1D и 2D графических режимах);
- **DIALOG** осуществляет переключение между двумя режимами создания геометрии. При активной функции DIALOG создание геометрических объектов осуществляется через диалоговое окно, в котором задаются все геометрические параметры выбранной фигуры. Открытие диалогового окна

осуществляется нажатием на соответствующую фигуру на графической панели инструментов (Draw). При не активной функции DIALOG создание геометрических фигур осуществляется в ручном режиме (функция DIALOG доступна только в 1D и 2D графических режимах);

- **MULTI** позволяет многократно создавать однотипные объекты, не нажимая каждый раз на выбранную фигуру на графической панели инструментов (доступно только в 1D и 2D графических режимах);
- **SOLID** указывает, что геометрические объекты с замкнутыми граничными контурами являются цельными, а не представляют только контуры (доступно только в 2D графическом режиме);
- **CSYS** переключает индикатор положения 3D координатной системы  из состояния "видимый" на "скрытый", который находится в левом нижнем углу пользовательского интерфейса (доступно только в 3D);
- информационное поле состояния памяти, находящееся в правом нижнем углу, отображает объем используемой динамической памяти (слева от наклонной черты) и текущий размер распределенной памяти (справа от наклонной черты). Для получения дополнительной информации о динамической памяти и коррекции её максимального значения см. "Rendering and the Java Heap Space" on page 119

Создание сложных геометрических объектов

В Femlab имеется возможность создавать сложные геометрические объекты (composite geometry object), комбинируя объекты с помощью булевых операций: объединения, пересечения и вычитания. Используя булевские формулы можно формировать сложные конструкции, включающие многократные операции с геометрическими фигурами. Чтобы выполнить данные операции, необходимо использовать кнопки на инструментальной панели Draw (2D и 3D) или открыть диалоговое окно Create Composite Object.

Применение булевых операций с использованием графической инструментальной панели (DRAW TOOLBAR)

- Нажмите кнопку **Union**  для объединения выделенных цельных объектов.
- Нажмите кнопку **Intersection**  для создания фигуры, представляющей пересечение выделенных цельных объектов.
- Нажмите кнопку **Difference**  для создания фигуры, представляющей геометрическую разность цельных объектов. Использование **Difference** при выделении нескольких объектов осуществляет вычитание всех выделенных цельных объектов из самого большого.

ПРИМЕНЕНИЕ ДИАЛОГОВОГО ОКНА ДЛЯ СОЗДАНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

В 2D и 3D можно использовать диалоговое окно создания сложных геометрических объектов (**Create Composite Object**). В нем комбинируются выбранные (выделенные) объекты, используя булевые операции. Откройте это диалоговое окно, выбрав (**Create Composite Object**) в меню **Draw** или нажимая кнопку **Create Composite Object**  на графической инструментальной панели.



Рис. 3.2.1.7. Диалоговое окно Create Composite Object

Использование формул

Выберите и выделите цельные объекты, с которыми необходимо работать. Выбирать их можно из списка или выделять непосредственно на рисунке. Набор формул осуществляется в поле редактирования **Set formula**, используя булевы операции. Символы +, -, и * представляют *сложение (объединение), вычитание и пересечение*, соответственно. При написании формул можно использовать круглые скобки. Нажатие **Apply** формирует сложный объект, согласно набранной формуле. Например, набрав $(C1+R1)*E1$, первая часть формулы $(C1+R1)$ представляет объединение прямоугольника R1 и круга C1, а вторая формирует пересечение этого объединения и эллипса E1. Указанные формулы можно применять только для цельных объектов.

Использование кнопочных ярлыков графической панели

Кнопочные ярлыки помогают в формировании объединений и пересечений всех выделенных объектов. Используя кнопку *Select All* можно выделить все геометрические объекты. В поле для записи формулы (**set formula**) по умолчанию задается формула сложения (объединения) всех выделенных объектов.

Сохранение и удаление внутренних границ и граней

Выберите сохранение внутренних границ (**Keep interior boundaries**) и **Keep interior edges** (только в 3D) с помощью флагов по мере того, как вы комбинируете геометрические объекты. Дополнительная информация изложена ниже в пункте Удаление Внутренних Границ этого же раздела.

Формование сложных геометрических объектов из несплошных геометрических объектов

Для создания сложных объектов, образованных комбинацией сплошных тел, поверхностей, кривых и точек, можно выбрать *сплошную трансформацию (Coerce to Solid)* , *поверхностную трансформацию (Coerce to Face)*  или *криволинейную трансформацию (Coerce to Curve)* . Указанные команды осуществляются с использованием графической инструментальной панели Draw. Дополнительная информация об этих преобразованиях изложена ниже, в пункте "Трансформация геометрических объектов" в этом же разделе.

Перемещение, вращение, масштабирование, и зеркальное отражение геометрических объектов

Перемещение, вращение, масштабирование и зеркальное отражение можно открыть в под-меню Modify, находящемся в меню Draw или посредством нажатия кнопок *Перемещение* (Move) , *Вращение* (Rotate) , *Масштабирование* (Scale)  и *зеркальное отражение* (Mirror)  графической инструментальной панели.

- **Move** - осуществляет перемещение во всех направлениях пространства.
- **Rotate** - производит поворот на заданный угол относительно оси или центра вращения.
- **Scale** - осуществляет задание масштабных коэффициентов во всех направлениях пространства.
- **Mirror** - осуществляет отражение относительно оси или плоскости.

Создание массива геометрических объектов

Для создания массива идентичных геометрических объектов, выберите **Modify** из меню Draw, и нажмите **Array** или нажмите кнопку Array  графической панели. Эта операция открывает диалоговое окно, где можно задавать количество идентичных объектов и их смещение относительно друг друга.

Копирование и вставка геометрических объектов

Копирование (COPY)

Нажмите **Ctrl+C** или выберите Copy из меню Правка (**Edit**), чтобы скопировать выбранную геометрическую фигуру в буфер обмена FEMLAB.

Вставка (PASTE)

Нажмите **Ctrl+V** или выберите **Paste** из меню Правка, чтобы вставить содержание буфера обмена FEMLAB в текущую модель. Используйте диалоговое окно **Paste** для задания смещений вставляемых геометрических объектов. Для одновременной вставки нескольких копий, задайте несколько смещений, отделив пробелом координаты смещения. Чтобы вставлять скопированные геометрические объекты без использования диалогового окна **Paste**, выберите **Preferences** в меню Options. Затем уберите флаг *Вставка геометрии через панель управления (Paste geometry objects using dialog box)* на закладке **General** диалогового окна **Preferences**.

В FEMLAB имеется возможность создавать копию геометрического объекта, удерживая клавишу **Ctrl** перетаскивая копию выделенного объекта на новое место.

Трансформация геометрических объектов

Femlab позволяет преобразовать один или несколько геометрических объектов в объекты различного типа, *трансформируя* их, например, из сплошного тела в кривую линию, представляющую контуры данного тела. Объект преобразования рассматривается как сложный геометрический объект, который преобразуясь становится сплошным телом, поверхностью, кривой или точечным объектом в зависимости от целевого преобразования, выбранного в под-меню *Трансформировать* в (**Coerce To**) в меню **Draw**. Имеется возможность *Трансформировать в сплошной объект* (**Coerce to Solid**), *Трансформировать в поверхность* (**Coerce to Face**) (только в 3D) и *Трансформировать в кривую* (**Coerce to Curve**) соответствующими кнопкам на графической панели, несколько различных для 2D и 3D.

Следующие комбинации обозначают:

1D

- трансформация сплошного объекта в точечный;
- трансформация точечного объекта, представляющего, по крайней мере, один закрытый домен в сплошной объект;

2D

- трансформация сплошного объекта в кривую или точечный объект;
- трансформация кривой, представляющей, по крайней мере, одну закрытую область в сплошной объект;
- трансформация кривой в точечный объект;

3D

- трансформация сплошного объекта в поверхность, кривую или точечный объект;
- трансформация поверхности, представляющей, по крайней мере, одно закрытое пространство в сплошной объект;
- трансформация поверхности в кривую, или точечный объект;
- трансформация кривой в точечный объект.

Удаление внутренних границ

Нажмите кнопку графической панели инструментов **Delete Interior Boundaries** , или выберите соответствующий элемент в меню **Draw**, чтобы стереть внутренние границы. В 3D можно удалить грани не смежные с какой либо поверхностью, а также грани смежные только с одной поверхностью.

Разбиение геометрических объектов

Разбиение геометрического объекта на части, можно осуществить кнопкой **Split Object**  графической инструментальной панели или, выбрав соответствующий элемент в меню **Draw**. Эта операция разбивает сплошной объект с несколькими подобластями в сплошные объекты, представляющие каждую подобласть. Кроме того, можно разбивать поверхность, кривую, и точечные объекты, составленные несколькими поверхностями, кривыми, и точечными сегментами в соответствующие элементы.

Имена геометрических доменов в FEMLAB

Концептуально, геометрия является совокупностью конечных геометрических *доменов*. Домены являются *связанными множествами*, такими как объемы, поверхности, кривые, или точки. Следующая таблица объединяет технические термины, зарезервированные для этих доменов в FEMLAB:

Таблица 3.1. Названия доменов в различных размерностях пространства

Размерность домена	Название в 3D	Название в 2D	Название в 1D	Название в 0D
3	субдомен	-	-	-
2	граница	субдомен	-	-
1	грань	граница	субдомен	-
0	вершина	вершина	граница	субдомен

Таким образом, домены максимальной размерности названы *субдоменами*. Домены следующего уровня названы *границами*. Границы иногда являются поверхностями в 3D и *гранями* в 2D. Вершины также называются *точками*.

Следующие правила обращения с доменами. Домены непересекаются. Каждый домен ограничен доменами меньшего размера. В частности, субдомен (в 3D, 2D, или 1D) ограничен границами, гранями (в 3D) и вершинами (в 3D и 2D). Граница (в 3D или 2D) ограничена гранями (в 3D) и вершинами. Грани ограничены вершинами.

Просмотр геометрии

При работе с несколькими конфигурациями одновременно можно отображать рабочую геометрию вместе с другими. Делается это открытием диалогового окна **View Geometries** из меню **Draw**. В списке **Visible Geometries** выберите те геометрии, которые вы хотите рассмотреть вместе с активной геометрией.