

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ
ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО
РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

RUSSIAN ACADEMY OF
SCIENCES
NUCLEAR
SAFETY INSTITUTE

Препринт № NSI-32-94

Preprint NSI-32-94

Аксенова А.Е., Варенков В.В., Первичко В.А.,
Попков А.Г., Чуданов В.В.

ИНТЕРАКТИВНЫЙ ПАКЕТ ПОДГОТОВКИ
ДАННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Москва
1994

Moscow
1994

Аксенова А.Е., Варенков В.В., Первичко В.А., Попков А.Г., Чуданов В.В. **ИНТЕРАКТИВНЫЙ ПАКЕТ ПОДГОТОВКИ ДАННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ.** Препринт № NSI-32-94. Москва: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 1994. 17 с.

Аннотация

В работе рассматривается интерактивный пакет подготовки данных для решения задач математической физики. Описывается процесс построения расчетных областей, сеток и задания граничных условий.

©ИБРАЭ РАН, 1994

Aksenova A.E., Varenkov V.V., Pervichko V.A., Popkov A.G., Chudanov V.V. **THE INTERACTIVE PREPROCESSOR FOR DATA GENERATION IN APPLICATION TO MATHEMATICAL PHYSICS PROBLEMS** (in Russian). Preprint NSI-32-94. Moscow: Nuclear Safety Institute, 1994. 17 p.

Abstract

In this paper an interactive preprocessor program intended for data generation in application to mathematical physics problems is described. The process of generation of computational regions, grids and boundary conditions with help of package is considered.

ИНТЕРАКТИВНЫЙ ПАКЕТ ПОДГОТОВКИ ДАННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

*Аксенова А.Е., Варенков В.В., Переичко В.А.,
Попков А.Г., Чуданов В.В.*

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

113191 Москва, ул. Б.Тулльская, 52

тел.: (095) 952-24-21, факс: (095) 230-20-29, эл. почта: pbl@ibrae.msk.su

Введение

Современные математические методы и уровень развития аппаратных средств позволяют проводить вычислительные эксперименты различной сложности с использованием персональной вычислительной техники. Известные коммерческие программные коды, такие как PHOENICS, TASCFLOW, DYNA, FIDAP и т.д., предназначенные для решения многомерных задач математической физики в областях сложной геометрической формы, имеют, кроме реализаций на мини-ЭВМ и рабочих станциях, версии на персональных компьютерах и успешно используются для решения научных и инженерных задач.

Одной из важных компонент программных кодов, ориентированных на моделирование физических процессов, является подсистема для построения расчетной области, согласованной сетки, а также задания граничных начальных условий. В силу определенного консерватизма в развитии пакетов, которые начинали разрабатываться еще на больших машинах без удобного интерактивного интерфейса, способы задания расчетных областей и сеток в значительной степени громоздки для пользователя. В последнее время активно развиваются интерактивные программы и техника построения различных геометрических объектов, которые в основном опираются на диалог с пользователем.

Практика показывает, что целесообразно развивать специализированные программные средства такого рода применительно к задачам математической физики. Интерактивный графический пакет для построения расчетных областей и согласованных сеток должен создавать файл, содержащий все необходимые атрибуты для математических расчетов и являющийся достаточно простым в использовании.

Следует отметить, что разработка диалогового интерфейса существенно увеличивает объем и сложность программного обеспечения, однако при этом улучшается удобство работы с пакетом и увеличивается производительность труда пользователя.

1 Организация внешних потоков данных

Основные компоненты программного кода "РАСПЛАВ" (см.[1]), ориентированного на моделирование физических процессов в ходе тяжелых аварий на атомных электростанциях показаны на рис. 1.

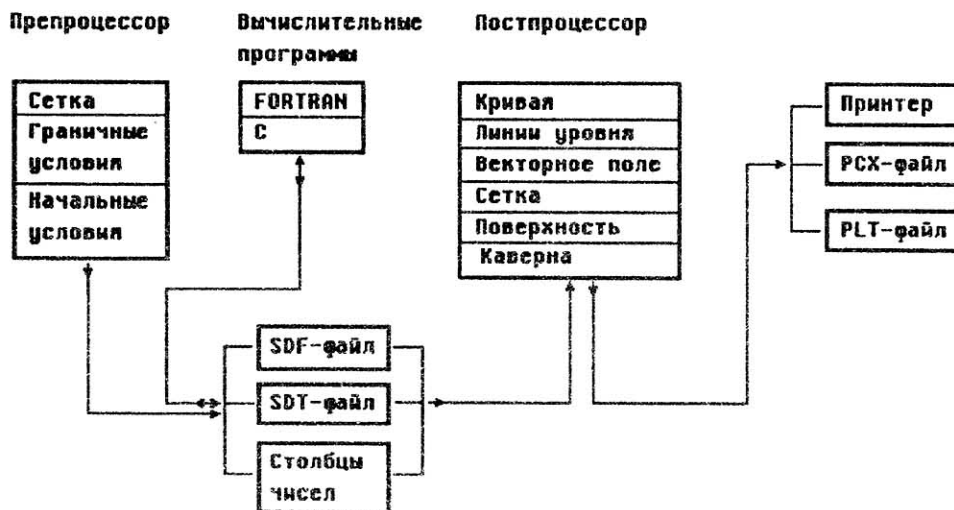


Рис. 1. Основные компоненты программного кода

Код реализован в виде трех основных модулей: препроцессора, вычислительного ядра, постпроцессора. В функции препроцессора входит подготовка начальных данных задачи, включая формирование сеток (прямоугольных и криволинейных), задание начальных и граничных условий. Программы вычислительного ядра реализуют 2- и 3-мерные алгоритмы решения уравнения математической физики, описывающие ряд физических процессов, в частности процессы тепломассопереноса. Вместе с тем, используются упрощенные 1.5D, 1D-мерные модели и корреляционные соотношения. Вычислительные программы написаны на языках C и Фортран. Постпроцессор служит для обработки и визуализации результатов численного эксперимента. Более подробно описание постпроцессора приводится в [2].

Для унификации внешних потоков данных в программном комплексе используется специальный файловый формат данных — SDF-формат, который представляет собой набор именованных переменных с их значениям и дополнительными атрибутами. Формирование SDF-файлов может производиться непосредственно вычислительными программами, препроцессором, постпроцессором, а также посредством конвертирования файлов, содержащих столбцы чисел (*.DAT-файлы) либо текстовый аналог SDF-файла (SDT-файлы) [3].

Основные положения

Препроцессор — программа, осуществляющая предварительную подготовку данных для расчетных программ.

При разработке основных принципов построения препроцессора в области математической физики (в частности, генератора сетки) мы руководствовались следующими требованиями:

- Описание границ геометрических объектов на основе параметрического задания кривых (для которых этот способ не достаточно сложен). Для более сложных объектов предусматривается табличное задание криволинейных границ в явном виде;
- Цветовое выделение различных подобластей составного геометрического объекта. При этом каждый цвет может нести определенную логическую нагрузку;
- Возможность работы с геометрическими объектами как с множествами, т.е. наличие операций объединения, вычитания, пересечения;
- Наличие прямоугольной сетки (как равномерной, так и неравномерной со сгущением по геометрическому закону с гладкими переходами);
- Наличие криволинейных четырехугольных сеток (как ортогональных, так и неортогональных);

- Наличие треугольных регулярных сеток;
- Возможность наложения (с пересечением) различных областей, в которых могут быть построены различные типы сеток.

Вышеперечисленные требования основывались на следующих особенностях используемых численных методов и алгоритмов (что нашло отражение в генераторе сетки):

- Конечно-разностные методы на прямоугольных сетках;
- Конечно-разностные схемы с учетом метода фиктивных областей или метода фиктивных коэффициентов;
- Вариационно-разностные схемы (аналогичные схемам конечно-элементным) для решения задач на криволинейных неортогональных сетках;
- Вариационно-разностные схемы как для 4-угольных регулярных сеток, так и для 3-угольных регулярных сеток;
- Методы решения задач с учетом наложения областей.

Перечисленные требования к препроцессору позволяют учитывать многие особенности задач математической физики. В частности, для задач тепло- и массопереноса:

- Теплопроводность в сплошных и пористых средах (различные типы краевых условий и криволинейные границы с острыми углами);
- Естественная конвекция несжимаемой жидкости (в том числе тепловыделяющей жидкости);
- Течения в многосвязных областях (задачи обтекания);
- Естественная конвекция в областях с криволинейными границами и различными краевыми условиями;
- Естественная конвекция в стратифицированных средах;
- Тепловые задачи с фазовыми переходами.

2 Работа с препроцессором “GRID GENERATOR”

Препроцессор “GRID GENERATOR” предназначен для построения расчетных областей, сеток и задания граничных условий для различных задач математической физики. В результате работе препроцессора формируются следующие блоки данных:

- два одномерных вещественных массива “GridX” и “GridY” в которых хранятся значения X и Y в узлах прямоугольной сетки;
- двумерный массив “MAP”-карта расчетной области. Размерность массива соответствует размерности расчетной сетки. Элементам массива присваиваются целочисленные значения из списка ключей, каждый из которых несет некоторую характеристику конкретного узла сетки. Так, значение карты в узле (i, j) равно 0, может трактоваться расчетной программой как фиктивный узел сетки, значения в диапазоне от 1 до N могут характеризовать состав расчетной области (1-бетон, 2-железо и т.п.).
- два двумерных вещественных массива “GridXD” и “GridYD”, содержащих значения координат узлов криволинейной сетки. Количество криволинейных сеток ограничено пятью.

- двумерный массив "MAPBOUND"—карта граничных условий. Размерности карты граничных условий и расчетной сетки одинаковы. Элементы массива в закодированном виде несут информацию о трех параметрах: тип граничных условий (первый, второй, третий род), способ задания (константа, функция, таблица, подпрограмма) и порядковый номер в указанном списке. Количество карт граничных условий ограничено семью, что позволяет формировать список различных граничных условий для одной геометрической области.

Работа с пакетом "GRID GENERATOR" происходит в интерактивном режиме с использованием устройства "мышь". Пользователь задает физические размеры прямоугольника, внутри которого будут создаваться расчетная область и сетка и определяет размерность сетки. Границы расчетной области задаются при помощи параметрических функций. Пакет позволяет формировать и редактировать список из параметрических функций и устанавливать флаг активности отдельно для каждой функции. Пользователь должен подобрать границы так, чтобы они образовывали замкнутую область. Эта область заливается выбранным цветом. Для сформированной области можно построить прямоугольную и криволинейную сетки, а также отредактировать карту раскраски. Карта раскраски редактируется как по отдельным ячейкам, так и с помощью прямоугольных зон, выделяемых на экране. В обоих случаях можно легко переустановить цвет раскраски и сформировать желаемую карту. Один из цветов выделен для обозначения фиктивной среды. С целью более удобного просмотра и редактирования карты введена операция увеличения ее отдельных участков. Равномерная прямоугольная сетка формируется автоматически в начале работы с новой областью, а также при изменении физических размеров области или размерности сетки. Пакет позволяет сгустить прямоугольную сетку на произвольно выделенном участке по геометрическому закону, задавая в качестве параметра отношение максимального размера ячейки к минимальному. На рис. 2 приведен пример прямоугольной сетки со сгущением относительно середины выделенного отрезка.

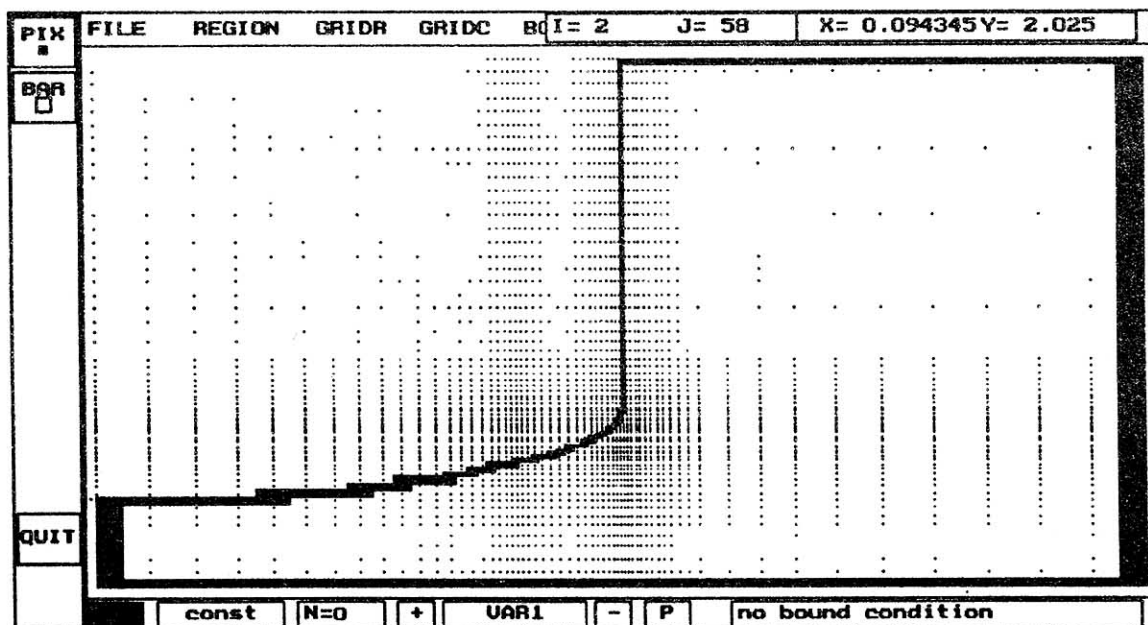


Рис. 2. Пример неравномерной прямоугольной сетки

Для формирования криволинейной сетки пользователь задает четыре кривые, определяющие стороны криволинейного четырехугольника и количество разбиений для каждой пары сторон. По умолчанию криволинейная сетка формируется путем линейной интерполяции. Пакет позволяет сгладить построенную сетку методом "упругой паутинки"[4]. Пользователь имеет возможность вывести на экран карту раскраски области с криволинейной сеткой. Пример построенной криволинейной сетки приведен на рис.3.

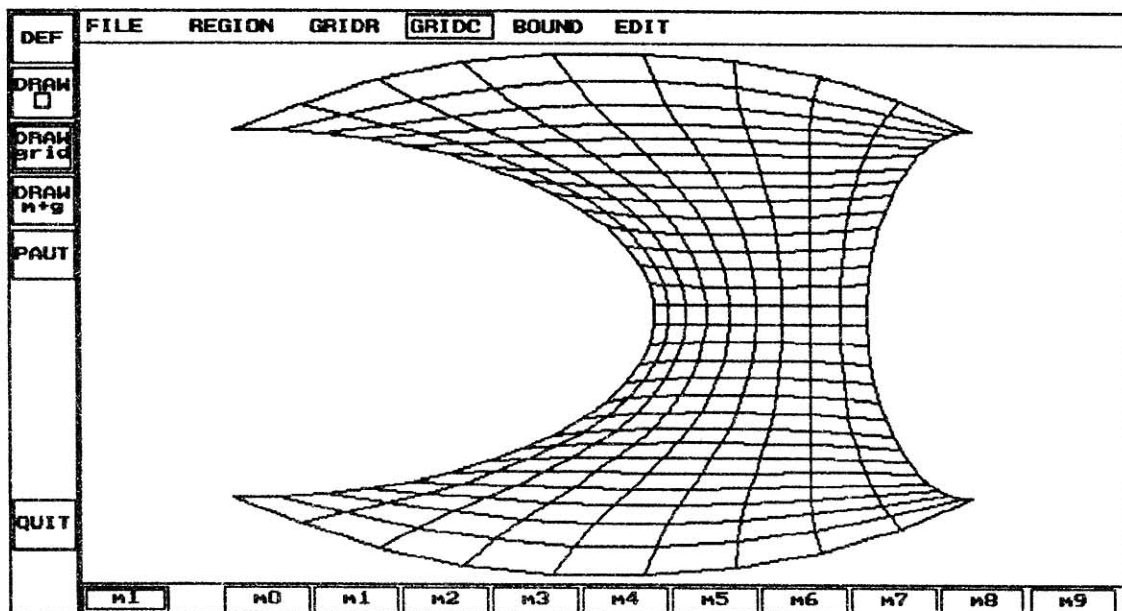


Рис. 3. Пример криволинейной сетки

Задание граничных условий производится путем выделения граничных ячеек области выбранным цветом и типом штриховки. Цвет передает тип граничных условий (первого, второго или третьего рода), а штриховка — форму задания (константа, функция, таблица, подпрограмма). Построенные сетки (прямоугольная и криволинейная) вместе с областью и граничными условиями могут быть сохранены в файле на диске и затем считаны с целью просмотра или модификации.

Запуск пакета “GRID GENERATOR” осуществляется командой “grid”.

Верхний уровень меню состоит из окон: “FILE”, “REGION”, “GRIDR”, “GRIDC”, “BOUND”, “EDIT”.

Меню “FILE” служит для ввода/вывода описанных выше блоков данных, а также для выхода из пакета. Для хранения данных используются SDF-файлы. Следует отметить, что параллельно с SDF-файлами существуют файлы, которые содержат информацию о функциях, описывающих расчетную область. Файлы имеют расширение *.SF, а их имена совпадают с текущим именем SDF файла.

Меню “REGION” позволяет пользователю задавать расчетную область с помощью параметрически записанных функций. Параметром функции является переменная с фиксированным именем “t”.

Подменю “REGION” состоит из окон “FORM”, “draw”, “fill auto”, “fill”, “DRAW”, “FILL auto”, “FILL”, “MAP”, “QUIT”.

Окно “FORM”(FORMULA) служит для задания или редактирования функций. Список функций ограничен значением 40. Номер текущей функции выводится в первом подокне. Для перехода к искомой функции достаточно установить ее номер либо с помощью кнопок “+” или “-”, либо просто набрав нужный. В следующих подокнах задаются признак активности кривой, функции $x(t)$ и $y(t)$, пределы изменения параметра t , его дискретность и цвет области, ограниченной заданной кривой. На рис. 4 показан пример задания функции.

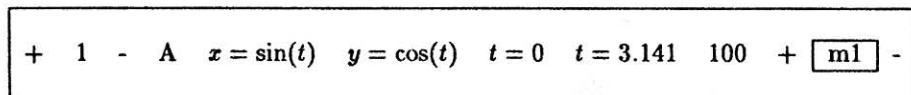


Рис. 4. Вид окна для задания параметрической кривой

Окно “draw” дает возможность нарисовать текущую кривую. Текущая кривая определяется номером кривой подменю “FORM” на момент выхода из этого подменю.

Окно "fill auto" осуществляет автоматическую заливку области, ограниченной текущей кривой соответствующим ей цветом. Закрашивается область, которая остается справа от кривой при ее обходе от начального значения параметра к конечному.

Окно "fill" дает возможность заливки области, ограниченной текущей кривой, с любой стороны от нее. С этой целью сначала выбирается цвет закрашки, а затем с помощью устройства "мышь" осуществляется заливка указанной части экрана.

Окно "DRAW" выводит на экран все "активные" кривые из списка. "Активными" являются кривые, которым в подменю "FORM" был установлен флаг активности "A".

Окно "FILL auto" осуществляет автоматическую заливку области, ограниченной всеми "активными" кривыми из списка. Закраске подвергается область, которая остается справа от каждой кривой при ее обходе от начального значения параметра к конечному.

Окно "FILL" дает возможность произвольной раскраски области, разбитой на подобласти всеми "активными" кривыми из списка. С этой целью сначала выбирается цвет закрашки, а затем с помощью устройства "мышь" осуществляется заливка указанной подобласти экрана.

При выборе из подменю окна "MAP" происходит заполнение массива "MAP" в соответствии с раскрашенной областью на экране.

Окно "QUIT" служит для выхода из подменю.

Меню "GRIDR" позволяет пользователю осуществлять редактирование карты раскраски "MAP" и прямоугольной сетки "GridX", "GridY". Подменю "GRID" состоит из окон "PIX", "BAR", "ZOOM in", "ZOOM out", "COMP", "TEMP", "QUIT"

Окно "PIX" служит для почечечного редактирования карты раскраски "MAP". С этой целью сначала выбирается цвет закрашки, а затем с помощью устройства "мышь" осуществляется закрашка указанной ячейки сетки.

Окно "BAR" позволяет пользователю осуществлять редактирования карты раскраски "MAP" прямоугольными зонами заливки. Зона закрашки выделяется с помощью устройства "мышь". Выделенная подобласть заливается выбранным цветом по нажатию левой клавиши "мышь".

Окно "ZOOM in" дает возможность пользователю изменить масштаб выделенной с помощью "мышь" прямоугольной части карты "MAP" с целью более удобного ее просмотра или редактирования.

С помощью окна "ZOOM out" восстанавливается первоначальный масштаб области редактирования.

Окно "COMP" служит для сгущения выбранного с помощью "мышь" участка сетки. Коэффициент и способ сгущения задаются в открывающихся окошках после выделения нужного участка. Коэффициент сгущения является отношением размера максимальной ячейки к минимальной и должен быть больше 1. Способ сгущения может быть или симметричным, когда минимальная ячейка находится в середине участка сгущения, или несимметричным, когда сгущение производится от начальной точки к конечной. Сгущение осуществляется по геометрической прогрессии.

Окно "TEMP" позволяет осуществлять переопределение карты "MAP" по измененной сетке.

Окно "CORR" осуществляет коррекцию участков карты, содержащих закрашенные области толщиной в одну ячейку. Такие области расширяются до толщины в две ячейки, что обеспечивает корректную работу алгоритмов.

Окно "QUIT" служит для выхода из подменю.

Меню "GRIDC" позволяет пользователю строить и редактировать криволинейные сетки "GridXD", "GridYD". Подменю "GRIDC" состоит из окон "DEF", "DRAW", "DRAW grid", "DRAW m+g", "PAUT", "QUIT".

Окно "DEF" служит для задания четырех кривых, определяющих криволинейный четырехугольник. В окошках каждой кривой устанавливается номер четырехугольника, номер стороны в этом четырехугольнике и количество разбиений. Номер четырехугольника может принимать значения от 0 до 5, при этом значение равное 0 является пассивным, т.е. с этим четырехугольником никакие операции не проводятся. Номер стороны принимает значения в диапазоне от 1 до 4.

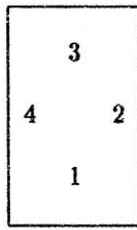


Рис. 5.

Сторона с номером 1 — это нижняя сторона в четырехугольнике, с номером 2 — правая, с номером 3 — верхняя, с номером 4 — левая. Если количество разбиений на противоположных сторонах (1 и 3 или 2 и 4) не совпадает, то из двух значений выбирается максимальное. При выходе из этих окошек, формируется криволинейная сетка, полученная линейной интерполяцией.

Окно **“DRAW”** позволяет просмотреть заданные криволинейные четырехугольники. Четырехугольник изображается, если только все параметры были установлены правильно (его номер не равен 0, заданы все четыре стороны).

Окно **“DRAW grid”** дает возможность просмотреть заданные криволинейные четырехугольники и полученные криволинейные сетки. Четырехугольник и сетка изображаются, если только все параметры были установлены правильно.

Окно **“DRAW m+g”** служит для одновременного изображения карты **“MAP”** и полученных криволинейных сеток.

Окно **“PAUT”** позволяет сгладить построенную криволинейную сетку методом *“упругой паутины”*.

Окно **“QUIT”** служит для выхода из подменю.

Меню **“BOUND”** позволяет пользователю осуществлять редактирование граничных условий. Подменю **“BOUND”** состоит из окон **“PIX”**, **“BAR”**, **“QUIT”**.

Цвет ячейки передает тип граничных условий:

- синий — не задано
- коричневый — первого рода
- серый — второго рода
- зеленый — третьего рода.

Штриховка ячейки передает форму задания граничных условий:

- сплошная — константа
- мелкая косая сетка — функция
- прямоугольная сетка — таблица
- крупная косая сетка — подпрограмма.

Окно **“PIX”** служит для поярочного задания граничных условий. С этой целью сначала выбирается цвет закрашки и тип штриховки, а затем с помощью устройства *“мышь”* осуществляется закрашка указанной ячейки сетки.

Окно **“BAR”** позволяет пользователю осуществлять редактирование граничных условий прямоугольными зонами. Зона выделяется с помощью устройства *“мышь”*. Пересечение выделенной зоны с границей области заливается выбранным цветом с выбранной штриховкой по нажатию левой клавиши *“мыши”*.

Меню **“EDIT”** дает возможность пользователю изменять размерности прямоугольных сеток и физические размеры прямоугольной области. Подменю **“EDIT”** состоит из окон **“DIMENSION”** и **“SIZE”**.

Окно **“DIMENSION”** служит для редактирования размерностей прямоугольной сетки. Если было произведено изменение хотя бы одной размерности, то карта **“MAP”** переинициализируется нулевыми значениями, а одномерные массивы **“GridX”**, **“GridY”**, содержащие координаты прямоугольной сетки переопределяется из расчета равномерной на данном интервале сетке при заданной размерности.

Окно **“SIZE”** позволяет устанавливать физические размеры расчетной области. При изменении значений происходит переопределение прямоугольной сетки.

Окно **“QUIT”** служит для выхода из подменю.

В настоящее время ведется работа по расширению возможностей препроцессора.

3 Пример применения пакета “GRID GENERATOR”

С использованием пакета “GRID GENERATOR” был проведен ряд расчетов, связанных с тематикой тяжелых аварий на атомных электростанциях. В частности, решались задачи естественной конвекции и удержания топлива в корпусе атомного реактора. Рассмотрим задачу воздействия расплавленного топлива на элементы конструкций корпуса атомного реактора ВПБЭР-600 более подробно с точки зрения применения пакета подготовки данных “GRID GENERATOR” и организации вычислительного процесса в целом.

3.1 Постановка задачи

При анализе тяжелых аварий важным вопросом является исследование воздействия расплавленного топлива на элементы конструкций корпуса реактора. Необходимо достаточно точно представлять последствия проплавления отдельных конструкций, а также основные временные характеристики процесса.

Рассматривается сценарий частичного обрушения и расплавления активной зоны реактора ВПБЭР. Твердые или жидкие обломки активной зоны (составляющие большую часть общей массы топлива) попадают на дно корпуса реактора и нагреваются до температуры плавления корпусной стали. Если остаточное тепловыделение велико, а теплоотвод недостаточен, происходит разогрев и расплавление обломков активной зоны. Остаточное тепловыделение распределяется по нескольким каналам потерь: на отвод тепла к корпусу и к верхней поверхности расплава, на нагрев топливных обломков и расплава. После расплавления топлива расплав разогревается до температур, превышающих температуру ликвидус кориума и начинается стадия высокотемпературного взаимодействия. Предполагается, что расплав представляет собой гомогенную смесь четырех компонент: окиси урана, стали и частично окисленного циркония.

Рассматривается водо-водяной энергетический реактор повышенной безопасности электрической мощностью 600 МВт (ВПБЭР-600) представляющий собой установку интегрального типа. Все оборудование первого контура находится в двустенном корпусе (основном и страховочном). Для данной задачи представляет интерес нижняя часть корпуса реактора, схематически показанная на рис. 6. Можно выделить следующие конструкционные составляющие:

- стальной корпус;
- пять стальных насосов;
- засыпка;
- технологическая полость.

При численной реализации производится некоторое упрощение исходной конфигурации. Процесс теплопереноса в расплаве топлива, корпусе и примыкающих элементах конструкций описывается нестационарным уравнением теплопроводности. Уравнение теплопроводности в двумерной геометрии с учетом цилиндрической симметрии записывается в виде:

$$\rho c(r, z, T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k(r, z, T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(r, z, T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q \quad (1)$$

где (r, z) — цилиндрические координаты; t — время, T — температура, ρ — плотность, $c(r, z, T)$ — теплоемкость, $k(r, z, T)$ — теплопроводность, q — объемная плотность тепловыделения. Коэффициенты c и k зависят от температуры, координат и учитывают фазовые состояния среды. Для решения согласованной задачи тепломассопереноса в расплаве, корпусе реактора и конструкциях используется схема сквозного счета, в которой фазовая граница особо не выделяется, а используется однородный алгоритм. Учет гидродинамики производится с помощью введения эффективного коэффициента теплопроводности в расплаве. Для перехода к двумерной цилиндрической задаче пять стальных насосов заменены на стальное кольцо таким образом, чтобы объемы насосов и полученного кольца совпадали.

Дискретизация дифференциального уравнения теплопроводности (1) осуществляется на основе неявных разностных схем [5]. Полученная система уравнений решается с помощью метода приближенной факторизации [6,7].

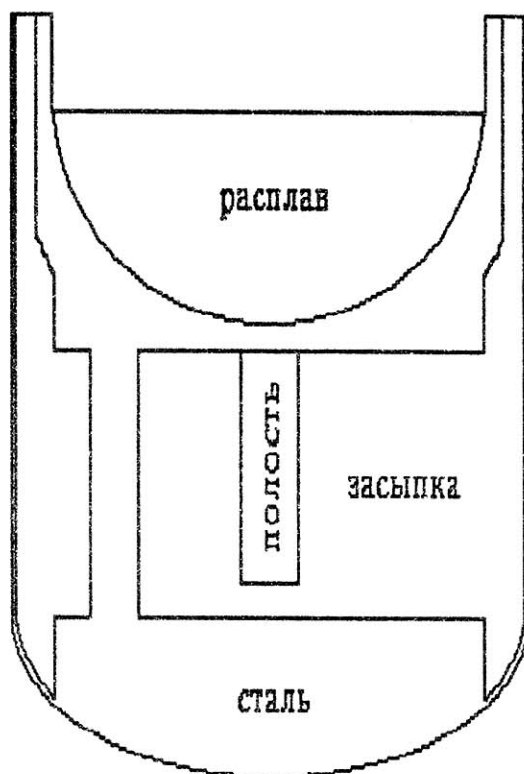


Рис. 6. Корпус реактора

3.2 Подготовка входных данных

Процесс подготовки данных для рассматриваемой задачи можно условно разбить на четыре этапа:

- задание размеров прямоугольной охватывающей области и размерность расчетной сетки. Для данной задачи размеры области по осям X и Y равны 3.6 и 10 м соответственно (рис. 7). Максимальная размерность используемой сетки составляла 201x201;
- формирование контура расчетной области с помощью параметрически заданных кривых и раскраска ее в соответствии с конструктивными особенностями (расплав, сталь, засыпка, пустота).

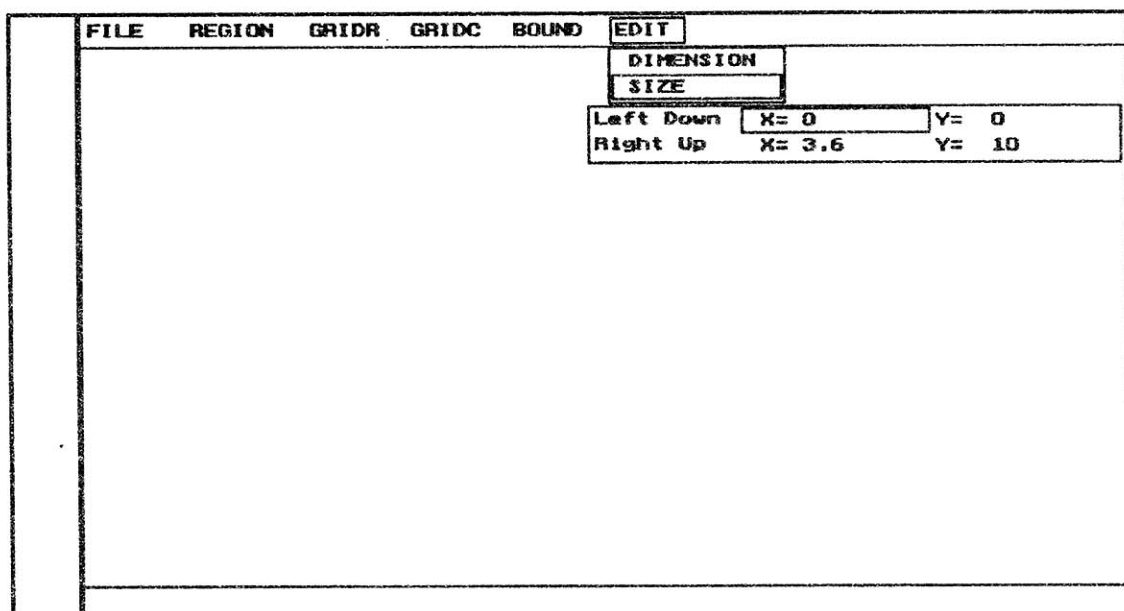


Рис. 7. Установка размеров области

В рассматриваемой задаче для описания расчетной области использовались следующие функции:

0	$x = 0$	$y = t$	$t = 0.000000$	$t = 9.000000$
1	$x = 3.26$	$y = t$	$t = 7.000000$	$t = 10.000000$
2	$x = 3.6 \cdot \sin(t)$	$y = 2 - 2 \cdot \cos(t)$	$t = 0.000000$	$t = 1.578000$
3	$x = t$	$y = 2$	$t = 0.000000$	$t = 3.000000$
4	$x = 3$	$y = t$	$t = 1.000000$	$t = 2.000000$
5	$x = t$	$y = 2.5$	$t = 0.000000$	$t = 0.375000$
6	$x = 0.375$	$y = t$	$t = 2.500000$	$t = 5.500000$
7	$x = 1.823$	$y = t$	$t = 2.000000$	$t = 5.500000$
8	$x = 2.477$	$y = t$	$t = 2.000000$	$t = 5.500000$
9	$x = t$	$y = 5.5$	$t = 0.000000$	$t = 3.000000$
10	$x = 3$	$y = t$	$t = 5.500000$	$t = 6.500000$
11	$x = 3 + 0.26 \cdot t$	$y = 6.5 + 0.5 \cdot t$	$t = 0.000000$	$t = 1.000000$
12	$x = 3 \cdot \sin(t)$	$y = 8 - 2 \cdot \cos(t)$	$t = 0.000000$	$t = 1.578000$
13	$x = 3$	$y = t$	$t = 8.000000$	$t = 10.000000$
14	$x = t$	$y = 10$	$t = 0.000000$	$t = 4.000000$
15	$x = t$	$y = 8.7$	$t = 0.000000$	$t = 3.000000$
16	$x = 3.52$	$y = t$	$t = 2.000000$	$t = 10.000000$
17	$x = 3.6$	$y = t$	$t = 2.000000$	$t = 10.000000$
18	$x = 3.52 \cdot \sin(t)$	$y = 2 - 1.92 \cdot \cos(t)$	$t = 0.000000$	$t = 1.570000$

На рис. 8 изображена полученная область.

При выборе из подменю окна "MAP" происходит заполнение карты расчетной области в соответствии с раскрашенной областью на экране. просмотр и при необходимости редактирование карты расчетной области и расчетной сетки (рис. 9).

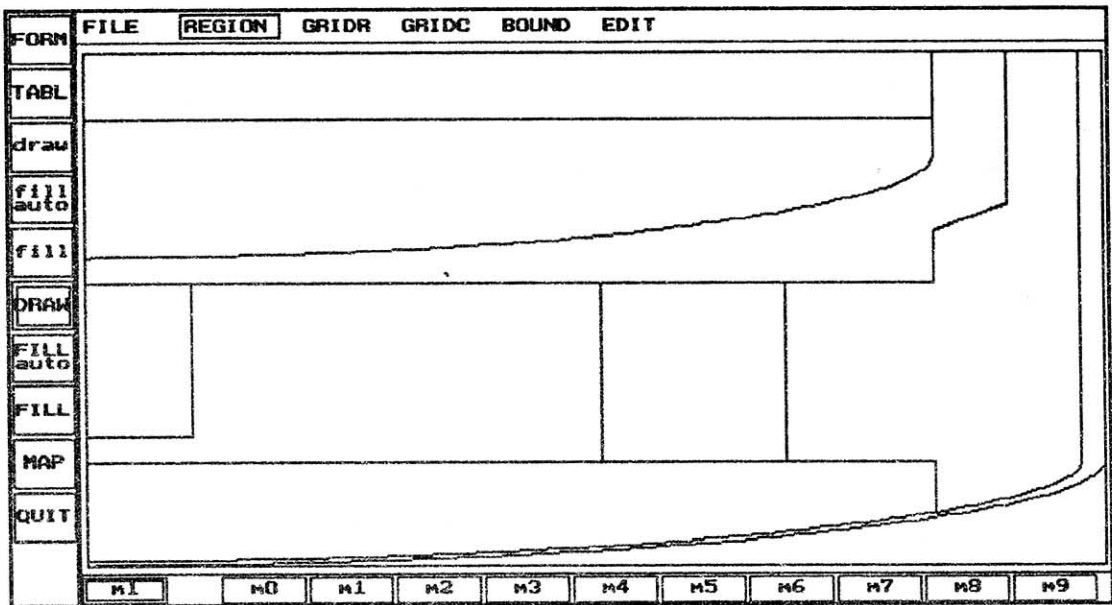


Рис. 8. Формирование контура области

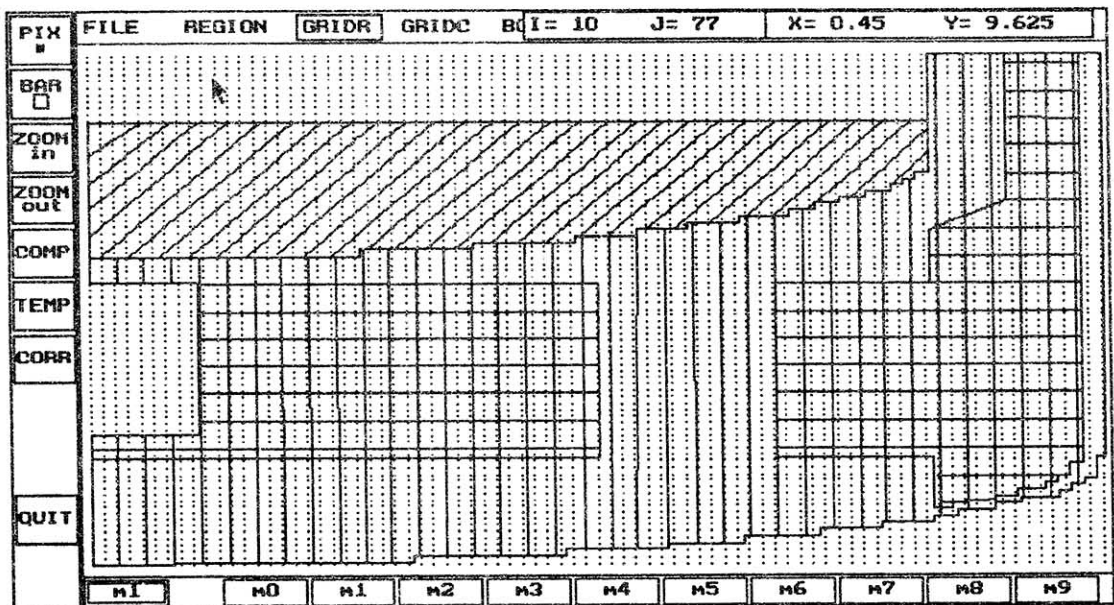


Рис. 9. Карта расчетной области

• задание граничных условий. На рисунке 10 показан вид экрана при постановке граничных условий: более тонкой линией отмечено граничное условие второго рода, более толстой — третьего.

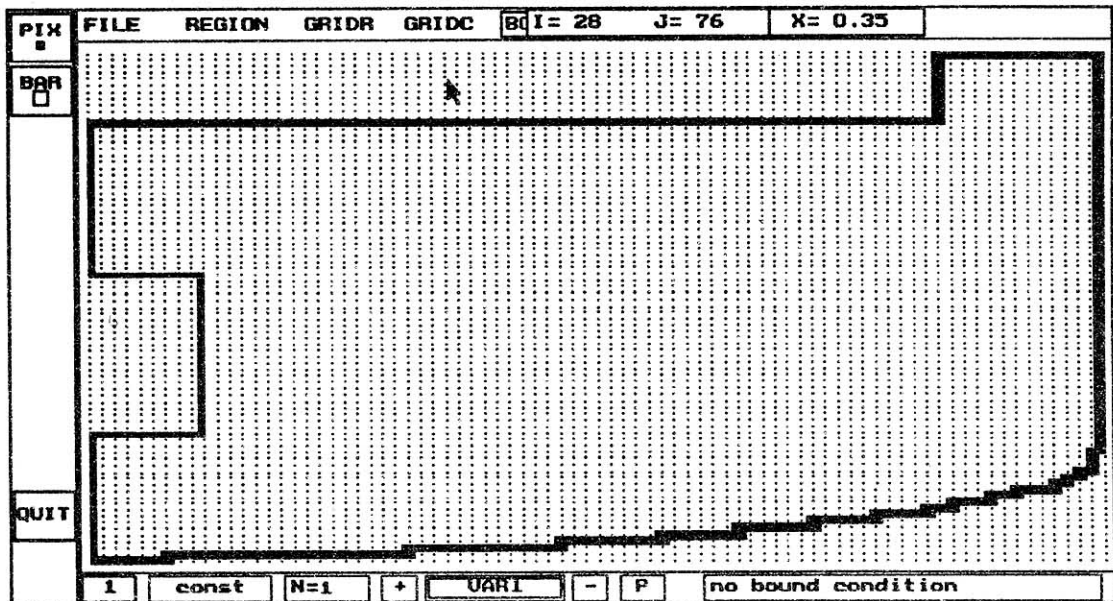


Рис. 10. Постановка граничных условий

В рассматриваемой задаче ставятся следующие граничные условия: на левой границе области (линии симметрии) задается условие 2-го рода — нулевой тепловой поток:

$$q_l = k \frac{\partial T}{\partial r} = 0;$$

на внешней стороне корпуса ставится условие 3 рода:

$$q_v = \alpha(T - T_v),$$

где T — температура поверхности расплава, T_v — температура снаружи корпуса, α — коэффициент теплопередачи.

На верхней границе расплава, в соответствии со сценариями тяжелых аварий, возможны несколько вариантов теплообмена:

а) Адиабатическая постановка граничных условий. Это условие соответствует предположению об установившемся тепловом равновесии над верхней границей расплава.

$$q_u = k \frac{\partial T}{\partial z} = 0;$$

б) Изотермическая постановка граничных условий. При полном теплосъеме с верхней границы расплава на поверхности расплава будут образовываться корки из затвердевшего расплава, существенно влияющие на теплообмен на границе. В этом случае, при моделировании теплопроводности в топливе, на верхней границе можно рассматривать изотермические граничные условия с температурой равной температуре затвердевания расплава (температуре солидус T_b):

$$T = T_b.$$

в) Лучистый теплообмен с окружающими конструкциями.

$$q = \sigma(T^4 - T_s^4),$$

где $\sigma = 5.6 \cdot 10^8$ Вт/(м²·К) — постоянная Стефана-Больцмана.

Пакет "GRID GENERATOR" позволяет хранить все три постановки граничных условий в одном блоке данных, но при желании можно сформировать три однотипных файла с конкретными граничными условиями.

Для ввода в вычислительную программу сформированных с помощью препроцессора данных требуется зачитать необходимые SDF-файлы: основной файл с данными о расчетной

сетке и карте расчетной области и файл с нужными граничными условиями. Таким образом, для проведения ряда расчетов, отличающихся либо геометрией области либо граничными условиями, достаточно лишь заменять файлы с входными данными.

3.3 Обработка результатов

Визуализация результатов расчетов и вывод графиков на печать осуществлялись с помощью интерактивного пакета программ "VV-2D". На рисунках 11-13 приводятся полученные результаты для варианта граничных условий с лучистым теплообменом.

На рисунке 11-12 показаны зависимости максимальной температуры расплава и объема расплава от времени.

На рисунке 13 отображено распределение температуры в реакторе.

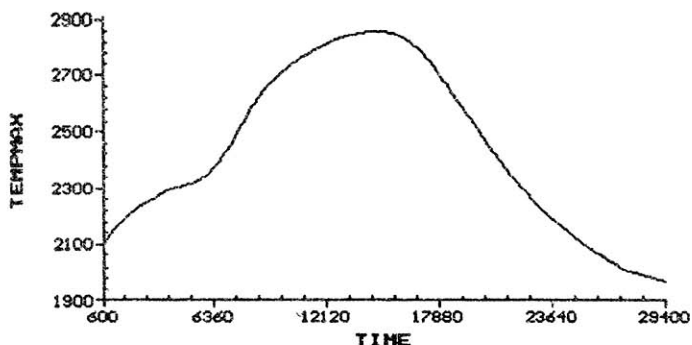


Рис. 11. Динамика максимальной температуры

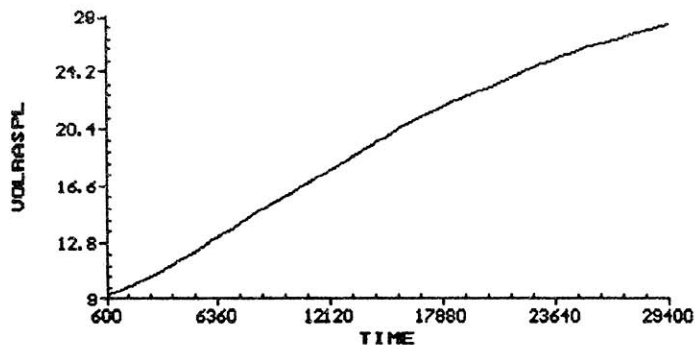


Рис. 12. Динамика объема расплава

Temperature

Max=2390.94
Min=299.999

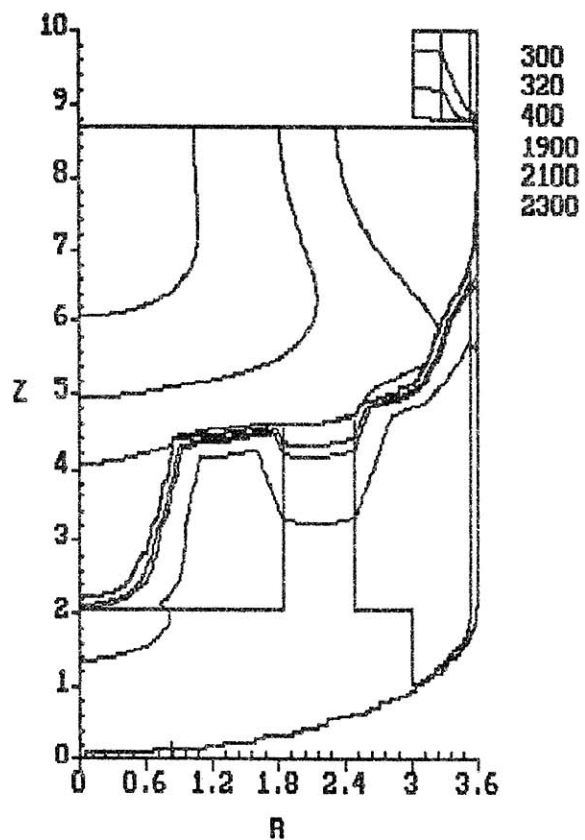


Рис. 13. Распределение температуры

4 Литература

1. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Головизнин В.М., Варенков В.В., Попков А.Г., Стрижов В.Ф., Чуданов В.В. Комплекс программ "РАСПЛАВ" для анализа взаимодействия расплава с бетоном. Сб. Проблемы безопасного развития атомной энергетики. М.: Наука, 1993.
2. Aksenova A.E., Chudanov V.V., Goloviznin V.M., Pervichko V.A., Popkov A.G., Varenkov V.V. Interactive Postprocessor VV-2D for scientific and engineering applications. Preprint NSI-3-94. Moscow: Nuclear Safety Institute, 1993.
3. Варенков В.В., Первичко В.А., Попков А.Г. Самодокументированный файл данных. Препринт NSI-16-93. М.: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 1993.
4. Головизнин В.М., Симачева О.Г. Об одном методе построения расчетных сеток. ЖВМ и МФ, 1983, т. 23, N 5, с. 1245-1248.
5. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1989.
6. Dupont T., Kendall R.P., Rachford H.H., Jr. An approximate factorization procedure for solving selfadjoint elliptic difference equations. SIAM J Numer Anal. 1968, 5, 559-573.
7. Булеев Н.И. Пространственная модель турбулентного обмена. М.: Наука, 1989.