

А. Н. ЧИЧКО, С. Г. ЛИХОУЗОВ,
В. Ф. СОБОЛЕВ, БГПА

The article describes the structure of the programme project for three-dimensions modelling of the cooling melt flow. It presents the data on filling and crystallization of the Radiator casting manufactured at MZOO. These data was calculated with the help of a developed computer system.

УДК 519:669.27

КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА "ПРОЛИТ" ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ОХЛАЖДАЮЩИХСЯ РАСПЛАВОВ В ФОРМЕ

В настоящее время разработка компьютерных систем автоматизированного проектирования (CAD/CAM) для металлургического и литейного производства является одной из наиболее сложных задач. Сложность прежде всего обусловлена многофакторностью технологических процессов, которые определяют получение литых деталей. Существующие физические и математические модели далеко не всегда позволяют получить адекватную картину технологического процесса, что является стимулом в создании новых моделей. Это в определенной степени стимулирует разработку новых программных продуктов. В настоящее время на компьютерном рынке можно выделить следующие пакеты по моделированию литейных процессов: ProCAST, MAGMASOFT, "ПОЛИГОН", LVMFlow и др.[1].

Перечисленные пакеты по цене довольно дорогие и "неподъемные" не только для белорусских предприятий, но и многих российских. Следует отметить, что и модели, лежащие в основе компьютерных систем, далеко не всегда учитывают особенности материалов (гетерофазность, наследственность и др.). Сложность технологических процессов и постоянные исследования в этой области требуют постоянного "внимания" к математическим моделям, их корректировки. Это, конечно, создает прежде всего финансовые трудности при использовании пакетов известных фирм. Поэтому в БГПА развивается направление, связанное с разработкой импортозамещающих программных продуктов по моделированию технологических процессов литейного производства.

Компьютерная система "ПроЛит" предназначена для моделирования технологических процессов литейного производства. В основу этой системы положено математическое ядро, состоящее из дифференциальных уравнений Навье—Стокса и Фурье—Кирхгофа и уравнения неразрывности [2, 3].

Программное обеспечение написано на языке Object Pascal в среде визуального программирования Delphi 5.0 (более 8000 строк исходного кода) для операционной системы Windows 95/98.

Проект программы состоит из:

1) файла проекта (*.dpr), который является контейнером объектов приложения. В нем собраны опи-

сания всех форм и модулей, входящих в проект программы;

2) 24 файлов описания экранных форм (*.dfm), содержащих определения класса формы, преобразуемые средой в визуальное представление;

3) 24 модулей (*.pas), поддерживающих функционирование экранных форм;

4) модуля структуры данных, главного модуля расчета, трех специализированных модулей расчета (скорости, переноса, охлаждения), модуля процедур и функций общего назначения.

При написании компьютерной системы (КС) был разработан и использован компонент, обеспечивающий рисование сетки и получение координат клеток при перемещении мыши.

КС состоит из трех укрупненных блоков (рис. 1): интерфейсной части, предназначенной для взаимодействия пользователя со средой моделирования; модуля структуры данных, содержащего информацию о расположении переменных в памяти ЭВМ и методы доступа к этим переменным; модулей расчета, содержащих процедуры и функции, необходимые для расчета значений скорости, плотности, давления и температуры.

Модуль структуры данных является основополагающим. Он подключается как к интерфейсной части, так и к модулям расчета. Этот модуль обеспечивает полную поддержку структуры данных: доступ к параметрам состояния, сохранение структу-

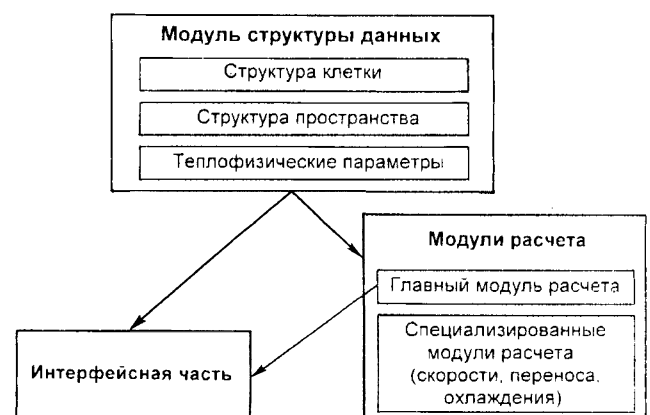


Рис. 1. Структура КС

ры и переменных в файл и чтение их из файла, сервисное обслуживание структуры (выделение и оптимизацию памяти, оптимизацию скорости доступа, проверку границ пространства и исключительных ситуаций). Интерфейсная часть и модули расчета взаимодействуют только на уровне периодического вызова главной процедуры расчета. Это означает, что интерфейс КС может быть легко использован для расчетов других процессов на основе конечно-разностных методов. Необходимо только переписать модули расчета и заменить тело главной процедуры расчета.

В интерфейсной части в свою очередь можно выделить пять блоков (рис. 2): для работы с файлами проекта; для графического представления и редактирования значения параметров клеток; для управления процессом моделирования; для работы с файлами записи расчета; для настроек интерфейса и дополнительной информации.

Пространство расчета. В КС пространство представляет собой сеть элементов в виде правильной кубической решетки. Каждому элементу соответствует набор переменных, характеризующих ее состояние, т. е. значения некоторых физических параметров (скорости, плотности, давления, температуры и т. д.) в этой клетке. Этот набор переменных представлен как запись *TCell*, состоящая из вещественных переменных, соответствующих физическим параметрам и переменной типа *TMatterType*, содержащей информацию о материале в клетке. Для описания состояний всех клеток пространства в памяти создается линейный динамический массив данных *TCellArray* с элементами типа *TCell*. Кроме того, существует трехмерный массив *TCubeI* целочисленного типа, содержащий ссылки на значения, хранящиеся в массиве *TCellArray*.

Такая организация хранения данных позволяет оптимизировать выделение оперативной памяти в процессе рисования за счет неиспользуемых участков куба. При создании нового файла КС запраши-

вает габариты пространства, т. е. количество клеток по осям *X*, *Y* и *Z*, необходимых для рисования модели отливки. После ввода этих параметров в оперативной памяти создается только трехмерный массив *TCubeI*, представляющий собой 3D-структуру пространства моделирования. Элементы этой структуры имеют целочисленный тип (4 байта). Объем памяти, необходимый для хранения структуры:

$$V_{\text{он}} = (n_x + n_y + n_z) \cdot 4, \quad (1)$$

где $V_{\text{он}}$ — объем занятой оперативной памяти; n_x , n_y , n_z — габариты пространства (в клетках). Линейный динамический массив параметров состояния клетки *TCellArray* на момент создания нового файла содержит только один элемент (с типом материала "Нет материала"). Все элементы массива *TCubeI* ссылаются на этот единственный элемент массива *TCellArray*. В дальнейшем при рисовании (присвоении клетке типа материала отличного от типа "Нет материала") выполняются два шага:

1) происходит выделение памяти для линейного динамического массива *TCellArray*, т. е. добавляется новый элемент массива, и этому элементу присваиваются параметры текущего состояния (выставление текущих параметров рисования будет описано ниже);

2) в соответствующем элементе массива *TCubeI* устанавливается ссылка на добавленный элемент линейного динамического массива *TCellArray*.

При обращении к любой клетке пространства происходит выбор параметров состояний из элемента массива состояний *TCellArray*, на который ссылается элемент 3D-структуры *TCubeI*.

Теплофизические характеристики, не изменяющиеся в процессе расчета, задаются для всех клеток, имеющих одинаковый тип материала и хранятся в массиве *TMatterProperties*.

Файловая система включает в себя пять типов файлов:

1) файл проекта (*.prj) содержит информацию о габаритах пространства, количестве клеток, заполненных веществом, а также о дополнительных настройках интерфейса;

2) файл структуры пространства (*.sub) — это файл последовательного доступа, который хранит значения трехмерного массива ссылок *TCubeI*;

3) файл параметров состояния элементов пространства (*.cel) хранит поэлементно значения линейного динамического массива *TCellArray*;

4) файл настройки процесса (*.lrs) содержит информацию о количестве кадров, сохраненных в файле процесса, и дополнительную информацию о процессе;

5) файл процесса (*.res) содержит результаты расчета, сохраняемые через определенное количество тактов.

Файлы первых трех типов полностью описывают модель отливки и создаются при выборе команды главного меню "Файл/Сохранить как...". Главным

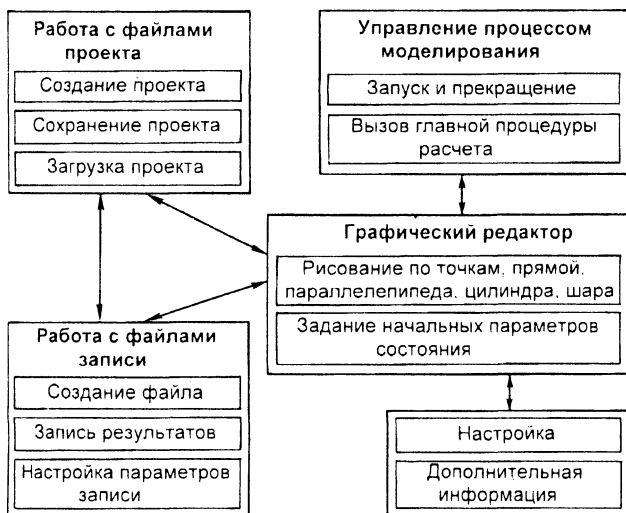


Рис. 2. Структура интерфейсной части

является файл проекта, с ним и работает пользователь. Все остальные файлы имеют имя файла проекта и с ними пользователь не работает. Файл настройки процесса и файл процесса тоже имеют одинаковое с проектом имя. Они создаются сразу же после начала расчета. Возможны три варианта записи результатов в файл процесса:

- полная перезапись файла процесса (в этом случае, если файл уже существует, то он будет уничтожен);
- перезапись с n -го кадра (если файл существует, то, начиная с n -го кадра, старые результаты будут перезаписаны);
- добавление результатов в конец файла (если файл процесса еще не существует, то он будет создан, но в этом случае, рекомендуется использовать вариант полной перезаписи процесса).

Визуализация процесса. Числовое значение компоненты состояния клетки ассоциируется с некоторым цветом. КС предусматривает также вывод черно-белых изображений, когда цвет плавно меняется от черного к белому. Таким образом, можно изобразить какое-либо сечение модели по определенному параметру среды и визуально оценить значения этого параметра одновременно по всех элементах данного сечения. Пользователь имеет возможность вывести на экран сразу несколько окон, отображающих различные параметры среды для одного сечения. На рис. 3 показан пример просмотра типов клеток, температуры в сечении и пространственное представление температур.

Если пользователь подведет курсор к некоторой точке изображения, то в окне значений будут отображены координаты точки и значения параметров

состояния в данной клетке. Пользователь имеет возможность произвольно задавать значение любого параметра в любой клетке (редактировать). При этом обеспечивается несколько режимов редактирования. Можно выбирать курсором определенную клетку и присваивать ей новые значения (этот режим напоминает обычное рисование пером). Можно присвоить новые значения сразу целой группе клеток, имеющих форму какого-нибудь примитива (параллелепипеда, цилиндра, шара). И наконец, можно скопировать параметры уже существующей области и вставить скопированный блок в любое место пространства.

При редактировании и работе расчетного модуля все изменения параметров клеток динамически отображаются на изображениях сечений, что позволяет пользователю непосредственно наблюдать протекание процессов в модели. В процессе моделирования КС последовательно просматривает состояние каждого элемента пространства и изменяет его параметры состояния согласно уравнениям. В любой момент состояние модели можно сохранить в отдельном файле. Это позволяет продолжить моделирование с определенного места. Так как сам процесс моделирования может занять много времени, то результаты расчетов сохраняются в файле процесса. Затем моделируемые процессы можно многократно наблюдать в режиме ускоренного просмотра. Для экономии места на жестком диске КС позволяет задавать количество тактов, через которое производится запись результатов.

Часто в качестве результатов моделирования требуется получить зависимость некоторого параметра состояния клетки от времени. Разработанная

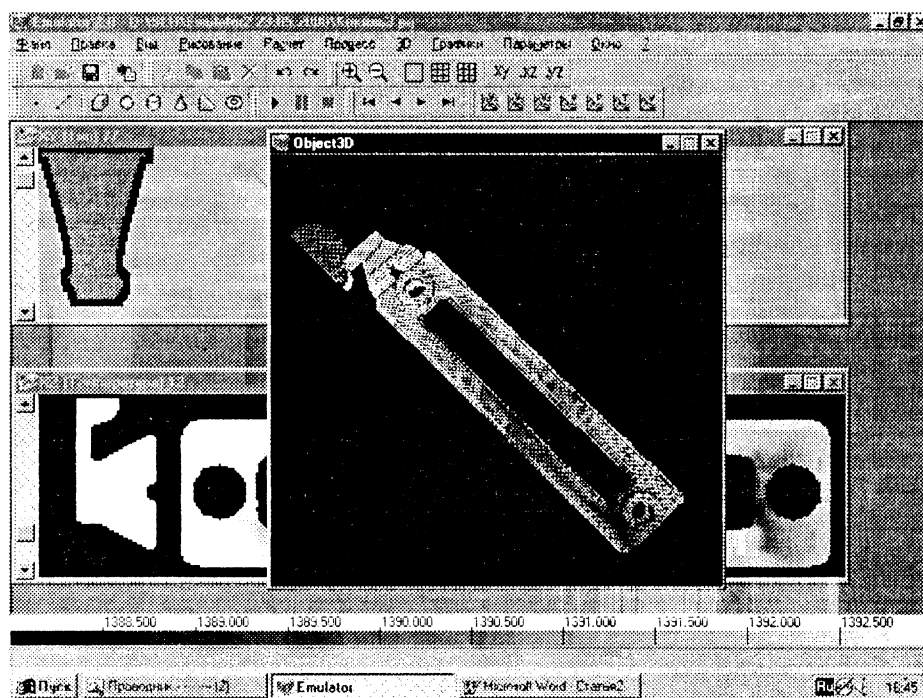


Рис. 3. Температурное поле отливки "Радиатор", изготавливаемой на ОАО "МЗОО", рассчитанное в компьютерной системе "ПроЛит"

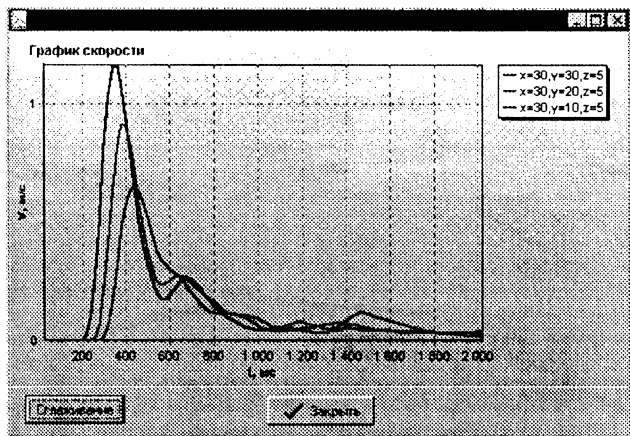


Рис. 4. Расчетные зависимости фильтрованных значений скорости V от времени для трех точек промышленной отливки "Радиатор"

КС позволяет вывести графики изменения любого параметра произвольного элемента модели (рис. 4). Для этого используются данные сохраненных ранее результатов моделирования.

Режимы работы КС. Существуют следующие режимы:

- работа с файлами собственного формата;

- импорт файлов отливок в формате твердотельного моделирования (*.stl);
- рисование и редактирование чертежа отливки с помощью графических примитивов (точка, параллелепипед, цилиндр, шар);
- расчет течения охлаждающегося расплава;
- запись в файл промежуточных моментов расчета;
- просмотр любого сечения отливки как до начала моделирования, так и в процессе расчета;
- визуализация динамики течения жидкости;
- просмотр полей скоростей и температур;
- вывод графиков зависимостей скорости, температуры, плотности, давления от времени в любой точке отливки.

Литература

1. Рысев М. А. Системы компьютерного моделирования литейных процессов // Литейное производство. 2000. № 1. С. 29—32.
2. Чичко А. Н., Яцкевич Ю. В. Трехмерное компьютерное моделирование охлаждения отливки и выбор питателя литейной системы на основе уравнения теплопроводности // ИФЖ. 1999. Т. 72, № 4. С. 792—801.
3. Chichko A., Yatskevich Y., Sobolev V. Three-dimensional computer modeling of alloys flow and foundry technology. Proceeding International conference in Bratislava // Technologia 99. 1999. Vol 2. P. 672—675.