



There is presented the structured schema of the packet "ProLit-1" for modeling of the cooling melt stream process. There are presented the comparative data on characteristics of temperature and speeds for test objects, received with the help of the program "ProLit-1" and «LVMFlow».

А. Н. ЧИЧКО, С. Г. ЛИХОУЗОВ, Ф. С. ЛУКАШЕВИЧ, БНТУ

УДК 519:669.27

КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА «ПРОЛИТ-1» ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ РАСПЛАВОВ

В настоящее время разработка компьютерных систем автоматизированного проектирования (CAD/CAE) для металлургического и литейного производства является одной из наиболее сложных задач. Сложность прежде всего обусловлена многофакторностью технологических процессов, которые определяют получение литых объектов. Существующие физические и математические модели не всегда позволяют получить адекватную картину технологического процесса, что служит стимулом в создании новых моделей. Это в определенной степени стимулирует разработку новых программных продуктов. В настоящее время на компьютерном рынке можно выделить целую группу программных продуктов по моделированию технологических процессов: ProCAST, MAGMASOFT, ПОЛИГОН, LVMFlow и др. Перечисленные пакеты по цене довольно дорогие не только для белорусских, но и для многих российских предприятий. Следует отметить, что и модели, лежащие в основе компьютерных систем, могут различаться, что приводит к разным результатам моделирования. Это говорит о том, что некоторые особенности физики процесса могут различаться в силу объективных причин. Сложность технологических процессов и постоянные исследования в данной области требуют постоянного "внимания" к математическим моделям, их корректировки и улучшения. Это, конечно, создает прежде всего финансовые трудности при использовании пакетов известных фирм. Поэтому в БНТУ развивается направление, связанное с разработкой группы импортозамещающих программных продуктов по моделированию технологических процессов литейного производства [1].

Компьютерная система «ПроЛит-1» одна из таких программ, предназначенная 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 [2–4]. 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 файла проекта (*.dpr), который является контейнером объектов приложения, в нем собраны описания всех форм и модулей, входящих в проект программы; 24 файлов описания экранных форм (*.dfm), содержащих определения класса формы, преобразуемые средой в визуальное представление; 24 модулей (*.pas), поддерживающих функционирование экранных форм; 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 структуры 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 компьютерной системы (КС) может быть легко использован для расчетов других процессов на основе конечно-разностных методов. Необходимо

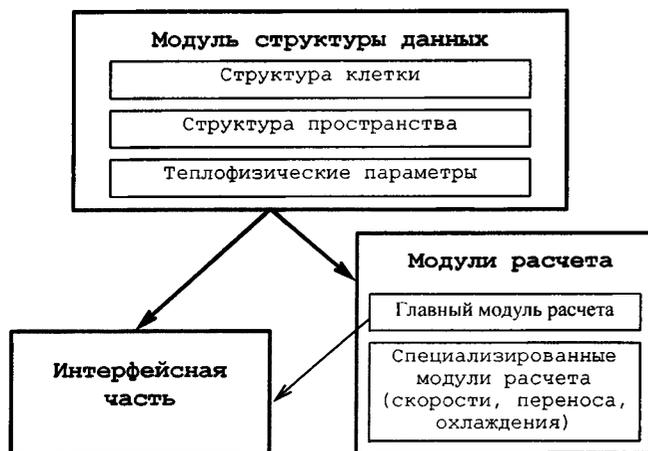


Рис. 1. Структура компьютерной системы «ПроЛит-1»

только переписать модули расчета и заменить тело главной процедуры расчета.

В интерфейсной части в свою очередь можно выделить пять блоков: 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.

В КС пространство расчета 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. Такой 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 запрашивает 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. 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 (присво-

ении клетке типа материала, отличного от типа «Нет материала») выполняются два шага:

- 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);

- 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 (*.cub) — 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 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).

При визуализации 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 всем элементам данного сечения. Пользователь имеет возможность вывести на экран сразу несколько окон, отображающих различные параметры среды для одного сечения. Возможны просмотр типов клеток, температуры в сечении и пространственное распределение 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 состояния 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. КС позволяет вывести графики изменения любого параметра произвольного элемента модели. Для этого используются данные сохраненных ранее результатов моделирования. Существуют следующие режимы работы с системой: 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.

Представляет интерес сравнить результаты моделирования, получающиеся в КС «ПроЛит-1», с результатами, полученными в широко рекламируемой КС «LVMFlow». Ниже проведен сравнительный анализ некоторых характеристик движущегося расплава в построенных 3d-объектах с помощью разработанного программного обеспечения «ПроЛит-1» и программного продукта «LVMFlow». Выбор этого продукта в качестве основного для получения информации связан с тем, что он широко рекламируется в интернете и имеются возможности для тестового расчета некоторых вариантов процесса течения. К тому же этот продукт может использоваться без рабочих станций. Практически все основные функции этого пакета эквивалентны функциям таких пакетов, как «ProCAST», «Magmasoft» и др. В пакете предлагаются четыре отливки с литниковыми системами для того, чтобы будущий пользователь этого пакета мог оценить возможности «LVMFlow». Аналогичные конструкции литниковой системы и отливки были построены в графическом редакторе компьютерной системы «ПроЛит-1». При этом были полностью соблюдены размеры пространственного объекта. На рис. 2, 3 представлен общий вид 3d-объекта в двух КС. Как видно из рисунков, объект представляет собой пластину и вертикальную литниковую систему с нижним подводом металла. В качестве начальных и граничных условий, а также теплофизических характеристик металла и формы были использованы следующие данные: число ячеек — 287 280; заливаемый металл — серый чугун СЧ10; химический состав — 93,07% Fe; 3,6% C; 0,7% Mn; 0,15% P; 0,08% S; температура заливки — 1260°C; начальная температура формы — 20°C; шаг по пространству — 0,002 м; теплофизические характеристики металла — $T_{\text{liq}} = 1168^\circ\text{C}$, $T_{\text{sol}} = 1145^\circ\text{C}$, теплопроводность и теплоемкость — как функции температуры.

В качестве анализируемых характеристик использовали распределение температуры поля в выделенных сечениях, а также функции зависимости температуры и скорости от времени в выделенных точках объекта.

На рис. 4 представлены сравнительные данные распределения температурного поля в момент времени $t=5\text{c}$ для среднего сечения и объемного изображения. Как видно из рисунка, распределение температуры по телу объекта равномерное, а

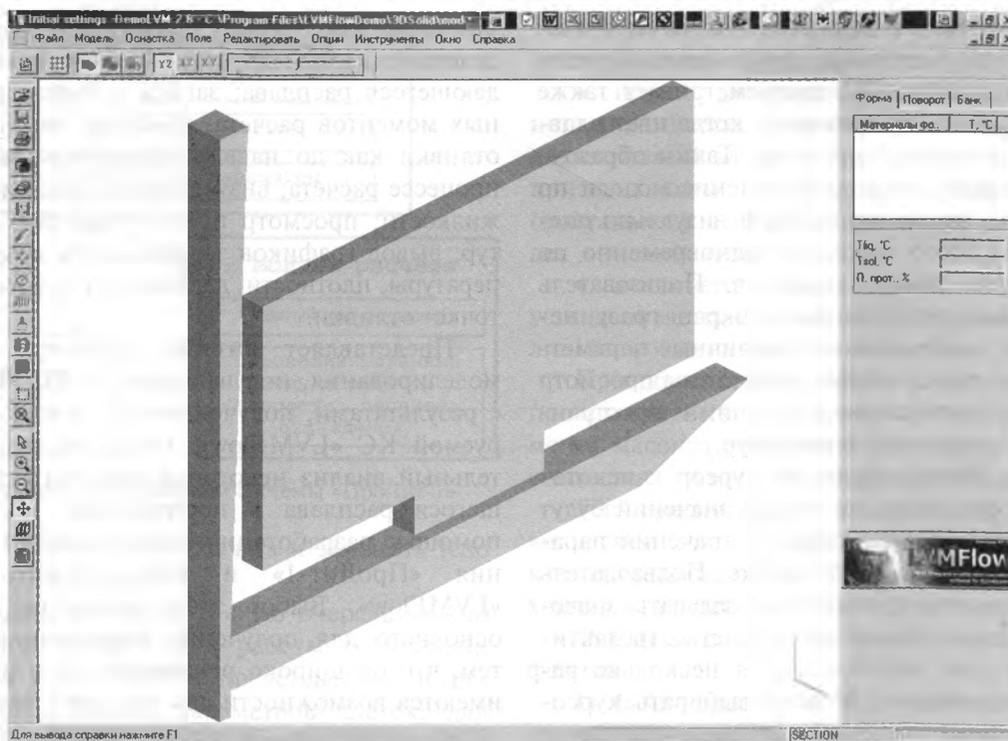


Рис. 2. Общий вид модельной отливки 3d-объекта (изображение в системе «LVMFlow»)

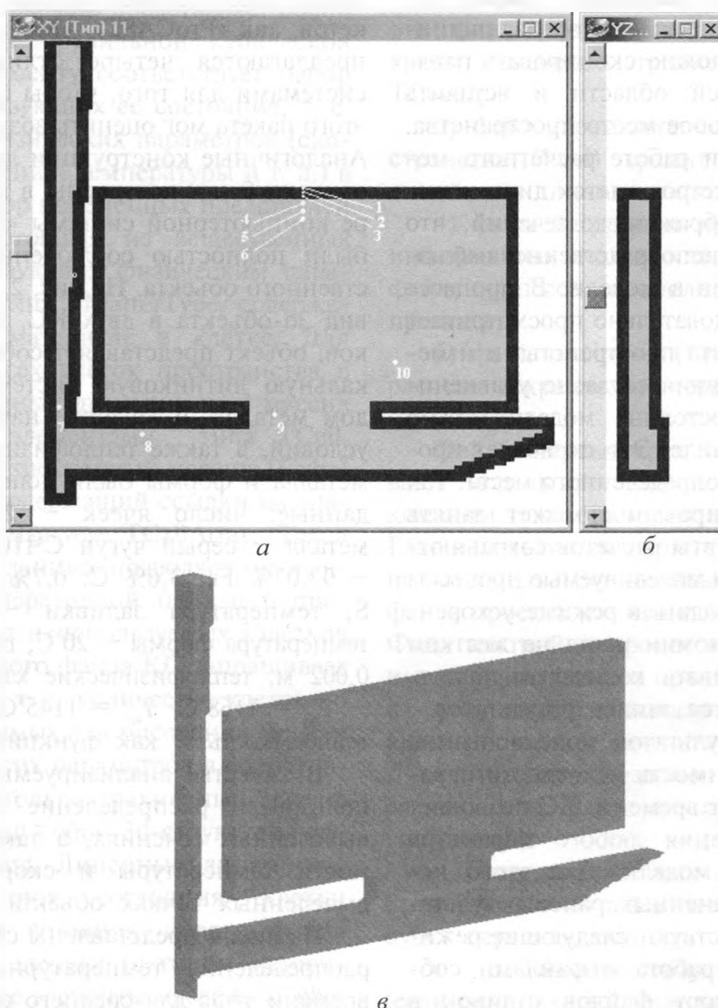
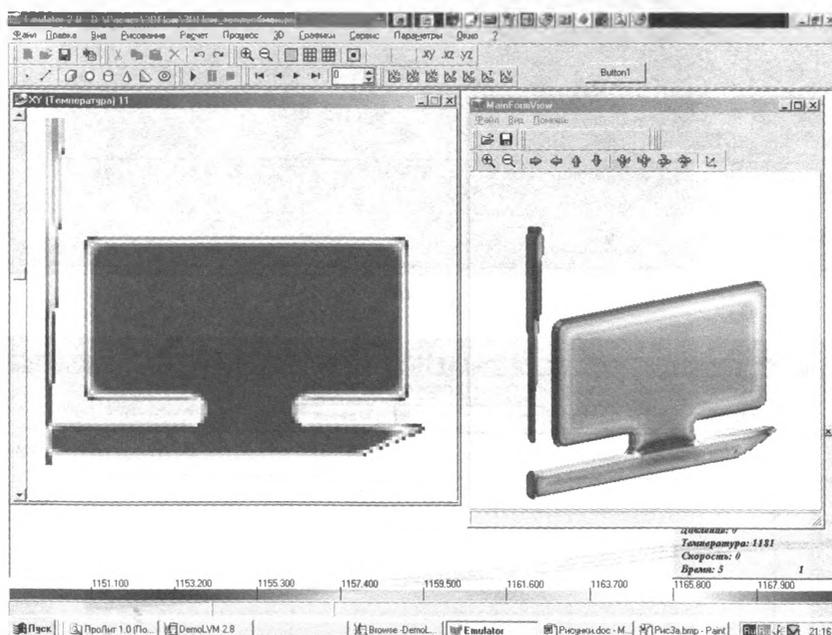


Рис. 3. Общий вид модельной отливки 3d-объекта с сечением (изображение в системе «ПроЛит-1»): а – вид спереди; б – вид сбоку; в – аксонометрия

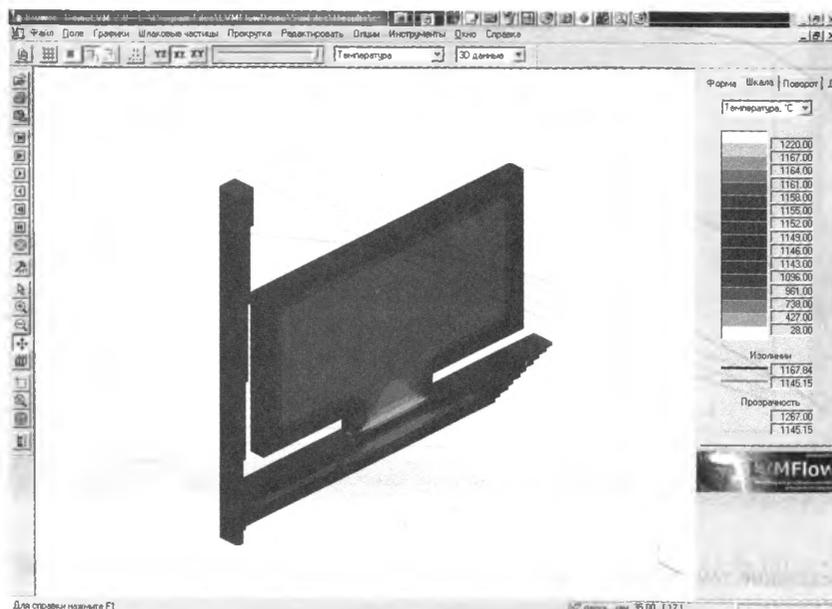
вблизи питателя имеется температурная область, вытянутая в виде треугольника, у которого вершина совпадает с началом сечения канала.

На следующем этапе для заданных точек 3d-объекта были рассчитаны зависимости $T=f(t)$. На рис. 5, 6 представлен характер этих зависимостей. Как видно из рисунков, точки 1–3 находятся в форме, а точки 4–6 – в 3d-объекте. Характер зависимости точек 1–3 свидетельствует о том, что в них протекают процессы нагрева формы. Причем характер увеличения температуры для этих точек по результатам пакетов «ПроЛит-1» и «LVMFlow» идентичен, особенно для точек 1 и 2. Для точек 4–6 уменьшение температуры сопровождается процессами охлаждения и кристаллизации, о чем свидетельствует наличие площадок на кривой охлаждения. Детальный анализ участка функции $f(t)$, на котором происходит кристалли-

зация, показывает некоторое различие в характере изменения температуры в объекте. По-видимому, эти различия связаны с тем, что модели кристаллизации в пакете «ПроЛит-1» отличаются от «LVMFlow». Математические модели при учете процесса кристаллизации могут быть различными как по реализации, так и по наполнению этих моделей, что является предметом ноу-хау разработанных пакетов. На рис. 7 показаны функции изменения скорости от времени для точек, приведенных на рис. 2. Как видно из рисунка, изменение скорости в выделенных точках сложным образом зависит от времени. Общий характер скоростей, полученных в «ПроЛит-1» и «LVMFlow», подобен, в то время как в деталях функции различны. Причина этого различия, по-видимому, в математической реализации процессов переноса.

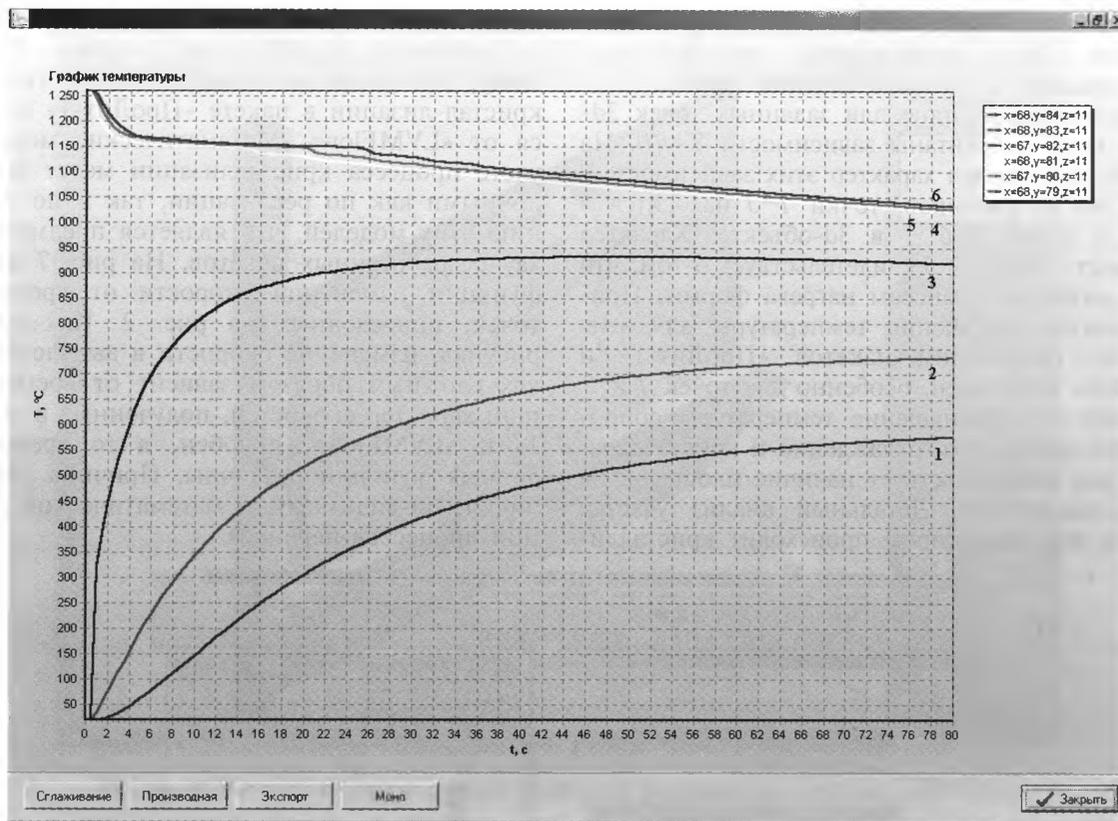


а

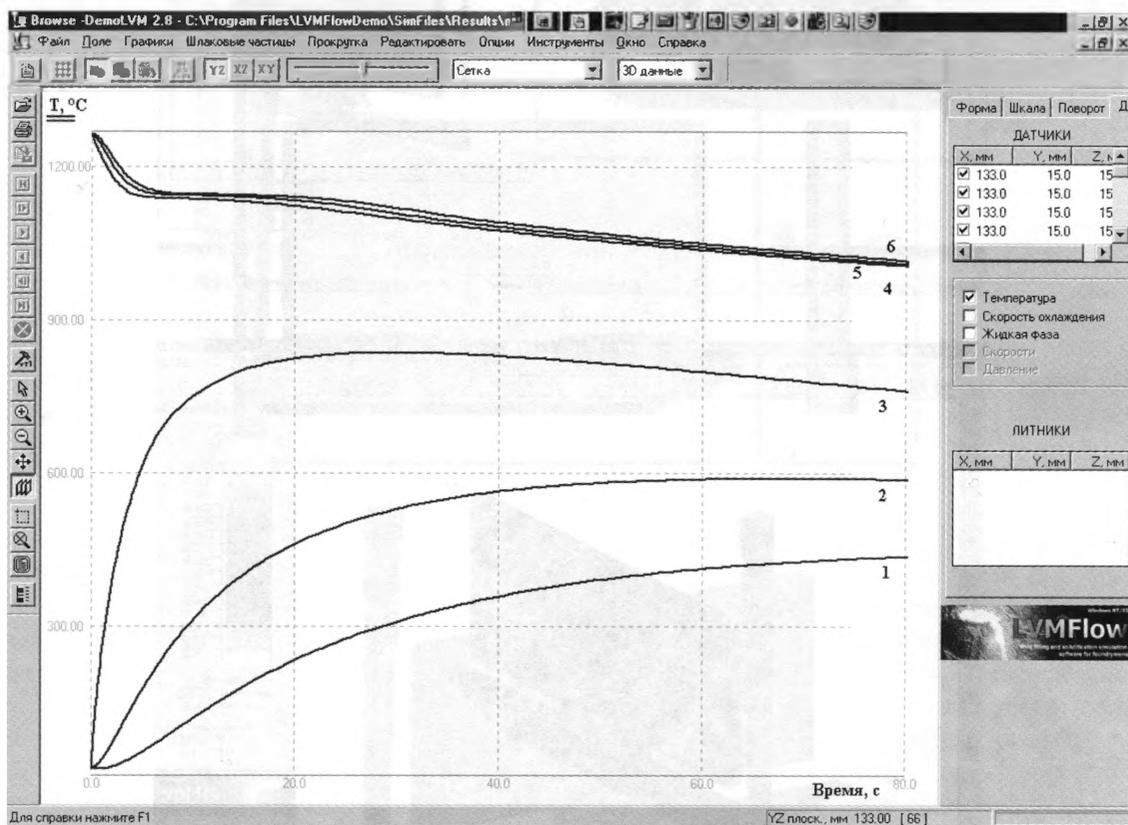


б

Рис. 4. Распределение температур в 3d-объекте, полученное в системах «ПроЛит-1» (а) и «LVMFlow» (б), $\tau=5c$

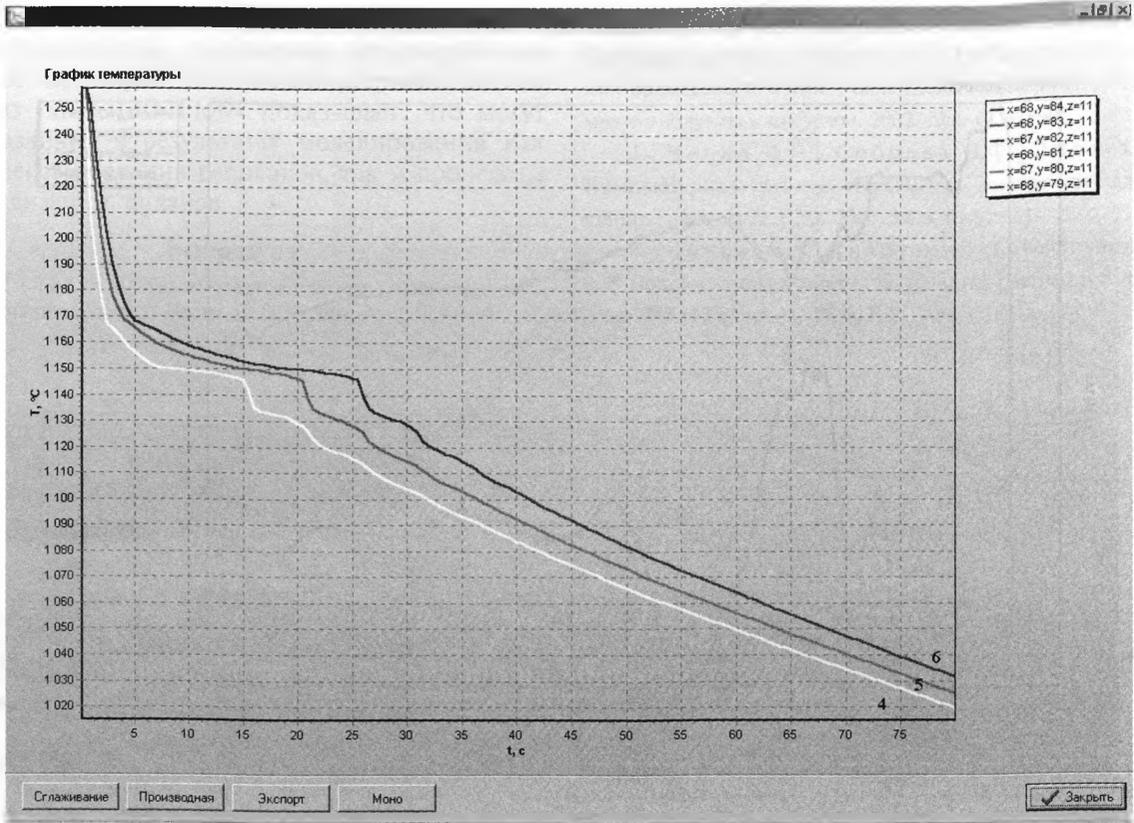


a

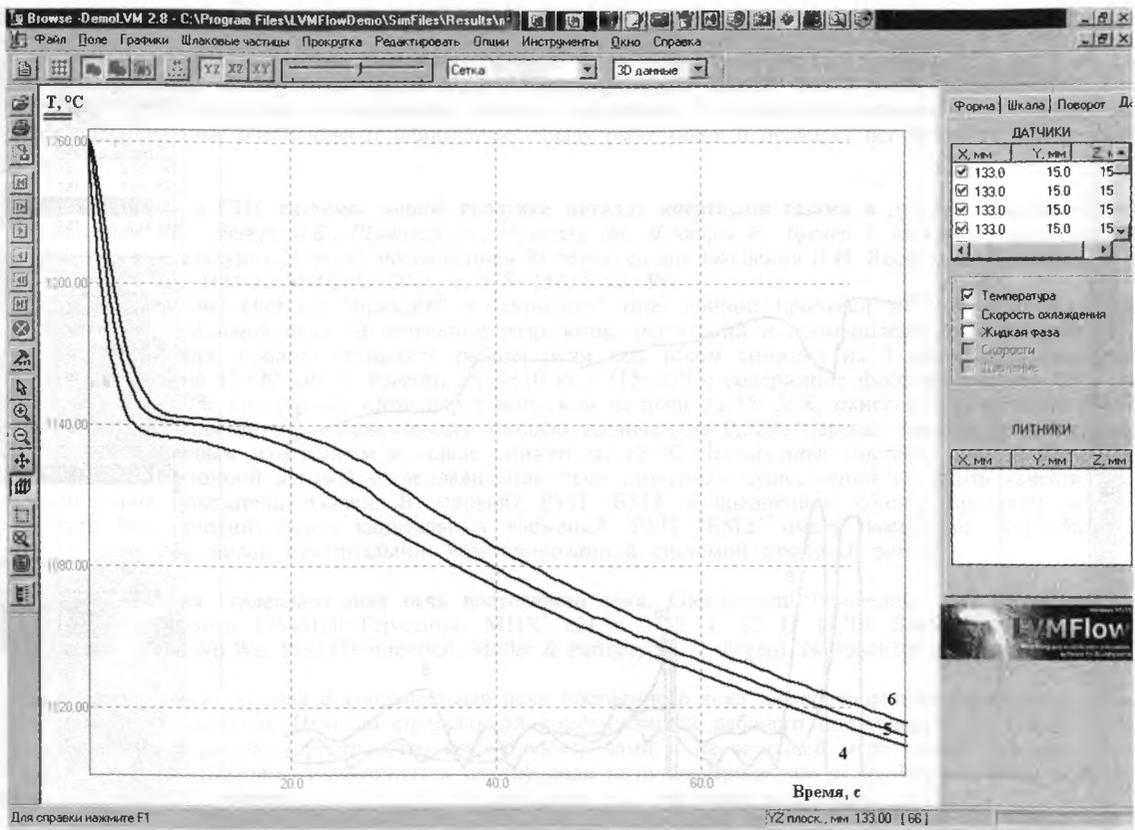


b

Рис. 5. Распределение температур во времени, полученное в системах «ПроЛит-1» (a) и «LVMFlow» (б)

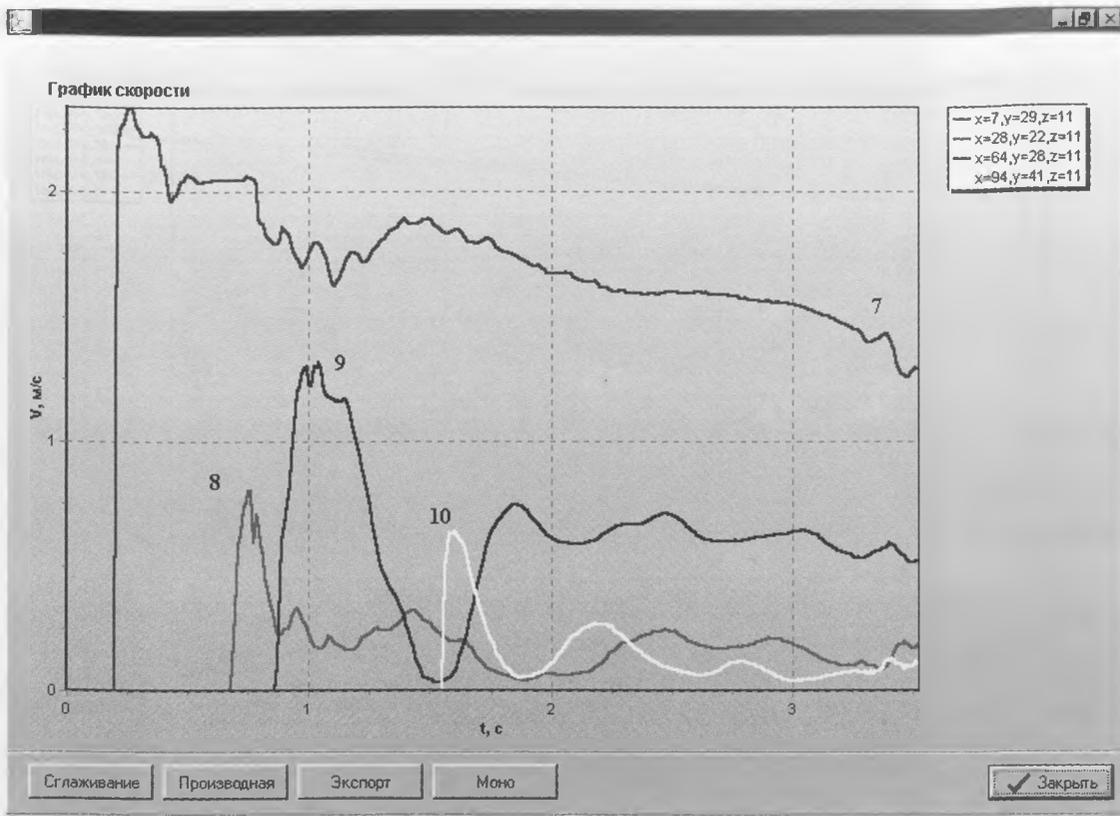


а

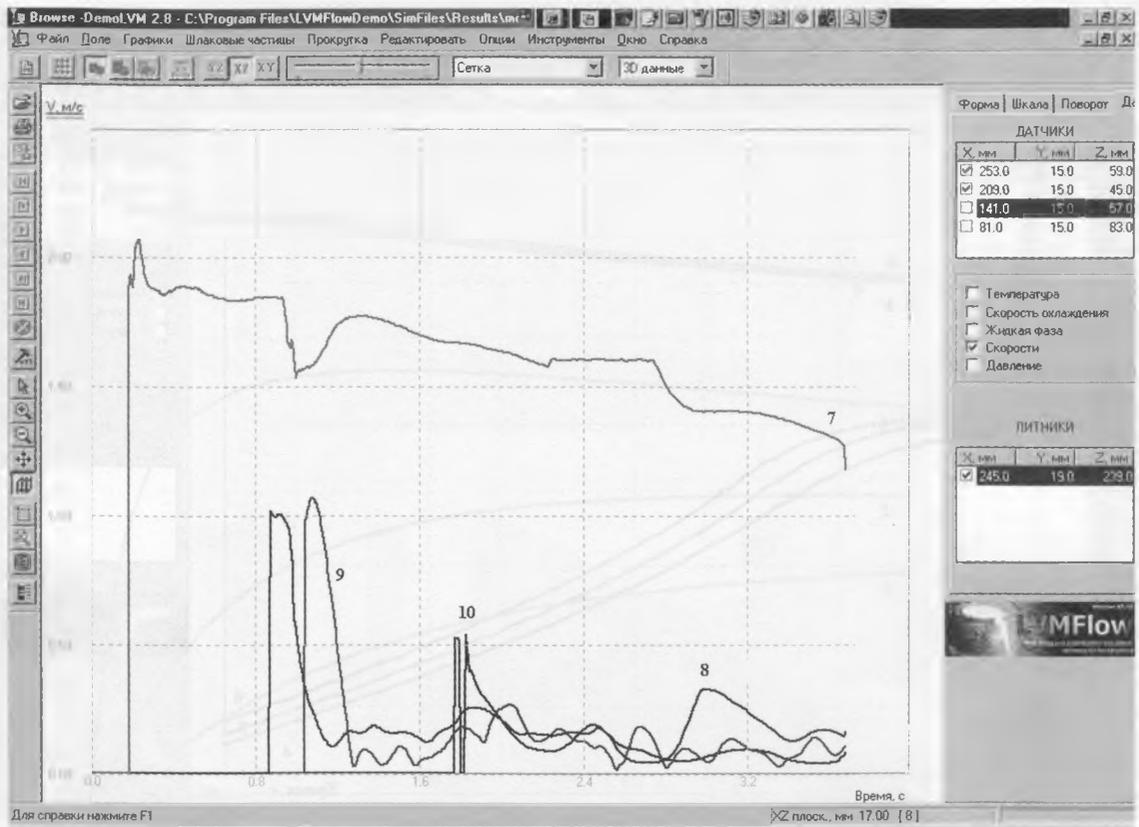


б

Рис. 6. Распределение температур во времени, полученное в системах «ПроЛит-1» (а) и «LVMFlow» (б)



а



б

Рис. 7. Распределение скоростей в точках 1–4 3д-объекта, полученное в системах «ПроЛит-1» (а) и «LVMFlow» (б)

Таким образом, проведенный анализ некоторых характеристик результатов моделирования тестовых примеров для компьютерных систем «ПроЛит-1» и «LVMFlow» показывает, что могут быть различия в результатах моделирования как по процессам течения расплавов, так и процессам кристаллизации сплавов.

Литература

1. Чичко А.Н. Компьютерные системы моделирования физических процессов // Вестн. БНТУ. 2003. № 2. С. 42–48.

2. Чичко А.Н., Соболев В.Ф., Лихоузов С.Г. Комплекс программных средств «ПроЛит» для моделирования процессов течения и охлаждения расплавов // Программные продукты и системы. 2002. №4. С. 47–48.

3. Чичко А.Н., Соболев В.Ф., Лихоузов С.Г. Компьютерная система «ПроЛит» - инструмент для повышения качества // ТЭО. 2001. № 6. С. 30–31.

4. Чичко А.Н., Лихоузов С.Г. Клеточно-автоматное моделирование процесса течения расплава в форме // Докл. НАН Беларуси. 2001. Т.45. №4. С. 110–114.



03.03–14Г.60. Тенденция развития технологии и оборудования электросталеплавильного производства. Еланский Д.Г., Еланский Г.Н. Труды 6 Конгресса сталеплавыльщиков, Череповец, 17–19 окт., 2000. М.: ОАО "Черметинформация". 2001, с. 188–197, 2 ил., табл.6 Библ. 25. Рус.

Показано, что ДСП традиционной конструкции имеют большие резервы в своем развитии. Печи новых конструкций не обеспечивают решающих преимуществ в технико-экономических показателях перед оптимизированной ДСП традиционной конструкции. В российских условиях выбор печей новых конструкций можно рекомендовать только предприятиям, уже обладающим опытом электросталеплавильного производства. Основное внимание при выборе ДСП должно быть направлено на подбор проверенной и хорошо зарекомендовавшей себя техники, максимально простой и надежной в эксплуатации. Все усилия технического перевооружения значат очень мало, если нет инвестиций в человеческий фактор – в подготовку, в поощрение кадров, в разработку обоснованной системы оплаты труда, в создание таких условий труда, которые обеспечивают наивысшую отдачу работников и позволяют персоналу гордиться и дорожить своим рабочим местом.

03.03–14Г.61. Первые в СНГ системы донной продувки металла инертными газами в дуговой сталеплавильной печи. Гуляев М.П., Филиппов В.В., Эндерс В.В., Шумахер Эв., Шумахер Эд., Францки Р., Бренер Х. Международная конференция-диспут "Металлургия и металлургия 21 века", посвященная 90-летию со дня рождения В.И. Явойского, Москва, 27–30 нояб., 2000: Сборник трудов, М.: Изд-во МИСиС. 2001, с. 128–137, 5 ил. Рус.

Исследованы и внедрены системы "прямого" и "скрытого" типа донной продувки металла инертными газами в мощной дуговой сталеплавильной печи. В результате разработок, испытаний и промышленного использования достигнуты следующие показатели: продолжительность работы печи под током снижена на 3 минуты; снижены удельные расходы: электроэнергии на 15–20 кВт/ч, извести на 8–10 кг/т (15–20%); содержание фосфора в металле уменьшилось на 45–50%, серы на 15–20%, содержание азота перед выпуском из печи на 15–25%, окисленность металла на 44%, угар раскислителей и легирующих на 5%, выход годного металла увеличен на 0,52%; перепад температур между последним измерением в печи и первым измерением в ковше снижен на 15 °С. Внедренные системы донной продувки ванны инертными газами в 100-тонной дуговой сталеплавильной печи позволили существенно улучшить качество металла и технико-экономические показатели плавки. В условиях РУП "БМЗ" с внедрением донной продувки решен вопрос дефицита извести без дополнительных капитальных вложений. РУП "БМЗ" имеет намерения оборудовать дуговую сталеплавильную печь №1 новой оригинальной комбинированной системой продувки ванны.

03.03–14Г.57П. Дуговая сталеплавильная печь постоянного тока. Gleichstromlichtbogenofen zur Herstellung von Stahl sowie Verfahren hierzu: Заявка 19846100 Германия, МПК⁷ с21 с 5/52, F 27 D 11/10. SMS Schloemann-Siemag AG, Pleschiutschnigg Fritz-Peter, Wu Wei-Ping (Hemmerich, Muller & Partner, 57072 Siegen). № 19846100.3; Заявл. 07.10.1998, Опубл. 13.04.2000. Нем.

Предлагается экологичная дуговая сталеплавильная печь постоянного тока, обеспечивающая высокую производительность при минимизации загрузки. Печь со специальной конфигурацией рабочего пространства оснащена по меньшей мере двумя вводимыми в рабочее пространство сверху электродами и по меньшей мере одним подовым электродом, генерирующими две наклонно ориентированные к центру пода печи электрические дуги. Загрузка печи осуществляется через центральную шахту с образованием столба подлежащего расплавлению материала.