

---

УДК 669.27:519

*А. Н. Чичко, д-р физ.-мат. наук, проф.;*

*В. Ф. Соболев, д-р техн. наук, проф.;*

*С. Г. Лихоузов, канд. техн. наук;*

*Ю. В. Яцкевич, канд. техн. наук;*

*О. А. Сачек, канд. техн. наук;*

*Д. М. Кукуй, д-р техн. наук, проф.;*

*О. И. Чичко, канд. техн. наук*

*(Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь, г. Минск)*

## Компьютерные системы моделирования для литейного и металлургического производства

---

**П**рименение методов моделирования при разработке технологических процессов является одним из важнейших способов повышения качества промышленного производства. В качестве причины, сдерживающей широкое применение методов численного моделирования технологических процессов в производстве, можно назвать пространственную сложность промышленных объектов. Это приводит к большой разрядности сетки промышленного объекта (отливки) и существенно увеличивает время расчетов технологического процесса. В то же время

в промышленном производстве эффективность решения технологических задач во многом зависит от оперативности, что может быть в данном случае обеспечено компьютерами с высокой степенью производительности. В последние годы в целях повышения производительности информационных технологий широко развивается такое научное направление, как создание мультипроцессорных вычислительных систем. Одна из таких систем (суперкомпьютер СКИФ) была разработана в результате совместных исследований белорусских и российских уче-

ных в Объединенном институте проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ОИПИ НАН Беларуси, г. Минск). Первые белорусские компьютерные системы с использованием многопроцессорных систем для литейного и металлургического производства были разработаны при выполнении научно-технической программы «Триада» Союзного государства Беларуси и России<sup>1</sup>.

## «ПроЛИТ-1с» [1]

Одним из путей, повышающих эффективность численных методов моделирования технологических объектов, является распараллеливание процесса вычислений для многоядерных компьютеров. Многоядерные мультипроцессорные системы за счет кластерной архитектуры позволяют существенно увеличить время моделирования технологического процесса. Большой интерес для промышленных предприятий литейного профиля, которые заинтересованы в том, чтобы разработка литейных технологий проводилась на основе моделирования процессов заполнения форм и кристаллизации сплавов, представляет использование возможностей суперкомпьютера СКИФ,

В настоящее время завершается работа по созданию модулей компьютерной системы «ПроЛит-1с». Предполагается, что промышленные предприятия обоих государств получают доступ к этой системе через сеть Интернет. Упрощенная схема работы предприятия с программой «ПроЛит-1с» будет строиться по следующему алгоритму:

*Шаг 1.* Технолог с помощью систем графики строит геометрическую модель отливки и варианты литниковой системы, причем число литниковых систем может быть большим.

*Шаг 2.* Формируются исходные данные по теплофизическим свойствам металла и формы, а также начальные условия заливки.

*Шаг 3.* Используя систему паролей, все входные данные по технологическим вариантам пересылаются на СКИФ для проведения процесса моделирования расчетов.

*Шаг 4.* С помощью Интернет-технологии технолог получает доступ к результатам вычислений в виде упрощенного (специальный текстовый файл, содержащий критерии для принятия решения по выбору литниковой системы) или полного (в виде файлов записей процесса течения и кристаллизации металла) протокола. Результаты расчетов в упрощенной или полной форме передаются на ПЭВМ для принятия решения технологом.

Компьютерная система (КС) «ПроЛит-1с» разработана на основе «ПроЛит-1» [1] и позволяет моделировать динамику процесса течения металла в литниковой системе и форме, а также осуществлять трехмерные расчеты полей температуры, пористости, скоростей, давлений в любой плоскости отливки и в любой момент времени. Возможен анализ температуры во времени в любой точке

«отливка — форма — литниковая система», т. е. имитация работы термодары. Визуализация дефектов усадочного происхождения проводится на основе дискретного поля плотностей. Анализируя величину скоростных потоков расплава в форме, можно оценить вероятность размыва форм для различных участков, а также образование дефектов типа «недолив» и «спай». Система «ПроЛит-1с» отличается от «ПроЛит-1» алгоритмами, позволяющими распараллелить процесс вычислений и за счет этого уменьшить время моделирования в десятки раз. Программное обеспечение «ПроЛит-1с» реализовано на основе системы LINUX. Структура компьютерной системы «ПроЛит-1с» представлена на рис. 1. Технология работы с системой предлагается следующая:

- 1 Входные данные передаются от рабочего места пользователя на суперкомпьютер по сети Интернет. Входными данными в КС «ПроЛит-1с» являются литниковая система в формате \*.stl, отливка в формате \*.stl, файл формата \*.rgm, в котором хранятся данные, необходимые для импорта объекта моделирования и расчета процессов движения расплава, его охлаждения и кристаллизации.
- 2 Работа расчетных модулей проводится на суперкомпьютере СКИФ. Математические функции в КС «ПроЛит-1с» распараллелены, что обеспечивает уменьшение времени расчета технологического процесса в несколько раз в зависимости от степени сложности рассчитываемого объекта.

КС «ПроЛит-1с» состоит из следующих расчетных модулей:

- модуль структуры данных, содержащий информацию о расположении переменных в памяти ЭВМ и методах доступа к этим переменным;
- модуль создания сеточного объекта;
- модули расчета движения расплава и расчета охлаждения и кристаллизации, содержащие процедуры и функции, необходимые для вычисления значений скорости, плотности, давления и температуры;
- модуль формирования файла результатов \*.rst.

Модуль структуры данных обеспечивает комплексное взаимодействие всех модулей, предоставляет доступ к параметрам состояния, обеспечивает сохранение структуры и переменных в файл и чтение их из файла, сервисное обслуживание структуры (выделение и оптимизацию памяти, оптимизацию скорости доступа, проверку грани пространства и исключительных ситуаций).

Файлы с результатами передаются на локальный компьютер пользователя, где могут быть просмотрены при помощи визуализатора (подсистемы трехмерной визуализации) с помощью технологии OpenGL. Благодаря этой подсистеме пользователь может визуально оценить процесс заполнения формы расплавленным металлом, увидеть места образования таких литейных дефектов, как недолив и спай, получить представление о процессе движения жидкого металла, его охлаждении и структурных превращениях.

<sup>1</sup> Научно-техническая программа Союзного государства Беларуси и России «Развитие и внедрение в государствах — участниках Союзного государства наукоемких компьютерных технологий на базе мультипроцессорных вычислительных систем», утверждена постановлением Совета Министров Союзного государства от 29.10.2005 № 29. — Прим. ред.

## Исходные данные

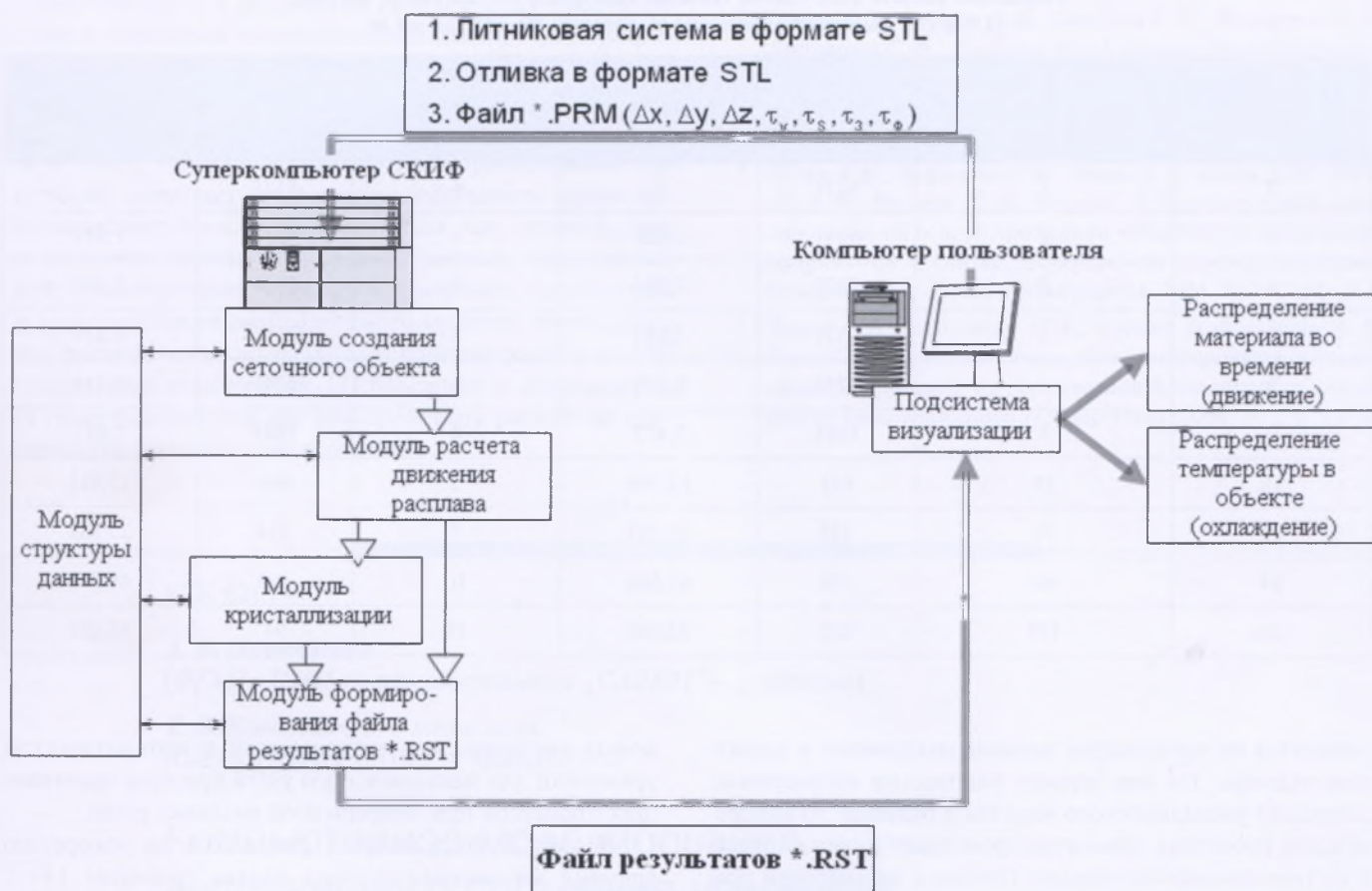


Рис. 1. Схема работы с компьютерной системой «ПроЛит-1с» для суперкомпьютера СКИФ

Подсистемы трехмерной визуализации выполняют следующие функции:

- отображают трехмерный объект, состоящий из отливки и литниковой системы;
- отображают процесс движения жидкого металла в форме в автоматическом режиме;
- позволяют просматривать в ручном режиме любой сохраненный момент движения расплава;
- позволяют просматривать области закристаллизовавшегося металла;
- отображают пространственно распределенное поле температур на момент окончания заливки;
- позволяют вращать объект в трех направлениях в любой момент времени.

Для иллюстрации возможностей программы «ПроЛит-1с» ниже представлены данные расчета процесса заполнения чугуном песчано-глинистых форм для отливки «Угольник» (номенклатура Минского завода отопительного оборудования). Расчет проводился на различном количестве процессоров (от 2 до 128 процессоров) кластера itk-121.bas-net.by. По окончании моделирования была выполнена оценка времени, затраченного на расчет и ускорение расчета, по сравнению с базовым расчетом на двух процессорах.

Анализ данных, представленных на рис. 2, показывает, что при использовании СКИФа достигается максимальное существенное ускорение расчета до 34 раз на 128 процессорах кластера itk-121.bas-net.by в зависимости от геометрии объекта, его размеров, шага расчета по пространству, времени моделирования. Данные по ускорению расчета для различных отливок на одинаковом количестве процессоров несколько меняются, что связано с неравномерностью распределения расчетных элементов по процессорам. Неравномерность распределения расчетных



Рис. 2. Влияние числа процессоров на ускорение и время моделирования для отливки «Угольник» (число расчетных элементов 1 501 522)

Результаты расчета 6000 тактов тепловой задачи для слитка 140 × 140 мм  
(1 020 272 расчетных элементов) на кластере itk-121.bas-net.by

| Общее число процессов | Число процессов, задействованных в расчете | Время расчета $t_1$ , с | Ускорение | Время первоначальных установок, с | Время расчета $t_2$ , с | Ускорение |
|-----------------------|--|-------------------------|-----------|-----------------------------------|-------------------------|-----------|
| 2                     | 1  | 8131                    | 1         | 4                                 | 8127                    | 1         |
| 3                     | 2  | 4091                    | 1,988     | 4                                 | 4087                    | 1,989     |
| 4                     | 3  | 2800                    | 2,904     | 4                                 | 2796                    | 2,907     |
| 5                     | 4  | 2121                    | 3,834     | 4                                 | 2117                    | 3,839     |
| 8                     | 7  | 1246                    | 6,526     | 4                                 | 1242                    | 6,544     |
| 9                     | 8  | 1088                    | 7,473     | 4                                 | 1084                    | 7,497     |
| 16                    | 15   | 611                     | 13,308    | 5                                 | 606                     | 13,411    |
| 32                    | 31   | 322                     | 25,252    | 8                                 | 314                     | 25,882    |
| 64                    | 63   | 178                     | 45,680    | 10                                | 168                     | 48,375    |
| 128                   | 127  | 112                     | 72,598    | 18                                | 94                      | 86,457    |

элементов по процессорам вызвана различиями в геометрии отливок. Так как заранее неизвестно направление движения расплавленного металла в отливке, то распределение расчетных элементов происходит в соответствии с их усредненным значением. Однако в дальнейшем при моделировании расчетные элементы, распределенные по различным процессорам, могут получить различное количество металла, что и приводит к колебаниям данных по ускорению расчета на одинаковом количестве процессоров для различных отливок.

Программное обеспечение «ПроЛит-1с» модифицировано в сравнении с «ПроЛит-1». Так, например, в программе «ПроЛит-1с» рассчитываются не один, а несколько вариантов технологического процесса. В результате по каждому варианту расчета выводится протокол, который включает распределения по температурам и скоростям объекта моделирования. С помощью разработанных для каждого варианта критериев технолог может выбрать оптимальный вариант для разработки технологической оснастки.

### «ПроНПС-1с» [2, 3]

В компьютерной системе «ПроНПС-1с» развивается подход, основанный на клеточно-автоматном моделировании процесса непрерывной разливки стали, позволяющий рассчитывать и визуализировать на компьютере трехмерный процесс получения литых заготовок в реальных промышленных условиях. В основе компьютерной системы лежит собственное математическое ядро, построенное на математических уравнениях теплопроводности с учетом функциональных значений теплоты кристаллизации. Математическое ядро может изменяться при введении

новых эмпирических зависимостей и математических уравнений для максимального учета природы протекающих процессов при непрерывной разливке стали.

В табл. 1 представлены результаты по ускорению времени машинного расчета слитка размером 140 × 140 мм (1 020 272 расчетных элементов), изготавливаемого на ОАО «Белорусский металлургический завод». Расчеты проводились с использованием 128 процессоров суперкомпьютера СКИФ. Для оценки ускорения было рассчитано 6000 тактов тепловой задачи для слитка 140 × 140 мм на кластере itk-121.bas-net.by с использованием различного количества процессов. В первой колонке таблицы представлено общее количество используемых процессов в расчетах, во второй — число процессов, задействованных в расчете. Время расчета представлено в колонке 3, ускорение — в колонке 4. Максимальное полное ускорение, достигнутое в тестовом расчете, — 72,598 раз на 128 процессах. В колонках 5–7 представлены данные по ускорению процесса моделирования — это полное время работы тестового расчета за вычетом времени первоначальных установок. Из представленных данных можно видеть, что ускорение расчета заготовок может быть увеличено практически в 72 раза при использовании 128 процессоров.

Применение мультипроцессорных вычислительных систем к решению задач кристаллизации может открыть новые возможности для анализа дендритной кристаллизации промышленной заготовки на микроуровне (размеры областей  $10^{-2} \div 10^{-4}$  м). Измельчение пространственной сетки и применение статистического распределения зародышей открывают возможности детального анализа процесса формирования межкристаллической ликвиции углерода, серы и фосфора, которые могут являться

причиной многочисленных дефектов слитка. Это все может привести к разработке программных продуктов нового поколения, позволяющих анализировать проблемы микроуровневой кристаллизации в металлических системах.

Таким образом, представленные результаты свидетельствуют, что использование мультипроцессорных технологий позволяет существенно уменьшить время моделирования технологии получения как отливок, так и заготовок. Результаты анализа данных, полученных при моделировании процессов движения, охлаждения и кристаллизации расплавленного металла, показывают, что достигается максимальное ускорение расчета на 128 процессорах кластера itk-121.bas-net.by в зависимости от геометрии объекта, его размеров, шага расчета по пространству, времени моделирования.

#### Список литературы

1. Чичко А. Н., Соболев В. Ф., Лихоузов С. Г., Лукашевич Ф. С., Лукашевич С. Ф., Хацкевич В. А. Система автоматизированного моделирования «ПроЛит-1» и опыт ее использования на Минском заводе отопительного оборудования // *Литье и металлургия*. 2004. Спецвыпуск. С. 117–123.
2. Чичко А. Н., Андрианов Н. В., Дёмин А. В., Кукуй Д. М., Соболев В. Ф., Яцкевич Ю. В., Чичко О. И. Компьютерное моделирование на основе программы «ПроНРС-2» продольных напряжений в слитке, охлаждаемом плоскофакельными форсунками // *Литье и металлургия*. 2004. № 2. С. 10–18.
3. Чичко А. Н., Маточкин В. А., Соболев В. Ф., Дёмин А. В., Чичко О. И. Клеточно-автоматное моделирование влияния скорости разливки на рост твердой фазы круглого слитка внутри кристаллизатора // *Энергетика*. 2006. № 2. С. 53–58.