



The influence of number of the multinuclear computer system SKIF processes on acceleration and period of modeling of metal filling and crystallization process in industrial molds is shown. The data are presented on the basis of calculations of the modeling system "Prolit-1c" of several industrial castings produced at OAO "MZOO".

А. Н. ЧИЧКО, С. Г. ЛИХОУЗОВ, В. Ф. СОБОЛЕВ, О. А. САЧЕК, О. И. ЧИЧКО, БНТУ

УДК 669.27:519

КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА «ПРОЛИТ-1С» ПОД СУПЕРКОМПЬЮТЕР «СКИФ» ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОЦЕССА ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВА В ПРОМЫШЛЕННЫХ ФОРМАХ

Применение компьютерного моделирования для разработки технологического процесса получения отливок является важной научно-технической задачей литейного производства. В настоящее время рынок компьютерных технологий предлагает целую группу систем моделирования (Procast, MagmaSoft, AF Solid, WinCast, 3d-Flow, ПроЛит-1, Полигон), которые различаются по методам разбиения сетки и математическим моделям. Математическое ядро этих систем является закрытым. Только сравнивая результаты промышленных или экспериментальных исследований и результаты моделирования, можно оценить адекватность "защитых" в них методов и подходов. Однако один недостаток касается всех без исключения компьютерных систем при использовании сложных по конфигурации объектов и относится к времени моделирования (счета). Время моделирования объектов зависит от числа разбиваемых элементов. Как показывает опыт работы с промышленными отливками, рассчитываемое пространство может достигать 1 000 000–5 000 000 элементов и более. С учетом дискретизации по времени полное время моделирования может достигать нескольких суток для одного варианта счета. Поэтому повышение быстродействия расчетных работ является очень актуальным вопросом как с научной, так и практической точки зрения.

Один из путей, повышающих эффективность численных методов моделирования технологических объектов, — распараллеливание процесса вычислений для многоядерных компьютеров. Многоядерные мультипроцессорные системы за счет кластерной архитектуры позволяют существенно увеличить время моделирования технологического процесса. Одной из известных мультипроцессорных систем является суперкомпьютер «СКИФ»,

который предназначен для решения вычислительных задач большой сложности. Использование возможностей этого компьютера представляет 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.

Цель настоящей работы — оценка ускорения времени моделирования заполнения форм и кристаллизации металла при использовании мультипроцессорных технологий суперкомпьютера «СКИФ».

Все исследования проводили на основе модулей компьютерной системы «ПроЛит-1с», которая разрабатывается в рамках инновационного проекта (задания) союзного государства «Россия—Беларусь» по программе «ТРИАДА» Белорусским Национальным техническим университетом (руководитель проекта А.Н. Чичко). Предполагается, что доступ к «ПроЛит-1с» через суперкомпьютер и Интернет получают промышленные предприятия обоих государств.

Компьютерная система «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 термпары. Визуализация деформаций 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 под систему LINUX.

При использовании компьютерного моделирования применительно к объектам литейного производства сложной пространственной конфигурации необходимо применять высокую размерность сетки (это миллионы сеточных элементов). Кроме того, проведение решения задач оптимизации технологии предполагает варьирование факторов технологии и размеров литниковой системы. Это все приводит к тому, что временные затраты на проведение моделирования процесса заполнения формы и кристаллизации отливки сложной пространственной конфигурации могут быть весьма значительными и затягиваться на сотни часов машинного времени. Естественный способ повышения скорости моделирования – распараллеливание процессов вычислений с использованием кластерных мультипроцессорных систем.

Таким образом, создание программного обеспечения для моделирования литейных процессов, адаптированного под мультипроцессорные технологии, – актуальная задача на сегодняшний день. Для решения этой задачи в 2005 г. были начаты работы по созданию программного обеспечения «ПроЛит-1с» под суперкомпьютер «СКИФ» для решения технологических задач литейного произ-

водства. Структура компьютерной системы (КС) «ПроЛит-1с» показана 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 *.prm, 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 времен 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 расчета значений скорости, плотности, давления и температуры;
- модуль формирования файла результатов, результаты моделирования сохраняются в процессе расчета с заданным шагом в файл результатов *.rst.

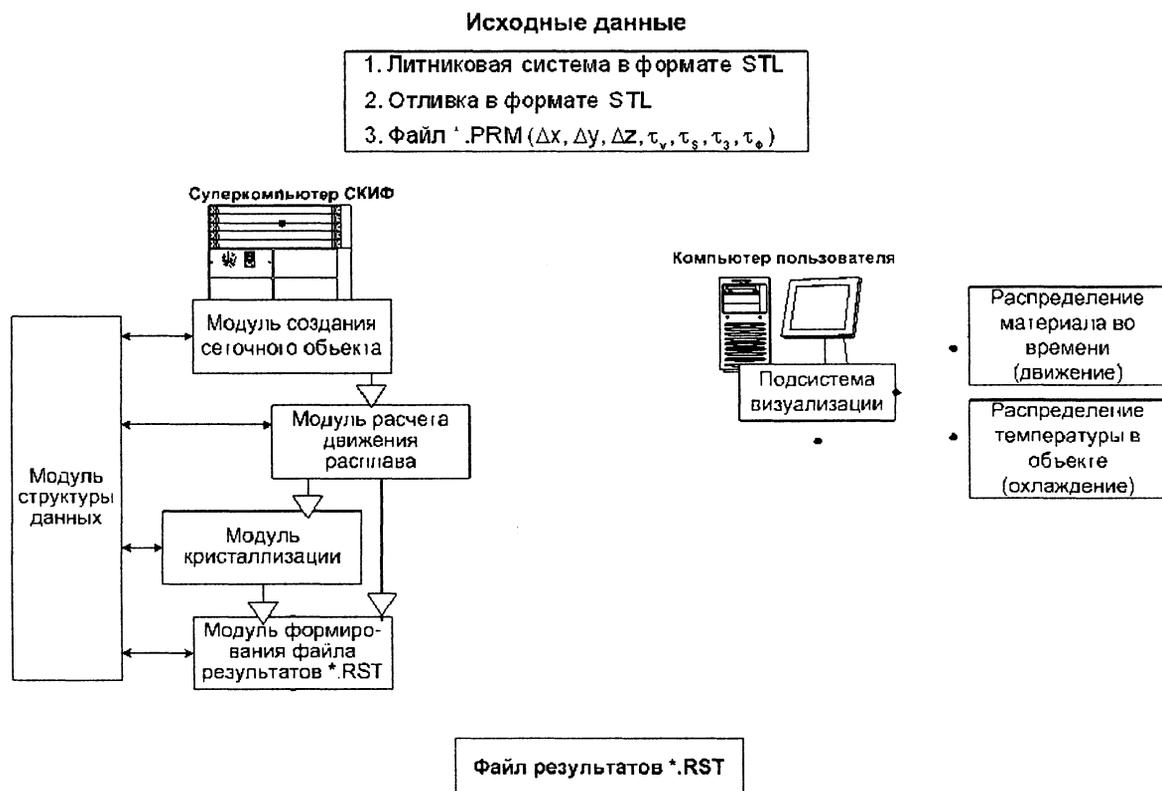


Рис. 1. Схема работы с компьютерной системой «ПроЛит-1с» для суперкомпьютера «СКИФ»

Модуль структуры данных обеспечивает комплексное взаимодействие всех модулей, предоставляет 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).

Файлы с результатами *.rst передаются с помощью технологий Интернет на локальный компьютер пользователя, где могут быть просмотрены, используя визуализатор (подсистемы трехмерной визуализации), с помощью технологии OpenGL. Пользователь может с помощью этой подсистемы 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 охлаждения и структурных превращениях.

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 любой сохраненный момент движения расплава, просматривая кадры в ручном режиме;
- 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 проверки адекватности расчетов движения металла в форме на основе разработанных моделей с использованием кластерных мультипроцессорных вычислительных систем на различном числе вычислительных узлов были промоделированы процессы течения расплавов чугуна в песчано-глинистые формы с учетом номенклатуры отливок ОАО «Минский завод отопительного оборудования». В качестве объектов моделирования были выбраны отливки «Змея», «Угольник» и «Радиатор БЗ-140х300».

Отливка «Змея» является тестовой (рис. 2) и служит для проверки адекватности расчетов движения металла в форме на основе разработанных моделей. Для отливки «Змея» была специально разработана песчано-глинистая форма и проведен ряд экспериментальных заливок чугуна СЧ10. В ходе экспериментальных заливок определяли скоростные режимы и временные характеристики движения расплавов. В частности, в качестве измеряемых характеристик течения расплава использовали времена перемещения

расплава из одной заданной точки в другую. Времена движения металла в выделенных точках формы определяли с помощью микроконтроллера, регистрирующего временные промежутки, последовательно закороченной сети контактных металлических элементов.

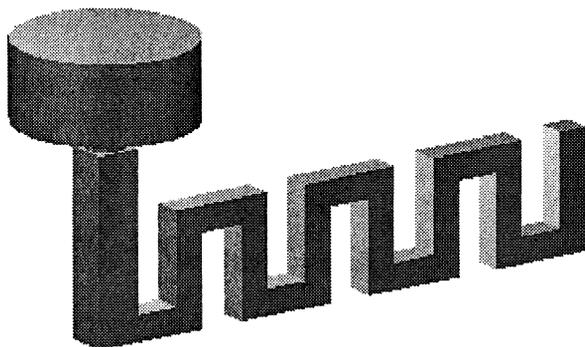


Рис. 2. Тестовый 3d-объект для моделирования отливки «Змея»

Отливки «Угольник» и «Радиатор БЗ-140х300» являются промышленными отливками, которые изготавливаются из чугуна на основе литниковой системы DISA (рис. 3, 4). Из рисунков видно, что литниковые системы с отливками имеют сложную структуру и с точки зрения литейной технологии представляют интерес для определения мест возможного появления недоливов, которые можно определить с помощью компьютерной системы «ПроЛит-1с». Геометрическая сложность структуры литниковой системы с отливками в сочетании с тонкими стенками и значительными габаритами делает проблемным по временным затратам моделирование заполнения металлом формы на персональном компьютере. Это ограничение позволяет устроить кластерные мультипроцессорные вычислительные системы.

Были рассмотрены четыре варианта, для которых в качестве начальных и граничных условий при моделировании использованы данные, приведенные в таблице.

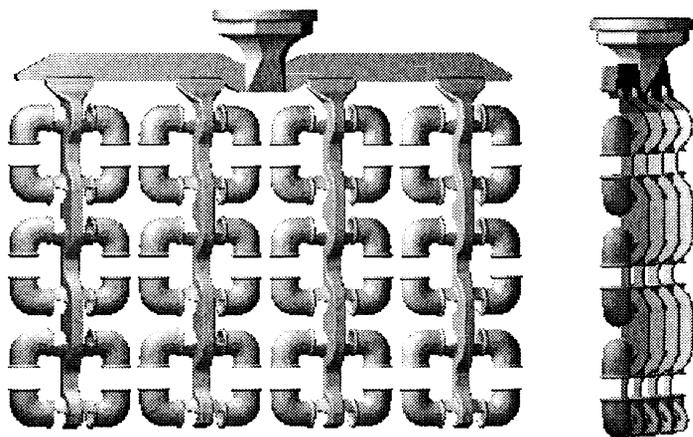


Рис. 3. Твердотельные 3d-модели отливки «Угольник»

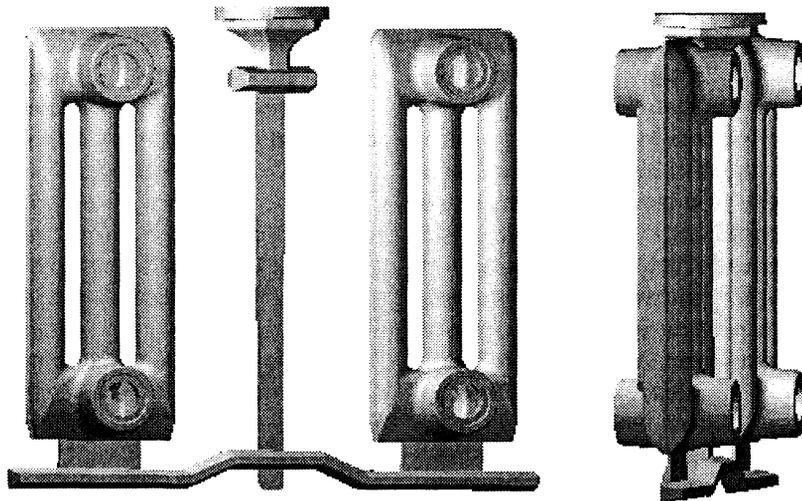


Рис. 4. Твердотельные 3d-модели отливки «Радиатор БЗ-140x300»

Некоторые характеристики процесса моделирования литейных объектов

Вариант	Отливка	Характеристика расчетной модели		Характеристика металла			
		шаг по пространству, м	число расчетных элементов	марка чугуна	химический состав, %	температура ликвидуса, °С	температура солидуса, °С
1	«Змея»	0,002	187 960	СЧ10	C – 3,6 Si – 2,4 Mn – 0,65 P – 0,2 S – 0,15	1238	1145
2	«Угольник»	0,002	418 867	КЧ30-6	C – 2,8 Si – 1,1 Mn – 0,45 P – 0,2 S – 0,18	1275	1145
3	«Угольник»	0,0012	1 501 522	КЧ30-6	C – 2,8 Si – 1,1 Mn – 0,45 P – 0,2 S – 0,18	1275	1145
4	«Радиатор БЗ-140x300»	0,002	446 523	СЧ10	C – 3,6 Si – 2,4 Mn – 0,65 P – 0,2 S – 0,15	1238	1145

В расчетах были приняты – температура металла 1400 °С, начальная температура формы 30 °С. В качестве теплофизических характеристик металла и формы использовали теплопроводность и теплоемкость как функцию температуры $f(T)$.

Выбранные для моделирования с использованием кластерных мультипроцессорных вычислительных систем отливки «Змея», «Угольник» и «Радиатор БЗ-140x300» рассчитывали на различном числе вычислительных узлов (от 2 до 128 процессоров) кластера itk-121.bas-net.by. По окончании моделирования проводили оценку времени, затраченного на расчет и ускорение расчета по сравнению с базовым (расчет на двух процессорах). Результаты проводимой оценки приведены на рис. 5–8. Следует отметить, что при расчете на N процессорах собственно в моделировании уча-

ствует $N - 1$ процессор, поскольку один процессор занят сервисным обслуживанием распараллеливания, в частности подготовкой структуры данных для следующего такта расчета, сохранением результатов расчета в файлы записи RST и т.д.

Из рисунков видно, что достигается максимальное ускорение расчета от 29 до 40 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 элементов по процессорам вызвана различиями в геометрии отливок. Так как заранее неиз-

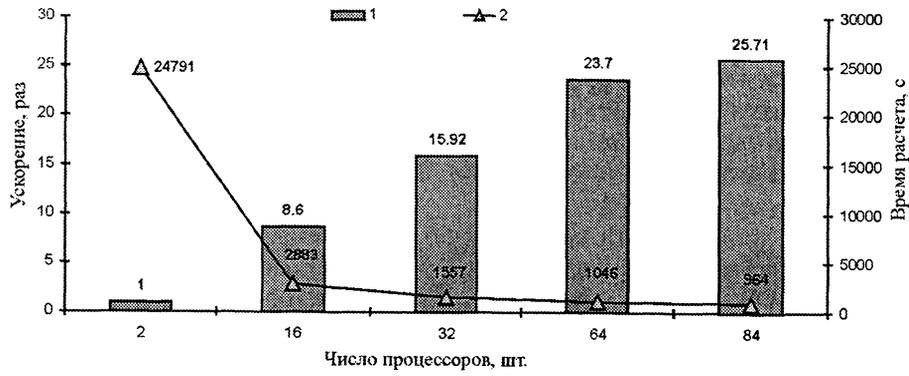


Рис. 5. Влияние числа процессоров на ускорение и время моделирования для отливки «Змея» (вариант 1): 1 – зависимость ускорения по сравнению с базовым от числа процессоров; 2 – зависимость времени расчета от числа процессоров

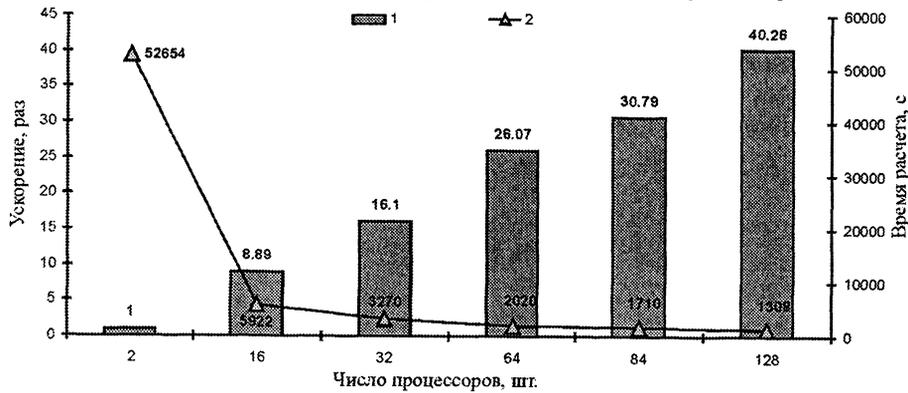


Рис. 6. Влияние числа процессоров на ускорение и время моделирования для отливки «Угольник» (число расчетных элементов 418 867, вариант 2): 1 – зависимость ускорения по сравнению с базовым от числа процессоров; 2 – зависимость времени расчета от числа процессоров

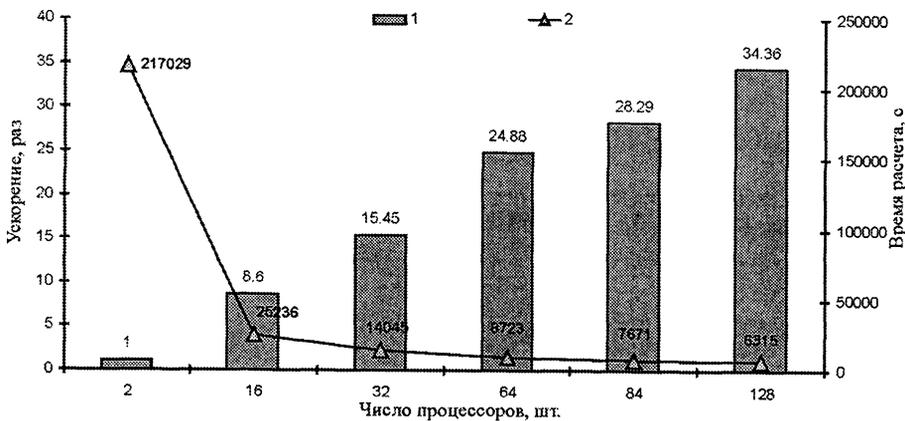


Рис. 7. Влияние числа процессоров на ускорение и время моделирования для отливки «Угольник» (число расчетных элементов 1501522, вариант 3): 1 – зависимость ускорения по сравнению с базовым от числа процессоров; 2 – зависимость времени расчета от числа процессоров

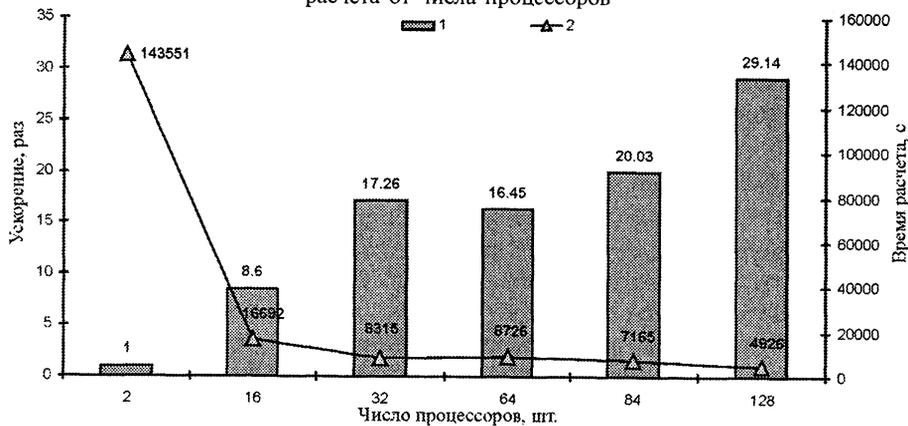


Рис. 8. Влияние числа процессоров на ускорение и время моделирования для отливки «Радиатор» (вариант 4): 1 – зависимость ускорения по сравнению с базовым от числа процессоров; 2 – зависимость времени расчета от числа процессоров

вестно 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 разных отливок.

На рис. 9, 10 приведены данные по влиянию числа процессоров на ускорение и время моделирования процесса заполнения и кристаллизации металла в различных формах. Следует отметить, что зависимость ускорения времени расчета от числа процессоров неодинакова для разного числа процессоров. Например, для числа процессоров до 32 зависимость носит одинаковый линейный характер для всех четырех случаев (рис. 9). Общий вид зависимости ускорения от числа процессоров

имеет вид: $y=0,47x+0,16$. Если число процессоров больше 32, то зависимость имеет вид, показанный на рис. 10. Общий вид зависимости ускорения от числа процессоров в этом случае имеет вид: $y=0,19x+10,81$. Во втором случае (если число процессоров больше 32) при увеличении числа процессоров ускорение растет более чем в 2 раза медленней. Это объясняется особенностями рассчитываемого пространства, в котором протекает моделируемый процесс.

На рис. 11, 12 представлены фрагменты заполнения отливок «Угольник» и «Радиатор БЗ-140х300», полученные на персональном компьютере из файла записи результатов моделирования RST с помощью специально разработанной системы визуализации. Файл RST был сформирован на этапе моделирования отливок на суперкомпьютере и затем перекачан на персональный компьютер с помощью сети Интернет. На рисунках можно видеть области синего цвета (воздух), красного цвета (жидкий металл) и коричневого



Рис. 9. Зависимость ускорения моделирования от числа процессоров (2–32шт.) для отливок: 1 – Вариант 1 («Змея»); 2 – Вариант 2 («Угольник»); 3 – Вариант 3 («Угольник»); 4 – Вариант 4 («Радиатор»); 5 – общая линия тренда

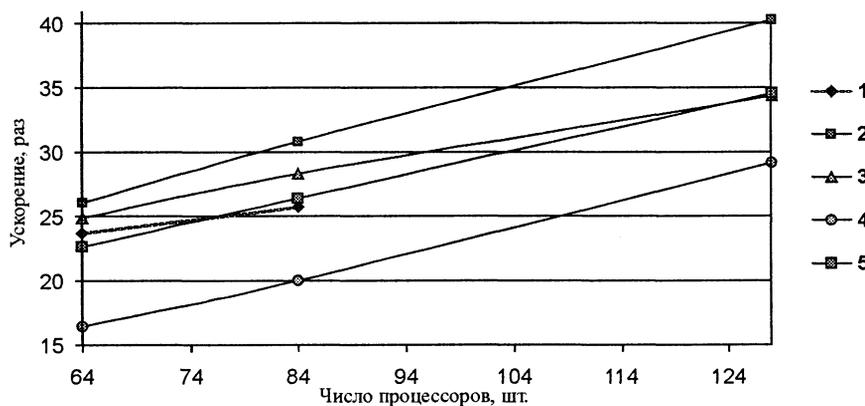


Рис. 10. Зависимость ускорения моделирования от числа процессоров (64–124шт.) для отливок: 1 – вариант 1 («Змея»); 2 – вариант 2 («Угольник»); 3 – вариант 3 («Угольник»); 4 – вариант 4 («Радиатор»); 5 – общая линия тренда

цвета (закристаллизованный металл). Также на рисунках приведены поля температур на поверхности отливок в момент окончания заливки. При отображении тепловых полей применяли следующую температурную шкалу: красный цвет соответствует максимальной температуре, фиолетовый – минимальной, остальные цвета соответствуют промежуточным температурам.

Таким образом, использование мультипроцессорных технологий позволяет существенно уменьшать время моделирования технологии изготовления промышленных отливок. Результаты анализа данных, полученных при моделировании процессов движения, охлаждения и кристаллизации расплавленного металла в литниковых системах и отливках, показывают, что

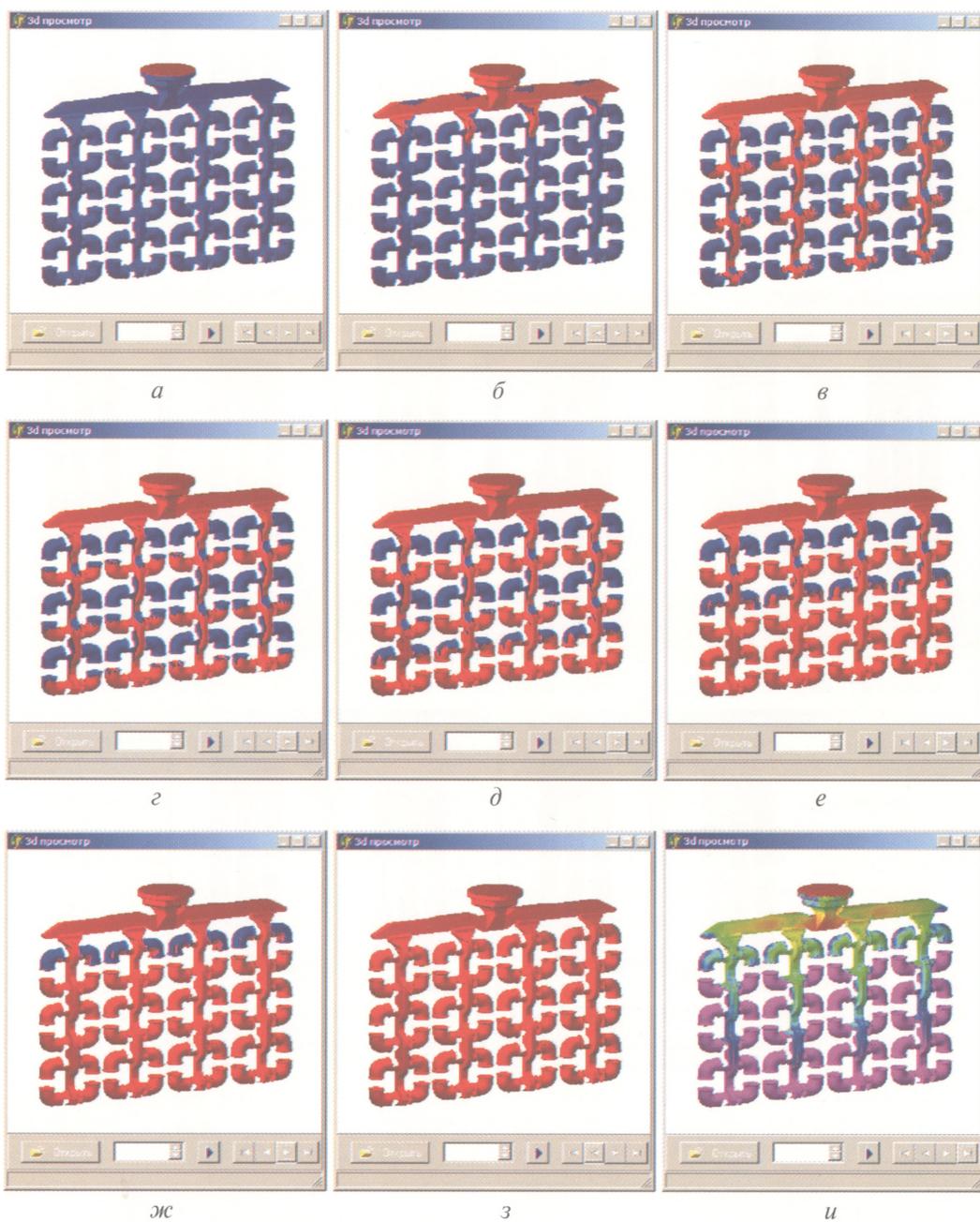


Рис. 11. Фрагмент моделирования процесса заполнения системы «литниковая система–отливка «Угольник» для интервалов: а – начальный момент времени, б – 1; в – 2; г – 3; д – 4; е – 5; ж – 6; з – 7; и – 8 с

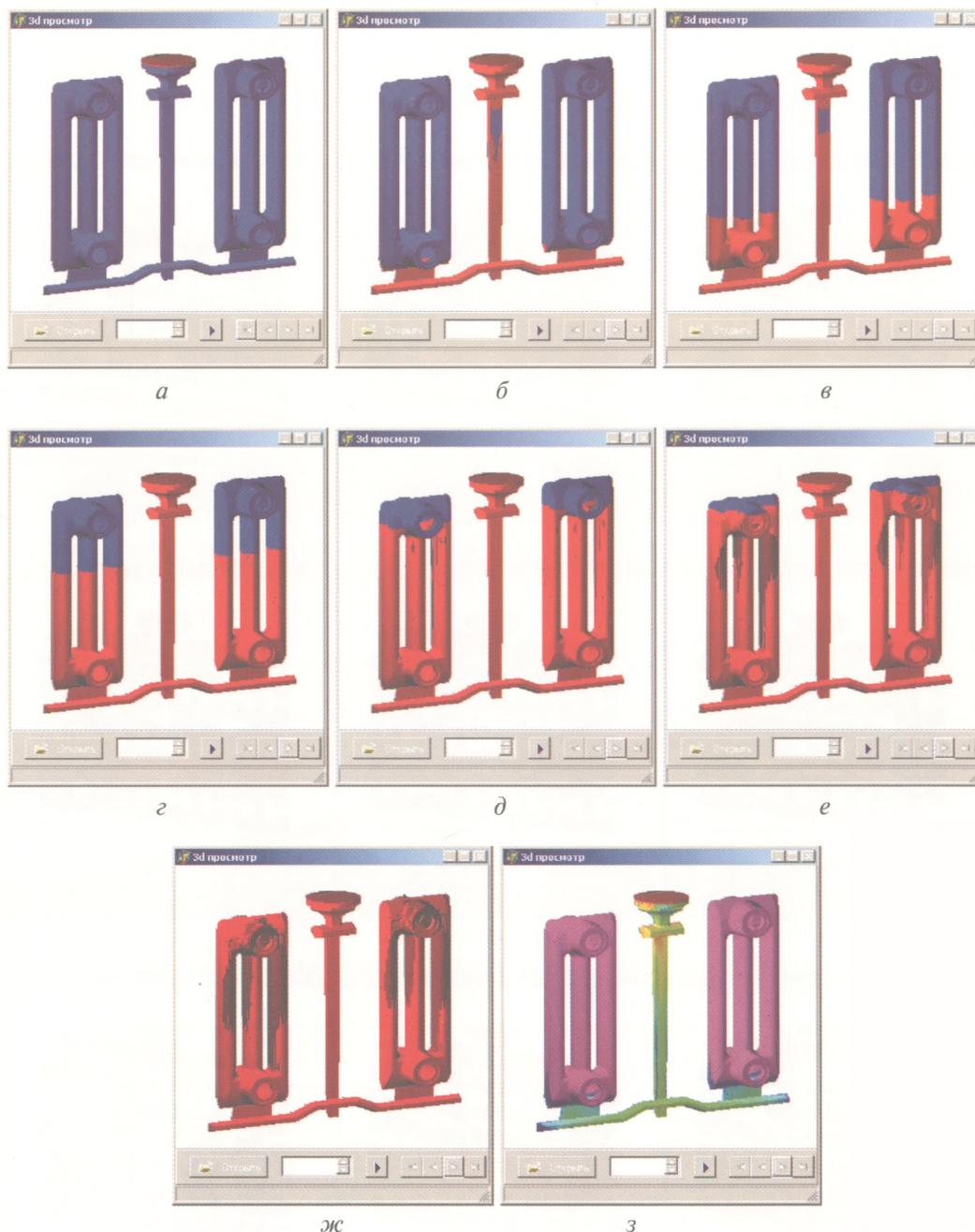


Рис. 12. Фрагмент моделирования процесса заполнения системы «литниковая система—отливка «Радиатор» для интервалов: а — начальный момент времени, б — 2; в — 4; г — 6; д — 8; е — 10; ж — 12; з — 13 с

достигается максимальное ускорение расчета от 29 до 40 раз на 128 процессорах кластера itk-121.bas-net.by в зависимости от геометрии объекта, его размеров, шага расчета по пространству, времени моделирования.

Литература

- 1 Чичко А.Н., Соболев В.Ф., Лихоузов С.Г. и др. Система автоматизированного моделирования «ПроЛит-1» и опыт ее использования на Минском заводе отопительного оборудования // Литье и металлургия. 2004. Спецвыпуск. С. 117–123.