



The data of modeling on supercomputer system SKIF of technological process of molds filling by means of computer system 'ProLIT-1c', and also data of modeling of the steel pouring process by means of 'ProNRS-1c' are presented. The influence of number of processors of multinuclear computer system SKIF on acceleration and time of modeling of technological processes, connected with production of castings and slugs, is shown.

А. Н. ЧИЧКО, Д. М. КУКУЙ, В. Ф. СОБОЛЕВ, С. Г. ЛИХОУЗОВ,
Ю. В. ЯЦКЕВИЧ, О. И. ЧИЧКО, БНТУ

УДК 669.27:519

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОД СУПЕРКОМПЬЮТЕР СКИФ «ПроЛит-1С» И «ПроНРС-1С» ДЛЯ ЛИТЕЙНОГО И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВ

Применение методов моделирования при разработке технологических процессов является одной из важнейших задач промышленного производства. Одной из причин, сдерживающих широкое применение методов численного моделирования технологических процессов в производстве, является пространственная 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. Одним из современных научных направлений, связанных с повышением производительности информационных технологий, является создание мультипроцессорных вычислительных систем. Одна из таких систем (СКИФ) была разработана в результате совместных исследований белорусских и российских ученых в Институте проблем информатики НАН Беларуси. Для создания прикладного программного обеспечения была разработана научно-техническая программа Союзного государства «Триада». Финансирование научно-технических проектов этой программы осуществляется из бюджета двух государств – России и Беларуси. Для литейного производства в рамках программы «Триада» в настоящее время выполняется проект, связанный с разработкой компьютерной системы «ПроЛит-1с». Для металлургического производства разрабатывается компьютерная система «ПроНРС-1с».

О программном обеспечении «ПроЛит-1с»

Применение компьютерного моделирования для разработки технологического процесса получения отливок – важная научно-техническая задача 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 закрыто. Только сравнивая результаты промышленных или экспериментальных исследований и результаты моделирования, можно оценить адекватность «защитных» в них методов и подходов. Однако один недостаток всех без исключения компьютерных систем при использовании сложных по конфигурации объектов – время 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 и более сеточных элементов. С учетом дискретизации по времени полное время моделирования может достигать нескольких суток для одного технологического варианта. Поэтому повышение быстродействия вычислительных работ является очень актуальным вопросом как с научной, так и практической точки зрения.

Одним из путей, повышающих эффективность численных методов моделирования технологических объектов, является распараллеливание процесса вычислений для многоядерных компьюте-

ров. Многоядерные мультипроцессорные системы за счет кластерной архитектуры позволяют существенно увеличить время моделирования технологического процесса. Одна из известных мультипроцессорных систем – 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.

В настоящее время завершается работа по созданию модулей компьютерной системы «ПроЛит-1с». Предполагается, что доступ к «ПроЛит-1с» через суперкомпьютер и Интернет получают промышленные предприятия обоих государств России и Беларуси. 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 с помощью интернет-технологии 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 «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. имита-

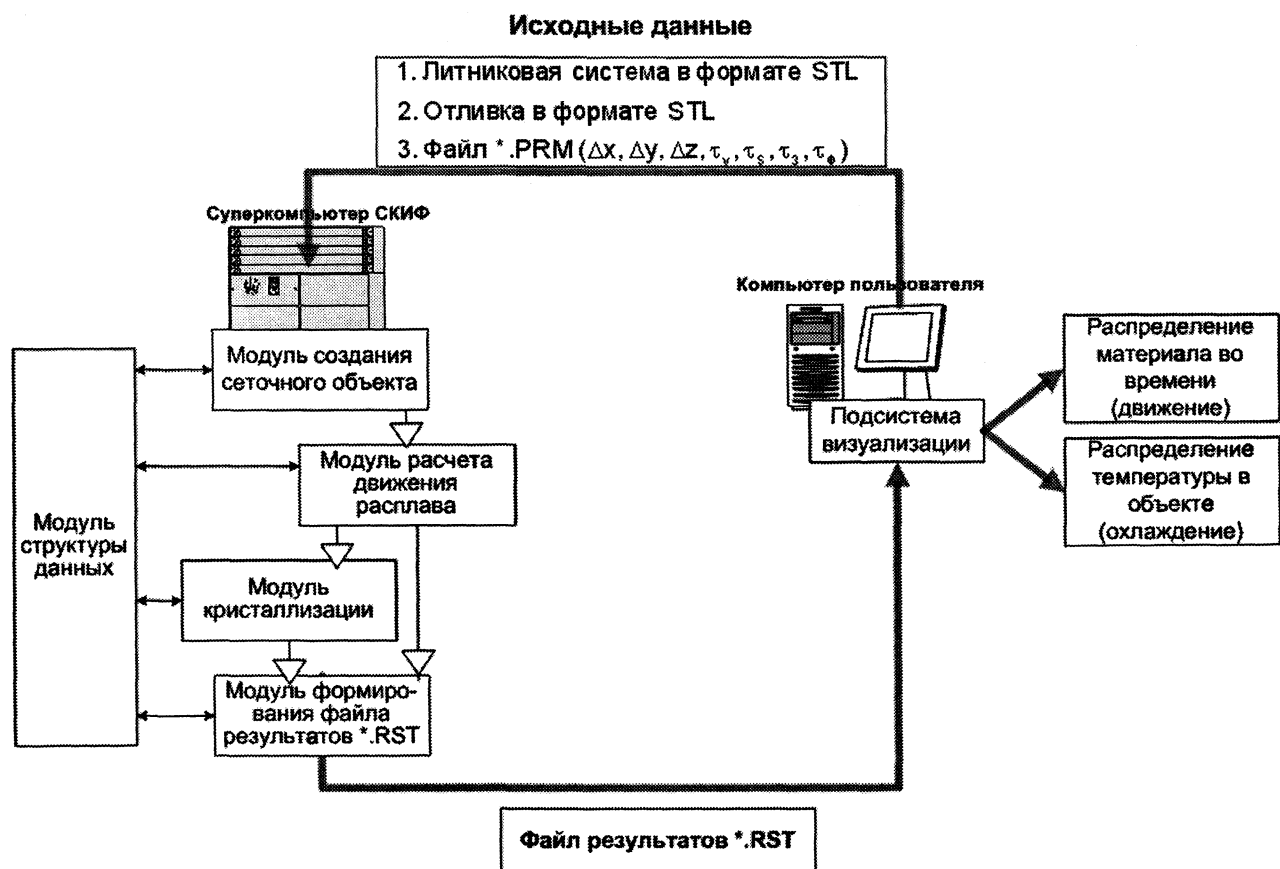


Рис. 1. Схема работы с компьютерной системой «ПроЛит-1с» для суперкомпьютера СКИФ

ция работы термомпары. Визуализация дефектов усачного 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. 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 *. prn, 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 расчета значений скорости, плотности, давления и температуры;
- модуль формирования файла результатов, результаты моделирования сохраняются в процессе расчета с заданным шагом в файл результатов *. rst.

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 при помощи визуализатора (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 охлаждении 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 иллюстрации возможностей программы «ПроЛит-1с» ниже приведены данные расчета процесса заполнения чугуном песчано-глинистых форм. В качестве объектов моделирования были выбраны отливки «Угольник» и «Радиатор БЗ-140х300» (номенклатура Минского завода отопительного оборудования), которые изготавливаются из чугуна на основе литниковых систем (рис. 2, 3).

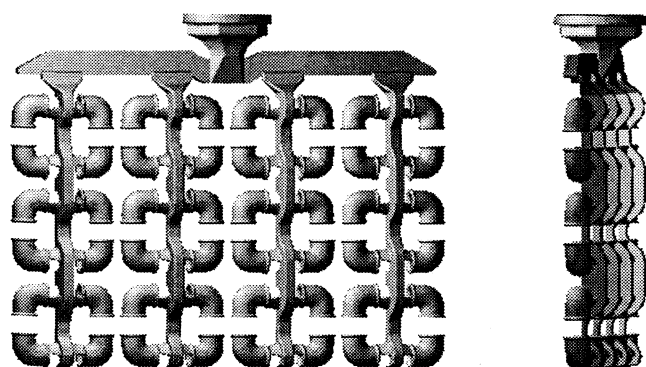


Рис. 2. Твердотельные 3d-модели «Угольник»

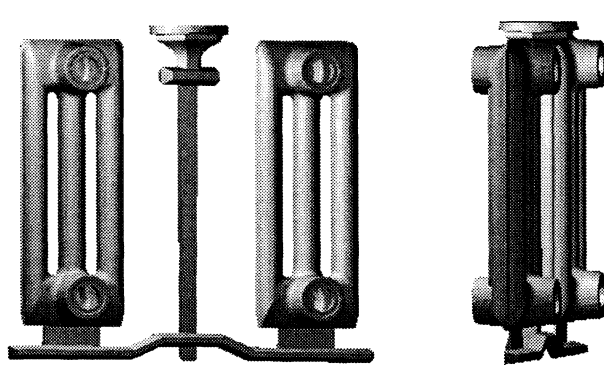


Рис. 3. Твердотельные 3d-модели «Радиатор БЗ-140х300»

Таблица 1. Некоторые характеристики процесса моделирования литейных объектов

Вариант	Отливка	Характеристики расчетной модели		Характеристики металла			
		шаг по пространству, м	число расчетных элементов	марка	химический состав, %	температура ликвидуса, °С	температура солидуса, °С
1	«Угольник»	0,002	418 867	Ковкий чугун КЧ30-6	C – 2,8 Si – 1,1 Mn – 0,45 P – 0,2 S – 0,18	1275	1145
2	«Угольник»	0,0012	1 501 522	Ковкий чугун КЧ30-6	C – 2,8 Si – 1,1 Mn – 0,45 P – 0,2 S – 0,18	1275	1145
3	«Радиатор БЗ-140х300»	0,002	446 523	Серый чугун СЧ10	C – 3,6 Si – 2,4 Mn – 0,65 P – 0,2 S – 0,15	1238	1145

Из рисунков видно, что литниковые системы с отливками представляют собой сложную пространственную структуру и с точки зрения литейной технологии представляет интерес определение мест возможного появления недоливов. 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 устранить кластерные мультипроцессорные вычислительные систе-

мы. В табл. 1 приведены некоторые исходные данные для проведения расчетов на суперкомпьютере СКИФ.

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 «Угольник» и «Радиатор БЗ-140х300» рассчитывали на различном числе

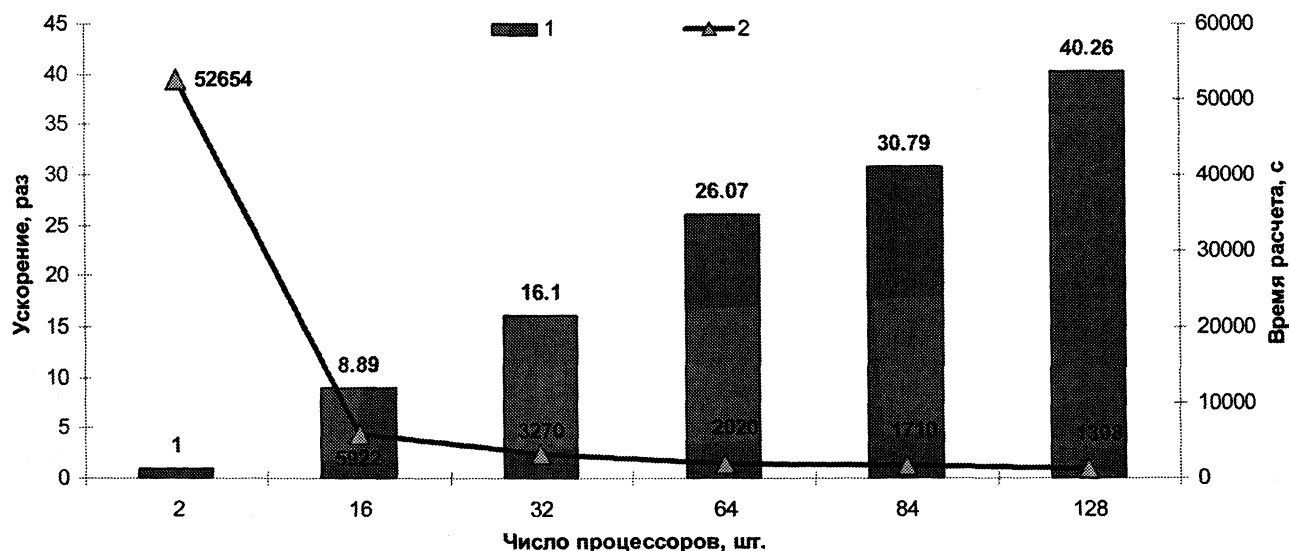


Рис. 4. Влияние числа процессоров на ускорение и время моделирования для отливки «Угольник» (число расчетных элементов 418 867, вариант 1): 1 – зависимость ускорения по сравнению с базовым от числа процессоров; 2 – зависимость времени расчета от числа процессоров

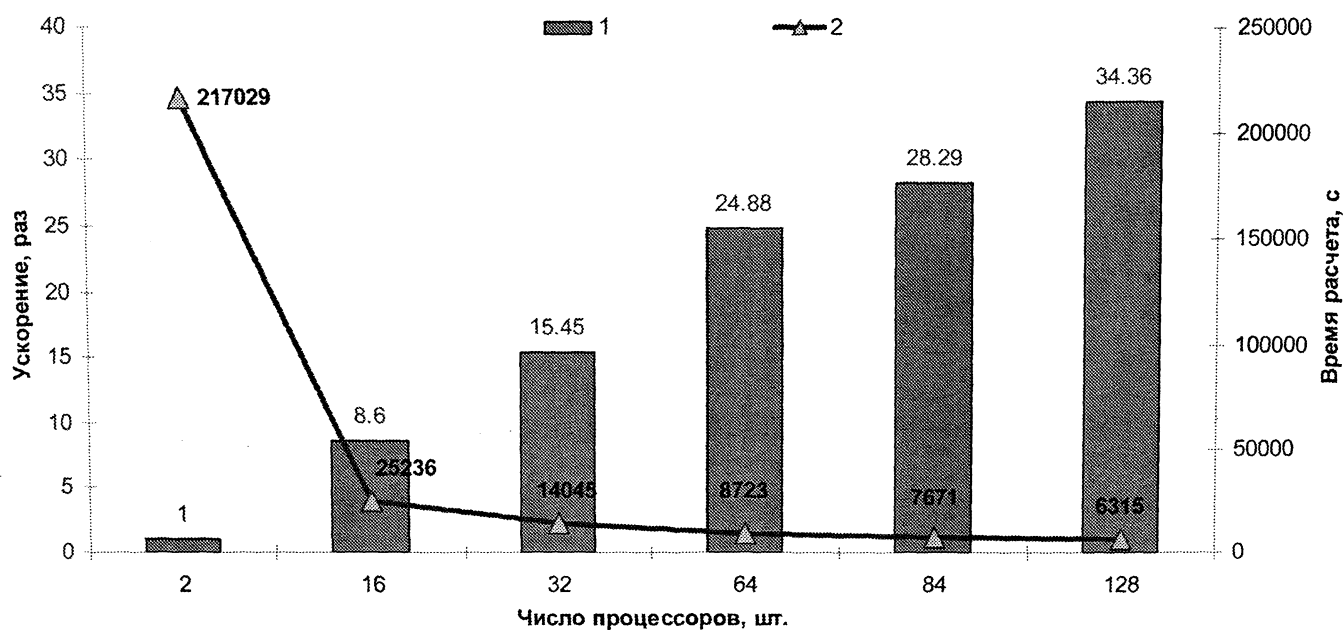


Рис. 5. Влияние числа процессоров на ускорение и время моделирования для отливки «Угольник» (число расчетных элементов 1501522, вариант 2): 1 – зависимость ускорения по сравнению с базовым от числа процессоров; 2 – зависимость времени расчета от числа процессоров

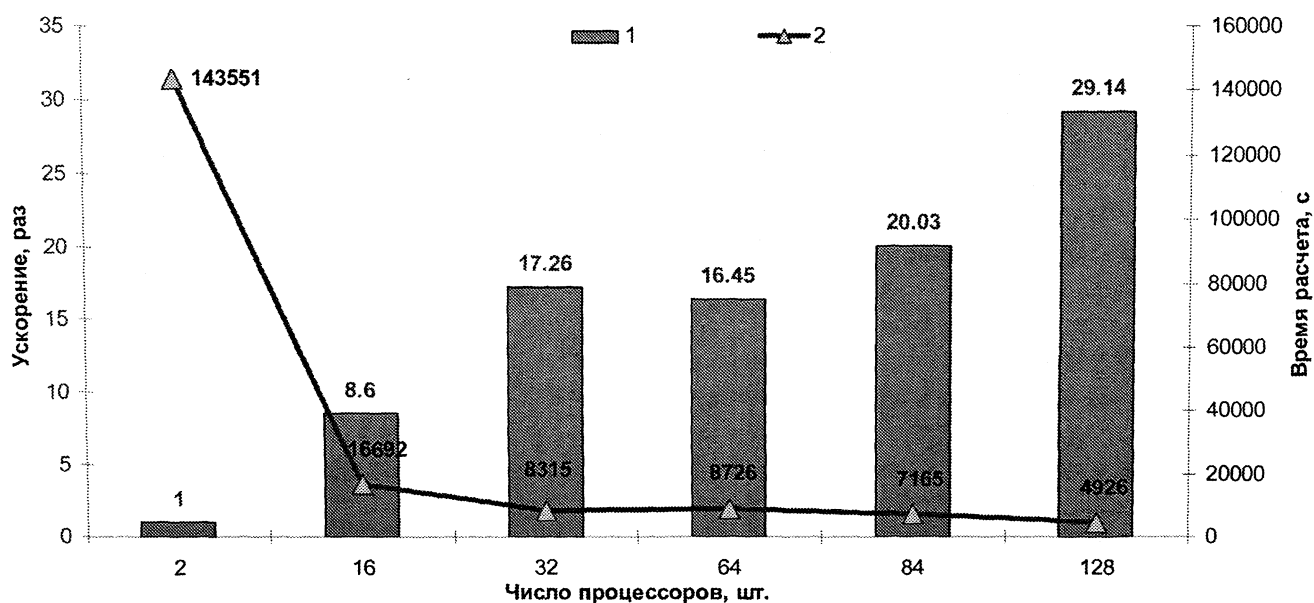


Рис. 6. Влияние числа процессоров на ускорение и время моделирования для отливки «Радиатор» (вариант 3): 1 – зависимость ускорения по сравнению с базовым от числа процессоров; 2 – зависимость времени расчета от числа процессоров

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. 4–6. Следует отметить, что при расчете на N процессорах собственно в моделировании участвует $N-1$ 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 при использовании суперкомпьютера СКИФ 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

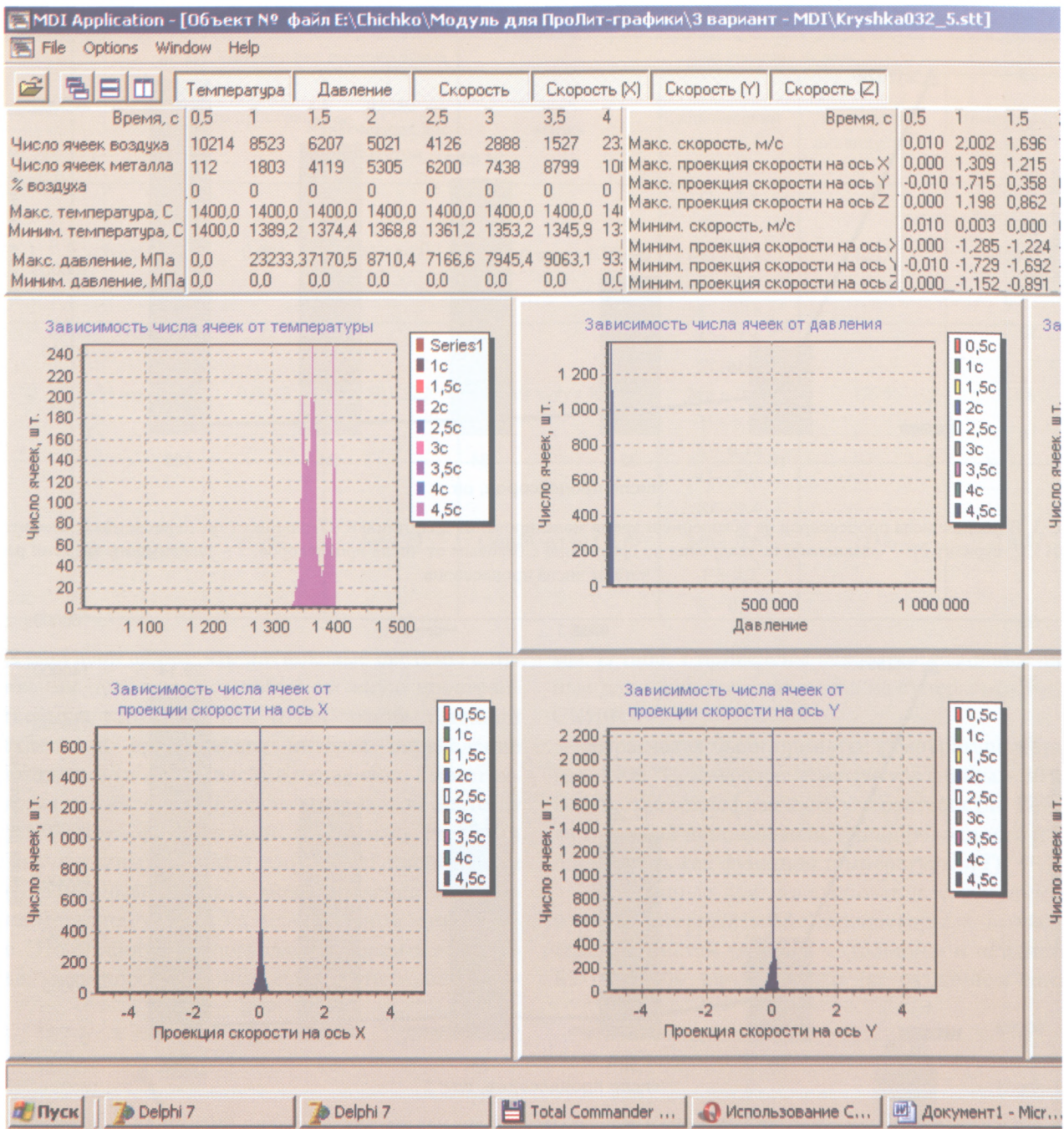


Рис. 7. Общий вид конечного протокола, содержащего результаты моделирования технологического процесса

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 разное количество металла, что и приводит к колебаниям данных по ускорению расчета на одинаковом количестве процессоров для различных отливок.

Программное обеспечение «ПроЛит-1с» под суперкомпьютер СКИФ модифицировано в сравнении с «ПроЛит-1». В «ПроЛит-1с» рассчитывается не один, а несколько вариантов технологи-

ческого процесса. В результате по каждому варианту расчета выводится протокол (рис. 7), который включает распределения по температурам и скоростям объекта моделирования. С помощью разработанных критериев, рассчитанных для каждого варианта, технолог может выбрать оптимальный вариант для разработки технологической оснастки.

О программном обеспечении «ПроНПС-1с»

Одной из важнейших задач металлургического производства является задача оптимизации температурно-временных режимов разлива стали. Из-

вестно, что качество литой заготовки, получаемой в машинах непрерывной разливки сталей, в значительной степени зависит от скорости разливки, условий охлаждения в кристаллизаторе и зонах вторичного охлаждения, химического состава стали, а также от ее пластических свойств. Все перечисленные выше факторы влияют на качество получаемого слитка. Образующиеся при этом дефекты, такие, как ликвация по углероду, продольные и поперечные трещины, усадочные дефекты заготовки в значительной степени зависят от процесса кристаллизации заготовки в машинах непрерывной разливки стали.

Одним из эффективных путей повышения качества непрерывнолитой заготовки является управление процессом кристаллизации стали на основе температурных режимов первичного и вторичного охлаждения в машине непрерывного литья заготовки (МНЛЗ) и варьирование скоростей разливки. Основу задач управления процессом кристаллизации составляют математические модели процессов охлаждения и кристаллизации литой заготовки в МНЛЗ. Задача кристаллизации промышленной заготовки – сложнейшая в теории металлургических процессов. В полной постановке она включает в себя систему уравнений Навье–Стокса, уравнение для энергии, уравнение неразрывности, описывающие движение металла, уравнение теплопроводности, описывающее процесс охлаждения металла с учетом различных функций, учитывающих кристаллизацию, а также уравнение диффузии, позволяющее рассматривать распределение элементов в различных фазах. Моделируя процессы течения расплава и его кристаллизацию, можно определять температурное поле слитка и его фазовое состояние в пространстве и во времени. При этом должна учитываться динамика процесса разливки стали на различных участках кристаллизующегося слитка, где происходят переходы из жидкого в жидко-твердое и твердое состояния. Следует отметить, что, несмотря на фундаментальный характер задач математического моделирования процесса кристаллизации слитка, целый ряд теоретических и практических вопросов, особенно касающихся разработки алгоритмов и программного обеспечения, не решен до сих пор.

Одной из важнейших характеристик процесса разливки слитка в машине непрерывного литья заготовок является задача расчета длины жидкой фазы. На длину жидкой фазы слитка влияют условия охлаждения, скорость движения слитка, температура разливки, марка стали и другие технологические характеристики. В зависимости от того, где заканчивается жидкая фаза в МНЛЗ, выбира-

ется положение тянущих роликовых механизмов. Это связано с пластическими свойствами слитка, которые различаются в зависимости от соотношения и протяженности жидкой и твердой фаз стали. Поэтому определение длины жидкой фазы является главным вопросом при разработке технологии получения слитков. Существующие методы оценки длины жидкой фазы в движущемся слитке основываются на полуэмпирических зависимостях и не позволяют учесть при расчете размеры зон вторичного охлаждения и изменения коэффициентов теплоотдачи в пространстве слитка. В то же время компьютерное моделирование кристаллизации слитка в трехмерном случае позволяет определить протяженность длины жидкой фазы в зависимости от пространственного положения зон вторичного охлаждения, размеров кристаллизатора, а также размеров воздушных прослоек по всей длине слитка.

В связи с этим построение математической модели процесса непрерывной разливки стали, учитывающей распределение температур и углерода, и компьютерная реализация ее, позволяющая рассчитывать кристаллизацию для конкретной МНЛЗ, является одной из важнейших задач, имеющих как научное, так и практическое значение. Математическая сторона этого вопроса частично описана в работах [2–12].

Необходимость применения мультипроцессорных вычислительных систем для решения задач математического моделирования процесса кристаллизации стали связана с большой размерностью сетки моделируемого объекта. Это приводит к тому, что моделирование процесса разливки сталей в реальной МНЛЗ (длина слитка может достигать 20–30 м) может затягиваться на сотни часов машинного времени. Современные методы расчета, основанные на численных методах, позволяют рассчитывать слитки длиной 20–30 м и сечением 250×300 мм с дискретностью клетки размером 10 мм, что позволяет использовать $20000 \times 250 \times 300 / 10 \times 10 \times 10 = 1\,500\,000$ сеточных элементов. Время расчета для одного варианта составляет приблизительно 10 ч. Несложно подсчитать, что увеличение точности до 1 мм увеличивает число клеток до $20000 \times 250 \times 300 / 1 \times 1 \times 1 = 1\,500\,000\,000$ клеток. Затраты компьютерного времени составят приблизительно $10 \times 10 \times 10 \times 10$ ч = 416 сут. Отсюда видно, что для компьютерного моделирования необходим суперкомпьютер. Пространственная сложность объекта приводит к сложным граничным условиям по группе параметров моделирования, которые связаны между собой системами уравнений теплопроводности и уравнений переноса: Оптимизация

технологических вариантов должна проводиться в широких интервалах варьирования как по физическим параметрам материалов, так и по пространственной конфигурации элементов МНЛЗ, что также требует больших затрат машинного времени.

Динамический пересчет сетки на каждом шаге итерации делает время выполнения этого шага критическим для работы всей компьютерной системы. Естественный способ повышения скорости расчетов в этом случае – распараллеливание процессов вычислений и реализация этой процедуры на суперкомпьютере.

Анализ отечественных и зарубежных научно-технических журналов показал, что статей, связанных с разработкой программного обеспечения на основе кластерных мультипроцессорных вычислительных систем в применении к моделированию процесса кристаллизации промышленных заготовок в машинах непрерывной разливки сталей, практически нет. Причиной этого является специфичность процессов, протекающих в машинах непрерывной разливки сталей, и недостаточная развитость математического обеспечения по процессам кристаллизации сталей, особенно в контексте протекания структурных превращений в условиях многоступенчатой неравновесной кристаллизации.

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 теплот кристаллизации. Математическое ядро может изменяться, дополняясь новыми эмпирическими зависимостями и математическими уравнениями, которые можно вводить, чтобы изменять модель и максимально учитывать природу протекающих процессов при непрерывной разливке стали. Одно из важнейших достоинств разрабатываемой математической модели кристаллизации промышленных заготовок – учет пространственной конфигурации кристаллизатора, размеров зон вторичного охлаждения. Клеточный автомат, в котором моделируется процесс, представляет собой неравномерную сеточную структуру, элементы которой являются различными материалами (расплав, воздух, кристаллизатор и т. д.). Связь между элементами пространственной структуры непрерывно-

литой заготовки задается в виде конечно-разностных аппроксимаций и является приближением используемых дифференциальных уравнений.

Входными характеристиками программы будут размеры слитка, коэффициенты теплоотдачи в зонах охлаждения МНЛЗ, скорость слитка, шаг изменения по пространству и времени, характеристики свойств сталей, геометрические размеры различных зон МНЛЗ. Выходными характеристиками программного обеспечения будут температурное поле промышленной заготовки для различных временных промежутков, длина жидкой фазы, формирующаяся в процессе кристаллизации, температура в области раскроса.

Основным оптимизационным параметром при проведении моделирования процесса кристаллизации служит длина жидкой фазы кристаллизующейся стали. Следует учитывать, что оптимизация даже по одному параметру (длина жидкой фазы слитка) технологического процесса разливки требует выполнения большого количества расчетов, так как число варьируемых параметров равняется как минимум восьми (размеры и расход воды в кристаллизаторе и трех зонах охлаждения). Если учесть нелинейный характер влияния расходов воды на процесс кристаллизации промышленной заготовки и ввести дополнительные зоны охлаждения в МНЛЗ, то число варьируемых параметров может существенно увеличить число моделируемых вариантов разливки стали. Это делает необходимым привлечение огромных вычислительных ресурсов, которые может обеспечить только суперкомпьютер.

Применение мультипроцессорных вычислительных систем к решению задач кристаллизации может открыть новые возможности для анализа дендритной кристаллизации промышленной заготовки на микроуровне (размеры областей 10^{-2} – 10^{-4} м). Измельчение пространственной сетки и применение статистического распределения зародышей открывают возможности детального анализа процесса формирования межкристаллической ликвации углерода, серы и фосфора, которые могут быть причиной многочисленных дефектов слитка. Это все может привести к разработке программных продуктов нового поколения, позволяющих анализировать проблемы микроуровневой кристаллизации в металлических системах.

В табл. 2 приведены результаты по ускорению времени машинного расчета слитка размером 140×140 мм (1020 272 расчетных элементов). Расчеты проводили с использованием 128 процессоров суперкомпьютера СКИФ. С целью оценки ускорения расчета было рассчитано 6000 тактов

Т а б л и ц а 2. Результаты расчета 6000 тактов тепловой задачи для слитка 140×140 (1020 272 расчетных элементов) на кластере itk-121. bas-net. by

Общее число процессов	Число процессов, задействованных в расчете	Время расчета t1, с	Ускорение	Время первоначальных установок, с	Время расчета t2, 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

тепловой задачи для слитка 140×140мм на кластере itk-121. bas-net. by с использованием различного количества процессов.

Из таблицы видно, что ускорение расчета заготовок может быть увеличено практически в 72 раза при использовании 128 процессоров.

Таким образом, использование мультипроцессорных технологий позволяет существенно уменьшать время моделирования технологии по-

лучения 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.

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.
2. Чичко А. Н. Численный послойный компьютерный анализ напряженного состояния заготовок круглого сечения / А. Н. Чичко, Н. В. Андрианов, А. В. Демин // *Литье и металлургия*. 2005. № 1. С. 61–65
3. Компьютерное моделирование динамики перемещения жидкой фазы в слитке круглого сечения, кристаллизующемся в МНЛЗ / А. Н. Чичко, Н. В. Андрианов, А. В. Демин и др. // *Литье и металлургия*. 2005. № 2. Ч. 2. С. 87–90.
4. Компьютерное моделирование на основе программы «ПроНПС-2» продольных напряжений в слитке, охлаждаемом плоскофакельными форсунками / А. Н. Чичко, Н. В. Андрианов, А. В. Демин, Д. М. Кукуй и др. // *Литье и металлургия*. 2004. № 2. С. 10–18.
5. Численное моделирование распределения температурного поля в кристаллизующемся слитке из стали 18ХГТ на основе компьютерной системы «ПроНПС» / А. Н. Чичко, Н. В. Андрианов, А. В. Демин и др. // *Литье и металлургия*. 2004. Спецвыпуск. С. 111–116.
6. Численные расчеты температур и напряжений в кристаллизующемся слитке из стали 20ХН3А размером 300×400 мм для различных условий охлаждения / А. Н. Чичко, Н. В. Андрианов, А. В. Демин и др. // *Литье и металлургия*. 2004. № 3. С. 131–135.
7. Численное моделирование напряжений вблизи поверхности в слитке круглого сечения, кристаллизующемся при круглофакельном вторичном охлаждении / А. Н. Чичко, Н. В. Андрианов, А. В. Демин и др. // *Литье и металлургия*. 2004. № 4. С. 57–63.
8. Компьютерное моделирование распределения температур на поверхности вытягиваемого слитка при дискретном характере зон вторичного охлаждения / А. Н. Чичко, А. В. Демин, Н. В. Андрианов // *Изв. вузов. Энергетика*. 2005. № 2. С. 63–68.
9. Динамика изменения температуры круглого слитка в области раскроя при его вытяжке на машине непрерывного литья заготовок малого радиуса / А. Н. Чичко, В. А. Маточкин, Д. М. Кукуй, М. А. Муриков, А. В. Демин, О. И. Чичко // *Литье и металлургия*. 2006. № 1. С. 16–22.
10. Компьютерный анализ влияния технологических факторов на образование твердой корки в кристаллизаторе при формировании круглого слитка в МНЛЗ / А. Н. Чичко, В. А. Маточкин, Д. М. Кукуй и др. // *Литье и металлургия*. 2006. № 1. С. 23–26.
11. Моделирование упругопластических деформаций при разливке стали в слитки круглого сечения / А. Н. Чичко, В. А. Маточкин, Д. М. Кукуй, М. А. Муриков, А. В. Демин // *Литье и металлургия*. 2006. № 2. Ч. 1. С. 35–38.
12. Клеточно-автоматное моделирование влияния скорости разливки на рост твердой фазы круглого слитка внутри кристаллизатора / А. Н. Чичко, В. А. Маточкин, В. Ф. Соболев и др. // *Энергетика*. 2006. № 2. С. 53–58.