УДК 681.3.012:621.1

В.П. Иващенко, Г.Г. Швачич, А.А. Шмукин

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ И ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Постановка проблемы исследований

Технологические операции, протекающие в печах и агрегатах металлургического производства, являются высокотемпературными теплофизическими процессами [1,2]. В первую очередь это технологии выплавки и разливки железоуглеродистых сплавов, нагрева, прокатки и термической обработки металлопродукции, а также вспомогательного оборудования, к которому относятся завалочные машины, ковши, чаши и др. Практика показывает, что ни интенсификация процессов металлургического производства, ни конструктивное совершенствование разнообразного металлургического оборудования не возможны без изучения и анализа явлений тепло и массообмена.

Система уравнений, описывающих подобные процессы, включает систему дифференциальных уравнений в частных производных, выражающих законы сохранения массы, импульса и энергии, уравнений диффузии для каждой компоненты в течениях многокомпонентного газа и уравнения состояния. В наиболее полной постановке такой системой уравнений являются уравнения Навье-Стокса, в различных частных случаях используются и различные упрощенные модели: уравнения Эйлера, пограничного слоя, вязкого ударного слоя и т.д. Эти уравнения содержат ряд коэффициентов, зависящих как от выбора системы координат, так и характеризующих физические свойства среды: коэффициенты вязкости, теплопроводности и диффузии. Если воспользоваться понятием эффективных коэффициентов турбулентного переноса, то общий вид уравнений сохраняется и для осредненных параметров турбулентных течений.

Кроме этого, например, для разработки рациональной технологии электротермической обработки труднодеформируемых марок стали требуются специальные меры по подготовке структурно-фазового состояния металла: исследование механизма и кинетики фазоупрочнения, определение интервала пластичности при многоциклической технологии обработки металлопроката. В этом случае к уравнениям механики сплошной среды подключаются и проблемы электродинамики – уравнения Максвелла. В результате имеемт математическую модель, состоящую из систем уравнений с очень большим числом неизвестных, решения которых находятся на грани возможностей существующих средств вычислительной техники.

К настоящему времени сложилась такая ситуация, когда решение одномерных нестационарных задач может осуществляться с точностью, достаточной для большинства технических запросов. О массовом решении трехмерных нестационарных задач на нынешнем уровне технической возможности и на базе традиционных методов, разработанных к настоящему времени, можно говорить, только учитывая следующие обстоятельства.

Во-первых, появление новых и недорогих средств коммуникации вычислительной техники стимулировало развитие новых информационных технологий (ИТ): структурного программирования; сетевых операционных систем; объектно-ориентированного программирования, систем параллельной обработки информации и т.д. Организация параллельной обработки информационных потоков, связь проблем распараллеливания с архитектурой ПЭВМ, системы параллельного программирования, методы и алгоритмы параллельных вычислений – вот те ключевые темы развития вычислительной техники на данном этапе.

Во-вторых, к настоящему времени наметились определенные тенденции по развитию вычислительных методов со сложной логической структурой, имеющих по сравнению с традиционными конечно-разностными методами более высокий порядок точности. Серьезным прогрессом в области решения многомерных пространственных задач можно считать ряд предложений, не совсем эквивалентных друг другу, но преследующих одну стереотипную цель – свести задачу трехмерного распределения области изменения переменных к последовательности схем, включающих неизвестные величины лишь в одном направлении – попеременно продольном, поперечном и вертикальном [3,4]. Заметим, что использование неявных схем при этом приводит к системам линейных

 ISSN 1562-9945

алгебраических уравнений (СЛАУ), имеющих трехдиагональную структуру. Таким образом, принятие в качестве методологической основы разностных схем расщепления, во-первых - обеспечивает экономичную и устойчивую реализацию численных моделей методом скалярных прогонок. И, во- вторых, - известно, что наибольший эффект от параллельного процессора достигается в тех случаях, когда он применяется для выполнения матричных вычислений линейной алгебры.

Статья посвящена разработке современных вычислительных математических технологий кластерного типа для приближенного решения начально-краевых задач металлургической теплофизики. Под *вычислительными математическими технологиями кластерного типа* здесь понимается совокупность вычислительных методов со сложной логической структурой, имеющих по сравнению с традиционными конечно-разностными методами более высокий уровень порядка аппроксимации. При этом вычислительные эксперименты реализуются при помощи параллельного процессора кластерного типа, что обеспечивает процедуру моделирования многомерных задач в реальном масштабе времени и существенно сокращает время проведения машинных экспериментов.

Актуальность темы исследований

В настоящее время машинное моделирование является одним из наиболее распространенных и мощных методов исследования сложных систем. В статье рассматривается класс задач, решение которых при помощи классического (последовательное) моделирования (особенность его состоит в том, что реализуется на однопроцессорном компьютере) занимает неприемлемо долгое время (недели и месяцы).

Время решения подобных задач можно существенно сократить, если для моделирования использовать многопроцессорные ЭВМ [5-7].

Для того чтобы в полной мере использовать преимущества, предоставляемые такими ЭВМ, в статье решены следующие задачи:

- сконструированы алгоритмы решения задач с учётом возможностей параллельной обработки данных несколькими процессорами одновременно;

- реализован процесс вычислений таким образом, чтобы каждый процессор использовался наиболее полно, и при этом суммарное время решения задачи стремилось к минимуму.

Проблемы, возникающие при разработке параллельных вычислительных систем, как правило, являются первостепенными и требуют глубокого изучения и исследования. Действительно, распределенное (параллельное) компьютерное моделирование охватывает весь спектр современной вычислительной техники: суперкомпьютеры, кластерные вычислительные системы, локальные и глобальные сети. Кроме того, распределенное моделирование позволяет решать задачи, требующие большого количества процессорного времени, интегрировать математические модели, которые обрабатываются на различных (в том числе и географически отдаленных) вычислительных системах.

В настоящее время в мире наблюдается стремительный рост числа многопроцессорных вычислительных систем кластерного типа и их суммарной производительности. Одновременно растет потребность в имитационных моделях сложных систем, требующих большого количества вычислительных ресурсов. Однако широкому внедрению машинного моделирования для многопроцессорных вычислительных систем препятствует отсутствие или недоступность систем распределенного моделирования. В этой связи, проблемы конструирования вычислительных кластеров, а также разработки вычислительных алгоритмов для параллельного процессора являются актуальными и первостепенными.

В связи с отмеченным, можно указать основные черты рассматриваемых в статье компьютерных технологий – параллельность и эффективность, базирующихся на современных численных методах. Параллельность вызвана необходимостью решать задачи настолько большой размерностью, что это возможно лишь на параллельных компьютерах с распределенной памятью. Распределенная память подразумевает разбиение данных на блоки, каждый из которых обрабатывается отдельным процессором, поэтому блочность алгоритмов характерна для большинства параллельных методов и технологий.

Эффективность связана с разумным распределением и использованием вычислительных ресурсов, для достижения заданной

 ISSN 1562-9945

точности расчетов минимальными вычислительными затратами, или, что равнозначно, для повышения точности расчетов на заданной вычислительной системе. Одним из самых мощных средств повышения эффективности технологии является ее адаптация к конкретной задаче.

В статье рассматриваются два вида адаптивности: адаптивное построение расщепленной математической модели и адаптация алгоритма решения дискретных задач. Таким образом, ключевыми инструментами при разработке параллельных и эффективных вычислительных технологий являются блочность и адаптивность, которые проявляются на двух основных этапах решения начально-краевых задач – построения адекватных схем расщепления и выделении независимых переменных, обеспечивающих технологичность передачи информации от границ области, и решении порожденных ими систем.

Область применения предлагаемых методов и алгоритмов включает прямые и обратные прикладные задачи металлургической теплофизики, а также параллельную дискретную обработку данных в виде графиков и картины изолиний. При этом для данных интерполяционного типа обеспечивается необходимая гладкость представления соответствующих изолиний при минимальных объемах выборки.

Цель исследования

заключается в конструировании и исследовании новых параллельных численно-аналитических методов адаптивного комплексного решения начально-краевых задач с учетом априорной информации об искомых функциях и применение этих методов к решению актуальных прикладных задач металлургического производства.

Основная часть исследований

Математическая постановка задачи

Рассмотрим решение краевой задачи Дирихле для уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial \mathrm{Y}}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \mathrm{Y}}{\partial x^2}, \; x \in [x_0, x_L], \; t \in [t_0, T] \qquad (1)$$

с начальным

$$Y_{\mid t=t_0} = \varphi(x) \qquad (2)$$

и граничными условиями

$$Y_{\mid x=x_0} = YW(t),\ Y_{\mid x=x_L} = YL(t)\,. \qquad (3)$$

Области определения искомой функции Y(t,x) в задаче (1)-(3) сопоставим сеточную область

$$\left.\begin{array}{ll} t_j = J \times Dt1, \quad j = \overline{1, M}, & Dt1 = T / M,\ M \in Z \\ x_p = p \times Dx1,\ \ p = \overline{0, 2m} & Dx1 = (x_L - x_0)/2m,\ m \in Z \end{array}\right\}, \qquad (4)$$

где введение целочисленного параметра m в топологию построения сеточных узлов по пространственной переменной x будет освещено ниже. Рассмотрим способ дискретизации задачи (1)-(3) по схеме метода прямых [3,4,8].

Конечно-разностная схема. Простейшая неявная схема по времени и центральные разности по координате x приводят к СЛАУ

$$C_p Y_{p+1,1} - Y_{p,1} + D_p Y_{p-1,1} = f_{p,1},\ \ p = \overline{1{,}2m-1}, \qquad (5)$$

где

$$\left.\begin{array}{l} C_p = D_p = \dfrac{A}{(1+2A)},\ \ A = \dfrac{\alpha}{Dx1^2} Dt1 \\ f_{p,1} = -\dfrac{YOp{,}1}{(1+2A)} \end{array}\right\}. \qquad (6)$$

Здесь сеточные функции $\mathrm{Y}_{0,1} = fW(t_j),\ \mathrm{Y}_{2m,1} = fL(t_j),$ – несут информацию о граничных условиях (3), а правые части $f_{p,1}$ – о начальных, так как сеточные функции $\mathrm{Y}O_{p,1}$ берутся с предыдущего j-1-го временного слоя. Следовательно, численный алгоритм (5),(6) является эволюционным и состоит из актов перехода от одного момента времени t_{j-1} к другому $t_j = t_{j-1} + Dt1$.

Распараллеливание СЛАУ (5),(6) при помощи перестановок (алгоритм «нечетно-четной» редукции осещен в [6].

Схема метода прямых [8]. После дискретизации уравнения (1) по временной переменной получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\mathrm{Y}''_{p+\varepsilon_{x,1}}(\varepsilon_x) - \frac{1}{A}\mathrm{Y}_{p+\varepsilon_{x,1}}(\varepsilon_x) = -\frac{1}{A}\mathrm{Y}O_{p+\varepsilon_{x,1}}(x), \qquad (7)$$

где $\mathrm{Y}O_{p+\varepsilon_{x,1}}(x)$ – известная начальная функция,

$\varepsilon_x = \dfrac{(x - x_p)}{(x_{p+1} - x_p)} \in [-1,+1]$ – нормированная пространственная переменная.

Общее решение уравнения (7) представляется в конечном виде:

$$\mathrm{Y}_{p+\varepsilon_X,1}(\varepsilon_x) = Y^*_{p+\varepsilon_x,1}(\varepsilon_x) + C_p C\eta\,\beta(\varepsilon_x) + D_p S\eta\,\beta(\varepsilon_x), \tag{8}$$

где C_p, D_p – константы интегрирования;

$Y^*_{p+\varepsilon_x,1}(x)$ – некоторое частное решение неоднородного уравнения (7);

$\beta = \sqrt{\dfrac{1}{\mathrm{A}}}$ – собственные числа характеристического уравнения.

Определив константы интегрирования C_p, D_p из условий при $\varepsilon_x = \pm 1$:

$$\mathrm{Y}_{p+\varepsilon_X,1}(\varepsilon_x)\big|_{\varepsilon_X \pm 1} = \mathrm{Y}_{p\pm 1,1}, \tag{9}$$

получим решение уравнения (7) в следующем виде:

$$\mathrm{Y}_{p+\varepsilon_X,1}(\varepsilon_x) = \Bigg\{\mathrm{Y}^*_{p+\varepsilon_X,1}(\varepsilon_x) + \frac{S\eta\,\beta(1+\varepsilon_x)}{S\eta\,\beta(2)}\left[\mathrm{Y}_{p+1,1} - \mathrm{Y}^*_{p+1,1}\right] +$$

$$+ \frac{S\eta\,\beta(1-\varepsilon_x)}{S\eta\beta(2)}\left[\mathrm{Y}_{p-1,1} - \mathrm{Y}^*_{p+1,1}\right]\Bigg\}. \tag{10}$$

Положив в (10) $\varepsilon_x = 0$, перейдем от распределенной формы решения к его дискретному аналогу в форме СЛАУ (5), но с другим функциональным наполнением:

$$\left.\begin{aligned} C_p = D_p = \frac{S\eta\beta(1)}{S\eta\beta(2)} = \frac{1}{2C\eta\beta} \\ f_{p,1} = C_p \mathrm{Y}^*_{p+1,1} - Y^*_{p,1} + D_p \mathrm{Y}^*_{p-1,1} \end{aligned}\right\}, p = \overline{1,2m-1}, \tag{11}$$

отличающегося от рассмотренного конечно- разностного метода, имеющего форму (6).

Распараллеливание СЛАУ (5) численнно-аналитическим методом прямых

Рассмотрим вариант распараллеливания СЛАУ (5) для случая , когда ее функциональное наполнение имеет вид (11), где гиперболические функции являются линейными комбинациями базисного решения двухточечной краевой задачи (7), а правые части совокупностью его частных решений. Поскольку этот алгоритм построен на точных кусочно-аналитических решениях, то эти обстоятельства должны каким-то образом способствовать процессу распараллеливания СЛАУ (5). Для реализации этой идеи предлагается использовать метод прогонок [4].

Известно, что в методе прогонок процедура прямой прогонки реализуется рекуррентно формированием двух последовательностей E_p, G_p, ($p = \overline{1,2m-1}$) по формулам:

$$E_p = \frac{C_p}{1 - D_p E_{p-1}}, \quad G_p = \frac{D_p G_{p-1} - f_{p,1}}{1 - D_p E_{p-1}}, \tag{12}$$

где старт для данной задачи обеспечивается входными параметрами

$$E_0 = 0,\ G_0 = Y_{0,1} = fW(t_j). \tag{13}$$

После завершения процедуры прямой прогонки в направлении возрастания индекса p вплоть до p=2m-1, процедура обратной прогонки выполняется по рекуррентной формуле:

$$Y_{p,1} = E_p Y_{p+1,1} + G_p \tag{14}$$

в направлении убывания индекса p от p=2m-1 до p=1. Старт этой процедуры обеспечивается выполнением условия $Y_{2m,1} = fL(t_j)$, реализующего ввод в алгоритм прогонок правого граничного условия (3).

Оказывается, что использование функционального наполнения для коэффициентов C_p, D_p и правых частей $f_{p,1}$, в форме (11), позволяет реализовать процедуру прямой прогонки в конечном виде и представить выражения для вычисления коэффициентов последовательностей E_p и G_p по формулам (12) как функций номера сеточных узлов:

$$\left.\begin{aligned} E_p &= \frac{s\eta\beta(p)}{s\eta\beta(p+1)}, \\ G_p &= \frac{1}{s\eta\beta(p+1)}\left[Y_{0,1} - \sum_{i=1}^{p} f_{i,1} s\eta\beta(i)\right] \end{aligned}\right\}, \quad p = \overline{1,2m-1}. \tag{15}$$

Именно эти обстоятельства далее позволяет подстановкой выражений по формулам (15) в рекуррентную формулу обратной прогонки (14), найти решение СЛАУ (5) в замкнутой форме относительно любого узла сеточной области (4):

 ISSN 1562-9945

$$Y_{2m-\nu,1}(\nu)=\frac{1}{s\eta\,\beta(2m)}\left\{\begin{array}{l} s\eta\,\beta(2m-\nu)\left[Y_{2m,1}-\sum\limits_{i=1}^{\nu}\frac{s\eta\,\beta(i)}{s\eta\,\beta}f_{2m-i,1}\right]+\\ +s\eta\,\beta(\nu)\left[Y_{0,1}-\sum\limits_{i=1}^{2m-1-\nu}\frac{s\eta\,\beta(i)}{s\eta\,\beta}f_{i,1}\right]\end{array}\right\},\nu=\overline{1,2m-1}, \qquad (16)$$

где гиперболические функции являются комбинациями базисных решений однородных СОДУ (7), имеющих форму двухточечных краевых задач, а комплексы $f_{p,1}=Y^*_{p+1,1}-2c\eta\beta Y^*_{p,1}+Y^*_{p-1,1}$ – совокупностью его частных решений.

Конкретизируем форму частных решений, формирующих правые части исходной СЛАУ(5) в неявном виде. Пусть начальные функции, входящие в уравнение (7), заданы квадратичными зависимостями как функции аргумента ε_x :

$$Y0_{p+\varepsilon_{x},1}(\varepsilon_x)=Y0_{p,1}+\varepsilon_x Y0_{p,2}+\varepsilon_x^2 Y0_{p,3}\,, \qquad (17)$$

где

$$\left.\begin{array}{l} Y0_{p,2}=\frac{1}{2}(Y0_{p+1,1}-Y0_{p-1,1}),\\ Y0_{p,3}=\frac{1}{2}(Y0_{p+1,1}+Y0_{p-1,1}-2Y0_{p,1})\end{array}\right\} \qquad (18)$$

центрально разностные операторы первого и второго порядка.

Легко убедиться, что функция

$$Y^*_{p+\varepsilon_x,1}(\varepsilon_x)=\left\{\left(Y0_{p,1}+2A\times Y0_{p,3}\right)+\varepsilon_x Y0_{p,2}+\varepsilon_x^2 Y0_{p,3}\right\} \qquad (19)$$

удовлетворяет тождественно дифференциальному уравнению (7) и, следовательно, является его частным решением.

Учитывая особенности вычисления гиперболических функций, входящих в решение (16), приведем его к виду

$$Y_{2m-\nu,1}(\nu)=\left\{\begin{array}{l}\left[\ell^{-\beta\nu}\frac{\bar{s\eta}\beta(2m-1)}{\bar{s\eta}\beta(m)}YL(t_j)+\ell^{-\beta(2m-\nu)}\frac{\bar{s\eta}\beta(\nu)}{\bar{s\eta}\beta(m)}YW(t_j)\right]-\\ -\left[\begin{array}{l}\frac{\bar{s\eta}\beta(2m-\nu)}{\bar{s\eta}\beta(2m)}\sum\limits_{i=1}^{\nu}\ell^{-\beta(\nu-i)}\bar{f}_{2m-i,1}\frac{\bar{s\eta}\beta(i)}{\bar{s\eta}\beta}+\\ +\frac{\bar{s\eta}\beta(\nu)}{\bar{s\eta}\beta(2m)}\sum\limits_{i=1}^{2m-1-\nu}\ell^{-\beta[\,2m-(\nu+i)\,]}\bar{f}_{i,1}\frac{\bar{s\eta}\beta(i)}{\bar{s\eta}\beta}\end{array}\right]\end{array}\right\},\nu=\overline{1,2m-1}, \qquad (20)$$

где приняты следующие обозначения:

$$\left.\begin{array}{l}\bar{f}_{p,1}=(Y^*{}_{p+1,1}+Y^*{}_{p-1,1})\ell^{-\beta}-2\bar{c\eta}\,\beta\times Y^*{}_{p,1}\,,\\ \left\{\begin{array}{c}\bar{c\eta}b\\ \bar{s\eta}b\end{array}\right\}=\frac{1}{2}(1\pm\ell^{-2b}),\quad b>0\end{array}\right\}. \qquad (21)$$

Таким образом, алгоритм (20), (21) абсолютно устойчив для любых входных данных, имеет максимальную параллельную форму и, следовательно, минимально возможное время его реализации на $\nu = \overline{1,2m-1}$ параллельных вычислительных устройствах. Если можно назначить один процессор на один узел расчета, то становится возможным проведение расчетов во всех узлах сеточной области параллельно и одновременно.

Процесс моделирования освещаемого класса задач реализован при помощи вычислительного кластера.

Особенности конструирования вычислительного кластера

Конструктивно вычислительный кластер представляет собой вычислительную систему, построенную из стандартных вычислительных узлов, объединенных быстродействующей низколатентной (малоинерционной) компьютерной сетью. Заметим, что при освещении вопросов конструирования и применения вычислительных кластеров часто рассматривают понятие латентности. Под латентностью здесь понимают время самого простого взаимодействия узлов кластера через коммуникационную среду. Эти понятия вводятся для оптимизации сетевых взаимодействий.

Практическая реализация вычислительного кластера предполагает наличие главного (управляющего, MASTER) узла и некоторых подчиненных (SLAVE) вычислительных узлов. Как правило компиляция и сборка исполняемых кодов программ осуществляется MASTER-машиной, инициирующей соответствующие вычислительные процессы и рассылающей исполняемые коды программ по SLAVE-машинам. Данные MASTER-машиной рассылаются путем применения какого-либо из интерфейсов: MPI (Message Passing Interface) или PVM (Parallel Virtual Machine).

На рис. 1 представлена структурная схема разработанного авторами вычислительного кластера. Кластер собран из 5 системных блоков идентичной конфигурации: Sempron 2000, 256 Mb RAM DDR 400, HDD Samsung 40 Gb, Mb KT-600 ECS, Radeon 9200, Codegen 300 W, net card Realtek 8139. Системные блоки подключены в сеть по технологии Ethernet 100BaseT через сетевой коммутатор (switch), физический тип соединения – «звезда». Кластер работает под управлением ОС Linux. Связь между узлами кластера осуществляется посредством протоколов TCP/IP с использованием технологии MPI.

 ISSN 1562-9945

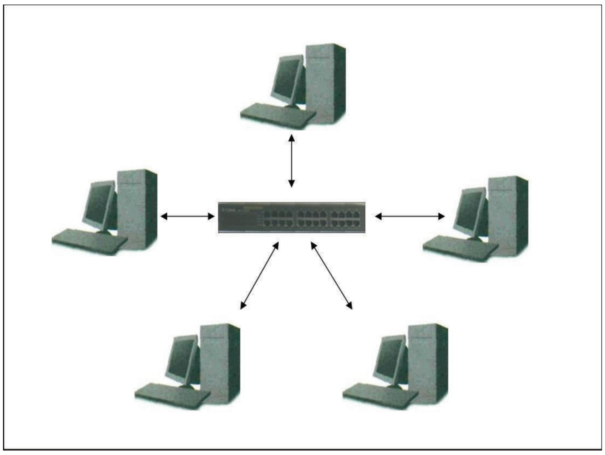

Рисунок 1 - Структурная схема вычислительного кластера

В зависимости от составленного алгоритма вычислений процесс работы такого кластера может развиваться по одному из направлений:

- на всех компьютерах вычислительного кластера запускается одна также программа;

- MASTER-машина готовит данные, необходимые SLAVE-машинам и рассылает их в виде MPI - сообщений, а затем собирает с них обработанную информацию для интерпретации.

Заметим, что внутри общей программы MASTER-машина и SLAVE-машины идентифицируют себя посредством специальной переменной – идентификатора.

Авторы статьи убедились, что современные технологии позволяют создать вычислительный кластер при минимальном навыке выполнения хозяйственных работ, а также принимая во внимание присущий большинству молодых исследователей уровень знаний системного и пользовательского ПО.

Вычислительный кластер, структурная схема которого представлена на рис.1, является инструментальной средой, предназначенной для приобретения навыков управления и программирования многопроцессорных систем. Заметим, что вследствие применения Linux, стандартных систем программирования и управления ресурсами, аналогичным профессиональных кластерных систем, процесс переноса наработанного программного обеспечения на большие кластерные системы максимально прост и удобен. Кроме того, мощные вычислительные системы не отвлекаются на выполнение рутинных (отладочных операций).

Хотя заметим, что системное программное обеспечение вычислительного кластера должно давать возможность работы как в режиме Windows (подготовка текстового материала, обмен сообщений по E-Mail, привычный режим работы в INTERNET и тт.д.) и одновременно управлять работой вычислительного кластера в среде Linux. Проблемы функционирования Windows – кластера, особенности совместной работы Linux – кластера и операционной системы Windows авторы надеются осветить в ближайших публикациях.

Заметим, что компьютерные вычислительные кластеры дополнительно стимулировали развитие новой области знаний – технологии параллельных вычислений (ТПВ), основные особенности которой для рассматриваемого класса задач освещаются в следующем разделе статьи.

В настоящее время на кафедре прикладной математики и вычислительной техники создан персональный вычислительный кластер. Особенности его конструирования, формирования программного обеспечения авторы собираются изложить в ближайших публикациях.

Вычислительные эксперименты

Эффективность предложенного подхода иллюстрируется решением задач нестационарной теплопроводности, некоторыми особенностями моделирования обратных задач исследования теплофизических свойств материалов, задач прогноза экологических систем под влиянием естественных и антропогенных факторов. Для наглядности рассмотрим некоторые особенности математического моделирования обратных задач исследования теплофизических свойств материалов

Итак, рассматриваются тепловые задачи металлургической теплофизики. Их постановка формулируется с точки зрения соотношений причина – следствие. К причинным характеристикам теплообменного процесса в соответствии с принятой математической моделью отнесены граничные условия и их параметры, начальные условия, теплофизические свойства и т.д.

Заметим, что решение задач теплопроводности (ЗТ) дает возможность по заданным, известным из теплового или численного эксперимента температурным полям, определять различные

 ISSN 1562-9945

причинные характеристики теплообменных процессов в системе твердое тело - окружающая среда. Под причинными характеристиками обычно подразумеваются коэффициенты уравнений, начальные поля, граничные условия, характеристики области интегрирования и т. д. Обратные задачи теплопроводности (ОЗТ) являются некорректно поставленными, поэтому методы их решения сложнее, чем соответствующих прямых задач. Разработан алгоритм и выявлены особенности решения коэффициентных ОЗТ.

Предложенный подход реализован в виде ППП.

Краткая иллюстрация работы ППП

В данном разделе статьи речь идет о ППП, предназначенном для обработки данных теплофизического эксперимента. При этом, основная цель, которая преследовалась при создании ППП – это оказание существенной помощи исследователю на всех этапах обработки теплофизического эксперимента.

Работа ППП иллюстрируется рисунками 2-4.

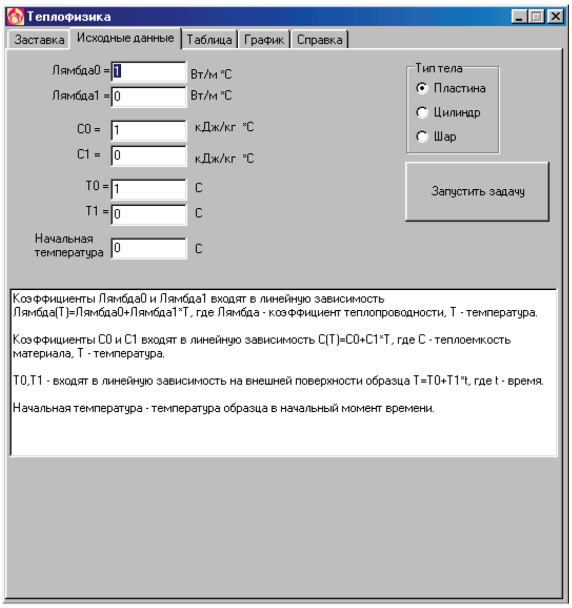

Рисунок 2 - Ввод исходных данных

Результаты решения задач могут представлеяться как в виде таблиц, так и соответствующими графическими зависимостями.

Решение тестовой коэффициентной ОЗТ методом математического моделирования

В качестве тестовой задачи рассмотрим образец цилиндрической формы, изготовленный из материала с теплофизическими свойствами [9] (кокс из газового угля, стр.41, Таблица 42-кокс формованный):

$$\lambda = 0.161 + 0.024 * 10^{-2} * T$$
$$C = 1.281 + 0.208 * 10^{-2} * T\ .$$

Плотность кокса из газового угля $\rho = 1912, kг / m^3$. С такими теплофизическими свойствами моделировалось температурное поле образца, имеющего цилиндрическую форму ($\kappa = 1$). При заданном линейном по времени изменении температуры на границе образца ($TL = 20 + 100 * \tau$) температурное поле для конкретного момента времени $\tau = a_0 t / L^2$ =0.5, где $a_0 = \lambda_0 / \rho\, c_0$ ($\lambda_0 = 1, c_0 = 1$), приведено на рис. 3, 4.

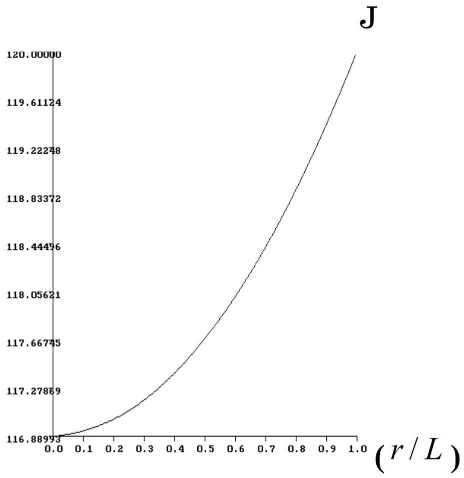

Рисунок 3 - Изменение температуры по сечению образца в момент времени $\tau = \tau_1$=0.5

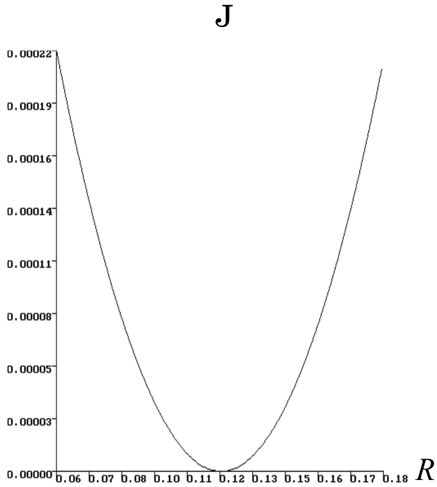

Рисунок 4 - Решение коэффициентной ОЗТ при $R = a$ с управлением относительно коэффициента температуропроводности

Точные значения коэффициента теплопроводности и температуропроводности соответственно равны

 ISSN 1562-9945

$\lambda(f_2) = 0.16598, f_2 = 0.1253$, где f_2 – изменение температуры во втором узле по сечению образца. Минимумы невязок, представленных на рис. 4 в точности соответствуют этим значениям [9].

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Основным научным результатом представленной статьи является разработка новых эффективных математических технологий кластерного типа для решения многомерных нестационарных задач металлургического производства. При этом:

Предложен, проанализирован и реализован новый подход для решения многомерных нестационарных задач металлургического производства на основе параллельных компьютерных технологий кластерного типа. Доказана универсальность его по отношению к решению широкого класса задач металлургического производства.

Реализованы и расширены основные компоненты технологии параллельного конструирования алгоритмов на основе метода прямых и аналитических методов. Доказаны основы формирования неограниченного параллелизма для вычислительных кластеров MPI архитектуры.

Разработаны теоретические основы распараллеливания на основе схем расщепления последовательных алгоритмов алгебраическими и численно-аналитическими методами.

Разработаны и исследованы параллельные технологии решения многомерных нестационарных задач металлургического производства. Обоснована и практически реализована область применения предлагаемых методов, охватывающая комплексный подход их использования на основе решений прямых и обратных задач металлургического производства. Предложенный подход включает параллельную обработку (визуализацию) векторов решений в виде графиков и изолиний.

Разработан и протестирован высокоэффективный комплекс программ для решения широкого класса задач металлургического производства. Предложены основные принципы управления и представления визуализации данных, опираясь на которые исследователь получает адекватную картину изучаемого явления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Роуч П. Вычислительная гидродинамика / Пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 616с.
2. Коздоба Л. А. Вычислительная теплофизика. – Киев: Наук. Думка, 1992. – 224с.
3. Яненко Н. Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. – Новосибирск: Наука, 1967. – 196с.
4. Ковеня В. М., Яненко Н. Н. Метод расщепления в задачах газовой динамики. – Новосибирск: Наука, 1981. – 304с.
5. Воеводин В. В. Математические модели и методы в параллельных процессах. – М.: Наука. Гл. ред .физ.-мат. мет., 1986. – 29с.
6. Швачич Г. Г., Шмукин А. А. Особенности конструирования параллельных вычислительных алгоритмов для ПЭВМ в задачах тепло- и массообмена // Восточно - Европейский журнал передовых технологий. 2(8) 2004. с. 42-47.
7. Швачич Г. Г., Шмукин А. А. О концепции неограниченного параллелизма в задачах теплопроводности // Восточно- Европейский журнал передовых технологий. 3(9) 2004. с. 81-84.
8. Шмукин А. А., Дреус А. Ю. К построению численно-аналитических решений методом прямых для задач механики вязкой несжимаемой жидкости // Весник Херсонского государственного технического университета. – 2000. – №2(8) – с. 235-240.
9. Ильченко К. Д., Чеченев В. А., Иващенко В. П., Терещенко В. С. Теплофизические свойства промышленных материалов, Справочник, Днепропетровск. : Січ, 1999.- 152с.

Получено 12.03.2008 г.