

# Имитационное стохастическое моделирование процессов высокоскоростной механической обработки (на примере шлифования)

А.А. Дьяконов<sup>1</sup>, А.В. Лепихов<sup>2</sup>

ГОУ ВПО НИУ Южно-Уральский государственный университет<sup>1</sup>,  
ОАО ГРЦ им. В.П. Макеева<sup>2</sup>

В работе приведены результаты стохастического имитационного моделирования процесса шлифования на основе технологий параллельных вычислений. Структурно программа разбита на три блока, каждый из данных блоков представляет собой набор вложенных циклов (глубина вложенности от 2 до 4). При этом циклы, начиная с глубины 2 допускают эквивалентное преобразование к виду, содержащему независимые итерации. Цикл верхнего уровня допускает распараллеливание с условием синхронизации входных данных в начале каждой итерации. В параллельной реализации программного комплекса использована комбинация технологий MPI и OpenMP. Технология OpenMP используется при декомпозиции циклов нижнего уровня. Эффективность распараллеливания на данном уровне определяется размером кэш-памяти ядра и скорости доступа к оперативной памяти. Технология MPI используется для распараллеливания циклов верхнего уровня и применяется для расчетов с высокой степенью точности.

## 1. Введение

В настоящее время в машиностроении (станкостроении) происходят коренные преобразования, связанные с выпуском совершенно нового оборудования для абразивной обработки и интенсификации скоростей приводов рабочих движений станка, а следовательно, происходит переход от обычных традиционных режимов резания к скоростным и сверхскоростным режимам обработки. С другой стороны, для современного машиностроения характерен переход к использованию большой номенклатуры новых материалов (композиционные, полимерные, наномодифицированные, градиентные и сложноструктурные дисперсные материалы и т. д.), являющихся эффективными заменителями дорогостоящих.

В связи с этим сложилась парадоксальная ситуация – существует огромная номенклатура современных станков и новых материалов при отсутствии каких-либо режимно-инструментальных рекомендаций по проектированию технологического процесса.

С другой стороны, т.к. многие новые материалы, как обрабатываемые, так и абразивные, создаются на основе высокотехнологичных производств, то в принципе их механические, теплофизические и другие свойства известны. Однако остается открытым вопрос о их контактном силовом взаимодействии, т.е. явления, происходящие, в нашем случае, при резании, что является фундаментальной основой для разработки различных режимно-инструментальных рекомендаций. Традиционные эмпирические подходы к разработке таких рекомендаций в настоящее время являются неработоспособными, т.к. отсутствует производственный статистический материал, существенное изменение технологических задач при проектировании процесса обработки и т. д.

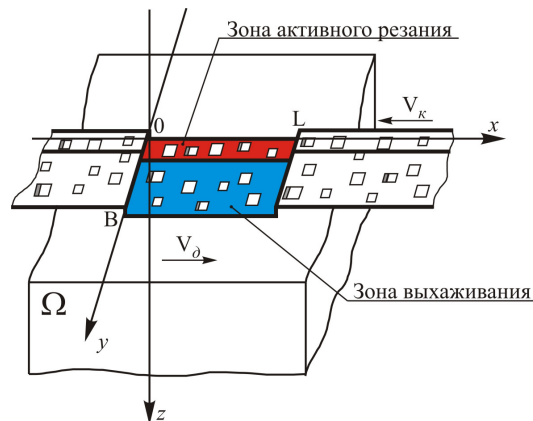
Как показывает отечественный и зарубежный опыт, самым эффективным решением подобных задач в свете стремительного увеличения производительности современных вычислительных систем, является разработка математической модели или системы моделей рассматриваемого процесса механической обработки и реализации посредством имитационного моделирования. Однако для получения репрезентативного результата необходима модель, максимально отражающая физику рассматриваемого процесса, т.е. возникает необходимость систематики и разработки обобщенной модели процесса, справедливой для каждого из более чем 50 видов абразивной обработки. Особенностью процессов абразивной обработки является быстротекучесть (время единичного воздействия составляет порядка  $10^{-5}$ – $10^{-8}$  с) и наличие внутренней

существенной нелинейности прочностных свойств обрабатываемого материала от температурно-скоростных характеристик процесса. При этом реализацию существенно усложняет главная особенность процесса абразивной обработки – стохастический характер взаимодействия режущего профиля абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки [1, 2]. Поэтому реализация данного проекта возможна лишь на основе применения технологий параллельного программирования и применения высокопроизводительных кластеров.

## 2. Математическая постановка задачи

Решение задачи режимно-инструментального оснащения современного оборудования и разработки рекомендаций по обработке новых материалов проводится посредством имитационного стохастического моделирования, базирующегося на теплофизической модели процесса абразивной обработки.

Расчетная схема теплофизической модели представлена на **Рис. 1**. На детали, являющейся полупространством, зафиксирована неподвижная система координат XYZ (система координат станка). Активизация тепловых источников – случайно расположенных абразивных зерен происходит в области пятна контакта, ограниченного по длине отрезком OL и ширине отрезком OB. Развертка круга с расположенными на ней абразивными зёрнами движется со скоростью  $V_k$ , а деталь (полупространство) с соответствующей скоростью  $V_d$ . При этом для учета физики взаимодействия видов с продольной подачей введены две зоны резания.



**Рис. 1.** Расчетная схема теплофизической модели процессов абразивной обработки

Пологая, что каждое зерно на пятне контакта является источником тепла интенсивности  $q$ , придем к следующей математической формулировке задачи:

$$\begin{cases} c(U)U_t + \vec{V}_d \overrightarrow{\text{grad}}U = \text{div}(\lambda(U) \overrightarrow{\text{grad}}U) & \begin{cases} -\infty < x < \infty \\ -\infty < y < \infty \\ z > 0 \end{cases} \\ \lambda(U)U_z|_{z=0} = -q(x, y, t), \end{cases} \quad (1)$$

где  $c(U)$  – весовая теплоемкость материала;  $\vec{V}_d$  – вектор скорости детали;  $\lambda$  – теплопроводность;  $q(x, y, t)$  – интенсивность теплового источника с координатами  $x, y$  в момент времени  $t$ .

Это вторая краевая задача для уравнения теплопроводности в полупространстве с конвективным членом.

Принимая во внимание то, что существенное изменение температурного поля происходит на разгонном участке, который составляет порядка 10–15% от общей длины контакта, можно принять допущения, что теплофизические свойства материала являются постоянными внутри из каждой рассматриваемой группы.

В итоге получим систему (2), являющейся линейной постановкой системы уравнений (1).

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} + V_{\partial} \frac{\partial U}{\partial x} = \chi \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) & \begin{cases} -\infty < x < \infty \\ -\infty < y < \infty \\ z > 0 \end{cases} \\ \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\lambda} q(x, y, t) & \begin{cases} 0 < x < L \\ 0 < y < B \end{cases} \end{cases}, \quad (2)$$

где  $\chi$  – коэффициент температуропроводности.

Таким образом, имеем модель, обобщающую идеи двух разноплановых теплофизических направлений в абразивной обработке, т.е. рассматривается сплошная область контакта, по которой перемещаются тепловые источники, интенсивность тепловыделения которых определяется исходя из температурно-скоростных прочностных свойств материала.

## 2.1 Интегральное решение теплофизической модели

Математическое описание трехмерного температурного поля в зоне шлифования при полном учете кинематики процесса – скорости круга, заготовки, скоростей подачи, а также представлении процесса абразивной обработки, как процесса множественного микрорезания абразивными зернами приводит ко второй краевой задаче для уравнения теплопроводности в среде, движущейся со скоростью детали, и стохастическим множеством тепловых источников, пробегающих зону контакта круга с заготовкой со скоростью круга.

Рассмотрим действие одного теплового источника – абразивного зерна в начальный момент времени  $t=0$  (Рис. 2). Положение зерна в пространстве будет описываться соответствующими координатами по оси абсцисс и ординат.

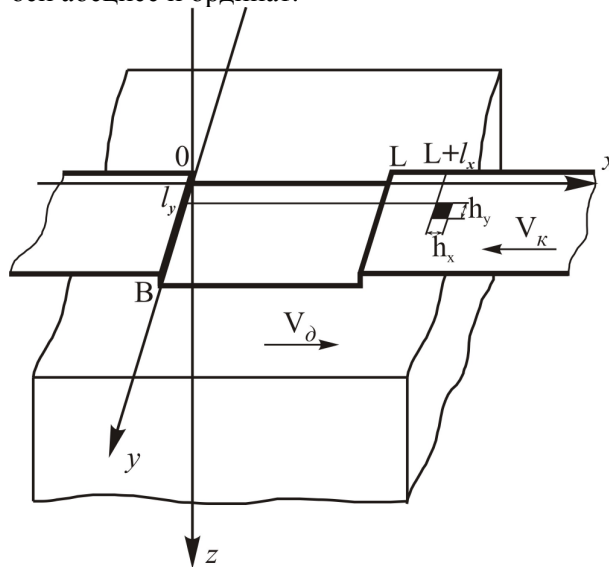


Рис. 2. Расчетная схема теплофизической модели от действия единичного источника тепла – абразивного зерна

В первом приближении форма зоны шлифования принята в виде прямоугольника с соответствующими границами. Такой вид она имеет для схем: круглое наружное врезное шлифование, шлифование отверстий, бесцентровое, плоское шлифование периферией круга.

В результате имеем вторую краевую задачу для уравнения теплопроводности в полупространстве с конвективным членом, для которой отсутствуют известные решения.

Из специальных разделов уравнений математической физики известны разнообразные методы, позволяющие отойти от конвективного члена в уравнении теплопроводности. Это методы интегрального и итерационного преобразования, применение функций Грина, Фурье и т. д.

Однако анализ предложенной расчетной схемы показал, что перевод задачи в подвижную систему координат, связанную с заготовкой, позволяет построить интегральное решение задачи в виде свертки функции интенсивности теплового источника с функцией Грина для полупространства. Функция интенсивности источника является кусочно-аналитической (Рис. 3):

$$q(x, y, t) = \begin{cases} q & \text{– в заштрихованных областях;} \\ 0 & \text{– вне областей.} \end{cases}$$

Вследствие такой составной структуры функции  $q(x, y, t)$  целесообразно введение элемента решения – функции влияния отдельного теплового источника, которая формируется как тройной интеграл по отдельной заштрихованной области, трансформирующийся после описания границ области в трехкратный (4).

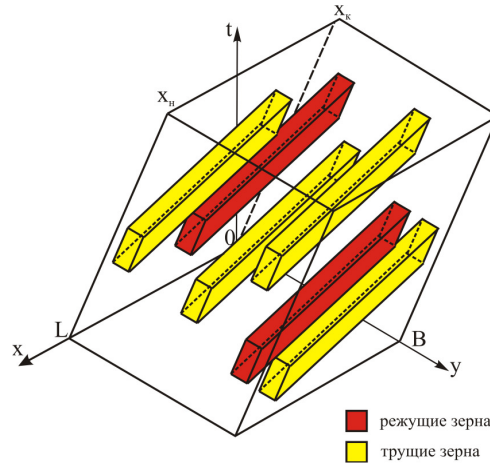


Рис. 3. Фазовый портрет множественного источника

$$U = \frac{q}{\sqrt{(4\pi\chi)^3}} \iiint_{x,y,z} e^{-\frac{z^2 + (y-y')^2 + [(x-x') - V_o(t-t')]^2}{4\chi(t-t')}} \frac{dt' dx' dy'}{\sqrt{(t-t')^3}}. \quad (4)$$

В зоне шлифования тепловой источник перемещается со скоростью  $V_k$  (см. Рис. 2), тогда закон его перемещения можно записать следующим образом:

- начало действия  $x_{II} = L - h_x + l_x - (V_k + V_d)t$ ,
- окончание действия  $x_3 = L + l_x - (V_k + V_d)t$ .

Структура подинтегральной функции и функций в пределах интегрирования в решении (4) такова, что получается естественный порядок рассмотрения однократных интегралов. Переменные  $x'$  и  $y'$  независимы друг от друга, и интегрирование по ним можно вести в первую очередь, затем рассматривается объединяющий все переменные интеграл по  $t'$ .

Пределы интегрирования по  $y'$  постоянны, поэтому интеграл по этой переменной выражается непосредственно через известные функции  $\text{erf}(\zeta)$ .

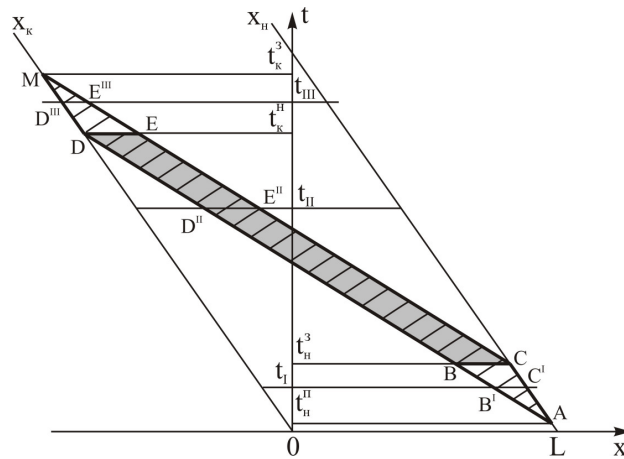
Сложнее обстоит дело в интеграле по переменной  $x'$ . Здесь пределы интегрирования зависят от времени  $t$  и поскольку интеграл рассматривается для текущего времени, область интегрирования может принимать три разных формы (Рис. 4):

- $t_n^{II} \leq t \leq t_n^3$  – вход зерна-источника в зону шлифования, область интегрирования – треугольник  $AB^1C^1$  – зона I;
- $t_n^3 \leq t \leq t_n^{II}$  – работа зерна-источника в зоне шлифования, область – параллелограмм  $B^1CD^1E^1$  – зона II;

–  $t_k^{\text{II}} \leq t \leq t_k^3$  – выход зерна-источника из зоны шлифования, область интегрирования – трапеция  $DED^{\text{III}}E^{\text{III}}$  – зона III.

Области I и III более сложны для интегрирования, поскольку ширина области переменна и является функцией времени. В области II ширина постоянна и не зависит от времени, т.е. интеграл существенно упрощается. Учитывая, что зона входа (I) и выхода (III) зерна на порядок меньше зоны его работы (II), предлагается пренебречь этими нестационарными зонами и ограничить рассмотрение интеграла (2) зоной I. Механически это допущение означает, что зерно мгновенно попадает в зону шлифования и также мгновенно из нее исчезает. Это математическое допущение даже более реалистично с точки зрения теплофизики процесса. При такой трактовке закономерностей работы теплового источника его фазовый портрет описывается лишь областью с двойной штриховкой – параллелепипед  $BCDE$  (см. **Рис. 4**).

Для модифицированного фазового портрета теплового источника интегрирование по  $x^{\wedge}$  проводится аналогично интегрированию по  $y^{\wedge}$ .



**Рис. 4.** Фазовый портрет единичного теплового источника в системе координат заготовки

В итоге трехкратный интеграл (4) сводится к однократному по переменной  $t^{\wedge}$ :

$$\begin{aligned}
 U &= 2q \int_{t_h}^t e^{-\frac{z^2}{4\chi(t-t^{\wedge})}} \left[ \operatorname{erf} \frac{|y-l_y|}{\sqrt{4\chi(t-t^{\wedge})}} - \operatorname{erf} \frac{|y-l_y-h_y|}{\sqrt{4\chi(t-t^{\wedge})}} \right] \times \\
 &\times \left[ \operatorname{erf} \frac{|X-L-l_x+h_x+wt|}{\sqrt{4\chi(t-t^{\wedge})}} - \operatorname{erf} \frac{|X-L-l_x+wt|}{\sqrt{4\chi(t-t^{\wedge})}} \right] \times \\
 &\frac{4\pi\chi(t-t^{\wedge})}{4} \frac{dt^{\wedge}}{\left(\sqrt{4\pi\chi(t-t^{\wedge})}\right)^3} = \frac{1}{2} q \int_{t_h}^t e^{-\frac{z^2}{4\chi(t-t^{\wedge})}} \left[ \operatorname{erf} \frac{|y-l_y|}{\sqrt{4\chi(t-t^{\wedge})}} - \operatorname{erf} \frac{|y-l_y-h_y|}{\sqrt{4\chi(t-t^{\wedge})}} \right] \times \\
 &\times \left[ \operatorname{erf} \frac{|X-L-l_x+h_x+wt|}{\sqrt{4\chi(t-t^{\wedge})}} - \operatorname{erf} \frac{|X-L-l_x+wt|}{\sqrt{4\chi(t-t^{\wedge})}} \right] \frac{dt^{\wedge}}{\sqrt{4\pi\chi(t-t^{\wedge})}}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Этот интеграл является существенно несобственным – верхний предел  $t^{\wedge}=t$  образует особую точку для всех составляющих подинтегральной функции. Однако функциональное преобразование:

$$\sqrt{t-t^{\wedge}} = \xi$$

трансформирует его к виду (6), где особенность сохраняется лишь в аргументе функции  $\text{erf}(\xi)$ , в нижнем пределе.

$$U = \frac{2q}{\sqrt{\pi\chi}} \int_0^{\sqrt{t-t_0}} e^{-\frac{z^2\xi^2}{4\chi}} \left[ \text{erf} \frac{X-L-l_x+V_d(t-\xi^2)}{\sqrt{4\chi\xi}} - \text{erf} \frac{X-L-l_x+h_x+V_d(t-\xi^2)}{\sqrt{4\chi\xi}} \right] \times \\ \times \left[ \text{erf} \frac{y-l_y}{\sqrt{4\chi\xi}} - \text{erf} \frac{y-l_y-h_y}{\sqrt{4\chi\xi}} \right] d\xi, \quad (6)$$

Суммирование (6) по всем источникам позволяет сформировать многокритериальную трехмерную теплофизическую модель процессов абразивной обработки:

$$U = \sum_i \frac{2q(U_{i-1})}{\sqrt{\pi\chi}} \int_0^{\sqrt{t-t_0}} e^{-\frac{z^2\xi^2}{4\chi}} \left[ \text{erf} \frac{X-L-l_{xi}+V_o(t_i-\xi^2)}{\sqrt{4\chi\xi}} - \right. \\ \left. - \text{erf} \frac{X-L-l_{xi}+h_{xi}+V_o(t_i-\xi^2)}{\sqrt{4\chi\xi}} \right] \left[ \text{erf} \frac{y-l_{yi}}{\sqrt{4\chi\xi}} - \text{erf} \frac{y-l_{yi}-h_{yi}}{\sqrt{4\chi\xi}} \right] d\xi.$$

### 3. Структура программного комплекса

Разработанная модель, численно реализованная в виде программы «Пространственная многокритериальная теплофизическая модель процессов обработки» [3], позволяет расчетным способом спрогнозировать основные выходные показатели – точность, качество обработки, оценить влияние характеристики абразивного инструмента и т. д.

Отработка этой модели показала, что для полученных результатов расчета характерно наличие значительной дисперсии. В силу центральной предельной теоремы теории вероятности для наиболее значимой оценки генеральной совокупности в 6σ интервале необходимо рассматривать порядка 200 значений случайной величины. А, принимая во внимание, что результатом расчета является случайная функция, а не величина, то необходимо рассматривать еще большие выборки.

Решение этой задачи на обычных персональных компьютерах является практически не выполнимой, т.к. требует колоссальных затрат времени – расчет одной точки эксперимента может занимать от нескольких часов до двух десятков дней.

Такую трудоемкую и вычислительно-сложную задачу в настоящее время можно решить только посредством мультипроцессорных кластеров и технологии параллельного программирования [4]. В настоящее время совместно с кафедрой «Системного программирования» разработана тестовая версия распараллеленной программы, обобщенный алгоритм которой представлен на **Рис. 5**.

Одну реализацию расчета (редукцию) можно представить следующим образом.

Стандартный алгоритм программы состоит из 7 основных подсистем. По исходным данным (подсистема 1) формируется вероятностное строение рабочей поверхности инструмента (подсистема 2), далее проводится статистическая проверка распределения размеров зерен и их пространственного расположения (подсистема 3), при этом, если результат проверки статистически незначим, алгоритм программы возвращается в подсистему 1 и производится аналогичная процедура. Сформированная развертка передается в подсистему 4, где на основе нелинейной теплофизической модели, базы данных теплофизических констант и температурно-скоростных прочностных характеристик обрабатываемого материала производится расчет температурных полей.

Данные по температурам передаются в подсистему 5, и на основе математической модели радиальной составляющей силы резания, рассчитывается суммарное усилие в зоне абразивной обработки для каждого рассматриваемого момента времени.

Полученные массивы температур и радиальной составляющей силы резания передаются в подсистему 7, где производится их оценка по двум центральным моментам математической статистики – математическому ожиданию и дисперсии.

Анализ структуры алгоритма с позиций технологии параллельного программирования показал, что его иерархически-модульная структура и последовательность работы естественным образом вписывается в данную технологию.

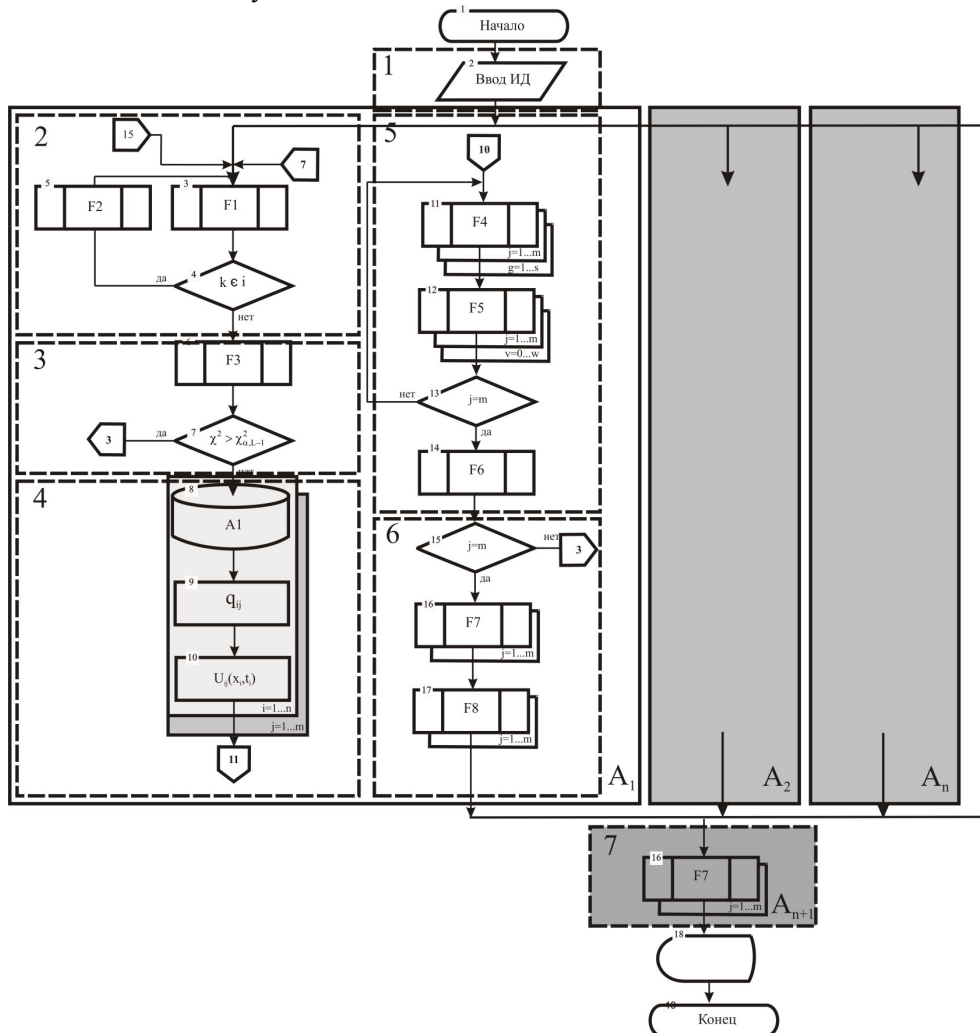


Рис. 5. Обобщенный алгоритм имитационной стохастической модели процессов абразивной обработки

#### 4. Параллельные алгоритмы

Процесс анализа исходного кода последовательной версии программного комплекса проходил в два этапа:

1. Выявление наиболее ресурсоемких участков кода программы.
2. Редуцирование исходного кода.

Под *редуцированием* в данной работе понимается создание модели информационных зависимостей участка кода (обычно цикла) следующим образом:

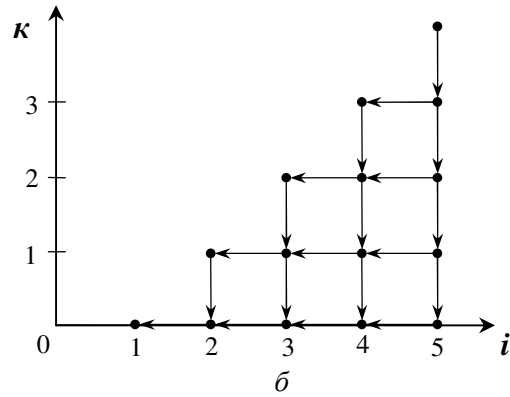
- группировкой последовательно выполняемых участков кода в блоки.
- удалением операторов, не имеющих зависимостей в редуцируемом коде.

Анализ исходного кода и практика использования программного комплекса показали, что наибольшее время работы программного комплекса (до 99%) затрачивается на выполнение следующих операций (Рис. 6).

```

for (k = 0; k < N; k++) {
  for (i = k+1; i < N; i++) {
    x = F1(A[k], A[i]);
    B[k] += F2(x);
    B[i] += F3(x);
  }
  A[k] = F4(B[k]);
}

```



**Рис. 6.** Схема информационных зависимостей алгоритма формирования режущей части инструмента

1. Формирование режущей части абразивного инструмента. Сложность данного блока заключается в вероятностной реализации равномерного распределения абразивных зерен и формирования их размеров по закону нормального распределения. После первичного построения режущей части возникает необходимость в корректировке – вторичное распределение зерен с учетом их случайных размеров, т.к. в некоторых случаях возникает наложение зерен вследствие первоначального распределения центров зерен, что противоречит технологии изготовления абразивного инструмента. Анализ показал, что выполнение данного блока занимает от 5% до 20% от итогового времени расчета.

2. Расчет интенсивности тепловыделения каждого абразивного зерна, находящегося в зоне контакта с обрабатываемой поверхностью заготовки. Выполнение данного блока занимает от 5% до 25% от итогового времени расчета.

3. Расчет распределения поля температур по глубине поверхностного слоя обрабатываемой поверхности в заданные моменты времени. Выполнение данного блока занимает от 60% до 95% от итогового времени расчета.

На первом этапе распараллеливания программного комплекса был выполнен процесс редукции алгоритма формирования режущей части инструмента, который привел к схеме информационных зависимостей, показанной на **Рис. 6а**. Здесь и далее  $A[]$  и  $B[]$  – массивы, состоящие из вещественных элементов,  $F_1, \dots, F_4$  – ресурсоемкие преобразования, зависящие по данным от значения переменной  $x$ . На **Рис. 6б** пространство итераций алгоритма представлено в соответствии с методом координат [5]. В результате анализа зависимостей пространства итераций, в соответствии с [4] было выполнено преобразование алгоритма путем замены счетчиков циклов следующим образом:

$$\begin{cases} i = \frac{N}{2} + s + j + 1 \\ k = \frac{N}{2} + s - j \end{cases}, s \in \left[ -\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2} \right]; j \in \left[ 0, \dots, \frac{N}{2} - s \right].$$

Схема полученного в результате преобразований алгоритма показана на **Рис. 7**. Данный алгоритм может быть эффективно распараллелен на одном вычислительном узле при помощи директив OpenMP.

На втором этапе распараллеливания была выполнена редукция алгоритма расчета интенсивности тепловыделения режущих зерен. На **Рис. 8** показана схема информационных зависимостей данного алгоритма. Как можно заметить, итерации внешнего цикла сильно связаны между собой по данным. Однако итерация состоит из двух независимых блоков кода. Распараллеливание выполняется путем расщепления итерации внешнего цикла на две OpenMP-секции.

На последнем, третьем этапе выполнен анализ и распараллеливание наиболее трудоемкой операции расчета распределения поля температур по глубине поверхностного слоя. Время выполнения данной операции на персональном компьютере существенно зависит от постановки задачи и варьируется в диапазоне от нескольких минут – для простых задач – до недель, для задач с большим количеством зерен и мелким шагом по времени. Редуцированный алгоритм данной операции показан на **Рис. 9**.



```

for (s = - $\frac{N}{2}$ ; s <  $\frac{N}{2}$ ; s++) {
    for (j = 0; j <  $\frac{N}{2} - s$ ; j++) {
        x = F1(A[ $\frac{N}{2} + s - j$ ], A[ $\frac{N}{2} + s + j + 1$ ]);
        B[ $\frac{N}{2} + s - j$ ] += F2(x);
        B[ $\frac{N}{2} + s + j + 1$ ] += F3(x);
    }
}
for (k = 0; k < N; k++)
    A[k] = F4(B[k]);

```

**Рис. 7.** Схема модифицированного алгоритма формирования режущей части инструмента

```

for (k = 0; k < N; k++) {
    for (i = 0; i < k; i++)
        x += F1(A[i]);
    A[j] = F2(x);

    for (i = 0; i < k; i++)
        u += F3(B[i]);
    B[j] = F4(u);
}

```

**Рис. 8.** Схема информационных зависимостей алгоритма расчета интенсивности тепловыделения режущих зерен

```

for (z = 0; z < LAYERS_NUM; z++)
    for (i = 0; i < Y_POINTS; i++)
        for (j = 0; j < X_POINTS; j++)
            for (k = 0; k < N; k++) {
                u += F1(A[z], B[i], C[j], D[k]);
                saveToDisk(F2(u));
            }
}

```

**Рис. 9.** Схема информационных зависимостей алгоритма расчета распределения поля температур по глубине поверхностного слоя

Как можно заметить, распараллеливание алгоритма может быть выполнено на произвольном количестве вычислительных узлов. Существенным фактором, влияющим на эффективность распараллеливания, является необходимость дублирования массивов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  на вычислительных узлах и необходимость их синхронизации после завершения этапа расчета температур по глубине изделия.

Параллельный алгоритм расчета поля температур на базе технологии MPI можно описать следующей последовательностью шагов. Пусть для расчета выделено  $n$  вычислительных узлов. На каждом узле выполняется отдельный процесс программного комплекса. На первом шаге процесс  $P_0$ , расположенный на нулевом узле, выполняет формирование режущей поверхности инструмента. На втором шаге процесс  $P_0$  выполняет доставку подготовленной на шаге 1 режущей поверхности каждому процессу. На третьем шаге каждый процесс выполняет расчет интенсивности тепловыделения зерен. На четвертом шаге процессу назначается набор итераций для расчета распределения поля температур в соответствии с правилом:

$$m = (\text{LAYERS\_NUM} * \text{Y\_POINTS} * \text{X\_POINTS}) / n.$$

где  $m$  – количество итераций алгоритма. Процесс выполняет расчет поля температур по глубине. На пятом шаге процесс  $P_0$  выполняет синхронизацию результатов.

Технология MPI используется для распараллеливания обработки итераций циклов трех верхних уровней. Для параллельного выполнения цикла нижнего уровня используется технология OpenMP. Особенностью предложенного параллельного решения является дублирование операции расчета интенсивности тепловыделения зерен, выполняемой на третьем шаге, что позволяет существенно снизить накладные расходы на обмен данными по сети и уменьшить общее время работы программного комплекса.

В настоящее время проводится исследование характеристик ускорения и расширяемости программного комплекса на базе вычислительного кластера Южно-Уральского государственного университета «Скиф Урал». Получаемые результаты показывают значительное ускорение времени счета. Например, реализация 500 редуций при средних технологических входных параметрах круглого центрального шлифования с радиальной подачей ориентировочно занимает в

среднем 0,5–1,2 минуты, против 520 минут для 50 редуций на персональном компьютере высокой производительности.

## 5. Область применения результатов

Массовая реализация готового продукта «Рекомендации по режимно-инструментальному оснащению современных абразивных станков и обработки новых материалов» планируется в трех направлениях:

1. Разработка справочника нового поколения для режимно-инструментального оснащения существующих в настоящее время 80 видов операций абразивной обработки. Учитывая, что последнее издание подобного материала – «Общемашиностроительные нормативы режимов резания и норм времени для шлифовальных работ» было выпущено в 1976 г., настоящий справочник представляет особую практическую ценность и имеет большие коммерческие перспективы. Подтверждением этому является то, что по заказам машиностроительных предприятий Российской Федерации авторами проекта совместно с ОАО «Уральский НИИ абразивов и шлифования» в 2005–2007 году разработаны:

- руководящий технический материал «Проектирование операций шлифования. Выбор характеристики шлифовального круга, назначение режимов резания, определение норм времени»;
- укрупненный справочник «Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах».

Данные материалы внедрены в действующее производство на более чем 200 предприятиях, в числе которых флагманы аэрокосмической, автомобилестроительной и машиностроительной отрасли – ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС», ОАО «ВОСТСИБМАШ», группа «ГАЗ» и др.

2. Разработка программной оболочки для интеграции в CAD\CAM\CAPP системы. Основное направление данной разработки – реализация автоматизированного выбора характеристик абразивного инструмента, расчета режимов резания и норм времени. Необходимость реализации данной задачи вызвана тем, что в настоящее время в современных САПР ТП данные процедуры выполняются на основе чтения баз данных, занесенных из общемашиностроительных нормативов резания, которые в свою очередь являются укрупненными. Проведенный анализ показал, что такая методика приводит зачастую к существенному занижению режимов резания, что в итоге приводит к потерям в производительности от 20 до 65%.

В этом направлении также имеются большие коммерческие перспективы в виде сотрудничества с отечественным лидером в области САПР ТП – группы компаний «Omega-Technologies» – программный продукт ADEM CAD\CAM\CAPP.

3. Реализация программы для научно-исследовательских работ и решения проектных технологических задач режимно-инструментального оснащения операций абразивной обработки. Основное направление – проведение хозяйственных работ, связанных с решением проблем внедрения и применения новых абразивных и обрабатываемых материалов, а также разработки режимных рекомендаций для сверхскоростных условий обработки (>150 м/с).

Планируется проводить также проектные работы по освоению и внедрению комбинированных методов механической обработки – обработка с предварительным нагревом, принужденным силовым и электрохимическим воздействием и т. д.

## Заключение

Описан программный комплекс для решения задачи имитационного стохастического моделирования процессов высокоскоростной механической обработки. Представлена архитектура и основные подсистемы программного комплекса. Выполнен анализ возможности параллельной реализации программного комплекса. Представлены параллельные алгоритмы, разработанные в процессе его реализации. Выполнен анализ сфер применения программного комплекса и дальнейшие направления его развития.

В настоящее время выполняется анализ характеристик ускорения и расширяемости разработанной параллельной реализации, проводятся тестовые запуски программного комплекса на кластере ЮУрГУ «Скиф Урал».

В качестве направлений дальнейших исследований можно выделить решение следующих основных задач:

1. Анализ и модификация исходного (последовательного) алгоритма расчета интенсивности тепловыделения зерен с целью увеличения ресурса параллелизма.
2. Разработка системы структурирования и буферизации данных, выдаваемых программным комплексом в параллельном режиме, с целью снижения накладных расходов на взаимодействие с диском.
3. Разработка методики редуцирования исходного программы кода до схемы информационных зависимостей.

## Литература

1. Дьяконов А.А. Стохастический подход к решению теплофизических и силовых задач теории шлифования // *Металлообработка*, 2008. №2(44). С.2–6.
2. Dyakonov A.A. Application area of fast-moving sources theory in thermophysics of abrasive machining tasks // *Proceedings of the Chelyabinsk Scientific Center*, 2010. Vol. 1 (47). P. 31–34.
3. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ 2010610052 Российская Федерация. Пространственная многокритериальная теплофизическая модель процессов абразивной обработки / А.А. Дьяконов, А.В. Геренштейн, А.А. Кошин. – № 2009616027; заявл. 28.10.2009; зарегистр. 11.05.2010.
4. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 608 с.
5. *Lamport L.* The coordinate method for the parallel execution of DO-loops. // *Commun. ACM*, Vol. 17, Issue 2. 1974. P. 83-93.