

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

Россия, г. Челябинск  
Южно-Уральский государственный университет  
кафедра «Технология машиностроения»

Авторы: А.А. Дьяконов, А.В. Лепихов, Л.В. Шипулин  
Докладчик: Л.В. Шипулин

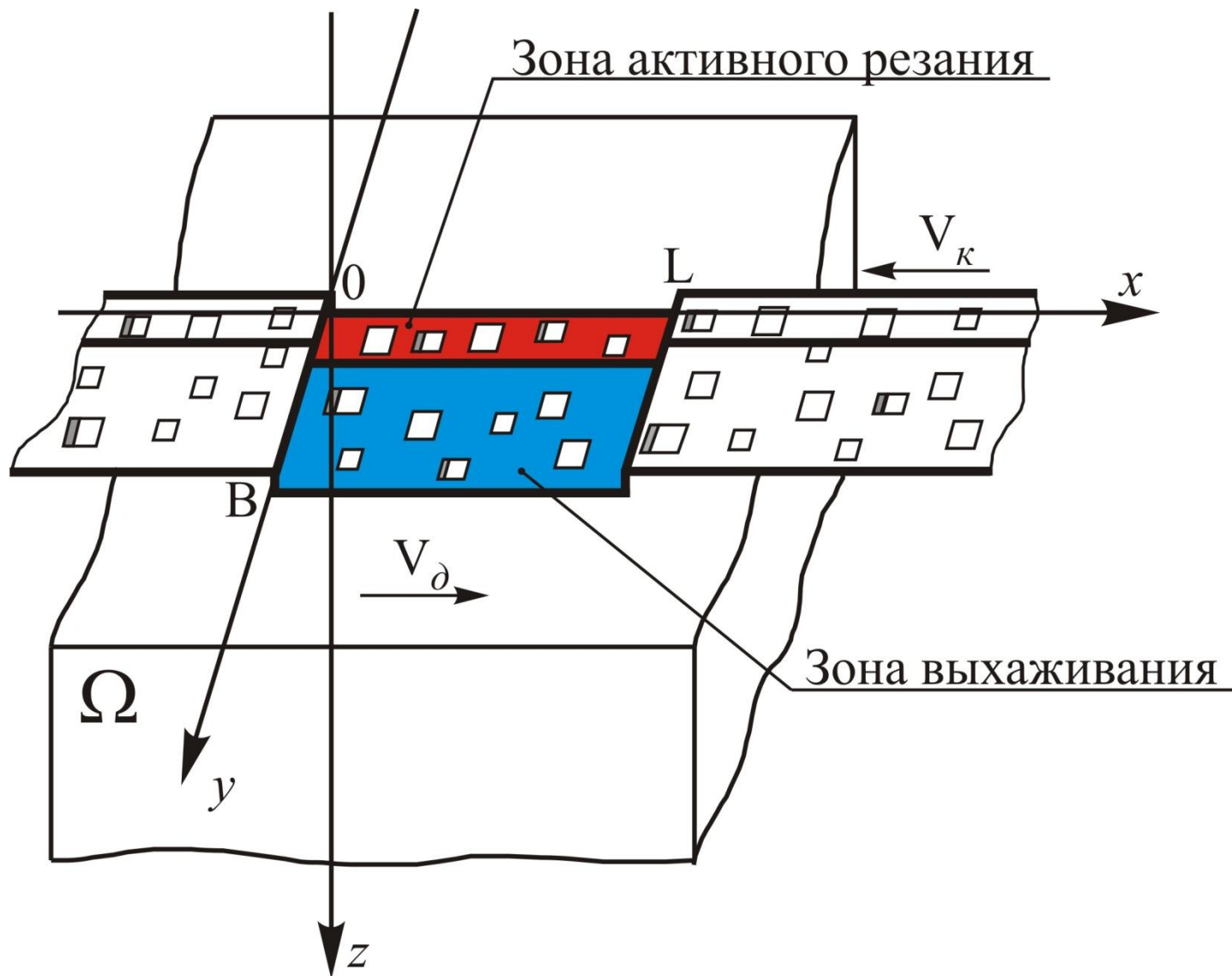
# Физическая природа шлифования

- множественное скоростное микрорезание абразивными зернами;
- поверхность формируется наложением рисок друг на друга;
- время деформации металла составляет  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  сек;
- снятие стружки и трение зерна о деталь задней поверхностью выделяет большое количество энергии;
- большая часть выделенной энергии тратится на нагрев детали;
- интенсивный нагрев вызывает разуплотнение металла детали;
- последующие зерна работают в среде нагретого металла и выделяют новые «порции» тепла;
- температурное поле детали движется вместе с деталью;
- стандартный цикл шлифования длится порядка 20-30 секунд. За 1 секунду через зону контакта шлифовального круга с заготовкой успевает пройти порядка 150 000 абразивных зерен;
- абразивные зерна расположены случайным образом и имеют случайные размеры.

# Комплексная модель шлифования

- Модель рабочей поверхности шлифовального круга
- Модель зоны пятна контакта
- Модель обрабатываемого материала
- Модель контактного взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемым материалом
- Модель интенсивности теплового источника
- **Теплофизическая модель**
- Модель вероятностного температурного поля в зоне обработки от воздействия множества тепловых источников
- Модель вероятностной радиальной составляющей силы резания

# Расчетная схема теплофизической модели



# Математическая формулировка задачи

Зерна на пятне контакта – источники тепла интенсивности  $q$ . Это вторая краевая задача для уравнения теплопроводности в полупространстве с конвективным членом.

$$\left\{ \begin{array}{l} c(U)U_t + \vec{V}_\delta \overrightarrow{\text{grad}}U = \text{div}(\lambda(U) \overrightarrow{\text{grad}}U) \\ \lambda(U)U_z|_{z=0} = -q(x, y, t), \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} -\infty < x < \infty \\ -\infty < y < \infty \\ z > 0 \end{array} \right\},$$

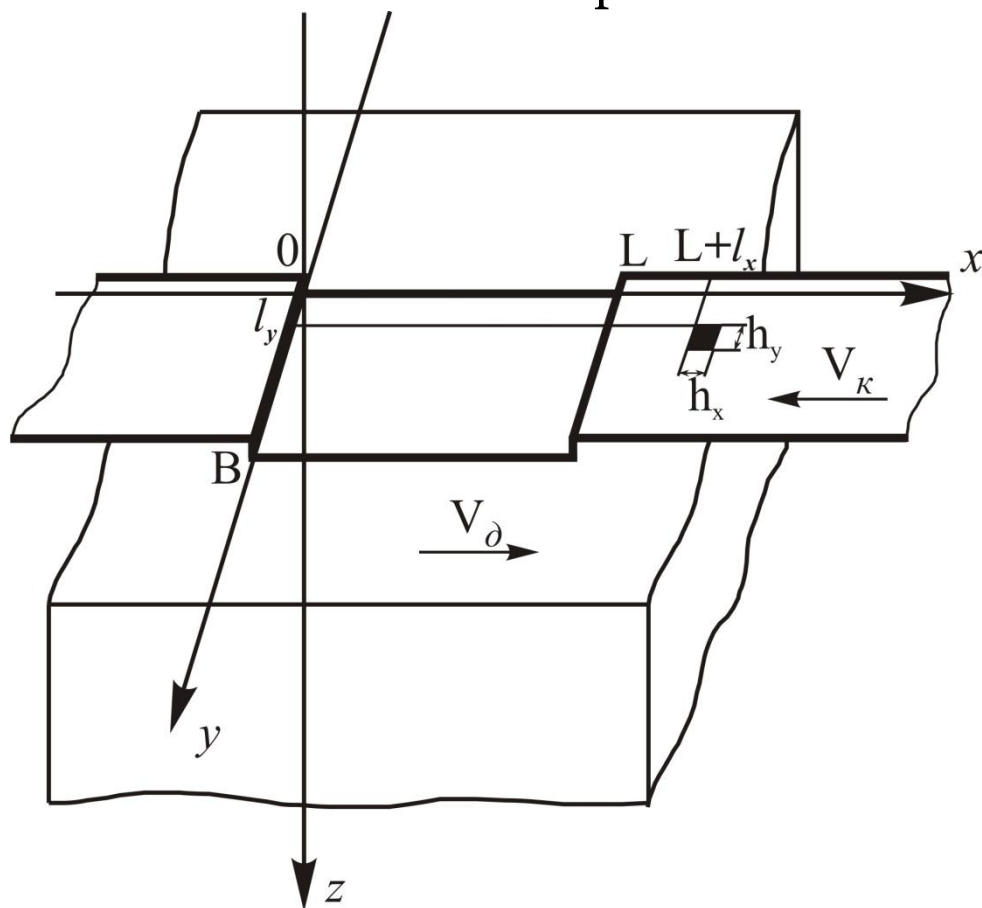
где  $c(U)$  – весовая теплоемкость материала;  $\vec{V}_\delta$  – вектор скорости детали;  $\lambda$  – теплопроводность;  $q(x, y, t)$  – интенсивность теплового источника с координатами  $x, y$  в момент времени  $t$ .

Теплофизические свойства материала являются постоянными внутри из каждой рассматриваемой группы:

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

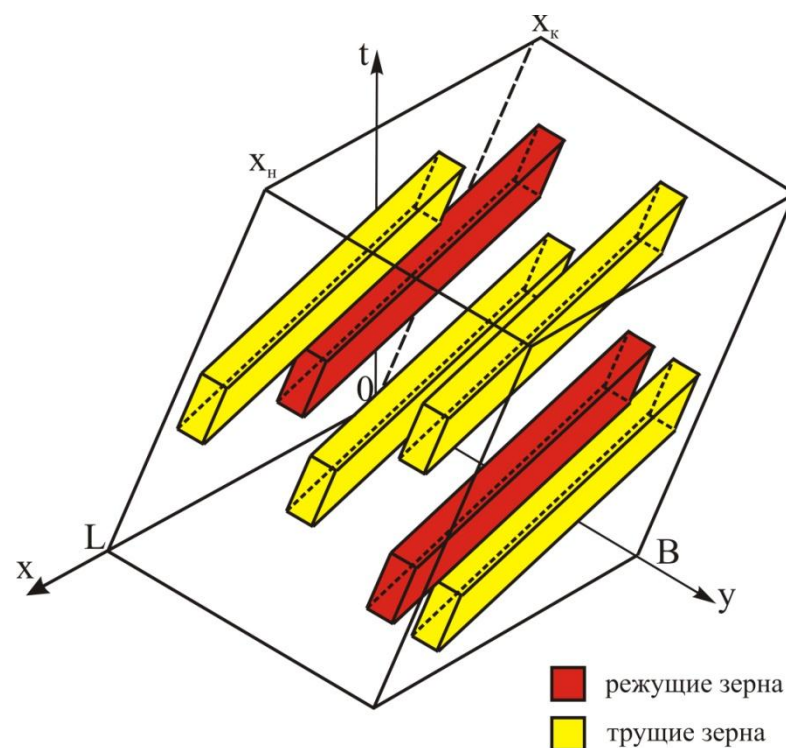
# Интегральное решение теплофизической модели

Действие одного теплового источника в момент времени  $t=0$



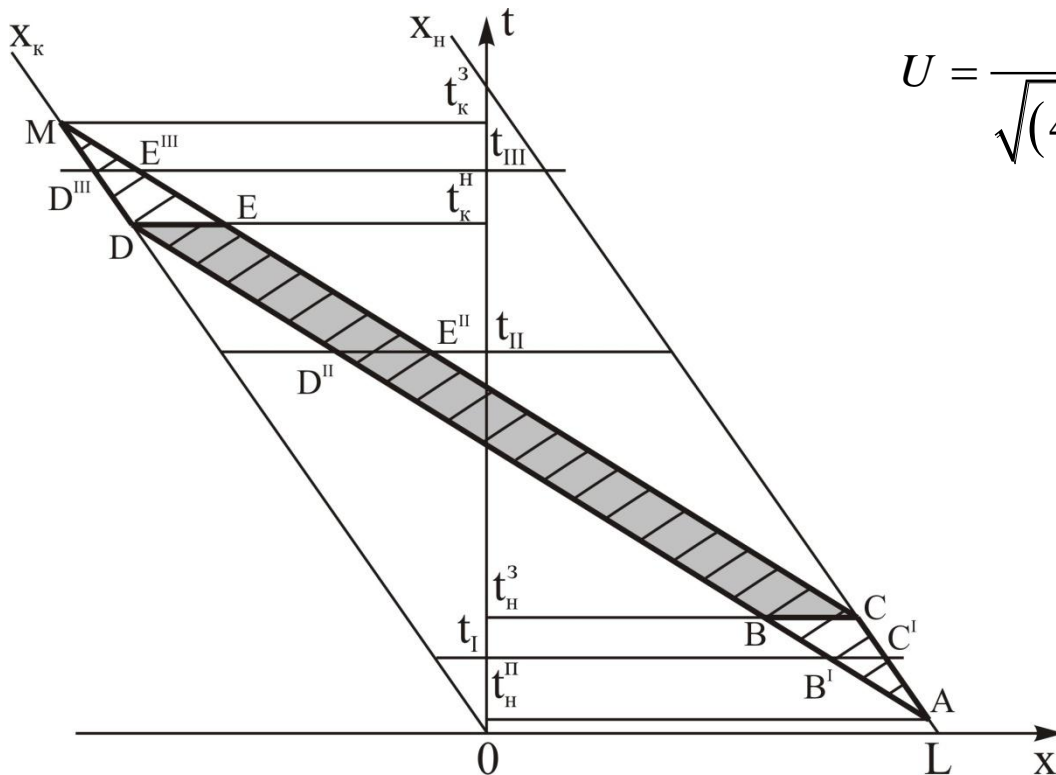
Фазовый портрет множественного источника

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



# Интегральное решение теплофизической модели

Фазовый портрет единичного теплового источника в системе координат заготовки



Функция влияния единичного теплового источника

$$U = \frac{q}{\sqrt{(4\pi\chi)^3}} \iiint_{x,y,z} e^{-\frac{z^2 + (y-y')^2 + [(x-x') - V_0(t-t')]^2}{4\chi(t-t')}} \frac{dt' dx' dy'}{\sqrt{(t-t')^3}}$$

# Интегральное решение теплофизической модели

Однократный интеграл с функциональным преобразованием  $\sqrt{t-t_0} = \xi$

$$U = \frac{2q}{\sqrt{\pi\chi}} \int_0^{\sqrt{t-t_0}} e^{-\frac{z^2\xi^2}{4\chi}} \left[ \operatorname{erf} \frac{X-L-l_x + V_d(t-\xi^2)}{\sqrt{4\chi\xi}} - \operatorname{erf} \frac{X-L-l_x + h_x + V_d(t-\xi^2)}{\sqrt{4\chi\xi}} \right] \times$$

$$\times \left[ \operatorname{erf} \frac{y-l_y}{\sqrt{4\chi\xi}} - \operatorname{erf} \frac{y-l_y - h_y}{\sqrt{4\chi\xi}} \right] d\xi,$$

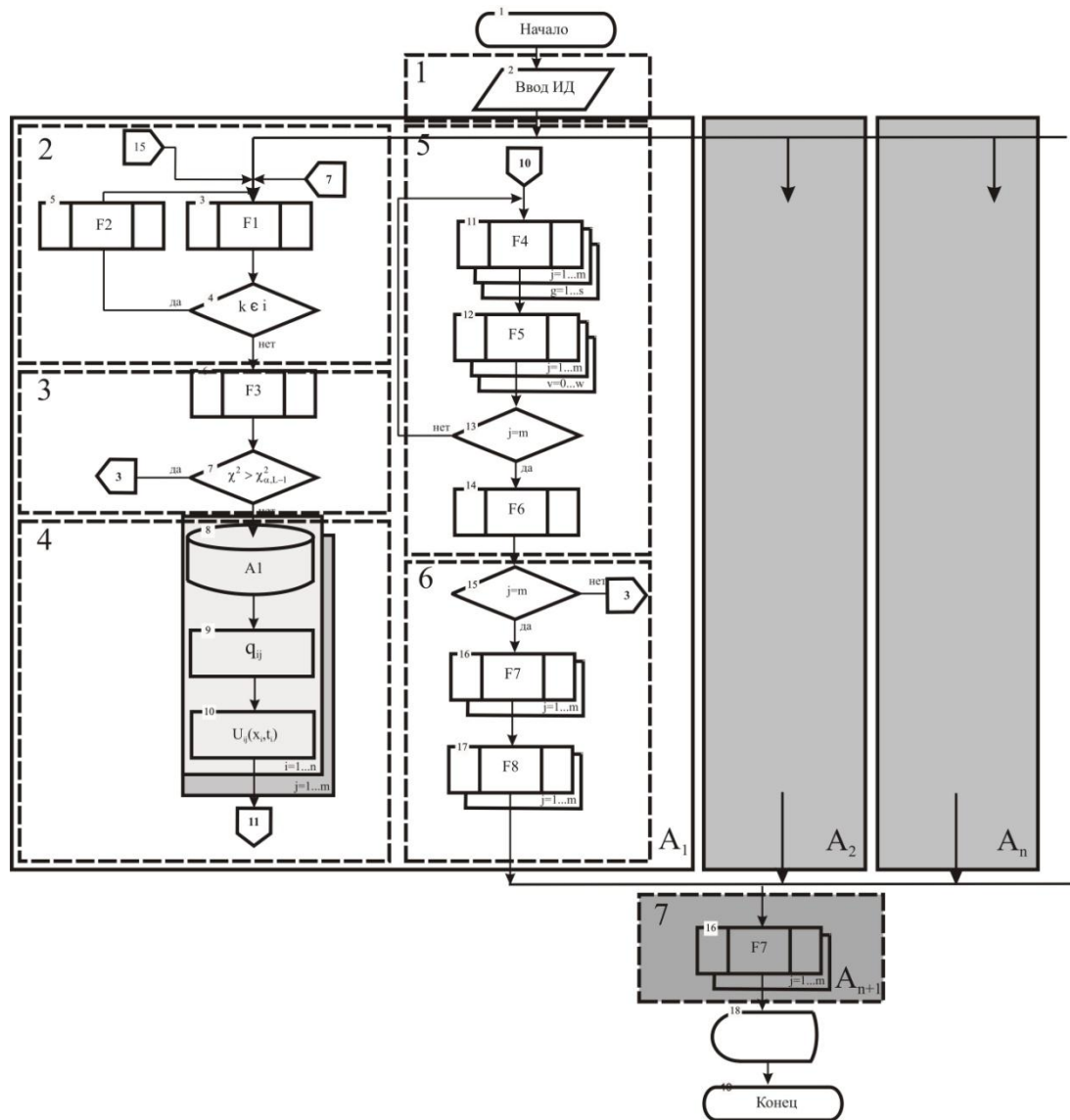
Многокритериальная трехмерная теплофизическая модель

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

$$\left. - \operatorname{erf} \frac{X-L-l_{xi} + h_{xi} + V_d(t_i - \xi^2)}{\sqrt{4\chi\xi}} \right] \left[ \operatorname{erf} \frac{y-l_{yi}}{\sqrt{4\chi\xi}} - \operatorname{erf} \frac{y-l_{yi} - h_{yi}}{\sqrt{4\chi\xi}} \right] d\xi.$$



# Структура программного модуля



- 1 – исходные данные;
- 2 – формирование поверхности инструмента;
- 3 – статистическая проверка инструмента;
- 4 – нелинейная теплофизическая модель;
- 5 – расчет сил резания;
- 6 – оценка по математическому ожиданию и дисперсии;
- $A_1, A_2, A_n$  – параллельные блоки вычисления редуций;
- 7 ( $A_{n+1}$ ) – статистика по редуциям.

# Параллельные алгоритмы

Наибольшая часть времени (до 99%), затрачиваемого на расчеты:

1. Формирование режущей части абразивного инструмента.

Вероятностная реализация равномерного распределения зерен и формирование их размеров по закону нормального распределения.

Первичное и вторичное распределение. 5-20%.

2. Расчет интенсивности тепловыделения каждого абразивного зерна. 5-25%.

3. Расчет распределения поля температур по глубине поверхностного слоя. 60-95%.

# Этапы распараллеливания

## 1. Редуцирование алгоритма формирования рабочей поверхности.

Схема информационных зависимостей

```
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]);  
}
```

Замена счетчиков циклов:

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

Схема модифицированного алгоритма формирования режущей части инструмента

```
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]);
```

Эффективное распараллеливание  
на одном вычислительном узле при  
помощи директив OpenMP

# Этапы распараллеливания

## 2. Редуцирование алгоритма расчета интенсивности тепловыделения режущих зерен

Схема информационных зависимостей

```
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);  
}
```

Расщепление итераций внешнего цикла на две OpenMP-секции

## 3. Редуцирование алгоритма расчета интенсивности тепловыделения режущих зерен

Схема информационных зависимостей

```
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));  
            }  
}
```

Дублирование массивов A, B, C и D, синхронизация после завершения расчета температур

MPI для распараллеливания обработки 3-х верхних уровней, для нижнего – OpenMP

# Заключение

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 центрового шлифования с радиальной подачей ориентировочно занимает в среднем **0,5–1,2** минуты, против **520** минут для 50 редуций на персональном компьютере высокой производительности.