

Применение функционально-воксельной модели к моделированию тепловых характеристик

А.А. Сычева,
бакалавр, sycheva.a@rambler.ru,
МГТУ «Станкин», г. Москва,
А.М. Плаксин,
асп., инж., a.m.plaksin@gmail.com,
ИПУ РАН, г. Москва

В работе рассматривается проблема моделирования тепловых характеристик. Применяемые в настоящее время подходы к моделированию тепловых процессов приводят к снижению достоверности вычислений за счет упрощения исходной модели. Предлагаемый в работе метод позволяет обойти недостаток традиционного подхода для получения более точного результата. В качестве примера проведено функционально-воксельное моделирование выраженного закона распространения тепла в ситуациях точечного и распределённого приложения тепла.

The problem of modeling thermal characteristics is presented. Current approaches to modeling thermal processes lead to a decrease in the reliability of calculations by simplifying the original model. The proposed method makes it possible to compensate for the shortcomings of the traditional approach to obtain a more accurate result. We performed functional and voxel modeling of the pronounced heat propagation law in situations of point and distributed heat application as an example.

Введение

Моделирование тепловых процессов и характеристик является одной из важных задач в промышленных и научных областях. Одной из таких областей является машиностроение, где один из наиболее распространенных методов достижения необходимой геометрии детали является механическая обработка резанием металлов. Современная промышленность требует от обработки все более точных результатов, в связи с чем необходим учет всех разноплановых процессов, влияющих на результат процесса обработки.

Сложное взаимодействие заготовки и обрабатывающего инструмента, происходящее в процессе металлообработки, сопровождаются множеством физических явлений. Накапливающиеся по абсолютной величине упругие деформации, вызванные вдавливанием движущегося резца в инструмент, переходят в пластические. Помимо этого, в прирезцовом слое материала обрабатываемой детали возникают сложные упругонапряжённые состояния, а с ростом пластических деформаций происходят сдвиговые деформации. Вся совокупность сложных физических процессов и взаимодействий приводит к интенсивному возникновению тепла в зоне резания.[1]

В процессе механической обработки металлов резанием в зоне резания выделяют три основных источника возникновения тепла, представленных на рисунке 1.:

1. Q_1 – внутреннее трение между частицами срезаемого слоя в процессе стружкообразования;
2. Q_2 – трение между передней поверхностью инструмента и образованной стружкой;
3. Q_3 – трение по задним поверхностям инструмента поверхности резания и обработанной поверхности.

Выделяемое вышеуказанными источниками тепло не аккумулируется в месте своего возникновения. Тепловые потоки распространяется от зон с большей температуры к зонам с низкой температурой по четырем выделенным на рисунке 1 направлениям[2]:

1. q_1 – отвод тепла стружкой обрабатываемого материала;
2. q_2 – отвод тепла внутрь обрабатываемой заготовки;
3. q_3 – отвод тепла внутрь обрабатывающего инструмента;
4. q_4 – отвод тепла в окружающую среду.

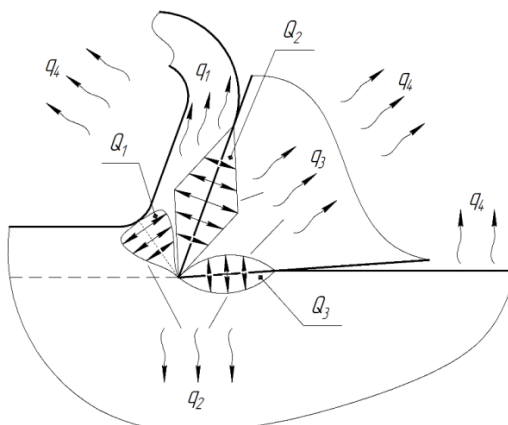


рис. 1 Источники тепла в зоне резания

Доли распределения тепла по вышеуказанным направлениям зависят от множества факторов, в числе которых как параметры режима резания, так и физико-механические и геометрические свойства обрабатываемого инструмента и материала заготовки, а также внешняя среда, в которой протекает процесс обработки. Для прослеживания данных зависимостей было проведено огромное количество эмпирических исследований и расчетов.

Наибольший интерес для повышения точности обработки вызывает отвод тепла в обрабатываемую заготовку и режущий инструмент. В первом случае важность рассмотрения тепловых процессов объясняется тем, что отводимое заготовкой тепло приводит к повышению ее температуры. Сильный разогрев тонкостенных заготовок влечет за собой тепловые деформации и их коробление, что непременно сказывается на результатах процесса обработки. Говоря о теплоте, переходящей в режущий инструмент, нельзя забывать, что несмотря на относительно малую долю тела, отводимую инструментом, концентрируется тепло в малых объемах, что приводит к значительному повышению температуры инструмента в этих областях. Тогда уже речь может идти о снижении износоустойчивости и режущих свойств инструмента или даже увеличения температуры практически до температуры его красностойкости [3].

Из множества параметров, составляющих режим резания, можно выделить один, наиболее сильно влияющий на перераспределение выделяемого и отводимого тепла – скорость резания. Рисунок 2 наглядно демонстрирует, как с увеличением скорости резания происходит перераспределение долей образуемого и отводимого тепла по уже указанным выше направлениям.

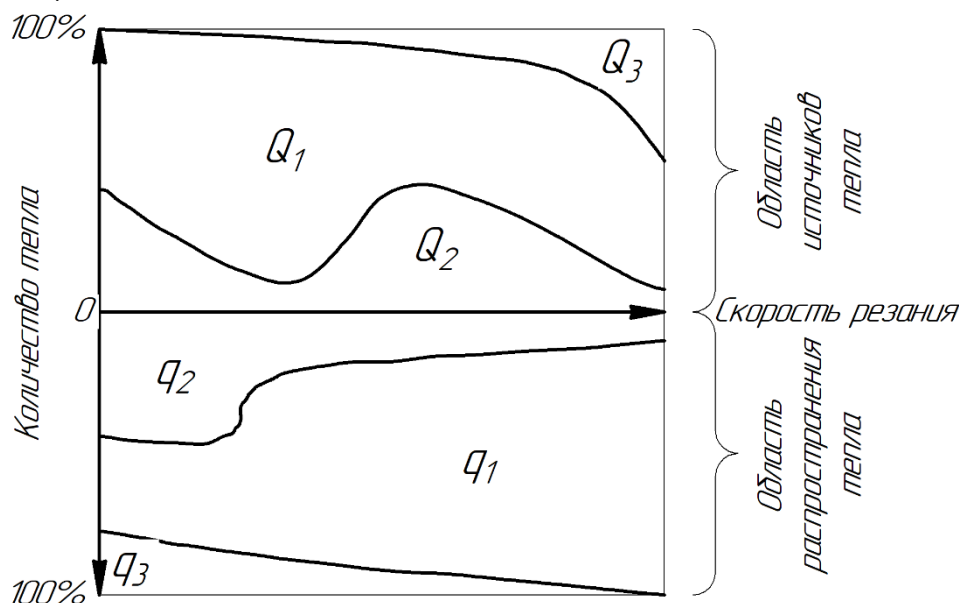


рис. 2 Зависимость образования и распределения теплоты в материале от скорости резания

После всего выше сказанного, уже не стоит под вопросом необходимость теплового анализа при построении программы обработки детали и в процессе моделирования металлообработки. Необходимо учитывать и прогнозировать тепловые процессы, возникающие в зоне резания, и распространение тепловых потоков.

2. Выражение теплового закона

Исследование тепловых характеристик необходимо в задачах моделирования тепловых процессов и исследования поведения теплового потока – его распределения и рассеивании. Можно считать, что при моделировании тепловые характеристики будут задаваться тензором второго ранга – тепловым тензором. Такой тензор будет представлять из себя матрицу, состоящую из трех строк и трех столбцов. Также тепловой тензор будет определять объемный вектор. Под объемным вектором будем понимать векторное поле, в котором каждой точке рассматриваемого пространства будет ставиться в соответствие вектор, определяемый функциями отдаления и направления от заданной точки. Объемный вектор, определяемый тепловым тензором, и будет являться отображением тепловых характеристик в модели.

В ходе многочисленных исследований и измерений за период изучения данного вопроса был предложен ряд аналитических и эмпирических формул, описывающих поведение теплового потока в различных ситуациях. В нашем случае, для получения выражения теплового закона необходимо учитывать функцию распространения тепла, приложенную температуру и коэффициент, приводящий к равновесию значение прикладываемой температуры в кратчайший момент времени с объемом ее распределения. В общем виде функция распространения теплового потока будет иметь вид (1).

$$T(x,y,z) = \sum_{i=1}^n (\eta \cdot t_i \cdot g(x,y,z)) \quad (1)$$

При этом уравновешивающий коэффициент «эта» будет рассчитываться по формуле (2), где V_g – объем определяемой функцией g фигуры.

$$\eta = \frac{1}{V_g} \quad (2)$$

В данном рассмотрении задачи моделирования распространения тепла в материал не учитываются свойства материала. При рассмотрении тепловых характеристик с подобным упрощением, законом распространения тепла в материале при его точечном приложении к поверхности будет являться гиперboloид вращения с центром в точке приложения тепла, функция g которого имеет вид (3).

$$g(x,y,z) = \frac{1}{\Delta + x^2 + y^2 + z^2} \quad (3)$$

Плоское сечение определяемой данной функцией фигуры изображено на рисунке 3.

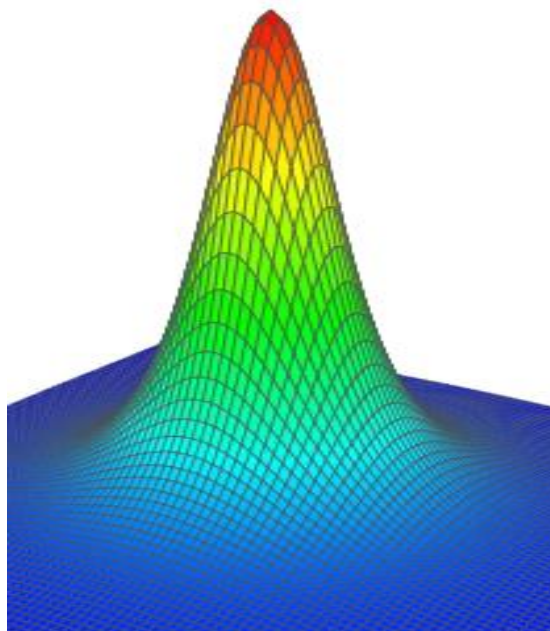


рис. 3 Плоское сечение фигуры g

3. Функционально-воксельное моделирование тепловых характеристик

Широко применяемый в современных задачах моделирования метод конечных элементов имеет неоспоримый недостаток – для моделирования, например, тепловых процессов в зоне резания необходимо две модели рассматриваемой детали. Для начала разрабатывается твердотельная модель детали, отображающая форму изделия как результат применения операции булевой алгебры к некоторому множеству геометрических элементов. Посредством загрузки такой модели в САМ-модуль разрабатывается логика обработки детали на станке ЧПУ. Для исследования же тепловых характеристик твердотельную модель необходимо привести к полигональному виду, то есть триангулировать, и уже эту модель загружать в модуль проведения теплового анализа. Задача же корректировки программы обработки детали на основе результатов теплового анализа решается разработчиком программы обработки [4].

Применение функционально-воксельной модели в решении подобных задач позволяет обойти этот недостаток, непременно приводящий к погрешностям вычислений за счет преобразования моделей и человеческого фактора, что достигается посредством хранения всех необходимых характеристик в одной модели в аналитическом виде (см. рис. 4).

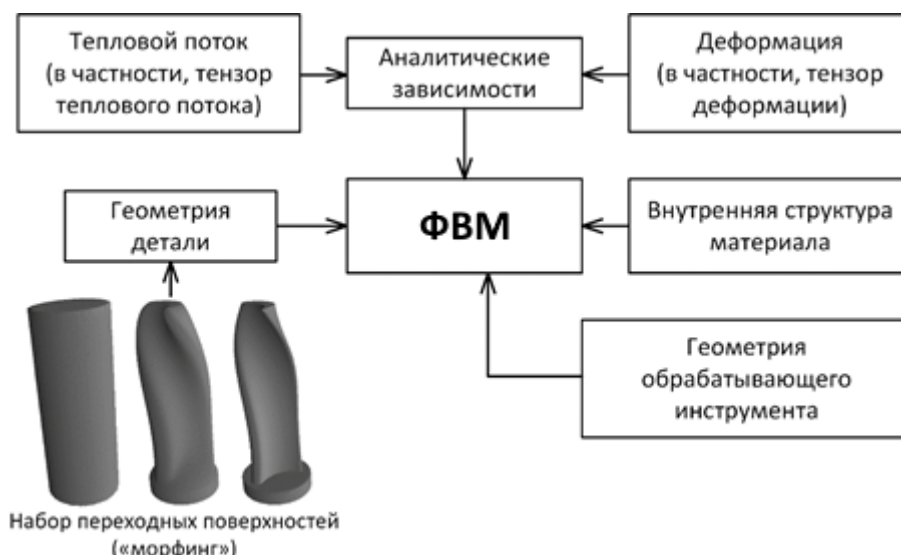


рис. 4 Информация, хранящаяся внутри ФВМ

Результатом описания модели в специфике функционально-воксельного моделирования являются образы модели – M-образы. Под M-образом понимают соразмерный прототипу графический образ, отображающий некоторое его свойство. Базовые M-образы несут основную информацию, определяемую аналитическим описанием объекта [7]. Количество таких образов определено пространством представления нормали изучаемого объекта.

Для построения функционально-воксельной модели рассматриваемого в предыдущем разделе закона распространения тепла в необходимы четыре образа-модели, представленные на рисунках 5 и 6. Данные M-образы

отражают локальные геометрические характеристики исследуемой функции по осям «X» «Y» и «Z», а также расстояние от начала координат.

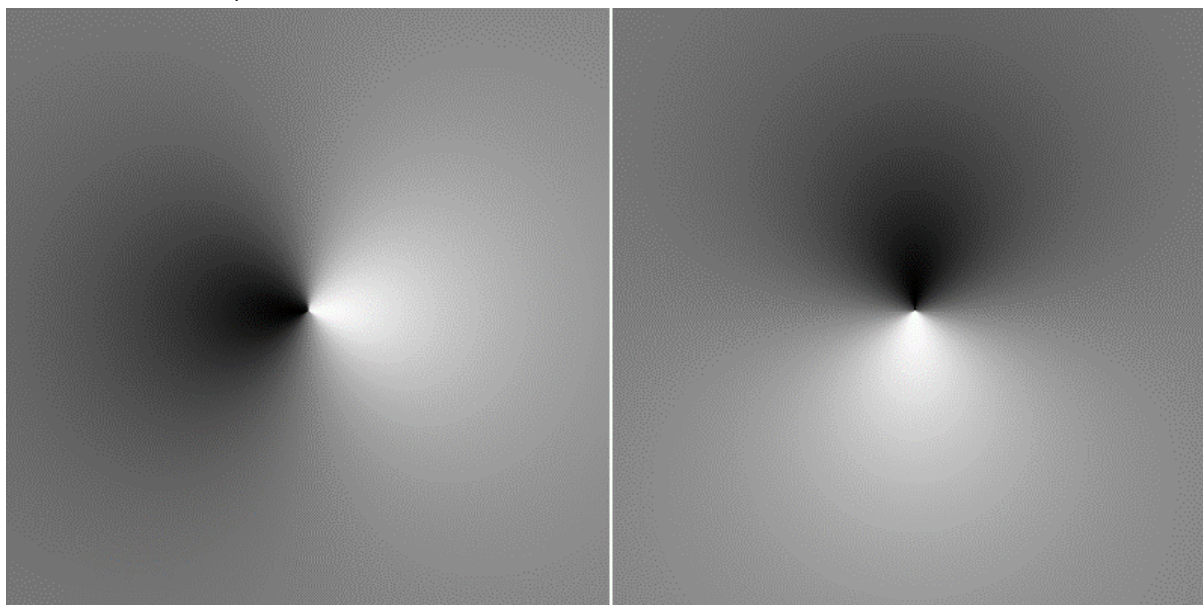


рис. 5 М-образы по оси «X» и по оси «Y»

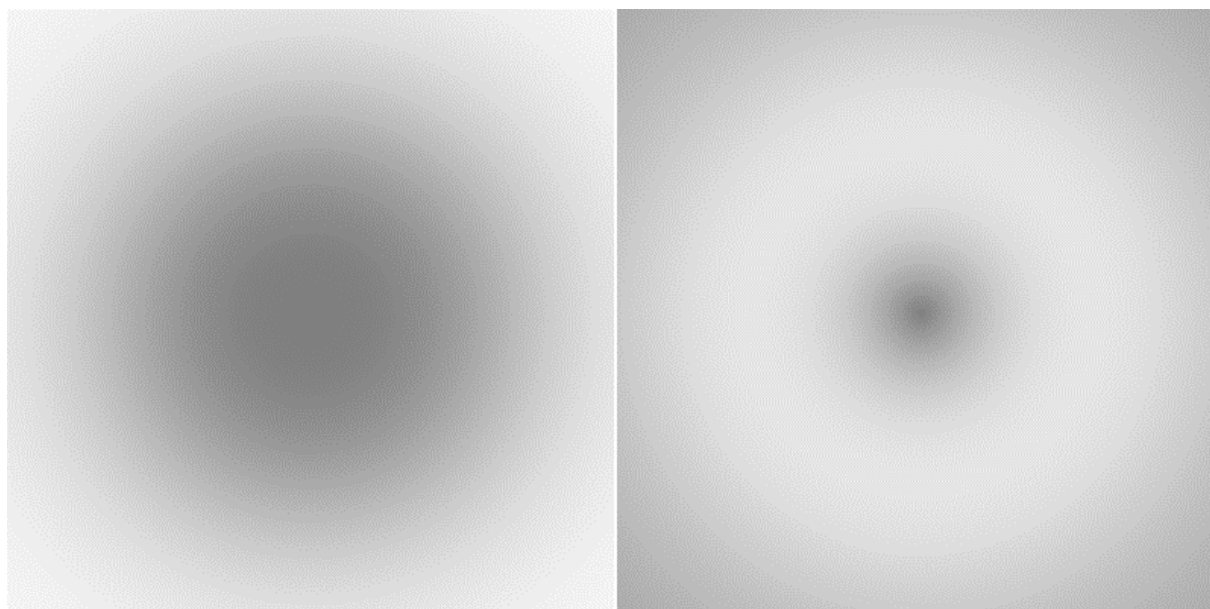


рис. 6 М-образы по оси «Z» и расстояния от начала координат

Применение функционально-воксельной модели к задаче исследования тепловых характеристик позволяет посредством использования данных М-образов упростить вычисление рассматриваемой функции g , которая теперь в двумерном варианте выражается как (4)

$$T_i(x,y) = 1 \cdot t_i \cdot g'(x,y) \rightarrow g'(x,y) = \frac{C_4}{C_3} - \frac{C_1}{C_3} x - \frac{C_2}{C_3} \quad (4)$$

Исходя из представленных четырех образов-моделей функции, определяющей распространение теплового потока по гиперболическому закону с параболическим погашением можно провести моделирование рассматриваемого процесса.

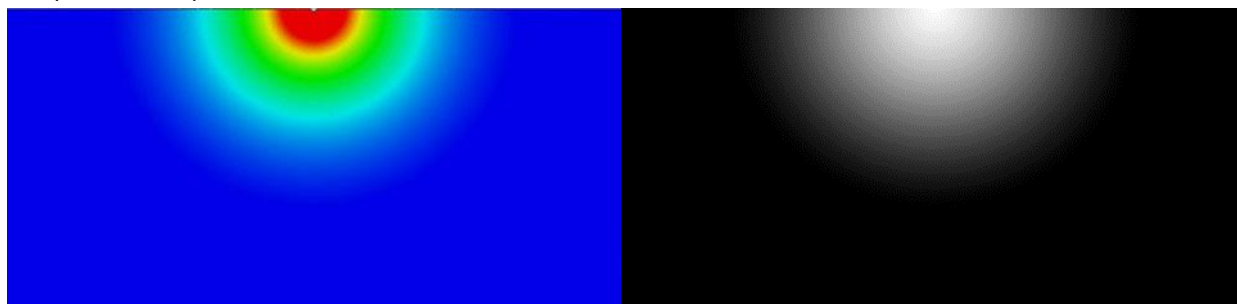


рис. 7 Реализация теплового потока МКЭ (слева) и МФВ (справа)

На рисунке 7 представлена двумерная реализация распространения теплового потока в материале при точечном приложении тепла с помощью метода конечных элементов (слева) и метода функционально-воксельного моделирования (справа). Невозможность указания точечного приложения тепла в реализации первым из указанных методов приводит к необходимости рассмотрения источника тепла как некоторой площадки, что наглядно представлено на указанном рисунке – площадка приложения тепла имеет вид «выемки». Применение функционально-воксельных моделей в отличие от предыдущего метода позволяет работать с точечным приложением тепла, что закономерно повышает точность проводимых вычислений.

При моделировании распределённого приложения тепла площадка контакта рассматривается как последовательность точек приложения тепла. При этом учитывается наложение тепловых потоков, их распределение и угасание во взаимном влиянии друг на друга рядом расположенных источников. Результат моделирования распределенного приложения тепла к объекту представлен на рисунке 8. Аналогично со случаем точечного приложения тепла, моделирование было проведено двумя методами – методом конечных элементов (слева) и методом функционально-воксельного моделирования (справа). Как можно наблюдать на представленной иллюстрации, применение предлагаемого в данной статье метода ничуть не уступает в результатах широко применяемому в настоящее время методу конечных элементов.

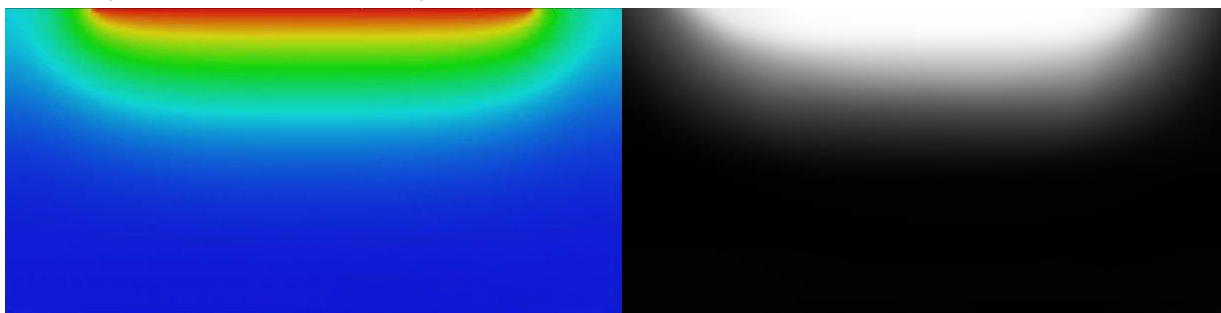


рис. 8 Реализация распределённого теплового потока МКЭ (слева) и МФВ (справа)

Дальнейшие разработки в данной области и совершенствование применения метода функционально-воксельного моделирования к задачам моделирования тепловых характеристик позволит анализировать не только распространение тепла от статического источника, но и позволит рассматривать динамически перемещающийся по отношению к объекту источник тепла.

Литература

1. Сычева А.А. Метод функционально-воксельного моделирования в задачах исследования физических процессов при механической обработке резанием / Материалы 1-го тура Международной студенческой научно-практической конференции «Автоматизация и информационные технологии» (АИТ 2018). Сборник докладов института информационных систем и технологий. Под общей редакцией д.т.н. проф. Позднеева Б.М. – М.: МГТУ «Станкин», 2018. С. 58.
2. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981. 279 с. ил.
3. Трусов В.Н., Скуратов Д.Л., Законов О.И., Шикин В.В. Влияние режимов резания на температуру при фрезеровании заготовок из труднообрабатываемых материалов // Вестник СГАУ. 2011. №3-1. С.57-62.
4. Плаксин А.М., Толоч А.В. Функционально-воксельная модель в задачах интеллектуализации систем автоматизированного проектирования / Вестник МГТУ Станкин. М.: МГТУ Станкин, 2017. № 2 (41). С. 75-78.
5. Толоч А.В., Плаксин А.М., Васенков С.В. Применение воксельных структур в задачах интеллектуализации систем автоматизированного проектирования / Труды Международной школы молодых ученых и специалистов в области робототехники, производственных технологий и автоматизации. Металлообработка (Москва, 2016). М.: ФГБОУ ВО МГТУ "Станкин", 2016. С. 67-69.
6. Р. И. Ахметшин, М. Ш. Мигранов, А. А. Верещака Моделирование тепловых процессов при резании инструментом с функциональными покрытиями // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2007. №2. С.116-119.
7. Толоч А.В. Функционально-воксельный метод в компьютерном моделировании. М.: Физматлит, 2016. – 112 с.
8. Плаксин А.М., Сычева А.А. Исследование тепловых процессов в зоне резания методом функционально-воксельного моделирования / Труды 17-й Международной конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта» (CAD/CAM/PDM-2017, Москва). М.: ИПУ РАН, 2017. С.84-88