

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 9, №2 (2017) <http://naukovedenie.ru/vol9-2.php>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/36TVN217.pdf>

Статья опубликована 07.04.2017

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Колоскова А.В., Киселёв И.А., Иванов И.И. Моделирование динамики процесса точения с учетом податливости обрабатываемой детали // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №2 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/36TVN217.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**УДК 62-13; 621.91; 534.1**

**Колоскова Анна Владимировна**

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)», Россия, Москва  
Магистрант  
E-mail: [anna.koloskova@gmail.com](mailto:anna.koloskova@gmail.com)

**Киселёв Игорь Алексеевич**

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)», Россия, Москва  
Кандидат технических наук, доцент  
E-mail: [i.a.kiselev@yandex.ru](mailto:i.a.kiselev@yandex.ru)  
РИНЦ: [http://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=713365](http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=713365)

**Иванов Илья Игоревич**

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)», Россия, Москва  
Ассистент  
E-mail: [ivanovilig@gmail.com](mailto:ivanovilig@gmail.com)  
РИНЦ: [http://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=698910](http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=698910)

## **Моделирование динамики процесса точения с учетом податливости обрабатываемой детали**

**Аннотация.** В данной статье представлен способ предсказания высокоамплитудных вибраций в задаче обработки точением с использованием трёхмерных огибающих максимальных и минимальных амплитуд перемещений, усилий резания и толщин срезаемого слоя. Рассмотрена модель динамики процесса точения в трехмерной постановке с использованием геометрического алгоритма, феноменологической модели сил резания и конечно-элементной модели динамики обрабатываемой детали. Решена тестовая задача обработки цилиндрической оболочки точением с учетом динамики детали для заданного диапазона изменения скорости резания. Результаты моделирования представлены в виде трехмерных отображений для сил резания, перемещений и толщины срезаемого слоя в зависимости от скорости вращения оболочки и координаты вдоль траектории обработки. Проводится сравнение для различных режимов реализаций сил резания, вибраций детали в зоне обработки, мгновенных значений толщины срезаемого слоя в зависимости от времени, а также формы обработанной поверхности с учетом влияния вибраций с целью показать наличие связи между режимом обработки, жесткостью обрабатываемой детали и развитием автоколебаний при обработке детали точением. Полученные результаты численного моделирования позволяют определить рациональные режимы токарной обработки, свободные от высокоамплитудных вибраций.

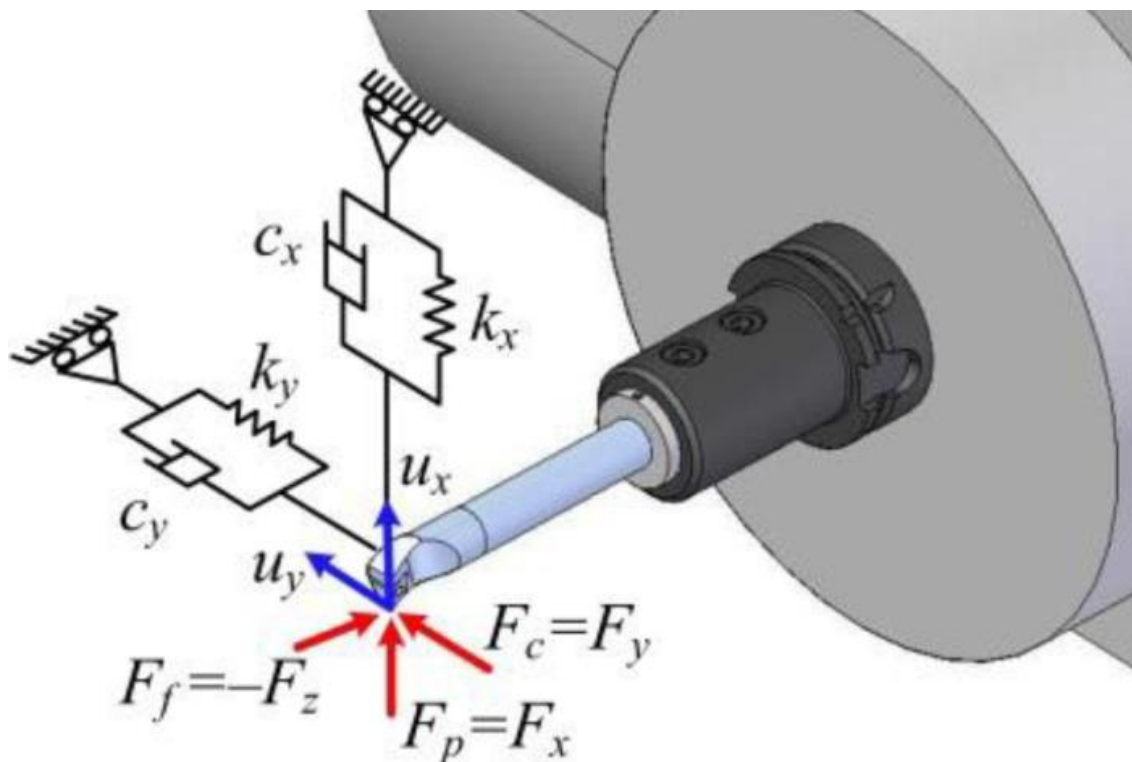
**Ключевые слова:** автоколебания; динамика точения; вибрации

### Введение

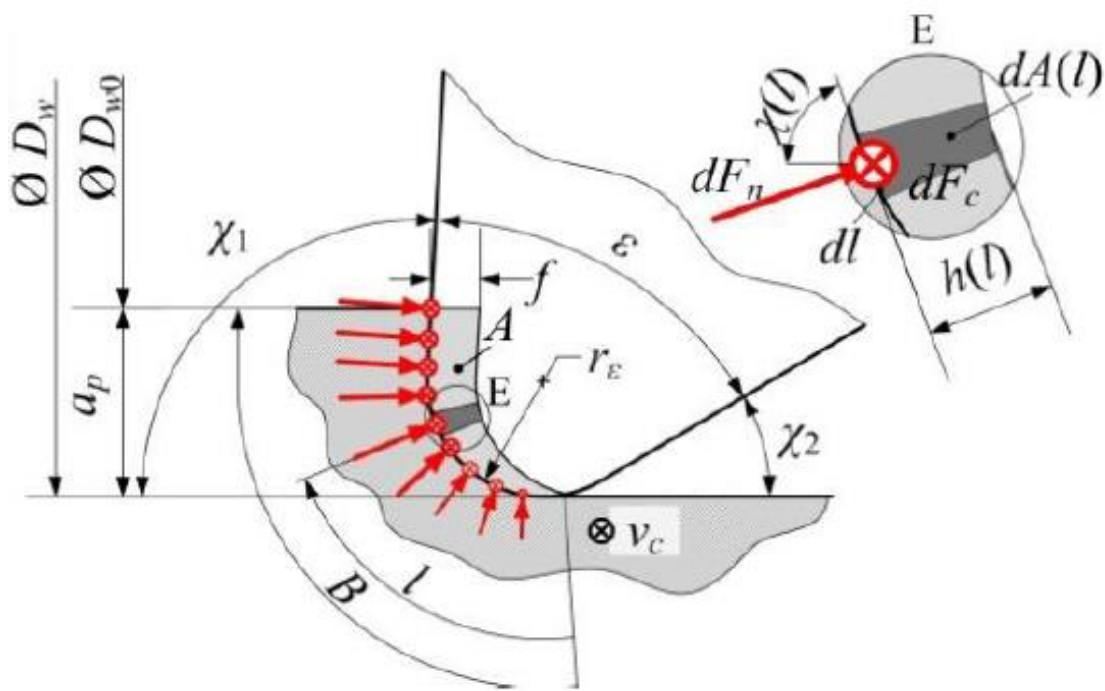
Точение - широко распространённый в машиностроении процесс механической обработки. Для увеличения производительности целесообразно использовать максимально допустимые инструментом и оборудованием технологические параметры. Однако в этом случае часто возникают высокоамплитудные вибрации инструмента и заготовки (чаттер [1]), приводящие к порче инструмента и обрабатываемой поверхности. По этой причине необходимо заранее определять неблагоприятные режимы и избегать их в процессе обработки.

В настоящий момент разработано множество моделей динамики процесса точения. В частности, в работе [2] используется одностепенная модель динамики процесса точения для анализа устойчивости и определения диапазона частот чаттера. В работе [3] для анализа устойчивости процесса используется двухстепенная модель динамики точения. Диаграмма устойчивости позволяет оценить различные режимы обработки с точки зрения возникновения автоколебаний (динамической потери устойчивости регулярного процесса резания). Производится дискретизация режущей кромки, на каждом отдельном участке определяются силы резания и моделируется удаление материала (рис. 1 а - в). В работе [4] моделирование процесса обработки точением осуществляется во временной области. Также авторами проводится анализ влияния взаимодействия инструмента и детали по задней грани режущей кромки на динамику процесса резания.

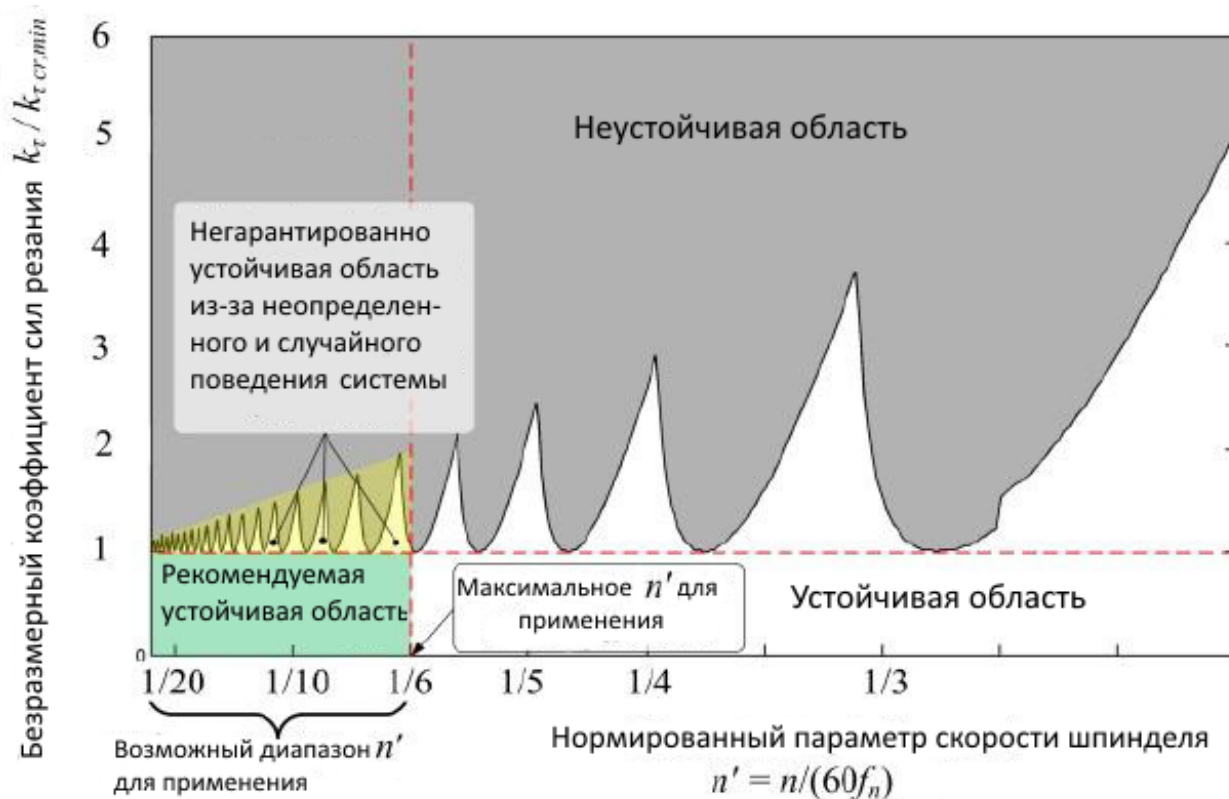
В данной работе рассмотрена модель динамики пространственного точения с учетом динамики детали. Модель позволяет не только определить усилия резания и перемещения детали в зоне обработки, но и получить изображения обработанной поверхности с учетом возможного появления вибрационных отметин на отдельных неблагоприятных режимах.



а



б



**Рисунок 1.** а - Двухступенная модель точения [3]; б - Распределение сил резания по режущей кромке [3]; в - диаграмма устойчивости [3]

Структура применяемой имитационной модели динамики пространственного точения представлена на рис. 2 [5]. Математическая модель содержит в своем составе три основных блока. Базовым является блок определения взаимного положения геометрической модели токарного резца и модели обрабатываемой поверхности, куда в качестве исходных данных

загружаются модель детали и траектория инструмента. В этом же блоке определяется толщина срезаемого слоя. Второй блок отвечает за расчет сил резания как функции мгновенных значений толщины срезаемого слоя. Третий блок отвечает за моделирование движения обрабатываемой детали и инструмента под действием сил резания. В общем виде колебания детали и инструмента в процессе обработки описывает система неоднородных дифференциальных уравнений второго порядка [5], в правой части которой, устанавливается связь с остальными блоками модели за счет метода вычисления сил резания. При практической реализации решение данной системы уравнений осуществляется на базе метода конечных элементов с использованием метода модальной суперпозиции. Для интегрирования уравнений движения детали и инструмента в модальном пространстве применяется схема интегрирования с итерационным уточнением для учета нелинейного характера зависимости сил резания от геометрии срезаемого слоя и взаимных перемещений режущей кромки и обрабатываемой поверхности. В рамках данной работы рассматривается только динамика обрабатываемой детали - тонкостенной оболочки, как наиболее податливого звена технологической системы.

Результатами моделирования динамики течения в программе 3DCUT являются:

- Изменение компонент усилий резания в процессе обработки;
- Изменение компонент перемещений инструмента и детали в процессе обработки;
- Изменение толщин срезаемого слоя в процессе обработки;
- Геометрия поверхности детали после обработки.

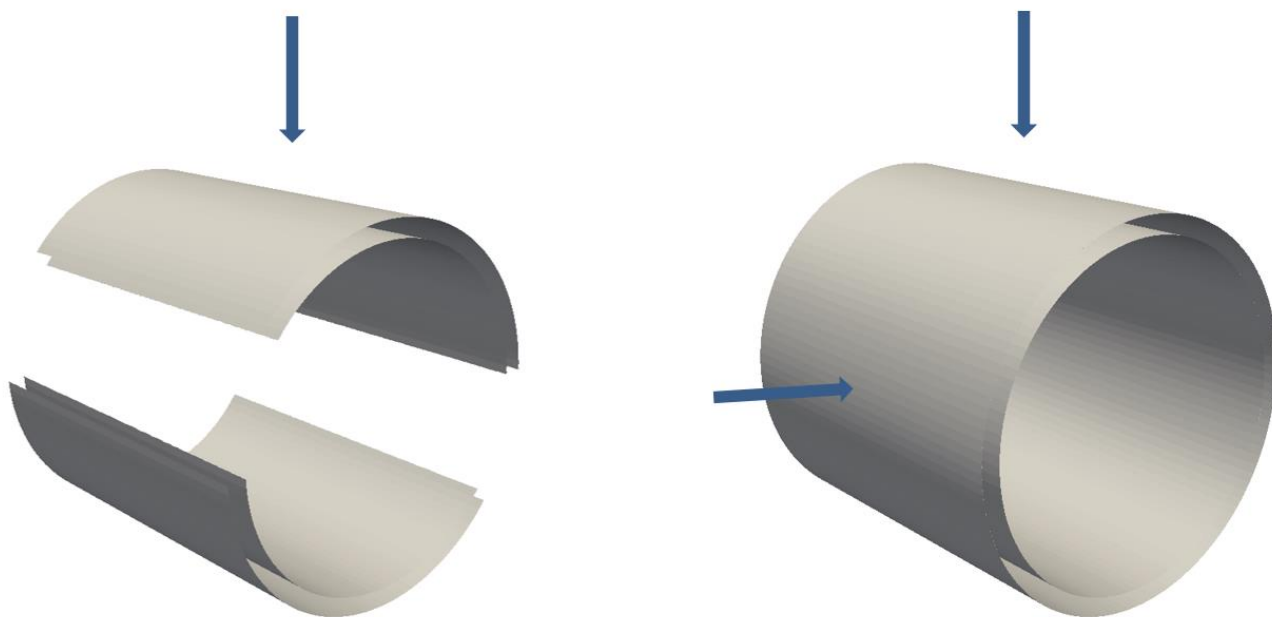
Для формирования новой поверхности и определения эпюры толщины срезаемого слоя применяют математические модели геометрии как инструмента, так и обрабатываемой поверхности детали. На каждом шаге интегрирования по времени:

- определяется толщина срезаемого слоя для каждого отрезка модели режущей кромки, основываясь на взаимном расположении этого отрезка и геометрической модели поверхности;
- производится изменение геометрической модели поверхности путём вычитания заемаемого режущей частью инструмента объёма.

Для описания геометрии обрабатываемой детали используется метод Z-буфера [6, 7, 8]. Выбирается плоскость проецирования с регулярной сеткой точек на ней, из каждой точки в направлении перпендикулярном плоскости проецирования проводится луч, и определяются все его точки пересечения с поверхностью детали. Таким образом, Z-буфер представляет собой аппроксимацию толщины детали, построенную на регулярной сетке. В местах, где касательная плоскость к поверхности составляет малый угол с направлением проецирования, наблюдается плохое качество аппроксимации (рис. 3а). Этот недостаток исключается путем использования дополнительных направлений проецирования (рис. 3б).

Режущая кромка инструмента представлена дискретной моделью в виде набора точек дискретизации, соединенных последовательностью малых прямолинейных отрезков. На каждом временном шаге производится изменение координат точек дискретизации, связанное с взаимным перемещением режущей кромки и обрабатываемой поверхности детали за счет главного движения резания и перемещения подачи

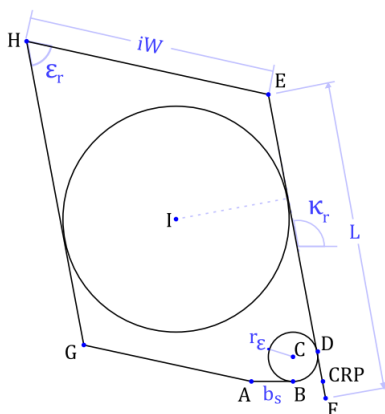




**Рисунок 3.** Поверхность, полученная при проецировании в: а - одном направлении; б - двух направлениях (стрелки указывают на направление проецирования)

Толщина срезаемого слоя в точке дискретизации режущей кромки определяется как расстояние от данной точки до обрабатываемой поверхности, измеренное по нормали к режущей кромке в ее плоскости. Таким образом, для определения толщины срезаемого слоя для каждой точки дискретизации требуется решать задачу о пересечении луча нормали к режущей кромке с моделью поверхности детали, представленной Z-буфером.

Токарный резец считается абсолютно жестким, что позволяет отказаться от рассмотрения уравнения движения инструмента. Используемая модель геометрии режущей кромки аналогична предложенной в статье [9] (рис. 4), отличие заключается в следующем: в рассмотрение вводятся лишь отрезки GA, AB, BD, DE.



**Рисунок 4.** Геометрия режущей кромки [9]

Координаты точек дискретизации режущей кромки определяются в локальной системе координат, в плоскости режущей кромки. Начало локальной системы координат располагается в т. С, ось абсцисс параллельна отрезку АВ, ось ординат направлена в сторону т. Е. Для работы геометрического алгоритма необходимо получать координаты точек дискретизации в системе координат обрабатываемой поверхности. Для перехода к новой системе координат применяется преобразование поворота (1) [9], учитывающее углы  $\gamma_f, \gamma_p$  и  $\kappa_r$  (рис. 5, рис. 6) расположения

резца на державке. Для учета главного движения режущей кромки относительно обрабатываемой детали применяется дополнительное преобразование поворота - вокруг оси заготовки [9]. Таким образом, в геометрическом алгоритме модель режущей кромки осуществляет вращение вокруг модели обрабатываемой поверхности, что обеспечивает высокую вычислительную эффективность алгоритма и в тоже время отражает реальный характер относительного движения режущей кромки и обрабатываемой поверхности.

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos(\kappa_r) & 0 & \sin(\kappa_r) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\kappa_r) & 0 & \cos(\kappa_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma_p) & -\sin(\gamma_p) \\ 0 & \sin(\gamma_p) & \cos(\gamma_p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\gamma_f) & -\sin(\gamma_f) & 0 \\ \sin(\gamma_f) & \cos(\gamma_f) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

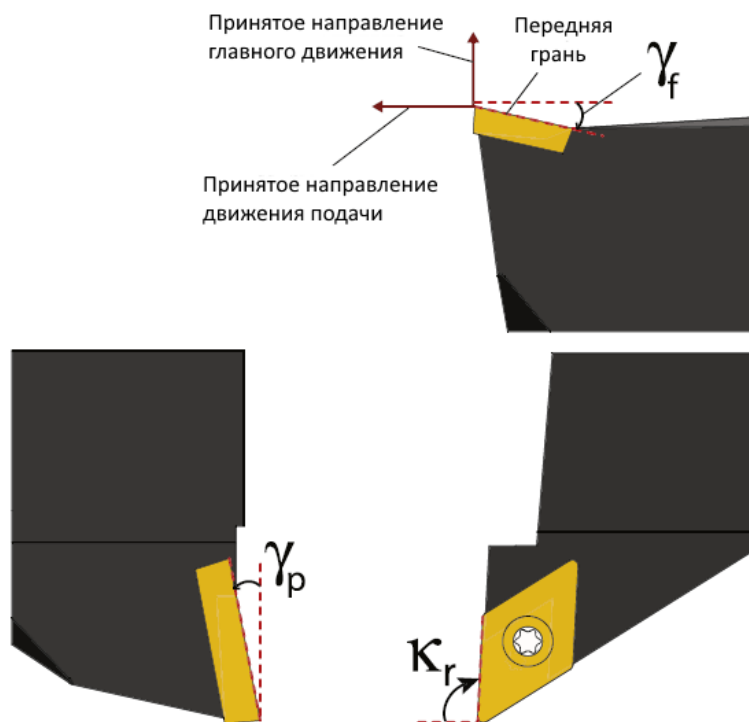
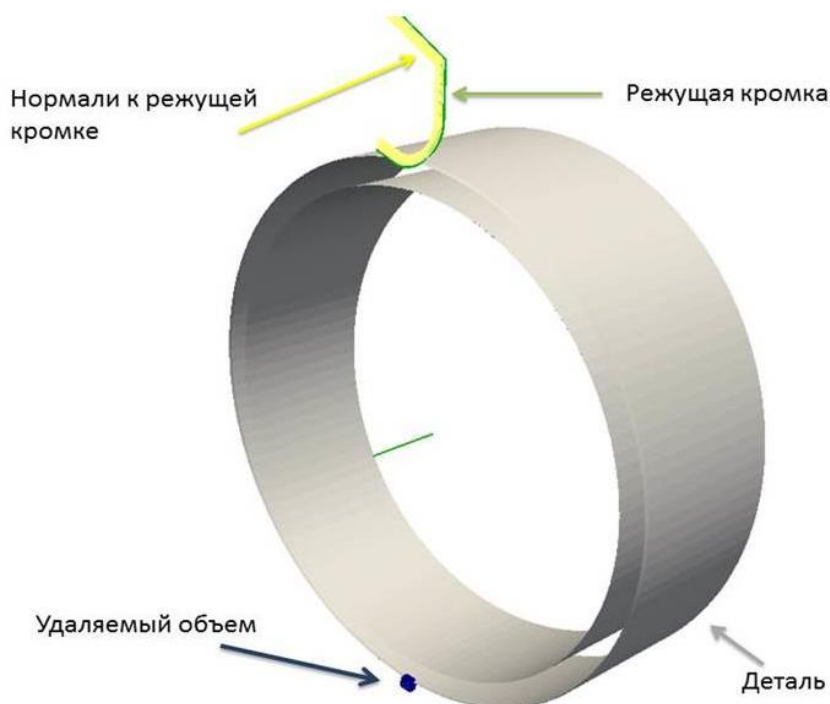


Рисунок 5. Положение резца в инструменте [9]

В работе используется экспериментально подтвержденная обобщенная модель сил резания для точения, сверления и фрезерования [9, 10]:

$$\begin{aligned} F_{ui} &= K_{uci} \cdot A_{ci} + K_{uei} \cdot S_i \\ F_{vi} &= K_{vci} \cdot A_{ci} + K_{vei} \cdot S_i \end{aligned} \quad (2)$$

где:  $F_u$  - касательная сила к передней грани режущей кромки,  $F_v$  - нормальная к передней грани сила,  $i$  - номер сегмента режущей кромки,  $A_{ci} = h_i \cdot b_i$  - площадь поверхности стружки,  $S_i = b_i / \sin(\kappa_r^*)$  - ширина срезаемого участка,  $h_i$  и  $b_i$  - местная толщина срезаемого слоя и длина участка грани режущей кромки,  $K_{uc}, K_{vc}$  - коэффициенты нормальной составляющей силы резания и силы трения,  $K_{ue}, K_{ve}$  - коэффициенты сил резания кромок для случая косоугольного резания. За счет блочной структуры алгоритма моделирования возможно применение ряда других известных моделей сил резания, в том числе с зависимостью от скорости резания.



**Рисунок 6.** Описание тестовой модели (рисунок авторов)

В качестве тестовой модели выбрана цилиндрическая оболочка длиной 200 мм, внешним диаметром 100 мм и толщиной 2 мм. Материал оболочки - сплав алюминия (Модуль упругости  $E = 7 \cdot 10^{10}$  Па, коэффициент Пуассона  $\nu = 0.33$ , плотность  $\rho = 2.78 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>). Конечно-элементная модель (рис. 7) получена с помощью комплекса Siemens NX. Коэффициенты для сил резания (2) [9]:  $K_{uc} = 429 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$ ,  $K_{vc} = 332 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$ ,  $K_{ue} = 10 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$ ,  $K_{ve} = 10 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$ .

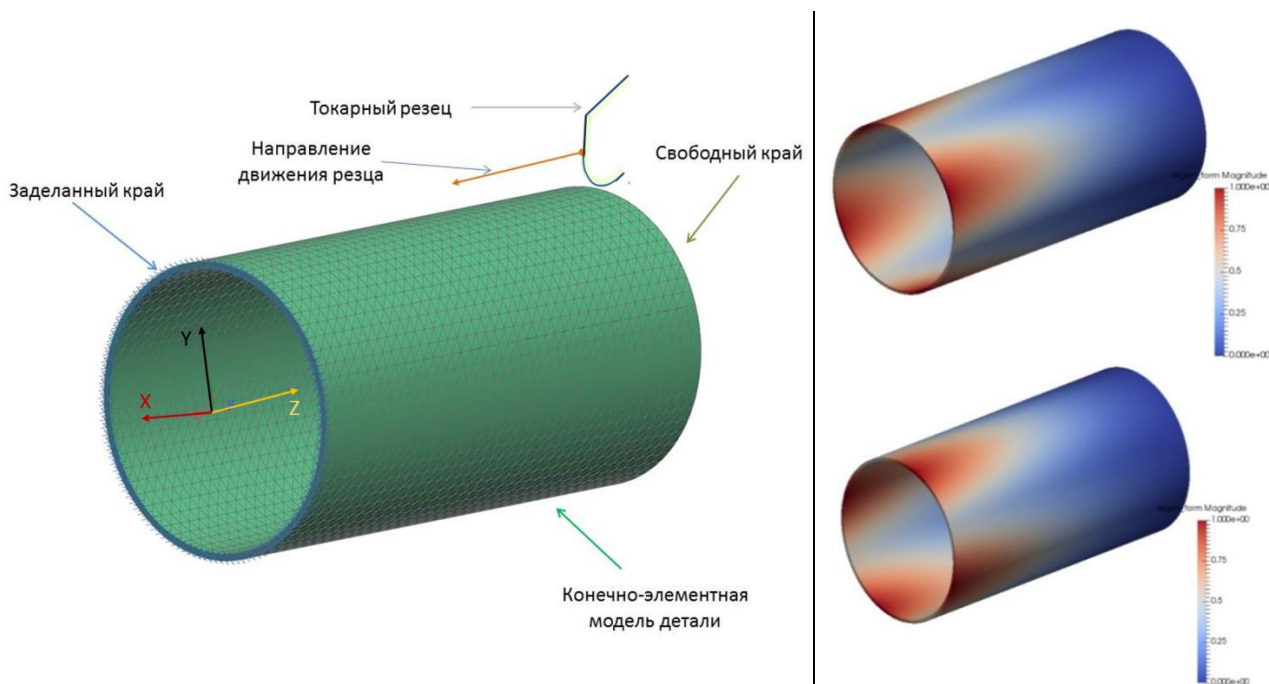
Для расчета использовался десяти-узловой тетраэдральный квадратичный объемный конечный элемент. Число элементов - 16525. Число узлов - 32254.

Ось оболочки совпадает с осью Z декартовой системы координат. Оболочка закреплена по торцу при  $z = 0$ . Инструмент движется от свободного края к заделанному.

Для решения тестовой задачи использованы следующие значения геометрических параметров инструмента:  $b_s = 10$  мм,  $\varepsilon_r = \frac{\pi}{6}$ ,  $L=20$  мм,  $r_e = 6$  мм,  $\kappa_r = \frac{2\pi}{3}$ ,  $\gamma_f = 0$ ,  $\gamma_p = 0$ .

Моделирование динамики обрабатываемой детали осуществляется с применением метода разложения по собственным формам с учетом первых двух собственных частот, которые были получены в комплексе 3DCUT [5]:  $f_1 \approx f_2 = 903$  Гц. Собственные формы, соответствующие полученным собственным частотам приведены на рис. 7. Учет только 2-х низших собственных частот заготовки обусловлен тестовым характером задачи, при выполнении реальных расчетов может потребоваться рассмотрение большего числа собственных частот. В данной работе не рассматривается влияние снятия припуска на собственные частоты заготовки, а также влияние на динамику детали гироскопических эффектов, вызванных ее вращением. Оба эффекта планируется учесть при проведении дальнейших исследований.





**Рисунок 7.** Конечно-элементная модель заготовки (слева), собственные формы соответствующие первым двум собственным частотам (справа) (рисунок авторов)

Частота вращения детали является одним из основных параметров, определяющих вибрации при точении. Для расчета используется параметр  $p$ , связанный со скоростью вращения детали следующим образом

$$p = \frac{f_1}{n_z \omega / 60}$$

где:  $f_1$  - первая собственная частота заготовки,  $n_z$  - число режущих кромок, при точении  $n_z = 1$ ,  $\omega$  - скорость вращения обрабатываемой детали.

Решение задачи проводится в комплексе 3DCUT для диапазона скоростей вращения детали  $\omega = 6450 \dots 5760$  об/мин (таблица 1).

**Таблица 1**

**Параметры задачи (составлено авторами)**

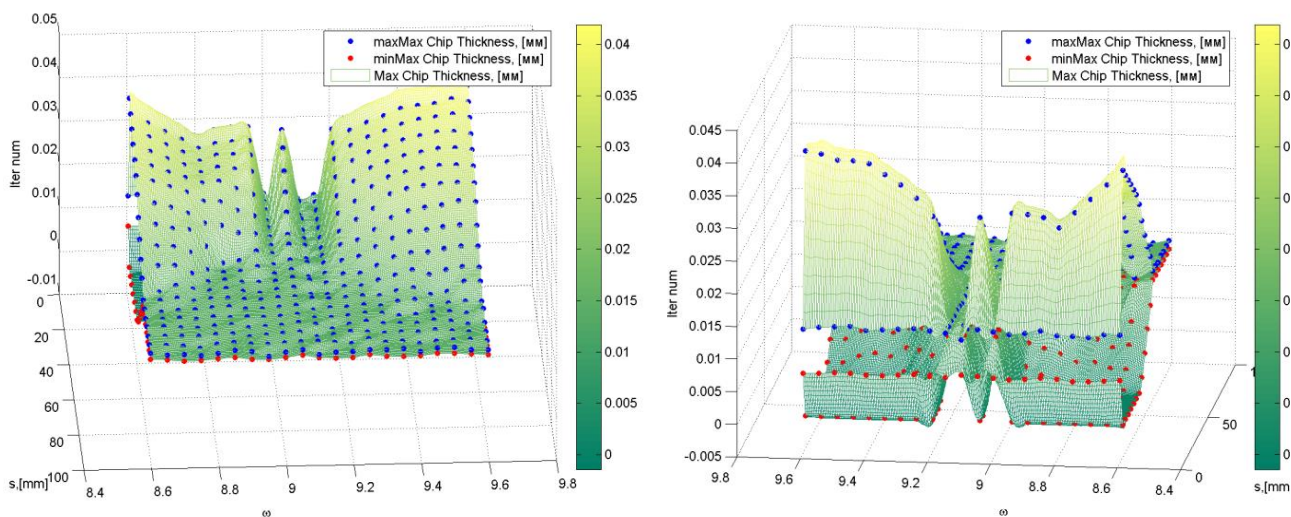
Безразмерный параметр скорости начальный	$p = 8.4$	Глубина резания	$r = 0.3$ мм
Безразмерный параметр скорости конечный	$p = 9.4$	Осевая подача	$s = 0.05$ мм/об
Шаг изменения безразмерного параметра скорости вращения	0.05	Модальное демпфирование, в долях от критического	0.03

**Результаты**

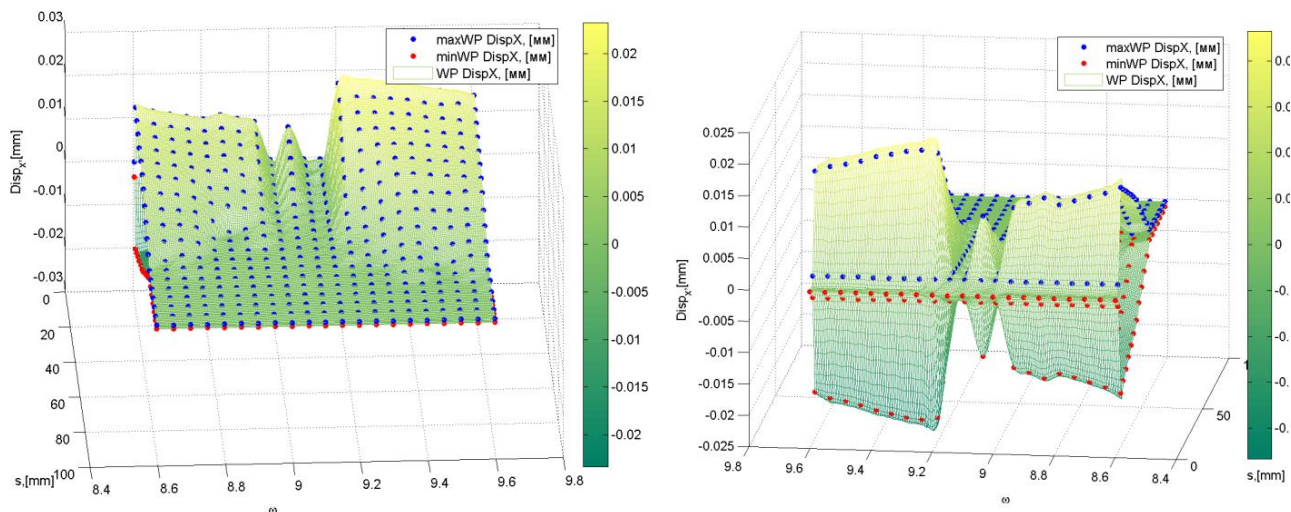
Для общего анализа результатов многовариантного моделирования динамики течения цилиндрической оболочки (с различными скоростями вращения детали (таблица 1)) в программе 3DCUT используется огибающая максимальных и минимальных амплитуд перемещений, усилий резания и толщин срезаемого слоя. Построение огибающих проводится следующим образом: временные реализации перемещений, усилий резания и толщин

срезаемого слоя, полученные в результате многовариантного моделирования, делятся на равное количество отрезков по длине маршрута обработки; после чего, в окрестности границ отрезков, определяются максимальные и минимальные значения среди экстремумов соответствующих реализаций и откладываются на диаграмме. На рис. 8 - рис. 12 представлены огибающие максимальных и минимальных амплитуд толщин срезаемого, компонент перемещений детали и компонент усилий резания.

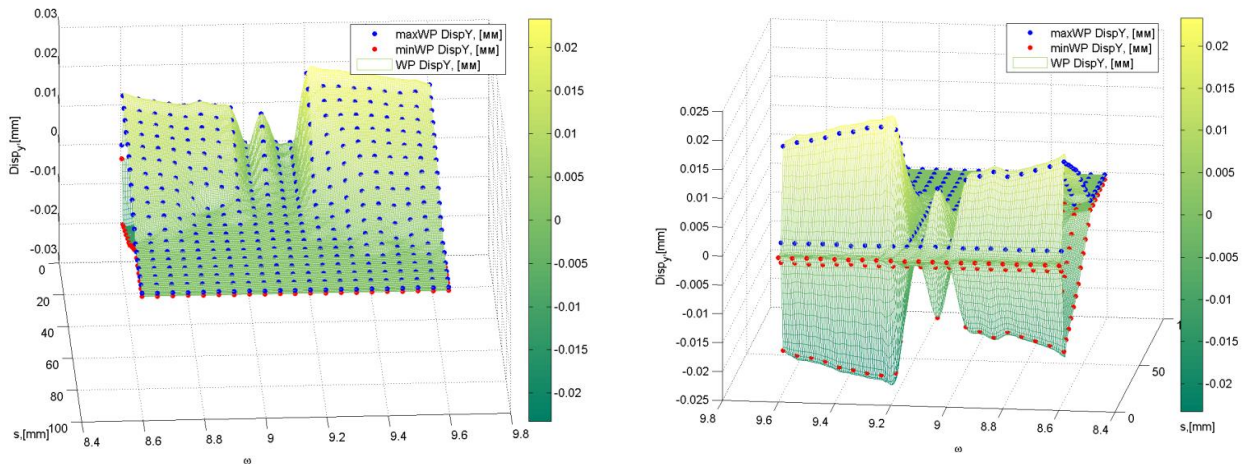
В случаях, когда расчётные значения амплитуд колебаний детали достигают недопустимо больших значений, они ограничиваются величиной 1 мм.



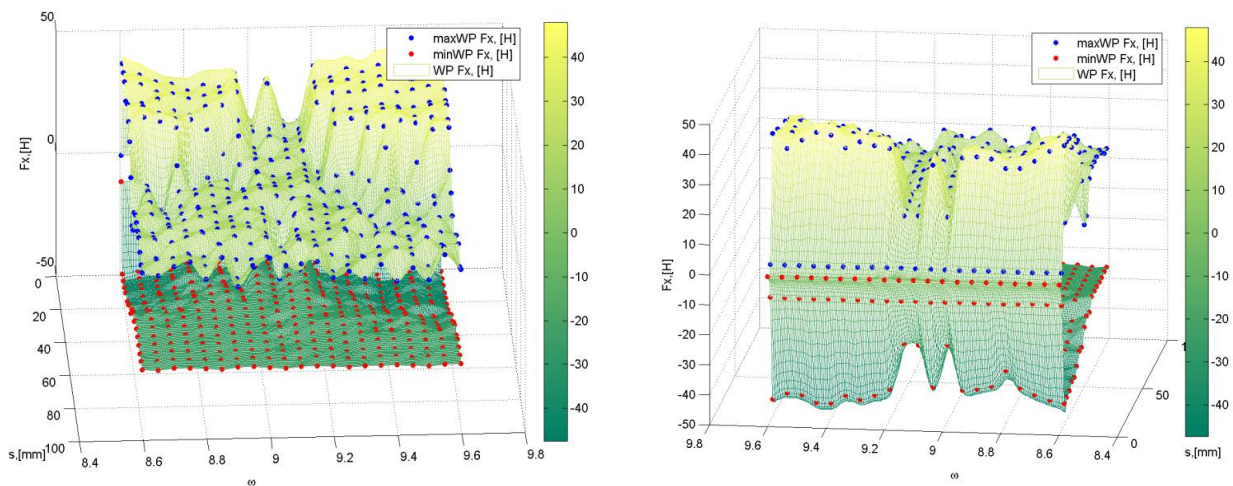
**Рисунок 8.** Огибающая толщин срезаемого слоя (рисунок авторов)



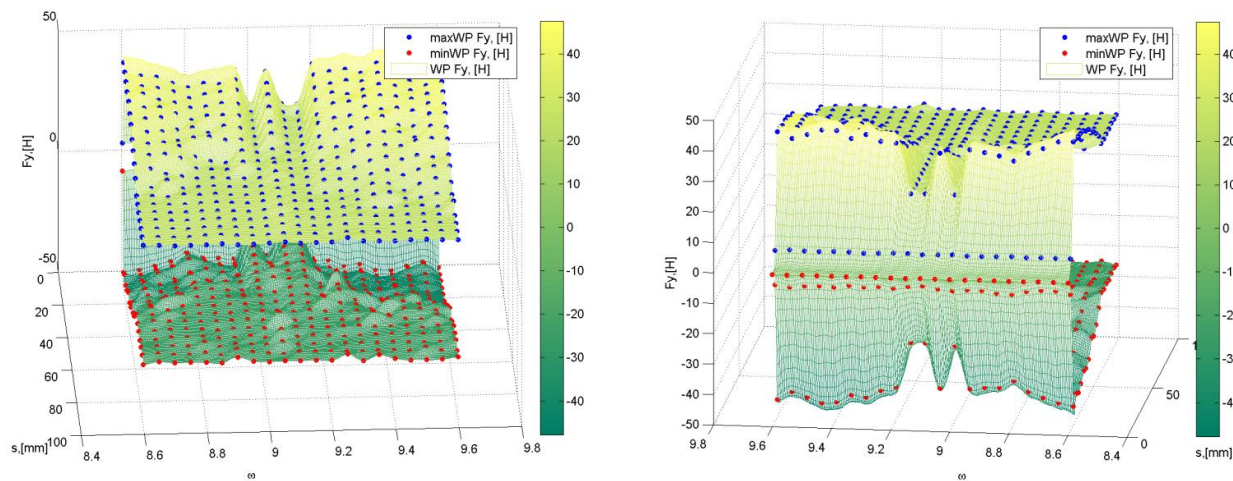
**Рисунок 9.** Огибающая перемещений детали в направлении оси X (рисунок авторов)



**Рисунок 10.** Огибающая перемещений детали в направлении оси Y (рисунок авторов)



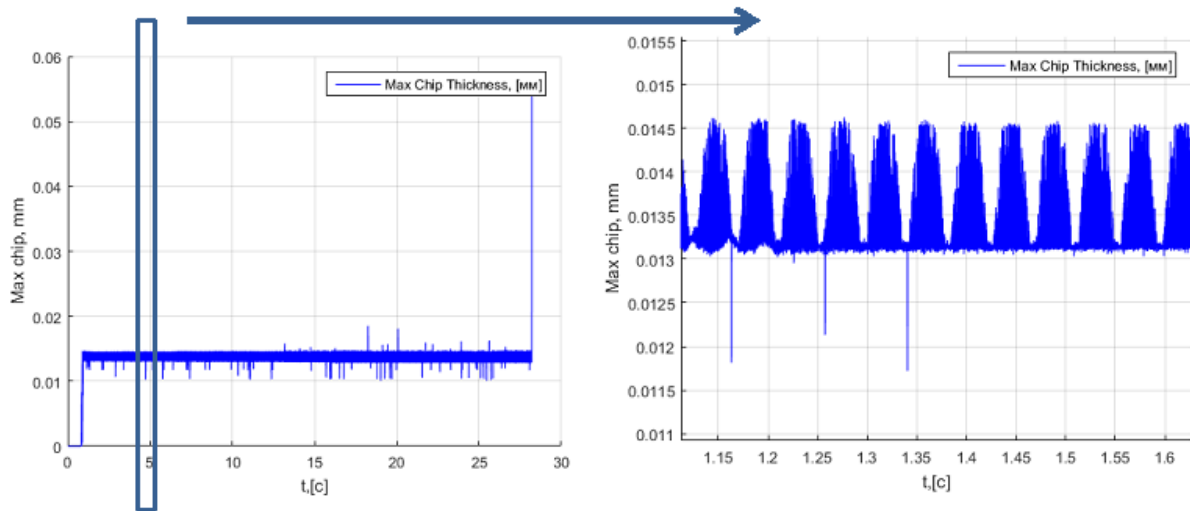
**Рисунок 11.** Огибающая усилий резания в направлении оси X (рисунок авторов)



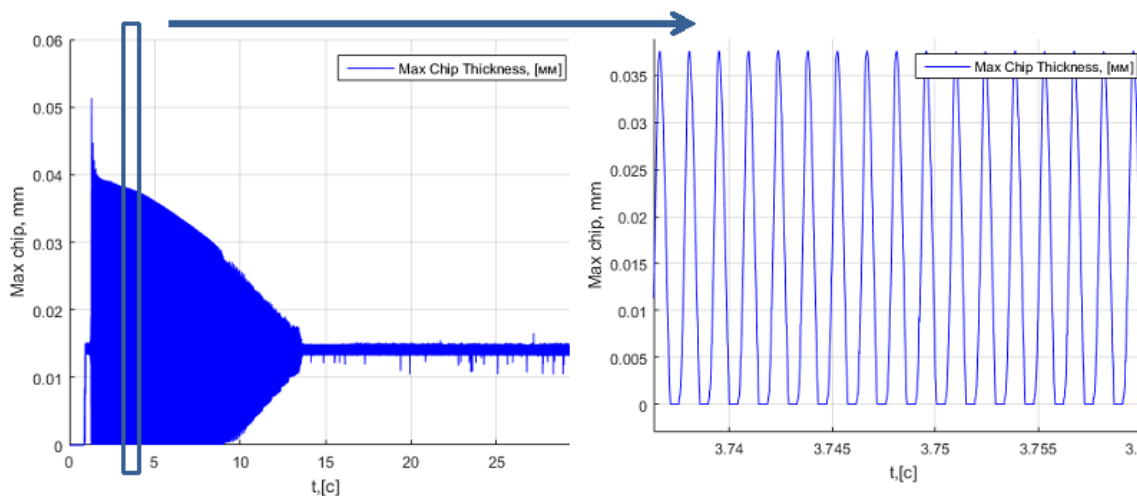
**Рисунок 12.** Огибающая усилий резания в направлении оси Y (рисунок авторов)

На диаграммах (рис. 8 - рис. 12) видно, что режимы  $p = 9.15$ ,  $p = 9.10$  и  $p = 9.00$  наиболее благоприятные, амплитуды значительно ниже, чем при остальных скоростях вращения заготовки. Рассмотрим два режима  $p = 9.10$  и  $p = 9.50$ . Для выбранных режимов приведены графики максимумов толщины срезаемого слоя вдоль режущей кромки, сил резания и перемещений точки детали в зоне резания в зависимости от времени в системе координат

(рис. 7) вращающейся вместе с деталью (рис. 13 - рис. 17), а также трехмерные визуализации обработанных поверхностей (рис. 20, рис. 19). Под перемещением детали будем понимать перемещение узла ее конечно-элементной модели, с наименьшим расстоянием до точки дискретизации режущей кромки, в которой толщина срезаемого слоя максимальна на шаге интегрирования по времени.



**Рисунок 13.** Временная реализация максимума толщины срезаемого слоя вдоль режущей кромки при  $p = 9.10$  (рисунок авторов)



**Рисунок 14.** Временная реализация максимума толщины срезаемого слоя вдоль режущей кромки при  $p = 9.50$  (рисунок авторов)

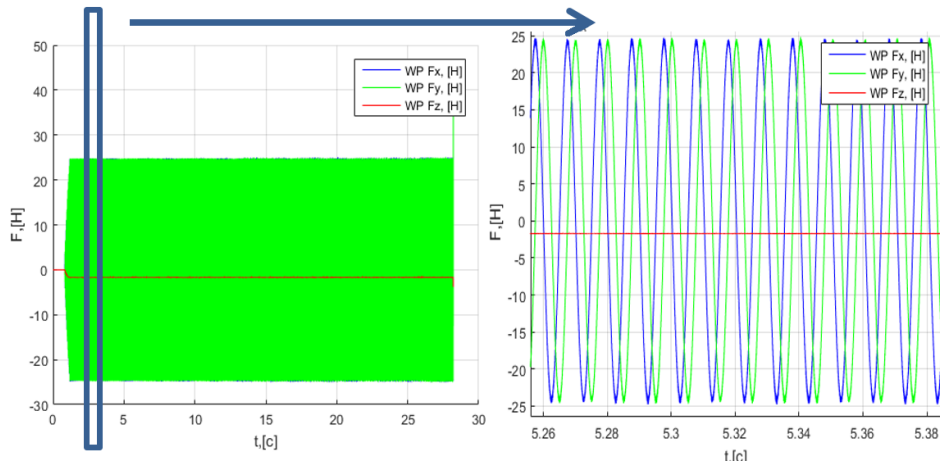


Рисунок 15. Временная реализация сил резания в системе координат детали при  $\rho = 9.10$  (рисунок авторов)

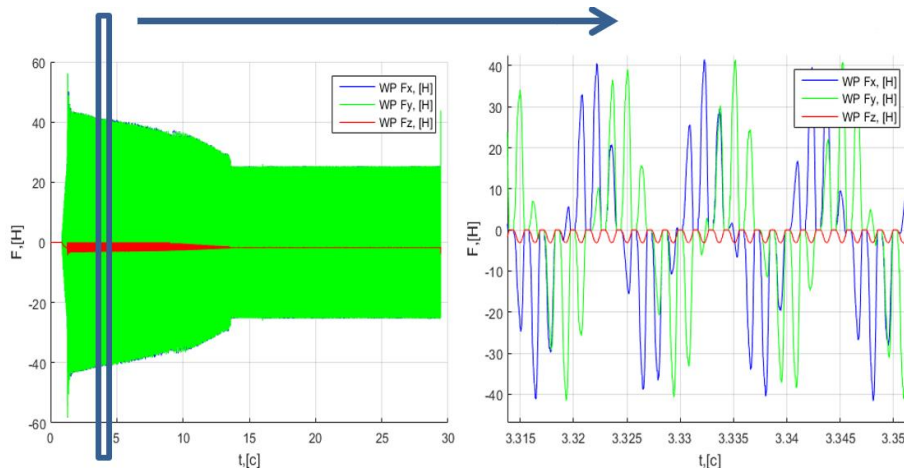


Рисунок 16. Временная реализация сил резания в системе координат детали при  $\rho = 9.50$  (рисунок авторов)

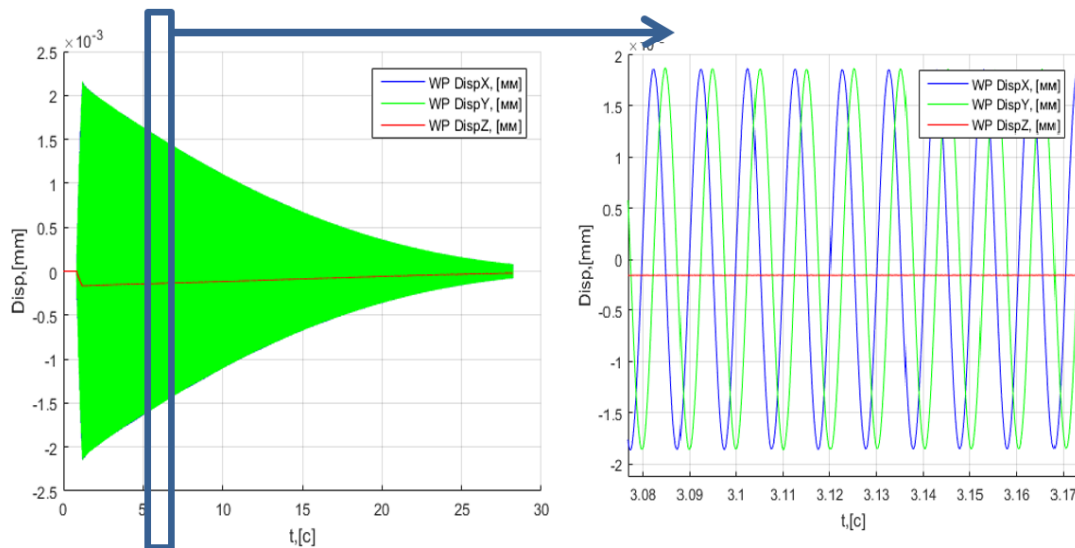
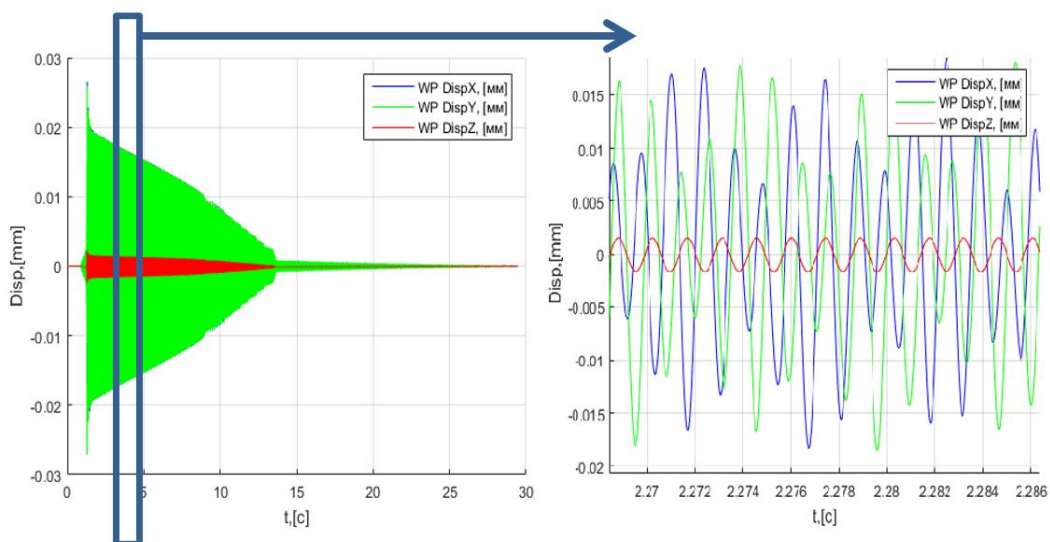


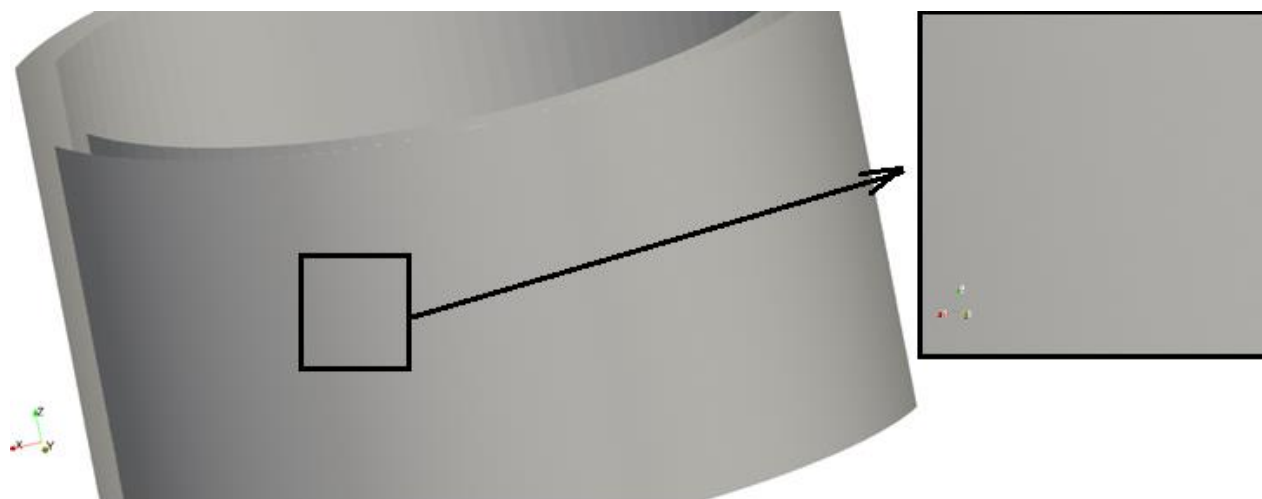
Рисунок 17. Временная реализация перемещений для точки детали в зоне резания в системе координат детали при  $\rho = 9.10$  (рисунок авторов)



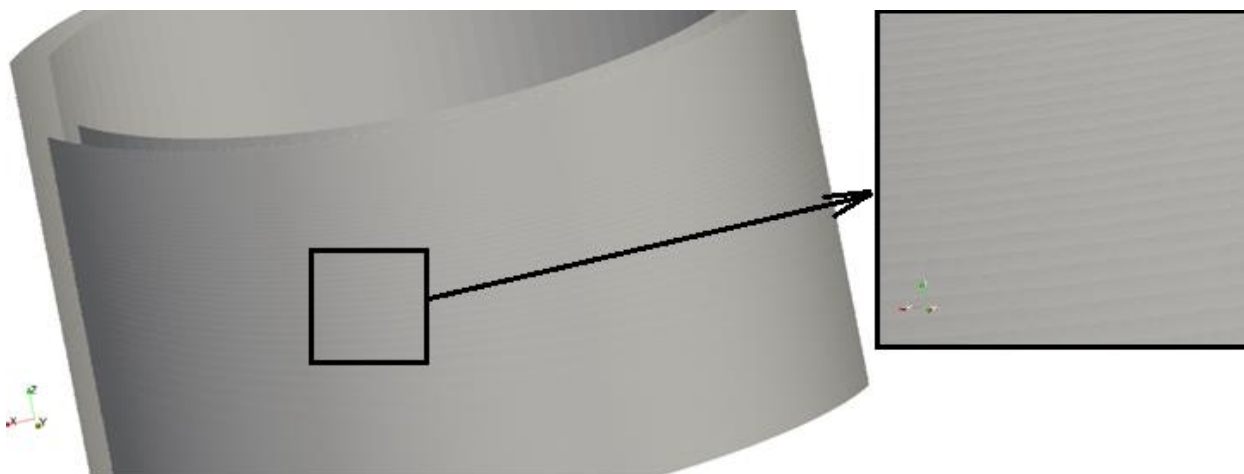
**Рисунок 18.** Временная реализация перемещений для точки детали в зоне резания в системе координат детали при  $p = 9.50$  (рисунок авторов)

Рассмотрим результаты, полученные для режима  $p = 9.10$ . На рис. 13 наблюдается непрерывное резание. Выбросы на графиках (рис. 13) не оказывают существенного влияния на результаты моделирования и являются следствием дискретной модели поверхности и режущей кромки. Улучшения результатов можно добиться путем увеличения числа участков разбиения режущей кромки и дискретизации поверхности. На рис. 17 можно отметить плавное уменьшение амплитуд вибраций при перемещении резца от свободного к заделанному краю, что связано с изменением жесткости системы.

Существенно отличается картина, полученная для режима обработки  $p = 9.50$ . На рис. 18 видно, что сразу после врезания инструмента возбуждаются вибрации с высокой амплитудой, многократно превышающей амплитуду колебаний при режиме  $p = 9.10$ . В отличие от графика, представленного на рис. 13, на рис. 14 можно заметить прерывание резания. По мере возрастания жесткости оболочки в зоне резания при приближении к заделке, амплитуда колебаний уменьшается. В моменты времени, соответствующие 9 с и 14 с., происходит резкая смена характера динамического поведения системы. На 9-ой секунде прекращается прерывание резания, но продолжает реализовываться автоколебательный характер движения системы с постепенным снижением амплитуды вибраций. На 14 секунде прерывание резания резко прекращается и ступенчато снижается амплитуда вибраций - динамическая система проходит через точку бифуркации и возвращается к регулярному процессу резания.



*Рисунок 19. Обработанная поверхность при  $p = 9.10$  (рисунок авторов)*



*Рисунок 20. Обработанная поверхность при  $p = 9.50$  (рисунок авторов)*

В зависимости от режима обработки динамическое поведение системы оказывает различное влияние на форму обработанной поверхности детали. На рис. 20 видны вибрационные отметины для неблагоприятного режима обработки с  $p = 9.50$ . На рис. 19, при благоприятном режиме обработки с  $p = 9.10$ , поверхность гладкая, без следов вибраций обрабатываемой детали.

### Заключение

В данной статье рассмотрена модель динамики точения в трехмерной постановке, включающая алгоритм геометрического моделирования, феноменологическую модель сил резания и конечно-элементную модель динамики обрабатываемой детали. В качестве результатов моделирования могут быть получены реализации сил резания, вибраций детали в зоне обработки, мгновенных значений толщины срезаемого слоя в зависимости от времени, а также форма обработанной поверхности с учетом влияния вибраций. Представленные результаты многовариантного решения тестовой задачи обработки цилиндрической оболочки точением в виде трехмерных отображений сил, перемещений и толщины срезаемого слоя в зависимости от скорости вращения оболочки и координаты вдоль траектории обработки позволяют выбрать благоприятные режимы точения, сопровождающиеся приемлемым уровнем вибраций и качеством обработанной поверхности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. R.N. Arnold, The mechanism of tool vibration in the cutting of steel, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 154 - 1946. - P. 261-284.
2. E. Turkes, S. Orak, S. Neseli, Linear analysis of chatter vibration and stability for orthogonal cutting in turning // Journal of Refractory Metals and Hard Materials - 2011. - P. 163-169.
3. G. Totis, M. Sortino. Robust Analysis of Stability in Internal Turning // Proceda Engineering. - 2014. - Vol. 69. - P. 1306-1315.
4. N.K. Chandiramani, T. Pothala. Dynamics of 2-dof regenerative chatter during turning // Journal of Sound and Vibration. - 2006. - Vol. 290. - P. 448-464.
5. Киселев И.А. Моделирование динамики процесса фрезерования тонкостенных сложнопрофильных деталей. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук // Москва, 2013. - 243 с.
6. Fussel B.K., Jerard R.B., Hemmett J.G. Modeling of cutting geometry and forces for 5-axis sculptured surface machining // Computer-Aided Design. 2003. V. 35, №4. P. 333-346.
7. Киселев И.А. Геометрический алгоритм 3MZBL для моделирования процессов обработки резанием. Методика описания поверхности заготовки // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2012. №6. С. 158-175.
8. Воронов С.А., Киселев И.А. Геометрический алгоритм 3MZBL для моделирования процессов обработки резанием. Алгоритм изменения поверхности и определения толщины срезаемого слоя // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2012. №6. С. 70-83.
9. Y. Altintas, Z.M. Kilic. Generalized dynamic model of metal cutting operations, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2013, vol. 62, pp. 47-50.
10. M. Kaymakci, Z.M. Kilic, Y. Altintas. Unified cutting force model for turning, boring, drilling and milling operations // International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2012, vol. 54-55, pp. 34-45.



**Koloskova Anna Vladimirovna**

Bauman Moscow state technical university, Russia, Moscow  
E-mail: annaa.koloskova@gmail.com

**Kiselev Igor Alekseevich**

Bauman Moscow state technical university, Russia, Moscow  
E-mail: i.a.kiselev@yandex.ru

**Ivanov Ilya Igorevich**

Bauman Moscow state technical university, Russia, Moscow  
E-mail: ivanovilig@gmail.com

## **Modeling of the turning process dynamics, taking into the account the compliance of the workpiece**

**Abstract.** This article presents the method of chatter prediction in turning process using 3D diagrams of maximum and minimum vibrations magnitudes, cutting forces and instantaneous chip thickness along the tool path. The 3D structural dynamic module is developed; it includes a finite element model of workpiece and surface topography module, a dynamic cutting force prediction module. A numerical model simulating the turning process of thin-walled cylindrical workpieces for various spindle speed values is considered. The dynamics of the workpiece is taken into the account. The results of the modeling are 3D diagrams of maximum and minimum vibrations magnitudes, cutting forces and instantaneous chip thickness along the tool path. The comparison of the instantaneous chip thickness, cutting forces and vibrations magnitudes along the machining time and machined workpiece surface for different regimes is presented to show the dependency between the stiffness of the workpiece and dynamic stability. The results of numerical simulations predict chatter free regimes of turning process.

**Keywords:** turning process dynamics; chatter; vibration