

Набережночелнинский институт (филиал)
ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

На правах рукописи



Сунгатов Ильназ Зуфарович

ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СФЕРИЧЕСКИХ ФРЕЗ
С ВИНТОВЫМИ СТРУЖЕЧНЫМИ КАНАВКАМИ

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической и
физико-технической обработки

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Р.М. Хисамутдинов

Набережные Челны 2016

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ С ВИНТОВЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ.....	8
1.1. Классификация винтовых поверхностей.....	8
1.2. Виды профилей образующих винтовых поверхностей инструментов.....	12
1.3. Методы формообразования изделий с винтовыми поверхностями	13
1.4. Методы определения производящего профиля шлифовального круга....	15
2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ВИНТОВОЙ СТРУЖЕЧНОЙ КАНАВКИ СФЕРИЧЕСКОЙ ФРЕЗЫ ШЛИФОВАЛЬНЫМ КРУГОМ	28
2.1. Формы фрез с винтовой стружечной канавки	28
2.2. Математическое моделирование винтовой поверхности сферической фрезы	30
2.3. Определение производящего профиля и параметров установки шлифовального круга	45
2.4. Винтовое проецирование производящей поверхности шлифовального круга.....	57
2.5. Сравнение расчетного и фактического профиля образующей винтовой поверхности сферической фрезы.....	61
3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ВИНТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ СФЕРИЧЕСКОЙ ФРЕЗЫ ИНСТРУМЕНТОМ ВТОРОГО ПОРЯДКА.....	64
3.1. Компьютерное моделирование винтовой поверхности сферической фрезы и шлифовального круга.....	64
3.2. Составление алгоритма и разработка прикладной программы расчета параметров винтовой поверхности сферической фрезы.....	69
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СФЕРИЧЕСКИХ ФРЕЗ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ	74

4.1. Изготовление партии сферических фрез с одинаковым расположением винтовых стружечных канавок.....	74
4.2. Сопоставление расчетных и фактических профилей винтовой стружечной канавки.....	76
4.3. Разработка конструкции и изготовление сферической фрезы с одинаковым расположением винтовой стружечной канавки.....	84
4.4. Проведение испытаний работоспособности сферических фрез с винтовыми стружечными канавками.....	86
4.5. Экономическая эффективность применения экспериментальных сферических фрез.....	91
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	94
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	95
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	109
Приложение 1. Патенты и свидетельства.....	110
Приложение 2. Грамоты и дипломы.....	114
Приложение 3. Чертеж сферической фрезы.....	117
Приложение 4. Математическое моделирование винтовой поверхности на сфере.....	118
Приложение 5. Код программы расчета параметров образующей и направляющей винтовой поверхности на сфере, а так же результат работы программы.....	122

ВВЕДЕНИЕ

В современном машиностроении широко используются изделия со сложными поверхностями, все многообразие которых по применению в технике и технологии можно разделить на инструменты для воспроизведения подобных деталей и собственно сами детали. Зачастую инструмент имеет более сложную поверхность, чем обрабатываемая деталь. Значительную часть сложных поверхностей составляют винтовые поверхности. Среди всего многообразия инструментов с винтовой поверхностью большую группу составляют сферические фрезы, которые применяются для обработки радиусных участков корпусных деталей, штампов и литейных форм. Современная промышленность, широко использующая станки с числовым программным управлением, в настоящее время нуждается в большом количестве сферических фрез с высокой работоспособностью при минимально возможной стоимости.

Для обработки винтовых поверхностей применяют в основном шлифовальный круг, профилирование которого, при условии отсутствия подрезов и неполного формирования профиля канавок, является одной из наиболее трудоемкой задачей в инструментальном производстве в виду того, что профиль винтовой поверхности ни в одном из сечений не соответствует профилю образующей шлифовального круга. Кроме этого, для определения направляющей винтовой поверхности применяется метод пересечения сферы с прямым архимедовым геликоидом, что сама по себе является сложной поверхностью и приводит к сложным расчетам. Методы определения производящего профиля шлифовального круга разработаны для конических и цилиндрических поверхностей, в то время как наиболее общей и сложной является винтовая поверхность на сфере.

Для исключения зоны с нулевыми скоростями, существует методика проектирования и изготовления сферической фрезы с групповым расположением винтовой стружечной канавки. Однако данная конструкция имеет существенные недостатки в виде сложности в изготовлении и малого количества зубьев на торце, которое обуславливается количеством групп. Некоторые изготовители сфериче-

ских фрез с одинаковым расположением винтовой стружечной канавки зону с нулевыми скоростями избегают путем изготовления центрального отверстия на торце. В этом случае исключаются зона с нулевыми скоростями, но со временем отверстие забивается стружкой.

Таким образом, **целью научной работы** является: повышение работоспособности сферических фрез с винтовыми стружечными канавками на основе математического моделирования процесса обработки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Модернизировать математическую модель процесса формирования винтовой поверхности сферической фрезы инструментом второго порядка.

2. Разработать компьютерную модель процесса обработки винтовой поверхности сферической фрезы инструментом второго порядка, составить алгоритм, разработать прикладную программу расчета параметров винтовой поверхности сферической фрезы.

3. Исследовать профиль образующей винтовой поверхности сферической фрезы на этапе компьютерного моделирования процесса обработки и уточнение параметров взаимного расположения шлифовального круга и сферической фрезы на основе математических моделей.

4. Подтвердить адекватность математических моделей в промышленных условиях посредством изготовления опытной партии сферических фрез и сопоставления расчетных и фактических данных профилей винтовой стружечной канавки.

Научная новизна:

1. Математическая модель винтовой поверхности сферической фрезы, основанная на методе определения направляющей винтовой поверхности как следа пересечения сферы и цилиндра;

2. Методика определения производящего профиля шлифовального круга для обработки винтовых стружечных канавок на сферической фрезе.

Практическая ценность состоит в:

1. Разработанной прикладной программе расчета параметров винтовой поверхности сферической фрезы (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010612411 РФ);

2. Разработанной конструкции сферической фрезы с одинаковым расположением винтовой стружечной канавки и исключаяющей зоны с нулевыми скоростями (патент РФ на полезную модель № 90000).

Методы исследований. Для решения поставленных задач в работе использованы основные положения теории винтовых поверхностей при проектировании режущих инструментов, теории проектирования металлорежущих инструментов, технологии машиностроения, аналитической геометрии. При исследованиях применяли математическое и компьютерное аналитическое моделирование, язык программирования (Delphi 7), пакеты программ КОМПАС-3D V12 и Mathcad 14.0. Экспериментальные исследования проводили на пятикоординатном станке Michael Deckel S22p Num. Для контроля полученных результатов использовали универсально-измерительный микроскоп MEIJИ MT 7530 и профилометр 296.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель винтовой поверхности сферической фрезы.
2. Методика определения профиля образующей исходной инструментальной поверхности.

Степень надежности полученных фактических данных профиля винтовой стружечной канавки сферической фрезы обеспечиваются за счет изготовления опытной партии и статистической обработки результатов.

Реализация результатов работы. Результаты работы используются в Технологическом центре ПАО КАМАЗ в виде руководящих технических материалов и в учебном процессе Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на межрегиональной (Камские чтения, г. Набережные Челны: ИНЭКА, 2009), всероссийской (Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2009», г. Казань: КГТУ им. А.Н. Туполева, 2009) и междуна-

родных (XVI Туполевские чтения, г. Казань: КГТУ им. А.Н. Туполева, 2008; Современные технологии в машиностроении, г. Пенза: Приволжский дом знаний, 2008; XVII Туполевские чтения, г. Казань: КГТУ им. А.Н. Туполева, 2009; Образование и наука производству, г. Набережные Челны: ИНЭКА, 2010) научно-технических конференциях.

В полном объеме результаты работы были заслушаны и одобрены на расширенном заседании кафедры «Автоматизация и управление», «Системный анализ и информатика», «Информационные системы» и «Высокоэнергетические процессы и агрегаты» Отделения Энергетики и Информатизации «Конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств», «Машиностроение» Автомобильного отделения Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

По теме работы опубликовано 19 печатных работ в виде научных статей и тезисов докладов международных, всероссийских и межрегиональных научно-технических конференций, из них 8 в изданиях, рекомендованных к публикации Высшей аттестационной комиссией, получен патент на полезную модель и свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка использованной литературы и приложения. Материал изложен на 131 страницах машинописного текста, содержит 61 рисунков, 7 таблиц. Список литературы состоит из 119 наименований.

1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ С ВИНТОВЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

1.1. Классификация винтовых поверхностей

Впервые вопросы теории винтовых поверхностей при проектировании режущего инструмента и классификация винтовых поверхностей (Рисунок 1.1.) была изложена в работе В.С. Люкшина. В этой работе была рассмотрена цилиндрическая винтовая поверхность, как линейчатая, так и круговая [50]. Под винтовой поверхностью понимается поверхность, описываемая линией, которая вращается с постоянной угловой скоростью вокруг неподвижной оси и одновременно перемещается поступательно с постоянной скоростью вдоль этой оси. Винтовым движением принято считать сложное движение, которое состоит из поступательного движения, параллельного оси и одновременно вращательного движения вокруг этой оси. Любая винтовая поверхность может перемещаться по себе и посредством изгибания может быть наложена на поверхность вращения [60, 61]. При пересечении образующей ось вращения винтовую поверхность принято называть закрытой, в противном случае - открытой. По виду образующей винтовые поверхности так же бывают круговыми и линейчатыми. Кроме этого винтовые поверхности подразделяют по положению относительно винтовой оси образующей. Поверхность, образованная обыкновенным винтовым движением линии – образующей, называется обыкновенной винтовой поверхностью. Линейчатые винтовые поверхности – поверхности, образующая которых является прямой линией. При пересечении закрытой винтовой поверхности торцовой плоскостью в сечении образуется архимедова спираль или архимедов геликоид. Геликоид называют прямым при перпендикулярности оси винта прямолинейной образующей (винтовой коноид), в других случаях – косой геликоид (Рисунок 1.2.).

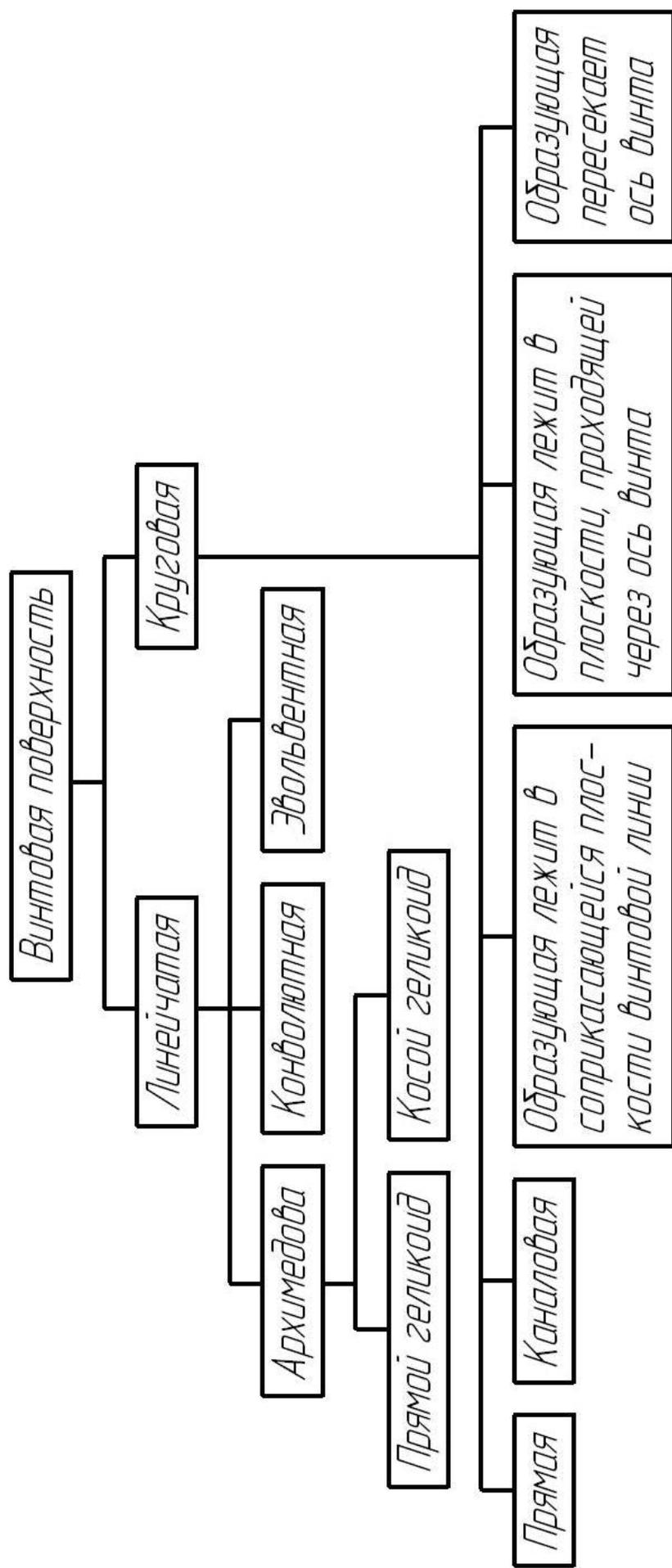


Рисунок 1.1. Классификация винтовых поверхностей

При пересечении торцевой плоскостью открытой линейчатой винтовой поверхности в сечении получается эвольвента. При обыкновенной эвольвенте поверхность называют эвольвентой, иначе, в случае, когда эвольвента удлиненная или укороченная – конволютной. Таким образом, конволютную винтовую поверхность можно считать наиболее общим случаем.

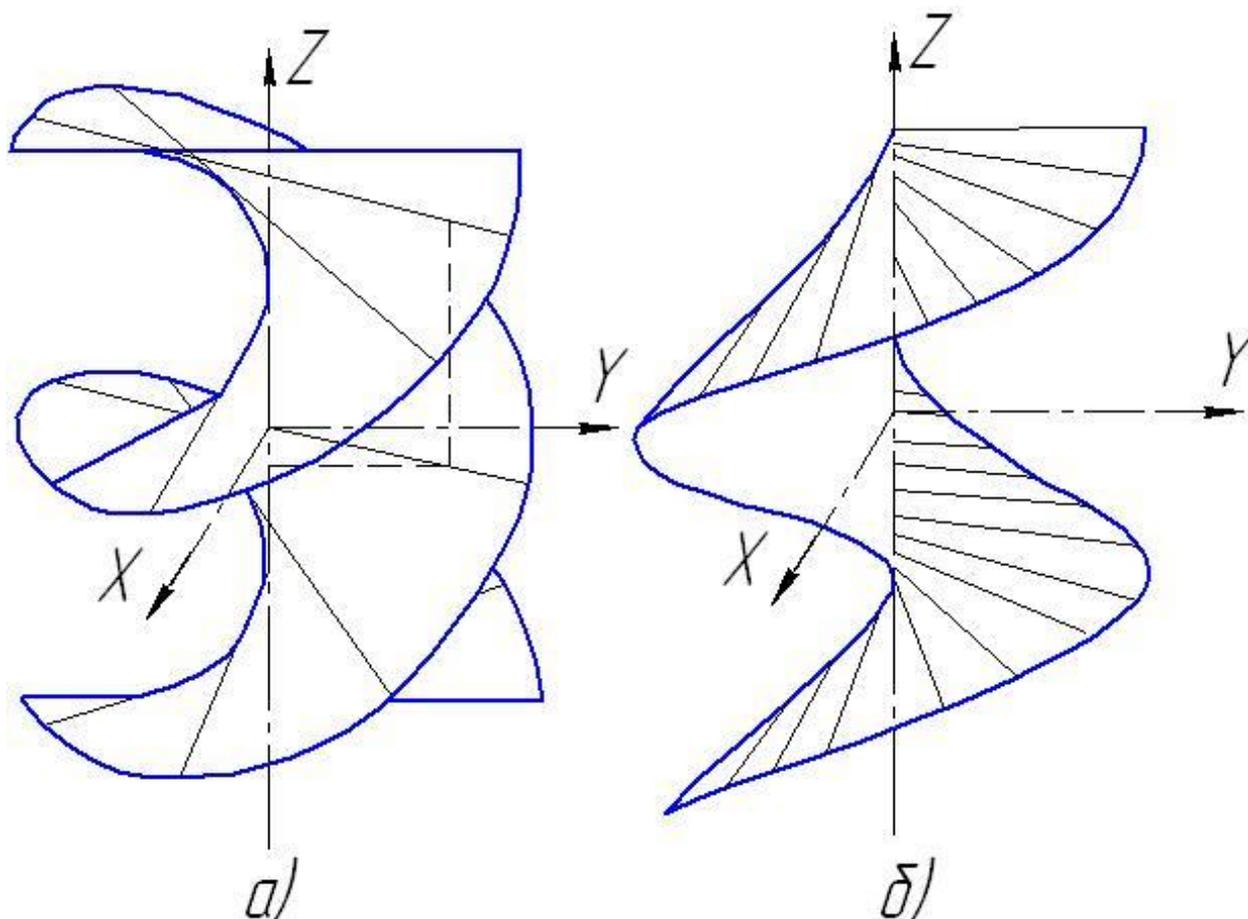


Рисунок 1.2. Геликоид (а – прямой; б – косой)

Круговые винтовые поверхности – поверхности, образующая L которых является окружность (Рисунок 1.3.). Каналовая винтовая поверхность получается при условии что поверхность, которая огибает сферу и имеет радиус в его винтовом движении. При случае перпендикулярности оси винта плоскости круга получаем винтовую поверхность прямого типа.

Сложное движение, которое состоит из вращательного движения вокруг постоянной оси и одновременно поступательного параллельно этой оси, является винтовой поверхностью с переменным шагом, которые бывают цилиндрические и конические.

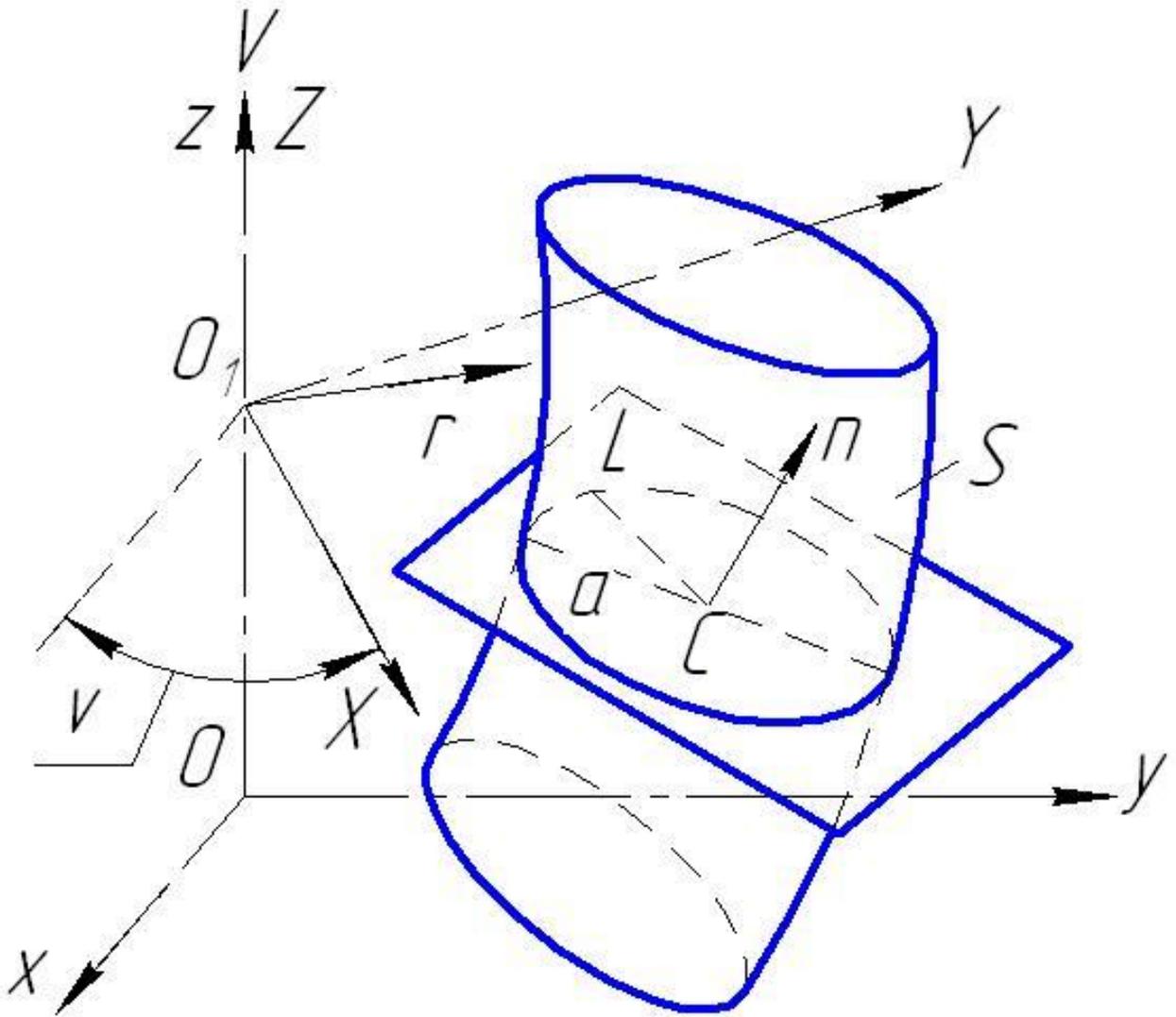


Рисунок 1.3. Круговая винтовая поверхность

Развитием работы [50] послужили работы [88, 91], в которых рассмотрена сложная винтовая поверхность, а именно винтовая поверхность на конусе. Сложные винтовые поверхности характеризуются переменной образующей и переменным шагом, к которым так же относится винтовая поверхность на сфере. Переменными параметрами являются шаг H и угол ω наклона винтовой канавки. При постоянном угле наклона изменяется шаг винтовой канавки, и, наоборот, при постоянном шаге угол наклона является переменным параметром.

1.2. Виды профилей образующих винтовых поверхностей инструментов

Профили винтовых поверхностей представленные на рисунке 1.4. используются в фрезах, например в концевых фрезах и сферических фрезах. Профили с трапецевидной спинкой (Рисунок 1.4., а), с усиленной спинкой (Рисунок 1.4., б) и параболический (Рисунок 1.4., в) используются в концевых фрезах. Профиль прямолинейный остроконечный (Рисунок 1.4., г) характерен для сферических фрез.

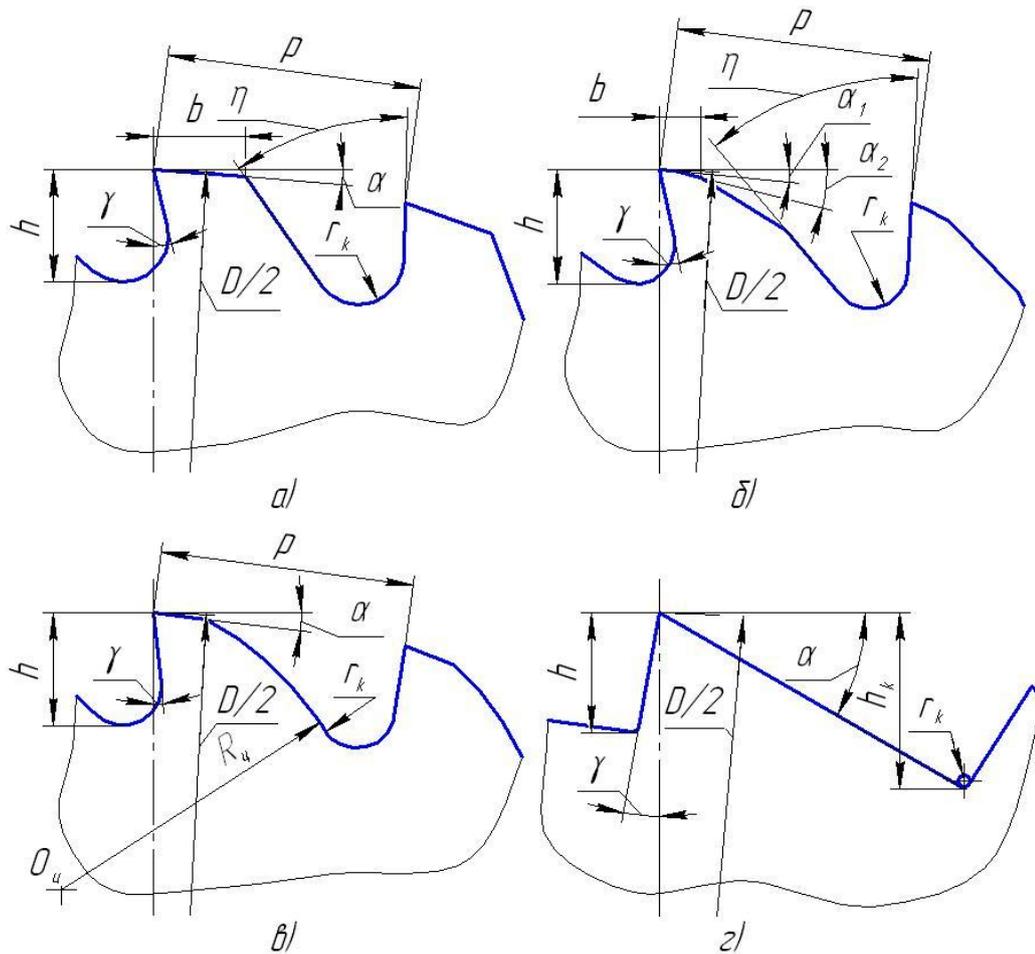


Рисунок 1.4. Профили образующих винтовых поверхностей инструментов где D – диаметр, γ и α – передний и задние углы соответственно, r_k – радиус стружечной канавки, h – высота зуба, h_k – глубина врезания, η – угол стружечной канавки, R_u – Радиус задней спинки, b – ширина задней спинки, p – шаг зубьев.

Остроконечный профиль инструмента более предпочтителен в сферических фрезах с винтовой поверхностью в связи с относительной простотой при изготовлении.

1.3. Методы формообразования изделий с винтовыми поверхностями

В случае формообразования фасонных или винтовых линейчатых поверхностей посредством фасонных или резьбовых резцов (Рисунок 1.5., *a*), резьбовых гребенок (Рисунок 1.5., *б*), метчиков (Рисунок 1.5., *в*), плашек (Рисунок 1.5., *г*), резьбонарезных головок (Рисунок 1.5., *д*) применяется метод копирования [7, 8]. В случае получения глобоидного червяка с помощью чашечного обкаточного резца (Рисунок 1.5., *e*) реализуется метод безцентроидного огибания с участием сложного обкаточного движения формообразования. Метод безцентроидного огибания, при формообразовании винтовых поверхностей, используется при обработке шлифовальным кругом. Шлифовальные круги и дисковый инструмент используют при изготовлении резьбы (Рисунок 1.5., *ж, з*), ходовых винтов (Рисунок 1.5., *и*), червяков (Рисунок 1.5., *к*), при шлифовании на концевых и цилиндрических фрезах стружечных канавок (Рисунок 1.5., *л*), при обработке сверл и метчиков (Рисунок 1.5., *м*). При обработке зубчатых цилиндрических колес с косыми (винтовыми) зубьями и цилиндрических червяков используются шлифовальные круги модульные пальцевые фрезы (Рисунок 1.5., *н*), многониточные гребенчатые фрезы при фрезеровании (Рисунок 1.5., *о*) и многониточные шлифовальные круги используются при шлифовании (Рисунок 1.5., *п*) коротких резьб.

В перечисленных случаях метод безцентроидного огибания осуществляется с участием 2-х формообразующих движений винтового движения и вращения инструмента. При этом профиль винтовой поверхности и профиль производящей поверхности различны, что подразумевает решение задачи определения профиля производящей поверхности шлифовального круга.

Наиболее производительным и распространенным методом обработки винтовых поверхностей изделий является шлифование дисковым кругом (Рисунок 1.5., *ж, з, и, к*).

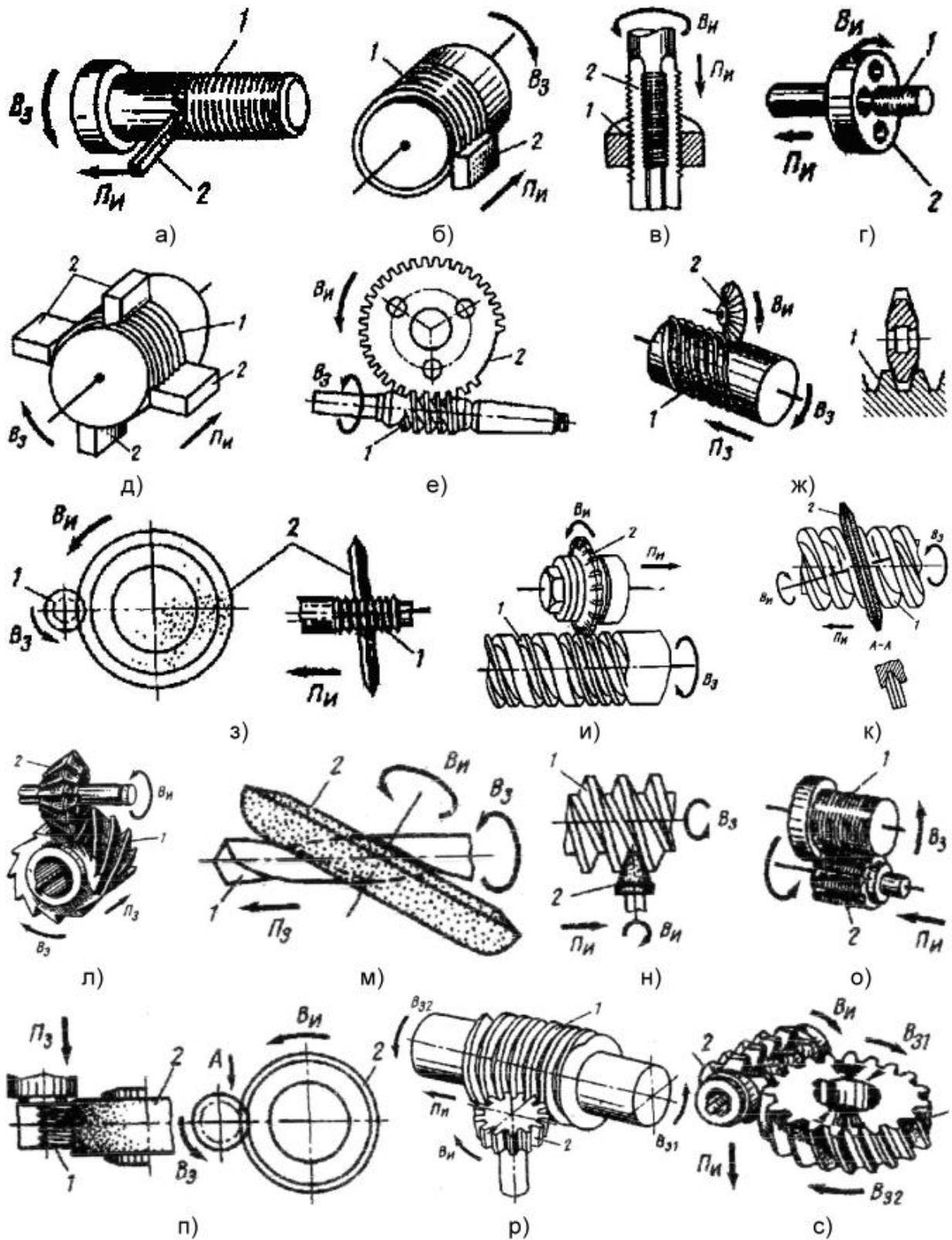


Рисунок 1.5. Схемы формирования винтовых поверхностей:
 где 1 - образуемая на заготовке поверхность, 2 - режущий инструмент.

1.4. Методы определения производящего профиля шлифовального круга

Одним из ключевых этапов профилирования шлифовального круга является определение производящего профиля шлифовального круга. Этим вопросам посвящены работы советских, российских и зарубежных ученых М.М. Абдреева [1], А.Н. Борисова [4, 5], С.В. Борисова [6], А.Э. Волкова [10], Г.И. Грановского [13, 14], В.А. Гречишникова [19, 20], Ф.С. Дихтяря [27], М.В. Жуплов [33], С.Ю. Илюхина [35], Г.Г. Иноземцева [38], В.В. Истоцкого [40], Г.Н. Кирсанова [42], А.Г. Кондрашова [45], С.И. Лашнева [47], В.С. Люкшина [50], А.В. Передерия [56], В.А. Перепелицы [57], С.М. Петрова [58], Ю.Е. Петухова [59], С.П. Радзевича [62, 63], П.Р. Родина [64, 65], Г.Н. Сахарова [67], С.Д. Сметанина [70], Ю.С. Степанова [71], В.Б. Ступко [72], А.И. Фасхутдинов [74], Р.М. Хисамутдинова [76], Н.А. Чемборисова [88, 91], В.Г. Шаламова [94], Г.И. Шевелевой [95], Н.Н. Щеголькова [98], И.А. Щурова [100], М.И. Юликова [102], Ф.С. Юнусова [107, 111], С.Ю. Юрасова [113].

Все методы определения производящего профиля шлифовального круга сводятся к 2-м группам методов или их комбинации: методы, которые используют дифференциальную геометрию и те, которые не используют их [35]. К аналитической группе относятся методы: общих нормалей, общих касательных, с использованием пространственной линии [4, 5, 27, 33, 38, 42-44, 46, 47-49, 57, 62, 63, 64-66, 94, 96-98, 101, 102, 107, 113, 114]. Вторую группу графоаналитических методов обычно называют «метод совмещенных сечений» [6, 10, 12, 15-24, 26, 34-37, 58, 59, 95, 99, 100].

К методу относящейся к первой группе, использующей дифференциальную геометрию, относится метод общих нормалей. Суть данного метода состоит в том, что осуществляется поиск общих нормалей в мгновенной линии контакта производящей поверхности шлифовального круга и винтовой поверхности. Данный метод рассмотрел в своих работах Г.Н. Кирсанов [42] (Рисунок 1.6.). Расположение P_o относительно оси детали, определяется как расстояние между a и углом α :

$$p = atg\varepsilon = A_o tg\alpha, \quad (1.1)$$

$$\begin{cases} x_0 = n \cos(\varphi - \psi) + (z'_0 \operatorname{tg} \nu + m) \sin(\varphi - \psi); \\ y_0 = n \sin(\varphi - \psi) + (z'_0 \operatorname{tg} \nu + m) \cos(\varphi - \psi); \\ z_0 = z'_0 + p\varphi. \end{cases} \quad (1.2)$$

где z'_0 – координата текущей точки; φ – угловой параметр; $\nu = \operatorname{arctg}(p/n)$ – угол скрещивания.

Выражение необходимое для нахождения точки запишется как

$$n_1 \sin \varphi + n_2 \cos \varphi - n_3 \varphi \sin \varphi + n_4 \varphi \cos \varphi - n_5 = 0, \quad (1.3)$$

где $n_1 = \sin \psi (n \operatorname{tg} \alpha + p \operatorname{tg} \nu) + m \operatorname{tg} \alpha \cos \psi$, $n_2 = \cos \psi (n \operatorname{tg} \alpha + p \operatorname{tg} \nu) - m \operatorname{tg} \alpha \sin \psi$,
 $n_3 = p \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \nu \cos \psi$, $n_4 = p \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \nu \sin \psi$, $n_5 = p + p \operatorname{tg} \alpha$.

Решением (1.3) является уравнение расчета значений корней

$$\varphi_{n+1} = \varphi_n - \frac{(n_1 + n_3 \varphi_n) \sin \varphi_n + (n_2 + n_4 \varphi_n) \cos \varphi_n - n_5}{(n_1 + n_4 - n_3 \varphi_n) \cos \varphi_n - (n_2 + n_3 - n_4 \varphi_n) \sin \varphi_n}. \quad (1.4)$$

Координаты точек, которые принадлежат проиводящему профилю шлифовального круга, определяются системы уравнений:

$$\begin{cases} x_u = n \cos(\varphi - \psi) + m \sin(\varphi - \psi) - A_\omega; \\ y_u = -p\varphi \sin \varepsilon - \cos \varepsilon [-m \cos(\varphi - \psi) + n \sin(\varphi - \psi)]; \\ z_u = -p\varphi \cos \varepsilon + \sin \varepsilon [-m \cos(\varphi - \psi) + n \sin(\varphi - \psi)]. \end{cases} \quad (1.5)$$

На основе рассмотренного метода Н.Н. Щегольковым [98] разработан итерационный метод. Смысл метода заключается в том, что задавшись положением торцового сечения, определяют значение отклонения проекции нормали (Рисунок 1.7.).

Метод общих касательных основан на том же принципе, что и методе общих нормалей. Метод изложен в работе С.И. Лашнева [47], который в свою очередь, основан на графоаналитическом методе В.М. Воробьева [11]. Винтовая поверхность описывается уравнениями

$$\begin{cases} x = r \sin(\varphi_0 + \varphi); \\ y = r \cos(\varphi_0 + \varphi); \\ z = p\varphi. \end{cases} \quad (1.6)$$

где φ – угол поворота; r , φ_0 – параметры, определяющие положение точки.

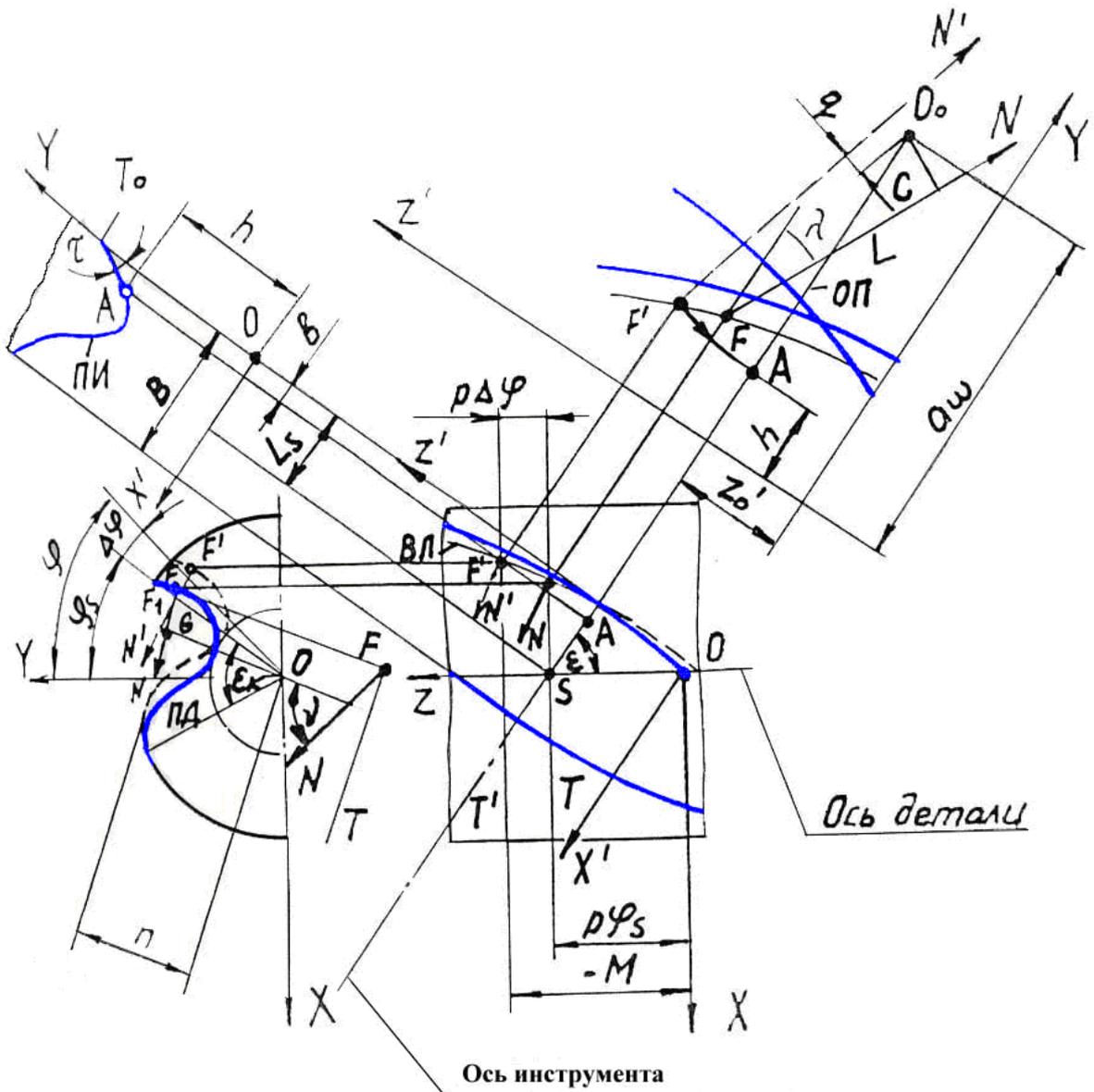


Рисунок 1.7. Расчетная схема итерационного метода общих нормалей

Начало инструментальной системы координат $X_u Y_u Z_u - O_u$ совпадает с точкой скрещивания осей инструмента и заготовки S . Ось X_u направлена по кратчайшему расстоянию между осями инструмента Y_u и заготовки Z . Ось Z_u перпендикулярна координатной плоскости $O_u X_u Y_u$ (Рисунок 1.8.) [91]. Уравнение винтовой поверхности в системе координат инструмента принимает вид

$$\begin{cases} x_u = A_w - r \sin \mu; \\ y_u = r \cos \mu \sin \varepsilon + p \varphi \cos \varepsilon; \\ z_u = p \varphi \sin \varepsilon - r \cos \varepsilon \cos \mu. \end{cases} \quad (1.7)$$

где $\mu = \varphi_0 + \varphi + \psi$; ψ – угол между осью Y и координатной плоскостью $O_u Y_u Z_u$ в плоскости OXY .

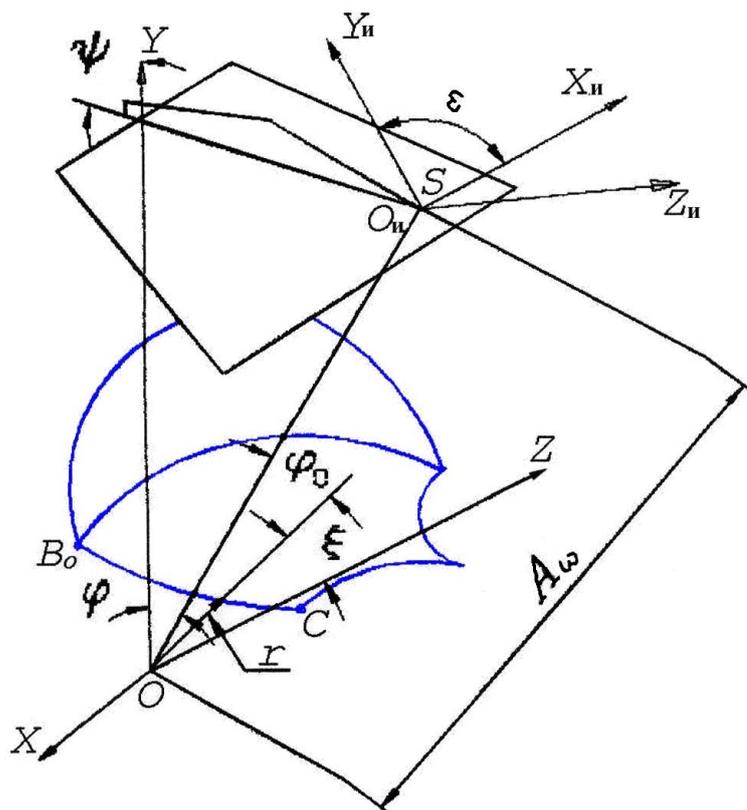


Рисунок 1.8. Расчетная схема метода общих касательных

Характеристика определяется решением уравнения:

$$\frac{p\varphi \sin \varphi - r \cos \mu \cos \varepsilon}{A_\omega - r \sin \mu} = \operatorname{tg} \omega \sin \varepsilon \cos \mu + (\operatorname{tg} \omega \sin \varepsilon \sin \mu - \cos \varepsilon) \operatorname{tg}(\mu + \zeta), \quad (1.8)$$

где ζ – угол между нормалью к отрезку и направлением радиуса, рад.

Задавшись положением точек на профиле винтовой поверхности целесообразно вычислить параметр φ . Далее можно выявить координаты точек профилирующей поверхности дискового инструмента

$$\begin{cases} x_u = A_\omega - r \sin \mu; \\ r = \frac{x_u}{\cos \eta}; \\ y_u = r \cos \mu \sin \varepsilon + p\varphi \cos \varepsilon. \end{cases} \quad (1.9)$$

где угол η определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{p\varphi \sin \varepsilon - r \cos \mu \cos \varepsilon}{A_\omega - r \sin \mu}. \quad (1.10)$$

В метод совмещенных сечений [19, 20] заложен принцип, который характеризуется так, что винтовая поверхность пересекается плоскостями, которые прохо-

дятся параллельно через ось инструмента. Полученные сечения необходимо спроецировать на осевую плоскость дискового инструмента. В этом случае образуется группа круговых проекций, огибающая к которым является производящим профилем шлифовального круга (Рисунок 1.9.).

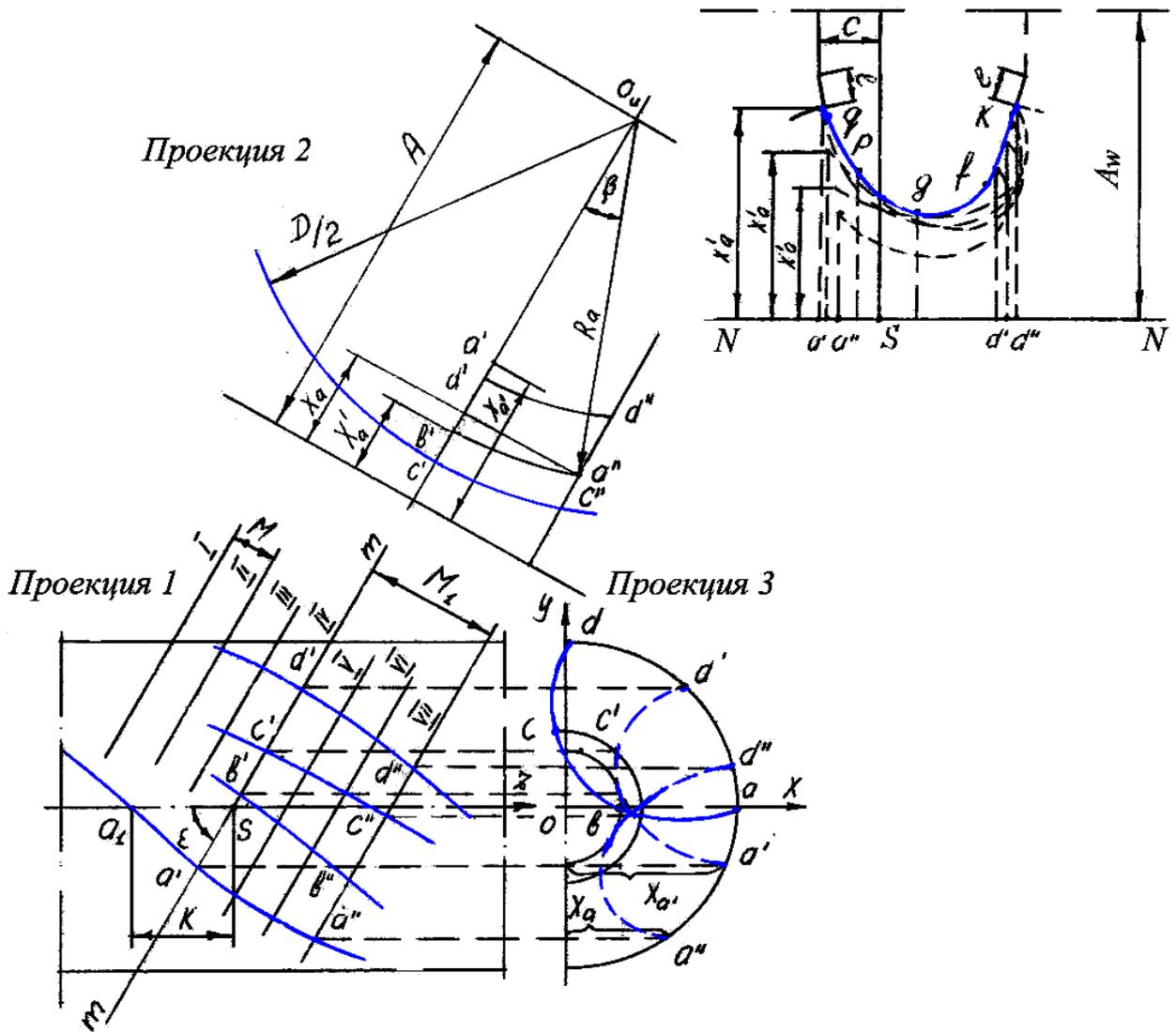


Рисунок 1.9. Схема профилирования методом совмещенных сечений

Каркасно-кинематический метод, разработанный С.Ю. Илюхиным, также относится к методу совмещенных сечений [35] (Рисунок 1.10.). Суть каркасно-кинематического метода состоит в том, что инструмент и заготовка представляют как каркас, который состоит из сечений. Получаемый профиль определяется на линиях путем моделирования процесса формообразования.

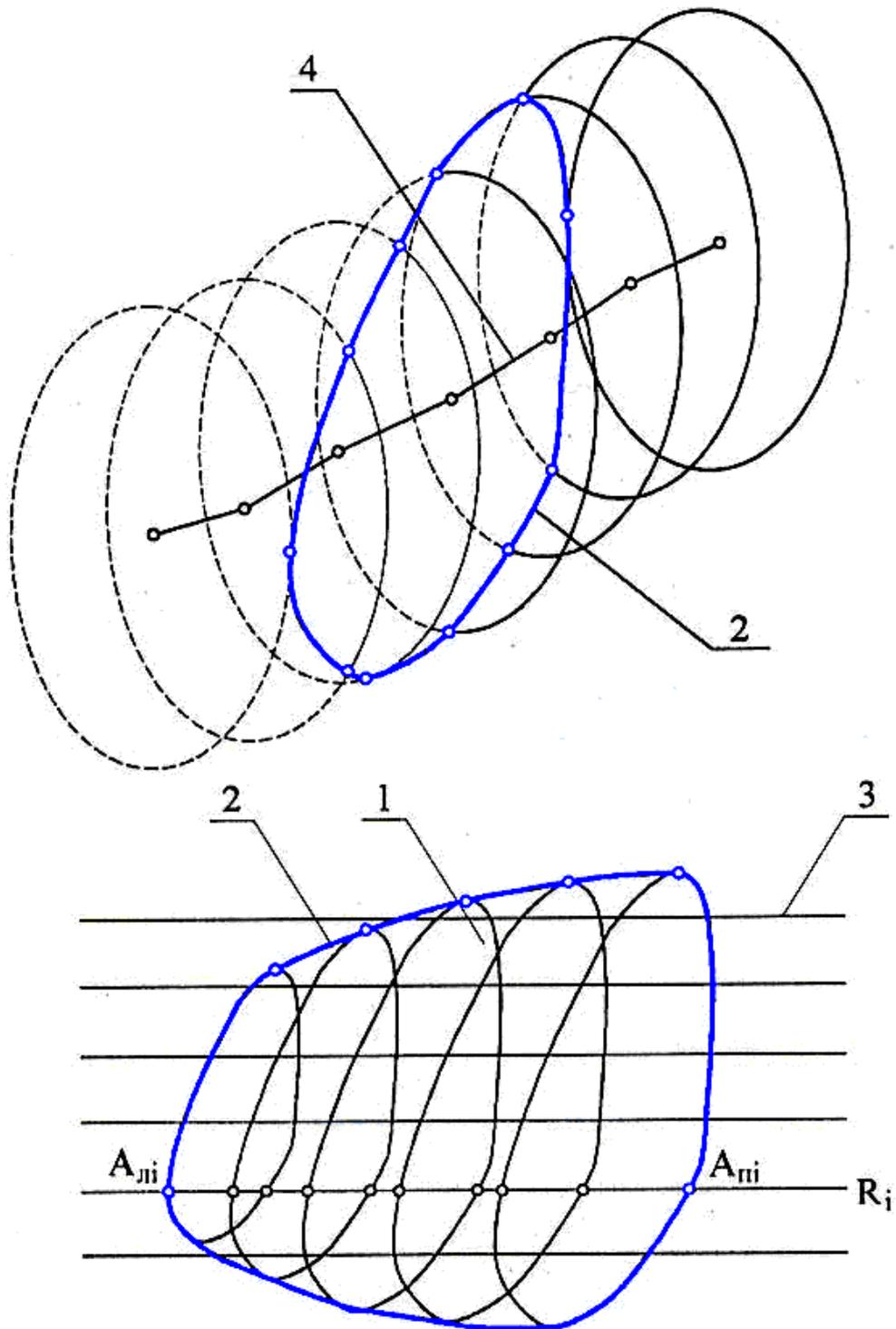


Рисунок 1.10. Схема каркасно-кинематического метода

В работе С.Д. Сметанина [70] разработан метод профилирующих окружностей, который основан на том, что у шлифовального круга, как и у любого другого, формообразующими участками являются точки профиля, лежащие на исходной инструментальной поверхности. Расчетная схема момента профилирования произвольной точки «к» профиля винтовой поверхности приведена на рисунке 1.11.

В работе получено трансцендентное уравнение для определения угла профилирования, которое едино независимо от вида участка профиля винтовой поверхности:

$$\beta = \xi - \frac{A_{\omega} \cdot \operatorname{tg} \tau}{p} \operatorname{tg} \beta \quad (1.11)$$

где ξ – угловое положение расчетной точки, A_{ω} – межосевое расстояние, τ – угол разворота оси шлифовального круга, p – винтовой параметр.

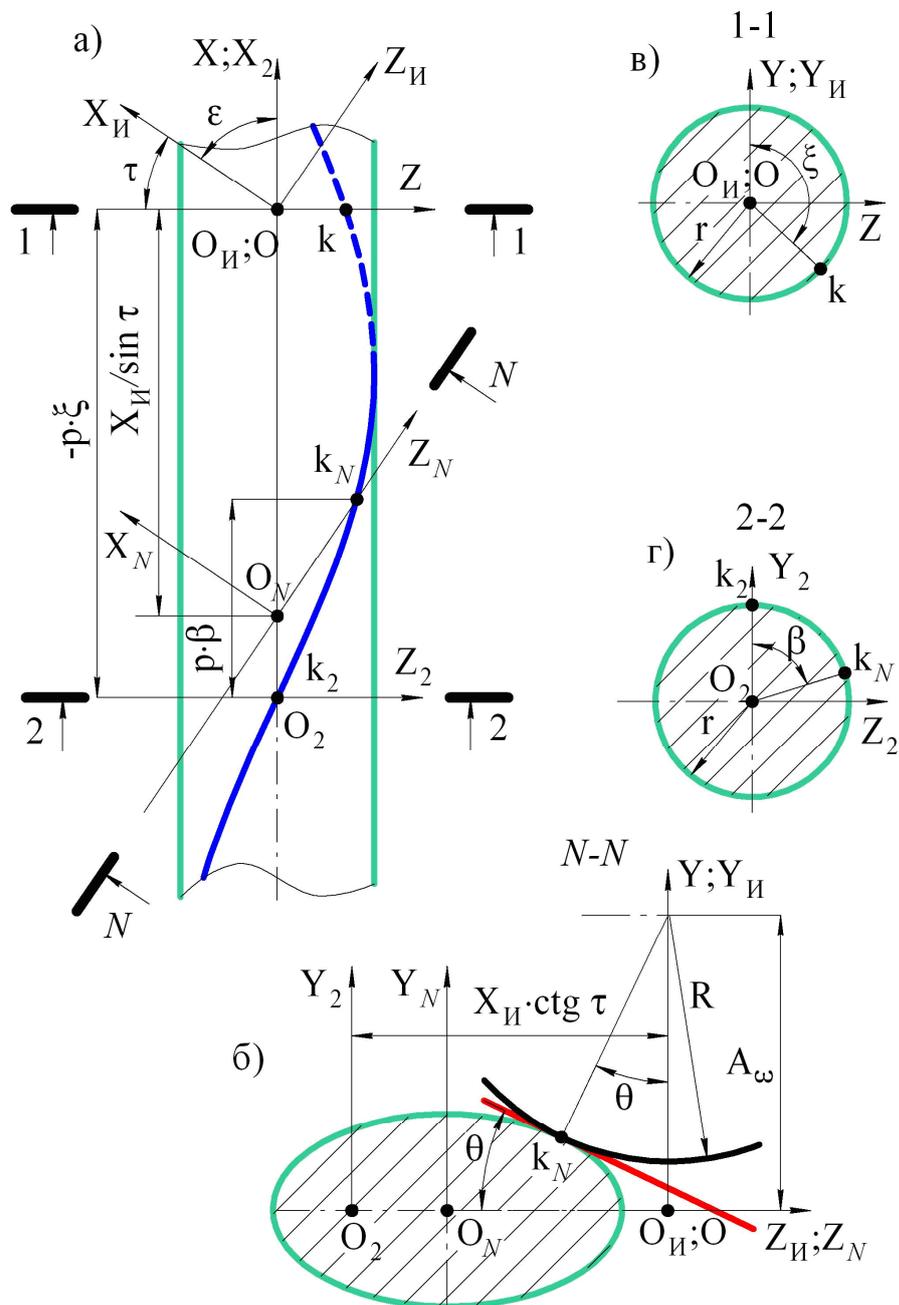


Рисунок 1.11. Расчетная схема определения общей касательной

В работах А.Э. Волкова и Г.И. Шевелевой [10, 95] предложен оболочивающей метод. К комбинированному методу определения образующей исходной инструментальной поверхности можно отнести метод разработанный в работе Б.А. Перепелицы [57], который обосновал положение об алгоритмической общности между конструированием и формообразованием. В.Б. Якубович в своей работе [114] большое внимание уделил этапу оптимизации при автоматизации. В работе Ю.С. Степанова [71] исследована геометрическая модель пространственно-сложной поверхности и шлифовального круга. Поверхность заготовки и шлифовального круга представлены как совокупность пространств Римана [41], вложенных в 3-х мерное Евклидово пространство [29]. Данное решение позволяет ввести глобальную декартову систему координат. Проектированию инструмента для обработки винтовых поверхностей на станках с ЧПУ посвятил свои работы С.П. Радзевич. Его методики относятся к кинематической теории огибания [62, 63]. И.А. Щуров в своей работе [99] предлагает вести расчет производящего профиля для обработки винтовой поверхности с использованием средств булевой алгебры.

Существующие методы определения производящего профиля не всегда поддаются автоматизации, ограничивая при этом возможность создания систем автоматизированного проектирования. Начиная с работ Гречишников В.А. [19, 20] созданы все условия для того чтобы разработать метод, который полностью отвечает требованиям автоматизации проектирования.

Анализ зарубежной литературы показал, что работы, посвященные формообразованию винтовой стружечной канавки шлифовальным кругом, в открытом доступе отсутствуют. Этот факт можно объяснить коммерческой тайной производителей инструмента. Найденные работы оказались лишь переводами ранее вышедших работ отечественных исследователей. В основном встречались работы посвященные формообразованию сложных поверхностей на станках с ЧПУ сферическими фрезами [115-119]. В данных работах рассматривается смещение сферической фрезы от заданной траектории при обработки сложных поверхностей. Проведены анализы процесса обработки сферической фрезой и разработаны ма-

тематические модели, позволяющие определить влияние угла подачи и хода винтовой линии на силу резания. Разработан аналитический метод определения радиального смещения оси сферической фрезы с постоянным шагом при обработке глубоких выемок. Коэффициенты Фурье силы резания под воздействие смещения отражают величину фазового угла и радиального смещения резца, которые являются основой для определения величины смещения.

С целью повышения работоспособности инструментов с винтовыми поверхностями на кафедре «Конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств» Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» и ПАО «КАМАЗ» были развернуты широкие теоретико-экспериментальные исследования [2, 3, 9, 16, 25, 30, 31, 51-55, 68, 69, 73, 75, 77-87, 89, 90, 92, 93, 103-112], в результате которых были защищены кандидатские [32, 45, 56, 58, 72, 74, 76, 88, 113] и докторская [90] диссертации. Данные работы в основном ограничены лишь рассмотрением методов определения профиля образующей исходной инструментальной поверхности для обработки винтовых поверхностей на цилиндрической и конической поверхностях. В то время как более сложной и общей является винтовая поверхность на сфере.

В работе Борисова С.В. [6] рассмотрены вопросы разработки концевых фрез с винтовыми стружечными канавками. Разработаны математические модели формообразующей части фрезы, на основе которых создана управляющая программа для станка с числовым программным управлением. В работе предложен принцип определения винтовой линии на сфере пересечением поверхностей сферы и прямого архимедова геликоида, но окончательное уравнение винтовой линии для сферы не представлено (Рисунок 1.12.).

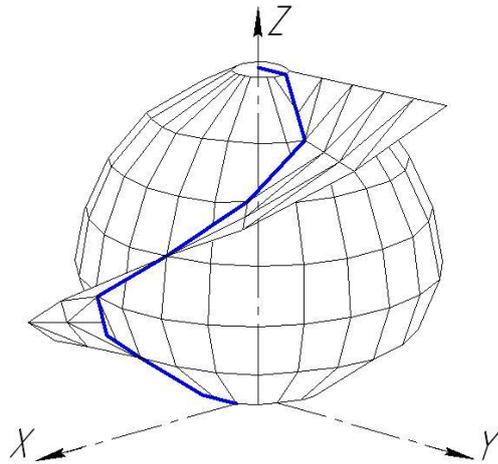


Рисунок 1.12. Определение винтовой линии как следа пересечения сферы и прямого архимедова геликоида

Совместное решение уравнений полученной в результате вращения образующей исходной инструментальной поверхности и прямого архимедова геликоида для получения уравнения винтовой режущей кромки довольно трудоемко. В работе недостаточно подробно исследовано поведение винтовой линии при изменении параметра винта p .

Известна конструкция сферической фрезы (ГОСТ 18944-73), геометрические параметры, конструкции и размеры коронки которой показаны на рисунке 1.13.

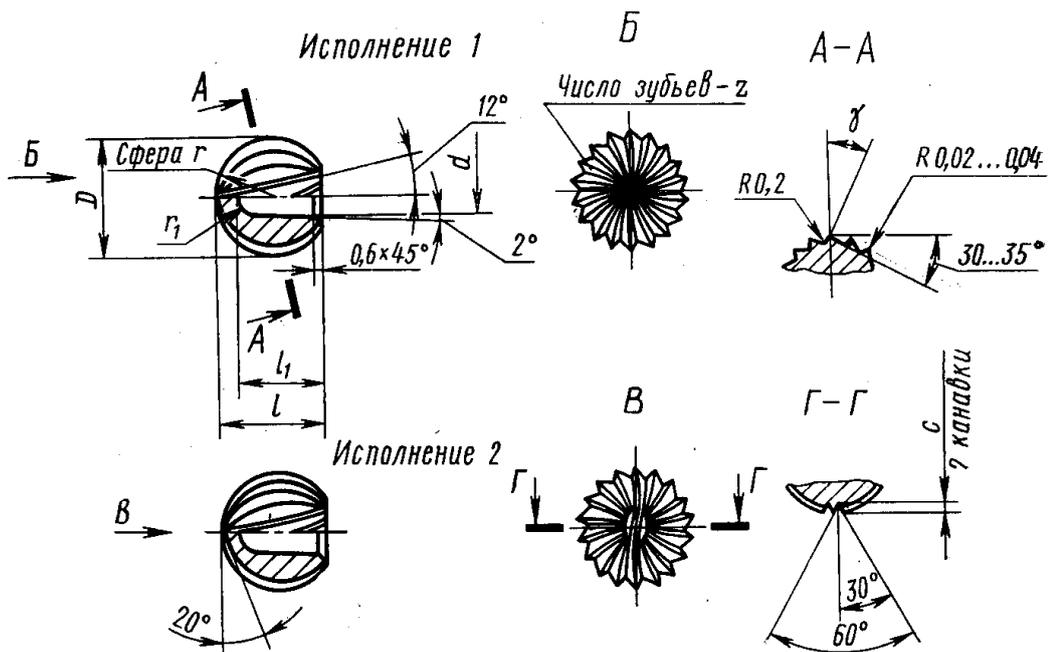


Рисунок 1.13. Геометрические параметры сферических фрез по ГОСТ 18944-73

Преимуществом данной конструкции является простота изготовления. К недостаткам относятся прямолинейность стружечной канавки. Для исключения зоны с нулевыми скоростями на торце изготовлены поперечные режущие кромки, которые обрабатываемый материал не режут, а выдавливают.

Работы Истоцкого В.В. [39-40] посвящены формированию режущей части сферических фрез шлифовально-заточным станком с числовым программным управлением. В данной работе рассмотрены сферические фрезы с групповым и одинаковым расположением винтовой стружечной канавки. Достоинством сферических фрез с одинаковым расположением винтовых стружечных канавок является сравнительная простота конструкции. Существенным недостатком является наличие нерабочей области на торце, которая образуется при сведении винтовых стружечных канавок к оси на торцевой части. Некоторые изготовители данный недостаток избегают путем изготовления центрального отверстия на торце. В этом случае полностью исключаются зона с нулевыми скоростями, но со временем отверстие забивается стружкой. В работе во избежание зоны с нулевыми скоростями разработана методика проектирования и изготовления сферической фрезы с групповым расположением винтовой стружечной канавки (Рисунок 1.14.).



Рисунок 1.14. Конструкция сферических фрез с групповыми зубьями

Конструкция с групповым расположением винтовой стружечной канавки в сферических фрезах имеет существенные недостатки в виде сложности в изготовлении и малого количества зубьев на торце, которое обуславливается количеством групп. Перечисленные недостатки приводят к появлению отклонений параметров

профиля винтовой стружечной канавки сферической фрезы от заданной в виде подрезания или неполного формирования винтовой стружечной канавки.

Таким образом, **целью научной работы** является: повышение работоспособности сферических фрез с винтовыми стружечными канавками на основе математического моделирования процесса обработки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Модернизировать математическую модель процесса формирования винтовой поверхности сферической фрезы инструментом второго порядка.

2. Разработать компьютерную модель процесса обработки винтовой поверхности сферической фрезы инструментом второго порядка, составить алгоритм, разработать прикладную программу расчета параметров винтовой поверхности сферической фрезы.

3. Исследовать профиль образующей винтовой поверхности сферической фрезы на этапе компьютерного моделирования процесса обработки и уточнение параметров взаимного расположения шлифовального круга и сферической фрезы на основе математических моделей.

4. Подтвердить адекватность математических моделей в промышленных условиях посредством изготовления опытной партии сферических фрез и сопоставления расчетных и фактических данных профилей винтовой стружечной канавки.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ВИНТОВОЙ СТРУЖЕЧНОЙ КАНАВКИ СФЕРИЧЕСКОЙ ФРЕЗЫ ШЛИФОВАЛЬНЫМ КРУГОМ

2.1. Формы фрез с винтовой стружечной канавки

Формы исходных инструментальных поверхностей фрез с винтовой стружечной канавки представляют собой поверхность вращения, образующая которых составлена из отрезков прямых линий, дуг окружностей и других технологически просто воспроизводимых кривых. Основными формами исходной инструментальной поверхности являются цилиндр, конус и сфера (Рисунок 2.1.).

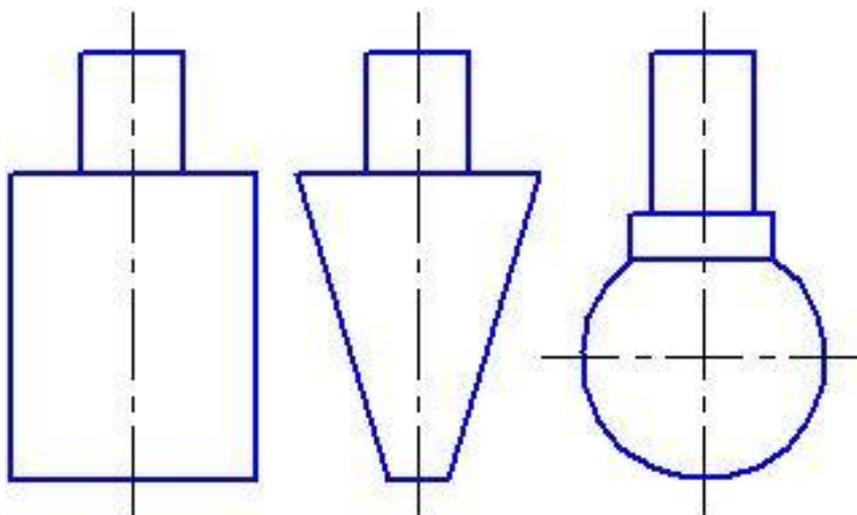


Рисунок 2.1. Основные профили исходных
инструментальных поверхностей

Разнообразие форм исходной инструментальной поверхности обеспечивается комбинациями основных, которые могут быть выпуклыми, вогнутыми и выпукло-вогнутыми (Рисунок 2.2.). Существует стандарт, который обеспечивает производство большим количеством форм исходной инструментальной поверхности [28]: ГОСТ 22134-76 – ГОСТ 22158-76 – параметры конструкций различных форм бор-фрез и их режимов обработки. По способу крепления рабочей части бор-фрезы подразделяются на насадные и цельные (концевые).

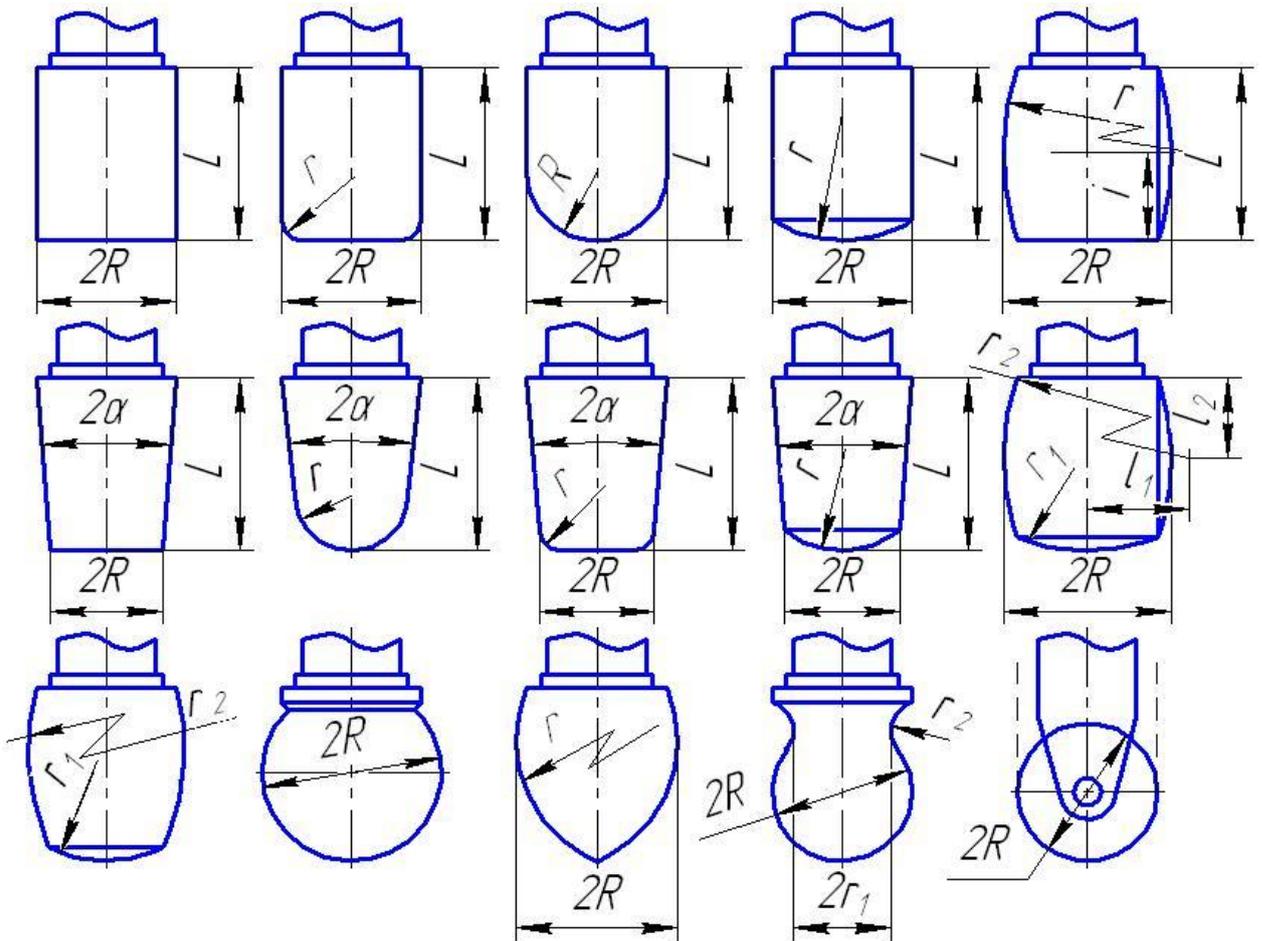


Рисунок 2.2. Формы исходных инструментальных поверхностей
 где R – радиус; L – длина; r, r_1, r_2 – радиусы кривых образующей; i – смещение радиуса кривых; α – угол наклона образующей.

Торцовая часть всевозможных форм исходной инструментальной поверхности может быть плоской или сферической. Среди фрез со сферическим торцом наиболее часто встречаются сферические, сфероконические и сфероцилиндрические (Рисунок 2.3.).



а) сферическая;

б) сфероконическая;

в) сфероцилиндрическая

Рисунок 2.3. Фрезы со сферическим торцом

Наиболее распространенным, сложным и общим случаем формы исходной инструментальной поверхности является сферическая форма фрезы. Исходная инструментальная поверхность сферической фрезы представляет собой винтовую поверхность на сфере.

2.2. Математическое моделирование винтовой поверхности сферической фрезы

Основными конструктивными элементами сферической фрезы является зуб и винтовая стружечная канавка (впадина между зубьями). Зуб, являясь основным рабочим элементом, срезает припуск с обрабатываемой заготовки при совершении движений резания и состоит из режущей кромки, задней и передней поверхностей. При шлифовании винтовой стружечной канавки сферической фрезы образуется передняя поверхность зуба и одновременно придается окончательная форма спинке смежного зуба. Таким образом, операция шлифования винтовой стружечной канавки адекватна операции шлифования зубьев.

Форма винтовой стружечной канавки определяется геометрией зуба и ее размерами, которые зависят от диаметра. Геометрические параметры должны обеспечивать:

- рациональные углы резания;
- свободное размещение стружки;
- необходимую прочность режущего зуба.

Основным параметром режущей кромки является передний угол γ , который определяет положение передней поверхности лезвия и предназначен для образования стружки, уменьшения работы по пластическому деформированию снимаемого припуска. Передний угол оказывает влияние на силы резания, стойкость и на радиус естественного завивания стружки [50].

Передний угол назначают в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала. При обработке вязких металлов передний угол вы-

бирается положительным от $5 \div 30^\circ$. Для некоторых сталей, в частности для жаропрочных, из-за низкой стойкости, применение сферических фрез без отрицательного переднего угла не допустимо. При обработке жаропрочных сталей и сплавов, чугуна и бронзы передний угол применяют равным -25° , а при обработке сплавов на титановой основе равным -10° (ГОСТ 18934-18949-73).

Задний угол α назначается исходя из условий обработки, марки материала, марки инструмента и величины обрабатываемого слоя в пределах от $10 \div 35^\circ$ (Рисунок 2.4.).

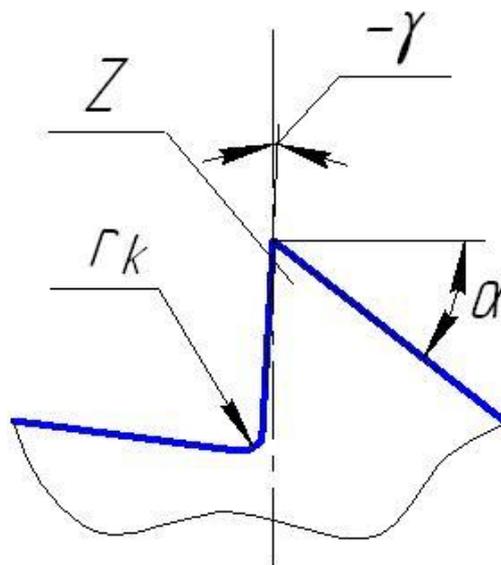


Рисунок 2.4. Основные параметры зуба

Передний γ и задний α углы совместно влияют на стойкость сферической фрезы и определяют угол заострения режущего клина β , от которого зависит радиус округления ρ режущей кромки.

В отличие от прямолинейной винтовая форма стружечной канавки обеспечивает равномерность обработки, упрочняет режущую кромку и уменьшает контактную нагрузку.

Режущая кромка образуется в месте пересечения передней и задней поверхностей. Независимо от тщательности отделки, передняя и задняя рабочие поверхности всегда имеют некоторую шероховатость. Поэтому даже после тщательной заточки и доводки рабочих поверхностей режущего клина всегда имеет место некоторое округление по радиусу ρ . Величина радиуса ρ оказывает влияние на ха-

рактически протекания процесса резания, причем особенно существенно при срезании тонких стружек, толщина которых соизмерима с ρ . (Рисунок 2.5.). Уменьшение ρ достигается путем шлифования по задней поверхности.

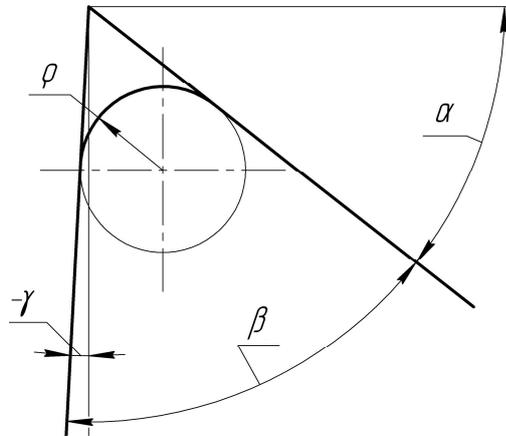


Рисунок 2.5. Режущий клин

Количество зубьев Z сферической фрезы выбирается исходя из рекомендаций по ГОСТ 22134-76 и ГОСТ 22158-76 приведенных в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Тип	Диаметр, мм				
	3; 4; 5	6; 8	10; 12	16; 20	25; 32
	Число зубьев				
с особо крупным зубом	8		12	16	24
с крупным зубом	12		16	24	32
со средним зубом	16		24	32	48
с мелким зубом	–	24	32	48	64
с особо мелким зубом	–	32	48	64	–

Винтовая поверхность представляет собой след перемещения плоской (пространственной) фигуры (образующая) по винтовой линии (направляющей). Винтовая поверхность считается заданной, если известны параметры образующей и направляющей [50]. Для определения образующей сферической винтовой поверхности в данной работе рассмотрено осевое сечение сферической фрезы (Рисунок 2.6.).

Для математического описания образующей винтовой поверхности сферической фрезы необходимы данные, которые имеются на чертеже или рассчитываются.

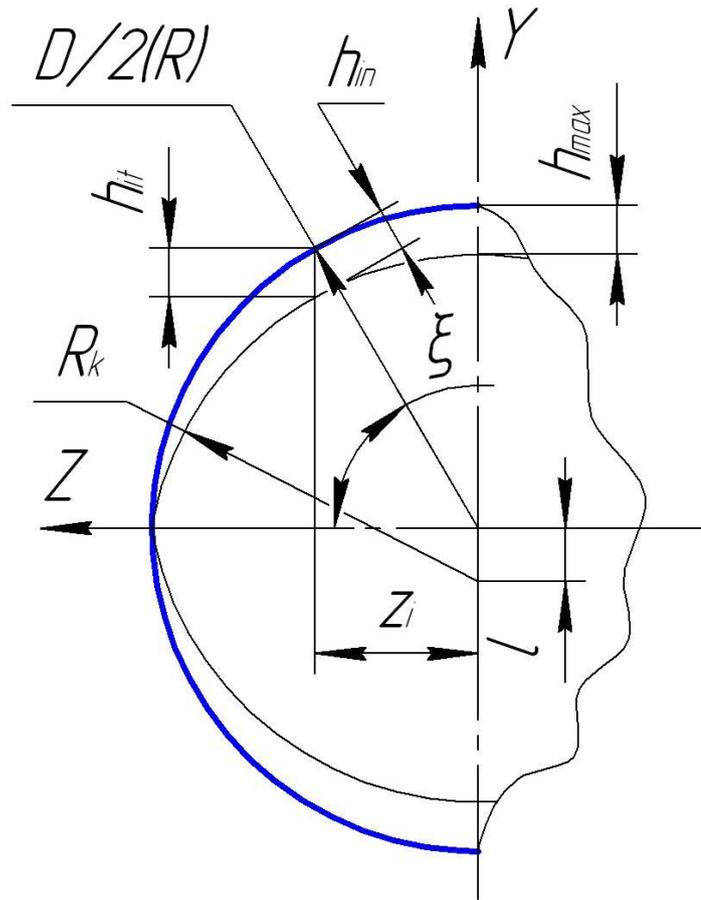


Рисунок 2.6. Осевое сечение сферической фрезы

Рассчитываемые данные:

$$\tau = \frac{2\pi}{Z};$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} + \tau + \gamma_i - \alpha;$$

$$D_i = 2\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - z_i^2};$$

$$h_i = \frac{D_i}{2} \cdot \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\cos(\tau - \alpha)}\right).$$

где h – глубина винтовой стружечной канавки; z – смещение текущего сечения вдоль оси OZ ; i – индекс, обозначающий номер текущего сечения вдоль оси OZ ; τ – окружной шаг; θ – угол профиля канавки.

Также рассмотрено нормальное сечение сферической фрезы, которое на расстоянии $D/2$ совпадает с торцовым сечением [40] (Рисунок 2.7.).

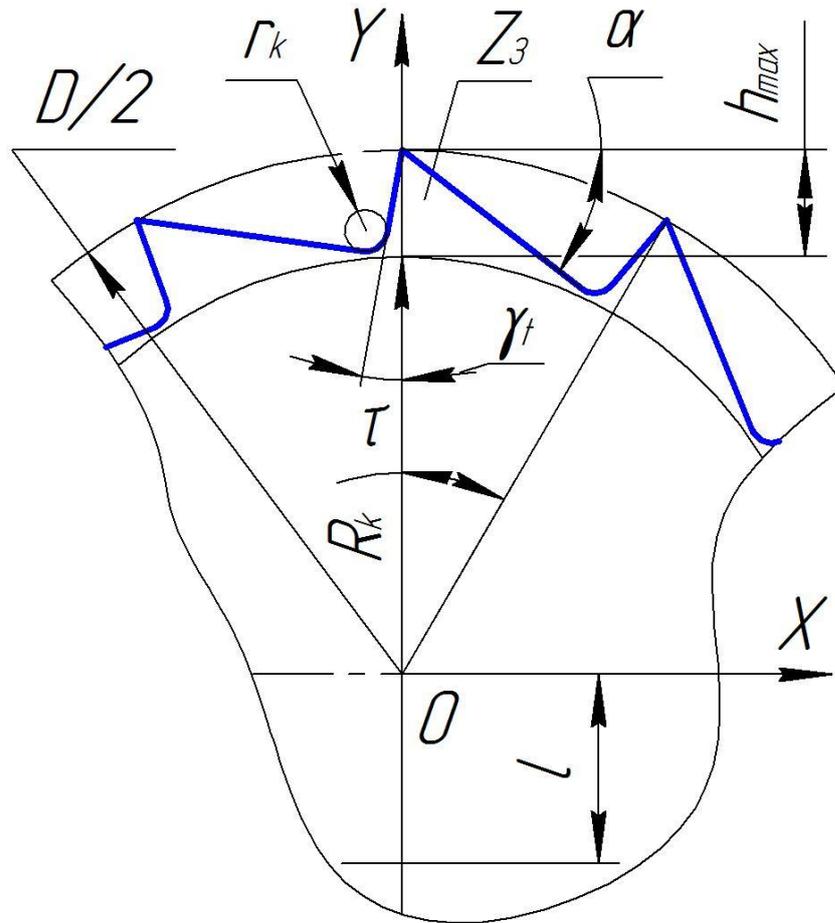


Рисунок 2.7. Нормальное сечение

Максимальное значение высоты зуба h_{\max} определяется в торцовом сечении наибольшего диаметра, который на сферических фрезах определяется на расстоянии $D/2$ от торца и уравнение будет выглядеть как

$$h_{\max} = \frac{D}{2} \cdot \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\cos(\tau - \alpha)} \right), \quad (2.1)$$

Из уравнения (2.1) видно, что глубина стружечной канавки зависит только от изменения диаметра текущего сечения D_{it} , так как окружной шаг $\tau = 2\pi/Z$ и задний угол α постоянны. Тогда уравнение (2.1) для текущего i -го сечения выразится

$$h_{it} = \frac{D_{it}}{2} \cdot \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\cos(\tau - \alpha)} \right)$$

где D – диаметр фрезы; Z – количество зубьев.

Применив теорему косинусов и выполнив преобразования с учетом уравнения (2.1), получен радиус дна винтовой стружечной канавки сферической фрезы

$$R_k = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{(D - h_{\max})^2 + h_{\max}^2}{1 - \cos\left(\pi - 2 \cdot \arctg\left(\frac{D}{D - 2h_{\max}}\right)\right)}}, \quad (2.2)$$

Из рисунка 2.6 видно, что также справедливо равенство

$$l + \frac{D}{2} = h_{\max} + R_k, \quad (2.3)$$

где l – величина смещения центра радиуса дна.

Диаметр торцового сечения выражается уравнением

$$D_{it} = 2 \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - z_i^2}, \quad (2.4)$$

Величина смещения центра радиуса дна l определяется следующим выражением

$$l = \sqrt{R_k^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}, \quad (2.5)$$

Величина смещения радиуса дна и радиус дна винтовой стружечной канавки в сферических фрезах обеспечивают свод канавок к оси фрезы на торцовой части [79]. Необходимым условием для свода винтовых стружечных канавок является $R_k > D/2$. Высота зуба в любом торцовом сечении выражается следующим уравнением

$$h_{it} = \sqrt{R_k^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} - \sqrt{R_k^2 - z_i^2} + \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - z_i^2}, \quad (2.6)$$

С учетом (2.4) и (2.5) уравнение (2.6) примет вид

$$h_{it} = l + \frac{D_{it}}{2} - \sqrt{R_k^2 - z_i^2}, \quad (2.7)$$

При смещении торцового сечения $z_i = 0$ высота зуба принимает максимально значение $h_{\max} = l + \frac{D}{2} - R_k$. При смещении $z_i = \frac{D}{2}$ высота зуба $h = 0$, образуя при этом нерабочую область на торцовой части сферической фрезы, который в обработке не участвует, а лишь нагреваясь, вызывает термические реакции. Высота зуба в нормальном сечении h_{in} выражается следующим уравнением

$$h_{in} = R + l \sin \xi - \sqrt{R_k^2 - l^2 \cos^2 \xi} \quad (2.8)$$

где $\xi = \arccos\left(\frac{z_i}{R}\right)$ – угол наклона смещения торцевого сечения.

Образующая винтовой поверхности сферической фрезы выглядит как сложная кривая, состоящая из двух прямых линий и одной дуги окружности, которые сопряжены между собой (Рисунок 2.8.).

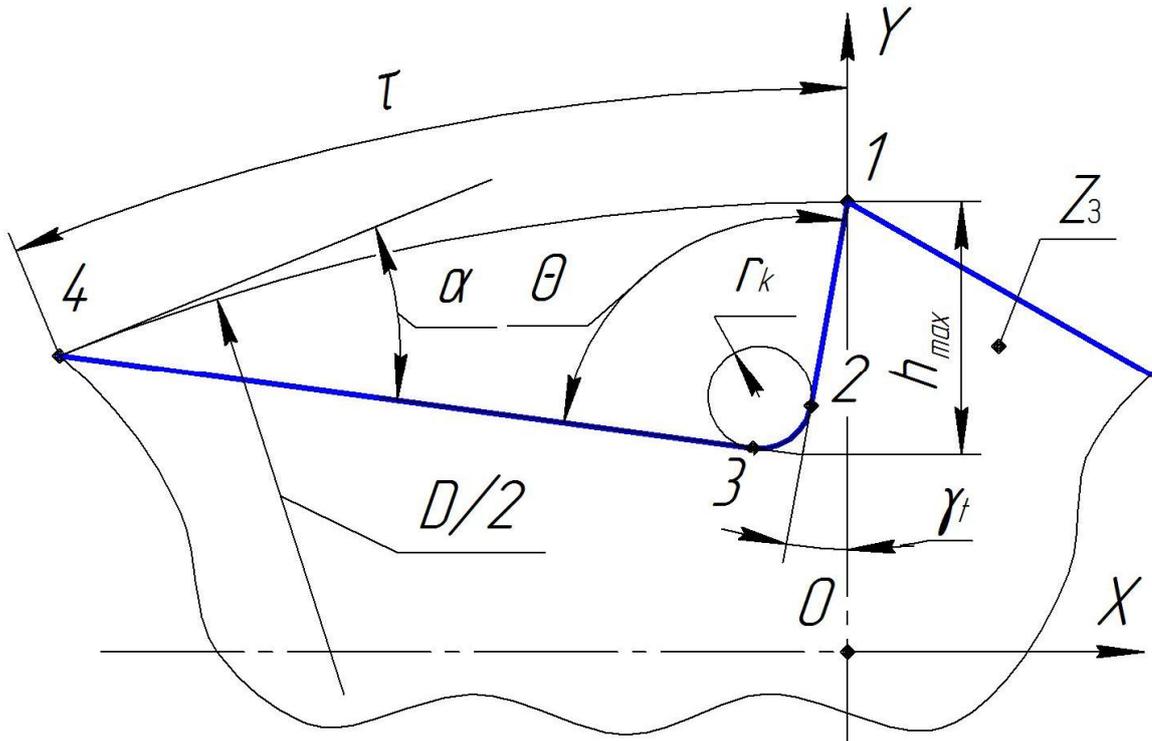


Рисунок 2.8. Образующая винтовой поверхности

Координаты узловых точек:

$$X_1 = 0; Y_1 = \frac{D_i}{2};$$

$$X_2 = h_i \operatorname{tg} \gamma_t; Y_2 = \frac{D_i}{2} - h_i + r_k \cos \gamma_t;$$

$$X_3 = \frac{D_i}{2} - h_i - \frac{D_i}{2} (\cos \gamma_t - \sin \theta); Y_3 = \left(h_i - \frac{D_i}{2} (\cos \theta - \sin \gamma_t) \right) \operatorname{tg} \gamma_t - \frac{D_i}{2} (\cos \gamma_t - \sin \theta);$$

$$X_4 = \frac{D_i}{2} \sin \tau; Y_4 = \frac{D_i}{2} \cos \tau.$$

После определения координат точек образующей нужно задаться текущими точками на участках. Выполненные расчеты по приведенным математическим за-

висимостям позволили получить описание образующей винтовой поверхности на сфере.

Далее определим параметры направляющей – винтовой линии на сфере [80, 81]. Для определения винтовой линии на сфере рассмотрим задачу о пересечении поверхностей, которая является наиболее значительной с теоретической и практической точек зрения. Линия, являющаяся общей для обеих поверхностей и которые пересекаются между собой, называется линией пересечения. Воспользуемся свойством, по которой посредством изгибания, любая винтовая линия может быть наложена на поверхность вращения [60, 61]. Рассмотрим схему пересечения сферы с цилиндром и построение линии пересечения (Рисунок 2.9.).

Для нахождения точек фронтальной проекции линии пересечения воспользуемся вспомогательными секущими плоскостями γ' , параллельными фронтальной плоскости проекции, и определим характерные точки. Поверхность цилиндра является горизонтально проецирующей, поэтому горизонтальная проекция линии пересечения совпадает с горизонтальной проекцией самого цилиндра. Вспомогательные плоскости пересекают поверхность сферы по окружности, а поверхность цилиндра – по образующим. На их пересечении получаем точки, принадлежащие линии пересечения. Точки с 1 по 26 являются характерными точками. Низшую (26) и высшую (1) точки находим на пересечении с поверхностью сферы тех образующих цилиндра, которые расположены в горизонтально проецирующей плоскости, проходящей через ось цилиндра и центр сферы. В результате соединения всех найденных точек кривой линией, получена искомая линия пересечения – винтовая линия на сфере.

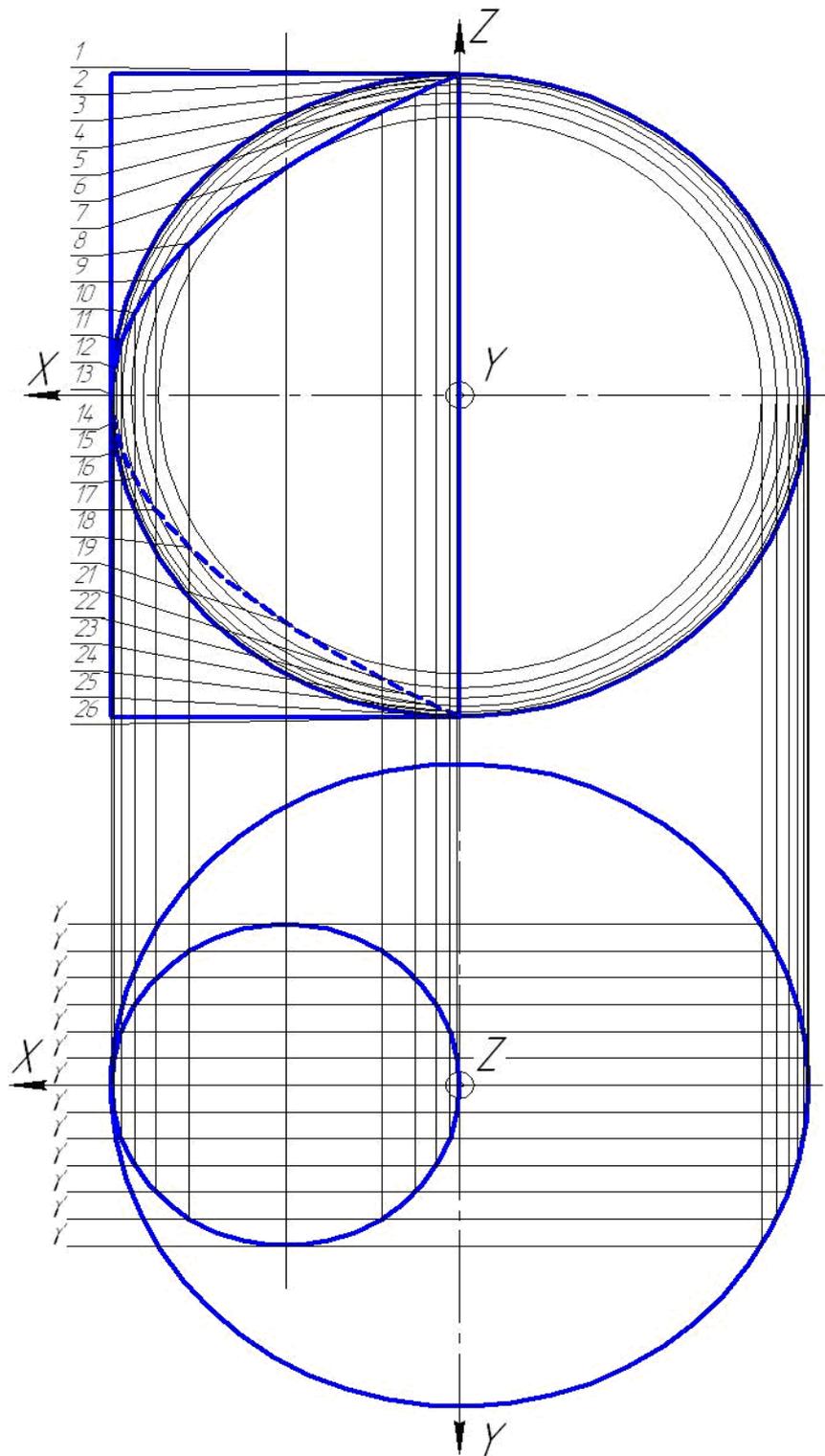


Рисунок 2.9. Схема построения линии пересечения цилиндра со сферой
 Рассмотрено пересечение цилиндра радиуса R и сферы радиуса $2R$, центр которой лежит на поверхности цилиндра (Рисунок 2.10.).

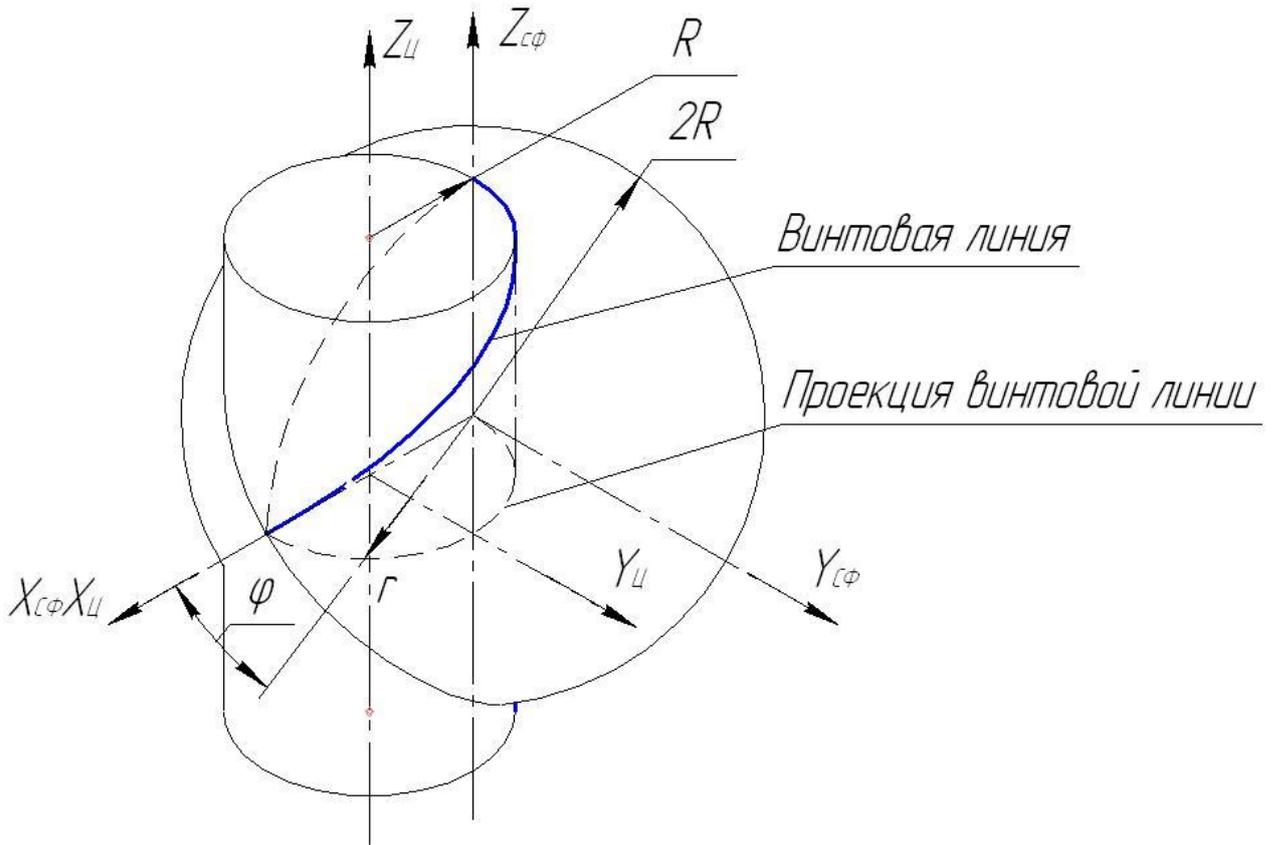


Рисунок 2.10. Пересечение сферы с цилиндром

где $X_{сф}Y_{сф}Z_{сф}$ – система координат сферы; R – радиус цилиндра; $X_{ц}Y_{ц}Z_{ц}$ – система координат цилиндра, смещенная относительно $X_{сф}Y_{сф}Z_{сф}$ на расстояние R ;

Изменением расстояния смещения оси цилиндра относительно сферы, диаметры сферы и цилиндра получена винтовая линия на сфере с параметром винта $p = 1$. При $0 \leq p < 1$ винтовая линия находится на эллипсоиде. По мере приближения p к нулю винтовая линия вытягивается и при $p = 0$ образует медиану. Полученное в результате пересечения тело так же называется телом Вивиани.

При $p > 1$ винтовая линия представляет собой локсодрому, локсодромную или локсодромную кривую (Рисунок 2.11.). Локсодрома пересекает все меридианы тел вращения любой формы под одним и тем же углом подъема винтовой линии ϑ .

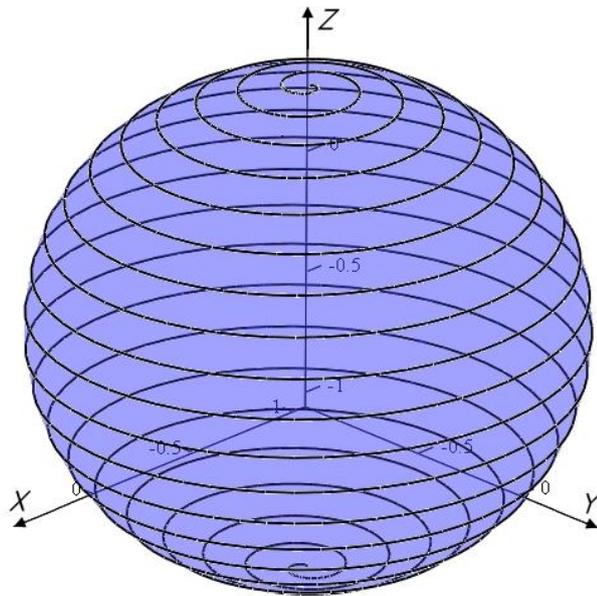


Рисунок 2.11. Локсодрома

В виду того, что пересекающиеся поверхности вращения симметричны, для математического описания винтовой линии на сфере (направляющей) достаточно рассмотреть лишь 1/8 часть пересечения (Рисунок 2.12.).

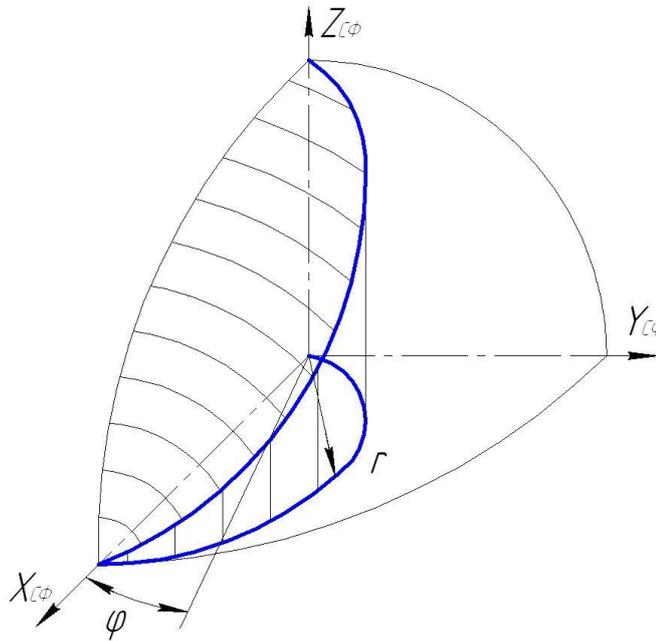


Рисунок 2.12. Пересечение сферы и цилиндра

Уравнения сферы и цилиндра относительно системы координат $X_{C\phi} Y_{C\phi} Z_{C\phi}$ выглядит как

$$x^2 + y^2 + z^2 = 4R^2, \quad (x - R)^2 + y^2 = R^2 \Leftrightarrow x^2 + y^2 = 2Rx. \quad (2.8)$$

Отсюда выведено

$$z^2 = 4R^2 - 2Rx.$$

С учетом того, что

$$x = r \cos \varphi, y = r \sin \varphi \text{ и } x^2 + y^2 = r^2$$

Получено

$$x^2 + y^2 = 2Rx \Leftrightarrow r^2 = 2Rr \cos \varphi \Leftrightarrow r = 2R \cos \varphi.$$

И с учетом уравнений

$$\begin{aligned} x &= r \cos \varphi = 2R \cos^2 \varphi = R(1 + \cos 2\varphi), \\ y &= r \sin \varphi = 2R \sin \varphi \cos \varphi = R \sin 2\varphi, \text{ и } p = \frac{R}{\operatorname{tg} \omega} = \frac{H}{2\pi}. \\ z &= 2R \sin \varphi. \end{aligned}$$

получено уравнение винтовой линии на сфере (направляющей) в параметрическом виде

$$\begin{cases} x_g = p \operatorname{tg} \omega \cos^2 2\varphi, \\ y_g = p \operatorname{tg} \omega \sin 2\varphi, \\ z_g = 2p \operatorname{tg} \omega \sin \varphi. \end{cases} \quad (2.9)$$

где r – расстояние от начала координат до проекции винтовой линии на плоскость OXY ; φ – угол поворота r ; p – параметр винта; ω – угол наклона винтовой линии; H – шаг винтовой линии.

Для получения количества винтовых линий равным Z (количество зубьев сферической фрезы) необходимо полученную винтовую линию повернуть вокруг оси OZ на окружной шаг $\tau = \frac{2\pi}{Z}$, воспользовавшись оператором преобразования правых систем координат [63], схема которой представлена на рисунке 2.13. Описание оператора преобразования координат в матричной форме выглядит как

$$\operatorname{Rt}(\tau, Z) = \begin{bmatrix} \cos \tau & \sin \tau & 0 & 0 \\ -\sin \tau & \cos \tau & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Системой уравнений

$$\begin{cases} X_1 = X \cos \tau + Y \sin \tau; \\ Y_1 = -X \sin \tau + Y \cos \tau; \\ Z_1 = Z. \end{cases}$$

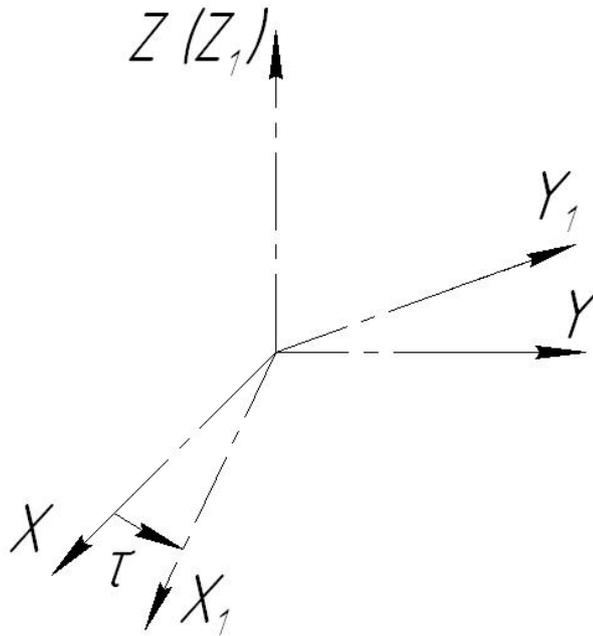


Рисунок 2.13. Схема преобразования координат

Вращением винтовой линии, получены винтовые линии на сфере (Рисунок 2.14.).

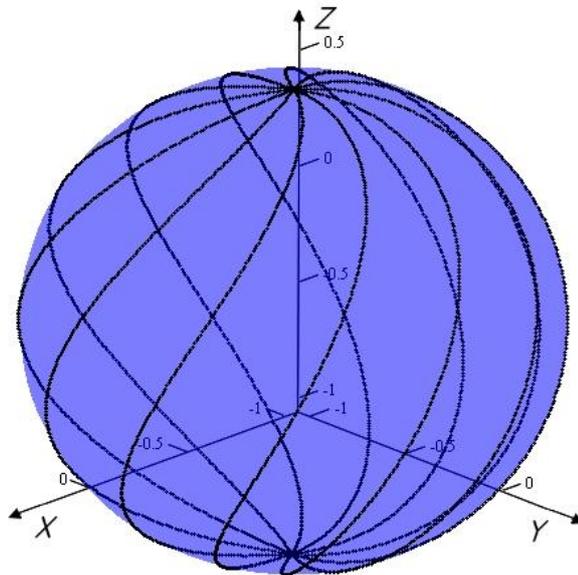


Рисунок 2.14. Винтовые линии на сфере

Так как угол наклона винтовой линии переменный ($\omega = \text{var}$), необходимо рассмотреть схему определения угла наклона в рассматриваемой точке (Рисунок 2.15.). Общей винтовой линией обычно называют сложное движение точки M , которое состоит из движений по прямой параллельной оси и движения прямой параллельной самой себе.

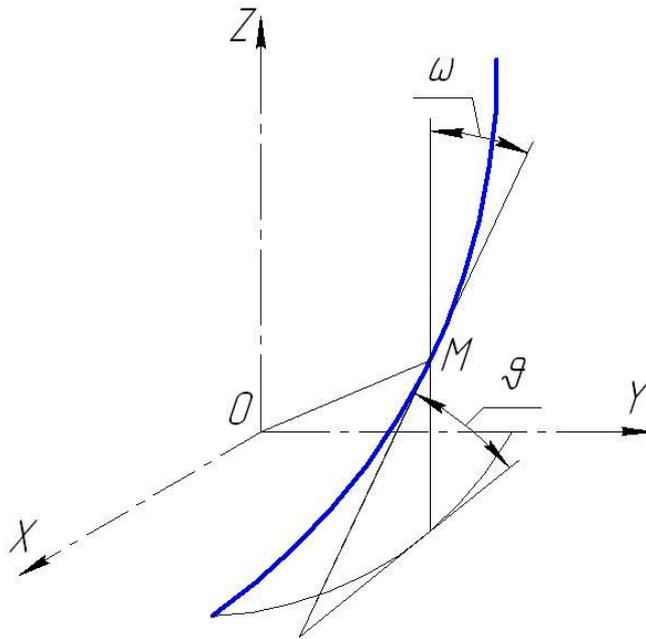


Рисунок 2.15. Схема определения угла наклона винтовой линии.

где $\vartheta = \frac{\pi}{2} - \omega$ – угол подъема винтовой линии.

Касательная к винтовой линии с осью OZ образует угол наклона винтовой линии ω .

$$\omega = \arccos \sqrt{p^2 \cos^2 2\varphi}.$$

Геометрический смысл параметра винта p определяется как:

$$p = R / \operatorname{tg} \omega.$$

Приданием образующей движение вдоль направляющей винтовой линии на сфере получена винтовая поверхность на сфере.

Согласно зависимостям [67], для винтовых поверхностей расположенных на цилиндре существует выражение взаимосвязи передним углом γ и углом наклона направляющей винтовой линии ω . При увеличении ω уменьшается γ .

$$\gamma_n = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg} \gamma_t \cos \omega), \quad (2.10)$$

где ω – угол наклона винтовой линии, γ_n – передний угол в торцовом сечении.

Для конических винтовых поверхностей эта взаимосвязь была выведена в работе [6]:

$$\gamma_n = \operatorname{arctg} \left(\operatorname{tg} \omega \cos \left(\frac{\pi}{2} - k \right) + \operatorname{tg} \gamma_t \sin \left(\frac{\pi}{2} - k \right) \right), \quad (2.11)$$

где k – угол конуса.

Для нахождения зависимости переднего угла в нормальном сечении от угла наклона винтовой линии для сферической винтовой поверхности рассмотрена схема представленная на рисунке 2.16. На схеме изображена проекция конической поверхности на плоскость XOY .

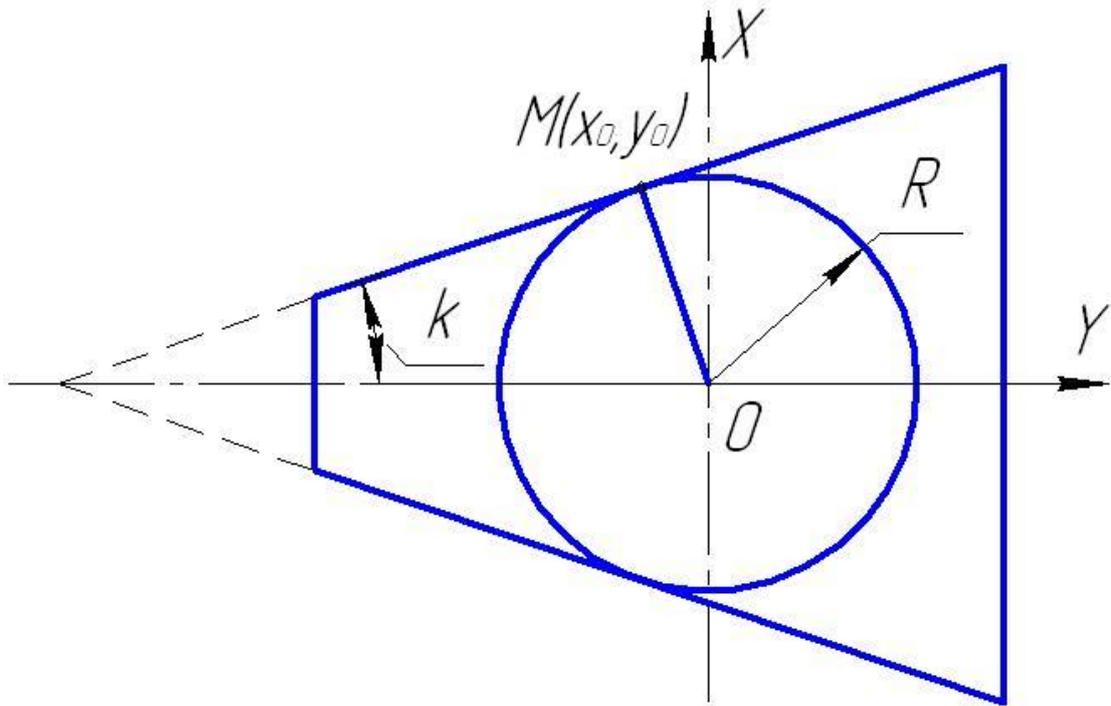


Рисунок 2.16. Образующая конуса – касательная к окружности

Рассмотрена образующая конуса как касательные к некоторой окружности с центром в начале координат. Уравнение окружности с центром в начале координат имеет вид

$$x^2 + y^2 = R^2 \quad (2.12)$$

Уравнение касательной в точке M с координатами x_0, y_0 будет выглядеть как

$$x_0x + y_0y = R^2 \text{ и } k = -\frac{x_0}{y_0} \quad (2.13)$$

Тогда уравнение (2.13) после преобразования будет выглядеть как

$$\gamma_n = \text{arctg}\left(\frac{y \text{tg} \gamma_t - x \text{tg} \omega}{R}\right) \quad (2.14)$$

Уравнение (2.14) определяет связь между получаемым в нормальном сечении передним углом инструмента первого порядка и углом наклона направляющей сферической винтовой линии.

Таким образом, описана образующая винтовой поверхности на сфере и выведены математические зависимости, разработан метод определения и выведены математические зависимости винтовой линии на сфере, разработана схема определения угла наклона винтовой линии ω в рассматриваемой точке, а также исследовано влияние параметра винта p на винтовую линию на сфере. Придав образующей, движение вдоль направляющей винтовой линии на сфере получается винтовая поверхность на сфере [50]. Моделирование проводилось средствами компьютерной математики Mathcad 14.0 (приложение 4).

2.3. Определение производящего профиля и параметров установки шлифовального круга

Задача определения производящего профиля для обработки винтовой поверхности на сфере состоит из двух этапов построения круговых проекций винтовых линий на осевую плоскость шлифовального круга и поиска огибающей к группе круговых проекций винтовых линий [91, 92].

Прежде всего, необходимо задаться диапазоном изменения значения угла φ , которая определяет расположение образующей. Диапазон изменения значения угла φ можно рассмотреть как угол между 2-мя наиболее удаленными точками касания поверхности шлифовального круга и винтовой поверхности сферической фрезы. Данная задача довольно сложна в виду того что необходимо решать пространственную задачу с применением численных методов. Точного определения зоны контакта в общем случае нет, достаточно будет определить диапазон изменения угла φ . На рисунке 2.17 представлена зона контакта, в которой находятся круговые проекции и угол φ изменяется от θ_1 до θ_2 [87].

В каждом сечении межосевое расстояние переменное и выражается следующим уравнением

$$A_{oi} = \sqrt{z_i^2 + (l + R_i)^2} - h_{in} + R_u \quad (2.15)$$

При обработке винтовых стружечных канавок сферической фрезы необходимо задать поворот вокруг собственной оси согласованным с остальными движениями так, чтобы выполнялось условие:

$$\theta_{\phi} = 2\pi \pm \varphi \tan \omega_0 + \frac{\tau}{\cos(\pm\varphi)} \quad (2.16)$$

где ω_0 – угол наклона винтовой линии в сечении максимального диаметра; $\pm\varphi_i$ – текущая координата при вращении вокруг вертикальной оси.

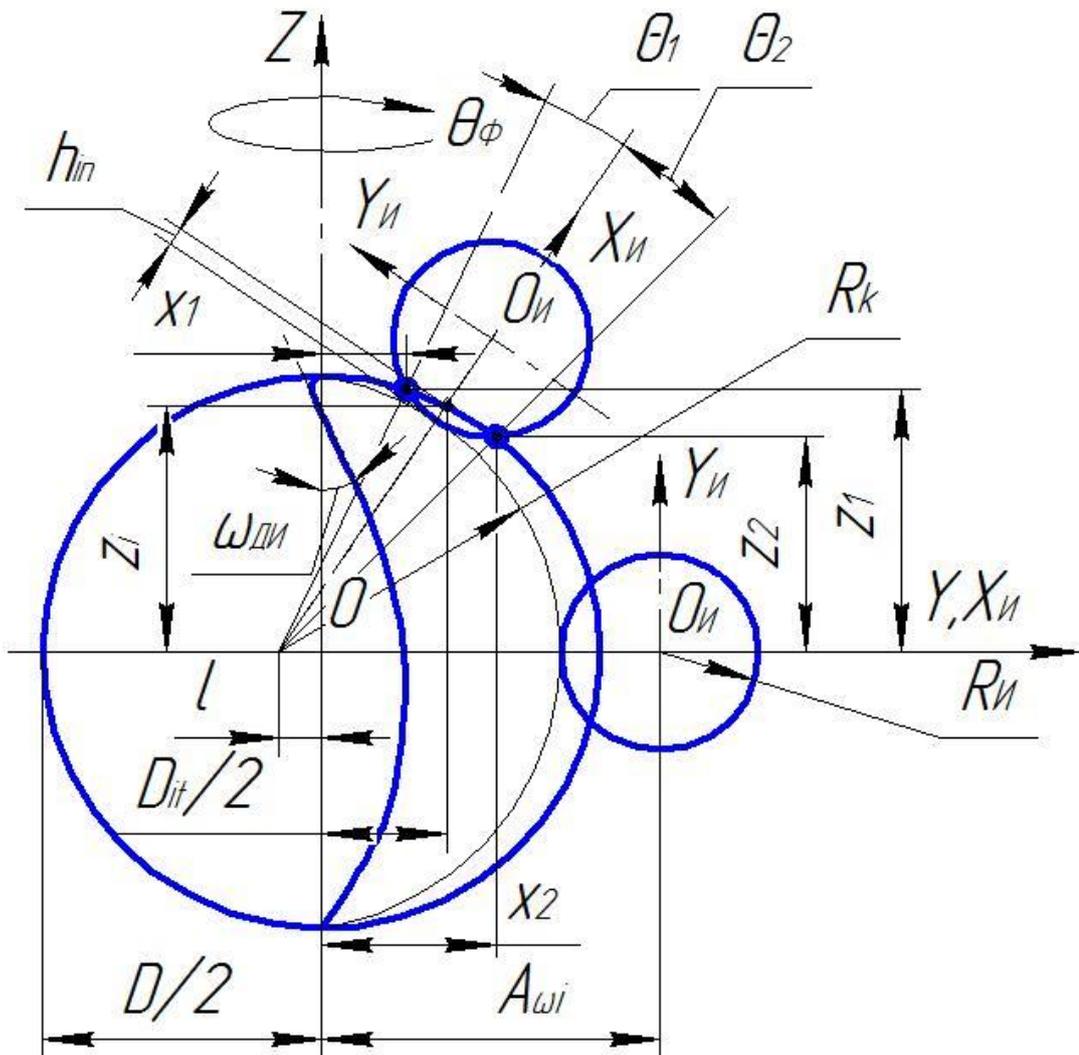


Рисунок 2.17. Схема определения диапазона решения задач

Для сохранения неизменным профиля винтовой стружечной канавки, обеспечения постоянства переднего угла и размеров впадины между соседними зубьями необходимо, чтобы торец шлифовального круга всегда был параллелен вектору результирующей линейной скорости вращательных движений инструмента вокруг собственной и вертикальной оси (Рисунок 2.18.). То есть отсутствие

подрезания или неполного формирования винтовой стружечной канавки обеспечивается при следующем законе изменения угла наклона шлифовального круга:

$$\omega_{\text{шк}} = \arctg(\text{tg} \omega_0 \cos(\pm \varphi) + \tau \cdot \text{tg}(\pm \varphi)) \quad (2.17)$$

Следовательно, угол скрещивания определится как

$$\varepsilon = \frac{\pi}{2} - \omega_{\text{шк}} \quad (2.18)$$

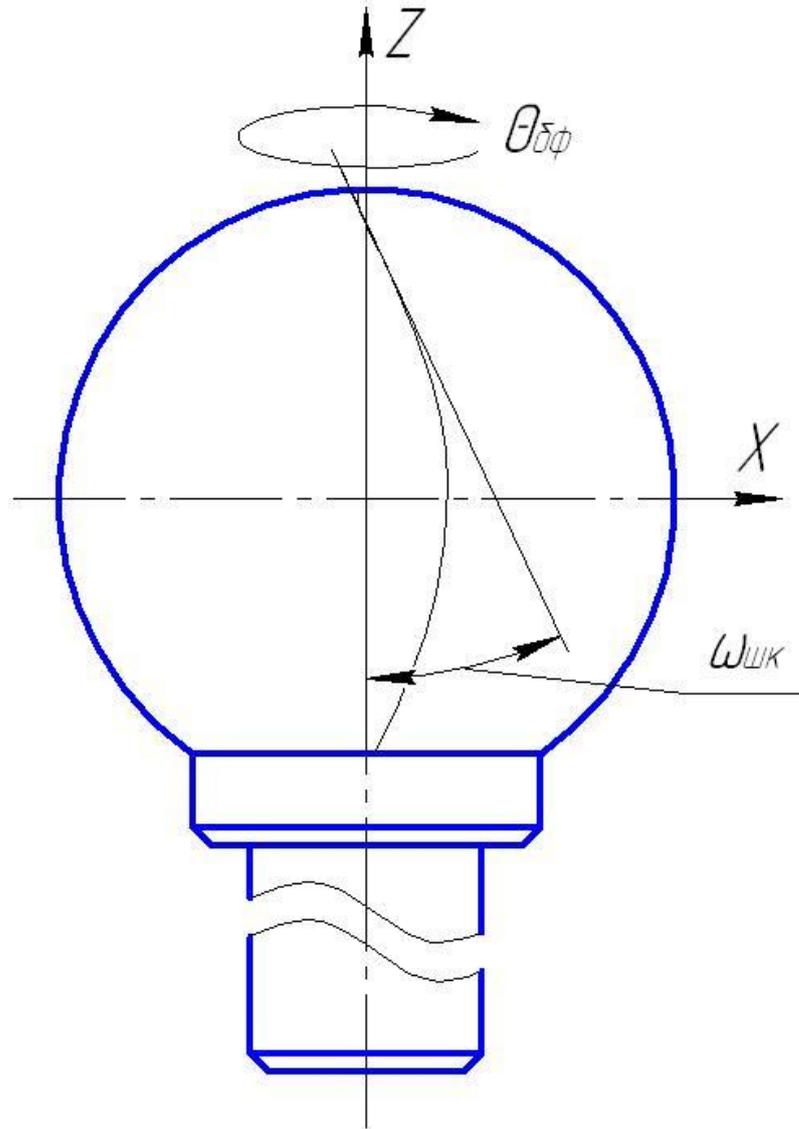


Рисунок 2.18. Схема обработки стружечных канавок

Уравнение окружности сечения на торце шлифовального круга запишется как:

$$z^2 + (x - A_{oi})^2 = R_{ди}^2, \quad (2.19)$$

где $R_{ди} = A_{oi} - R_{сф} + h_i$, h_i – глубина профиля винтовой канавки.

Уравнение которое получено в торцовом сечении:

$$x^2 + z^2 = 1, \quad (2.20)$$

При решении вышеуказанных уравнений получили координаты точек их взаимного пересечения:

$$\begin{cases} z^2 + (x - A_{oi})^2 - R_{ДП}^2 = 0, \\ x^2 + z^2 - 1 = 0. \end{cases} \quad (2.21)$$

Преобразованием вышеуказанной системы выявили, что:

$$1 - 2xA_{oi} + A_{oi}^2 - R_{ДП}^2 = 0,$$

и так же справедливо выражение:

$$\begin{cases} x_{1,2} = A_{oi} \pm R_{ДП}, \\ z_{1,2} = \pm \sqrt{1 - x_{1,2}^2}, \end{cases} \quad (2.22)$$

Откуда можно определить углы θ_1 до θ_2 , как:

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctg\left(\frac{z_1}{x_1}\right), \\ \theta_2 = \arctg\left(\frac{z_2}{x_2}\right). \end{cases} \quad (2.23)$$

В результате выведенные зависимости характеризуют диапазон расположения зоны контакта. Для определения максимального диаметра шлифовального круга, гарантирующего отсутствие подрезов и неполного формирования винтовой стружечной канавки, нужно выявить радиус кривизны проекции. Данное положение известно из теоремы Менье. Данная теорема доказывается в дифференциальной геометрии [60, 61]. Теорема Менье: если поверхность имеет какую-либо кривую и точку на этой кривой, то при проведении плоскости через касательную и и главную нормаль к этой кривой в данной точке, получается плоская кривая, которая имеет ту же касательную и нормаль. (Рисунок 2.19.).

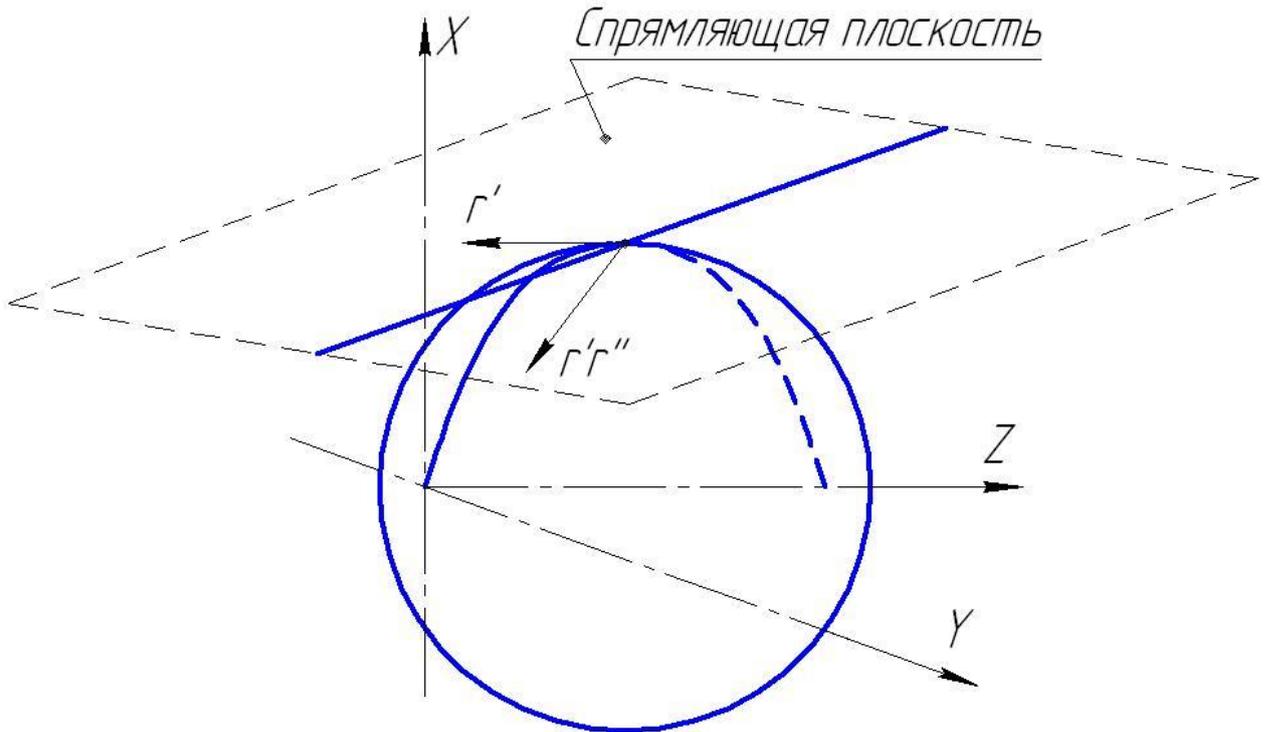


Рисунок 2.19. Плоскость пространственной кривой линии

Радиус кривизны плоской кривой выражается как

$$R_k = \frac{(Z'_{\varphi c} + Y'_{\varphi c})^{3/2}}{|Z'_{\varphi c} Y''_{\varphi c} - Y'_{\varphi c} Z''_{\varphi c}|} \quad (2.24)$$

При постоянном осевом шаге направляющей винтовой линии на сфере, уравнения проекции на плоскость спрямления будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} y_{\varphi c} = p \operatorname{tg} \omega \sin 2\varphi, \\ z_{\varphi c} = 2p \sin \omega \sin \varphi. \end{cases} \quad (2.25)$$

Производные первого и второго порядка по φ запишутся:

$$\begin{cases} y'_{\varphi c} = p \operatorname{tg} \omega \cos 2\varphi, \\ z'_{\varphi c} = 2p \sin \omega \cos \varphi. \end{cases}$$

$$\begin{cases} y''_{\varphi c} = -p \operatorname{tg} \omega \sin 2\varphi, \\ z''_{\varphi c} = 0. \end{cases}$$

С учетом производных формула (2.25) окончательно примет вид

$$R_k = \frac{\left((2p \sin \omega \cos \varphi)^2 + (p \operatorname{tg} \omega \cos 2\varphi)^2 \right)^{3/2}}{|2p^2 \sin \omega \cos \varphi - \operatorname{tg} \omega \sin 2\varphi|}$$

Соответственно, при рассмотрении 2-х случаев при $\varphi = \pi$ и $\varphi = 2\pi$, можно выявить минимальный радиус кривизны, которая определяет максимальный диаметр шлифовального круга. При $\varphi = 0$ по формуле максимальный диаметр шлифовального круга определяется как

$$d_{u_max} \leq \frac{(4p^2 \sin^2 \omega + p^2 \operatorname{tg}^2 \omega)^{\frac{3}{2}}}{2p^2 \sin \omega} \quad (2.26)$$

Выполнив круговое проецирование винтовых линий изделия на осевую плоскость шлифовального круга можно получить производящий профиль шлифовального круга [91]. Для определения производящего профиля шлифовального круга для обработки винтовой стружечной канавки на сфере необходимо развернуть винтовую линию цилиндрическую поверхность. На рисунке 2.20 приведена расчетная схема кругового проецирования винтовых линий на плоскость шлифовального круга.

λ – угол, численно равный углу подъема винтовой линии;

ε – угол скрещивания, образованный между осями инструмента $O_u Z_u$ и заготовки OZ

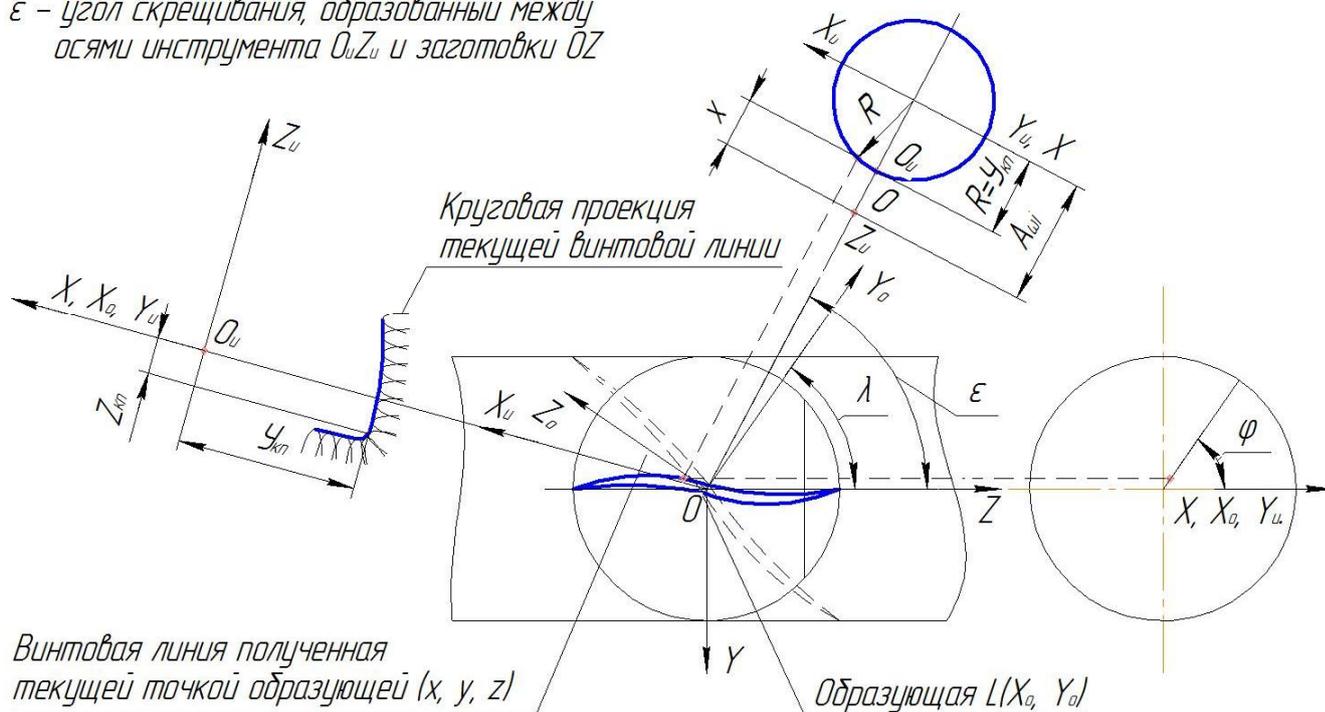


Рисунок 2.20. Расчетная схема профилирования

Образующую винтовой поверхности зададим в системе координат $X_0 Y_0 Z_0$. Очевидно, что любой точке соответствует своя винтовая линия. Круговые проек-

ции винтовой линии на осевую плоскость шлифовального круга $Y_u Z_u$ определяются как:

$$\begin{cases} x_{kn} = 0; \\ y_{kn} = \sqrt{x_u^2 + y_u^2}; \\ z_{kn} = z_u. \end{cases} \quad (2.27)$$

где x_u, y_u, z_u – координаты точек винтовых линий изделия в системе $X_u Y_u Z_u$, связанной со шлифовальным кругом.

Для определения координаты точек винтовых линий необходимо пересчитать координаты точек из системы координат $X_\varepsilon Y_\varepsilon Z_\varepsilon$ в систему координат $X_u Y_u Z_u$ посредством использования матрицы вращения:

$$\begin{vmatrix} x_u \\ y_u \\ z_u \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & -\cos \varepsilon & \sin \varepsilon & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -A_{\omega i} \\ 0 & \sin \varepsilon & \cos \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_\varepsilon \\ y_\varepsilon \\ z_\varepsilon \\ 1 \end{vmatrix} \quad (2.28)$$

Путем выделения из матричного выражения получаем систему уравнений, которая определяет координаты точек винтовых линий:

$$\begin{cases} x_u = -y_\varepsilon \cos \varepsilon + z_\varepsilon \sin \varepsilon; \\ y_u = x_\varepsilon - A_{\omega i}; \\ z_u = y_\varepsilon \sin \varepsilon + z_\varepsilon \cos \varepsilon. \end{cases} \quad (2.29)$$

Совместным решением уравнений (2.28) в (2.29) была получена система уравнений кругового проецирования винтовых линий на плоскость шлифовального круга:

$$\begin{cases} x_{kn} = 0; \\ y_{kn} = \sqrt{(-y_\varepsilon \cos \varepsilon + z_\varepsilon \sin \varepsilon)^2 + (x_\varepsilon - A_{\omega i})^2}; \\ z_{kn} = y_\varepsilon \sin \varepsilon + z_\varepsilon \cos \varepsilon. \end{cases} \quad (2.30)$$

Данное уравнение описывает круговые проекции винтовых линий на плоскость шлифовального круга. Посредством проецирования образуется группа круговых проекций, которые образованы точками винтовой линии. Производящий

профиль представляет собой огибающую к группе кривых. Определения огибающей группы кривых более подробно рассмотрена в работе [88] (Рисунок 2.21.).

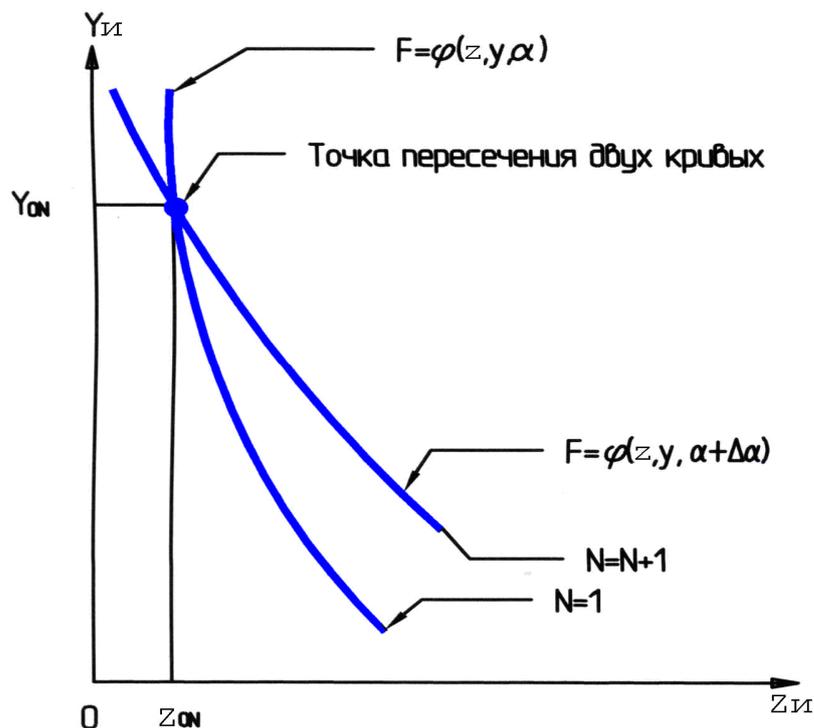


Рисунок 2.21. Схема определения огибающей

Очевидно, что на расстоянии между 2-мя кривыми ничтожно мало и кривую можно представить как совокупность точек и уравнение которых имеет вид

$$\frac{Z - Z_{N,i}}{Z_{N,i+1} - Z_{N,i}} = \frac{Y - Y_{N,i}}{Y_{N,i+1} - Y_{N,i}} .$$

При пересечении прямых образуются точка их пересечения, координаты которой определяются как:

$$Z_{ON} = \frac{\begin{vmatrix} B_{N,i} & C_{N,i} \\ B_{N,i+1} & C_{N,i+1} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} A_{N,i} & B_{N,i} \\ A_{N,i+1} & B_{N,i+1} \end{vmatrix}}; Y_{ON} = \frac{\begin{vmatrix} A_{N,i} & C_{N,i} \\ A_{N,i+1} & C_{N,i+1} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} A_{N,i} & B_{N,i} \\ A_{N,i+1} & B_{N,i+1} \end{vmatrix}} \quad (2.31)$$

Искомые точки должны удовлетворять условиям:

если $Z_{N,i} \geq Z_{N,i+1}$, то $Z_{N,i} \geq Z_{ON} \geq Z_{N,i+1}$

$Z_{N,i} \leq Z_{N,i+1}$, то $Z_{N,i} \leq Z_{ON} \leq Z_{N,i+1}$

и если $Y_{N,i} \geq Y_{N,i+1}$, то $Y_{N,i} \geq Y_{ON} \geq Y_{N,i+1}$

$$Y_{N,i} \leq Y_{N,i+1, \text{ТО}} \leq Y_{N,i} \leq Y_{ON} \leq Y_{N,i+1}$$

Поиск точек пересечения двух ближайших кривых осуществляется методом последовательного перебора точек и сечений. В связи с тем, что в данном методе отсутствует оценка точности, то необходимо дополнение к методу. Характеристикой данного метода является то, что строятся и дуги окружностей [91]. По выбранным точкам необходимо построить дугу окружности и определить центр круга, а также необходимо определить расстояние из центра до кривых.

По выявленным точкам определяется центр, который проходит через окружности. Данный процесс необходимо повторить до тех пор, пока расстояние между центрами не окажется меньше между центрами данной точки (Рисунок 2.22.).

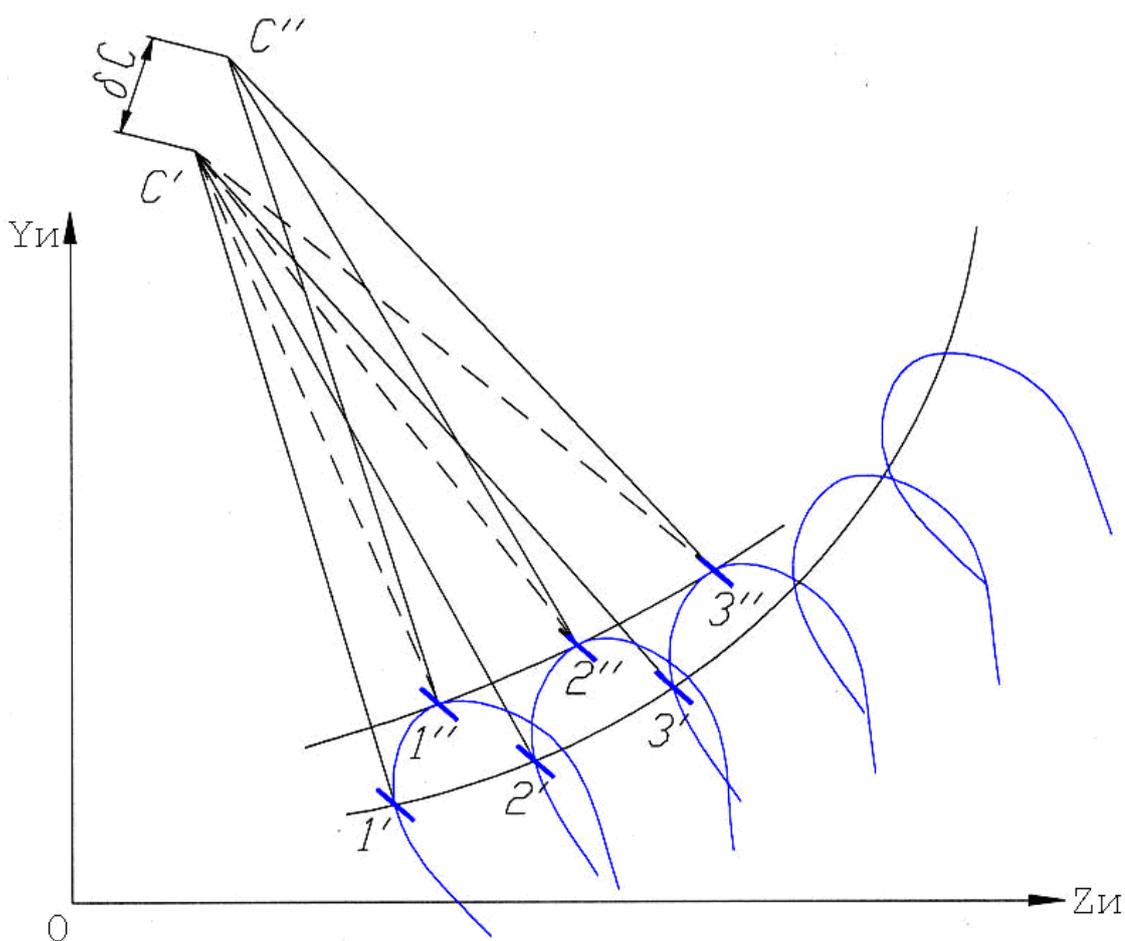


Рисунок 2.22. Схема определения огибающей

Чтобы определить координаты текущего центра точки C' необходимо ввести точки: A и B – середины отрезка соответственно $1'2'$ и $2'3'$ (Рисунок 2.23.).

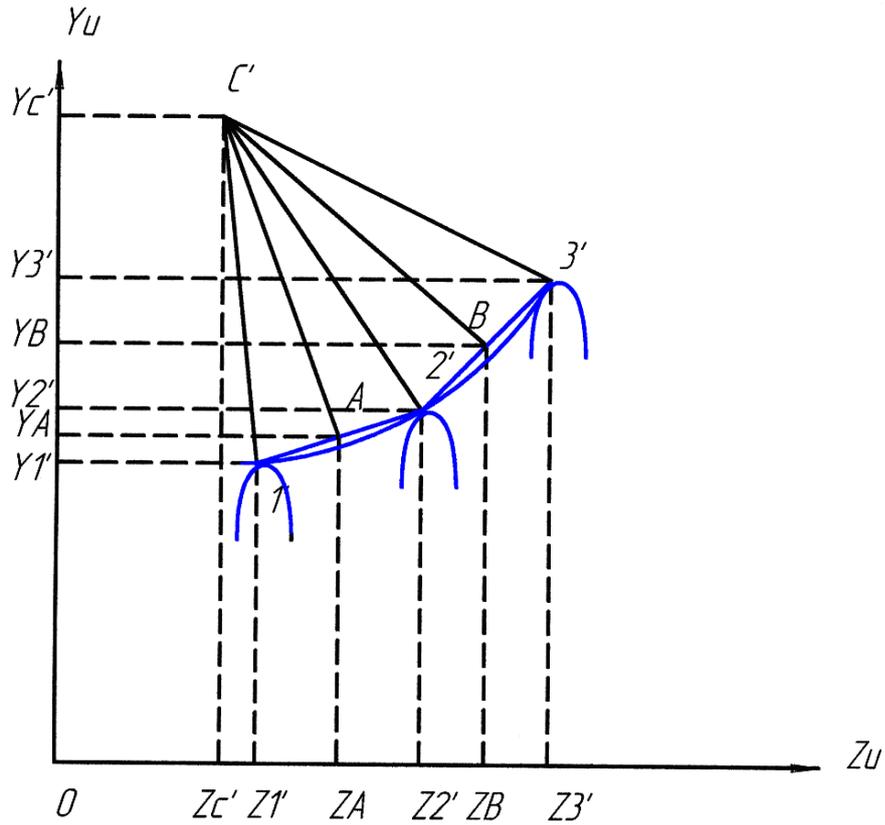


Рисунок 2.23. Определение координат центра окружности

Координаты центра окружности определяются как произведение углов наклона. Для решения данной задачи нужно найти координаты A и B :

$$z_A = \frac{z_1 + z_2}{2}; \quad y_A = \frac{y_1 + y_2}{2}; \quad z_B = \frac{z_2 + z_3}{2}, \quad y_B = \frac{y_2 + y_3}{2}.$$

Коэффициенты угла наклона отрезков прямых:

$$k_{12} = \frac{y_2 - y_1}{z_2 - z_1}; \quad k_{23} = \frac{y_3 - y_2}{z_3 - z_2}; \quad k_{AC'} = \frac{y_A - y_{C'}}{z_A - z_{C'}}; \quad k_{BC'} = \frac{y_B - y_{C'}}{z_B - z_{C'}}. \quad (2.32)$$

С учетом вышеуказанного условия получается система уравнений:

$$\begin{cases} k_{12} k_{AC'} = -1, \\ k_{23} k_{BC'} = -1. \end{cases} \quad (2.33)$$

Совместным решением систем (2.32) и (2.33) была получена система:

$$\begin{cases} z_{C'} = k_{12}(y_A - y_{C'}) + z_A, \\ z_{C'} = k_{23}(y_B - y_{C'}) + z_B \end{cases} \quad (2.34)$$

Результатом решения относительно $y_{C'}$ является формула:

$$y_{C'} = \frac{k_{23}y_B - k_{12}y_A + z_B - z_A}{k_{23} - k_{12}}. \quad (2.35)$$

Путем подстановки полученного значения в систему уравнений (2.35) определили остальные координаты центра окружности. Далее осуществляется поиск точек на кривых (Рисунок 2.24.).

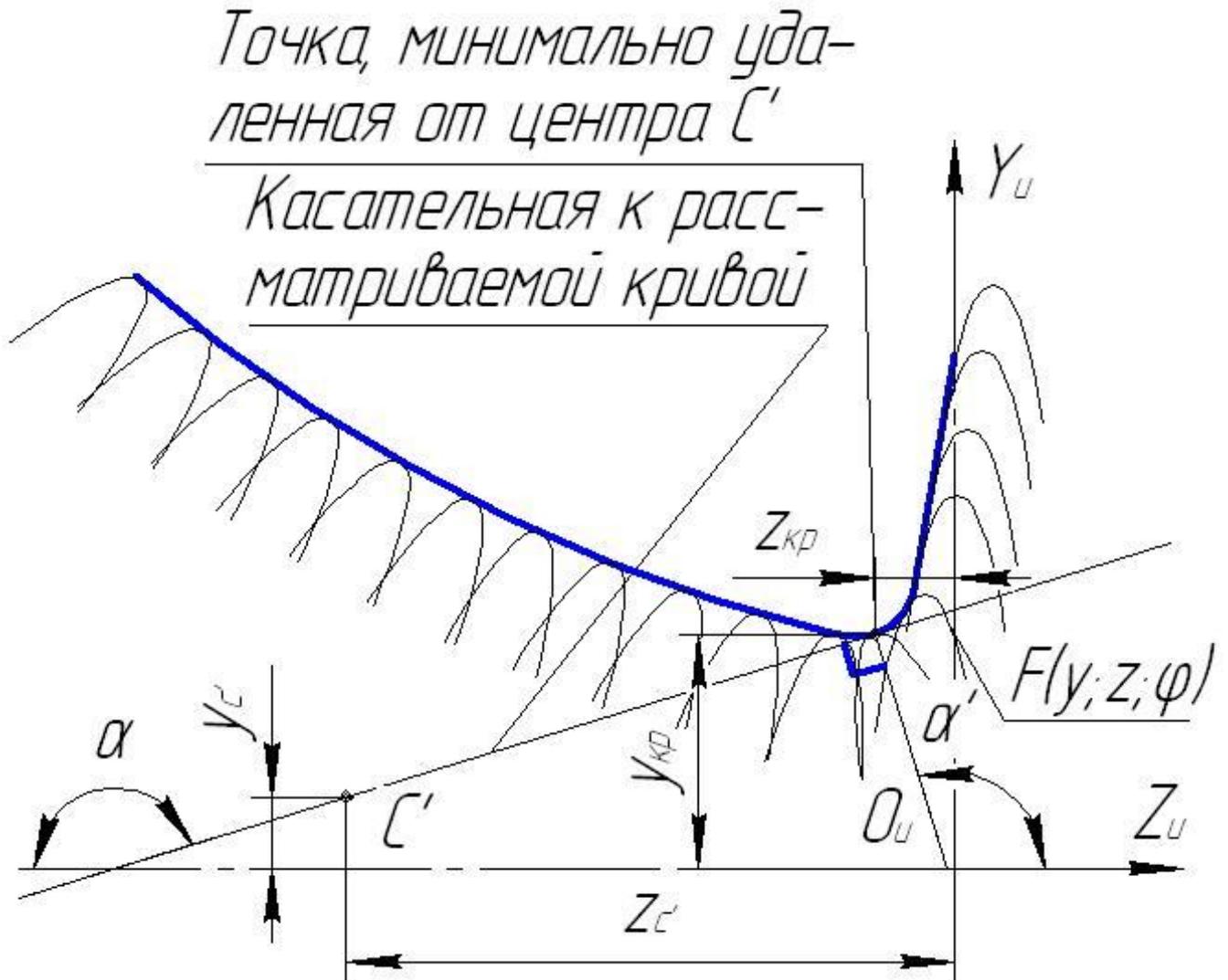


Рисунок 2.24. Определение точки кратчайшим расстоянием

Вышеуказанное условие математически можно выразить следующим образом:

$$\operatorname{tg} \alpha = -\operatorname{ctg} \alpha' \quad (2.36)$$

Тангенс угла наклона касательной можно определить как производную (2.24):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dy_{kn}}{dz_{kn}} \quad (2.37)$$

Данное выражение можно выразить как частные производные:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\frac{\partial y_{kn}}{\partial \varphi}}{\frac{\partial z_{kn}}{\partial \varphi}} \quad (2.38)$$

где $\frac{\partial y_{kn}}{\partial \varphi}$, $\frac{\partial z_{kn}}{\partial \varphi}$ – частные производные:

$$\begin{cases} \frac{\partial y_{kn}}{\partial \varphi} = \frac{(y \cos \varepsilon - z \sin \varepsilon) \left(\frac{\partial z}{\partial \varphi} \sin \varepsilon - \frac{\partial y}{\partial \varphi} \cos \varepsilon \right) + (x - A_\omega) \frac{\partial x}{\partial \varphi}}{\sqrt{(z \sin \varepsilon - y \cos \varepsilon)^2 + (x - A_\omega)^2}}; \\ \frac{\partial z_{kn}}{\partial \varphi} = \frac{\partial y}{\partial \varphi} \sin \varepsilon + \frac{\partial z}{\partial \varphi} \cos \varepsilon. \end{cases} \quad (2.39)$$

где $\frac{\partial x}{\partial \varphi}$, $\frac{\partial y}{\partial \varphi}$, $\frac{\partial z}{\partial \varphi}$ – частные производные уравнений, которые задают винтовую поверхность изделия.

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial \varphi} = -x_e \sin \varphi - y_e \cos \varphi; \\ \frac{\partial y}{\partial \varphi} = x_e \cos \varphi - y_e \sin \varphi; \\ \frac{\partial z}{\partial \varphi} = P. \end{cases} \quad (2.40)$$

Путем подстановки частных производных (2.40) в (2.39) была получена система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial y_{kn}}{\partial \varphi} = \frac{(y \cos \varepsilon - z \sin \varepsilon)(P \sin \varepsilon - x \cos \varepsilon) + y(x - A_\omega)}{\sqrt{(z \sin \varepsilon - y \cos \varepsilon)^2 + (x - A_\omega)^2}}; \\ \frac{\partial z_{kn}}{\partial \varphi} = -x \sin \varepsilon + P \cos \varepsilon. \end{cases} \quad (2.41)$$

Подставив (2.41) в (2.38), были получены значения тангенса угла наклона:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{(y \cos \varepsilon - z \sin \varepsilon)(P \sin \varepsilon - x \cos \varepsilon) + y(x - A_\omega)}{(x \sin \varepsilon + P \cos \varepsilon) \sqrt{(z \sin \varepsilon - y \cos \varepsilon)^2 + (x - A_\omega)^2}}; \quad (2.42)$$

Котангенс угла наклона прямой, которая соединяет искомую точку на проекции винтовой линии можно определить по следующей формуле:

$$\operatorname{ctg} \alpha' = \frac{(y \cos \varepsilon - z \sin \varepsilon) - z_{c'}}{y_{c'} - \sqrt{(z \sin \varepsilon - y \cos \varepsilon)^2 + (x - A_{\omega})^2}}. \quad (2.43)$$

Данный метод позволяет определить производящий профиль шлифовального круга без предварительного рассечения винтовой поверхности.

2.4. Винтовое проецирование производящей поверхности шлифовального круга

В данной работе используется схема метода совмещенных сечений [20]. Для выявления группы винтовых проекций в зоне контакта шлифовального круга и сферической фрезы выполняется проецирование кругового следа производящего профиля шлифовального круга на плоскость заготовки. В результате образуется группа винтовых проекций.

Для того чтобы выполнить винтовое проецирование нужно преобразовать координаты точек образующей производящего профиля шлифовального круга из системы координат, связанной со шлифовальным кругом в систему координат, связанной с обрабатываемой сферической фрезой:

$$\begin{cases} x = y_u + A_{\omega}; \\ y = z_u \sin \varepsilon - x_u \cos \varepsilon; \\ z = x_u \sin \varepsilon + z_u \cos \varepsilon. \end{cases} \quad (2.44)$$

В результате выходные точки можно спроецировать по винтовой линии в плоскость шлифовального круга:

$$\begin{cases} x_{en} = x \cos \varphi - y \sin \varphi; \\ y_{en} = x \sin \varphi + y \cos \varphi; \\ z_{en} = z + p\varphi. \end{cases} \quad (2.45)$$

где x_{en}, y_{en}, z_{en} – координаты точек круговых следов производящей поверхности шлифовального круга в винтовом движении.

Для выявления координат точек винтовых проекций производящей поверхности шлифовального круга на плоскость сферической фрезы нужно уравнение системы (2.45) приравнять к нулю. В результате после преобразований сформируется система:

$$\begin{cases} x_{en} = x \cos \varphi - y \sin \varphi; \\ z_{en} = z + p\varphi; \\ \varphi = -\operatorname{arctg}\left(\frac{y}{x}\right). \end{cases} \quad (2.46)$$

Система уравнений (2.46) задает координаты винтовых проекций производящей поверхности шлифовального круга на плоскость. В результате была получена группа винтовых проекций круговых следов производящей поверхности шлифовального круга, которая выражена аналитически.

Решением обратной задачи является винтовое проецирование кругового следа производящей поверхности шлифовального круга на исходное сечение [91] (Рисунок 2.25.).

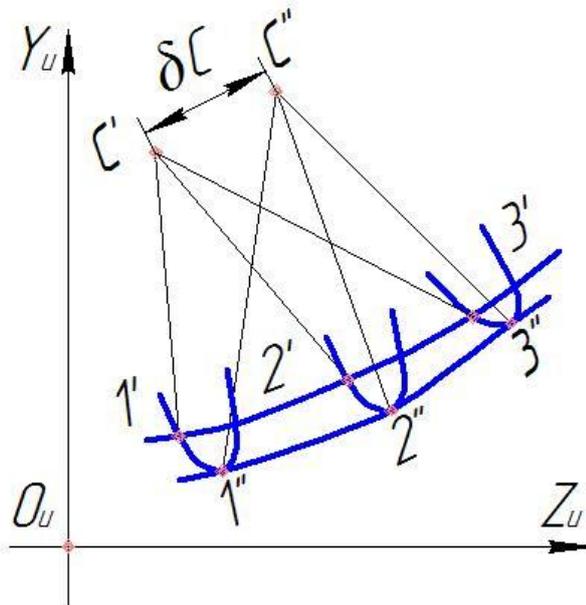


Рисунок 2.25. Определение точек огибающей

Точка которая имеет наибольшее расстояние с центром C' , должна удовлетворять условию: касательная в точке должна быть перпендикулярна прямой, которая содержит отрезок (Рисунок 2.26.).

Математически данное условие можно записать как:

$$\operatorname{tg} \alpha = -\operatorname{ctg} \alpha'.$$

Отсюда можно определить тангенс угла наклона касательной как:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dx_{en}}{dz_{en}} \quad (2.47)$$

Вышеприведенное выражение так же можно выразить через функции системы уравнений, которые описывают винтовые проекции:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\frac{\partial y_{en}}{\partial \beta}}{\frac{\partial z_{en}}{\partial \beta}} \quad (2.48)$$

где $\frac{\partial x_{en}}{\partial \beta}, \frac{\partial z_{en}}{\partial \beta}$ — производные по углу β :

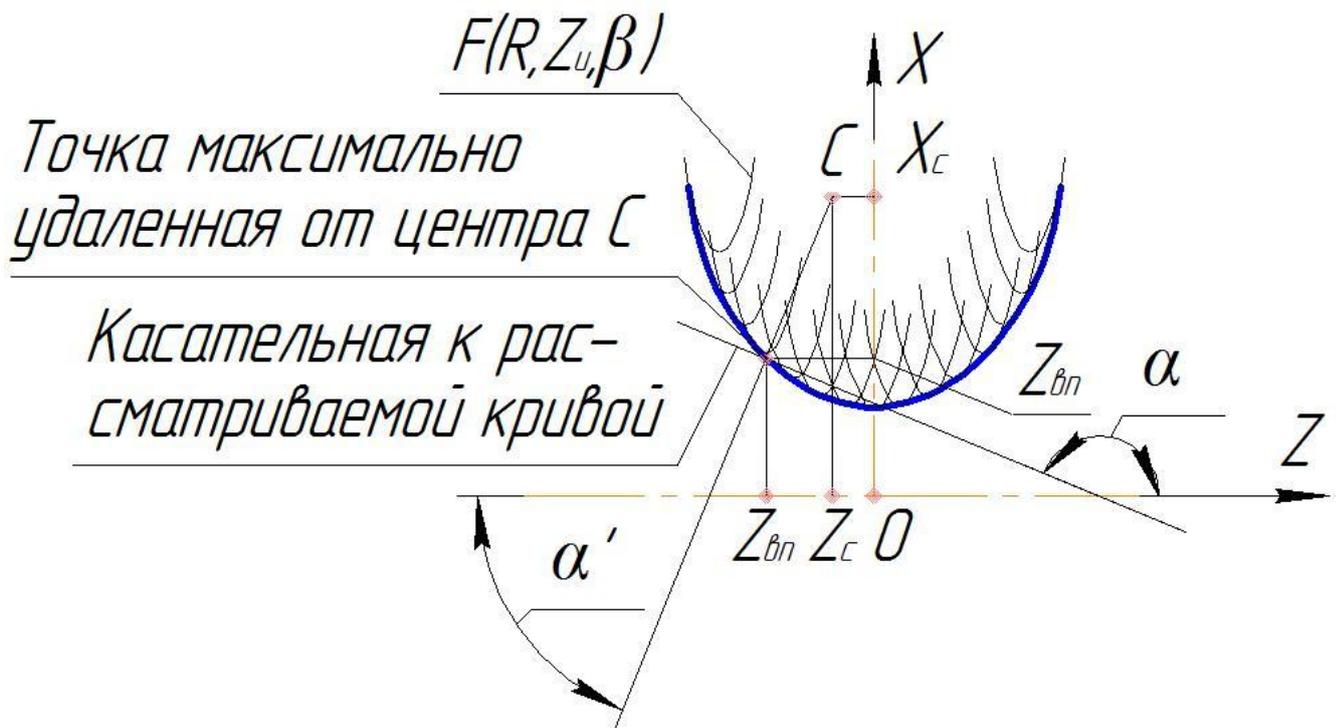


Рисунок 2.26. Определение точки на винтовой проекции

$$\begin{cases} \frac{\partial x_{en}}{\partial \beta} = \frac{\partial x}{\partial \beta} \cos \varphi - x \sin \varphi \frac{\partial \varphi}{\partial \beta} - \frac{\partial y}{\partial \beta} \sin \varphi - y \cos \varphi \frac{\partial \varphi}{\partial \beta}; \\ \frac{\partial z_{en}}{\partial \beta} = \frac{\partial z}{\partial \beta} + P \frac{\partial \varphi}{\partial \beta}; \\ \frac{\partial \varphi}{\partial \beta} = \frac{y \frac{\partial x}{\partial \beta} - x \frac{\partial y}{\partial \beta}}{x^2 + y^2}. \end{cases} \quad (2.49)$$

где $\frac{\partial x}{\partial \beta}, \frac{\partial y}{\partial \beta}, \frac{\partial z}{\partial \beta}$ – производные уравнений которые задают винтовую поверхность.

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial \beta} = -R_u \sin \beta; \\ \frac{\partial y}{\partial \beta} = -R_u \cos \beta \cos \varepsilon; \\ \frac{\partial z}{\partial \beta} = R_u \cos \beta \cos \varepsilon. \end{cases} \quad (2.50)$$

С учетом полученных систем (2.48 и 2.49) система уравнений (2.50) получит вид:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\left(-R_u \sin \beta + (z_u \sin \varepsilon - R_u \sin \beta \cos \varepsilon) \frac{\partial \varphi}{\partial \beta} \right) \cos \varphi - \left((R_u \cos \beta + A_\omega) \frac{\partial \varphi}{\partial \beta} - R_u \cos \beta \cos \varepsilon \right) \sin \varphi}{R_u \cos \beta \sin \varepsilon + P \frac{\partial \varphi}{\partial \beta}} \quad (2.51)$$

где $\varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{R_u \sin \beta \cos \varepsilon - z_u \sin \varepsilon}{R_u \cos \beta + A_\omega} \right)$, а $\frac{\partial \varphi}{\partial \beta} = \frac{R_u \sin \beta (R_u \sin \beta \cos \varepsilon - z_u \sin \varepsilon) + R_u \cos \beta \cos \varepsilon}{(R_u \cos \beta - A_\omega)^2 + (z_u \sin \varepsilon - R_u \sin \beta \cos \varepsilon)^2}$

Котангенс угла наклона прямой определяется по следующей формуле:

$$-\operatorname{ctg} \alpha' = \frac{(R_u \sin \beta \sin \varepsilon) + z_u \cos \varepsilon + P \varphi - z_{c'}}{x_{c'} - ((R_u \cos \beta + A_\omega) \cos \varphi - (z_u \sin \varepsilon - R_u \sin \beta \cos \varepsilon) \sin \varphi)} \quad (2.52)$$

Совместным решением уравнений (2.51) и (2.52) была найдена система уравнений, которую необходимо решить относительно параметра φ . По данной методике производится поиск точек, которые принадлежат огибающей.

2.5. Сравнение расчетного и фактического профиля образующей винтовой поверхности сферической фрезы

Задача сравнения заданного и рассчитанного профиля решается при получении результатов моделирования процесса обработки винтовой поверхности детали шлифовальным кругом [56]. Для решения данной задачи необходимо определить расстояние по нормали от координат точек профиля винтовой поверхности до координат точек рассчитанного профиля. При условии что расчетный профиль не выходит за границы поля допуска принимается решение о годности инструмента. Для решения данной задачи необходимо найти расстояние по нормали от точки профиля винтовой поверхности до точки рассчитанного профиля. Во-первых, необходимо определить точку расчетного профиля, являющейся ближайшей к точке заданного профиля. Во-вторых, необходимо определить центр и радиус окружности (Рисунок 2.27.).

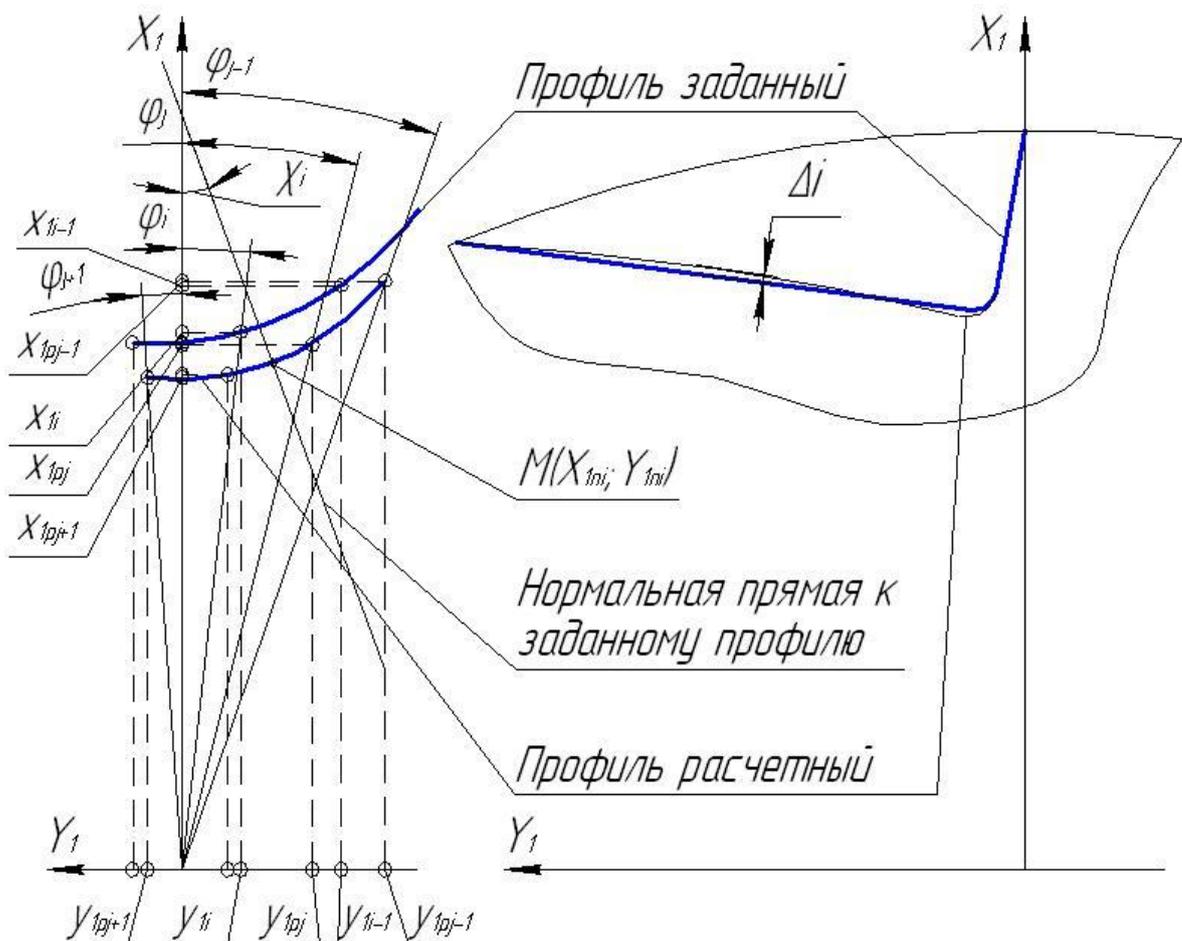


Рисунок 2.27. Сравнение профилей винтовой стружечной канавки

Для выявления профиля применяется линейная аппроксимация. Нормальная прямая к заданному профилю имеет следующий вид $y = k(x - x_{1i}) + y_{1i}$, где $k = \operatorname{tg}\chi_i$.

Так как прямая нормали перпендикулярна отрезку аппроксимирующему прямой

$$k = \operatorname{tg}\chi_i = -\frac{x_{1i-1} - x_{1i}}{y_{1i-1} - y_{1i}}, \quad (2.53)$$

где $x_i, y_i, x_{i-1}, y_{i-1}$ – координаты точек заданного профиля винтовой стружечной канавки.

После выявления уравнения прямой находятся точки пересечения профилем винтовой стружечной канавки:

$$x^2 - 2xx_{1c} + x_{1c}^2 + y_{1c}^2 - 2yy_{1c} + y^2 = R^2.$$

В результате была получена система уравнений:

$$\begin{cases} x^2 - 2xx_{1c} + x_{1c}^2 + y_{1c}^2 - 2yy_{1c} + y^2 - R^2 = 0; \\ y = k(x - x_{1i}) + y_{1i}. \end{cases} \quad (2.54)$$

В результате преобразования было получено уравнение:

$$(1+k^2)x^2 - x(2x_{1c} + 2ky_{1c} + 2k^2x_{1i} - 2ky_{1i}) + (x_{1c}^2 + y_{1c}^2 + 2ky_{1c}x_{1i} - 2y_{1c}y_{1i} + k^2x_{1i}^2 - 2ky_{1i}x_{1i} + y_{1i}^2 - R^2) = 0,$$

которое приводится к виду $ax^2 + bx + c = 0$.

Таким образом, координата y определяется из системы уравнений 2.42. Профилю винтовой стружечной канавки соответствует точка, у которой координата x находится в интервале между x_{1pj-1} и x_{1pj+1} , а y координата – в интервале между y_{1pj-1} и y_{1pj+1} соответственно. Расстояние по нормали вычисляется как длина отрезка

$$\Delta i = \left| \sqrt{(x_{1ni} - x_{1i})^2 + (y_{1ni} - y_{1i})^2} \right| \quad (2.55)$$

После вычисления расстояния необходимо выполнить проверку

$$\Delta i \leq \delta / 2 \quad (2.56)$$

где δ – допуск на профиль детали.

Приведенные математические зависимости позволяют выполнить сравнение рассчитанного и исходного профиля винтовой стружечной канавки сферической фрезы.

Таким образом, в настоящей главе получены следующие результаты:

1. Выявлены математические зависимости винтовой поверхности на сфере и инструмента второго порядка.
2. Разработана математическая модель процесса формирования винтовой поверхности на сфере шлифовальным кругом.
3. Разработана методика определения производящего профиля шлифовального круга для обработки винтовых стружечных канавок на сфере.

3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ВИНТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ СФЕРИЧЕСКОЙ ФРЕЗЫ ИНСТРУМЕНТОМ ВТОРОГО ПОРЯДКА

3.1. Компьютерное моделирование винтовой поверхности сферической фрезы и шлифовального круга

Для обозначения моделирования процесса обычно применяется термин «численный эксперимент». Бурное развитие средств вычислительной техники стирает грань между натуральным и численным моделированием. Нередко для разграничения натурального и численного моделирования используют термин «компьютерное моделирование» [91].

Компьютерное моделирование процесса формообразования винтовой поверхности сферической фрезы шлифовальным кругом выполняется в последовательности:

- математическое описание поверхности шлифовального круга в сечении;
- определение параметров установки шлифовального круга;
- моделирование процесса обработки винтовой поверхности шлифовального круга;
- получение группы винтовых проекций производящего профиля;
- определение огибающей группы винтовых проекций производящего профиля;
- сравнение полученных профилей.

Указанная последовательность моделирования процесса обработки винтовой поверхности шлифовальным кругом приведена в виде общего алгоритма (Рисунок 3.1.).

Исходными данными для моделирования обработки являются описание профиля образующей исходной инструментальной поверхности, а также параметры установки шлифовального круга относительно сферической фрезы.

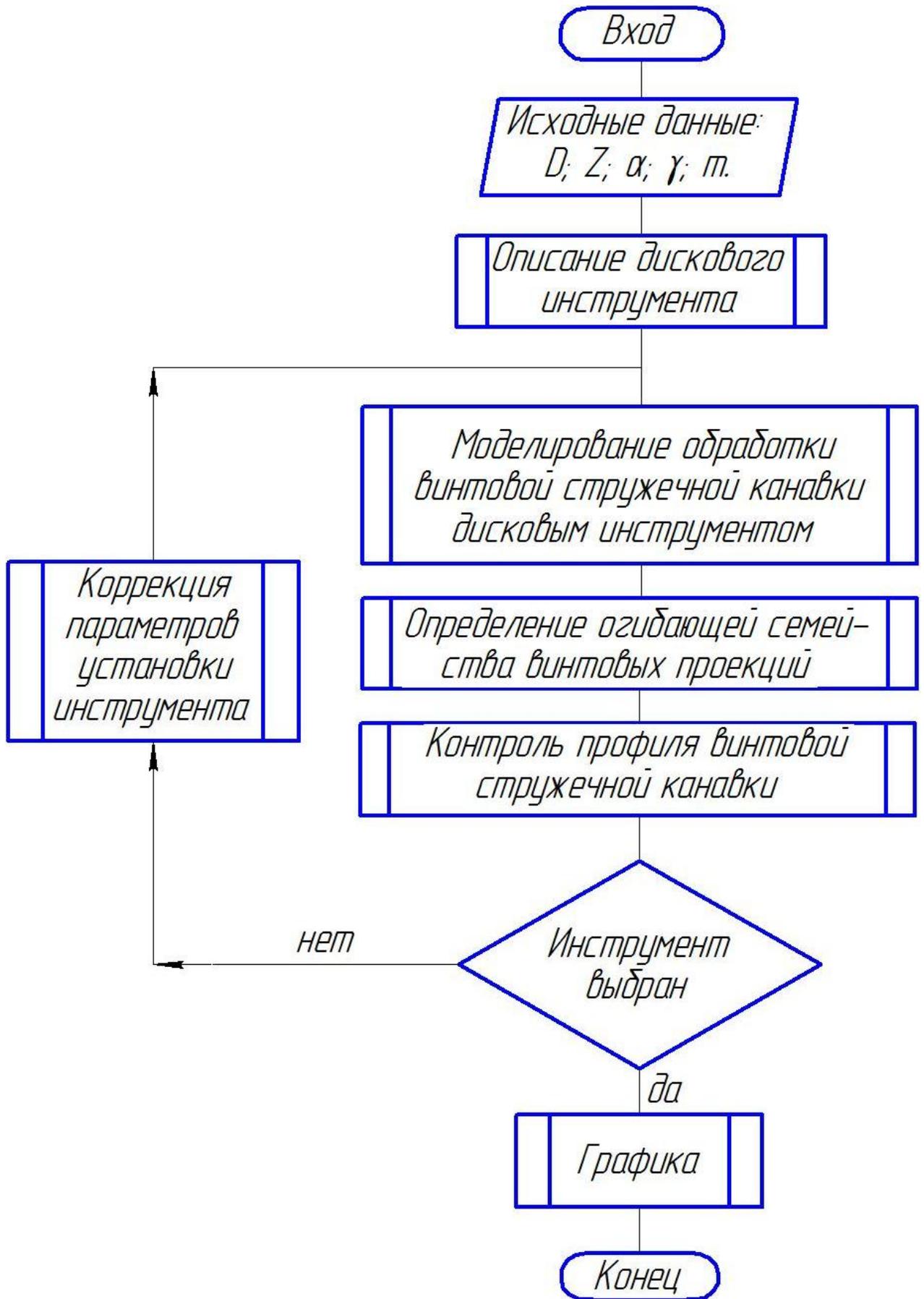


Рисунок 3.1. Общий алгоритм компьютерного моделирования

Профиль образующей производящего профиля обычно задается в виде набора точек, линий и дуг окружности. Для которых необходимо получить аналитические выражения (Рисунок 3.2.).

Прямая задается координатами точки 1 ($y_1; z_1$) и координатами точки 2 ($y_2; z_2$). Тогда уравнение прямой будет иметь вид:

$$y_u = \frac{(z_u - z_1)(y_2 - y_1)}{(z_2 - z_1)} + y_1 \quad (3.1)$$

Дугу окружности можно задать координатами центра дуги $O_c(y_c, z_c)$, радиусом дуги R_c . В этом случае уравнение дуги окружности имеет вид:

$$\begin{cases} z_u = R_c + z_c; \\ y_u = R_c + y_c. \end{cases} \quad (3.2)$$

Уравнение следующего участка дуги окружности задается как:

$$\begin{cases} z_u = R_o + z_o; \\ y_u = R_o + y_o. \end{cases} \quad (3.3)$$

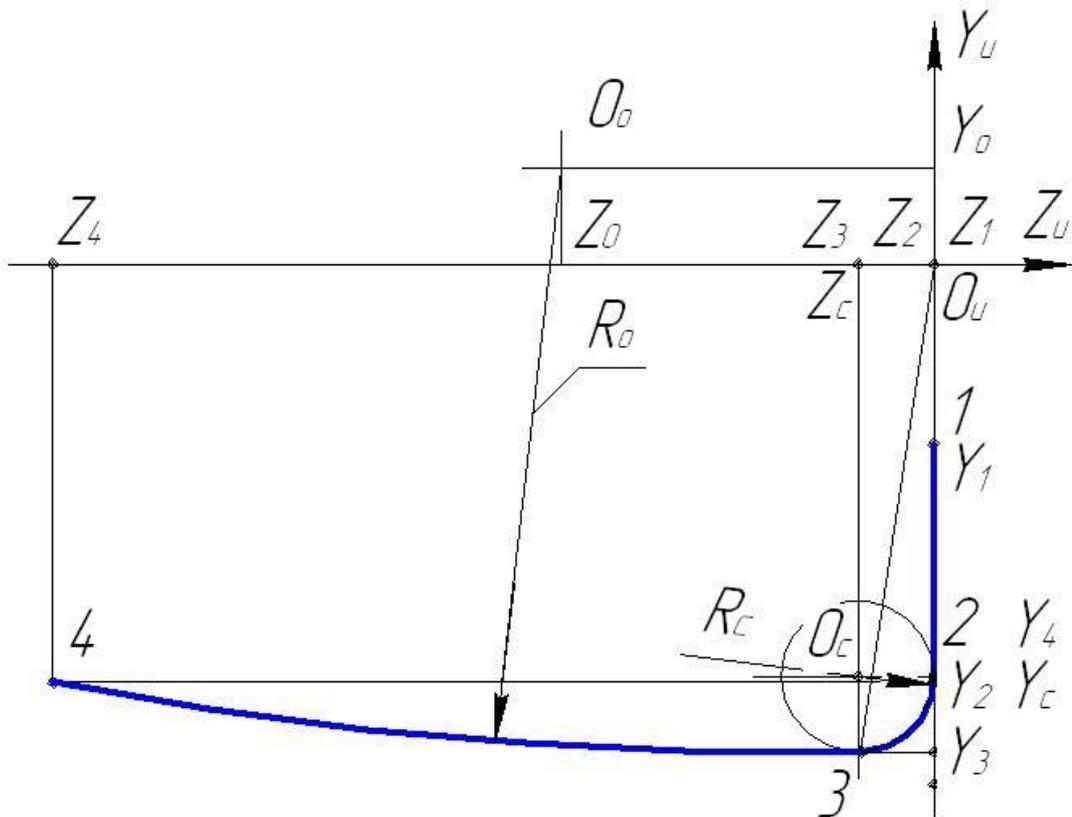


Рисунок 3.2. Расчет точек профиля производящего профиля

Придав каждой точке производящего профиля движение вращения относительно оси $O_u Z_u$ системы координат $X_u Y_u Z_u$, формируется исходная инструментальная поверхность вращения шлифовального круга (Рисунок 3.3.):

$$\begin{cases} x'_u = (R_o + R_c + z_o + z_c) \cos \beta; \\ y'_u = (R_o + R_c + z_o + z_c) \sin \beta; \\ z'_u = z_u. \end{cases} \quad (3.4)$$

где β – угол поворота точки профиля производящей поверхности относительно системы $X_u Y_u Z_u$; z_u – значение координаты Z_u в плоскости которой находится; R радиус шлифовального круга.

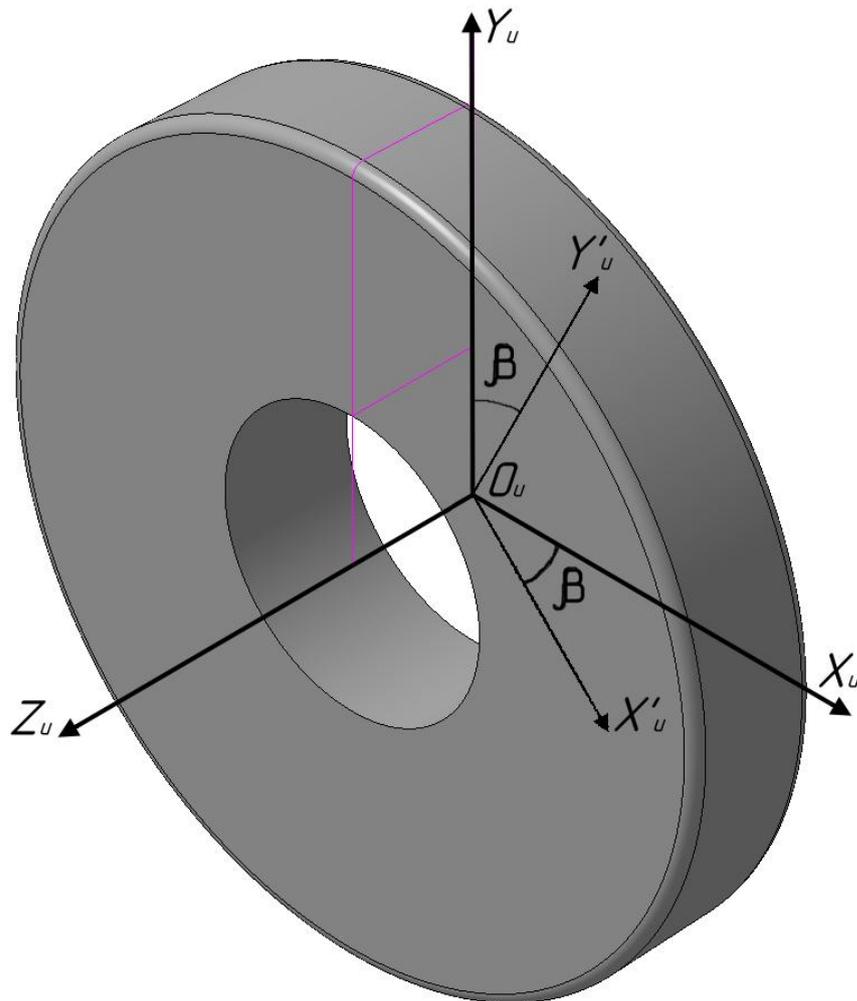


Рисунок 3.3. Исходная инструментальная поверхность шлифовального круга

Также для моделирования процесса обработки необходимы параметры заготовки для сферической фрезы. Заготовка сферической фрезы представляет собой сферическую поверхность в оправке (Рисунок 3.4.).

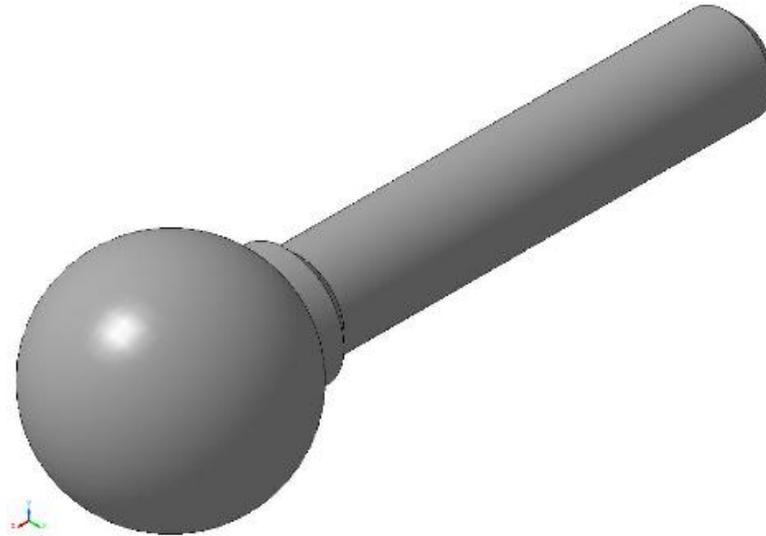


Рисунок 3.4. Заготовка сферической фрезы

Для моделирования процесса обработки компьютерные модели шлифовального круга и заготовки сферической фрезы были импортированы в систему проектирования КОМПАС-3D V12. По расчетным данным из главы 2.3 параметров установки шлифовального круга в КОМПАС-3D V12 смоделирован процесс обработки сферической фрезы шлифовальным кругом (Рисунок 3.5.).

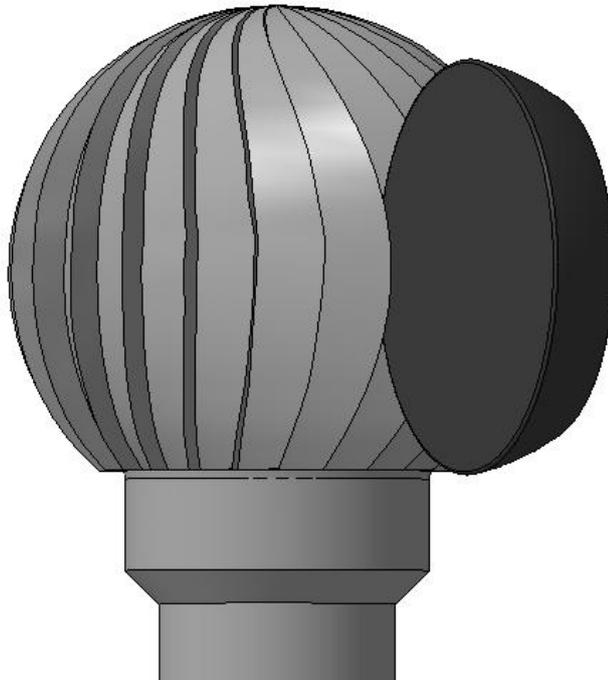


Рисунок 3.5. Процесс обработки сферической фрезы

На основе компьютерной модели был построен график изменения угла наклона винтовой стружечной канавки в зависимости от диаметра фрез (Рисунок 3.6.).

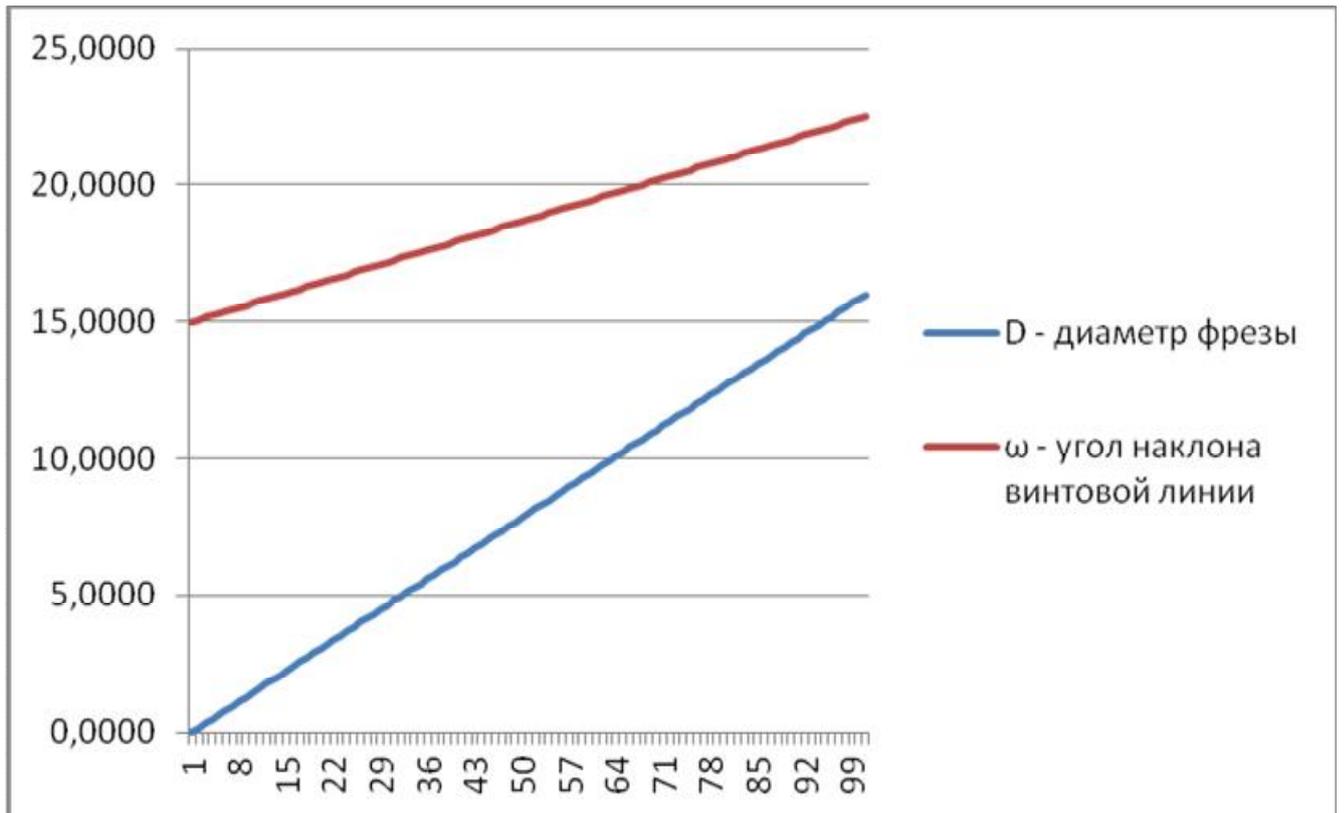


Рисунок 3.6. График изменения угла наклона винтовой стружечной канавки

Так же компьютерная модель позволяет уточнять параметры взаимного расположения шлифовального круга и сферической фрезы в процессе обработки.

3.2. Составление алгоритма и разработка прикладной программы расчета параметров винтовой поверхности сферической фрезы

По приведенным математическим зависимостям в главах 2.2 и 2.3 разработан алгоритм (Рисунок 3.7.) и составлена программа расчета параметров винтовой стружечной канавки и координат точек профиля винтовой поверхности сферической фрезы на языке программирования Delphi (приложение 4). На программу получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010612411 РФ [68]. Интерфейс программы представлен на рисунке 3.8.

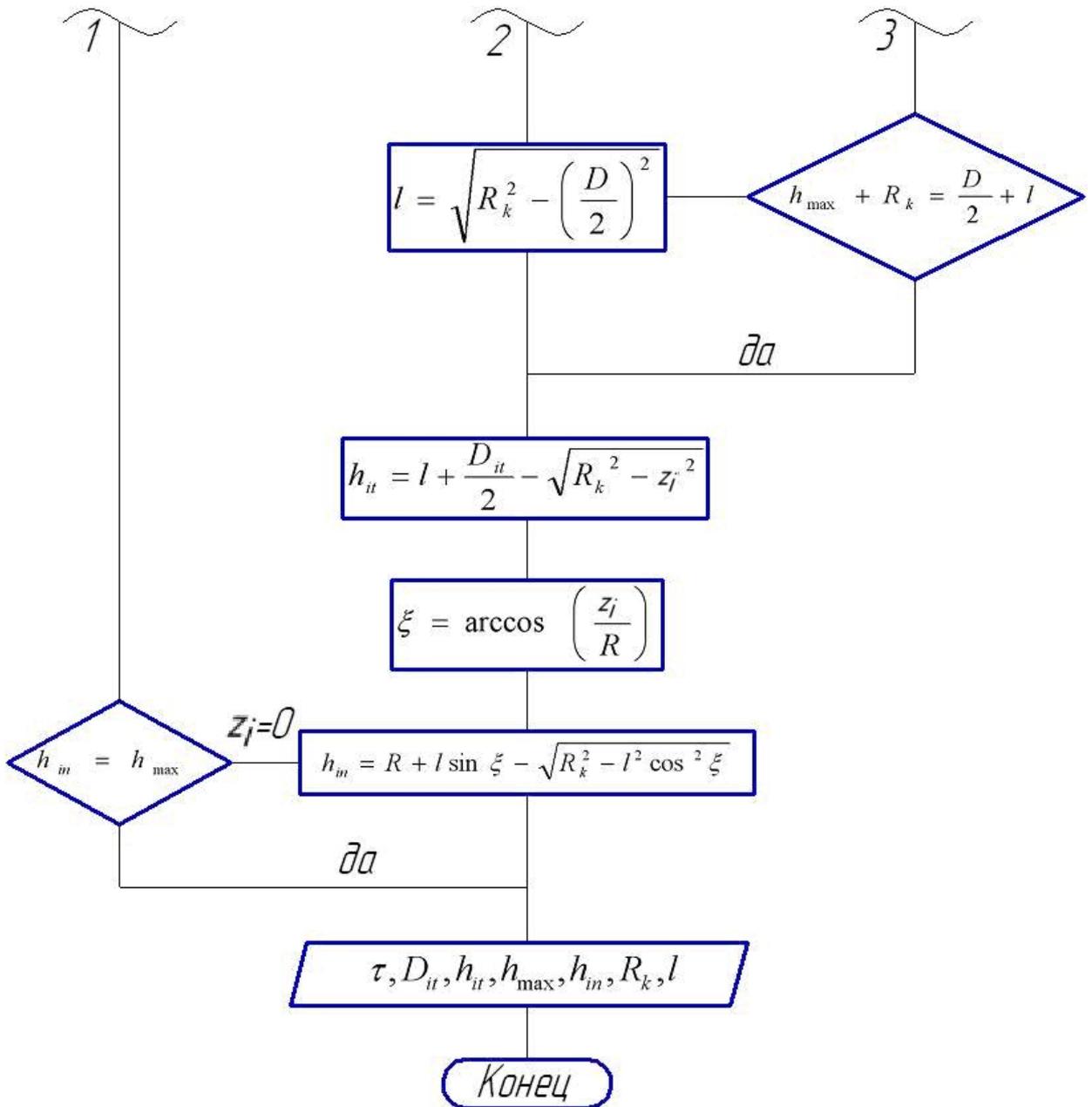


Рисунок 3.7. Алгоритм расчета параметров винтовой стружечной канавки (продолжение)

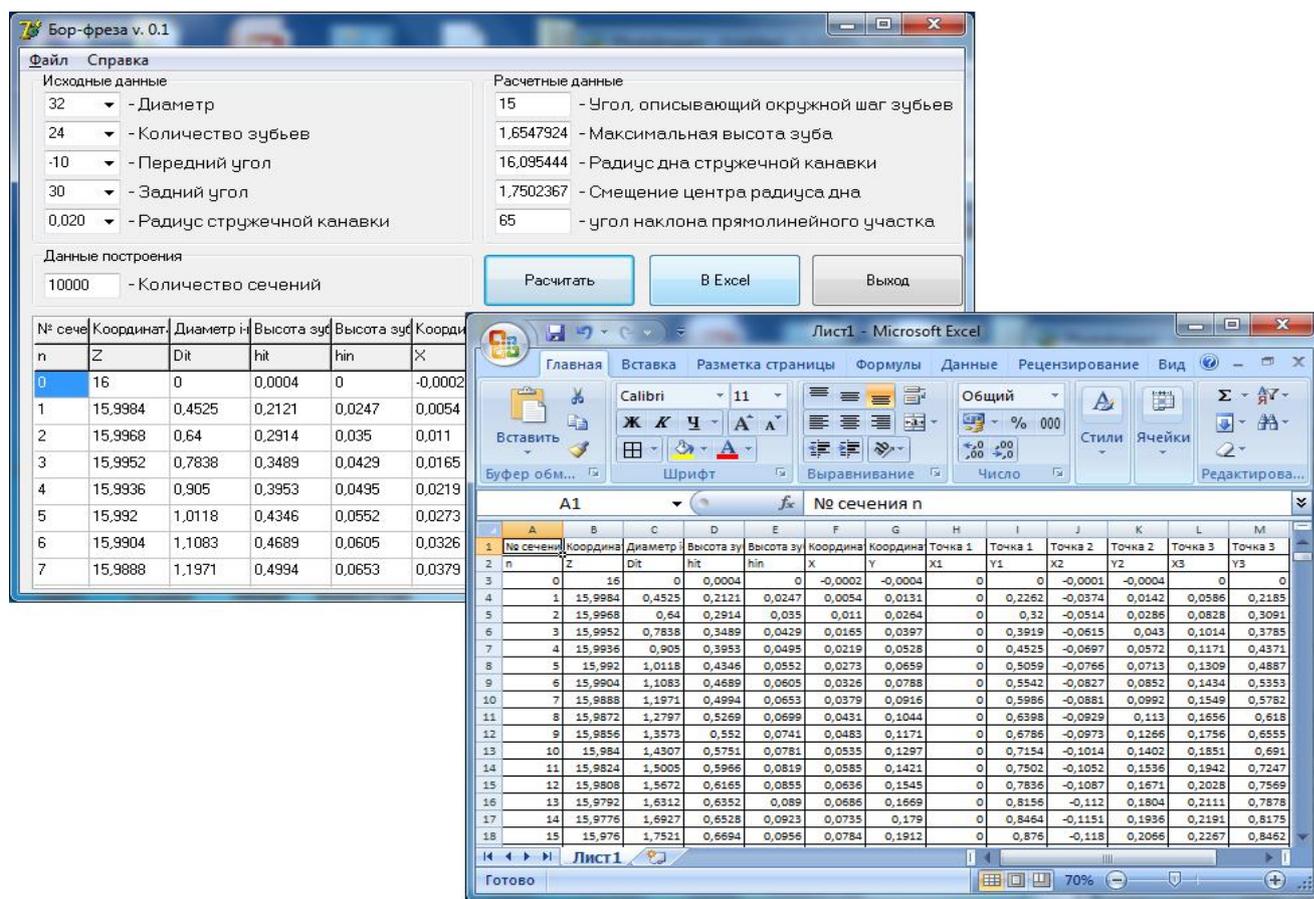


Рисунок 3.8. Интерфейс программы

Программа позволяет рассчитать конструктивные параметры винтовой стружечной канавки в любом торцовом сечении и координаты всех точек образующей на всей винтовой поверхности сферы.

Компьютерное моделирование исходной инструментальной поверхности сферической фрезы удобнее производить по торцовым сечениям (не менее двух), от количества которых зависит точность построения [69]. Компьютерное моделирование сферической фрезы рассмотрено на примере использования графического пакета КОМПАС-3D V12 с применением трехмерной графики. Современное программное обеспечение трехмерного моделирования содержат в себе модули работы с таблицами Microsoft Excel. После выполнения расчетов параметров винтовой стружечной канавки составленной программой и выводом результатов ее работы в виде координат точек профиля образующей и направляющей винтовой поверхности на сфере была построена компьютерная 3D модель сферической фрезы (Рисунок 3.9.).

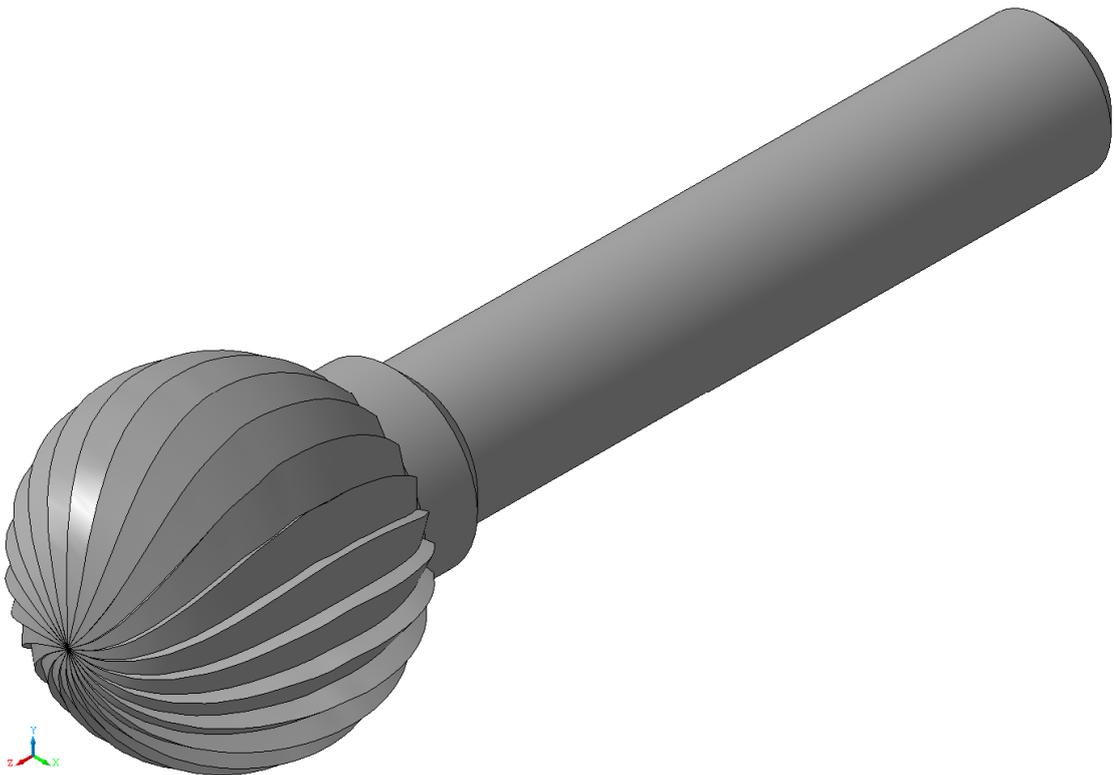


Рисунок 3.9. Компьютерная 3D модель сферической фрезы

На основании изложенного материала в данной главе запишем результаты:

1. На основе математических зависимостей построены компьютерные модели шлифовального круга и сферической фрезы.
2. Разработан алгоритм, составлена прикладная программа и построена компьютерная модель процесса обработки сферической фрезы шлифовальным кругом.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СФЕРИЧЕСКИХ ФРЕЗ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

4.1. Изготовление партии сферических фрез с одинаковым расположением винтовых стружечных канавок

Для проверки адекватности математической модели необходимо изготовить и проконтролировать партию сферических фрез. Сферические фрезы используются при обработке штампов, литейных форм, пресс-форм, лопаток турбин и корпусных деталей. Например, в ПАО "КАМАЗ-Дизель" сферические фрезы используются для обработки корпуса компрессора 7403.1118134, корпуса турбины 7403.1118154 и карданного вала 7401.1005020-20. Исходными данными для проектирования и изготовления инструмента являются геометрические параметры режущей части и технологические параметры, которые приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Исходные данные

Наименование	Обозначение	Значение
Диаметр сферической фрезы	D	32
Число зубьев фрезы	Z	24
Передний угол	γ	10°
Задний угол	α	30°
Радиус дна стружечной канавки	r_k	0,2
Параметр винта	p	0,2

По виду технологического процесса изготовления сферические фрезы подразделяются на «черновые» – изготавливаются по последовательно выполняемым операциям предварительного спекания режущей части, формирования зубьев, окончательного спекания и припаивания оправки и «светлые» – винтовая стружечная канавка выполняется на окончательно сформированной режущей части шлифовальным кругом.

В виду того, что «светлый» вид технологического процесса изготовления является более простым, из однокарбидного мелкодисперсного твердого сплава ВК8 (твердость по Роквеллу HRA не менее 88) в автоматическом режиме на пятикоординатном шлифовальном станке Michael Deckel S22p Num (Рисунок 4.1.) одноугловым шлифовальным кругом из эльбора на керамической связке марки ЛКВ₄₀ 63/50 ГОСТ 24106-80 (Рисунок 4.2.) были изготовлены сферические фрезы (Рисунок 4.3.) в количестве 10 штук.



а)

б)

Рисунок 4.1. Обработка винтовых стружечных канавок:

а) рабочая область б) консоль управления

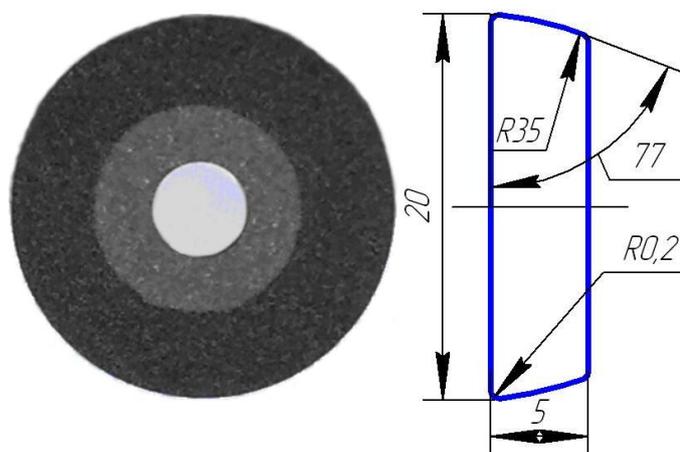


Рисунок 4.2. Одноугловый шлифовальный круг



Рисунок 4.3. Изготовленная сферическая фреза

Свойства вольфрамкобальтового сплава ВК8 представлены в таблице 4.2.

WC % Вольфрам	Co % Кобальт	Прочность на изгиб (σ)	Твердость HRA (по Роквеллу)	Плотность (ρ), г/см ³	Теплопроводность (λ), Вт/(м·°с)
92	8	1700	88	14,8	50,2

Области применения ВК8:

- черновое строгание при неравномерном сечении среза и прерывистом резании, строгании, чернового фрезерования, сверления, чернового рассверливания, чернового зенкерования серого чугуна, цветных металлов и их сплавов и неметаллических материалов;
- обработки нержавеющей, высокопрочных и жаропрочных труднообрабатываемых сталей и сплавов, в том числе сплавов титана.

Изготовленные сферические фрезы необходимо проверить на отсутствие подрезов или неполного формирования винтовой стружечной канавки путем сопоставления расчетных и фактических размеров профилей.

4.2. Сопоставление расчетных и фактических профилей винтовой стружечной канавки

Для проверки адекватности математических моделей нужно сопоставить расчетные и фактические размеры профилей. Под адекватностью понимают степень соответствия модели реальному объекту. Для проверки адекватности математической модели была изготовлена партия из 10 сферических фрез, что достаточно для степени надежности полученных результатов равной 0,95.

Профиль винтовой стружечной канавки сферической фрезы состоит из сопряженных между собой трех участков: 1-2 – отрезок прямой; 2-3 – дуга окружности; 3-4 – отрезок прямой (Рисунок 4.4.). Для отсутствия отрицательных по знаку координат точек профиля развернем координатную плоскость на 90° и участок профиля разобьем на точки.

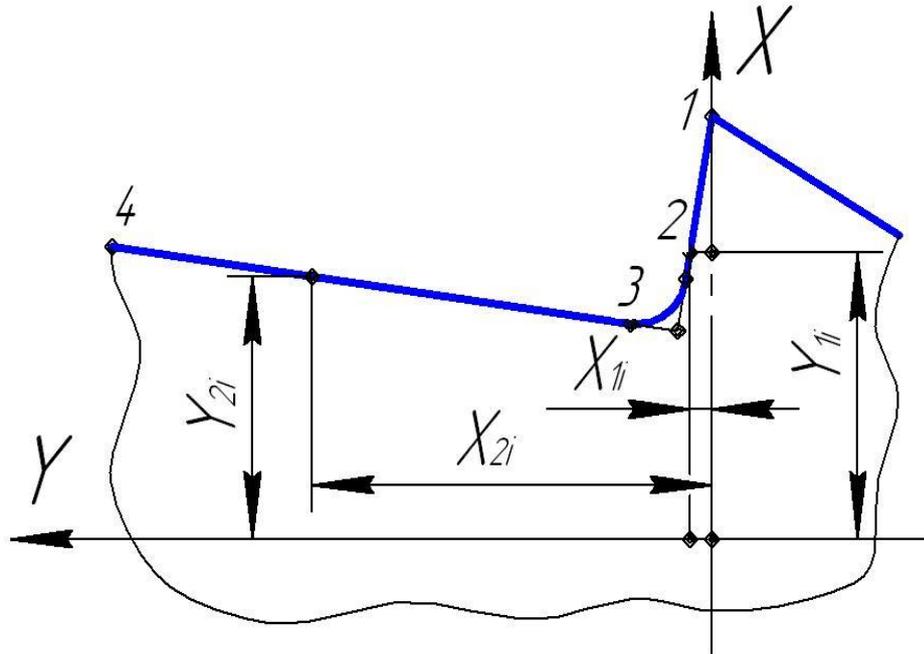


Рисунок 4.4. Профиль винтовой стружечной канавки

Для установки адекватности компьютерной модели, каждую сферическую фрезу, предварительно залитую эпоксидной смолой, подвергли разрушающему контролю, при котором изготовленные сферические фрезы технологически разрежали перпендикулярно оси и шлифовали (Рисунок 4.5.).

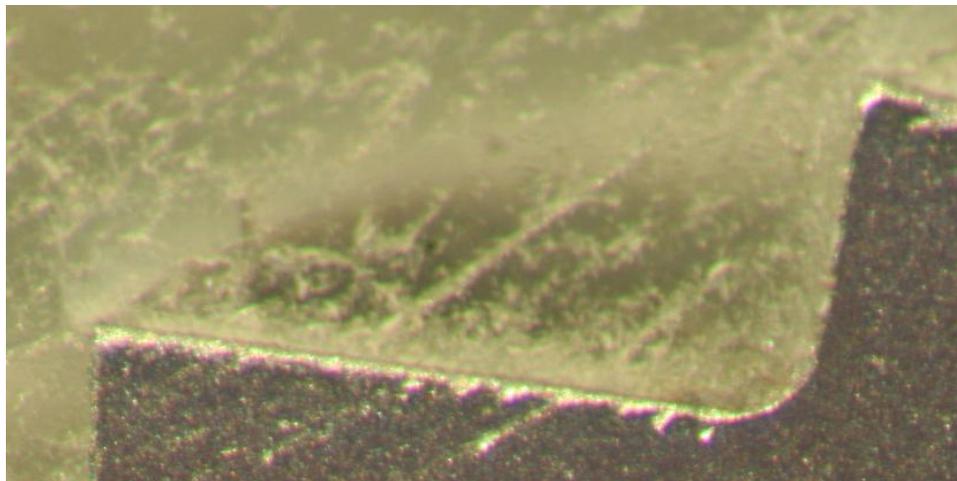


Рисунок 4.5. Профиль винтовой стружечной канавки

Профиль винтовой стружечной канавки измерялся на универсально-измерительном микроскопе MEIJI MT 7530. (Рисунок 4.6.).



Рисунок 4.6. Внешний вид инструментального микроскопа

Результаты измерений профиля винтовой стружечной канавки партии сферических фрез приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Образец 1					Образец 2				
	X, мм	Y, мм	Y', мм	δ		X, мм	Y, мм	Y', мм	δ
1	16,00	0,000	-0,053	0,053	1	16,00	0,000	-0,049	0,049
2	15,55	0,079	0,120	0,041	2	15,55	0,079	0,123	0,044
3	15,11	0,158	0,160	0,002	3	15,11	0,158	0,154	0,004
4	14,66	0,237	0,198	0,039	4	14,66	0,237	0,201	0,036
5	14,23	0,316	0,259	0,057	5	14,23	0,316	0,263	0,053
6	14,08	0,539	0,583	0,044	6	14,08	0,539	0,585	0,046
7	14,10	0,938	0,897	0,041	7	14,10	0,938	0,891	0,047
8	14,15	1,336	1,293	0,043	8	14,15	1,336	1,273	0,063
9	14,20	1,735	1,689	0,046	9	14,20	1,735	1,677	0,058
10	14,26	2,134	2,081	0,053	10	14,26	2,134	2,086	0,048
11	14,31	2,533	2,484	0,049	11	14,31	2,533	2,490	0,043
12	14,36	2,932	2,881	0,051	12	14,36	2,932	2,892	0,040
13	14,41	3,331	3,283	0,048	13	14,41	3,331	3,289	0,042
14	14,47	3,730	3,685	0,045	14	14,47	3,730	3,675	0,055
15	14,52	4,129	4,084	0,045	15	14,52	4,129	4,089	0,040
16	14,57	4,527	4,479	0,048	16	14,57	4,527	4,459	0,068
17	14,62	4,926	4,874	0,052	17	14,62	4,926	4,879	0,047
18	14,68	5,325	5,278	0,047	18	14,68	5,325	5,271	0,054
19	14,73	5,724	5,681	0,043	19	14,73	5,724	5,672	0,052
20	14,78	6,123	6,074	0,049	20	14,78	6,123	6,061	0,062
Средняя погрешность $\delta = 0,045$					Средняя погрешность $\delta = 0,048$				

Продолжение таблицы 4.2

Образец 3					Образец 4				
	X, мм	Y, мм	Y', мм	δ		X, мм	Y, мм	-0,022	δ
1	16,00	0,000	0,010	0,053	1	16,00	0,000	0,100	0,049
2	15,55	0,079	0,090	0,041	2	15,55	0,079	0,151	0,044
3	15,11	0,158	0,144	0,002	3	15,11	0,158	0,213	0,004
4	14,66	0,237	0,190	0,039	4	14,66	0,237	0,299	0,036
5	14,23	0,316	0,280	0,057	5	14,23	0,316	0,585	0,053
6	14,08	0,539	0,561	0,044	6	14,08	0,539	0,895	0,046
7	14,10	0,938	0,883	0,041	7	14,10	0,938	1,273	0,047
8	14,15	1,336	1,262	0,043	8	14,15	1,336	1,672	0,063
9	14,20	1,735	1,669	0,046	9	14,20	1,735	2,082	0,058
10	14,26	2,134	2,077	0,053	10	14,26	2,134	2,492	0,048
11	14,31	2,533	2,485	0,049	11	14,31	2,533	2,876	0,043
12	14,36	2,932	2,862	0,051	12	14,36	2,932	3,282	0,040
13	14,41	3,331	3,285	0,048	13	14,41	3,331	3,696	0,042
14	14,47	3,730	3,666	0,045	14	14,47	3,730	4,102	0,055
15	14,52	4,129	4,093	0,045	15	14,52	4,129	4,475	0,040
16	14,57	4,527	4,462	0,048	16	14,57	4,527	4,895	0,068
17	14,62	4,926	4,882	0,052	17	14,62	4,926	5,244	0,047
18	14,68	5,325	5,263	0,047	18	14,68	5,325	5,692	0,054
19	14,73	5,724	5,681	0,043	19	14,73	5,724	6,073	0,052
20	14,78	6,123	6,055	0,049	20	14,78	6,123	-0,022	0,062
Средняя погрешность $\delta = 0,047$					Средняя погрешность $\delta = 0,041$				

Продолжение таблицы 4.2

Образец 5					Образец 6				
	X, мм	Y, мм	Y', мм	δ		X, мм	Y, мм	Y', мм	δ
1	16,00	0,000	-0,034	0,053	1	16,00	0,000	-0,039	0,049
2	15,55	0,079	0,118	0,041	2	15,55	0,079	0,135	0,044
3	15,11	0,158	0,183	0,002	3	15,11	0,158	0,189	0,004
4	14,66	0,237	0,224	0,039	4	14,66	0,237	0,229	0,036
5	14,23	0,316	0,299	0,057	5	14,23	0,316	0,285	0,053
6	14,08	0,539	0,591	0,044	6	14,08	0,539	0,582	0,046
7	14,10	0,938	0,901	0,041	7	14,10	0,938	0,892	0,047
8	14,15	1,336	1,278	0,043	8	14,15	1,336	1,267	0,063
9	14,20	1,735	1,686	0,046	9	14,20	1,735	1,677	0,058
10	14,26	2,134	2,096	0,053	10	14,26	2,134	2,082	0,048
11	14,31	2,533	2,499	0,049	11	14,31	2,533	2,481	0,043
12	14,36	2,932	2,883	0,051	12	14,36	2,932	2,888	0,040
13	14,41	3,331	3,292	0,048	13	14,41	3,331	3,277	0,042
14	14,47	3,730	3,706	0,045	14	14,47	3,730	3,759	0,055
15	14,52	4,129	4,109	0,045	15	14,52	4,129	4,083	0,040
16	14,57	4,527	4,483	0,048	16	14,57	4,527	4,477	0,068
17	14,62	4,926	4,903	0,052	17	14,62	4,926	4,892	0,047
18	14,68	5,325	5,257	0,047	18	14,68	5,325	5,252	0,054
19	14,73	5,724	5,704	0,043	19	14,73	5,724	5,701	0,052
20	14,78	6,123	6,071	0,049	20	14,78	6,123	6,062	0,062
Средняя погрешность $\delta = 0,037$					Средняя погрешность $\delta = 0,045$				

Продолжение таблицы 4.2

Образец 7					Образец 8				
	X, мм	Y, мм	Y', мм	δ		X, мм	Y, мм	Y', мм	δ
1	16,00	0,000	-0,051	0,053	1	16,00	0,000	-0,046	0,049
2	15,55	0,079	0,132	0,053	2	15,55	0,079	0,131	0,052
3	15,11	0,158	0,197	0,002	3	15,11	0,158	0,202	0,004
4	14,66	0,237	0,258	0,039	4	14,66	0,237	0,281	0,036
5	14,23	0,316	0,337	0,057	5	14,23	0,316	0,345	0,053
6	14,08	0,539	0,582	0,044	6	14,08	0,539	0,583	0,046
7	14,10	0,938	0,972	0,041	7	14,10	0,938	0,984	0,047
8	14,15	1,336	1,392	0,043	8	14,15	1,336	1,389	0,063
9	14,20	1,735	1,772	0,046	9	14,20	1,735	1,782	0,058
10	14,26	2,134	2,121	0,053	10	14,26	2,134	2,101	0,048
11	14,31	2,533	2,561	0,049	11	14,31	2,533	2,572	0,043
12	14,36	2,932	2,940	0,051	12	14,36	2,932	2,972	0,040
13	14,41	3,331	3,311	0,048	13	14,41	3,331	3,302	0,042
14	14,47	3,730	3,768	0,045	14	14,47	3,730	3,773	0,055
15	14,52	4,129	4,077	0,045	15	14,52	4,129	4,081	0,040
16	14,57	4,527	4,462	0,048	16	14,57	4,527	4,459	0,068
17	14,62	4,926	4,872	0,052	17	14,62	4,926	4,851	0,047
18	14,68	5,325	5,251	0,047	18	14,68	5,325	5,258	0,054
19	14,73	5,724	5,687	0,043	19	14,73	5,724	5,682	0,052
20	14,78	6,123	6,076	0,049	20	14,78	6,123	6,071	0,062
Средняя погрешность $\delta = 0,040$					Средняя погрешность $\delta = 0,047$				

Продолжение таблицы 4.2

Образец 9					Образец 10				
	X, мм	Y, мм	Y', мм	δ		X, мм	Y, мм	Y', мм	δ
1	16,00	0,000	-0,057	0,053	1	16,00	0,000	-0,004	0,049
2	15,55	0,079	0,145	0,066	2	15,55	0,079	0,099	0,044
3	15,11	0,158	0,208	0,002	3	15,11	0,158	0,195	0,004
4	14,66	0,237	0,292	0,039	4	14,66	0,237	0,286	0,036
5	14,23	0,316	0,353	0,057	5	14,23	0,316	0,367	0,053
6	14,08	0,539	0,579	0,044	6	14,08	0,539	0,586	0,046
7	14,10	0,938	0,979	0,041	7	14,10	0,938	0,986	0,047
8	14,15	1,336	1,391	0,043	8	14,15	1,336	1,399	0,063
9	14,20	1,735	1,791	0,046	9	14,20	1,735	1,801	0,058
10	14,26	2,134	2,085	0,053	10	14,26	2,134	2,076	0,048
11	14,31	2,533	2,583	0,049	11	14,31	2,533	2,585	0,043
12	14,36	2,932	2,967	0,051	12	14,36	2,932	2,972	0,040
13	14,41	3,331	3,297	0,048	13	14,41	3,331	3,281	0,042
14	14,47	3,730	3,769	0,045	14	14,47	3,730	3,781	0,055
15	14,52	4,129	4,089	0,045	15	14,52	4,129	4,082	0,040
16	14,57	4,527	4,461	0,048	16	14,57	4,527	4,459	0,068
17	14,62	4,926	4,849	0,052	17	14,62	4,926	4,853	0,047
18	14,68	5,325	5,252	0,047	18	14,68	5,325	5,254	0,054
19	14,73	5,724	5,675	0,043	19	14,73	5,724	5,679	0,052
20	14,78	6,123	6,089	0,049	20	14,78	6,123	6,083	0,062
Средняя погрешность $\delta = 0,050$					Средняя погрешность $\delta = 0,049$				

Средняя погрешность винтовой стружечной канавки партии сферической фрезы равна $\delta=0,045$ мм. Результаты измерений показали достоверность теоретических выкладок при сравнении результатов обработки винтовой стружечной канавки сферической фрезы в производственных условиях с результатами математического моделирования.

Параметры шероховатости по ГОСТ 2789-73 передних и задних поверхностей винтовой стружечной канавки сферических фрез повышенной точности

должны быть не более $Ra\ 0,4$ мкм. В лаборатории технических измерений были произведены измерения шероховатости на профилометре 296 (Рисунок 4.7.).



Рисунок 4.7. Измерение шероховатости на профилометре 296

Шероховатость передней и задней поверхностей винтовой стружечной канавки партии изготовленных сферических фрез составляет $Ra\ 0,25$ мкм.

4.3. Разработка конструкции и изготовление сферической фрезы с одинаковым расположением винтовой стружечной канавки

Сферические фрезы изготавливаются с групповым или с одинаковым расположением винтовой стружечной канавки. Существенным недостатком сферических фрез с одинаковым расположением винтовой стружечной канавки является наличие нерабочей области на торце, которая образуется при сведении винтовых стружечных канавок к оси на торцевой части. Некоторые изготовители данный недостаток избегают путем просверливания центрального отверстия на торце. В этом случае полностью исключаются зона с нулевыми скоростями, но со временем отверстие забивается стружкой.

Для исключения зоны с нулевыми скоростями и возможности подачи смазочно-охлаждающей жидкости непосредственно в зону резания центровое отверстие необходимо прожигать насквозь (Рисунок 4.8.).

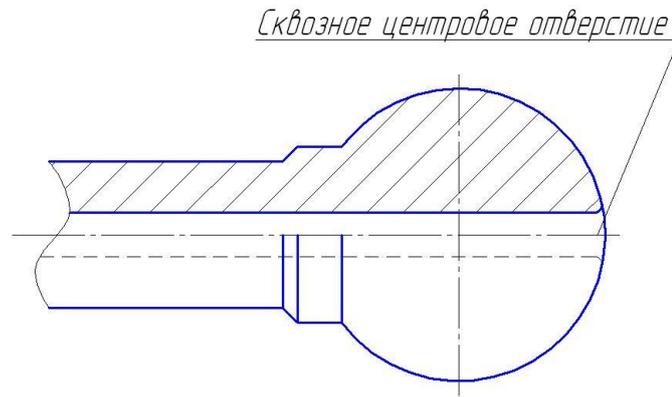


Рисунок 4.8. Сквозное центровое отверстие в сферической фрезе

На данную конструкцию получен патент РФ на полезную модель № 90000 со следующей формулой изобретения [54]:

Сферические фрезы (сферическая, сфероконическая, сфероцилиндрическая и грушевидная), содержащая режущую часть или коронку с выполненными на ней длинными зубьями по винтовой линии, которые на торцевой части сводятся к оси инструмента, отличающиеся тем, что на торцевой части выполнено с возможностью подачи смазочно-охлаждающей жидкости и исключения винтовых стружечных канавок нулевой глубины сквозное осевое отверстие.

Для прожига сквозного осевого отверстия использовалась электроэрозионная обработка, схема обработки которой представлена на рисунке 4.9.

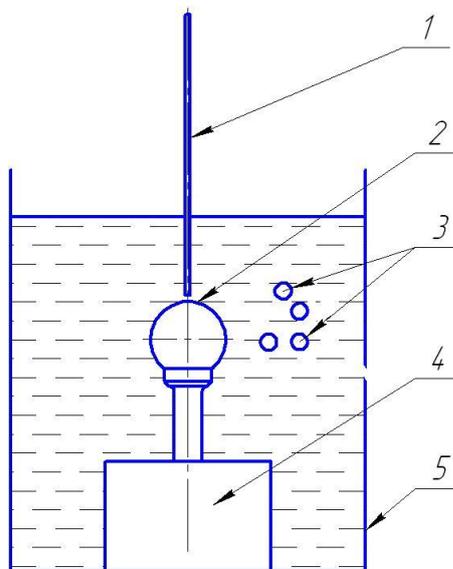


Рисунок 4.9. Схема прожига сферической фрезы:

1 – электрод-инструмент (медная проволока); 2 – заготовка (сферическая фреза); 3 – продукты обработки (оседают на дно); 4 – диэлектрическая среда; 5 – ванна.

Диаметр электрод-инструмента должен быть на 0,1...0,3 мм меньше получаемого диаметра. Сферическая фреза со сквозным осевым отверстием представлена на рисунке 4.10.



Рисунок 4.10. Сферическая фреза со сквозным осевым отверстием

Данное решение исключает зону с нулевыми скоростями в сферических фрезах, а так же обеспечивает возможность подачи охлаждающего средства по сквозному осевому отверстию, что исключает забивание стружкой, как самого осевого отверстия, так и винтовой стружечной канавки, а также положительно влияет на процесс обработки в целом, а значит и качество обрабатываемой поверхности. В насадных конструкциях сферических фрез сквозное осевое отверстие прожигается в сборе оправки с коронкой.

4.4. Проведение испытаний работоспособности сферических фрез с винтовыми стружечными канавками

В данной главе в соответствии с теоретическими исследованиями сферических фрез с одинаковым расположением винтовой стружечной канавки проведены исследования, которые позволили установить повышение работоспособности инструмента и доказать преимущества над стандартным инструментом.

Для проведения экспериментального исследования было выбрано, в виду повсеместного применения в машиностроении, 3 вида обрабатываемого материала, механические свойства которых представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 Механические свойства обрабатываемого материала

	Сплав ВТ5Л (изготовление отливок)	Сталь 20Х13 (турбинные лопатки)	Сталь 5ХНМ (изготовление крупных прессо- вых штампов)
Предел прочности, σ_B МПа	800	1600	1570
Относительное удлинение, δ ,	6	13	9

Обработка проводилась плоской поверхности заготовки на глубину не более 1 мм и на длину не более 100 мм. Размеры заготовок 400x200x40. Сферическая фреза относительно заготовки наклонена на 75° . В качестве смазочно-охлаждающей жидкости применялась водосмешиваемая СОЖ Аквол-2.

Под повышением работоспособности обычно понимают стойкость инструмента, которая характеризуется суммарным временем (мин) его работы между переточками. Контролируемыми параметрами являлись состояние режущих кромок и шероховатость рабочей поверхности. Режимы обработки в зависимости от марки материала представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 Режимы обработки в зависимости от марки материала

σ_B	f_z (мм)	V (м/мин)	n (об/мин)
800	0,060	42	617
1600	0,085	62	517
1570	0,036	68	676

В таблицах 4.13 - 4.15 показаны результаты обработки.

Таблица 4.13 Сводная таблица обработки Сплава ВТ5Л

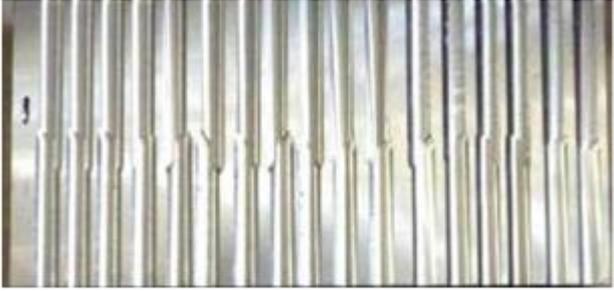
		
№ заг.	Обычная сферическая фрез	Сферическая фреза с одинаковым расположением винтовых стружечных канавок
1	Нормально	Нормально
2	Нормально	Нормально
3	Нормально	Нормально
4	Нормально	Нормально
5	Нормально	Нормально
6	Нормально	Нормально
7	Нормально	Нормально
8	Нормально	Нормально
9	Нормально	Нормально
10	Нормально	Нормально
11	Нормально	Нормально
12	Нормально	Нормально
13	Нормально	Нормально
14	Нормально	Нормально
15	Нормально	Нормально
16	Появление небольшого свиста	Нормально
17	Небольшой свист	Нормально
18	Сильный свист	Нормально
19	Сильный износ, прижоги	Появление небольшого свиста
20	Поломка инструмента в месте крепления коронки к оправке	Небольшой свист
21		Небольшой свист
22		Небольшой свист
23		Износ по задней поверхности
24		Сильный свист
25		Сильный износ, прижоги
26		Поломка инструмента в месте крепления коронки к оправке

Таблица 4.14 Сводная таблица обработки Стали 20Х13

№ заг.	Обычная сферическая фрез	Сферическая фреза с одинаковым расположением винтовых стружечных канавок
1	Нормально	Нормально
2	Нормально	Нормально
3	Нормально	Нормально
4	Нормально	Нормально
5	Нормально	Нормально
6	Нормально	Нормально
7	Появление небольшого свиста	Нормально
8	Небольшой свист	Нормально
9	Сильный свист	Нормально
10	Сильный износ, прижоги	Нормально
11	Поломка инструмента в месте крепления коронки к оправке	Появление небольшого свиста
12		Появление небольшого свиста
13		Небольшой свист
14		Небольшой свист
15		Износ по задней поверхности
16		Сильный свист
17		Сильный износ, прижоги
18		Поломка инструмента в месте крепления коронки к оправке

Таблица 4.15 Сводная таблица обработки стали 5ХНМ

№ заг.	Обычная сферическая фрез	Сферическая фреза с одинаковым расположением винтовых стружечных канавок
1	Нормально	Нормально
2	Нормально	Нормально
3	Нормально	Нормально
4	Нормально	Нормально
5	Появление небольшого свиста	Нормально
6	Появление небольшого свиста	Нормально
7	Небольшой свист	Нормально
8	Сильный свист	Нормально
9	Поломка инструмента в месте крепления коронки к оправке	Нормально
10		Появление небольшого свиста
11		Небольшой свист
12		Износ по задней поверхности
13		Сильный свист
14		Сильный износ, прижоги
15		Поломка инструмента в месте крепления коронки к оправке

На рисунке 4.11 представлена сводная гистограмма работоспособности сферических фрез.

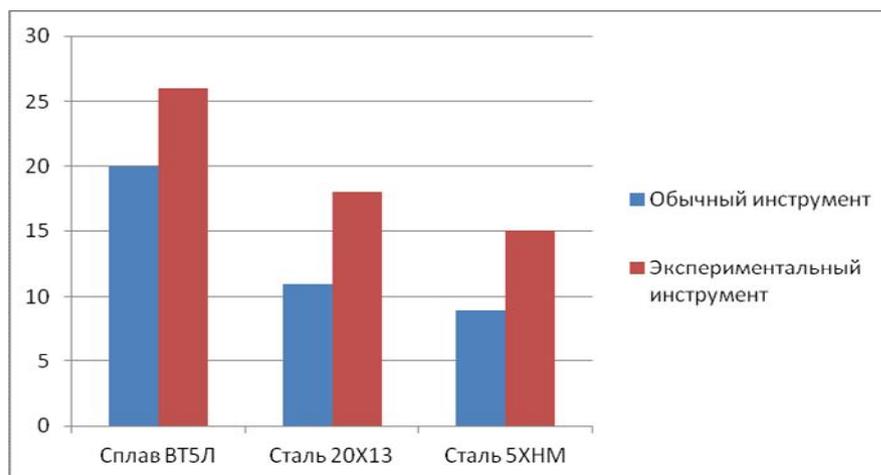


Рисунок 4.11. Сводный график проверки работоспособности сферических фрез

Следующим шагом экспериментальных исследований было измерение шероховатости поверхности обработанной заготовки на профилометре 296.

Основные параметры:

1. Измеряемый параметр шероховатости поверхности по ГОСТ 2789-73.
2. Диапазон измерений R_a , мкм 0,02–10.
3. Верхние пределы диапазонов, мкм 0,1; 1; 10.
4. Погрешность профилометра не превышает требований ГОСТ 19300-73

Шероховатость обработанной поверхности составила $R_a 6,3$ мкм.

Таким образом, результаты эксперимента показали что шероховатость обработанной поверхности стандартными и экспериментальными сферическими фрезами одинакова, но стойкость экспериментальных сферических фрез выше на 17-23%.

4.5. Экономическая эффективность применения экспериментальных сферических фрез

Расчет экономической эффективности предполагаемого способа повышения работоспособности сферических фрез выполнялся при обработке плиты из ста-

ли 5ХНМ с применением водосмешиваемой смазочно-охлаждающей жидкости Аквол-2. Результаты расчет экономической эффективности представлены в таблице 4.16.

Таблица 4.16 Расчет экономической эффективности

	Обычная сферическая фреза	Сферическая фреза с винтовыми стружечными канавками
Исходные данные		
Стоимость станко-часа, руб.	700	700
Кол. деталей в год, шт.	4000	4000
Количество инструментов	172	172
Результаты расчета		
Стоимость инструмента, руб./шт.	291	237
Снижение стоимости сферической фрезы	18,56%	
Общие затраты, инструмент	50052 р.	40764 р.
Затраты в год, руб.	1301254 р.	1209246 р.
Снижение затрат	7,07%	

Таким образом, использование сферической фрезы с одинаковым расположением винтовых стружечных канавок позволяет достичь снижение затрат на инструмент в 1,22 раза, при этом снижение затрат на производство составляет 7,07%.

Таким образом, в настоящей главе сделано следующее:

1. По «светлому» виду технологического процесса изготовлена партия сферических фрез.
2. На инструментальном микроскопе проведены измерения партии сферических фрез разрушающим методом.
3. Подтверждена достоверность теоретических выкладок при сравнении результатов обработки винтовой стружечной канавки сферической фрез в производственных условиях с результатами компьютерного моделирования.

4. Разработана конструкция сферической фрезы со сквозным осевым отверстием, которая исключает зону с нулевыми скоростями.

5. Результаты эксперимента показали что шероховатость обработанной поверхности стандартными и экспериментальными сферическими фрезами одинакова, но стойкость экспериментальных сферических фрез выше на 17-23%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны математические модели и алгоритмы расчета параметров винтовой стружечной канавки сферической фрезы и шлифовального круга.
2. Разработана математическая модель обработки сферической фрезы шлифовальным кругом с учетом угла скрещивания при взаимном положении инструмента и заготовки, которая позволяет обеспечить заданный профиль.
3. Выявлено, что профилирующий участок режущей кромки шлифовального круга, формирующий дно винтовой стружечной канавки, для исключения подрезания или неполного формирования, необходимо править с радиусом на 0,1-0,2 мм меньше, чем радиус дна винтовой стружечной канавки сферической фрезы.
4. Проведено компьютерное моделирование процесса обработки винтовой стружечной канавки сферической фрезы шлифовальным кругом.
5. Установлено, что для обеспечения возможности обработки винтовой стружечной канавки сферической фрезы шлифовальным кругом необходимо, чтобы у винтовой линии на сфере параметр винта был не более 0,5.
6. Подтверждена адекватность алгоритмов, математических и компьютерных моделей в промышленных условиях при изготовлении опытной партии путем сопоставления профилей винтовой стружечной канавки изготовленных сферических фрез с результатами компьютерного моделирования.
7. Разработаны методика создания сферических фрез с одинаковым расположением винтовых стружечных канавок, обеспечивающая отсутствие подрезов или неполного формирования профиля и конструкция сферической фрезы со сквозным осевым отверстием, исключая зону с нулевыми скоростями.
8. Результаты эксперимента показали что шероховатость обработанной поверхности стандартными и экспериментальными сферическими фрезами одинакова, но стойкость экспериментальных сферических фрез выше на 17-23%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдреев, М.М. Повышение эффективности изготовления рабочих поверхностей роторов винтовых компрессоров дисковым инструментом : Автореферат дис. канд. техн. наук : 05.03.01 / КГТУ им. А.Н. Туполева Казань, 2006, 20 с.
2. Абызов, А.П. Влияние технологической наладки станка на условия формообразования винтовых поверхностей при обработке их дисковыми инструментами / А.П. Абызов, Н.А. Чемборисов, С.Ю. Юрасов // «Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века»: Материалы V МНТК - Донецк: ДонГТУ, 1998. - С. 6-7.
3. Абызов, А.П. Выбор режущего инструмента при технологическом проектировании / А.П. Абызов, Н.А. Чемборисов, Ф.С. Юнусов, В.Б. Ступко // XXII Российская школа по проблемам науки и технологий : тезисы докладов. – Миасс : МНУЦ, 2002. – С. 75.
4. Борисов, А.Н. Автоматизация решения вопросов формообразования винтовых поверхностей дисковыми инструментами / А.Н. Борисов. – Автореферат дис. канд. техн. наук, Тула: ТПИ, 1982. – 18 с.
5. Борисов, А.Н. Геометрическая теория автоматизированного проектирования металлорежущих инструментов / А.Н. Борисов. – Автореферат дис. докт. техн. наук, Тула, 1993. – 36 с.
6. Борисов, С.В. Разработка фасонных концевых фрез с винтовыми стружечными канавками на криволинейной поверхности вращения / С.В. Борисов. – Автореферат дис. канд. техн. наук. М.: МГТУ “Станкин”, 1998. – 18 с.
7. Бушуев В.В. Станочное оборудование автоматизированного производства: Учебник в 2 т. Т.1. / В.В. Бушуев, А.А. Авраамов, Н.Н. Верейкин, А.А. Гаврюшин; Под ред. В.В. Бушуева. – М.: Станкин, 1993. – 581 с.
8. Бушуев В.В. Станочное оборудование автоматизированного производства: Учебник в 2 т. Т.2. / В.В. Бушуев, А.А. Авраамов, Н.Н. Верейкин, А.А. Гаврюшин; Под ред. В.В. Бушуева. – М.: Станкин, 1994. – 653 с.

9. Ведерников, Ю.А. Способ фрезерования винтовых поверхностей переменного шага и постоянного радиуса профиля [Текст] / Ю.А. Ведерников, Р.М. Хусаинов, Д.В. Емельянов // Справочник. Инженерный журнал (с приложением). – 2012. – № 11. – С. 10–13.

10. Волков, А.Э. Компьютерное моделирование процессов формообразования поверхностей резанием / А.Э. Волков // Конструкторско-технологическая информатика - 2000: Труды конгресса. В 2-х т.т./IV Международный конгресс. - М.: Изд-во «Станкин», 2000. – С.122-126

11. Воробьев, В.М. Профилирование фрез для изделий с винтовыми канавками. Автореферат дис. канд. техн. наук, М.: Мосстанкин, 1950. – 18 с.

12. Гаврилов, Ю.В. Аналитическое исследование формообразования винтовых канавок дисковыми инструментами / Ю.В. Гаврилов. – Автореферат дис. канд. техн. наук, Челябинск: ЧПИ, 1975. – 18 с.

13. Грановский, Г.И. О методике исследования и назначения режимов резания на автоматических линиях //Вестник машиностроения. - 1963. - № 10.

14. Грановский, Г.И. О стойкости инструмента как исходном параметре для расчета режимов резания //Вестник машиностроения. - 1965. - № 8.

15. Гречишников, В.А. Автоматизированное проектирование металлорежущего инструмента / В.А. Гречишников, Г.Н. Кирсанов, А.В. Катаев и др. М.: Мосстанкин, 1984

16. Гречишников, В.А. Компьютерный метод совмещенных сечений для определения профиля дискового инструмента обрабатывающего винтовую поверхность детали. Сообщение первое / В.А. Гречишников, Н.А. Чемборисов, И.Р. Ахметшин, А.Х. Низамов // Технологические проблемы производства летательных аппаратов и двигателей. Тезисы докладов. - Казань: КГТУ имени Туполева А.Н., 1993, с.14

17. Гречишников, В.А. Математическое и графическое моделирование сложных винтовых поверхностей на осевых режущих инструментах / В.А. Гречишников, Д.В. Андреевский, С.В. Григорьев // «Конструкторско-

технологическая информатика - КТИ-96».: Труды 3-го Международного конгресса. - М. МГТУ «Станкин», 1996.

18. Гречишников, В.А. Математическое моделирование в инструментальном производстве / В.А. Гречишников, Н.В. Колесов, Ю.Е. Петухов. – М.: МГТУ «Станкин», 2003. – 117 с.

19. Гречишников, В.А. Некоторые вопросы профилирования инструмента для обработки винтовых поверхностей / В.А. Гречишников. – Автореферат дис. канд. техн. наук, М.: Мосстанкин, 1964. – 18 с.

20. Гречишников, В.А. Повышение эффективности проектирования и эксплуатации инструмента для механообработки на основе системного моделирования. Автореферат дис. докт. техн. наук, М.: Мосстанкин, 1989. – 36 с.

21. Гречишников, В.А. Подсистема автоматизированного проектирования режущих инструментов / В.А. Гречишников, В.Н. Щербаков //Станки и инструменты.-1987.- № 1.

22. Гречишников, В.А. Проектирование дискового инструмента для обработки винтовых поверхностей / В.А. Гречишников, Г.Н. Кирсанов //Машиностроитель.- 1978.- № 10.

23. Гречишников, В.А. Профилирование инструмента для обработки винтовых поверхностей деталей по методу совмещенных сечений / В.А. Гречишников. – М. : Мосстанкин, 1979. – 27 с.

24. Гречишников, В.А. Система автоматизированного проектирования режущего инструмента / В.А. Гречишников. Сб. «Автоматизированные системы проектирования и управления» Серия 9, выпуск 2, М.: ВНИИТЭМР,1987.

25. Гречишников, В.А. Формирование информационно-поисковой системы инструментального обеспечения автоматизированного производства и проектирование САПР РИ / В.А. Гречишников, Ф.С. Юнусов, Н.А. Чемборисов // М.: Машиностроение, 2000. - 223 с.

26. Григорьев, С.В. Формообразование винтовых зубьев на коническом инструменте. Автореферат дис. канд. техн. наук, М.: МГТУ «Станкин», 1998. – 18 с.

27. Дихтярь, Ф.С. Профилирование металлорежущих инструментов (фрез, шеверов, шлифовальных кругов, зуборезных гребенок, долбяков, резцов и летучек) / Ф.С. Дихтярь. М.: Машиностроение, 1965.
28. Дружинский, И.А. Методы обработки сложных поверхностей на металлорежущих станках / И.А. Дружинский. М.-Л.: Машиностроение, 1965
29. Егоров, И.П. Геометрия. О системах аксиом евклидовой геометрии. Обобщенные пространства. Изд.2. – 2009. 256 с.
30. Емельянов, Д.В. Вопросы нарезания винтовых поверхностей с переменным углом подъема спирали на станках с ЧПУ [Текст] / Д.В. Емельянов, Ю.А. Ведерников, Р.М. Хисамутдинов // Справочник. Инженерный журнал (с приложением). – 2013. – № 8. – С. 31–32.
31. Емельянов, Д.В. Конструкция спирального сверла с переменным углом подъема спирали для формообразования отверстий в труднообрабатываемых материалах [Текст] / Д.В. Емельянов // Справочник. Инженерный журнал (с приложением). – 2013. – № 3. – С. 31–34.
32. Емельянов, Д.В. Проектирование и производство спиральных сверл переменной жесткости с изменяемым углом наклона стружечных канавок: дис. ... канд. техн. наук / Д.В. Емельянов. – Казань : КГТУ им. Туполева, 2014. – 126 с.
33. Жуплов, М.В. Профилирование фрез для обработки винтовых поверхностей на основе построения схем формообразования. Автореферат дис. канд. техн. наук, Орел.: ОГТУ, 2009. – 16 с.
34. Илюхин, С.Ю. Каркасно-кинематический метод профилирования / С.Ю. Илюхин // Труды IV международного конгресса «Конструкторско-технологическая информатика 2000». – М. : СТАНКИН, 2000. – С. 224–227.
35. Илюхин, С.Ю. Каркасно-кинематический метод моделирования формообразования поверхностей деталей машин дисковым инструментом: дис. ... доктора техн. наук / С.Ю. Илюхин. – Тула : ТГУ, 2002. – 390 с.
36. Илюхин, С.Ю. Концептуальная модель профилирования поверхностей / С.Ю. Илюхин, А.В. Доронин // «СТИН» № 11, 2000

37. Илюхин, С.Ю. Современные тенденции развития методов профилирования / С.Ю. Илюхин, В.Б. Протасьев // Конструкторско-технологическая информатика - 2000: Труды конгресса. В 2-х т.т./IV Международный конгресс. - М.: Изд-во «Станкин», 2000

38. Иноземцев, Г.Г. Проектирование металлорежущих инструментов / Г.Г. Иноземцев. М.: Машиностроение, 1984

39. Истоцкий, В.В. Принципы подготовки управляющих программ при изготовлении зубьев фасонных борфрез на заточных полуавтоматах с ЧПУ / В.В. Истоцкий // Известия ТулГУ. Серия. Машиноведение, система приводов и детали машин: Вторая Международная научно-техническая конференция «Проектирование, технологическая подготовка и производство зубчатых передач» - Тула: Изд-во ТулГУ, 2005. – С.115-117.

40. Истоцкий, В.В. Формирование режущей части фасонных борфрез с применением шлифовально-заточных станков с ЧПУ. Автореферат дис. канд. техн. наук. ТГУ, Тула, 2005, 116 с.

41. Картан, Э. Геометрия групп Ли и симметрические пространства. Москва: 1949. – 381 с.

42. Кирсанов, Г.Н. Проектирование методом винтов сложных инструментов для механообработки. Автореферат дис. докт. техн. наук. М.: Мосстанкин, 1985.

43. Кирсанов, Г.Н. Профилирование инструментов с винтовой исходной инструментальной поверхностью для обработки винтовых поверхностей / Г.Н. Кирсанов // Вестник машиностроителя. – 1977. – № 7. – С. 22–24.

44. Кирсанов, Г.Н. Расчет профиля дискового инструмента для обработки винтовых поверхностей / Г.Н. Кирсанов, С.С. Ласточкин // Станки и инструменты. – 1980. – № 5. – С. 31–35.

45. Кондрашов, А.Г. Повышение качества обработки фасок на торцах зубьев зубчатых колес на основе проектирования зубофасочного инструмента: диссертация ... кандидата технических наук: 05.03.01 / Кондрашов Алексей Геннадьевич; Моск. гос. технол. ун-т "Станкин" 2008, 127 с.

46. Ласточкин, С.С. Проектирование дискового инструмента для винтовых поверхностей деталей в автоматизированном поисковом режиме. Автореферат дис. канд. техн. наук. М.: Мосстанкин, 1984.

47. Лашнев, С.И. Вопросы профилирования режущих инструментов для обработки винтовых поверхностей изделий. Автореферат дис. канд. техн. наук, Тула: ТПИ, 1954.

48. Лашнев, С.И. Профилирование инструментов для обработки винтовых поверхностей / С.И. Лашнев. М.: Машиностроение, 1965

49. Лашнев, С.И. Расчет параметров профиля винтовой поверхности в произвольной секущей плоскости / С.И. Лашнев, А.Н. Борисов // Станки и инструменты. –1984. –№ 12. – С. 18–21.

50. Люкшин, В.С. Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов / В.С. Люкшин. – М. : Машиностроение, 1968. – 371 с.

51. Патент РФ № 60890. Приспособление для заточки концевых фрез / А.Г. Кондрашов, Н.А. Чемборисов, А.И. Фасхутдинов – № 2006133151/22; заявл. 14.09.06; опубл. 10.02.07, Бюл. № 4; приоритет 14.09.06. – 2 с.

52. Патент РФ № 67011. Концевая фреза со сферическим торцом / А.Г. Кондрашов, А.И. Фасхутдинов – № 2007103094/22,; заявл. 25.01.07; опубл. 10.10.07 Бюл. № 28; приоритет 25.01.07. – 2 с.

53. Патент РФ № 74324. Фреза концевая / А.Г. Кондрашов, А.И. Фасхутдинов – № 2008102286/22,; заявл. 21.01.08; опубл. 27.06.08 Бюл. № 18; приоритет 21.01.08. – 2 с.

54. Патент РФ № 90000. Борфреза со сферическим торцом со сквозным осевым отверстием / Н.А. Чемборисов, И.З. Сунгатов – № 2009125388/22; заявл. 02.07.09; опубл. 27.12.09 Бюл. № 36. – 3 с.

55. Патент СССР № 01819206. Эталонная деталь /В.А. Гречишников, С.В. Касьянов, Н.А. Чемборисов. Официальный бюллетень комитета РФ по патентам и товарным знакам № 20 от 30.05.93.

56. Передерий, А.В. Повышение эффективности технологической подготовки производства за счет автоматизации выбора дисковых фрез в информационно-

поисковой системе. Автореферат дисс. канд. техн. наук. КамПИ: Набережные Челны, 2003, 20 с.

57. Перепелица, Б.А. Разработка теории формообразования и проектирования режущего инструмента на основе многопараметрических отображений. Автореферат дис. докт. техн. наук. М.: Мосстанкин, 1981, 37 с.

58. Петров, С.М. Формирование конических винтовых поверхностей деталей дисковым инструментом с использованием математического моделирования: дис. ... канд. техн. наук /С.М. Петров. – Казань :КГТУ им. Туполева А.Н., 2001. – 105 с.

59. Петухов, Ю.Е. Проектирование инструментов для обработки резанием деталей с фасонной винтовой поверхностью на стадии технологической подготовки производства: дис. доктора техн. наук: защищена 16.11.2004: утв. 8.04.2005 / Ю.Е. Петухов. – М.: Изд-во МГТУ «СТАНКИН», 2004. – 393 с.

60. Позняк Э.Г. Основы математического анализа: В 2 ч.: Ч. 1: Учебник для вузов. // Э.Г. Позняк, В.А. Ильин / – Москва. 2005, 648 с.

61. Позняк Э.Г. Основы математического анализа: В 2 ч.: Ч. 2 Учебник для вузов. // Э.Г. Позняк, В.А. Ильин / – Москва. 2006, 464 с.

62. Радзевич С.П. Формообразование сложных поверхностей на станках с ЧПУ. Киев: «Вища школа», 1991.

63. Радзевич С.П. Формообразование поверхностей деталей. Киев: «Растан», 2001.

64. Родин, П.Р. Вопросы теории проектирования режущего инструмента : дис. ... доктора техн. наук / П.Р. Родин. – Киев : Киевский политехнический институт, 1961. – 346 с.

65. Родин, П.Р. Исследование геометрических параметров спиральных сверл. Автореферат дис. канд. техн. наук, М.: МАТИ, 1948.

66. Родин, П.Р. Основы проектирования режущих инструментов / П.Р. Родин. – Киев : «Вища школа», 1990 – 424 с.

67. Сахаров, Г.Н. Металлорежущие инструменты : учебник для вузов / Г.Н. Сахаров, О.Б. Арбузов, Ю.Л. Боровой [и др.]. – М. : Машиностроение, 1989. – 328 с.

68. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010612411 Российская Федерация. Расчет конструктивных параметров винтовой стружечной канавки и координат точек профиля винтовой поверхности (FSF v. 0.1) / Н.А. Чемборисов, И.З. Сунгатов (RU); Правообладатели: Н.А. Чемборисов, И.З. Сунгатов (RU) – № 2010610758; заявл. 17.02.2010; зарегистр. 06.04.2010.

69. Симонова, Л.А. Имитационное моделирование формообразования специального дискового инструмента на этапе технологической подготовки производства на примере сферической фрезы / Л.А. Симонова, Р.М. Хисамутдинов, И.З. Сунгатов // КШП-ОМД. 2015. – № 3. С. 30-33.

70. Сметанин, С.Д. Метод профилирующих окружностей при формообразовании винтовых поверхностей дисковым инструментом. Автореферат дис. канд. техн. наук, Челябинск, 2008. – 17 с.

71. Степанов Ю.С. Технологии, инструменты и методы проектирования абразивной обработки с бегущим контактом. Автореферат дис. докт. техн. наук, Орел: Орловский государственный технический университет, 1997.

72. Ступко, В.Б. Повышение геометрической точности каналовых винтовых поверхностей на основе профилирования дисковых фрез - Дисс. работа на соискание ученой степени канд. техн. наук. КГТУ им. Туполева А.Н.: Казань. 2003. – 173 с.

73. Фасхутдинов, А.И. Точность профиля винтовой канавки концевой инструмента / А.И. Фасхутдинов // Металлообработка. – 5-ый номер 2008 г. – С. 10-13.

74. Фасхутдинов, А.И. Совершенствование процессов профилирования винтовых канавок и обработки концевых фрез со сферическим торцом: Автореферат дисс. канд. техн. наук. ИжГТУ – Ижевск, 2011. - 25 с.

75. Хисамутдинов, Р.М. Оценка увода оси отверстия при обработке осевым инструментом с переменным шагом винтовой линии / Р.М. Хисамутдинов, Д.В. Емельянов // Справочник. Инженерный журнал. – 2012. – № 6. – С. 10–13.

76. Хисамутдинов, Р.М. Разработка методов формообразования производящей поверхности червячных фрез и долбяков. Дис. канд. техн. наук. Казань, КГТУ им. Туполева А.Н., 2005, 199 с.

77. Чемборисов, Н.А. Автоматизированный расчет профиля дискового инструмента и траектории обработки винтовых поверхностей деталей / Н.А. Чемборисов, Ф.С. Юнусов, В.Б. Ступко // Сборник рефератов НИОКР № 2 серия МШ за 1999 г. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт межотраслевой информации - информационно-аналитический центр оборонной промышленности, М.,: 1998, 26 с.

78. Чемборисов, Н.А. Математическая модель обработки стружечной канавки конической концевой фрезы инструментом дискового типа. / Н.А. Чемборисов, А.А. Шматков // «Молодая наука - новому тысячелетию»: Тезисы докладов МНТК – Н. Челны: КамПИ, 1996, с.63

79. Чемборисов, Н.А. Математические зависимости торцового сечения сферической бор-фрезы / Н.А. Чемборисов, И.З. Сунгатов // СТИН № 8, 2009. – с. 23-24.

80. Чемборисов, Н.А. Математическое описание винтовой линии на сфере – сообщение первое / Н.А. Чемборисов, И.З. Сунгатов // СТИН № 1, 2010. – с. 36-40.

81. Чемборисов, Н.А. Математическое описание винтовой линии на сфере – сообщение второе / Н.А. Чемборисов, И.З. Сунгатов // СТИН № 2, 2010. – с. 25-29.

82. Чемборисов, Н.А. Математическое моделирование процессов формообразования сложных винтовых поверхностей деталей режущим инструментом / Н.А. Чемборисов, С.Ю. Юрасов, С.М. Петров, Р.М. Хусаинов. – Отчет по г/б НИР № 01.9.08.0003901 - Н. Челны: КамПИ, 1998, 78 с.

83. Чемборисов, Н.А. Метод обработки передней поверхности инструментов с винтовыми стружечными канавками / Н.А. Чемборисов, С.Ю. Юрасов // Ме-

ханика машиностроения: Тезисы докладов МНТК – Н. Челны: КамПИ, 1997, с. 110-111

84. Чемборисов, Н.А. Методика автоматизированного расчета профиля инструмента для обработки наружной составной каналовой винтовой поверхности / Н.А. Чемборисов, Ф.С. Юнусов, В.Б. Ступко // Вестник Казанского государственного технического университета имени Туполева А.Н. № 4, 2001, с. 20-24

85. Чемборисов, Н.А. Обеспечение требуемых геометрических параметров концевых конических инструментов с винтовыми стружечными канавками. / Н.А. Чемборисов, С.Ю. Юрасов // XVIII Российская школа по проблемам проектирования неоднородных конструкций, посвященная 75-летию со дня рождения академика В.П.Макеева. Тезисы докладов. – Миасс: МНУЦ, 1999, с. 176.

86. Чемборисов, Н.А. Обработка винтовых канавок концевого инструмента / Н.А. Чемборисов, А.И. Фасхутдинов // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института. Том VI. – Альметьевск: АГНИ, 2008. – С. 95-98.

87. Чемборисов, Н.А. Определение зоны контакта при обработке фасонной сферической фрезы дисковым инструментом / Н.А. Чемборисов, Р.М. Хисамутдинов, И.З. Сунгатов // СТИН № 9, 2012. – с. 34-35.

88. Чемборисов, Н.А. Повышение эффективности обработки деталей с каналовой винтовой поверхностью за счет комплексного моделирования инструмента и технологической операции: Дис. канд. техн. наук: защищена 3.11.2003: утв. . . . / Н.А. Чемборисов. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 1994, 330 с.

89. Чемборисов, Н.А. Подход к методике профилирования абразивного инструмента дискового типа для обработки деталей содержащих винтовые поверхности общего вида / Н.А. Чемборисов, С.Ю. Юрасов // «Совершенствование процессов финишной обработки в машино- и приборостроении, экология и защита окружающей среды»: Тезисы докладов МНТК - Минск: Кибер, 1995, с. 156.

90. Чемборисов, Н.А. Проектирование концевых фрез со сферическим торцом / Н.А. Чемборисов, А.И. Фасхутдинов // Известия ТулГУ. Сер. Инструментальные и метрологические системы. Вып. 2. Труды международной юбилейной научно-технической конференции «Проблемы формообразования деталей при об-

работке резанием» посвященной 90-летию со дня рождения С.И. Лашнева, 27-30 января 2007 г. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. – С. 94-97.

91. Чемборисов, Н.А. Профилирование дисковых режущих инструментов для обработки винтовых поверхностей цилиндрических и конических деталей : дис. ... доктора техн. наук / Н.А. Чемборисов. – Казань :КГТУ им. Туполева А.Н., 2003. – 399 с.

92. Чемборисов, Н.А. Профилирование фасонной фрезы для обработки винтовой поверхности / Н.А. Чемборисов // СТИН № 4, 2003. – С. 18-20

93. Чемборисов, Н.А. Формообразование винтовых канавок концевого инструмента / Н.А. Чемборисов, А.И. Фасхутдинов // СТИН. – 2009. – № 3, – С. 13-15.

94. Шаламов, В.Г. Развитие методов профилирования при формообразовании винтовых поверхностей. / В.Г. Шаламов, С.Д. Сметанин // «СТИН», № 11, 2009.

95. Шевелева, Г.И. Теория формообразования и контакта движущихся тел. - М.: Изд-во «Станкин», 1999.

96. Щегольков, Н.Н. Компьютерный расчет нормального профиля винтовых стружечных канавок концевых фрез / Н.Н. Щегольков // «СТИН», № 2, 1995

97. Щегольков, Н.Н. Моделирование профиля изделия при компьютерном профилировании обрабатывающего инструмента / Н.Н. Щегольков // Вестник машиностроения. – 1995. – № 5. – С. 32–35.

98. Щегольков, Н.Н. Разработка методов компьютерного профилирования фасонных режущих инструментов на основе метода итераций: Дис. докт. техн. наук.- М.: МГТУ Станкин, 1997.- 435 с.

99. Щуров, И.А. Расчет профиля дискового инструмента для обработки винтовой поверхности / И.А. Щуров // «СТИН» № 1, 1996

100. Щуров, И.А. Теория расчета точности обработки и параметров мерных инструментов на основе дискретного твердотельного моделирования. Автореферат дис. докт. техн. наук, Челябинск, ЮУрГУ, 1999.

101. Юликов, М.И. Расчет на ЭВМ установочных параметров абразивного круга при шлифовании червячных фрез / М.И. Юликов, Н.В. Колесов // Обработка материалов резанием : межведомственный (межвузовский) сб. науч. трудов. – М., 1976. – С. 13–15.
102. Юликов, М.И. Теоретические основы системы проектирования режущего инструмента. Автореферат дисс. докт. техн. наук. - Тула, 1979.
103. Юнусов, Ф.С. Выявление зависимости между математическим описанием номинальной и действительной винтовых поверхностей – сообщение первое / Ф.С. Юнусов, Н.А. Чемборисов, А.В. Передерий // Тепловые двигатели в XXI веке: фундаментальные проблемы теории и технологии: ВНТК. Тезисы докладов. Казань: Издательство КГТУ им. Туполева А.Н., 1999, с.98
104. Юнусов, Ф.С. Выявление зависимости между математическим описанием номинальной и действительной винтовых поверхностей – сообщение второе / Ф.С. Юнусов, Н.А. Чемборисов, А.В. Передерий // Технология, инновация, качество -99. МНТК. Сборник докладов. Казань: Издательство КГТУ им. Туполева А.Н., 1999, с.247-249
105. Юнусов, Ф.С. Компьютерная модель процесса обработки винтовой поверхности детали дисковым инструментом / Ф.С. Юнусов, Н.А. Чемборисов, С.М. Петров // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 1996. – № 4. – С. 32–35.
106. Юнусов, Ф.С. Компьютерное моделирование процесса обработки сложных винтовых поверхностей деталей дисковым инструментом / Ф.С. Юнусов, Н.А. Чемборисов, М.П. Ионов // Наука – производству: современные задачи управления, экономики, технологии и экологии в машино- и приборостроении. //Сборник материалов ВНТК, посвященной 30-летию Арзамасского филиала НГТУ, Арзамас, 1998, с. 88-90.
107. Юнусов Ф.С., Математическое моделирование процесса формообразования винтовых поверхностей аэродинамического профиля. / Ф.С. Юнусов, Н.В. Краснова // «Прогрессивные методы обработки деталей летательных аппаратов и двигателей»: Межвузовский сборник научных трудов. - Казань: КАИ, 1978.

108. Юнусов, Ф.С. Моделирование формообразования сложных поверхностей деталей автомобиля резанием / Ф.С. Юнусов, С.М. Петров, Н.А. Чемборисов // Научно-техническая конференция «XVII Российская школа по проблемам проектирования неоднородных конструкций» : тез. докладов. – Миасс, 1998. – С. 49.

109. Юнусов, Ф.С. Оптимизация параметров настройки станка для обработки винтовых стружечных канавок, расположенных на конусе / Ф.С. Юнусов, Н.А. Чемборисов, С.Ю. Юрасов // «Молодая наука - новому тысячелетию»: Тезисы докладов МНТК – Н. Челны: КамПИ, 1996, с. 65

110. Юнусов, Ф.С. Проблемы выбора инструмента для обработки сложных винтовых поверхностей / Ф.С. Юнусов, С.М. Петров, Н.А. Чемборисов // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Наука – производству: современные задачи управления, экономики и экологии в машино- и приборостроении». – Арзамас, 1998. – С. 21–23.

111. Юнусов Ф.С. Проектирование новой технологической наладки для обработки винтовых стружечных канавок конических концевых инструментов. / Ф.С. Юнусов, Н.А. Чемборисов, С.Ю. Юрасов // Вестник Казанского государственного технического университета имени Туполева А.Н. № 4, 1999, с. 19-22.

112. Юнусов, Ф.С. Формирование сложной поверхности деталей / Ф.С. Юнусов, А.П. Абызов, Н.А. Чемборисов, С.М. Петров : тез. докладов научно-технической конференции. – Альметьевск, 1996. – С. 36.

113. Юрасов, С.Ю. Совершенствование геометрических параметров инструментов с коническими винтовыми поверхностями на основе моделирования режущих кромок : дис. ... канд. техн. наук / С.Ю. Юрасов. – М. : МГТУ «СТАНКИН», 2000. – 134 с.

114. Якубович, Ю.Б. Исследование процесса формообразования винтовых поверхностей дисковым инструментом и оптимизация параметров его установки при автоматизированном проектировании. Автореферат дисс. канд. техн. наук. - Минск, 1977.

115. Chung-Liang Tsai, Yunn-Shiuan Liao Cutting force prediction in ball-end milling with inclined feed by means of geometrical analysis.-The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009. 46. NI 29-41
116. J.-J.J.Wang, C.-Y. Huang A force-model-based approach to estimating cutter axis offset in ball end milling.-The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004. 24. NI 10-18
117. Jone-Ming Hsieh, Ying-Chien Tsai Geometric modeling and grinder design for toroid-cone shaped cutters.-Springer-Verlag London Limited, 2005. 29. NI 12-21
118. Liqiang Zhang, Jingchun Feng, Yuhua Wang, Ming Chen Feedrate scheduling strategy for free-form surface machining through an integrated geometric and mechanistic model.-National Natural Science Foundation of China, 2009. 40. NI 11-12
119. Tae-Sung Jung, Min-Yang Yang, Kang-Jae Lee A new approach to analysing machined surfaces by ball-end milling.-Springer-Verlag London Limited, 2004. 25. NI 33-40

ПРИЛОЖЕНИЯ



Автор(ы): *Сунгатов Ильназ Зуфарович (RU), Чемборисов Наиль Анварович (RU)*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU⁽¹¹⁾90 000⁽¹³⁾ U1(51) МПК
B23C 3/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ (ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ)

(21), (22) Заявка: 2009125388/22, 02.07.2009

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
02.07.2009

(45) Опубликовано: 27.12.2009 Бюл. № 36

Адрес для переписки:

423810, Татарстан, г. Набережные Челны,
пр.Мира, 68/19, ГОУ ВПО "Камская
государственная инженерно-экономическая
академия" (ИНЭКА)

(72) Автор(ы):

Сунгатов Ильназ Зуфарович (RU),
Чемборисов Наиль Анварович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

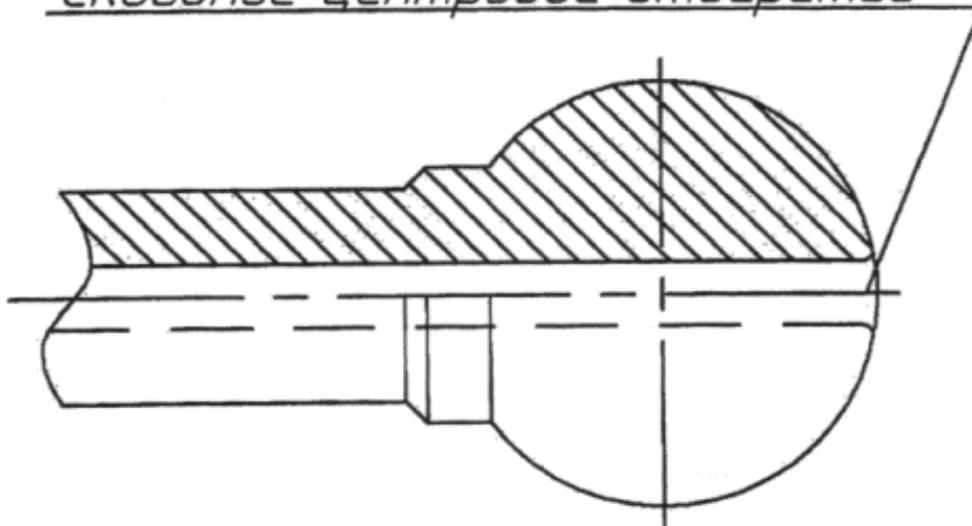
Государственное образовательное
учреждение высшего профессионального
образования "Камская государственная
инженерно-экономическая академия"
(ИНЭКА) (RU)

(54) БОРФРЕЗА СО СФЕРИЧЕСКИМ ТОРЦОМ СО СКВОЗНЫМ ОСЕВЫМ ОТВЕРСТИЕМ

(57) Формула полезной модели

Борфреза со сферическим торцом (сферическая, сфероконическая, сфероцилиндрическая и грушевидная), содержащая режущую часть или коронку с выполненными на ней длинными зубьями по винтовой линии, которые на торцевой части сводятся к оси инструмента, отличающаяся тем, что на торцевой части выполнено с возможностью подачи смазочно-охлаждающей жидкости и исключения стружечных канавок нулевой глубины сквозное осевое отверстие.

Сквозное центровое отверстие



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2010612411

Расчет конструктивных параметров винтовой стружечной канавки и координат точек профиля винтовой поверхности

Правообладатель(ли): **Чемборисов Наиль Анварович (RU),
Сунгатов Ильназ Зуфарович (RU)**

Автор(ы): **Чемборисов Наиль Анварович,
Сунгатов Ильназ Зуфарович (RU)**

Заявка № 2010610758

Дата поступления 17 февраля 2010 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ

6 апреля 2010 г.



Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов





Министерство образования и науки Российской Федерации



Министерство образования и науки Республики Татарстан



Академия наук Республики Татарстан



КАИ
КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
— А.А. ТУПОЛЕВА



ОАО "Камский
автомобильный завод"



Объединенная
авиационная корпорация

V ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АВИАЦИИ,
НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА И ЭНЕРГЕТИКИ
"АНТЭ-2009"**



ДИПЛОМ

НАГРАЖДАЕТСЯ

Сунгатов И.З.

За участие в конференции с докладом

*"Конструктивные параметры
винтовой стержневой компрессор-
оруд"*

Ректор КГТУ им. Туполева



Казань
2009

Гортышов Ю. Ф.



НАБЕРЕЖНОЧЕЛНИНСКИЙ ИНСТИТУТ
КАЗАНСКОГО (ПРИВОЛЖСКОГО) ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

ДИПЛОМ

награждается

участник

Всероссийской научно-практической конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых

«VII КАМСКИЕ ЧТЕНИЯ»

24 апреля 2015 г.

Сунгазов Ислаз Зухратович

за *II место*

В СЕКЦИИ

**«АВТОМАТИЗАЦИЯ И
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

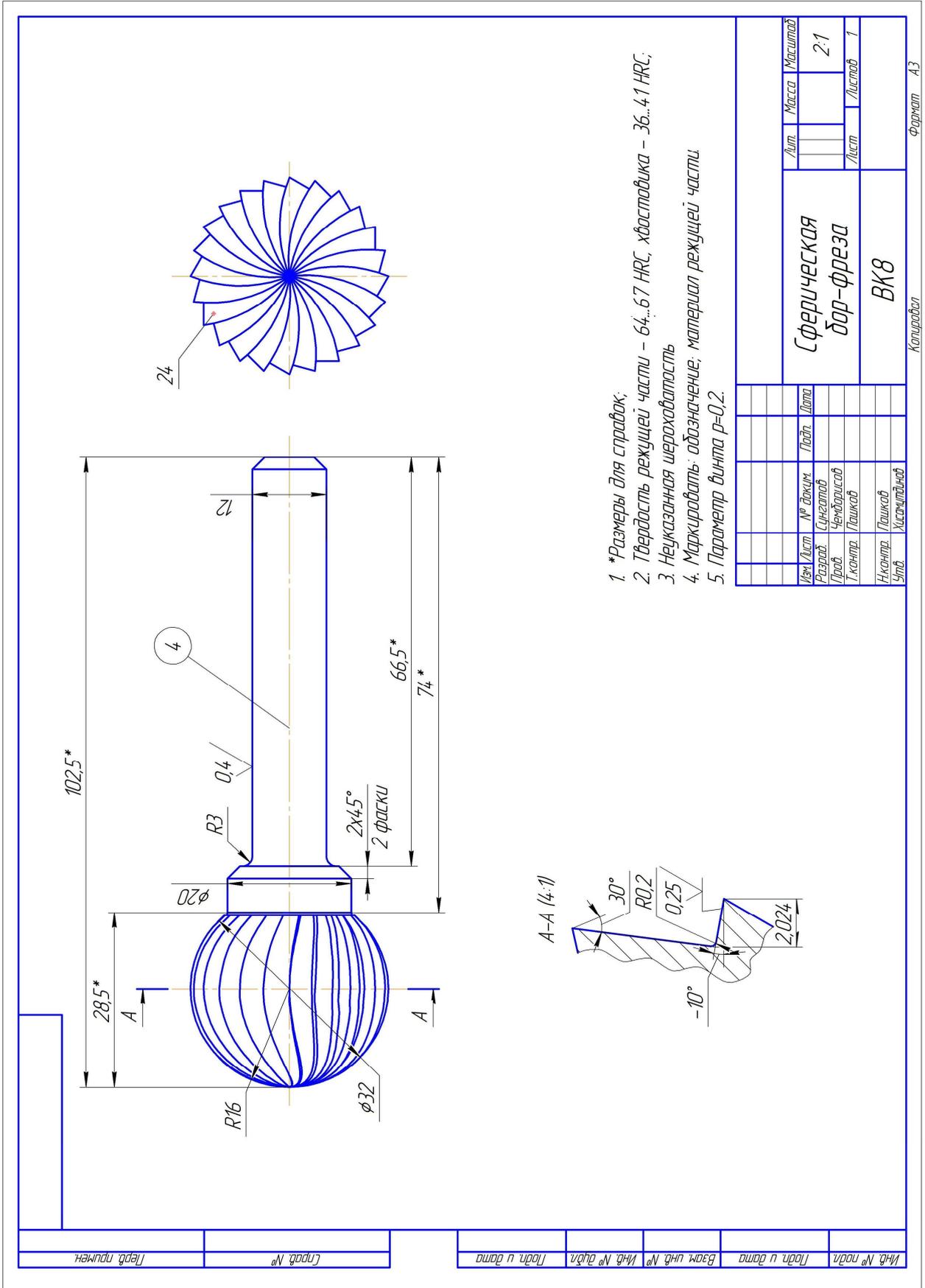
Директор
Набережночелнинского
института КФУ



Набережные Челны
2015 г.

M. M. Ganiev
М.М.Ганиев

Приложение 3. Чертеж сферической фрезы



Приложение 4. Математическое моделирование
винтовой поверхности на сфере

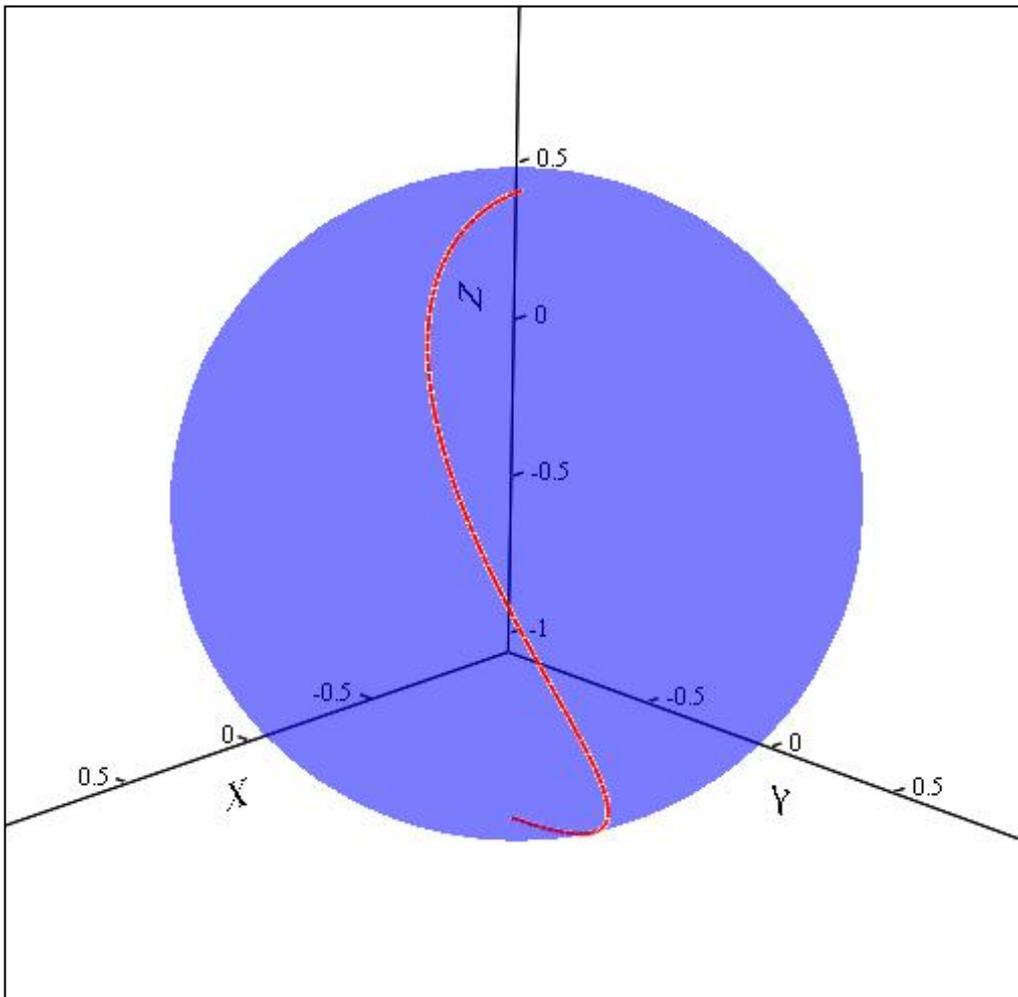
$$n := 100 \qquad i := 0..n \qquad u_i := \frac{\pi}{n} \cdot i$$

$$S(u, v) := \begin{pmatrix} \sin(u) \cdot \cos(v) \\ \sin(u) \cdot \sin(v) \\ \cos(u) \end{pmatrix} \qquad S1(u, v) := \begin{pmatrix} \sin(u) \cdot \cos(v) \\ \sin(u) \cdot \sin(v) \\ \cos(u) \end{pmatrix}$$

$$SS := \text{CreateMesh}(S, 0, 1 \cdot \pi, 0, 2 \cdot \pi, 80, 40)$$

$$v_i := 0.5 \cdot u_i \qquad S1_i := S1(u_i, v_i)$$

$$X_i := (S1_i)_0 \qquad Y_i := (S1_i)_1 \qquad Z_i := (S1_i)_2$$



SS, (X, Y, Z)

$$n := 250 \quad \xi := \frac{-1}{2}$$

$$\underline{S}(u, v) := \begin{pmatrix} \sin(u) \cdot \cos(v) \\ \sin(u) \cdot \sin(v) \\ \cos(u) \end{pmatrix} \quad S0(u, v) := \begin{pmatrix} \sin(u) \cdot \cos(v) \\ \sin(u) \cdot \sin(v) \\ \cos(u) \end{pmatrix}$$

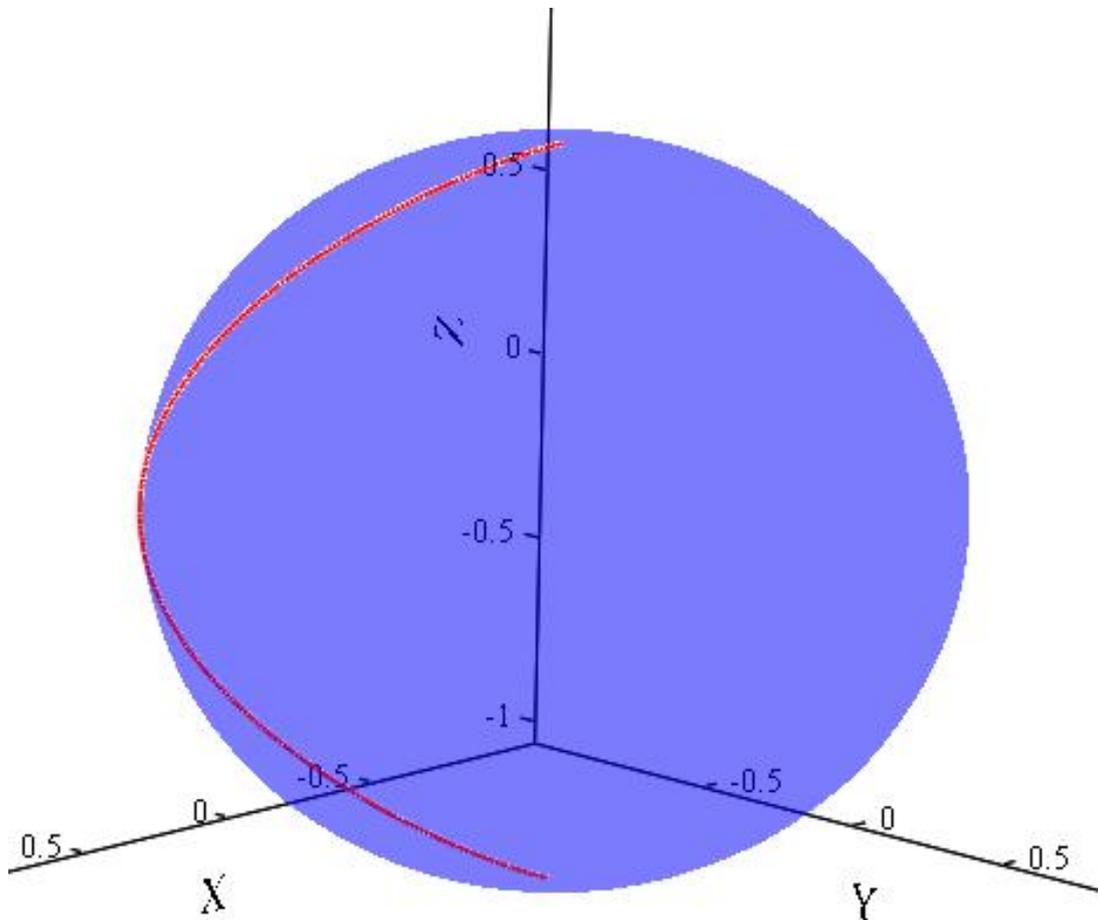
$$i := 0..n \quad u_i := \frac{\pi}{n} \cdot i \quad v_i := \xi \cdot u_i$$

$$SS := \text{CreateMesh}(S, 0, 1 \cdot \pi, 0, 2 \cdot \pi, 80, 40) \quad \overrightarrow{S1} := S0(u, v)$$

$$X_i := (S1_i)_0 \quad Y_i := (S1_i)_1 \quad Z_i := (S1_i)_2$$

$$\underline{N}_i := 12$$

$$XYZ := \text{augment}(X, Y, Z) \quad \omega := (1000 \ 1000 \ 1000)$$



SS, (X, Y, Z)

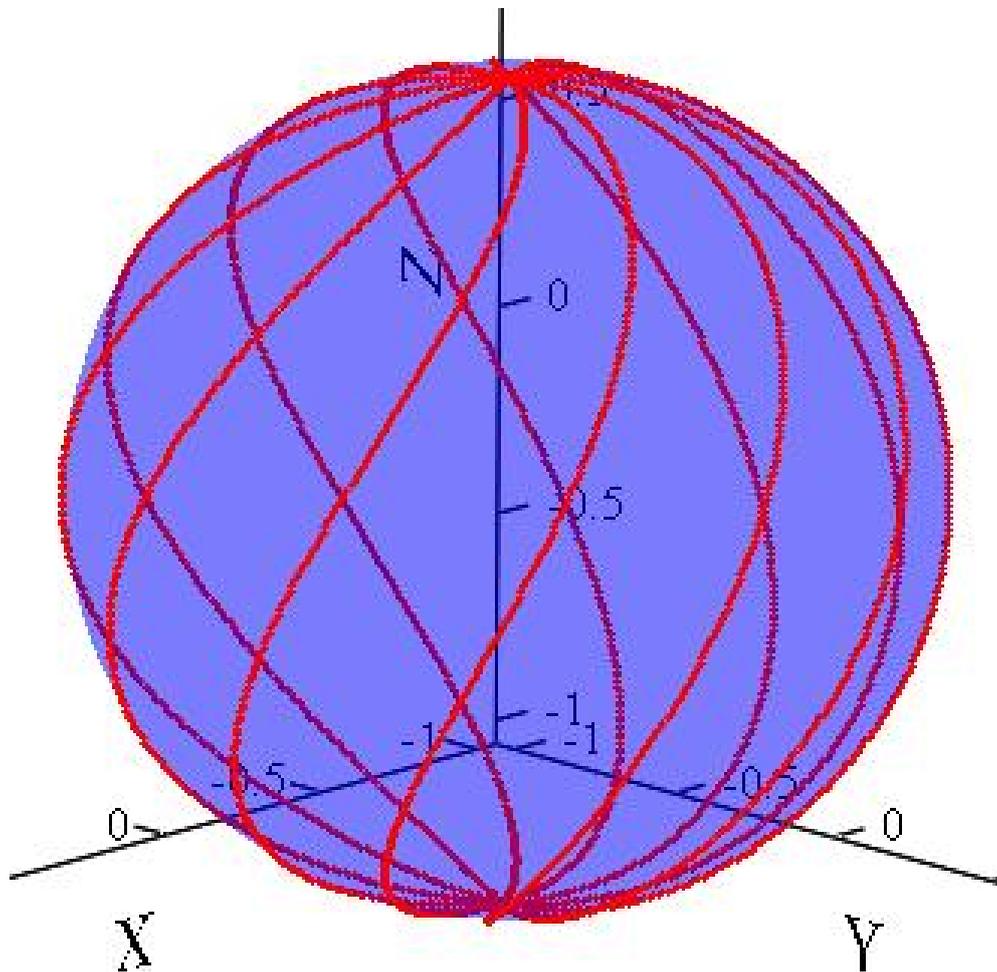
$$\underline{T}(\alpha) := \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\underline{T}(\alpha) := \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

```

XYZ := | A ← XYZ
      | for k ∈ 1..N
      |   | a ←  $\frac{2\pi}{N} \cdot k$ 
      |   | A ← stack(A, XYZ·T(a), ω)
      | A

```



SS, (XYZ^{<0>}, XYZ^{<1>}, XYZ^{<2>})

$$n := 20$$

$$i := 0..n$$

$$j := 0..n$$

$$u_i := \frac{-2\pi i}{n}$$

$$v_j := \frac{2\pi j}{n}$$

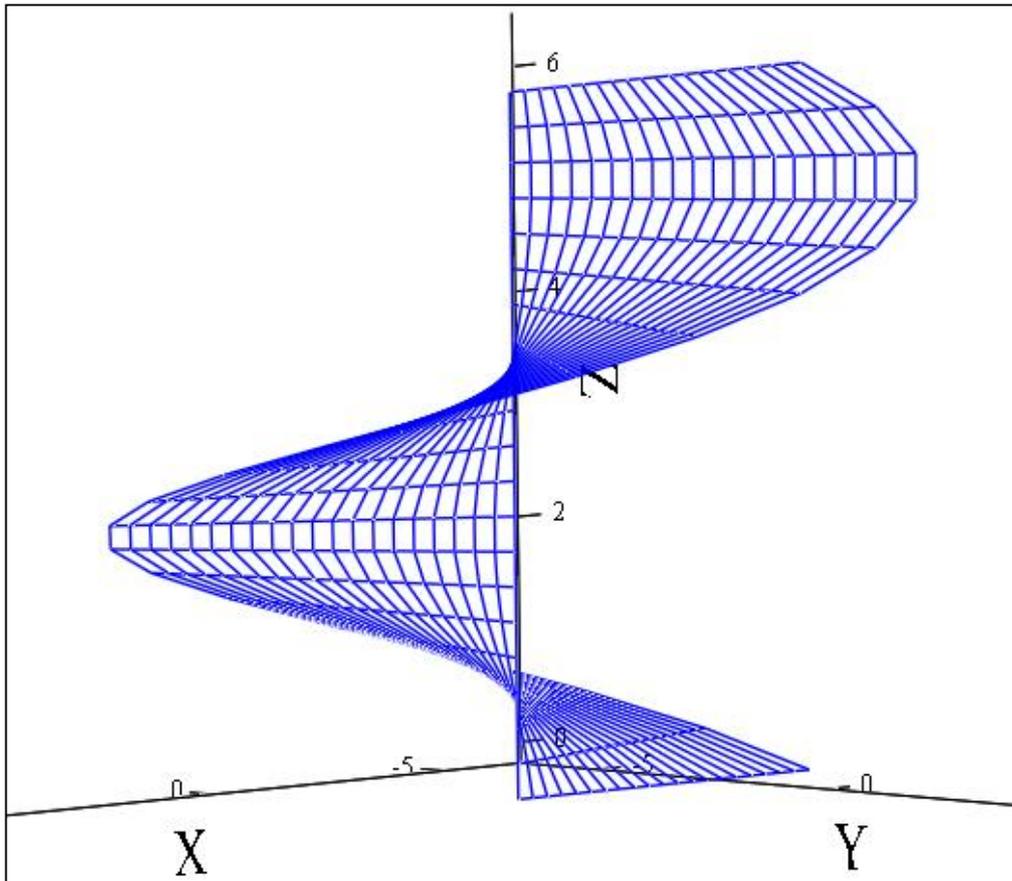
$$S(u, v) := \begin{pmatrix} u \cdot \cos(v) \\ u \cdot \sin(v) \\ v \end{pmatrix}$$

$$S_{i,j} := S(u_i, v_j)$$

$$X_{i,j} := (S_{i,j})_0$$

$$Y_{i,j} := (S_{i,j})_1$$

$$Z_{i,j} := (S_{i,j})_2$$



(X,Y,Z)

Приложение 5. Код программы расчета параметров образующей и направляющей винтовой поверхности на сфере, а так же результат работы программы

```
unit Unit1;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, ActnList, ComCtrls, StdCtrls, Grids, XPMan, Menus, ExtCtrls,
  OleServer, ExcelXP;

type
  TForm1 = class(TForm)
    GroupBox1: TGroupBox;
    GroupBox2: TGroupBox;
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;
    Label3: TLabel;
    Label4: TLabel;
    Label5: TLabel;
    Edit1: TEdit;
    Edit2: TEdit;
    Label6: TLabel;
    Label7: TLabel;
    ComboBox1: TComboBox;
    ComboBox2: TComboBox;
    ComboBox3: TComboBox;
    ComboBox4: TComboBox;
    ComboBox5: TComboBox;
    Button1: TButton;
    Edit3: TEdit;
    Edit4: TEdit;
    StringGrid1: TStringGrid;
    Edit5: TEdit;
    Button3: TButton;
    GroupBox3: TGroupBox;
    Label8: TLabel;
    Button2: TButton;
    Label9: TLabel;
    Label10: TLabel;
    Edit6: TEdit;
    Label11: TLabel;
    ExcelApplication1: TExcelApplication;
  procedure ComboBox1Change(Sender: TObject);
  procedure FormShow(Sender: TObject);
  procedure Button1Click(Sender: TObject);
  procedure Button2Click(Sender: TObject);
```

```

    procedure Button3Click(Sender: TObject);
private
    procedure Add345;
    procedure Add68;
    procedure Add1012;
    procedure Add1620;
    procedure Add2532;
    procedure Raschet1;
    procedure Raschet2;
public
    { Public declarations }
end;

var
    Form1: TForm1;

implementation

uses Math;
{$R *.dfm}

{ TForm1 }

//Количество зубьев сферической фрезы исходя из диаметра (По ГОСТу).
procedure TForm1.Add1012;
begin
    with ComboBox2 do begin
        ComboBox2.Items.Add('12');
        ComboBox2.Items.Add('16');
        ComboBox2.Items.Add('24');
        ComboBox2.Items.Add('32');
        ComboBox2.Items.Add('48');
    end;
end;

procedure TForm1.Add1620;
begin
    with ComboBox2 do begin
        ComboBox2.Items.Add('16');
        ComboBox2.Items.Add('24');
        ComboBox2.Items.Add('32');
        ComboBox2.Items.Add('48');
        ComboBox2.Items.Add('64');
    end;
end;

procedure TForm1.Add2532;
begin
    with ComboBox2 do begin
        ComboBox2.Items.Add('24');
        ComboBox2.Items.Add('32');
        ComboBox2.Items.Add('48');
    end;
end;

```

```

    ComboBox2.Items.Add('64');
end;
end;

```

```

procedure TForm1.Add345;
begin
    with ComboBox2 do begin
        ComboBox2.Items.Add('8');
        ComboBox2.Items.Add('12');
        ComboBox2.Items.Add('16');
    end;
end;

```

```

procedure TForm1.Add68;
begin
    with ComboBox2 do begin
        ComboBox2.Items.Add('8');
        ComboBox2.Items.Add('12');
        ComboBox2.Items.Add('16');
        ComboBox2.Items.Add('24');
        ComboBox2.Items.Add('32');
    end;
end;

```

```

procedure TForm1.ComboBox1Change(Sender: TObject);
begin
    ComboBox2.Clear;
    case ComboBox1.ItemIndex of
        0,1,2:
            Add345;
        3,4:
            Add68;
        5,6:
            Add1012;
        7,8:
            Add1620;
        9,10:
            Add2532;
    end;
    ComboBox2.Text:='Z';
end;

```

// Вывод основных расчетных данных.

```

procedure TForm1.Raschet1;
var D,Z,a,t,hmax,Rkk,Rxy,l:real;
begin
    D:= StrToFloat(ComboBox1.Text);
    Z:= StrToFloat(ComboBox2.Text);
    a:= StrToFloat(ComboBox4.Text);
    t:= 2*RadToDeg(PI)/Z;
    hmax:= D/2*(1-(Cos(DegToRad(a)))/Cos(DegToRad(t-a)));

```

```

Rkk:= 0.5*Sqrt((Sqr(D-hmax)+Sqr(hmax))/(1-Cos(DegToRad(RadToDeg(PI)-
2*RadToDeg(ArcTan(D/(D-2*hmax)))))));
l:= Sqrt(Sqr(Rkk) - Sqr(D/2));
Rxy:=(D/2 - hmax)*1.3;
Edit1.Text:= FloatToStr(t);
Edit2.Text:= FloatToStr(hmax);
Edit3.Text:= FloatToStr(Rkk);
Edit4.Text:= FloatToStr(l);
Edit6.Text:= FloatToStr(Rxy);
end;

```

```

// Надписи и параметры заголовков таблицы.
procedure TForm1.FormShow(Sender: TObject);

```

```
begin
```

```
  With StringGrid1 Do
```

```
    begin
```

```
      Cells[0,0]:='№ сечения n';
```

```
      Cells[1,0]:='Координата Z направляющей линии или смещение сечения m';
```

```
      Cells[2,0]:='Диаметр i-го торцового сечения';
```

```
      Cells[3,0]:='Высота зуба в торцовом i-том сечении';
```

```
      Cells[4,0]:='Высота зуба в нормальном i-том сечении';
```

```
      Cells[5,0]:='Координата X направляющей линии';
```

```
      Cells[6,0]:='Координата Y направляющей линии';
```

```
      Cells[7,0]:='Точка 1';
```

```
      Cells[8,0]:='Точка 1';
```

```
      Cells[9,0]:='Точка 2';
```

```
      Cells[10,0]:='Точка 2';
```

```
      Cells[11,0]:='Точка 3';
```

```
      Cells[12,0]:='Точка 3';
```

```
      Cells[0,1]:='n';
```

```
      Cells[1,1]:='Z';
```

```
      Cells[2,1]:='Dit';
```

```
      Cells[3,1]:='hit';
```

```
      Cells[4,1]:='hin';
```

```
      Cells[5,1]:='X';
```

```
      Cells[6,1]:='Y';
```

```
      Cells[7,1]:='X1';
```

```
      Cells[8,1]:='Y1';
```

```
      Cells[9,1]:='X2';
```

```
      Cells[10,1]:='Y2';
```

```
      Cells[11,1]:='X3';
```

```
      Cells[12,1]:='Y3';
```

```
    end;
```

```
      StringGrid1.ColWidths[0]:=40;
```

```
      StringGrid1.ColWidths[1]:=59;
```

```
      StringGrid1.ColWidths[2]:=59;
```

```
      StringGrid1.ColWidths[3]:=59;
```

```
      StringGrid1.ColWidths[4]:=59;
```

```
      StringGrid1.ColWidths[5]:=59;
```

```
      StringGrid1.ColWidths[6]:=59;
```

```
      StringGrid1.ColWidths[7]:=44;
```

```
      StringGrid1.ColWidths[8]:=44;
```

```

StringGrid1.ColWidths[9]:=44;
StringGrid1.ColWidths[10]:=44;
StringGrid1.ColWidths[11]:=44;
StringGrid1.ColWidths[12]:=44;
end;

// Заполнение ячеек таблицы.
procedure TForm1.Raschet2;
var n,i:Integer;
var Zk,t,X1,Y1,X2,Y2,X3,Y3,hmax,psi,hin,hit,l,Dit,Rkk,D,R,Rsum,S,X,Y,yp,Rxy:Currency;
begin
  n:=StrToInt(Edit5.Text);
  D:=StrToFloat(ComboBox1.Text);
  Rkk:=StrToFloat(Edit3.Text);
  l:=StrToFloat(Edit4.Text);
  yp:=StrToFloat(ComboBox3.Text);
  Rxy:=StrToFloat(Edit6.Text);
  hmax:=StrToFloat(Edit2.Text);
  Zk:=StrToFloat(ComboBox2.Text);
  R:=D/2;
  S:=R/n;
  Rsum:=R;
  t:=2*RadToDeg(PI)/Zk;
  StringGrid1.RowCount:=n+3;
  for i:=0 to n do begin
    StringGrid1.RowHeights[i] := 21;
  // Расчет конструктивных параметров винтовой стружечной канавки.
  StringGrid1.Cells[0,i+2] := IntToStr(i);
  StringGrid1.Cells[1,i+2] := FloatToStr(Rsum);
  Dit:=2*sqrt(sqr(D/2)-sqr(Rsum));
  StringGrid1.Cells[2,i+2] := FloatToStr(Dit);
  hit:=l+Dit/2-sqrt(sqr(Rkk)-sqr(Rsum));
  StringGrid1.Cells[3,i+2] := FloatToStr(hit);
  psi:=arccos(Rsum/R);
  hin:=D/2+l*sin(psi)-sqrt(sqr(Rkk)-sqr(l*cos(psi)));
  StringGrid1.Cells[4,i+2] := FloatToStr(hin);
  X:=(Dit/2-hit)*cos(pi-arccos((Dit/2-hit)/(2*Rxy))-arcsin((D/2-hmax)/(2*Rxy)));
  StringGrid1.Cells[5,i+2] := FloatToStr(X);
  Y:=(Dit/2-hit)*sin(pi-arccos((Dit/2-hit)/(2*Rxy))-arcsin((D/2-hmax)/(2*Rxy)));
  StringGrid1.Cells[6,i+2] := FloatToStr(Y);
  // Расчет координат точек профиля винтовой поверхности.
  X1:=0;
  StringGrid1.Cells[7,i+2] := FloatToStr(X1);
  Y1:=(Dit/2);
  StringGrid1.Cells[8,i+2] := FloatToStr(Y1);
  X2:=hit*tan(DegToRad(yp));
  StringGrid1.Cells[9,i+2] := FloatToStr(X2);
  Y2:=(Dit/2)-hit;
  StringGrid1.Cells[10,i+2] := FloatToStr(Y2);
  X3:=(Dit/2)*sin(DegToRad(t));
  StringGrid1.Cells[11,i+2] := FloatToStr(X3);
  Y3:=(Dit/2)*cos(DegToRad(t));

```

```

StringGrid1.Cells[12,i+2] := FloatToStr(Y3);
Rsum := Rsum - S;
end;
end;

// Проверка на ошибки ввода данных исходных или построения и расчет.
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
begin
  try
    Raschet1;
    Raschet2;
    Button3.Enabled:=True;
  except
    MessageDlg('Ошибка при вводе данных исходных или построения. Повторите пожалуйста
ввод!',mtError,[mbok],0);
  end;
end;

// Сохранение в Microsoft Excel.
procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);
var
  WorkBk: _Workbook;
  WorkSheet: _Worksheet;
  i, j, r, k, c: Integer;
  TabGrid, HeadGrid: Variant;
begin
  if StringGrid1.Cells[1, 1] <> " then begin
    r := StringGrid1.RowCount;
    c := StringGrid1.ColCount;
    TabGrid := VarArrayCreate([0,(r-1),0,(c-1)], varDouble);
    i := 2;
    repeat
      j := 0;
      k := 0;
      while j < c do begin
        TabGrid[i-2,k] := StrToFloat(StringGrid1.Cells [j,i]);
        Inc(k);
        Inc(j);
      end;
      Inc (i);
    until i > (r-1);
    try
      ExcelApplication1 := TExcelApplication.Create(Self);
      ExcelApplication1.ConnectKind := ckNewInstance;
      ExcelApplication1.Connect;
      ExcelApplication1.Workbooks.Add(xIWBATWorksheet, 0);
    except
      MessageDlg('Ошибка при сохранении. Проверьте пожалуйста доступность Microsoft Ex-
cel!',mtError,[mbok],0);
    end;
    WorkBk := ExcelApplication1.Workbooks.Item[1];
    WorkSheet := WorkBk.Worksheets.Get_item(1) as _Worksheet;
  end;
end;

```

```
WorkSheet.Range['A1', 'M' + IntToStr(r-2)].Value2 := TabGrid;
HeadGrid := VarArrayCreate([0,2,0,(c-1)], varVariant);
i:=0;
repeat
  j := 0;
  k := 0;
  while j < c do begin
    HeadGrid[i,k] := StringGrid1.Cells [j,i];
    Inc(k);
    Inc(j);
  end;
  Inc (i);
until i > 1;
WorkSheet.Range['A1', 'M2'].Insert(2, 1);
WorkSheet.Range['A1', 'M2'].Value2 := HeadGrid;
TabGrid := Unassigned;
ExcelApplication1.Visible[0] := true;
ExcelApplication1.ScreenUpdating[0] := true;
end;
end;

// Выход.
procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
  Close;
end;
end.
```

Результат работы программы расчета параметров
образующей и направляющей винтовой поверхности на сфере

№ сечения	Координата Z направляющей линии или смещение сечения m	Диаметр i-го торцового сечения	Высота зуба в торцовом i-том сечении	Высота зуба в нормальном i-том сечении	Координата X направляющей линии	Координата Y направляющей линии
n	Z (m)	Dit	hit	hin	X	Y
0	16,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	15,8400	4,5142	1,2961	0,3032	0,3460	0,8965
2	15,6800	6,3679	1,5009	0,4260	0,5747	1,5819
3	15,5200	7,7794	1,6058	0,5190	0,7442	2,1593
4	15,3600	8,9600	1,6723	0,5962	0,8764	2,6674
5	15,2000	9,9920	1,7193	0,6635	0,9824	3,1260
6	15,0400	10,9176	1,7548	0,7235	1,0687	3,5465
7	14,8800	11,7619	1,7827	0,7779	1,1395	3,9366
8	14,7200	12,5414	1,8055	0,8280	1,1979	4,3015
9	14,5600	13,2675	1,8244	0,8746	1,2459	4,6452
10	14,4000	13,9485	1,8406	0,9181	1,2852	4,9702
11	14,2400	14,5907	1,8544	0,9592	1,3171	5,2791
12	14,0800	15,1992	1,8666	0,9977	1,3425	5,5736
13	13,9200	15,7777	1,8774	1,0344	1,3622	5,8551
14	13,7600	16,3294	1,8869	1,0693	1,3771	6,1249
15	13,6000	16,8570	1,8955	1,1026	1,3876	6,3839
16	13,4400	17,3628	1,9033	1,1344	1,3941	6,6332
17	13,2800	17,8484	1,9103	1,1649	1,3972	6,8733
18	13,1200	18,3156	1,9168	1,1942	1,3972	7,1049
19	12,9600	18,7658	1,9228	1,2222	1,3944	7,3286
20	12,8000	19,2000	1,9282	1,2494	1,3891	7,5450
21	12,6400	19,6194	1,9333	1,2755	1,3814	7,7543
22	12,4800	20,0249	1,9379	1,3007	1,3717	7,9572
23	12,3200	20,4174	1,9423	1,3251	1,3602	8,1537
24	12,1600	20,7975	1,9464	1,3486	1,3469	8,3443
25	12,0000	21,1660	1,9502	1,3713	1,3321	8,5294
26	11,8400	21,5234	1,9538	1,3934	1,3159	8,7090
27	11,6800	21,8703	1,9572	1,4149	1,2984	8,8836
28	11,5200	22,2072	1,9604	1,4356	1,2798	9,0532

29	11,3600	22,5345	1,9634	1,4557	1,2602	9,2181
30	11,2000	22,8526	1,9662	1,4752	1,2396	9,3785
31	11,0400	23,1619	1,9689	1,4941	1,2183	9,5345
32	10,8800	23,4628	1,9714	1,5125	1,1961	9,6864
33	10,7200	23,7556	1,9739	1,5304	1,1733	9,8342
34	10,5600	24,0405	1,9761	1,5478	1,1499	9,9781
35	10,4000	24,3179	1,9783	1,5647	1,1259	10,1182
36	10,2400	24,5880	1,9804	1,5811	1,1015	10,2546
37	10,0800	24,8510	1,9824	1,5970	1,0767	10,3874
38	9,9200	25,1073	1,9843	1,6127	1,0516	10,5169
39	9,7600	25,3568	1,9861	1,6277	1,0262	10,6429
40	9,6000	25,6000	1,9878	1,6425	1,0005	10,7658
41	9,4400	25,8369	1,9895	1,6568	0,9747	10,8854
42	9,2800	26,0677	1,9910	1,6708	0,9486	11,0020
43	9,1200	26,2926	1,9926	1,6843	0,9226	11,1155
44	8,9600	26,5118	1,9940	1,6975	0,8964	11,2262
45	8,8000	26,7253	1,9954	1,7104	0,8702	11,3339
46	8,6400	26,9333	1,9968	1,7230	0,8440	11,4388
47	8,4800	27,1359	1,9980	1,7351	0,8179	11,5410
48	8,3200	27,3333	1,9992	1,7469	0,7918	11,6406
49	8,1600	27,5256	2,0005	1,7585	0,7659	11,7373
50	8,0000	27,7128	2,0016	1,7697	0,7401	11,8317
51	7,8400	27,8951	2,0027	1,7806	0,7144	11,9235
52	7,6800	28,0726	2,0037	1,7912	0,6889	12,0129
53	7,5200	28,2453	2,0047	1,8016	0,6637	12,0998
54	7,3600	28,4134	2,0057	1,8116	0,6387	12,1843
55	7,2000	28,5769	2,0066	1,8214	0,6139	12,2665
56	7,0400	28,7359	2,0075	1,8309	0,5895	12,3464
57	6,8800	28,8905	2,0084	1,8401	0,5653	12,4240
58	6,7200	29,0408	2,0092	1,8491	0,5415	12,4995
59	6,5600	29,1867	2,0100	1,8577	0,5180	12,5727
60	6,4000	29,3285	2,0108	1,8662	0,4949	12,6438
61	6,2400	29,4661	2,0115	1,8744	0,4721	12,7128
62	6,0800	29,5996	2,0122	1,8823	0,4498	12,7797
63	5,9200	29,7290	2,0129	1,8900	0,4278	12,8445
64	5,7600	29,8545	2,0136	1,8974	0,4063	12,9073
65	5,6000	29,9760	2,0142	1,9046	0,3853	12,9681

66	5,4400	30,0936	2,0148	1,9116	0,3646	13,0269
67	5,2800	30,2074	2,0154	1,9183	0,3445	13,0838
68	5,1200	30,3174	2,0160	1,9248	0,3248	13,1387
69	4,9600	30,4236	2,0165	1,9311	0,3056	13,1918
70	4,8000	30,5261	2,0170	1,9372	0,2870	13,2429
71	4,6400	30,6249	2,0175	1,9430	0,2688	13,2922
72	4,4800	30,7200	2,0180	1,9486	0,2512	13,3396
73	4,3200	30,8115	2,0184	1,9540	0,2341	13,3853
74	4,1600	30,8995	2,0188	1,9592	0,2175	13,4292
75	4,0000	30,9839	2,0193	1,9642	0,2015	13,4711
76	3,8400	31,0647	2,0196	1,9690	0,1861	13,5115
77	3,6800	31,1421	2,0200	1,9735	0,1712	13,5500
78	3,5200	31,2160	2,0204	1,9779	0,1570	13,5867
79	3,3600	31,2864	2,0207	1,9820	0,1433	13,6217
80	3,2000	31,3535	2,0210	1,9860	0,1301	13,6551
81	3,0400	31,4171	2,0213	1,9897	0,1176	13,6867
82	2,8800	31,4773	2,0216	1,9933	0,1057	13,7166
83	2,7200	31,5342	2,0218	1,9966	0,0944	13,7450
84	2,5600	31,5877	2,0221	1,9998	0,0838	13,7715
85	2,4000	31,6380	2,0224	2,0027	0,0737	13,7964
86	2,2400	31,6848	2,0225	2,0055	0,0643	13,8198
87	2,0800	31,7284	2,0227	2,0080	0,0555	13,8414
88	1,9200	31,7688	2,0230	2,0104	0,0473	13,8613
89	1,7600	31,8058	2,0231	2,0126	0,0398	13,8797
90	1,6000	31,8396	2,0233	2,0146	0,0329	13,8965
91	1,4400	31,8701	2,0234	2,0164	0,0267	13,9116
92	1,2800	31,8974	2,0235	2,0180	0,0211	13,9252
93	1,1200	31,9215	2,0236	2,0194	0,0161	13,9371
94	0,9600	31,9423	2,0237	2,0206	0,0119	13,9474
95	0,8000	31,9600	2,0238	2,0217	0,0082	13,9562
96	0,6400	31,9744	2,0239	2,0225	0,0053	13,9633
97	0,4800	31,9856	2,0239	2,0232	0,0030	13,9689
98	0,3200	31,9936	2,0240	2,0236	0,0013	13,9728
99	0,1600	31,9984	2,0240	2,0239	0,0003	13,9752
100	0,0000	32,0000	2,0240	2,0240	0,0000	13,9760