

**С.И. ПЕСТРЕЦОВ  
К.А. АЛТУНИН  
М.В. СОКОЛОВ  
В.Г. ОДНОЛЬКО**

**КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ  
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ  
РЕЗАНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ  
МАШИНОСТРОЕНИЯ**



**Москва, 2012**

УДК 621:004.896  
ББК К5-642-5-05  
К652

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «ТГТУ»  
*В.И. Кочетов*

Главный технолог ОАО «Тамбовгальванотехника им. С.И. Лившица»  
*В.А. Пивоваров*

К652      Концепция создания системы автоматизированного проектирования процессов резания в технологии машиностроения / С.И. Пестрецов, К.А. Алтунин, М.В. Соколов, В.Г. Однолько. – М. : Издательский дом «Спектр», 2012. – 212 с. – 400 экз.  
ISBN 978-5-4442-0012-4.

Проведен обширный комплекс научно-теоретических и концептуальных исследований, в результате которых решена конкретная техническая задача, направленная на изучение процесса резания материалов в технологии машиностроения. Создано программное обеспечение реализующее алгоритм и интерфейсы разработанных блоков САПР для оптимизации процесса резания, баз данных режущих инструментов и обрабатываемых материалов.

Предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием процессов обработки материалов резанием в технологии машиностроения, а, так же аспирантам, магистрантам и студентам старших курсов, специализирующимся в области конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств.

УДК 621:004.896  
ББК К5-642-5-05

ISBN 978-5-4442-0012-4

© С.И. Пестрецов, К.А. Алтунин,  
М.В. Соколов, В.Г. Однолько, 2012

## ВВЕДЕНИЕ

---

В настоящее время сокращение сроков проектирования и подбор оптимальных параметров процесса резания – это важнейшие требования, предъявляемые к разработке технологического процесса. Применение современных САПР позволяет удовлетворить их лишь частично, так как в большинстве случаев технолог самостоятельно применяет решение о выборе тех или иных режимов резания, руководствуясь собственным опытом. Наличие САПР, предлагающей пользователю выбрать из списка возможных параметров процесса резания оптимальные при заданных условиях, позволило бы существенно повысить эффективность технологического процесса.

Такая САПР позволила бы технологу рассмотреть все доступные наборы параметров конкретного процесса резания, смоделировать этот процесс и, исходя из каких-либо конкретных ограничений, обусловленных данным производством, или из целей, которые должны быть достигнуты при осуществлении данного технологического процесса, выбрать его оптимальный в данных условиях вариант.

В данной работе рассматривается концепция создания САПР для оптимизации процесса резания, описаны последовательность работы ее блоков и проведена работа по созданию алгоритмов работы этих блоков.

# 1. ЛИТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНЫЙ ОБЗОР МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ

---

Для постановки задачи исследования необходимо выполнить обзор существующих методов моделирования и оптимизации процессов резания, а также программных продуктов, реализующих данную функцию. Рассмотрим вышеупомянутое поэтапно.

## 1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

### 1.1.1. ОБЪЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Объектами моделирования (ОМ) в машиностроении могут быть:

- технологические системы (ТС) – участки из универсальных станков, автоматические линии, гибкие производственные системы (ГПС);
- технологические процессы (ТП);
- физические процессы (ФП) – процессы, протекающие при резании металлов, при функционировании технологического оборудования в упругой системе станок–приспособление–инструмент–деталь (СПИД) и т.д.

### 1.1.2. ВИДЫ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Математическая модель (ММ) объекта моделирования – это система математических элементов (чисел, переменных, уравнений, неравенств, множеств, матриц, графов и т.д.) и отношений между ними, адекватно отражающая некоторые свойства объекта, его состояние в реальных условиях, созданная для решения той или иной задачи. ММ разрабатываются для описания и исследования ФП, ТП, ТС, проектирования и оптимизации ТП, ТС, организации работы ТС и построения САПР.

Различают аналитическое (решение задач оптимизации процессов в ТС и оптимизация самих ТС) и имитационное моделирование (изучение характеристик процесса, протекающего в ходе эксперимента).

Аналитическое моделирование основано на косвенном описании ОМ (ММ на основе аппарата математического программирования, корреляционного и регрессионного анализа). Как правило, модель состоит из целевой функции (характеристика объекта (системы), которую требуется вычислить или оптимизировать), варьируемых переменных и системы ограничений на переменные.

Имитационное моделирование основано на прямом описании ОМ с законами функционирования каждого элемента объекта и связей между ними. Пересчет системного времени в модели осуществляется двумя способами: шаг по времени выбирается с некоторым постоянным интервалом или от события к событию, при этом считается, что в промежутках времени между событиями в модели изменений не происходит.

Виды ММ могут делиться по различным признакам классификации (табл. 1.1).

### 1.1. Классификация математических моделей

Признаки классификации	Виды математических моделей	Назначение
1. Принадлежность к иерархическому уровню	Модели микроуровня	Отражают физические процессы, протекающие, например, при резании металлов, описывают процессы на уровне перехода (прохода)
	Модели макроуровня	Описывают технологические процессы
	Модели метауровня	Описывают технологические системы (участки, цехи, предприятие в целом)
2. Характер отображаемых свойств объекта	Структурные	Предназначены для отображения структурных свойств объектов (в САПР ТП для представления структуры технологического процесса, расцеховки изделий (используются структурно-логические модели)
	Функциональные	Предназначены для отображения информационных, физических, временных процессов, протекающих в работающем оборудовании, в ходе выполнения технологических процессов и т.д.

Признаки классификации	Виды математических моделей	Назначение
3. Способ представления свойств объекта	Аналитические	Представляют собой явные математические выражения выходных параметров как функций от параметров входных и внутренних (выражения для сил резания)
	Алгоритмические	Выражают связи между выходными параметрами и параметрами входными и внутренними в виде алгоритма
	Имитационные	Отражают развитие процесса (поведение исследуемого объекта) во времени при задании внешних воздействий на процесс (объект)
4. Способ получения модели	Теоретические	Создаются в результате исследования объектов (процессов) на теоретическом уровне (выражения для сил резания, полученные на основе обобщения физических законов)
	Эмпирические	Создаются в результате проведения экспериментов (изучения внешних проявлений свойств объекта с помощью измерения его параметров на входе и выходе) и обработки их результатов методами математической статистики

Признаки классификации	Виды математических моделей	Назначение
5. Особенности поведения объекта	Детерминированные	Описывают поведение объекта с позиций полной определенности в настоящем и будущем (формулы физических законов, технологические процессы обработки деталей и т.д.)
	Вероятностные	Учитывают влияние случайных факторов на поведение объекта, т.е. оценивают его будущее с позиций вероятности тех или иных событий (описание точности размеров в партии деталей с учетом явления рассеяния и т.д.)

### 1.1.3. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К МАТЕМАТИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ

К математическим моделям предъявляются следующие основные требования:

- универсальности (характеризует полноту отражения в ней свойств реального объекта и возможность использования модели для анализа большего числа технологических процессов и их элементов);
- точности (оценивается степень совпадения значений выходных параметров реального объекта и значений тех же параметров, рассчитанных с помощью модели);
- адекватности (способность модели отражать заданные свойства объекта с погрешностью, не выше заданной);
- экономичности (характеризуется затратами вычислительных ресурсов на ее реализацию);
- вычислимости (возможность ручного или с помощью ЭВМ исследования качественных и количественных закономерностей функционирования объекта (системы));

- модульности (соответствие конструкций модели структурным составляющим объекта (системы));
- алгоритмируемости (возможность разработки соответствующего алгоритма и программы, реализующей математическую модель на ЭВМ);
- наглядности (удобное визуальное восприятие модели).

Требования к точности, экономичности и степени универсальности математических моделей противоречивы. Поэтому необходимо иметь удачное компромиссное решение.

## 1.2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИЛОВЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТОЧЕНИИ МАТЕРИАЛОВ

### 1.2.1. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТОЧЕНИЯ

Рассмотрим процесс несвободного резания, при котором снятие припуска осуществляется радиусной и прямолинейной частями главной режущей кромки. Сечение остаточного выступа (неровности) на обработанной поверхности оформляется радиусными боковыми сторонами (рис. 1.1, *a*). Данный случай имеет место при соблюдении следующих соотношений:  $t \geq r(1 - \cos \varphi)$ ,  $s \leq 2r \sin \varphi$  [1].

На переднюю поверхность инструмента действуют сила трения  $F_{\text{п}}$  и нормальная сила  $N$ . Эти силы определяют силу стружкообразования  $R$  (рис. 1.2). Силы  $R_z$  и  $R_y$  являются соответственно горизонтальной (тангенциальной) и вертикальной (радиальной) составляющими силы  $R$ . Так как сила сдвига  $R_c$  является проекцией равнодействующей силы  $R$  на условную плоскость сдвига  $AB$ , то угол между силами  $R_z$  и  $R_c$  равен углу наклона условной плоскости сдвига  $\beta_1$ .

На заднюю поверхность инструмента действуют сила трения  $F_1$  и нормальная сила  $N_1$  (рис. 1.3).

При резании материалов средней пластичности на средних скоростях резания образуются стружки скалывания, при резании мягких пластичных материалов или тех же, но на больших скоростях резания образуются сливные стружки. Процесс образования стружек скалывания происходит в описанной ниже последовательности (рис. 1.4) [2].

Под действием силы  $P$  резец внедряется в обрабатываемый материал и производит его смятие. По мере перемещения резца длина площадки смятия  $l_{\text{см}}$  увеличивается и на элемент будущей стружки, действует возрастающая сила. Увеличение этой силы идет до тех пор, пока не произойдет скалывание элемента по плоскости 1–1 под углом  $\beta_1$ . Эта плоскость называется плоскостью скалывания, а угол – углом скалывания.



Со стороны резца на элемент стружки действует сила смятия  $P_{\text{см}}$ :

$$P_{\text{см}} = \sigma_{\text{см}} f_{\text{см}} = \sigma_{\text{см}} l_{\text{см}} b, \quad (1.1)$$

где  $\sigma_{\text{см}}$  – предел прочности обрабатываемого материала на смятие;  $b$  – ширина среза;  $l_{\text{см}}$  – длина площадки смятия.

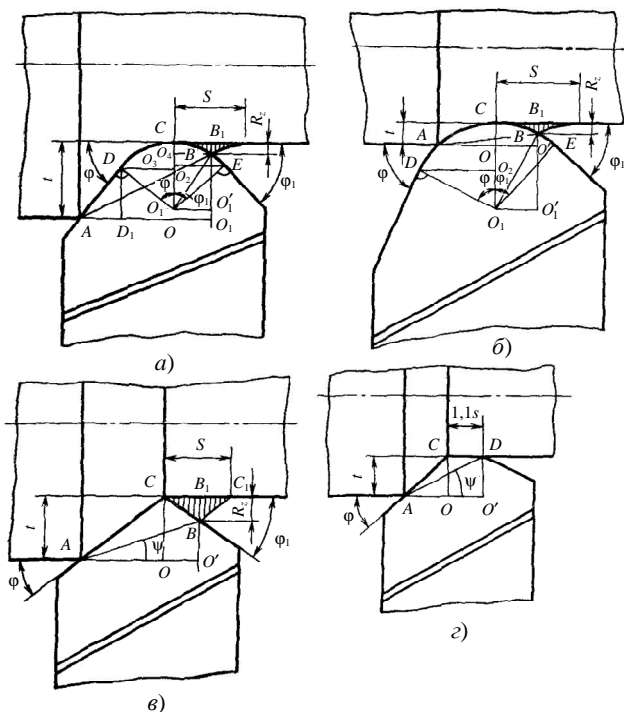
Элемент удерживается силой  $P_{\text{ск}}$ :

$$P_{\text{ск}} = \tau_{\text{ск}} f_{\text{ск}} = \tau_{\text{ск}} l_{\text{ск}} b, \quad l_{\text{ск}} = \frac{a}{\sin \beta_1}, \quad (1.2)$$

где  $\tau_{\text{ск}}$  – предел прочности обрабатываемого материала на сдвиг (скальвание).

Для скальвания элемента необходимо, чтобы

$$P'_{\text{см}} = P_{\text{см}} \cos(\beta_1 - \gamma) \geq P_{\text{ск}}. \quad (1.3)$$



**Рис. 1.1. Расчетная схема процесса резания:**

*a* – снятие припуска радиусной и прямолинейной частями главной режущей кромки; *б* – снятие припуска радиусной частью главной режущей кромки; *в* – работа проходным резцом; *з* – работа проходным резцом с режущей кромкой, параллельной оси детали (резцы Колесова для работы с большими подачами)

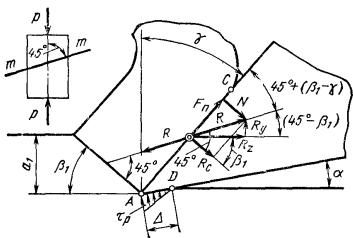


Рис. 1.2. Схема действия сил на передней поверхности инструмента

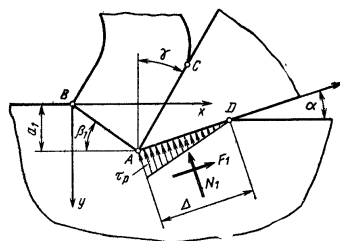


Рис. 1.3. Схема действия сил на задней поверхности инструмента

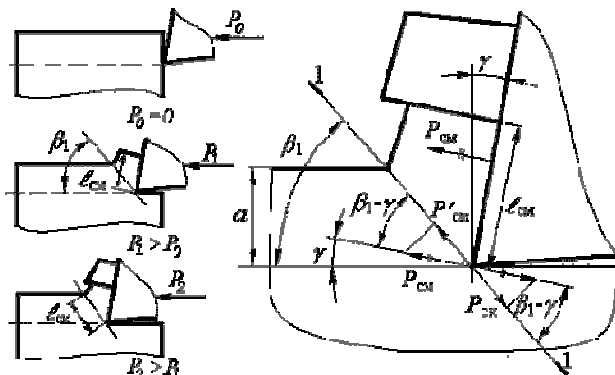


Рис. 1.4. Схема образования стружек скалывания

Периодический характер образования стружки вызывает колебания силы резания, что делает процесс резания динамически неустойчивым.

В сливных стружках деформация смятия происходит одновременно со сдвигом элементов. Как только произойдет его сдвиг, на плоскости сдвига металл упрочнится и прекратит свое движение по плоскости скалывания. При остановке он снова сминается движущимся инструментом, площадка смятия у основания элемента увеличивается, сила  $P_{см}$  становится больше  $P_{ск}$  и элемент вновь сдвигается. При образовании сливных стружек процесс формирования их продолжается в течение всего времени движения по передней поверхности режущего инструмента.

При резании хрупких металлов образуются стружки надлома. Резец, внедряясь в металл, не сдвигает его, а сжимает и вырывает сжатый надломленный элемент. Разрушение идет по поверхности, произвольно охватывающей напряженную зону, поэтому обработанная поверхность получается неровной.

Теплота  $Q$  (ккал/мин) в процессе резания образуется в результате [3]:

- внутреннего трения между частицами обрабатываемого металла в процессе деформации  $Q_{\text{деф}}$ ;
- внешнего трения стружки о переднюю поверхность резца  $Q_{\text{п.тр}}$ ;
- внешнего трения поверхности резания и обработанной поверхности о задние поверхности резца  $Q_{\text{з.тр}}$ ;
- отрыва стружки, диспергирования  $Q_{\text{дисп}}$  (образования новых поверхностей)

$$Q = Q_{\text{деф}} + Q_{\text{п.тр}} + Q_{\text{з.тр}} + Q_{\text{дисп}} = \alpha_0 \frac{P_z v}{427}, \quad (1.4)$$

где  $P_z v$  – работа резания, кгс·м/мин;  $E = 427$  кгс·м/ккал – механический эквивалент теплоты;  $\alpha_0$  – коэффициент, учитывающий переход работы резания в потенциальную энергию искаженной кристаллической решетки, указанные потери, незначительные по величине и в обычных расчетах этой потерей пренебрегают).

В процессе образования сливной стружки теплота концентрируется в трех основных зонах (рис. 1.5): в зоне сдвига элементов стружки  $AM$ , где происходит пластическая деформация; на площади контакта стружки по передней поверхности инструмента  $AO$ ; на площади контакта задней грани инструмента с обрабатываемой деталью.

Наиболее высокая температура (температура резания) наблюдается в стружке в зоне контакта ее с передней поверхностью инструмента, так как наибольшее количество теплоты, образующейся вследствие деформации (на поверхности  $AM$ ), остается в стружке и частично поглощается обрабатываемой деталью. Теплота трения стружки (на поверхности  $AO$ ) остается в основном в стружке и частично (3...5%) направляется в инструмент. Теплота трения по задним граням инструмента (поверхность  $AP$ ) направляется в деталь и резец. При обработке металлов с низкой теплопроводностью, например жаропрочных и титановых сплавов, в резец отводится до 20...40% всей теплоты.

Потери теплоты от конвекции и радиации в процессе резания ничтожно малы; невелико количество теплоты, уходящей в деталь, так как стружка быстро формируется в зоне резания и быстро проходит зону контакта с резцом. Однако теплота, поглощаемая изделием из жаропрочных сталей и сплавов, резко возрастает и при малых скоростях может достигать 35...45% всей теплоты резания.

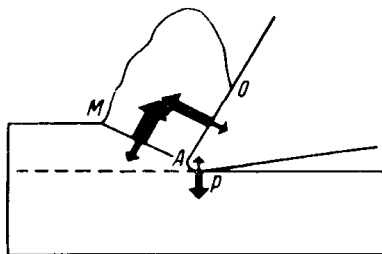


Рис. 1.5. Зоны концентрации теплоты в системе резец–стружка

Средняя температура стружки, когда последняя покидает зону деформации, °С:

$$\theta_{\text{деф.сп}} = \frac{\alpha_0 p \left[ (1 - \beta_0) - (\sin \gamma + \mu_0 \cos \gamma) \frac{1}{\xi} \right]}{E c_p \rho_{\text{стр}}}, \quad (1.5)$$

где  $p = \frac{P_z}{ba}$  – удельная сила резания, кгс/мм<sup>2</sup>;  $\alpha_0$  – коэффициент, учитывающий потерю теплоты на скрытую энергию деформации (принимается  $\alpha_0 = 0,95$ );  $\beta_0$  – коэффициент, учитывающий переход части тепла в изделие (по Вейнеру:  $\beta_0 = 0,1$  при  $v = 100$  м/мин,  $\beta_0 = 0,05$  при  $v = 300$  м/мин);  $\mu_0$  – коэффициент трения стружки;  $\xi$  – коэффициент усадки стружки;  $c$  – теплоемкость нагретой стружки в ккал/кгс·град;  $\rho_{\text{стр}}$  – плотность стружки, кгс/мм<sup>3</sup>;  $b$  – ширина среза, мм;  $a$  – толщина среза, мм;  $E$  – модуль упругости материала стружки, кгс/мм<sup>2</sup>.

Покидая зону деформации, нагретая до температуры  $\theta_{\text{деф.сп}}$  стружка трется по передней поверхности резца со скоростью  $\frac{v}{\xi}$  на площади контакта шириной  $b$  и длиной  $l$ . Теплота работы силы трения по передней грани в единицу времени  $Q_{\text{тр.п}} = \frac{F_n v}{E \xi}$ .

Температура на передней поверхности резца, полученная в результате трения стружки:

$$\theta_{\text{тр.п}} = \frac{F_n \sqrt{v \frac{1}{\xi} \pi}}{2Eb \sqrt{\lambda_p c_p \rho_p} l}, \quad (1.6)$$

где  $F_n$  – площадь передней поверхности резца;  $\lambda_p$  – коэффициент теплопроводности резца;  $c_p$  – теплоемкость резца;  $\rho_p$  – плотность материала резца.

Суммируя температуры деформации стружки и трения ее по передней поверхности инструмента, получим температуру резания (среднюю температуру на площади контакта стружки и инструмента):

$$\theta_{\text{рез}} = \theta_{\text{деф.сп}} + \theta_{\text{тр.п}} = \frac{\alpha_0 p \left[ (1 - \beta_0) - (\sin \gamma + \mu_0 \cos \gamma) \frac{1}{\xi} \right]}{E c_p \rho_p} + \frac{F_n \sqrt{v \frac{\sqrt{\pi}}{\xi} \frac{\sqrt{\pi}}{2}}}{Eb \sqrt{\lambda_p c_p \rho_p} l}. \quad (1.7)$$

Температура резания в действительности должна быть более высокой, чем получается расчетом по этой формуле, так как в ней не учтена теплота трения по задней поверхности резца. Последняя будет проявляться с увеличением скорости резания по мере затупления резца; при этом особенно заметно будет повышаться температура обрабатываемой детали.

Обрабатываемая деталь нагревается в основном теплотой деформации. Температура детали уменьшается с увеличением скорости резания, поскольку при этом уменьшается  $\theta_{\text{деф.ср}}$ . Подобный вывод подтверждается на практике при работе острым резцом в нормальных условиях. По мере затупления резца и значительного уменьшения заднего угла  $\alpha$  и угла в плане  $\varphi$  положение меняется. С увеличением силы трения растут работа и теплота трения по задней поверхности резца, и поэтому температура детали повышается с увеличением скорости резания  $v$ .

Рассмотрим температурное поле резца (рис. 1.6) [3]. Линии постоянных температур  $t \dots t$  (изотермы) в стружке ориентировочно расположены параллельно поверхности сдвига, а у резца почти концентрично вокруг режущей кромки. В этом случае согласно теории теплопроводности тепловые потоки должны быть направлены нормально изотермам; в схеме они показаны соответствующими кривыми со стрелками:  $n$  – в деталь;  $n'$  – в стружку;  $k$  – в резец. Наиболее высокие температуры наблюдаются вблизи режущей кромки и в зоне нароста.

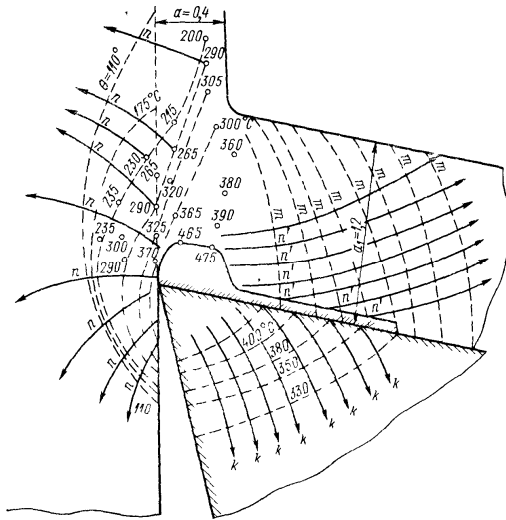


Рис. 1.6. Температурное поле в зоне резания и резца

В действительности температура резания зависит и от длины контакта поверхности резания и стружки по задней и передней поверхностям инструмента. Чем меньше длина контакта на задней поверхности, тем ниже среднее значение температуры резания и тем ближе к режущей кромке располагается ее максимум. С уменьшением длины контакта стружки с передней поверхностью средняя температура также снижается, но максимум температуры удаляется от режущей кромки. При скоростной обработке температура в зоне резания доходит до 800 °С, а на поверхности трения по передней грани достигает более 1200 °С [3]. Низкая теплопроводность твердых сплавов и особенно минералокерамики является причиной того, что теплота резания сосредоточивается в передней части резца, прилегающей к его вершине, что способствует ее пластической деформации. При этом режущие способности инструмента сохраняются ввиду его значительной красностойкости. Однако очень высокий температурный градиент, свойственный минералокерамическому резцу, способствует тепловому удару, разрушающему режущую кромку инструмента.

При весьма низкой температуре всего изделия и больших скоростях резания тонкий слой его обработанной поверхности может иметь достаточно высокую температуру, способную изменить структуру этого слоя. Поэтому, назначая режим резания, необходимо учитывать последующую чистовую обработку, при которой будет удален поврежденный слой детали.

Теоретический расчет температуры резания встречает значительные трудности, так как в расчетных формулах переменные являются взаимозависимыми параметрами. Так, теплоемкость  $c$  увеличивается, а теплопроводность  $\lambda$  уменьшается с возрастанием температуры. Длина контакта стружки и резца уменьшается с увеличением скорости резания, но заметно растет по мере износа резца и образования лунки на передней поверхности резца.

Значения постоянных коэффициентов ( $\alpha_0$ ,  $\beta_0$ ,  $\mu_0$ ) также изменяются в зависимости от различных факторов.

Температура резания зависит и от вида процесса резания: при несвободном резании резец нагревается больше, чем при свободном резании. Поэтому для расчета температуры резания чаще пользуются эмпирическими формулами, показывающими закономерности изменения температуры резания в зависимости от различных факторов и справедливыми в определенных границах и условиях.

Температура резания повышается с увеличением подачи  $s$ , но в меньшей степени, чем при повышении скорости  $v$ .

Еще меньше влияет на температуру резания глубина резания  $t$ , так как нагрузка на единицу длины режущей кромки не изменяется.

По мере нагрева резца разность температур стружки и резца падает, а поэтому интенсивность передачи теплоты от стружки резцу уменьша-

ется. Следовательно, с увеличением скорости резания  $v$  температура реза значительно поднимается, но в меньшей степени, чем скорость.

При резании хрупких металлов, например чугуна, когда работа пластической деформации весьма мала и удельные силы резания незначительны, температура резания заметно ниже, чем при обработке стали. Давление чугунной стружки сосредотачивается непосредственно на режущей кромке или вблизи нее, но это неблагоприятное обстоятельство влияет больше на абразивно-механический износ режущей кромки, чем на температуру резания.

При обработке цветных металлов температура резания сравнительно низкая из-за малой нагрузки и вследствие их большой теплопроводности. При резании жаропрочных сталей и сплавов, обладающих низкой теплопроводностью, температура резания значительно повышается (в 2–3 раза) по сравнению с конструкционными сталями.

С увеличением площади поперечного сечения реза температура резания уменьшается.

С увеличением угла резания  $\delta$  увеличивается сила резания и повышаются количество образующейся теплоты и температура резания.

С уменьшением угла в плане  $\phi$  несколько увеличивается нагрузка на рецз, удлиняется режущая кромка, увеличивается угол при вершине  $\epsilon$  и как следствие значительно улучшается теплоотвод, снижающий температуру резания.

Применение смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) снижает температуру резания, что вызвано как охлаждающим эффектом, так и уменьшением трения в процессе резания.

### 1.2.2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТОЧЕНИЯ

Силы резания определяются по формулам [1]:

$$R_z = \tau_p a_1 b_1 \left( 1 + \frac{1}{B} \right); \quad (1.8)$$

$$R_y = \tau_p a_1 b_1 \left( \frac{1}{B} - 1 \right); \quad (1.9)$$

$$F_n = \tau_p a_1 b_1 \left( \frac{\cos \gamma + \sin \gamma}{B} - \cos \gamma + \sin \gamma \right); \quad (1.10)$$

$$N = \tau_p a_1 b_1 \left( \frac{\cos \gamma - \sin \gamma}{B} + \cos \gamma + \sin \gamma \right); \quad (1.11)$$

$$F_1 = 0,625 \tau_p \rho_1 b \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}}; \quad (1.12)$$

$$N_1 = 0,625 \frac{\tau_p \rho_1 b}{\mu_1} \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}}, \quad (1.13)$$

где  $\tau_p$  – сопротивление обрабатываемого материала пластическому

сдвигу, Н/м<sup>2</sup>;  $a_1 = \frac{s}{c'} \sin \arctg \frac{c'}{[1 - a'(1 - \cos \varphi)] \operatorname{ctg} \varphi + a'(\sin \varphi + b')}$  – тол-

щина, среза, м;  $b_1 = \frac{c't}{\sin \arctg \frac{c'}{[1 - a'(1 - \cos \varphi)] \operatorname{ctg} \varphi + a'(\sin \varphi + b')}} -$

ширина среза, м;  $b = \frac{t}{\sin \varphi} \left[ 1 - a' \left( 1 - \cos \varphi - \frac{\varphi}{\sin \varphi} - \frac{ar \cos \sqrt{1 - b'^2}}{\sin \varphi} \right) \right];$

$$a' = r/t; \quad c' = 1 - a'(1 - \sqrt{1 - b'^2});$$

$$B = \frac{(\operatorname{Pe} B - 2) \operatorname{erf}(0,5\sqrt{\operatorname{Pe} B}) + 1,125\sqrt{\operatorname{Pe} B} \exp(-0,25 \operatorname{Pe} B)}{\sqrt{\operatorname{Pe} B} [\sqrt{\operatorname{Pe} + 0,325 F D^{0,3}} (1 - \sin \gamma)^{0,25}]} +$$

$$+ \frac{0,665 \operatorname{erf}(0,5\sqrt{\operatorname{Pe} B})}{\sqrt{\operatorname{Pe} B}} + \frac{0,145 F^{0,8} D^{0,25} \operatorname{erf}^{0,25}(0,5\sqrt{\operatorname{Pe} B})}{\operatorname{Pe}^{0,5} B^{0,2} (1 - \sin \gamma)^{0,95}} +$$

$$+ \frac{\operatorname{Pe} B (1 - \sin \gamma)^{0,4} [\cos \gamma + \sin \gamma - B(\cos \gamma - \sin \gamma)]}{(\cos \gamma + B \sin \gamma) [\operatorname{Pe} (1 - \sin \gamma)^{0,4} + 0,225 F D^{0,3}]} - 1;$$

$\operatorname{Pe} = \frac{\nu a_1}{a}$  – критерий Пекле, характеризующий степень влияния ре-

жимных условий процесса  $\nu a_1$  по сравнению с влиянием теплофизиче-

ских свойств обрабатываемого материала  $a$ ;  $F = \frac{\lambda_p}{\lambda} \beta \varepsilon$  – критерий,

отражающий влияние геометрии инструмента и отношения теплопро-

водностей инструментального и обрабатываемого материалов;

$D = a_1/b_1$  – критерий, характеризующий геометрию сечения среза;

$\operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx$  – интеграл вероятности;  $\mu_1$  – коэффициент трения

на задней контактной площадке.

Величина  $B$  и механические характеристики сталей и сплавов

приведены в [1].

Для случаев (рис. 1.1, б – з):

– рис. 1.1, б:  $t < r(1 - \cos \varphi)$ ;  $s \leq 2r \sin \varphi_1$ ;



$$a_1 = \frac{s}{c'} \sin \operatorname{arctg} \frac{c'}{\sqrt{2a'-1+a'b'}}; \quad b_1 = \frac{c't}{\sin \operatorname{arctg} \frac{c'}{\sqrt{2a'-1+a'b'}}}; \quad (1.14)$$

$$b = r \left[ \arccos \left( 1 - \frac{1}{a'} \right) + \arccos \sqrt{1-b'^2} \right];$$

– рис. 1.1,  $\epsilon$ :

$$a_1 = \frac{s}{d'} \sin \operatorname{arctg} \frac{d'}{1 + \operatorname{ctg} \varphi - d'}; \quad b_1 = \frac{d't}{\sin \operatorname{arctg} \frac{d'}{1 + \operatorname{ctg} \varphi - d'}}; \quad (1.15)$$

$$b = \frac{t}{\sin \varphi} \left[ 1 + \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_1} (1 - d') \right],$$

где  $d' = 1 - \frac{s}{t} \frac{1}{\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{ctg} \varphi_1}$ ;

– рис. 1.1,  $\zeta$ :

$$a_1 = s \sin \operatorname{arctg} \frac{1}{\operatorname{ctg} \varphi + 2,2a'b'}; \quad b_1 = \frac{t}{\sin \operatorname{arctg} \frac{1}{\operatorname{ctg} \varphi + 2,2a'b'}}; \quad (1.16)$$

$$b = t \left[ \frac{1}{\sin \varphi} + 2,2a'b' \right].$$

При приближенных расчетах средний коэффициент трения можно приравнять к  $\mu_1$ . Тогда

$$\mu = \mu_1 = \frac{\cos \gamma + \sin \gamma - B \cos(\cos \gamma - \sin \gamma)}{\cos \gamma - \sin \gamma + B \cos(\cos \gamma + \sin \gamma)}. \quad (1.17)$$

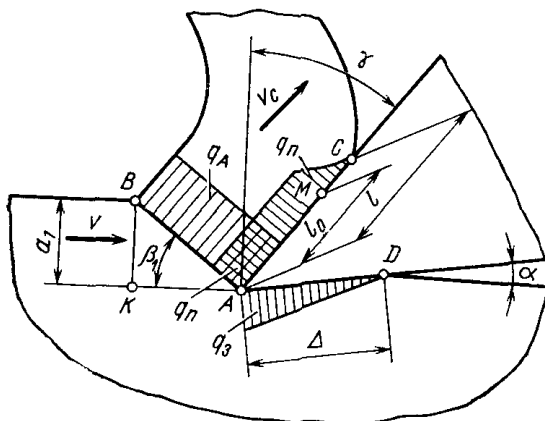
Процессы резания характеризуются наличием трех основных быстродвижущихся по отношению к стружке и детали плоских источников тепла шириной  $b_1$  и длиной  $AB = \frac{a_1}{\sin \beta_1}$  м,  $AC = l$  и  $AD = \Delta$  (рис. 1.7).

Источники  $AC$  и  $AD$  по отношению к резу являются неподвижными.

Величину участка  $AD = \Delta$  определим по формуле

$$\Delta = 1,25 \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}} \rho_1, \quad (1.18)$$

где  $\rho_1$  – радиус скругления режущей кромки реза.



**Рис. 1.7. Схема распределения суммарных интенсивностей тепловыделения в плоскости сдвига и на контактных поверхностях инструмента**

Длину контакта стружки с инструментом  $AC = l$  вычислим по формуле

$$l = 1,45 \left( \frac{\cos \gamma + \sin \gamma}{B} - \cos \gamma + \sin \gamma \right) a_1. \quad (1.19)$$

Величины подминаемого слоя металла  $h$  и  $h_y$  определяются следующим образом (рис. 1.8):

$$h = \rho_1 \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1+B^2}} \right); \quad (1.20)$$

$$h_y = \frac{hB}{\cos \gamma + B \sin \gamma}. \quad (1.21)$$

Максимальную температуру трения на передней поверхности (в точке  $M$ ) найдем как

$$\theta'_M = 0,9675 \frac{n \tau_p \sqrt{Pe}}{c \rho} \sqrt{\frac{\cos \gamma + \sin \gamma - B(\cos \gamma - \sin \gamma)}{\cos \gamma + B \sin \gamma}}, \quad (1.22)$$

где  $n = \frac{1}{1+b_0}$ ,  $b_0 = \frac{0,25 F D^{0,3} \sqrt{\cos \gamma + B \sin \gamma}}{\sqrt{Pe} B^{0,3} [\cos \gamma + \sin \gamma - B(\cos \gamma - \sin \gamma)^{0,2}]}$ ;  $c$  – тепло-

емкость материала заготовки;  $\rho$  – плотность материала заготовки.

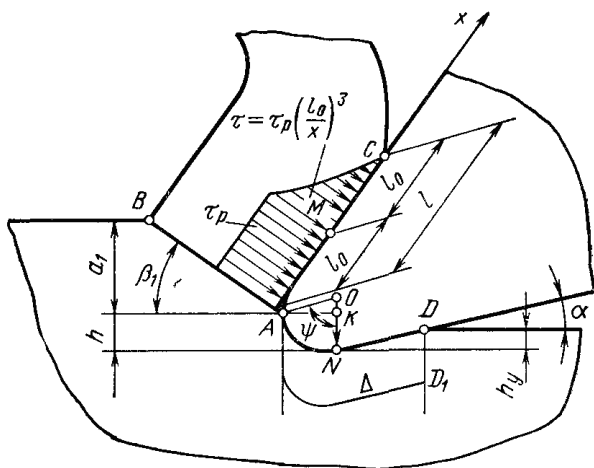


Рис. 1.8. Схема к расчету контактных площадок на передней и задней поверхностях инструмента

Максимальная контактная температура на передней поверхности имеет место в точке  $M$  ( $x = l_0$ ), т.е. в конце зоны пластического контакта, и выражается уравнением

$$\theta_M = \theta_A(1 + \psi_M), \quad (1.23)$$

где  $\theta_A = \frac{\tau_p}{c\rho B} \operatorname{erf} \sqrt{\frac{\operatorname{Pe} B}{4}}$  – максимальная температура пластических деформаций в условной плоскости сдвига (в точке  $A$ , на режущей кромке);  $\psi_M = \frac{0,9675nB\sqrt{\operatorname{Pe}}}{\operatorname{erf} \sqrt{\frac{\operatorname{Pe} B}{4}}} \sqrt{\frac{\cos \gamma + \sin \gamma - B(\cos \gamma - \sin \gamma)}{\cos \gamma + B \sin \gamma}}$  – отношение температур  $\theta'_M / \theta_A$ .

Температура в точке  $C$  – месте отрыва стружки от передней поверхности инструмента (при  $x = 2l_0$ ) – определяется по формуле

$$\theta_C = \theta_A(1 + 0,66\psi_M). \quad (1.24)$$

Суммарная контактная температура на передней поверхности равна

$$\theta_n = \theta_A \left( 1 + \psi_M \sqrt{\frac{x}{l_0}} \right), \quad 0 \leq x \leq l_0; \quad (1.25)$$

$$\theta_{\pi} = \theta_A \left[ 1 + \Psi_M \left( \frac{l_0}{x} \right)^{0,6} \right], \quad x > l_0. \quad (1.26)$$

Максимальная температура трения на задней поверхности инструмента (в точке  $N$ ) (рис. 1.9)

$$\theta'_{N} = 0,6 n_1 \sqrt{\text{Pe} E} \frac{\tau_p B^{0,25} \cos \alpha}{c \rho \sin^{0,25} \alpha}, \quad (1.27)$$

где  $n_1 = \frac{1}{1+b_1}$ ;  $b_1 = \frac{0,25 F D^{0,3} \sin^{0,1} \alpha}{\sqrt{\text{Pe} E}^{0,2} B^{0,1}}$ ;  $E = \rho_1 / a_1$ .

Координата, которой соответствует максимум суммарной контактной температуры на задней поверхности инструмента:

$$\left( \frac{x}{\Delta} \right)_m = 0,25 + \sqrt{0,0625 - \frac{0,1 \sin^{0,5} \text{erf} \sqrt{\frac{\text{Pe} B}{4}}}{n_1 \text{Pe} E B^{2,5} \cos \alpha}}. \quad (1.28)$$

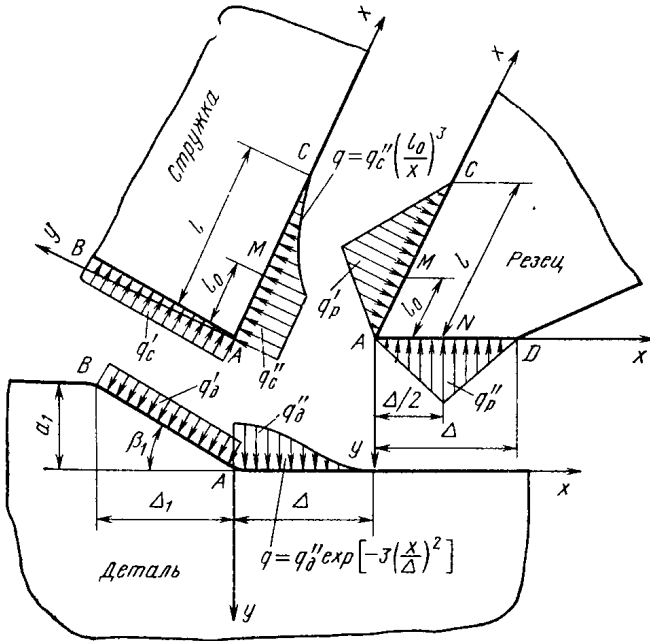


Рис. 1.9. Общая схема для расчета тепловых явлений при резании

Суммарные контактные температуры в точках  $N$  ( $x = 0,499\Delta$ ) и  $D$  ( $x = \Delta$ ):

$$\theta_N = \theta_A \left( 0,5 + \frac{0,36 \sin^{0,25} \alpha}{B^{1,25} \sqrt{\text{Pe} E}} + \psi_N \right); \quad (1.29)$$

$$\theta_D = \theta_A \left( 0,5 + \frac{0,25 \sin^{0,25} \alpha}{B^{1,25} \sqrt{\text{Pe} E}} + 0,71 \psi_N \right), \quad (1.30)$$

где  $\psi_N = \frac{0,6 n_1 B^{1,25} \sqrt{\text{Pe} E} \cos \alpha}{\sin^{0,25} \alpha \operatorname{erf} \sqrt{\frac{\text{Pe} B}{4}}}$ .

Средняя контактная температура на участке  $AD$

$$\bar{\theta}_3 = 0,5 \theta_A \left( 1 + \frac{1}{u} + mu \right) \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.31)$$

где  $u = \frac{\sqrt{\text{Pe} E} B^{1,25}}{\sin^{0,25} \alpha}$ ;  $m = \frac{1,035 n_1 \cos \alpha}{\operatorname{erf} \sqrt{\frac{\text{Pe} B}{4}}}$ .

Для определения тепловых потоков в заготовке воспользуемся схемой, изображенной на рис. 1.9.

Теплота  $Q_3$  распределяется между стружкой и резцом:

$$Q_3 = Q_{д,3} + Q_{р,3}, \quad (1.32)$$

где  $Q_{д,3}$  и  $Q_{р,3}$  – доли теплоты трения, уходящей соответственно с контактной площадки задней поверхности в деталь и резец, Дж/с.

$$Q_{д,3} = 0,625 n_1 \tau_p b \rho_1 v \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}} \cos \alpha; \quad (1.33)$$

$$Q_{р,3} = 0,625 (1 - n_1) \tau_p b \rho_1 v \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}} \cos \alpha, \quad (1.34)$$

где  $n_1 = \frac{1}{1 + b_1}$ ;  $b_1 = \frac{0,25 F D^{0,3} \sin^{0,1} \alpha}{\sqrt{\text{Pe} E^{0,2} B^{0,1}}}$ ;  $E = \rho_1 / a_1$ .

Средние удельные тепловые потоки:

$$\bar{q}_{д,3} = 0,5 n_1 \tau_p v \cos \alpha; \quad (1.35)$$

$$\bar{q}_{p,3} = 0,5(1 - n_1) \tau_p v \cos \alpha. \quad (1.36)$$

Теплота детали определяется как:

$$Q_d = \tau_p a_1 b_1 v M \left[ \frac{0,665 n_2 \operatorname{erf} \sqrt{\frac{Pe B}{4}}}{\sqrt{Pe B}} + \frac{0,625 E n_3 B^{1,5}}{\sin^{0,55} \alpha} \right], \quad (1.37)$$

$$\text{где } n_2 = \frac{1}{1 + \frac{0,27 F D^{0,3} E^{0,3}}{\sqrt{Pe} \sin^{0,15} \alpha}}, \quad n_3 = \frac{1}{1 + \frac{0,35 F D^{0,3} \sin^{0,1} \alpha}{\sqrt{Pe} E^{0,2}}}.$$

Теплота стружки определяется как

$$Q_c = \frac{\tau_p a_1 b_1 v}{B} \left[ \psi_c n_1 \operatorname{erf} \sqrt{\frac{Pe B}{4}} + B n \frac{\cos \gamma + \sin \gamma - B (\cos \gamma - \sin \gamma)}{\cos \gamma + \sin \gamma} \right], \quad (1.38)$$

$$\text{где } \psi_c = 1 - \frac{2}{Pe B} + \frac{1,125}{\sqrt{Pe B}} \frac{\exp\left(-\frac{Pe B}{4}\right)}{\operatorname{erf} \sqrt{\frac{Pe B}{4}}}, \quad n = \frac{1}{1 + \frac{0,325 F D^{0,3} (1 - \sin \gamma)^{0,25}}{\sqrt{Pe}}}$$

$$n_1 = \frac{1}{1 + \frac{0,225 F D^{0,3}}{Pe (1 - \sin \gamma)^{0,4}}}.$$

Данная математическая модель отличается от других тем, что все переменные или коэффициенты модели можно определить либо расчетным путем, либо из литературных данных или справочникам, что позволяет использовать ее для моделирования процесса резания практически для любого материала.

ММ процесса резания могут описывать силовые и тепловые процессы при обработке материала. В качестве составного компонента таких моделей может быть математическое описание геометрии и параметров стойкости режущего инструмента.

Так, в работе [4] приведена модель, которая позволяет прогнозировать производительность режущего инструмента на основании толщины покрытия, а также результатов испытания методом царапания и результатов испытания на трение и окисление. Подобные исходные параметры являются достаточно информативными для многих случаев прогнозирования стойкости режущего инструмента, так как они отвечают традиционным требованиям, предъявляемым к режущим инструментам.

Простейшим примером оценки стойкости инструмента является уравнение Тейлора  $T = cTv_k$ , с помощью которого в двойной логарифмической системе координат зависимость между скоростью резания  $v$  и стойкостью  $T$  выражается прямой линией. В этом случае для определения необходимых постоянных приведенного выше уравнения требуются затратные экспериментальные исследования процесса резания. Кроме того, выявлено, что применение подобных простых уравнений для инструментов с износостойким покрытием часто не позволяет получать достоверные результаты. Причина этого заключается в том, что при работе инструментов с покрытием при идентичном химическом составе покрытия и базового режущего материала и аналогичных условиях резания разброс значений стойкости инструмента достигает 240%.

Существует также необходимость увязать свойства режущих инструментов с номинальными значениями твердости, коэффициента трения и температуры окисления и учитывать эти зависимости при прогнозировании. Покрытие инструмента может быть учтено через коэффициент покрытия, который опять же необходимо определять в процессе экспериментального исследования процесса резания. Одной из первых достоверных математических моделей, основанной преимущественно на номинальных параметрах материала, является математическая модель Дерра. В этом случае для прогнозирования стойкости инструмента при точении используются возведенные в определенную степень отношения толщины и твердости слоя покрытия, а также коэффициента трения, температуры окисления и значения теплопроводности рассматриваемого и эталонного инструментов, причем в качестве показателей степени используются постоянные уравнения. Конечно, определение теплопроводности не относится к обычным процедурам, и подобная ММ не позволяет прогнозировать стойкость инструмента при изменении материала обрабатываемой детали или при изменении параметров процесса обработки.

Поэтому в работе [4] предлагается ММ, которая позволяет прогнозировать производительность режущего инструмента на основании толщины покрытия, а также результатов испытания методом царапания и результатов испытания на трение и окисление. Подобные исходные параметры являются достаточно информативными для многих случаев прогнозирования стойкости режущего инструмента, так как они отвечают традиционным требованиям, предъявляемым к режущим инструментам.

Эти требования обусловлены, в первую очередь, механическими и тепловыми нагрузками, а также трением и химическими процессами при резании, поэтому механизм износа режущего инструмента обусловлен абразивным истиранием, адгезией, окислением и нарушением целостности поверхностного слоя. Стойкость покрытия в отношении абразивного износа зависит от толщины покрытия  $h_s$  и одновременно

оказывает влияние на величину критической нагрузки  $L_c$  при испытании методом царапания, так как в процессе подобного испытания твердый алмазный наконечник проникает в слой покрытия. Склонность покрытия к адгезии очень хорошо исследовать методом трения «шарик–диск». В этом случае образец обрабатываемого материала в течение определенного времени совершает осциллирующее поступательное перемещение по поверхности покрытия и одновременно прижимается к этой поверхности по нормали. Получаемый таким образом коэффициент трения  $\mu$  характеризует влияние возможного адгезионного залипания у поверхности контакта режущего и обрабатываемого материалов. Стойкость против окисления  $T_{ок}$  определяется с использованием печи, для чего измеряют увеличение массы инструмента, обусловленное соединением режущего материала с кислородом. Температура, при которой подобное увеличение массы инструмента, отнесенное к единице времени прогрева инструмента, превышает граничное значение  $20 \text{ мг/см}^2$ , принимается в качестве температуры окисления. В качестве критерия, характеризующего влияние нарушения целостности поверхности, принимается критическая нагрузка  $L_c$ , полученная при испытании методом царапания.

В предлагаемой ММ [5] вводят поправочный коэффициент  $KF$ , на который необходимо умножить критерий стойкости  $T_{эталон}$ , принятый для эталонного инструмента, чтобы получить прогнозируемую стойкость рассматриваемого инструмента:

$$T = KFT_{эталон} \quad (1.39)$$

Поправочный коэффициент определяют следующим образом:

$$KF = k_0 A^{k_1} B^{k_2} C^{k_3} D^{k_4}, \quad (1.40)$$

где  $A = h_s/h_{эталон}$ ;  $B = L_c/L_{эталон}$ ;  $C = \mu_{эталон}/\mu$ ;  $D = T_{ок}/T_{ок \text{ эталон}}$ .

Для определения постоянных  $k_0 - k_4$  необходимо сначала провести реальные исследования процесса резания, а также небольшие относительно простые аналоговые исследования. Постоянные определяют с помощью числовых методов таким образом, чтобы свести к минимуму квадратичное отклонение между результатами исследования и имеющимися результатами, получаемыми с помощью системы уравнений. Эти базовые данные позволяют прогнозировать производительность режущих инструментов с новыми покрытиями.

Данная ММ пригодна для прогнозирования стойкости инструмента при различных материалах обрабатываемой детали. К тому же возможности уравнения (1.40) расширяются за счет введения таких факторов влияния обрабатываемого материала, как предел прочности при растяжении, твердость материала и процентное содержание в нем углерода, а также соответствующих показателей степени. Так как



отсутствуют значения критической нагрузки  $L_c$ , то для определения показателя  $B$  вместо критической нагрузки используют коэффициент теплопроводности  $\lambda$ .

Таким образом, можно обеспечить очень хорошее прогнозирование стойкости инструмента при обработке резанием других материалов, даже не прибегая к реальной обработке этих материалов.

### 1.3. ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ

В зависимости от обрабатываемого материала, геометрии инструмента, режимов и иных условий резания стружкообразование может протекать устойчиво с образованием непрерывной сливной стружки или неустойчиво с образованием стружки надлома, элементной, суставчатой. К последнему случаю относится также резание при наличии срывающегося, неустойчивого нароста. Сила резания в первом случае сохраняется относительно постоянной, во втором – периодически изменяется. Неустойчивость стружкообразования является выражением неустойчивости напряженно-деформационного состояния объема материала, подвергаемого пластическому деформированию при резании. Неустойчивость стружкообразования вызывает, как правило, неустойчивость динамической системы станка во всем диапазоне режимов обработки. Возникают колебания системы, качество обработанной поверхности резко ухудшается, поверхностный слой металла разрушается и т.д.

Таким образом, для повышения точности и качества поверхности обработанных деталей при высокой производительности процесса, немалое место занимают вопросы стабилизации самого процесса резания. Решение этой задачи имеет также большое значение для правильной оценки влияния переменности сил резания на динамику станка. Если элементность стружки оказывается полезной, так как стружка легко удаляется из зоны обработки, то неустойчивость наростообразования при формировании сливной стружки во всех отношениях является вредной. В связи с этим возникает задача выяснения и устранения условий образования в первую очередь неустойчивого нароста, а также стружек надлома и элементных.

Динамическая характеристика резания как элемента динамической системы станка представляет собой зависимость изменения силы резания от вызвавшего это изменение относительного смещения заготовки и инструмента.

Динамическая характеристика процесса резания может быть построена только для условий, когда процесс является собственно устойчивым, т.е. для условий образования сливной стружки. Схема зоны резания при формировании сливной стружки дана на рис. 1.10. Взят простейший случай прямоугольного свободного резания одним резцом [5].

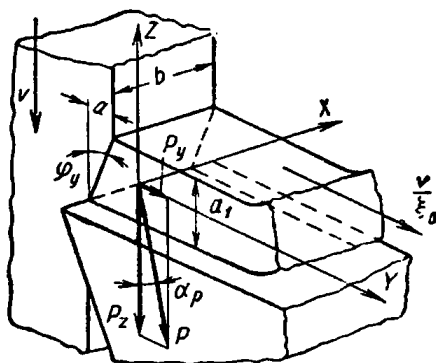


Рис. 1.10. Схема зоны резания при формировании сливной стружки

Смещение по нормали к поверхности резания (по оси  $Y$ ) вызывает изменение: толщины  $a$  срезаемого слоя; скорости скольжения стружки по передней поверхности резца; переднего угла или соответственно угла между обрабатываемой поверхностью и действительной скоростью резания; заднего угла или, иначе, контакта задней поверхности с поверхностью резания. Смещение по касательной к поверхности резания в направлении скорости резания (по оси  $Z$ ) вызывает изменение величины скорости резания. Смещение по касательной к поверхности резания (по оси  $X$ ) вызывает изменение направления скорости в плоскости резания и скорости скольжения стружки по передней поверхности резца. Влияние этого смещения на силы резания в практике проявляется мало, поэтому обычно его не учитывают, хотя в некоторых условиях оно и может играть важную роль.

Существующие представления о характере влияния деформаций упругой системы (УС) на силу резания можно разделить на три группы. Принято считать, что изменение силы резания определяется следующими изменениями условий резания:

- 1) изменением величины скорости резания или скорости скольжения стружки по резцу;
- 2) изменением сечения срезаемого слоя при условии резания по вибрационному следу от предыдущего прохода;
- 3) изменением углов резания в связи с изменением направления вектора скорости резания.

В соответствии с изложенным выше будем различать составляющие общего изменения силы резания, определяемые соответственно:  $dP_a$  – изменением толщины  $a$  срезаемого слоя, которое в данном случае дает изменение сечения срезаемого слоя;  $dP_\gamma$  – изменением переднего угла  $\gamma$ ;  $dP_\alpha$  – изменением заднего угла  $\alpha$ .

Рассмотрим случай когда сила резания определяется силами, действующими на передней и задней поверхностях резца. Изменение толщины срезаемого слоя равно относительному смещению резца и заготовки по нормали к поверхности резания, т.е.  $a = y$ . Изменение контактного давления на задней поверхности определяется изменением скорости смещения резца по оси  $Y$ .

Для плоской площадки (искусственная фаска или фаска износа) в соответствии со схемой (рис. 1.11) изменение  $\delta_{cp}$  среднего значения контактной деформации

$$\delta_{cp} = \frac{h}{2} \frac{1}{v} \frac{dy}{dt}, \quad (1.41)$$

где  $h$  – высота фаски;  $\frac{dy}{dt}$  к  $v$  является изменением заднего угла.

Линеаризуя в пределах отклонений зависимость удельного давления от контактной деформации, получаем коэффициент пропорциональности  $H_\alpha$ , который называется контактной жесткостью. Его значение зависит от исходного давления, формы площадки и твердости обрабатываемого материала. Чем больше твердость, тем больше  $H_\alpha$ . Для стали среднее значение  $H_\alpha = 100 \text{ кГ/мм}^3$ .

Пользуясь этими зависимостями, находим

$$P_\alpha = \frac{h^2 b H_\alpha}{2v} \frac{dy}{dt}. \quad (1.42)$$

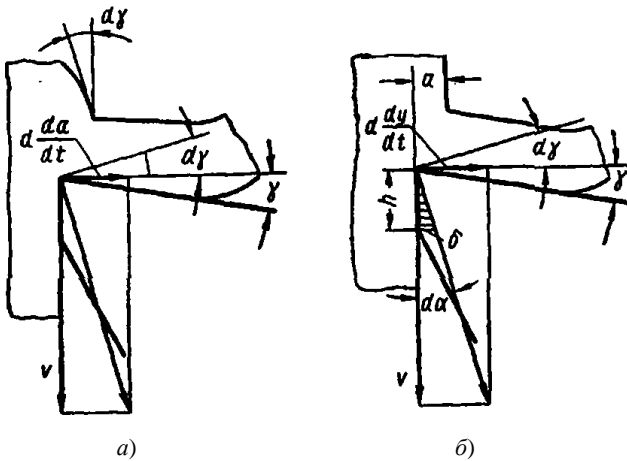


Рис. 1.11. Схема изменения переднего и заднего углов резца:  
 $a$  – при изменении припуска;  $b$  – при смещении резца

Переходя к операторной форме записи и суммируя  $P_\alpha$  с  $P_{\alpha\gamma}$ , получаем

$$P_{\alpha\gamma} = \frac{K_p \left( 1 + T_{\alpha\gamma} p + T_{\alpha p}^2 p^2 \right)}{1 + T_p p} y, \quad (1.43)$$

где  $T_\alpha = \frac{h^2 H_\alpha}{2\nu K}$  – постоянная времени заднего угла,

$$T_{\alpha\gamma} = T_\alpha - T_\gamma = \frac{1}{\nu} \left( \frac{h^2 H_\alpha}{2K} - \frac{K_\gamma a_0}{\xi_0} \right); \quad (1.44)$$

$$T_{\alpha p} = \sqrt{T_\alpha T_p} = \frac{1}{\nu} \sqrt{\frac{m}{n} \frac{a_0 \xi_0 h^2 H_\alpha}{2K}}, \quad (1.45)$$

для стали  $m/n = 4$ ;  $K$  – удельная сила резания (сила резания, отнесенная

к площади срезаемого слоя);  $K_\gamma = \left( \frac{m}{n} \frac{da_l}{dC_l} \right)_0^2 - 1 \approx 1$ ;  $dC_l = \frac{\nu}{\xi_0} dt$ ;

$T_p = \frac{m}{n} \frac{a_0 \xi_0}{\nu}$  – постоянная времени стружкообразования;  $T_\gamma = \frac{a_0 K_\gamma}{\nu \xi_0}$  –

постоянная времени переднего угла;  $a_0$  – толщина срезаемого слоя;  $K_p = Kb$  – коэффициент резания.

Выражение (1.43) отражает особенности изменения силы резания во времени при изменении толщины срезаемого слоя и является динамической характеристикой резания (сила–толщина среза).

Все постоянные времени, входящие в характеристику, содержат в знаменателе скорость резания. Поэтому их можно представить в виде некоторого пути, проходимого резцом со скоростью резания за время, равное постоянной времени:

$$l_p = \nu T_p; \quad l_\gamma = \nu T_\gamma; \quad l_\alpha = \nu T_\alpha; \quad l_{\alpha\gamma} = \nu T_{\alpha\gamma}.$$

Здесь

$$\left\{ l_p = \frac{m}{n} a_0 \xi_0; \quad l_\gamma = \frac{a_0 K_\gamma}{\xi_0}; \quad l_\alpha = \frac{h^2 H_\alpha}{2K} \right. \quad (1.46)$$

Известно, что для углеродистой стали  $\xi_0 = 2,5 \dots 4,5$ .

Полную характеристику по выражению (1.35) представим в виде произведения двух характеристик (передаточных функций):

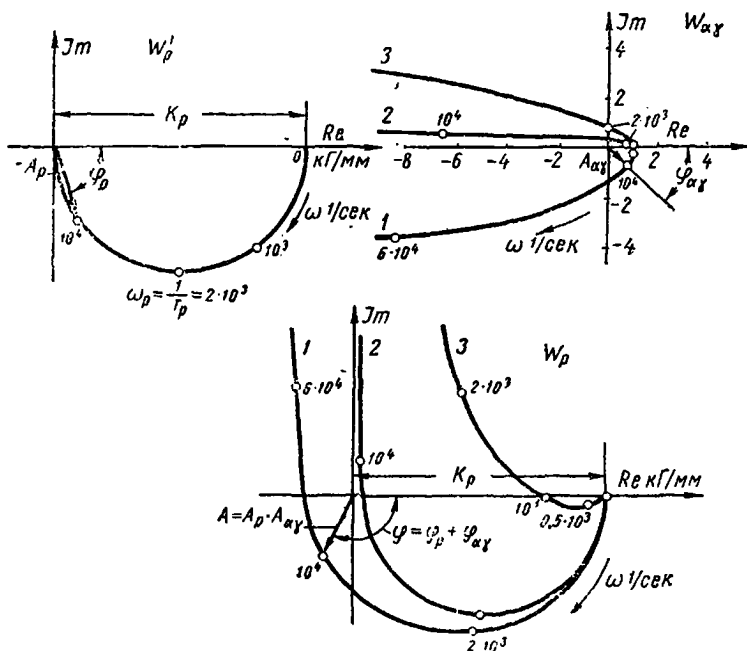
$$W_p = \frac{P_{\alpha\gamma}}{y} = W_p' W_{\alpha\gamma}, \quad (1.47)$$

$$\text{где } W'_p = \frac{K_p}{1+T_p^2 \omega^2} - i \frac{K_p T_p \omega}{1+T_p^2 \omega^2}; W_{\alpha\gamma} = 1 - T_{\alpha\gamma}^2 \omega^2 + iT_{\alpha\gamma} \omega.$$

На рисунке 1.12 приведены амплитудно-фазовые частотные характеристики, построенные в плоскости комплексного переменного, где  $A$  равно отношению амплитуды силы к амплитуде срезаемого слоя, а  $\varphi$  — фазовый сдвиг между силой и толщиной срезаемого слоя. Вид характеристики  $W_{\alpha\gamma}$  зависит от знака  $T_{\alpha\gamma}$ . Если  $T_{\alpha\gamma} > 0$  — фаза характеристики положительна. Если  $T_{\alpha\gamma} < 0$  — фаза отрицательна.

При анализе следует учитывать, что частотный диапазон практически ограничен и его можно разделить на следующие области: низкочастотная  $0 < \omega < 10$  1/с; среднечастотная  $10 < \omega < 3 \cdot 10^3$  1/с; высокочастотная  $3 \cdot 10^3 < \omega < 10^5$  1/с.

Среднечастотная область охватывает так называемые «низкочастотные» автоколебания при резании (до 500 Гц), высокочастотная — «высокочастотные» автоколебания (порядка 1000...15000 Гц).



**Рис. 1.12.** Амплитудно-фазовые частотные характеристики процесса резания:

$$a_0 = 0,1 \text{ мм}; v = 10 \text{ мм/с}; \xi = 4; H_{\alpha} = 102 \text{ кг/мм}^3; K_{\text{св}} = 0;$$

$$1 - h = 0,1 \text{ мм}; 2 - h = 0,5 \text{ мм}; 3 - h = 1,0 \text{ мм}$$

Для условий, охватывающих область так называемых низкочастотных автоколебаний, роль изменения переднего и заднего углов при смещениях несущественная. Однако при обработке с малыми усадками материалов, имеющих невысокую пластичность, а также в области высоких частот влияющие изменения переднего угла становится существенным. Влияние изменения заднего угла возрастает также по мере затупления инструмента.  $T_0$  и другое выражается увеличением  $T_\gamma$  и  $T_\alpha$ .

При анализе среднечастотной области характеристики в случае обработки с усадкой  $\xi \geq 2,5$  можно пользоваться упрощенным

выражением вида  $P_\alpha \approx \frac{K_p}{1+T_p p}$  и соответствующими ему

$$W_p' = \frac{K_p}{1+T_p^2 \omega^2} - i \frac{K_p T_p \omega}{1+T_p^2 \omega^2}.$$

Передаточная функция упругой системы, представленной в виде колебательного звена, имеет вид

$$W_{yc}^* = \frac{K_{yc}^*}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}, \quad (1.48)$$

где  $K_{yc}^*$  – приведенная статическая характеристика (податливость) данной нормальной системы, мм/Н;  $T_2 = \sqrt{m^*/c^*} = 1/\omega_c$  – инерционная по-

стоянная времени, с;  $T_1 = \frac{\lambda}{\pi} T_2$  – постоянная времени демпфирования, с;

$\lambda$  – логарифмический декремент;  $\omega_c = 2\pi f_c$  – собственная круговая частота колебаний,  $c^{-1}$ ;  $f_c$  – число собственных колебаний в секунду или, иначе, собственная частота колебаний в Гц;  $c$  – жесткость упругого звена, Н/мм;  $m$  – приведенная масса системы, т.е. масса той части конструкции которая принимает участие в колебательном движении, Н. При расчетах в качестве приведенной массы будем принимать массу заготовки.

Из данного выражения получается АФЧХ упругой системы, описываемой одной нормальной координатой

$$W_{yc}^* = \text{Re}_{yc}^* + i \text{Im}_{yc}^*, \quad (1.49)$$

где  $\text{Re}_{yc}^* = \frac{K_{yc}^* (1 - T_2^2 \omega^2)}{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + T_1^2 \omega^2}$ , мм/кг;  $i \text{Im}_{yc}^* = -\frac{K_{yc}^* T_1 \omega^2}{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + T_1^2 \omega^2}$ , мм/кг.

Замкнутая динамическая система, состоящая из УС с одной степенью свободы с передаточной функцией  $W_{yc}^* = \frac{K_{yc}^*}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}$  и

процесса резания, при учете только ее статической линейризованной характеристики будет иметь следующее выражение передаточной функции для разомкнутой системы:

$$W'_{\text{раз}} = W_{\text{yc}}^* K_p = \frac{K_{\text{yc}}^* K_p}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}. \quad (1.50)$$

График  $W'_{\text{раз}}$  этой разомкнутой системы показан на рис. 1.13 штриховой линией; он отличается от графика  $W_{\text{yc}}$  только масштабом изображения; его амплитуды увеличены в  $K_p$  раз, а фазовые углы остались такими же. АФЧХ не пересекает отрицательную ветвь вещественной оси комплексной системы координат. Поэтому, на основании критерия устойчивости Найквиста, при учете только статической характеристики процесса резания замкнутая динамическая система будет всегда устойчива. Если же учитывать динамическую характеристику процесса резания в виде  $W'_p$ , то передаточная функция разомкнутой системы будет следующая:

$$W''_{\text{раз}} = W_{\text{yc}}^* W'_p = \frac{K_{\text{yc}}^* K_p}{(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)(T_p p + 1)}. \quad (1.51)$$

Таким образом, в результате умножения на динамическую характеристику резания амплитуды УС изменяются по величине и получают дополнительный фазовый поворот по часовой стрелке. Каждая из АФЧХ элементов системы не пересекает отрицательную ветвь вещественной оси, а АФЧХ разомкнутой системы  $W''_{\text{раз}}$  уже ее пересекает, что может вызвать неустойчивость системы (график  $W''_{\text{раз}}$  на рис. 1.13 показан сплошной линией).

Построив АФЧХ по отрезку  $\text{Re}_{\text{yc}}^*$  можно судить о виброустойчивости системы. Чем больше отрезок  $\text{Re}_{\text{yc}}^*$ , отсекаемый характеристикой ЭУС на отрицательной ветви вещественной оси, тем меньше предельная ширина срезаемого слоя и ниже виброустойчивость системы. Эта закономерность хорошо согласуется с другой: чем больше отрезок, отсекаемый характеристикой ЭУС на положительной вещественной оси, тем ниже технологическая жесткость системы и тем меньше точность обработки или, иначе, – тем сильнее влияние деформаций системы на точность обработки.

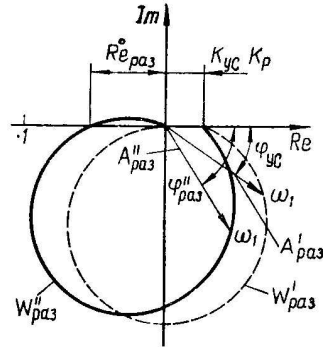


Рис. 1.13. АФЧХ разомкнутой системы

Предельная ширина среза  $b_{\text{пр}}$  может быть определена на основании критерия Найквиста ( $\text{Re}_{\text{раз}}^0 = -1$ ). После определения

$\omega = \sqrt{\frac{T_p + T_2}{T_p T_1^2}}$  получено следующее выражение для отрезка на вещественной оси АФЧХ разомкнутой системы:

$$\text{Re}_{\text{раз}}^0 = -\frac{K_p}{c} \frac{T_p T_2^2 / T_1}{T_2^2 + T_p^2 + T_p T_1}, \quad (1.52)$$

где  $c = 1/K_{\text{ус}}$  – коэффициент жесткости УС.

Исходя из этого, предельная ширина среза

$$b_{\text{пр}} = \frac{c T_1}{K T_p T_2^2} (T_2^2 + T_p^2 + T_p T_1). \quad (1.53)$$

## 1.4. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ

### 1.4.1. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ

Расчет оптимальных параметров (режимов резания, параметров качества и др.) технологического процесса или операции при заданной структуре с позиции некоторого критерия называют параметрической оптимизацией, которая предусматривает определение таких значений параметров  $x$ , при которых некоторая функция  $F(x)$ , называемая целевой функцией, или функцией эффективности (например, приведенные затраты, технологическая себестоимость, штучное время, штучная производительность, технологическая производительность, вспомогательное время и др.), принимает экстремальное значение.

Для решения задач оптимизации в технологическом проектировании используют математические модели и такие методы математического программирования, как линейное, целочисленное, динамическое, геометрическое и др.

В технологическом проектировании операционные модели, описанные методами математического программирования, записывают в следующем виде [7]:

$$\begin{cases} F(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min(\max); \\ g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq \overline{b_j}, \quad j = \overline{1, m}; \\ a_{1i} \leq x_i \leq a_{2i}, \quad i = \overline{1, n}, \end{cases} \quad (1.54)$$

где все управляемые  $x_i$  могут принимать значения из множества  $[a_{1i}, a_{2i}]$  действительных чисел;  $F(x)$  и  $g_j(x)$  – скалярные функции своих аргументов;  $\overline{b_j}$  – заданные действительные функции.



Задачи подобного типа в технологии машиностроения возникают при определении оптимальных режимов обработки. В этом случае могут быть использованы методы линейного и нелинейного программирования.

Применение метода линейного программирования вызывает трудности, связанные с линейностью критерия оптимальности и ограничений. Например, при назначении плана черновой обработки поверхности заготовки должны быть учтены ограничения, связанные с техническими данными оборудования, характеристиками режущего инструмента, размерами детали и др. Эти ограничения выражаются через параметры переходов (рабочих ходов) – режимы резания и соответствующие величины, характеризующие условия обработки (мощность привода оборудования; допустимая сила, действующая на механизм подачи станка; прочность и стойкость режущего инструмента; допустимое перемещение заготовки под действием сил резания).

Для согласования значений подачи  $s$  и частот вращения шпинделя  $n$  с паспортными данными оборудования используют коэффициенты геометрических рядов подач ( $\phi_s$ ) и частот вращения шпинделя ( $\phi_n$ ):

$$\begin{cases} s = s_1 \phi_s^{z_s - 1}; \\ n = n_1 \phi_n^{z_n - 1}. \end{cases} \quad (1.55)$$

Лучшему варианту плана обработки будут соответствовать минимальные затраты  $C = \sum_{i=1}^p C_i$ , где  $C_i$  – затраты на выполнение перехода (рабочего хода);  $p$  – число переходов (рабочих ходов).

Затем путем логарифмирования ограничений и целевой функции, связанных с одним переходом (рабочим ходом), получают линейную

задачу  $Z = k_0 + k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 \rightarrow \min$  при ограничениях  $\sum_{j=1}^3 a_{ij} x_j \leq b_i$ ;

$i = 1, n$ , где  $x_1 = \ln t$ ;  $x_2 = z_s$ ;  $x_3 = z_n$ ;  $t, s$  – соответственно глубина резания и подача при рассматриваемом переходе;  $a_{ij}$  – коэффициенты, зависящие от показателей степени при глубине резания, подачи и скорости резания в формулах сил и скорости резания, а также от коэффициентов геометрических рядов подач и частот вращения шпинделя;  $k_0, \dots, k_3, b_i$  – коэффициенты и величины ограничений, зависящие от конкретных условий обработки. Одним из возможных методов решения широкого класса нелинейных задач является метод геометрического программирования, который позволяет рассматривать задачи с учетом особенностей их инженерной постановки. Основное требование геометрического программирования состоит в том, чтобы все технические характе-

ристики были выражены в виде положительных полиномов (позиномы) от регулируемых параметров.

Для математической оптимизации может быть использован метод динамического программирования, который сводится к рекуррентным соотношениям (например, распределение припуска по технологическим переходам). Динамическое программирование является вычислительным методом, приводящим к глобальному оптимуму.

Используют также различные методы поиска, исключающие полный перебор (например, регулярного поиска для определения оптимальных режимов резания при обработке ступенчатых валов на токарном гидрокопировальном полуавтомате). Задают исходные данные (размеры и материал детали, режущий инструмент, глубину резания, жесткость узлов станка, цикловые и внецикловые потери времени работы оборудования). Требуется найти режим обработки, удовлетворяющий условиям по точности обработки, шероховатости поверхности, мощности, расходуемой на резание, кинематике станка и приводящий целевую функцию к максимуму.

При параметрической оптимизации математические модели оценивают с точки зрения пригодности их использования для решения технологических задач в производственных условиях. Их оценивают с помощью статистического анализа путем:

1) сравнения двух методов решения конкретной технологической задачи – математического моделирования и использования нормативных данных; при этом проверяют гипотезу соответствия значений двух выборок;

2) проверки математической модели на чувствительность влияния случайных факторов;

3) проверки математической модели на ее адекватность реальному технологическому процессу.

Рассмотрим наиболее важные технические ограничения, взятые из работы [8]. Все ограничения приводятся к неравенствам, в левой части которых зафиксированы параметры режима резания, а в правой – параметры, характеризующие элементы СПИД:

1. Ограничение устанавливает связь между скоростью резания, обусловленной принятой стойкостью инструмента, материалом режущей части инструмента, его геометрией, глубиной резания, подачей механическими свойствами обрабатываемого материала, с одной стороны, и скоростью резания, определяемой кинематикой станка, с другой стороны:

$$n s^{y_v} \leq \frac{1000 C_v K_v}{\pi T^m t^{x_v} d}, \quad (1.56)$$

где  $C_v$  – постоянный коэффициент, характеризующий нормативные условия обработки;  $K_v$  – общий поправочный коэффициент на ско-

рость резания, учитывающий измененные условия обработки по сравнению с нормативными;  $x_v, y_v$  – показатели степеней; скорость резания  $v = \pi d n / 1000$ .

2. Ограничение вызвано предельно допустимой мощностью электродвигателя главного движения выбранного станка:

$$n^{n_z+1} s^{y_z} \leq \frac{N_n \eta 6120 (10^3)^{n_z+1}}{C_z t^{x_z} d^{n_z+1} \pi^{n_z+1} K_z}, \quad (1.57)$$

где  $N_n$  – мощность электродвигателя главного привода станка, кВт;  $\eta$  – коэффициент полезного действия механизма передачи от электродвигателя к инструменту;  $K_z$  – поправочный коэффициент на мощность, учитывающий измененные условия обработки против нормативных.

3. Ограничение вызвано минимальной скоростью резания, возможной на выбранном станке:

$$n \geq n_{\text{ст.мин}}, \quad (1.58)$$

где  $n_{\text{ст.мин}}$  – минимально возможная частота вращения шпинделя заданной модели станка.

4. Ограничение вызвано максимальной частотой вращения шпинделя для выбранного станка:

$$n \leq n_{\text{ст.макс}}, \quad (1.59)$$

где  $n_{\text{ст.макс}}$  – максимально возможная частота вращения шпинделя для заданной модели станка.

5. Ограничение вызвано допустимой прочностью режущего инструмента:

$$n^{n_z} s^{y_z} \leq \frac{B H^2 (10^3)^{n_z} \sigma_{\text{изг}}}{60 C_z t^{x_z} d^{n_z} \pi^{n_z} K_z l K_{\text{зп}}}, \quad (1.60)$$

где  $BH$  – сечение резца;  $B$  – ширина, мм;  $H$  – высота, мм;  $l$  – вылет резца, мм;  $K_{\text{зп}}$  – коэффициент запаса прочности,  $\sigma_{\text{изг}}$  – предел прочности материала державки резца при изгибе.

6. Ограничение вызвано ограниченной жесткостью системы СПИД:

$$n^{n_y} s^{y_y} \leq \frac{\Delta (10^3)^{n_y} j}{2 C_y t^{x_y} K_{p_y} 10 \pi^{n_y} d^{n_y}}, \quad (1.61)$$

где  $\Delta$  – допуск на размер, мм;  $j$  – жесткость системы СПИД, Н/мм.

7. Ограничение вызвано ограничениями по жесткости обрабатываемой детали:

$$n^{n_y} s^{y_y} \leq \frac{K_{\text{ж}} E f (10^3)^{n_y} d^{4-n_y} \pi^{1-n_y}}{C_y t^{x_z} K_{Py} L_{\text{заг}}^3}, \quad (1.62)$$

где  $K_{\text{ж}}$  – коэффициент изменяющийся в зависимости от способа закрепления заготовки, при закреплении детали в центрах  $K_{\text{ж}} = 0,075$ , при закреплении детали в патроне и заднем центре  $K_{\text{ж}} = 0,16$ , при закреплении детали только в патроне  $K_{\text{ж}} = 0,005$ ;  $E$  – модуль Юнга обрабатываемого материала, Н/мм<sup>2</sup>;  $f = 0,2\Delta$  – допустимая стрела прогиба заготовки, мм;  $L_{\text{заг}}$  – длина заготовки.

8. Ограничение вызвано минимально допустимой величиной подачи для выбранного станка:

$$s \geq s_{\text{ст.мин}}, \quad (1.63)$$

где  $s_{\text{ст.мин}}$  – минимально допустимая подача на заданной модели станка, мм/об.

9. Ограничение вызвано максимально допустимой величиной подачи для выбранного станка:

$$s \leq s_{\text{ст.макс}}, \quad (1.64)$$

где  $s_{\text{ст.макс}}$  – максимально допустимая подача для заданной модели станка.

10. Ограничение вызвано требованиями к подаче на основе заданной шероховатости обрабатываемой поверхности:

$$s \leq 0,07 \sqrt{Rz} r, \quad (1.65)$$

где  $Rz$  – шероховатость поверхности, мкм;  $r$  – радиус при вершине реза, мм.

Режимы обработки какой-либо поверхности детали выбираются таким образом, чтобы они удовлетворяли этим техническим ограничениям. В рамках этих ограничений необходимо найти оптимальные режимы резания, т.е. такие режимы, при которых принятый критерий оптимизации достигал бы минимума (максимума). В качестве такого критерия выбрана производительность на данной технологической операции.

Критерий оптимизации: время обработки 1 мм поверхности резания принимают, когда произведение  $ns$  оказывается наибольшим. Задача сводится к тому, что необходимо найти такую частоту вращения шпинделя  $n$  и подачу  $s$ , которые отвечали бы всем без исключения неравенствам технических ограничений и произведение которых было бы максимальным.

Целевая функция:  $f = (ns) \rightarrow \max$ .

Система ограничений  $W$ :

$$W \left\{ \begin{array}{l}
s \geq s_{\min} \\
s \leq s_{\max} \\
n \geq n_{\min} \\
n \leq n_{\max} \\
ns^y \leq \frac{1000 \cdot C_V \cdot K_V}{\pi \cdot d \cdot T^m \cdot t^x} \\
n^{zp+1} s^{yp} \leq \frac{1020 \cdot 60 \cdot 1000^{zp+1} \cdot N \cdot \eta}{C_p \cdot t^{xp} \cdot K_p \cdot \pi^{zp+1} \cdot d^{zp+1}} \\
n^{zp} s^{yp} \leq \frac{1000^{zp} \cdot B \cdot H^2 \cdot \sigma_{\text{изг}}}{6 \cdot C_p \cdot t^{xp} \cdot K_p \cdot \pi^{zp} \cdot d^{zp} \cdot l_{\text{вр}} \cdot K_{\text{эл}}} \\
n^{n_y} s^{y_y} \leq \frac{\Delta \cdot (10^3)^{n_y}}{2 \cdot j \cdot C_y \cdot t^{x_y} \cdot K_{py} \cdot 10 \cdot \pi^{n_y} \cdot d^{n_y}} \\
n^{n_y} s^{y_y} \leq \frac{K_{\text{ж}} \cdot E \cdot f \cdot (10^3)^{n_y} d^{4-n_y} \cdot \pi^{1-n_y}}{C_y \cdot t^{x_z} \cdot K_{py} \cdot L_{\text{зар}}^3} \\
s \leq 0,07 \sqrt{R_z \cdot r} \\
ns \rightarrow \max
\end{array} \right. \quad (1.66)$$

Прологорилируем систему, обозначив  $\ln(n) = x_1$ ,  $\ln(s) = x_2$  логарифмы правых частей неравенств за переменные  $C_1, C_2, \dots, C_n$ , получим следующую систему

$$W \left\{ \begin{array}{l}
x_2 \geq C1 \\
x_2 \leq C2 \\
x_1 \geq C3 \\
x_1 \leq C4 \\
x_1 + yx_2 \leq C5 \\
(z_p + 1)x_1 + y_p x_2 \leq C6 \\
z_p x_1 + y_p x_2 \leq C7 \\
z_y x_1 + y_y x_2 \leq C8 \\
z_y x_1 + y_y x_2 \leq C9 \\
x_2 \leq C10 \\
x_1 + x_2 \rightarrow \max
\end{array} \right. \quad (1.67)$$

Математическая модель процесса резания может быть представлена в графическом виде. Граничные прямые, пересекаясь между собой, образуют многоугольник. Множество точек плоскости, заключенных внутри этого многоугольника и отвечающих области допустимых значений каждого неравенства, является решением системы неравенств. Полученные значения  $n_{\text{опт}}$  и  $s_{\text{опт}}$  корректируются с учетом частоты вращения шпинделя и подачи, имеющихся у выбранной модели станка. Очевидно, что при этом должно соблюдаться условие  $ns \leq n_{\text{опт}} s_{\text{опт}}$ , где  $s$  и  $n$  – окончательно принятые подача и частота вращения шпинделя.

#### 1.4.2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА КРИТЕРИЕВ ОПТИМАЛЬНОСТИ

Если требуется оптимизировать один из показателей качества проектируемого объекта при соблюдении ограничений на остальные показатели, то нужно сформировать один частный критерий.

Задача оптимизации при этом сводится к задаче максимизации (минимизации) данного критерия с учетом заданных ограничений.

При наличии нескольких критериев выбирают:

а) аддитивный критерий, если существенное значение имеют абсолютные значения критериев при выбранном векторе параметров  $X$ ;

б) мультипликативный критерий, если существенную роль играет изменение абсолютных значений частных критериев при вариации вектора  $X$ ;

в) максиминный (минимаксный) критерий, если стоит задача достижения равенства нормированных значений противоречивых (конфликтных) частных критериев.

Рекомендации по выбору ограничений, целевой функции и критериев оптимальности при обработке резанием. Для следующих критериев оптимизации следует принимать значения: штучная себестоимость, штучное время, компромисс стоимости и времени – минимум; число (в штуках); доля прибыли – максимум [9].

Зависимость для штучного времени должна быть приведена к проходу в пределах операции и к составляющим затрат времени, зависящим от режимов обработки. Во вспомогательном времени должно быть учтено только время на смену инструмента  $t_{\text{смн}}$  и поворот режущей пластины  $t_{\text{прп}}$ . Время обслуживания и отдыха ( $t_{\text{обсл}} + t_{\text{отд}}$ ) можно не учитывать.

Система ограничений для процессов резания приведена в табл. 1.2.

Основное время  $t_{\text{осн}}$ , определяемое только для станков, относят к длине прохода с рабочей подачей (может быть принята длина заготовки). В качестве технологических составляющих себестоимости должны быть учтены стоимость одного часа работы станка  $C_{\text{ст}}$ , часовая заработная ставка  $C_{\text{зс}}$ , стоимость других расходов  $C_{\text{др}}$  и стоимость инструмента  $C_{\text{инстр}}$ .

## 1.2. Технические ограничения при точении

Ограничения		Станок	Зажимное приспособление	Оптимальные рабочие режимы	Заготовки
Геометрические		Рабочее пространство (максимальный, минимальный диаметр заготовки, высота рабочей зоны, максимальная длина обработки и др.	Диапазоны запрещенных диаметров, биение детали в патроне	Геометрия режущей части, форма державки, токарный резец, токарная штанга	Размеры (громоздкость), геометрические погрешности (макро- и микроотклонения формы)
По нагрузке (износ)		Мощность, крутящий момент	Ограничение по частоте вращения, ограничение по силе зажима токарного патрона, задней баки	Материал режущей части, режущая пластина, резцедержавка	Материал, предварительная подготовка, обрабатываемость
Прочность, деформация и упругость	Статистическая	Упругость (шпиндель, станина, суппорт, задняя бабка, механизм подачи)	Жесткость закрепления	Прогиб державки	Прогиб заготовки (упругость заготовки)
	Динамическая	Аналитически пока не описано	Колебания (появление вибрации) в системе СПИД		
	Термическая		Термические деформации		

Ограничения могут быть образованы элементами системы СПИД, проявлением характеристик (геометрии, кинематики, нагрузки, износа) или совокупностью переменных (силами резания, производительностью, периодом стойкости), причем не всегда возможно однозначное разделение их.

## 1.5. МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КАК СРЕДСТВО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ

### 1.5.1. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ

Сущность метода конечных элементов (МКЭ) заключается в том, что область, занимаемая телом, разбивается на конечные элементы (треугольники в плоском случае и тетраэдры в пространственном). Внутри каждого элемента задаются некоторые функции формы, позволяющие определить перемещения внутри элемента по перемещениям в узлах (в местах стыков конечных элементов).

В работе [6] осуществлено математическое моделирование процессов резания на основании теории упруго-пластического деформирования и разрушения с применением МКЭ.

Процесс резания металла разбивается на три стадии [9]:

1) начальный момент врезания без разрушения материала (чистая деформация);

2) неустановившийся режим резания, характеризующийся изменением силы резания;

3) установившийся режим резания, при котором сила резания не меняется или изменяется в определенном диапазоне.

Модель разрушения осуществляется путем выделения в некоторой области линии предполагаемого раздела, по которой будет осуществляться разделение.

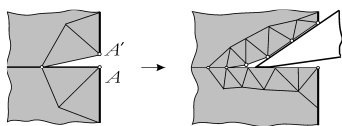
В начальный момент времени происходит деформирование материала без разрушения, до момента возникновения в зоне контакта напряжений, близких к пределу прочности. При превышении критического значения происходит разделение данного участка и дальнейшее продвижение резца.

В соответствии с основной концепцией МКЭ весь объем деформируемой среды разбивается на конечное число элементов, контактирующих друг с другом в узловых точках; совокупное движение этих элементов моделирует движение деформируемой среды. Основными неизвестными являются перемещения узловых точек элемента.

В качестве метода решения систем дифференциальных уравнений, применен метод последовательных нагружений. В соответствии с этим методом на каждом шаге итерационного процесса рассматривается нагружение деформируемого тела достаточно малым приращением нагрузки  $P$ , определяемой по известному на шаге перемещению передней контактной поверхности. Определяя из системы нелинейных уравнений реакцию тела на это приращение, находят новую его конфигурацию и соответствующее распределение напряжений, которые становятся исходными при формировании новых жесткостных соотношений на следующем шаге нагружения. В качестве начального приближения выбирается ненапряженное состояние.

Метод последовательных нагружений имеет определенный физический смысл, в силу рассмотрения на каждом шаге реакции системы на приращение нагрузки, как и в действительном процессе. Поэтому метод позволяет получить гораздо больше сведений о поведении тела в процессе деформирования.

Реализация механизма разделения в МКЭ сводится к разделению узлов при условии превышения значения интенсивности напряжения в узле  $A$  критического значения (рис. 1.14).



**Рис. 1.14.** Процесс разделения образца

При этом узел дублируется ( $A$  и  $A'$ ) с последующей перенумерацией узлов конечных элементов. Происходит разделение образца на две части –



основание и открепляемая стружка. При использовании критерия разделения по значению главной деформации применяются два подхода – по достижению значения в одном элементе, содержащем данный узел, или по среднему значению в группе граничных с узлом элементов.

Применение МКЭ накладывает ограничения на процесс разделения:

- разделение осуществляется в узлах элементов, находящихся на линии предполагаемого раздела;
- на одном шаге не может открепляться более одного узла;
- разделение происходит не ранее, чем будет откреплен узел, стоящий ближе к резу;
- разделенные узлы более не могут быть объединены;
- узел, попавший на поверхность клина, движется по его поверхности до момента открепления, но не ранее чем будет откреплен узел, стоящий перед ним.

Рассмотрение инструмента приводит к двум моделям: открепление не зависит от положения инструмента, т.е. может возникать опережающая трещина, независимо от характера материала; открепление происходит только при выполнении двух условий – превышении значения критерия разрушения в узле и положении резца в заданной  $\delta$ -окрестности.

Использование двух отличных подходов к описанию процесса разделения позволяет выявить практические преимущества и недостатки как критериев разрушения, так и самих моделей.

Автором работы [9] рассматривается процесс стружкообразования при резании металлов, который представляет собой пластическую деформацию, с возможным разрушением срезаемого слоя (рис. 1.15). Непосредственное влияние на процесс стружкообразования при прямоугольном резании оказывают только четыре фактора: угол действия, передний угол инструмента, скорость резания и свойства материала. Все остальные факторы влияют косвенно. Для выявления данных зависимостей выбран процесс свободного прямоугольного резания металла по плоской поверхности резания, где  $a$  – толщина срезаемого слоя или размер слоя, измеренный по нормали между соседними положениями поверхности резания;  $b$  – размер слоя, измеренный в направлении, нормальном к толщине слоя.

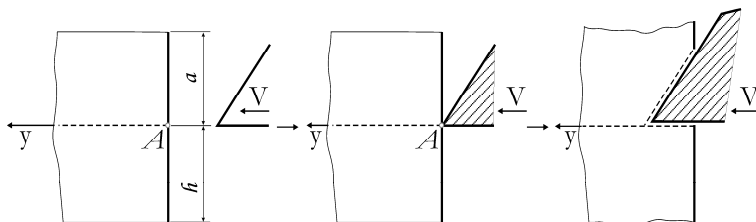


Рис. 1.15. Модель процесса плоского резания

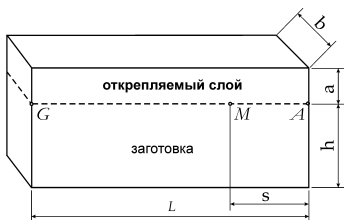


Рис. 1.16. Модель линии раздела

Отделение стружки от тела происходит путем выделения в некоторой области линии раздела  $GA$  (рис. 1.16). Толщина стружки считается постоянной на всем протяжении резания.

Рассматривался режим резания, при котором исключается возникновение застойных явлений на передней поверхности, и низкое тепловыделение в процессе резания не приводит к значительным изменениям физических характеристик материала. В начальный момент времени все напряжения в образце равны нулю. Контакт с инструментом происходит в точке  $A$  (рис. 1.17). Граничные условия заданы следующим образом:  $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3: V_n = 0; V_\tau = 0$ ,  $\Gamma_4, \Gamma_5: P_n = 0; P_\tau = 0$ . До достижения в точке  $A$  критического значения происходит чистая деформация образца без разрушения. Установившийся и неуставившийся процессы резания (рис. 1.18) описываются следующими граничными условиями:  $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3: V_n = 0; V_\tau = 0$ ,  $\Gamma_4, \Gamma_9: P_n = 0; P_\tau = 0$ ,  $\Gamma_5, \Gamma_6: P_n = 0; P_\tau = 0$ , при  $y > y_B$ ;  $\Gamma_7: V_\xi = 0; P_\eta = F_{тр}$ ,  $\Gamma_8: V_y = 0; P_x = F_{тр}$ .

Часть границ являются динамическими, т.е. при переходе от шага к шагу небольшой выделенный участок поверхности может менять граничные условия. Так, на стадии неуставившегося процесса  $\Gamma_5$  и  $\Gamma_6$  могут перейти в  $\Gamma_7$ ; при разделении возникают границы  $\Gamma_7, \Gamma_8$ , а  $\Gamma_8$  при выходе из зоны действия задней поверхности в  $\Gamma_9$ ; в точке  $B - \Gamma_7$  переходит в  $\Gamma_6$ .

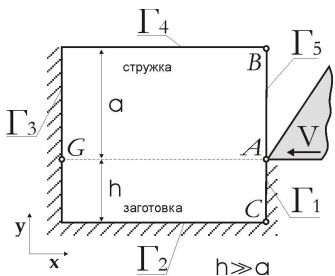


Рис. 1.17. Начальные и граничные условия

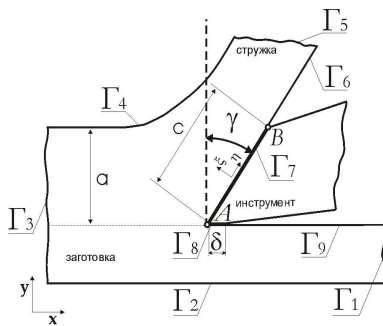
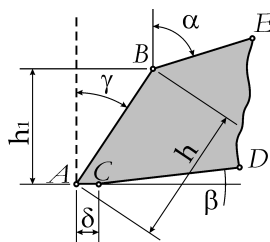


Рис. 1.18. Установившийся и неуставившийся процессы резания

На режущем инструменте (рис. 1.19) выделены следующие поверхности:  $AB$  – передняя режущая поверхность;  $AC$  – задняя режущая поверхность, в экспериментах это значение от 0,02 до 0,1 мм;  $\gamma$  – передний угол резания, точка  $B$  – точка отрыва, необходимая для моделирования действий стержневого;  $\beta$  – задний угол, служит для моделирования остаточных явлений на обработанной поверхности. Линии  $BE$  и  $CD$  считаются бесконечными. Длина передней режущей поверхности  $h$  иногда может совпадать с длиной контакта стружки и инструмента –  $s$ . При моделировании данные величины разделены и не являются одним и тем же. В ряде тестов резец может быть упрощен путем исключения поверхностей  $AC$ ,  $CD$ ,  $BE$  и точки  $B$ .



**Рис. 1.19. Поверхности режущего инструмента**

При моделировании инструмента сделаны следующие допущения:

- инструмент – абсолютно твердое тело;
- трение задано на двух поверхностях  $AB$  и  $AC$ ;
- допускается учет смазочных материалов путем изменения коэффициента трения  $\mu$ .

По данным автора работы [9] расчеты показывают, что установившийся процесс начинается при  $s \approx 4a$ , где  $a$  – толщина снимаемого слоя. Дальнейшие расчеты проведены при  $s \approx 5a$ , с типоразмером  $axbxc = 1 \cdot 6 \cdot 10$ , который обеспечивает большую плотность элементов в зоне разделения. Для каждого расчета задавалось, как минимум, 1000 шагов нагружения; но за счет итераций эта цифра была в пределах 1200...2000 шагов, а с учетом повторного расчета для учета трения 2200...4000 шагов. В силу фиксированной скорости  $v = 0,7$  м/мин было выбрано  $dt = 0,000043$  с. Глубина врезания острия резца – 0,5 мм, т.е. 5 толщин стружки, что дает право говорить о начале установившегося процесса. Исследование влияния числа элементов на точность расчета показало, что при скорости резания  $v = 0,7$  м/мин и при 534 элементах расхождение составило 5,7%.

Поиск диапазона скоростей, при которых модель справедлива, показал, что расхождение расчетных и экспериментальных данных начинается со значения скорости  $v = 2$  м/мин и  $a = 0,15$  мм для материала 20Х. Объясняется это расхождение неучтенными массовыми силами, которые на больших скоростях вносят существенный вклад. Таким образом, можно сделать вывод о справедливости модели для скоростей, не превышающих  $v = 2$  м/мин.

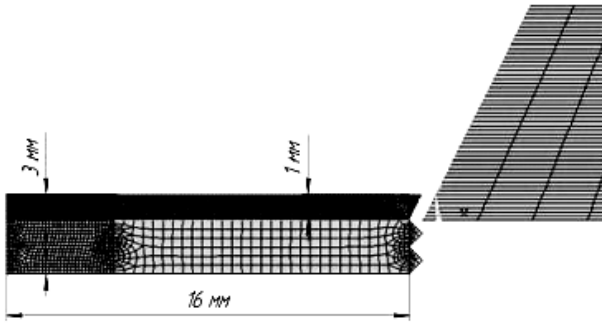
По мнению автора работы [9] применимость построенной модели с применением критерия разделения по интенсивности напряжений зависит от толщины снимаемого слоя. При уменьшении толщины снимаемого слоя возможно получить приемлемый результат при более высоких скоростях, нежели 4 м/мин.

В работе [10] с помощью метода конечных элементов, реализованного в программе ANSYS, рассмотрена плоская контактная задача взаимодействия резца с элементом стружки, состоящая из трех этапов. В отличие от обычных задач в данной задаче область приложения контактных давлений заранее неизвестна. Она определяется в процессе итерационного решения соответствующих уравнений. При составлении моделей предполагается, что процесс является пространственным, и рассматриваемый объем представляется в виде изотропной среды, обладающей свойствами линейно-деформируемого и вязкопластического тела.

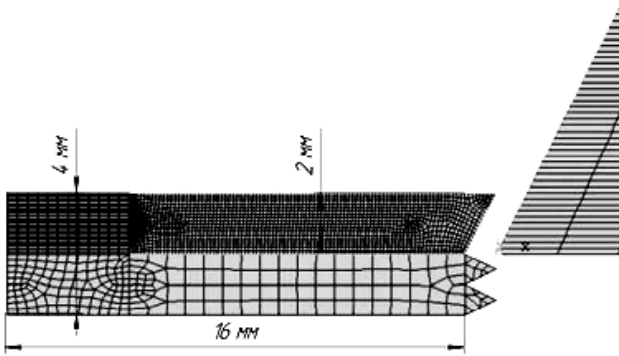
Было выполнено три этапа численного моделирования. На каждом этапе материал и условия контакта одинаковые, только различается глубина резания: 1, 2 и 3 мм, а ширина среза – 1 мм. Материал заготовки сталь 35Х. Контакт: поверхность – поверхность, коэффициент трения 0,12, разбиение поверхностей производим на четырехгранные элементы, каждый из которых имеет восемь узлов. На первом этапе глубина резания 1 мм, длина среза 6 мм, длина контакта стружки с заготовкой 1,784 мм, ширина среза 1 мм. На втором этапе глубина резания 2 мм, длина среза 6 мм, длина контакта стружки с заготовкой 3,5 мм, ширина среза 1 мм. На третьем этапе глубина резания 3 мм, длина среза 6 мм, длина контакта стружки с заготовкой 4,7 мм, ширина среза 1 мм.

Во всех численных опытах заготовка закреплялась по торцу и основанию, резец перемещался только в продольном направлении (рис. 1.20,  $a - \epsilon$ ).

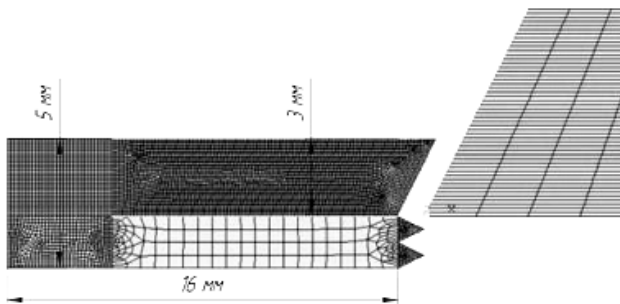
При перемещении резца на длину 6 мм происходит деформация заготовки, т.е. разрыв связей между заготовкой и снимаемым материалом и образование нового слоя – стружки, также наблюдается качественное перестроение внутренней структуры элементов стружки, при этом стружка получает усадку. Из-за больших пластических деформаций при резании возникают напряжения, которые достигают своей максимальной величины в месте контакта с передней поверхностью резца. Вследствие больших напряжений и больших пластических деформаций, на передней поверхности резца возникают нормальные и касательные контактные напряжения (рис. 1.21, 1.22).



a)

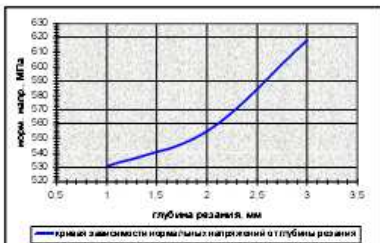


б)

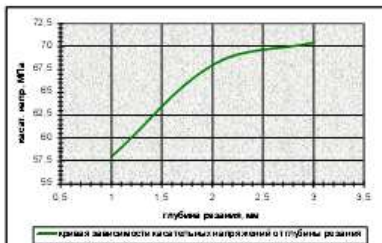


в)

**Рис. 1.20. Общий вид заготовки и реза:**  
 а – при глубине резания 1 мм; б – при глубине резания 2 мм;  
 в – при глубине резания 3 мм



**Рисунок 1.21. График нормальных напряжений**



**Рисунок 1.22. График касательных напряжений**

Напряжения более интенсивно распределяются в прирезцовой зоне. С увеличением глубины резания интенсивность напряжений возрастает.

### 1.5.2. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ, РЕАЛИЗУЮЩЕЕ МКЭ

Комплексы МКЭ (ANSYS, NASTRAN, ABAQUS, COSMOS и др.) относятся к категории CAE-систем (Computer Aided Engineering), применяемых при проектировании машиностроительных, строительных и других конструкций.

Лидером комплексов МКЭ (FEA-пакетов) является ANSYS. Детальное описание пакета ANSYS можно найти на официальном сайте компании ANSYS [11] или (русский, сокращенный вариант) на сайте компании CAD-FEM-Russia [12]. Достоинством этой системы является наиболее полная документация и система помощи.

Имеются следующие конфигурации программы ANSYS, различающиеся своими возможностями:

ANSYS Structural™ – статические и динамические расчеты в линейной и нелинейной постановках;

ANSYS Mechanical™ (с модулем ANSYS Thermal) – расчет полей температур из решения задач стационарной и нестационарной теплопроводности, конвекции, теплообмена излучением, расчеты фазовых превращений (замерзание, плавление, сварка и т.д.). Поля температур можно автоматически передать в ANSYS Structural для прочностных расчетов.

ANSYS Professional™ – решение контактных задач, проведение геометрически нелинейных расчетов и оптимизации;

ANSYS DesignSpace® – несложные прочностной, частотный или температурный расчеты, оптимизация, оценка в первом приближении правильности принятых конструктивных решений;

ANSYS Workbench – многодисциплинарный анализ.

Лицензионные дистрибутивы программ ANSYS и NASTRAN стоят довольно дорого – до 10 000 \$. У пользователей есть альтернатива использования freeware-программ конечно-элементного анализа. Далеко не полный их список можно найти на Web-страницах [12].

ELCUT – это интерактивная система моделирования двумерных краевых задач методом МКЭ [13]. Система позволяет решать плоские и осесимметричные задачи стационарной и нестационарной теплопередачи, анализа упругого напряженного состояния, совмещенные задачи и др. Имеется собственный модуль описания геометрии, можно импортировать фрагменты модели из AutoCAD или других САПР.

MatLab – профессиональный пакет для решения математических задач разной сложности, моделирования, решения уравнений, построения графиков. Пакет позволяет решать задачи тепло-массопередачи и переноса, выполнять прочностные расчеты, а также совместные задачи. Имеется обширная библиотека встроенных функций с возможностью дополнения пользователем.

FemLAB – пакет для математического моделирования практически любых процессов, описываемых дифференциальными уравнениями. Имеется возможность взаимодействия с Matlab и CAD-пакетами [12]. Основным достоинством данного пакета является графическое представление расчетной модели на координатной сетке. Сетка может быть выполнена в реальном масштабе моделируемого объекта.

Abaqus – универсальная конечно-элементная программа для проведения углубленного анализа поведения конструкции и решения задач теплопередачи, а также анализ контактного взаимодействия конструкции.

LS-DYNA (LSTC) предназначена для анализа нелинейного динамического отклика трехмерных неупругих структур, решения контактных задач (удар, разрушение и формование). Пользователями программы являются все известные мировые автомобильные концерны, множество фирм оборонной отрасли и др.

ADAMS позволяет определить все параметры движения системы как из абсолютно жестких, так и упругих звеньев; вычислить усилия в связях и реакции в опорах, усилия на элементы управления; определять взаимное перемещение составных частей и перемещения и углы поворота в шарнирах и др.

## 2. КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

---

### 2.1. ОБОБЩЕННАЯ БЛОК-СХЕМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ

Система автоматизированного проектирования (САПР) – автоматизированная система, реализующая информационную технологию выполнения функций проектирования, представляет собой организационно-техническую систему, предназначенную для автоматизации процесса проектирования, состоящую из персонала и комплекса технических, программных и других средств автоматизации его деятельности [16].

Основная цель создания САПР – повышение эффективности труда инженеров и технологического процесса, включая:

- сокращение себестоимости проектирования и изготовления за счет оптимизации процесса резания;
- повышение качества и технико-экономического уровня производимой продукции за счет подбора оптимальных технологических параметров при ее изготовлении.

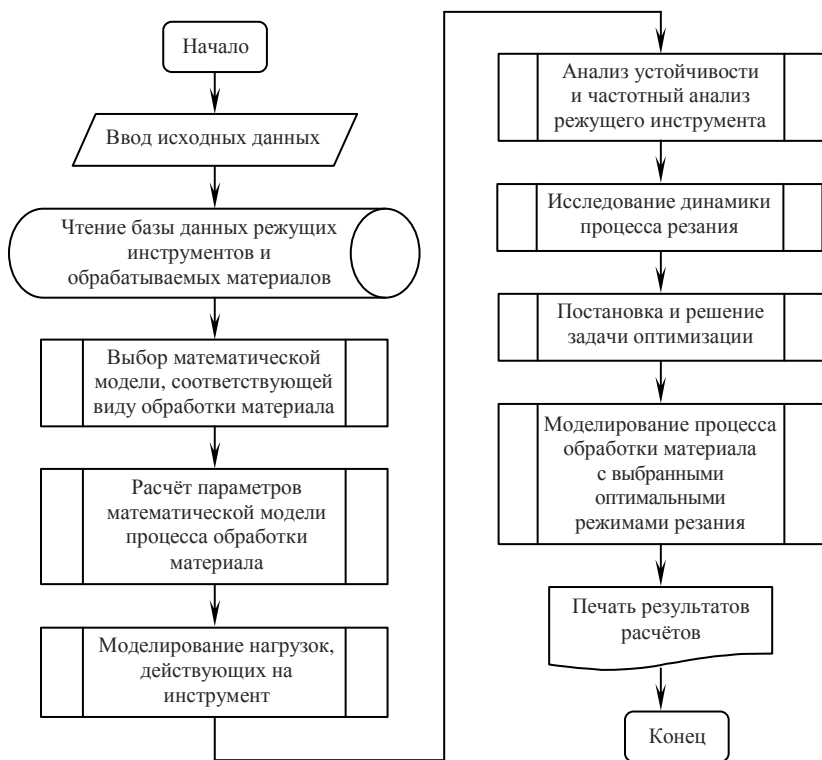
Предлагаемая САПР процессов резания материалов позволит с учетом исходных данных подбирать оптимальные конструктивные (геометрические параметры инструмента) и режимные (режимы резания) параметры для осуществления конкретного технологического процесса резания с максимальной технико-экономической эффективностью.

Предлагается следующая укрупненная блок-схема САПР процессов резания материалов (рис. 2.1), отражающая этапы оптимизации. Рассмотрим их с момента задания исходных данных до момента вывода полученных результатов.

На начальном этапе пользователь вводит марку обрабатываемого материала, обозначение режущего инструмента и условия обработки. Затем производится обработка полученной информации и сопоставление ее с базами данных, по заданным условиям обработки осуществляется выбор математической модели процесса резания, соответствующей заданному виду обработки материала. Вся эта совокупность данных передается в блок, осуществляющий расчет параметров математической модели, который может быть произведен, например, в среде Matlab.

По выходным данным расчета процесса резания исследуется напряженно-деформированное состояние режущего инструмента.





**Рис. 2.1. Обобщенная блок-схема проектирования процессов резания**

В результате проведения такого анализа могут быть получены распределения напряжений по телу инструмента и перемещения режущих кромок инструмента. По этим показателям делается вывод о допустимости принятых режимов резания в зависимости, например, от требуемых показателей к качеству изготавливаемой детали или жесткости СПИД.

С помощью CAE-модулей программ твердотельного моделирования проводится анализ устойчивости и частотный анализ режущего инструмента, в результате которых определяются критические нагрузки и минимальные относительные перемещения режущей кромки инструмента при определенной величине резонансной частоты. Ниже и выше этой величины деформации, как режущей кромки, так и тела самого инструмента довольно значительны. Исходя из этих обстоятельств, делается вывод о необходимости нахождения оптимальных геометрических параметров режущего инструмента с точки зрения обеспечения устойчивости процесса резания.

Далее исследуется динамика процесса резания на основе анализа передаточных функций, частотных характеристик (амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФЧХ), амплитудной частотной характеристики (АЧХ) и т.д.), характеристических уравнений системы СПИД и производится оценка устойчивости процесса по различным критериям устойчивости (критерии Раussa, Гурвица, Найквиста, Михайлова) в зависимости от конкретного процесса резания. В частности, исследование динамики процесса резания может быть осуществлено на основе построения АФЧХ процесса резания и АФЧХ упругой системы заготовка – режущий инструмент. По форме первой АФЧХ делается вывод о необходимости нахождения оптимальных геометрических параметров режущего инструмента с точки зрения обеспечения устойчивости процесса резания, а по форме второй АФЧХ (при использовании известных критериев устойчивости систем) – о необходимости повышения виброустойчивости системы. Например, виброустойчивость системы может быть обеспечена получением граничных значений скорости резания, ниже и выше которых система устойчива и вибрации отсутствуют.

По данным моделирования в модуле CAE-анализа производится выбор диапазона варьирования конструктивных и режимных параметров процесса резания и осуществляется постановка и решение задачи оптимизации этих параметров.

Для создания твердотельных моделей режущего инструмента, проведения анализа напряженно-деформированного состояния, анализа устойчивости и частотного анализа в процессе их работы, моделирования тепловых явлений при резании, а также последующего экспорта твердотельных моделей с расширениями *step* или *iges* в другие CAD/CAE/CAM-системы могут быть применены CAD-программы твердотельного моделирования среднего уровня Autodesk Inventor, SolidWorks с модулем «Simulation» и T-Flex CAD 11 с модулем «T-Flex Анализ» [2]. Кроме этого возможно использовать ANSYS Workbench, COMSOL Multiphysics и MatLab.

Отметим, что перечисленные выше программные продукты построены на едином программном ядре, что позволяет осуществлять передачу твердотельных моделей из одной системы в другую без потери качества электронной модели. Это позволит осуществлять междисциплинарный анализ и сквозное проектирование процесса. Важным свойством перечисленных программных продуктов является также возможность создания параметрических объектов, что позволит ускорить процесс проектирования. На начальном этапе моделирования используются твердотельные модели режущего инструмента, электронные модели которого строятся по каталогам и справочникам. При про-

ведении моделирования и оптимизации процессов резания эти модели инструментов легко трансформируются средствами параметризации в модели нестандартного инструмента. Таким образом, имеется возможность создания базы данных режущего инструмента в виде электронных моделей.

## **2.2. ВЫБОР ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ БЛОКОВ САПР**

### **2.2.1. ХАРАКТЕРИСТИКА СУБД MICROSOFT ACCESS**

При разработке базы данных была использована программа Microsoft Office Access.

В отличие от других СУБД, Access хранит все данные в одном файле, хотя и распределяет их по разным таблицам, как и положено реляционной СУБД [17]. К этим данным относится не только информация в таблицах, но и другие объекты базы данных, которые будут описаны ниже.

Для выполнения почти всех основных операций Access предлагает большое количество Мастеров (Wizards), которые делают основную работу за пользователя при работе с данными и разработке приложений, помогают избежать рутинных действий и облегчают работу неискушенному в программировании пользователю.

MS Access обладает большим количеством преимуществ по сравнению с системами подобного класса.

В первую очередь, можно отметить распространенность, которая обусловлена тем, что Access является продуктом компании Microsoft, программное обеспечение и операционные системы которой использует большая часть пользователей персональных компьютеров. MS Access полностью совместим с операционной системой Windows, постоянно обновляется производителем, поддерживает множество языков.

Также необходимо отметить, что MS Access ориентирован на пользователя с разной профессиональной подготовкой, что выражается в наличии большого количества вспомогательных средств, развитой системы справки и наличия интуитивно-понятного интерфейса.

MS Access предоставляет в распоряжение непрограммирующему пользователю разнообразные диалоговые средства, которые позволяют пользователю создавать приложения, не прибегая к разработке запросов на языке SQL или к программированию макросов или модулей на языке VBA.

Access обладает широкими возможностями по импорту/экспорту данных в различные форматы, от таблиц Excel и текстовых файлов, до практически любой серверной СУБД через механизм ODBC.

Создание приложений на Access во многом подобно всем остальным средствам автоматизации Microsoft Office. Здесь используется интерпретируемый язык Visual Basic for Applications, что приводит, как и при использовании любого интерпретируемого языка, к определенному увеличению затрат процессорного времени и уменьшению скорости работы программ и обработки данных. Для успешной разработки необходимо знать объектную модель самого Access и особенности ее использования.

Access предоставляет возможность вводить данные как непосредственно в таблицу, так и с помощью форм. Форма – это специальный объект-контейнер для других интерфейсных компонентов, таких как поля ввода и отображения данных, кнопки и др. На форме разработчик располагает компоненты для ввода, корректировки, просмотра и группировки данных, в зависимости от специфики приложения. В форму можно помещать рисунки и другие объекты.

В Access имеется возможность ввода нового типа данных – вкладка «Вложение», что позволяет хранить внутри базы данных любые файлы в их «родных» форматах, не требуя поддержки серверов OLE, причем в одну запись поля можно поместить сразу несколько вложений различного типа, а объем занимаемый ими значительно меньше, чем для объектов OLE. В полях вложения можно разместить до 2 Гбайт данных, один файл вложения не должен иметь размер больше 256 Мбайт. При сохранении вложений Access использует сжатие файлов.

Наиболее значимые характеристики сферы применения Microsoft Access, которые были приняты как ключевые:

- использование данных преимущественно в режиме однопользовательского доступа;
- отсутствие жестких требований по защите информации.

Access позволяет защищать данные лишь на пользовательском уровне, что вполне хватает для защиты от просмотра или неосторожных действий в среде сотрудников небольшой компании:

- факторы скорости работы программ не являются критическими;
- распространенность ОС Windows, простота и стандартизированность интерфейса, наличие большого количества удобных Мастеров делают Access очень дружественной для большинства пользователей. И, с другой стороны, можно полагаться на стабильность производителя, компания Microsoft является одним из мировых лидеров в производстве ПО и обеспечивает свои продукты подробной документацией, технической поддержкой и локализацией.

Таким образом Microsoft Office Access предоставляет достаточно средств для наглядного предоставления данных, что позволяет использовать его при разработке базы данных режущих инструментов и обрабатываемых материалов.

## 2.2.2. ХАРАКТЕРИСТИКА СРЕДЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ Delphi 7

При разработке приложений была использована среда программирования Delphi 7.

Система Delphi7 (далее – Delphi) использует технологию визуального программирования и предназначена для разработки приложений «под Windows». Delphi могут использовать программисты со средним уровнем подготовки, основательно знающие Pascal [18].

Среда визуального программирования Delphi 7 реализует концепцию создания приложений, позволяя увидеть объекты на экране монитора до выполнения программы, в процессе разработки ее интерфейса. Без применения технологии визуального программирования процесс отображения требует написания и отладки достаточно сложного кода для создания и настройки объектов, а просмотр созданных объектов возможен только при выполнении программы.

Объектно-ориентированное визуальное программирование относится к системам быстрой разработки приложений (RAD – Rapid Application Development). При разработке интерфейса пользователя в Delphi традиционные структурные методы уступают место итерационным подходам, выполненным в интерактивном режиме Delphi.

Все версии Delphi совместимы снизу вверх, т.е. все приложения, разработанные для более ранних версий, работают без изменения в более поздних версиях Delphi (кроме некоторых приложений для работы с базами данных). При разработке более поздних версий система Delphi дополнена средствами для работы с серверами Access'97, CORBA, MicroSoft Transaction Server (MTS), с технологией OLE, серверами COM Windows. Все они доступны, начиная с Delphi 5. Большинство версий выпускается в нескольких вариантах: Standard (стандартный), Professional (профессиональный), Client/Server (клиент/сервер), Enterprise (для разработки мощных баз данных). Библиотеки компонентов более поздних версий дополняются новыми компонентами.

Среда Delphi позволяет разрабатывать как обычные приложения, так и приложения для работы с базами данных. Delphi предоставляет программисту широкие возможности создания интерфейса пользователя, а также большой набор стандартных компонентов, с помощью которых можно создавать приложения достаточно высокого уровня сложности.

Delphi – это система объектно-ориентированного визуального программирования. Приложения (прикладные программы) Delphi являются интерактивными системами, в которых для организации взаимодействия между пользователем и программой используются методы (подпрограммы), управляемые событиями.

Основой объектно-ориентированного программирования является объект, который можно определить как совокупность данных (компонентов) и методов работы с ними. Объектно-ориентированная программа – это совокупность объектов и способов их взаимодействия. Обмен информацией между объектами производится с помощью сообщений. Сообщения являются результатом появления событий.

Объектно-ориентированное программирование (ООП, OOP – Object Oriented Programming) предоставило разработчикам программ методологию, которая облегчает многократное использование и развитие разработок.

В Delphi можно работать с различными СУБД (системами управления базами данных).

При работе с Delphi можно и не использовать концепции ООП, но использование элементов визуальной разработки автоматически ведет к применению ООП.

Объекты в Delphi – это элементы, из которых строится приложение: форма, рамка, кнопка, метка и пр. Объектом является и включаемый визуальный компонент (например, кнопка) в том виде, как он представлен во время помещения его на форму и во время выполнения программы. Объекты изображаются на экране до выполнения самой программы. Поэтому программирование в Delphi – визуальное.

Основным окном разрабатываемого приложения является форма. В процессе разработки приложения при размещении объекта на форме (например, кнопки) в визуальной среде основные параметры объекта (размер, положение на экране, цвет и пр.) сразу отображаются в виде реального компонента на форме, а соответствующий ему код на языке Object Pascal автоматически записывается в исходный файл формы, который отображает объект в процессе выполнения программы. Затем этот исходный код компилируется в исполняемый машинный код, который выполняется быстрее, чем интерпретируемый код других визуальных сред разработки.

Схематично взаимосвязь программ с Delphi и Windows представлена на рис. 2.2.

Среда Delphi 7 представляет собой интегрированную оболочку разработчика (рис. 2.3), в которую входит набор специализированных программ, ответственных за разные этапы создания готового приложения [19].

Исходный текст программы готовится в среде Delphi 7 с помощью встроенного редактора исходных текстов. Этот редактор специализирован. Он отличается гибкими возможностями цветового выделения различных элементов текста программы (ключевых слов, названий, операций, чисел и строк) и предоставляет возможность быстрого ввода часто встречающихся конструкций.

Левая панель редактора представляет собой Проводник, позволяющий быстро перемещаться между частями исходного текста и по структуре создаваемой программы. Важнейшая характеристика разрабатываемой программы – удобство ее пользовательского интерфейса, наличие и доступность необходимых элементов управления.

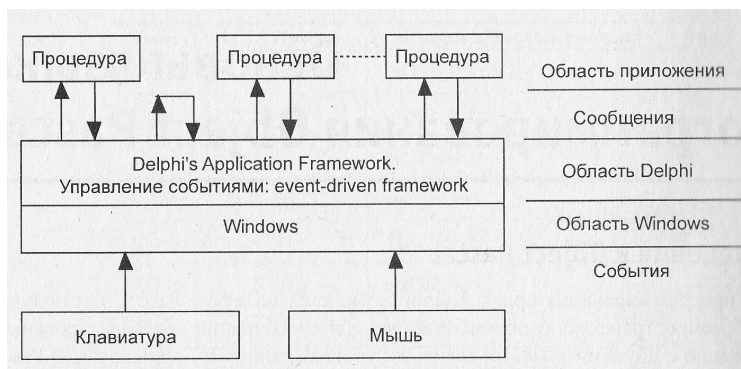


Рис. 2.2. Схема взаимосвязи программы приложения с Delphi и Windows

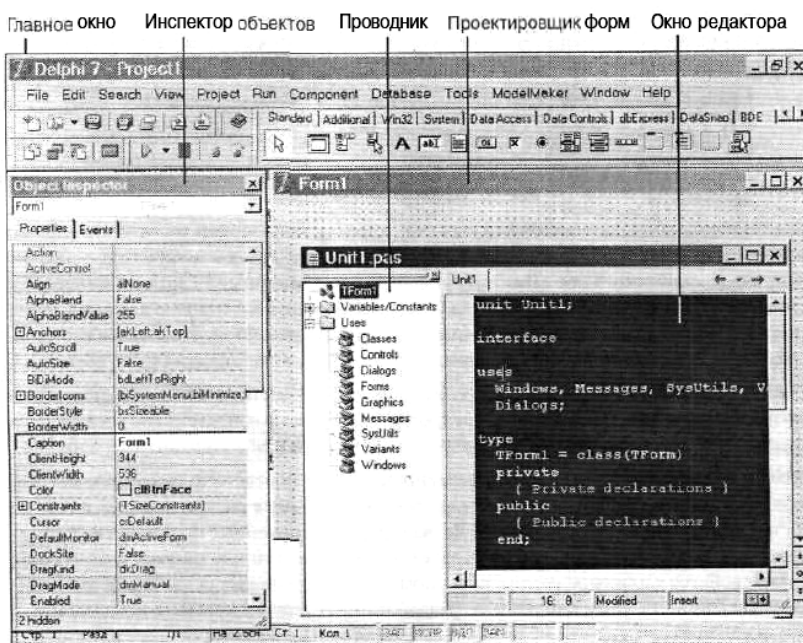


Рис. 2.3. Основные окна системы Delphi 7

В системе Delphi 7 имеется специальный проектировщик форм, с помощью которого окна будущей программы подготавливаются в виде форм. Проектировщик позволяет подобрать оптимальные размеры окон, разместить и настроить всевозможные элементы управления и меню, добавить готовые изображения, указать заголовки, подсказки, подписи и так далее.

Таким образом среда разработки Delphi 7 охватывает широкие возможности для создания приложений для Windows, что позволяет использовать ее для проектирования алгоритмов работы модулей создаваемой системы.

### 2.2.3. ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМЫ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ AUTODESK INVENTOR 2011

Для создания твердотельных моделей режущих инструментов и их анализа применяется система твердотельного моделирования Autodesk Inventor 2011.

Autodesk Inventor 2011 – это семейство продуктов для машиностроительного и промышленного 3D-проектирования, включающее в себя средства моделирования, создания инструментальной оснастки и обмена проектными данными. Являясь основой технологии цифровых прототипов, Autodesk Inventor позволяет создавать изделия более высокого качества за меньшее время.

Модель, подготовленная в Inventor, является точным цифровым 3D-прототипом изделия, с помощью которого можно проверять конструкцию в действии параллельно с ведением конструкторских работ, благодаря чему снижается потребность в изготовлении физических опытных образцов. Применение цифровых прототипов для конструирования, визуализации и тестирования продукции помогает более эффективно обмениваться проектной информацией, сокращать количество ошибок, быстрее выводить инновационные изделия на рынок.

Autodesk Inventor сочетает в себе ускорители проектирования и сборочные инструменты. Применяя их, проектировщик будет уверен, что все детали и компоненты расположены в изделии корректно.

Inventor обеспечивает быструю сборку отдельных деталей и узлов в единое изделие для формирования цельной структуры и проверки технологичности сборочных операций. Вставка и размещение новых компонентов производится с помощью зависимостей, задающих фиксированные и движущиеся компоненты.

Виртуальная проверка работы изделия, разработанного в Inventor, снижает вероятность ошибок и увеличивает технологичность его изготовления. Если между деталями обнаруживается статическое пересе-



чение, общий объем выделяется цветом. Путем вариации сборочных зависимостей и перетаскивания компонентов определяется, не будут ли они сталкиваться при работе механизма.

Преимущества 3D-проектирования в полной мере проявляются при работе со сложными изделиями, которые содержат большое количество компонентов. Упростить обработку таких изделий можно, преобразуя узлы в упрощенные модели деталей или в модели, составленные из поверхностей и из-за этого занимающие минимальный объем памяти. Кроме того, для управления требованиями к памяти и производительностью работы применяются уровни детализации. Существует специальный индикатор, указывающий, сколько свободной памяти доступно.

Использование библиотечных компонентов позволяет добиться большей стандартизации на предприятии. Такие компоненты совсем не сложно создавать и затем многократно применять в проектах. Для поиска компонентов имеется браузер с удобными функциями поиска и фильтрации элементов (рис. 2.4). Библиотека содержит более 650 тыс. элементов моделей. Это – гайки, болты, винты и другие детали. Можно создавать в библиотеке новые файлы и помещать в них собственные модели.

Можно сократить затраты времени на вставку покупных компонентов в модель изделия. Существует библиотека покупных компонентов, в которую входят модели от более чем 100 ведущих производителей стандартных деталей. Браузер библиотеки позволяет быстро и легко извлекать из нее модели в формате Inventor. Библиотека покупных компонентов полностью интегрирована с библиотекой компонентов Autodesk Inventor.

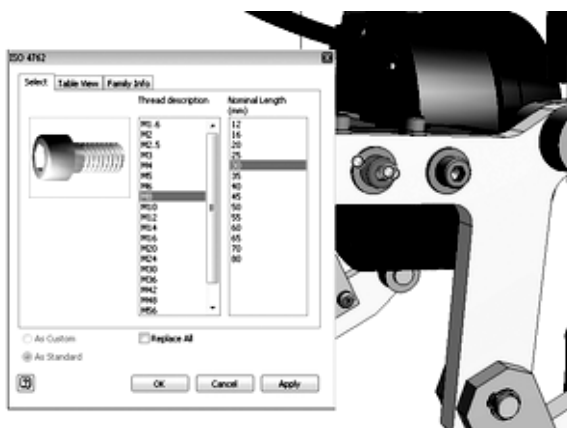


Рис. 2.4. Библиотека компонентов

Существует возможность работы с проектами, разработанными в других приложениях. Autodesk Inventor предоставляет обширный комплект трансляторов для открытия и сохранения файлов других САПР, а также файлов общепринятых в отрасли форматов, таких как IGES и STEP.

Существует возможность открывать файлы других форматов, предоставляемые поставщиками и заказчиками. Кроме того, им можно передавать 3D-данные в формате Inventor. С помощью трансляторов поддерживается обмен данными между Inventor и такими системами, как CATIA V5, UGS-NX, SolidWorks и Pro/ENGINEER. Inventor поддерживает прямой импорт и экспорт файлов CATIA V5, JT 6, JT 7, Parasolid и GRANITE, а также прямой импорт файлов UGS-NX, SolidWorks, Pro/E и SAT.

Существует возможность совместной работы с пользователями других 3D САПР/АСУП. Она реализуется благодаря способности Inventor открывать и сохранять файлы множества распространенных форматов.

Inventor имеет специальную среду для проверки и исправления импортированной 3D-геометрии (рис. 2.5). Она оснащена специализированными инструментами для анализа и исправления моделей, импортированных из форматов STEP и IGES. Можно временно изолировать объекты с ошибками геометрии, такими как разрывы поверхностей или несоответствие ограничивающих кривых. Среда содержит полный набор инструментов проверки, редактирования и автоматизированного исправления изолированных объектов: тел, поверхностей, каркасов и точек. Исправленные данные принимаются в Inventor в качестве 3D-моделей деталей, поверхностей и объемных каркасов.



Рис. 2.5. Проверка моделей

Проверить и оптимизировать работу изделия можно еще до его изготовления. Модуль Inventor Simulation Suite включает простые в использовании и тесно взаимодействующие друг с другом средства динамического анализа и расчета напряжений, которые помогают изучить поведение деталей и изделий еще до изготовления опытного образца.

Средства динамического анализа являются частью 3D-среды промышленного проектирования, поэтому выполнение анализа на протяжении всего процесса проектирования является очень эффективной мерой с точки зрения денежных затрат. Среда динамического анализа поддерживает моделирование движения и статичного состояния, а также позволяет выполнять расчеты методом конечных элементов на уровне детали и на уровне изделия.

Динамический анализ в Autodesk Inventor позволяет:

- оптимизировать проекты изделий с минимальными затратами материалов;
- уменьшать концентрацию напряжений и выполнять требования по безопасности;
- изменять размеры компонентов для уменьшения расхода энергии и стоимости эксплуатации;
- улучшать качество изделия за счет уменьшения нежелательной вибрации;
- изучать поведение движущихся деталей для улучшения эксплуатационных характеристик;
- балансировать вращающиеся компоненты для уменьшения внутренних напряжений.

Возможность моделирования движения в Autodesk Inventor использует сборочные зависимости 3D-модели для определения жестких тел, генерации подвижных соединений и расчета динамического поведения. Это позволяет изучить поведение изделия, в частности, расположение, скорости и ускорения движущихся деталей.

Пользователь может задавать динамические нагрузки и моменты разных типов, а также переменные во времени усилия в Редакторе профилей нагрузок, что способствует оценке поведения изделия под различными режимами нагрузки.

Расчет методом конечных элементов обеспечивает высокую точность и достоверность результатов расчета напряжений. Встроенные средства расчета методом конечных элементов обеспечивают прогноз напряжения и деформации при пиковых нагрузках за счет передачи значений сил реакции из динамического анализа в функцию расчета напряжений.

Функция расчета статике позволяет оптимизировать запас прочности в проектируемых изделиях.

Расчет методом нормальных волн позволяет предотвратить потенциально опасные вибрационные колебания, не прибегая к проведению испытаний на опытных образцах. Путем изучения генерирующих волн можно рассчитать вибрационные колебания и собственные частоты детали и изделий, а затем внести необходимые изменения для уменьшения амплитуды колебаний.

Параметрический расчет зависимостей изделий и анализ влияния различных значений параметров выполняется с помощью таблицы параметров. Он способствует изучению влияния изменений таких параметров, как толщина стенки корпуса, радиус сопряжения и диаметр отверстия.

Autodesk Inventor позволяет управлять материалами, нагрузками, зависимостями, сеткой, качеством решения, вариантами отображения и видимостью компонентов. Кроме того, поддерживается выполнение нескольких динамических анализов. Также можно выбрать автоматический или ручной способ задания контактов.

Существует несколько способов вывода результатов расчетов. Поддерживается вывод результатов в виде цветных графиков, сетки, анимации и интерактивных щупов. Можно выделить отдельные компоненты изделия путем скрытия других компонентов на виде.

Autodesk Inventor включает функцию формирования пользовательских отчетов со встроенной графикой.

Все вышеперечисленные особенности Autodesk Inventor позволяют использовать его для создания твердотельных моделей режущего инструмента, проведения анализа напряженно-деформированного состояния, анализа устойчивости и частотного анализа в процессе их работы, моделирования тепловых явлений при резании, а также последующего экспорта твердотельных моделей с расширениями step или iges в другие CAD/CAE/CAM-системы.

### **3. РАЗРАБОТКА БЛОКА ЗАДАНИЯ ИСХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ**

---

В проектируемой САПР базы данных будут использоваться как хранилище всех параметров процесса резания, в которое будет обращаться программа при задании пользователем начальных данных и при варьировании этих данных на этапах моделирования и оптимизации процесса резания.

#### **3.1. РАЗРАБОТКА БАЗЫ ДАННЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ И ОБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ**

По материалу режущей части резцы делятся на быстрорежущие, твердосплавные и с пластинами из керамики и сверхтвердых материалов (алмаз, эльбор и др.). Наибольшее применение в промышленности находят резцы из первых двух групп, поэтому данные о них будут заноситься в таблицы.

На резцы с пластинами из быстрорежущей стали предусмотрены следующие ГОСТы: ГОСТ 18868–73 «Резцы токарные проходные отогнутые», ГОСТ 18869–73 «Резцы токарные проходные прямые», ГОСТ 18870–73 «Резцы токарные проходные упорные», ГОСТ 18871–73 «Резцы токарные подрезные торцовые», ГОСТ 18872–73 «Резцы токарные расточные для обработки сквозных отверстий», ГОСТ 18873–73 «Резцы токарные расточные для обработки глухих отверстий», ГОСТ 18873–73 «Резцы токарные прорезные и отрезные», ГОСТ 18874–73 «Резцы токарные фасочные». На резцы с твердосплавными пластинами предусмотрены следующие ГОСТы: ГОСТ 18877–73 «Резцы токарные проходные отогнутые», ГОСТ 18878–73 «Резцы токарные проходные прямые», ГОСТ 18879–73 «Резцы токарные проходные упорные», ГОСТ 18880–73 «Резцы токарные подрезные отогнутые», ГОСТ 18881–73 «Резцы токарные чистовые широкие», ГОСТ 18882–73 «Резцы токарные расточные для обработки сквозных отверстий», ГОСТ 18883–73 «Резцы токарные расточные для обработки глухих отверстий», ГОСТ 18884–73 «Резцы токарные отрезные». Эти нормативные документы содержат таблицы (рис. 3.1), которые могут быть применены при построении базы данных. Обозначения резцов (такие как 2101-0001, 2101-0008) можно использовать в качестве первичного ключа, который будет служить для уникальной идентификации записей таблицы. Также в ГОСТах есть таблицы геометрических параметров инструмента (рис. 3.1).

Размеры в мм

Резцы								Сечение резца b-b	L	Тип пластин по ГОСТ 25426-90	
с углом резки пластины 10°				с углом резки пластины 0°							
правые		левые		правые		левые					
Обозна- чение	Приме- няе- мость	Обозна- чение	Приме- няе- мость	Обозна- чение	Приме- няе- мость	Обозна- чение	Приме- няе- мость				
2101-0001		2101-0002		—		—		8-8	50	07 (угол резки 10°)	
2101-0003		2101-0004		—		—		10-10	60		
2101-0005		2101-0006		—		—		12-12	70		
2101-0007		2101-0008		2101-0051		2101-0052		16-16	80		
2101-0009		2101-0010		2101-0053		2101-0054		20-12	100		
2101-0011		2101-0012		2101-0055		2101-0056		20-20	100		
2101-0013		2101-0014		2101-0057		2101-0058		25-16	120		
2101-0015		2101-0016		2101-0059		2101-0060		32-20	140		
											67: 07 (угол резки 0°)

Рис. 3.1. Таблица из ГОСТ 18879-73

Часто при расчетах и моделировании процессов резания требуется знать физико-механические и теплофизические свойства материала режущей части инструмента, что диктует необходимость свести эту информацию в отдельную таблицу. Нелишним будет и добавить в базу данных информацию о конструкции и размерах сменных пластин (ГОСТ 2379-77 «Пластины из быстрорежущей стали к резцам», ГОСТ 25395-90 «Пластины твердосплавные напаиваемые»). В этом случае первичным ключом может считаться номер пластины.

Таким образом, за основу базы данных на токарные резцы можно взять разделение резцов на твердосплавные и быстрорежущие, а уже эти две группы поделить согласно той классификации, которую дают ГОСТы. Повторяющиеся данные об углах в плане (главный угол в плане  $\phi$ , вспомогательный угол в плане  $\phi_1$ , угол при вершине  $\epsilon$ ) можно свести в отдельную таблицу. Также в схему базы данных следует добавить таблицы с параметрами напаиваемых пластин и осуществить связь с ними через поле «Номер пластины».

Исходя из всего вышеизложенного, можно составить схему базы данных резцов, которая представлена на рис. 3.2 на примере быстрорежущих резцов.

Список материалов обрабатываемых на токарных станках довольно обширен. И, тем не менее, можно выделить три основные группы: стали, чугуны и цветные металлы и сплавы. Для каждой из этих групп были составлены отдельные таблицы, содержащие информацию о физико-механических и теплофизических свойствах этих материалов. В базу данных были занесены те свойства материалов, которые не изменяются от термообработки и не зависят от вида и состояния заготовки (плотность, теплостойкость и др.). В качестве первичного ключа выбрана марка материала.

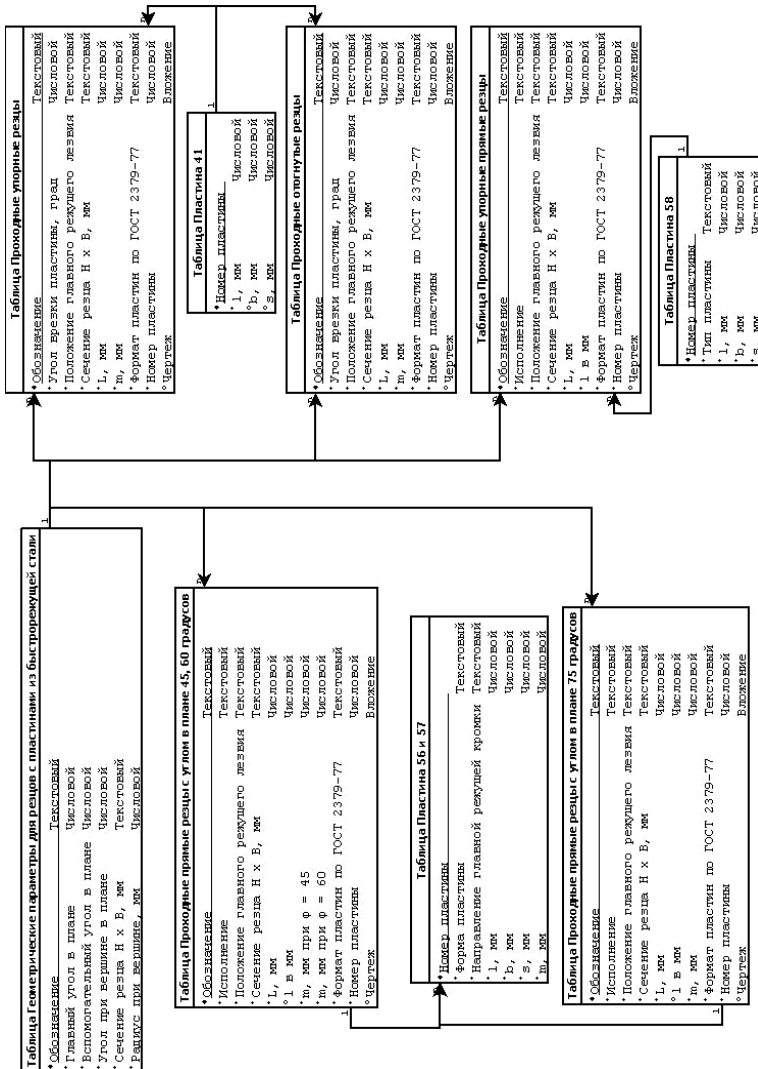


Рис. 3.2. Схема данных базы токарных быстрорежущих резцов

После того как были созданы таблицы для всех видов резцов на каждую из них была составлена форма. Кроме полей отображения данных на форму помещены кнопка добавления новых записей в таблицу и поле со списком, позволяющее перейти к нужной записи по обозначению резца. Также в окно добавлена подчиненная форма, описывающая параметры пластины, установленной на резце. Для большей наглядности была вставлена схема резца и пластины из ГОСТа, чтобы дать пользователю представление об их конструкции. Все элементы управления снабжены соответствующими надписями, поясняющими их назначение. В таблицу с основными параметрами резца было добавлено поле Вложения, которому дано название «Чертеж». В него помещены трехмерные модели резцов, соответствующие каждой строчке таблицы. Теперь найдя нужный ему резец в базе данных пользователь может открыть и посмотреть его трехмерную модель. Одна из созданных форм представлена на рис. 3.3.

Для удобства пользования формы были объединены в три группы: «Проходные резцы», «Проходные упорные резцы» и «расточные резцы». Эти группы помещены во вкладки, как показано на рис. 3.4, 3.5.

Немаловажное значение при проектировании процессов резания имеет выбор материала режущей части инструмента. При этом необходимо увязывать теплофизические свойства материала напаиваемой на резец пластины с его геометрическими параметрами.

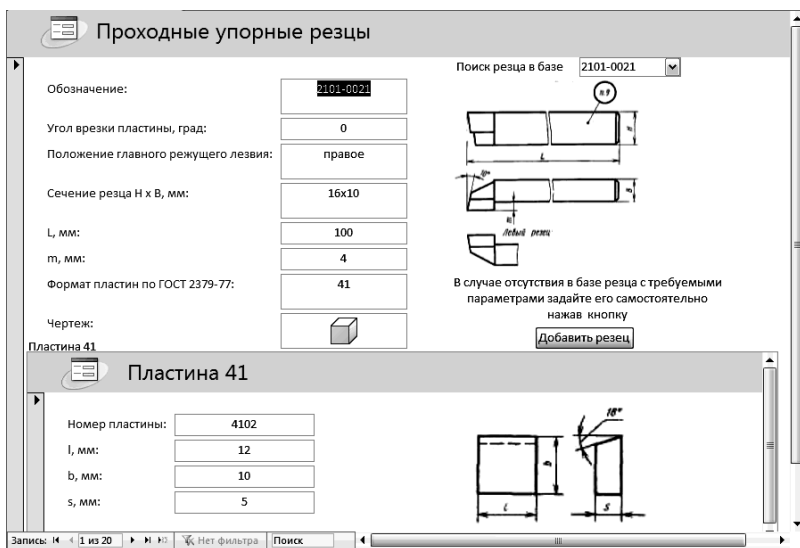
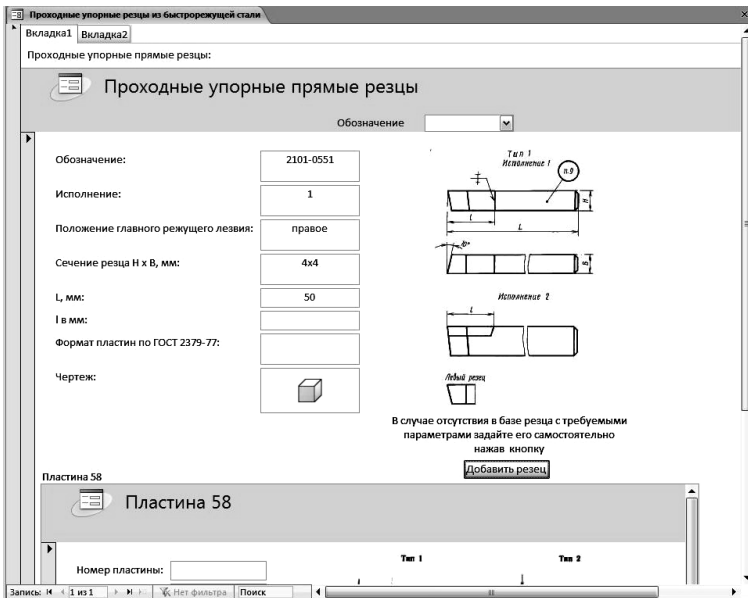
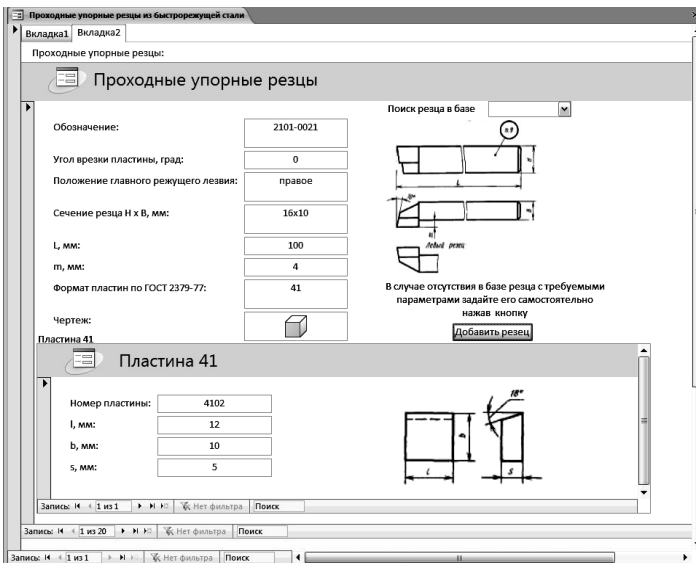


Рис. 3.3. Пример разработанной формы





**Рис. 3.4. Форма «Проходные упорные резы из быстрорежущей стали», вкладка 1**



**Рис. 3.5. Форма «Проходные упорные резы из быстрорежущей стали», вкладка 2**

**Материал режущей части**

Поиск по марке:

Марка:

Вид материала:

Коэффициент\_теплопроводности:

В случае отсутствия вашего материала в базе добавьте его нажав эту кнопку

После выбора материала режущей части вы можете перейти к выбору резца нажав соответствующие кнопки

Записи: 1 из 9 | Нет фильтра | Поиск

**Рис. 3.6. Форма «Материал режущей части»**

Задача была решена следующим образом. Была создана таблица теплофизических свойств материала режущей части инструмента и форма к ней (рис. 3.6). По аналогии с предыдущими формами были добавлены соответствующие элементы управления. Для обеспечения связи с таблицами резцов в окно добавлены дополнительные три кнопки, названия которых соответствуют основным трем видам резцов («Проходные резцы», «Проходные упорные резцы» и «Расточные резцы»). При нажатии на эти кнопки база данных сверяется со значением поля «Вид материала». Если там значится «Твердый сплав» откроется объединенная форма твердосплавных резцов соответствующих названию кнопки. Если «быстрорежущая сталь», то откроется соответствующая форма быстрорежущих резцов.

По принципу создания форм на резцы спроектированы формы на три основные группы обрабатываемых материалов (рис. 3.7 – 3.9).

С целью навигации по базе данных имеется главная кнопочная форма рис. 3.9). ее элементами являются объекты форм и отчетов. Здесь кнопки предназначены для выполнения следующих действий (сверху вниз):

- три кнопки для открытия форм материалов, соответствующих их названию;
- открытие формы «Материал режущей части», с которой пользователь может осуществить дальнейшую навигацию по базе;
- закрытие базы данных и Access.

**Стали**

Марка: 40X

Название:	Сталь легированная
Марка:	40X
Коэффициент_теплопроводности, м. кв/с:	0.0000675
Коэффициент_теплопроводности, Дж/(м*с*град):	33.9
Теплостойкость, Дж/(кг*град):	640
Плотность, кг/м. куб:	7850
Модуль упругости E:	210000

В случае отсутствия вашего материала в базе добавьте его нажав эту кнопку

[Добавить новую марку](#)

[Переход к главной форме](#)

**Рис. 3.7. Форма «Стали»**

**Чугуны**

Марка: СЧ12-28

Название:	Чугун серый
Марка:	СЧ12-28
Коэффициент_теплопроводности, м. кв/с:	0.00001135
Коэффициент_теплопроводности, Дж/(м*с*град):	39.8
Теплостойкость, Дж/(кг*град):	502
Плотность, кг/м. куб:	7000
Модуль упругости E:	80000

В случае отсутствия вашего материала в базе добавьте его нажав эту кнопку

[Добавить новую марку](#)

[Переход к главной форме](#)

**Рис. 3.8. Форма «Чугуны»**

**Цветные металлы и сплавы**

Марка: Д1

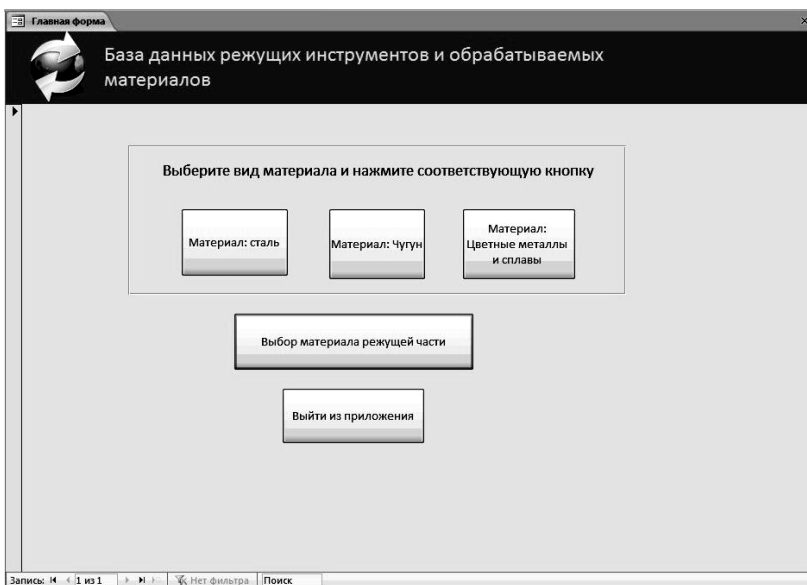
Название:	Дюралюминий
Марка:	Д1
Коэффициент_теплопроводности:	0,0000585
Коэффициент_теплопроводности:	151
Теплостойкость:	920
Плотность:	2800
Модуль упругости E:	74000

В случае отсутствия вашего материала в базе добавьте его нажав эту кнопку

[Добавить новую марку](#)

[Переход к главной форме](#)

**Рис. 3.9. Форма «Цветные металлы и сплавы»**



**Рис. 3.9. Главная кнопочная форма**

В данной работе нами сделаны первые шаги на пути к созданию баз данных режущих инструментов и обрабатываемых материалов. Была разработана логическая схема и интерфейс базы данных на примере токарных резцов. В дальнейшем планируется разработка аналогичных баз данных для других видов обработки.

### **3.2. СОЗДАНИЕ БЛОКА ОБРАБОТКИ НАЧАЛЬНЫХ ДАННЫХ**

Следующим этапом по созданию САПР является разработка подпрограммы, отвечающей за получение начальных данных, переработку этой информации, сверку ее с базой данных и передачу параметров, необходимых для расчетов другим блокам системы.

Работа с САПР для оптимизации процесса резания предполагает наличие всех исходных данных об этом процессе, как то: сведения об инструменте (его вид, тип, материал), режимах резания (скорость резания, подача, глубина резания, сила резания), обрабатываемом материале (вид, твердость и т.д.). Информация об инструменте и обрабатываемом материале занесена в созданную базу данных. Теперь требуется разработать приложение, извлекающее нужные пользователю параметры из таблиц базы и увязывающее их с режимами резания. В ре-

зультате на выходе должен получиться блок, осуществляющий задание начальных параметров обработки.

Среда Delphi обладает практически всеми возможностями современных систем управления базами данных. Она имеет встроенную поддержку языка структурированных запросов (SQL). С помощью Delphi можно разрабатывать как локальные, так и удаленные базы данных [21].

Для соединения проектируемого приложения с базой данных используется технология ADO.

ActiveX Data Objects (ADO) – это технология стандартного обращения к реляционным структурам данных от Microsoft.

В основе архитектуры ADO лежит объектная модель компонентов COM (Component Object Model). Все объекты и интерфейсы ADO представляют собой интерфейсы и объекты COM.

Модель COM является базовой для технологий ActiveX и OLE. Проиллюстрировать это отношение можно на примере объекта TObject, как базового объекта для VCL Delphi.

Технология COM работает с так называемыми COM-объектами. Во многом COM-объекты похожи на обычные объекты визуальной библиотеки компонентов Delphi. Но, в отличие от последних, COM-объекты не содержат поля, в них находятся лишь свойства и методы, а также интерфейсы.

Интерфейсы – это группы логически или семантически связанных процедур, которые обеспечивают связь между поставщиком услуги (сервером) и его клиентом. Названия интерфейсов начинаются с буквы I.

Обычный COM-объект включает в себя один или несколько интерфейсов. Кроме того, COM-объект содержит методы, которые позволяют приложению пользоваться им.

Технология COM имеет два явных плюса:

- создание COM-объектов не зависит от языка программирования. Таким образом, COM-объекты могут быть написаны на различных языках;

- COM-объекты пригодны для использования в любой среде программирования под Windows. В число этих сред входят Delphi, Visual C++, C++ Builder, Visual Basic и многие другие.

Хотя технология COM имеет очевидные достоинства, ей свойственны также и минусы, среди которых можно выделить зависимость от платформы. Эта технология применима только в операционной системе Windows и на платформе Intel.

Технология COM реализуется с помощью COM-библиотек (такие файлы операционной системы, как OLE32.DLL и OLEAUT32.DLL).

COM-библиотеки содержат набор стандартных интерфейсов, которые отвечают за функциональность COM-объекта, а также небольшой набор функций API, обеспечивающих создание COM-объектов и управление ими.

В Delphi воплощение и поддержка технологии COM называется Delphi ActiveX framework, DAX. Реализация DAX описана в модуле AxCtrls.

Рассмотрим особенности архитектуры ADO (рис. 3.10).

Для работы с механизмом ADO в Delphi 7 предназначено семь стандартных компонентов, расположенных на закладке ADO палитры компонентов (рис. 3.11).

Опишем те компоненты, которые используются в разрабатываемом приложении.

Первый компонент называется ADOConnection. С его помощью можно указывать местоположение базы данных и работать с транзакциями. Рассмотрим основные свойства компонента ADOConnection, отображаемые в окне инспектора объектов (табл. 3.1).

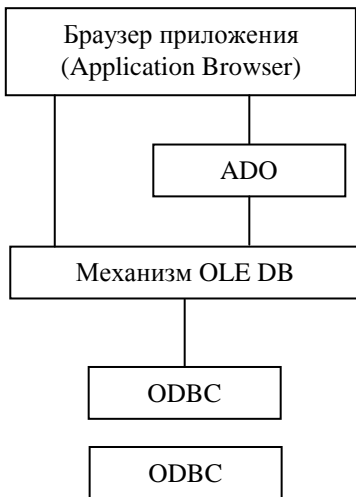


Рис. 3.10. Архитектура ADO

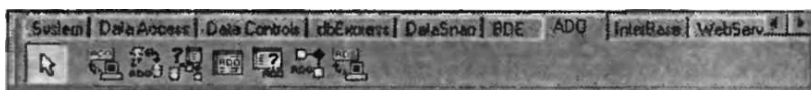


Рис. 3.11. Закладка ADO

### 3.1. Основные свойства компонента TADOSConnection

Название свойства	Тип свойства	Краткое описание
Attributes	TXactAttributes	Установка данного свойства позволяет определить, как ведет себя соединение с базой данных, т.е. будет ли открыться новая транзакция автоматически. Содержит два подчиненных свойства булевого типа (по умолчанию имеют значение false). xaCommitRetaining – определяет, будет ли новая транзакция открываться автоматически при подтверждении транзакции, и прекращает выполнение других транзакций; xaAbortRetaining – определяет, будет ли новая транзакция открываться автоматически при подтверждении транзакции, и отменяет с откатом (RollBack) выполнение других транзакций
CommandTimeout	Integer	Определяет время (в секундах) на выполнение команды. По истечении заданного интервала команда будет считаться невыполненной. По умолчанию длительность выполнения команды равна 30
Connected	Boolean	Применяется для установления соединения с набором данных. По умолчанию имеет значение false, т.е. связь с набором данных не установлена
ConnectionString	WideString	Содержит строку с информацией о месте хранения данных (о сервере базы данных)

Название свойства	Тип свойства	Краткое описание
ConnectOptions	TConnectOption	Указывает тип соединения – синхронное или асинхронное: соConnectUnspecified – синхронный тип соединения (по умолчанию); соAsyncConnect – асинхронный тип соединения. Полезен, когда сервер базы данных очень медленный, но необходимо помнить, что не все данные будут доступны сразу после установки соединения
DefaultOatbase	WideString	Определяет базу данных, которая используется для соединения по умолчанию. В случае, когда соединение с базой данных, указанной в свойстве ConnectionString, невозможно установить, будет произведено подключение к базе данных, указанной в данном свойстве
LoginPrompt	Boolean	Указывает, будет ли диалог ввода имени пользователя и пароля отображаться непосредственно перед соединением с базой данных. По умолчанию имеет значение true, т.е. диалог появляться будет
Name	TComponentName	Определяет имя компонента ADOConnection, которое будет использоваться в тексте программы
Provider	WideString	Определяет провайдера соединения



Следующий компонент закладки ADO называется ADOTable. Он предназначен для доступа к таблице с помощью механизма ADO. Рассмотрим свойства этого компонента.

Свойство Active имеет тип Boolean и позволяет открывать и закрывать набор данных. Его можно установить в окне инспектора объектов, но чаще всего такие операции с наборами данных производят во время выполнения приложения.

Свойство TableName компонента ADOTable имеет тип string и содержит имя текущей таблицы базы данных. В терминах Delphi каталог – это база данных, а файлы каталога – таблицы. Поэтому после указания пути к базе данных через свойство ConnectionString можно выбрать нужную таблицу из раскрывающегося списка свойства TableName в окне инспектора объектов (там будут отображены все названия файлов таблиц, находящихся в выбранном каталоге). Кроме того, значение этого свойства можно задавать и во время работы приложения, предварительно закрыв набор данных.

Свойство Connection – указатель на соединение с базой данных, TADODConnection.

Таким образом, технология ADO предоставляет нам достаточно возможностей для обеспечения соединения разрабатываемого приложения с базой данных.

Для считывания данных из таблиц воспользуемся следующим способом.

При поиске записей (особенно в больших таблицах) очень важно наличие индекса у полей, по которым будет производиться поиск. Во-первых, это ускоряет обработку данных. Во-вторых, некоторые методы поиска работают только с индексированными полями.

При поиске записей по значению полей используются методы Locate и Lookup. Для данных методов можно задействовать неиндексированные поля.

Метод Locate описывается следующим образом:

```
function Locate (const KeyFields: String; const KeyValues: Variant.  
Options-TLocateOptions): Boolean.
```

Метод ищет запись, которая соответствует заданным значениям полей. Параметр KeyFields определяет названия полей, по которым будет производиться поиск. Поля разделяются точкой с запятой. В параметре KeyValues указываются значения этих полей. Параметр Options позволяет устанавливать дополнительные критерии поиска:

- loCaseInsensitive – не учитывать регистр букв;
- loPartialKey – учитывать частичное совпадение значений.

Кроме метода `Locate`, для поиска записей применим также метод `Lookup`. Описание метода `Lookup` выглядит так:

```
function Lookup(const KeyFields: String; const KeyValues: Variant;  
const ResultFields: String); Variant;
```

Параметры `KeyFields` и `KeyValues` иницируются так же, как и в методе `Locate`. Метод `Lookup` в целом похож на метод `Locate`, но есть два основных отличия:

- метод `Lookup` осуществляет поиск на точное соответствие значений, указанных в параметрах;
- метод `Lookup` не переводит курсор на найденную запись, а считывает значения полей найденной записи.

Для получения значений полей найденной записи нужно указать требуемые названия полей в параметре `ResultFields`. Значения только этих полей и будут считаны из найденной записи. Порядок следования полей в параметре не имеет значения.

В случае успешного поиска метод `Lookup` возвращает в качестве результата значение типа `Variant`. Если в списке `ResultFields` всего один элемент, то будет возвращено значение типа `Variant`. Если же список содержит несколько полей, на выходе получим массив типа `Variant`, содержащий столько элементов, сколько перечислено в параметре `ResultFields`.

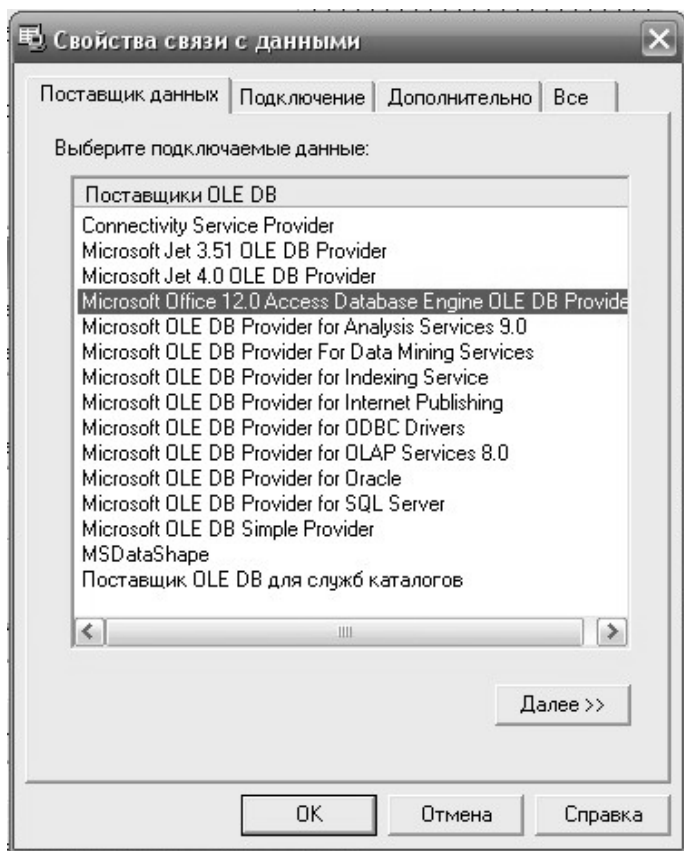
Метод `Lookup` возвращает значение `Null` при неудачном поиске.

Для наших целей больше подходит метод `Lookup`.

Для примера рассмотрим соединение приложения с таблицей «Стали». Помещаем на форму компонент `ADOConnection1`. Укажем базу данных – в свойстве `ConnectionString` компонента `ADOConnection1` нажмем кнопку с многоточием. Появится диалоговое окно редактора параметров соединения (рис. 3.12).



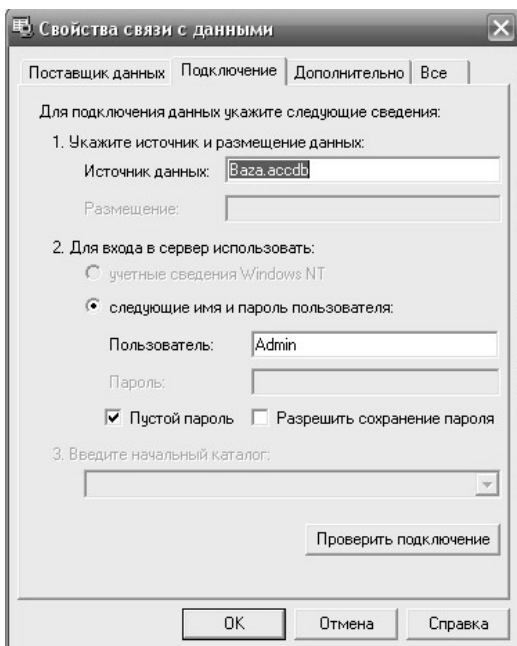
Рис. 3.12. Окно редактора параметров соединения



**Рис. 3.13. Окно «Свойства связи с данными».**  
**Вкладка «Поставщик данных»**

Данное окно предоставляет вам право решать, каким образом будет указана строка связи с базой данных, расположенной на сервере. Один из вариантов – интерактивный ввод строки в поле Use Connection String. Кроме того, можно использовать заранее подготовленный файл, содержащий такую строку связи (Use Data Link File). Установим переключатель в положение Use Connection String и нажмем кнопку Build. Откроется окно связи с данными (рис. 3.13).

На вкладке «Поставщик данных» отображается провайдер соединения. Базы данных Microsoft Access 2007 работают под управлением поставщика Microsoft Office 12.0 Access Database Engine OLE DB Provider. Выбираем его и жмем «Далее». Открывается вкладка «подключение» (рис. 3.14).



**Рис. 3.14.** Окно «Свойства связи с данными». Вкладка «Подключение»

Выбираем местонахождение базы данных. В поля «Пользователь» и «Пароль» вводим логин и пароль от базы данных так как показано на рис. 3.15. Жмем дважды ОК.

Включим соединение. Для этого в свойство Connected запишем True.

Теперь, после того как мы настроили соединение с базой данных, перейдем к извлечению информации из таблиц.

Помещаем на форму компонент ADOTable1. Будем использовать его для соединения с таблицей «Стали». Чтобы отличать этот компонент от других ему подобных, связанных с другими частями базы данных, свойству Name присвоим значение Stul1. Для соединения компонента с базой данных в свойстве Connection укажем на ADOConnection1. Из раскрывающегося списка свойства TableName выбираем имя таблицы «Стали». Теперь компонент Stul1 связан с нужной нам таблицей.

Производим выборку информации из базы данных, используя функцию Lookur. В качестве параметра KeyFields используем ключевое поле «Марка». Теперь программе осталось запросить у пользователя марку, которую он хочет найти и осуществить поиск параметров этой марки. Данные операции отображены в следующем коде:

```

h:=InputBox('Выборка информации из базы данных','Укажите
марку материала и щелкните на ОК,');
marka:=Stuli.Lookup('Марка',h,'Теплостойкость');
mat:=Stuli.Lookup('Марка',h,'Плотность');
res:=Stuli.Lookup('Марка',h,'Коэффициент_теплопроводности');
kt:=Stuli.Lookup('Марка',h,'Коэффициент_теплопроводности');
tau:=Stuli.Lookup('Марка',h,'Сопротивление_пластичному_сдвигу');
mE:=Stuli.Lookup('Марка',h,'Модуль_упругости_E');

```

Здесь переменной h задается значения марки, а через метод Lookup переменной marka, mat, res, kt, tau, mE передается значение теплофизических и физико-механических параметров выбранного материала.

Таким же образом из базы данных можно извлечь информацию о теплофизических и физико-механических свойствах чугунов и цветных сплавов, геометрических параметрах режущего инструмента и свойствах материала его режущей части. За эти действия на форме отвечают кнопки (рис. 3.16): «Запрос по материалу» – свойства обрабатываемого материала, «Выбор материала режущей части» – свойства материала режущей части, «Запрос по углам в плане» – геометрические параметры резца.

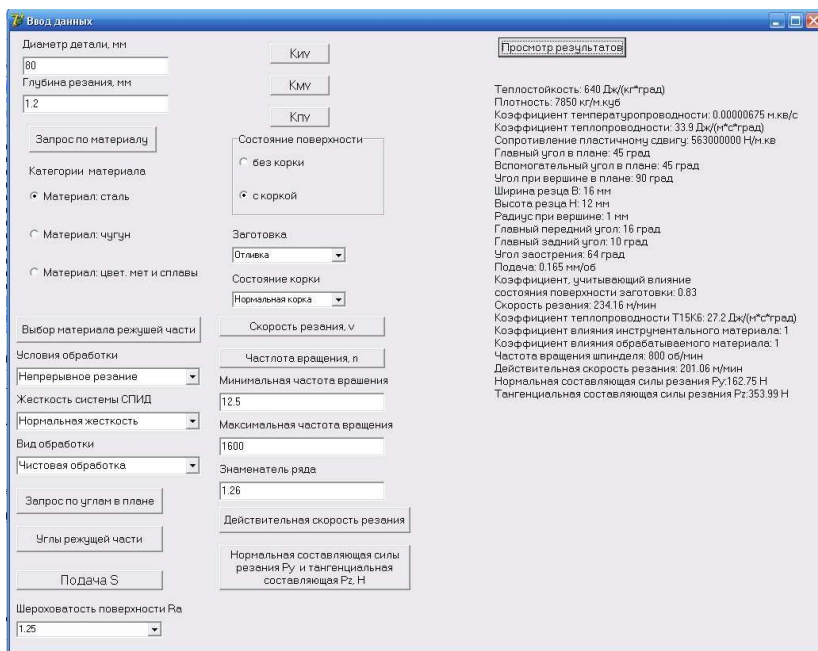


Рис. 3.16. Форма приложения

Кнопка «Выбор материала режущей части» осуществляет также подбор марок инструментального материала в зависимости от вида, характера и условий обработки на основе рекомендаций данных в работе [22].

Режимы резания в разрабатываемом приложении будут определяться по формулам и зависимостям, взятым из литературы [23]. Данные формулы учитывают характер обработки, тип и размеры инструмента, материал его режущей части, материал и состояние заготовки, тип и состояние оборудования.

Подача  $S$  при черновом точении принимается максимально допустимой по мощности оборудования, жесткости системы СПИД, прочности режущей пластины и прочности державки. Рекомендуемые подачи при черновом наружном точении приведены в [23].

Подачи при чистовом точении выбирают в зависимости от требуемых параметров шероховатости обработанной поверхности и радиуса при вершине резца [23].

Скорость резания  $v$  (м/мин) при наружном продольном и поперечном точении и растачивании определяется по эмпирической формуле

$$v = \frac{C_v}{T^m t^x s^y} K_v.$$

Среднее значение стойкости  $T$  при одноинструментальной обработке 30 – 60 мин. Значения коэффициента  $C_v$ , показателей степени  $x$ ,  $y$  и  $m$  приведены в [23].

Коэффициент  $K_v$  является произведением коэффициентов, учитывающих влияние материала заготовки  $K_{mv}$  в [23, табл. 1 – 4, с. 358 – 360], состояния поверхности  $K_{pv}$  в [23, табл. 5, с. 361], материала инструмента  $K_{iv}$  [23, табл. 5, с. 361].

Частоту вращения шпинделя  $n$ ,  $\text{мин}^{-1}$  определяют по формуле

$$n = \frac{1000v}{\pi D}.$$

После чего ее сверяют с паспортом станка и принимают ближайшее значение из геометрического ряда  $n_d$ .

Далее находят действительную скорость резания

$$v = \frac{\pi D n_d}{1000}.$$

Силу резания,  $H$ , принято раскладывать на составляющие силы, направленные по осям координат станка (тангенциальную  $P_z$ , радиальную  $P_y$  и осевую  $P_x$ ). Для расчетов понадобится лишь радиальная составляющая силы резания, поэтому введем в модуль только ее. При

наружном продольном и поперечном точении, растачивании, отрезании, прорезании пазов и фасонном точении эти составляющие рассчитывают по формуле

$$P_{z,y} = 10C_p t^x s^y v^n K_p .$$

Поправочный коэффициент  $K_p$  представляет собой произведение ряда коэффициентов ( $K_p = K_{mp} K_{фр} K_{гр} K_{\lambda p} K_{rp}$ ), учитывающих фактические условия резания. Численные значения этих коэффициентов приведены в [23].

Режимы резания в приложении рассчитываются по вышеуказанным формулам и рекомендациям при нажатии на соответствующую кнопку.

Все полученные в результате работы модуля данные пользователь может просмотреть при нажатии на кнопку «Просмотр результатов». Также к этой кнопке подключена функция, осуществляющая запаковку полученной информации в текстовый файл. Теперь другие модули САПР могут обратиться к этому файлу для получения данных для расчета.

Листинг разработанного модуля представлен в [26].

## 4. РАЗРАБОТКА БЛОКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕЗАНИЯ

Выбор математической модели силовых и тепловых процессов при точении материалов и основные уравнения, составляющие ее, были описаны в п. 1.2.2, в котором выведенные формулы и расчеты легли в основу подпрограммы.

Главная форма приложения представлена на рис. 4.1. Форма разделена панелями на несколько зон. Рассмотрим назначение каждой из них.

Первая панель называется «Данные для расчета». Здесь отображается информация, необходимая модулю для расчета параметров математической модели. Это теплофизические и физико-механические свойства материала заготовки и режущей части инструмента, геометрические параметры инструмента, режимы резания и условия обработки. Панель заполняется автоматически при открытии окна формы. Данные берутся из текстового файла, созданного в блоке обработки начальных данных.

**7.3 Расчет параметров математической модели**

**Данные для расчета**

Теплотность заготовки, Дж/(кг*град)	640
Плотность заготовки, кг/м.куб	7850
Коэф-т температуропроводности заготовки, м.кв/с	0.000008
Коэф-т теплопроводности заготовки, Дж/м*с*град	40.2
Сопротивление обрабатываемого материала, Н/м.кв	48500000
Главный угол в плане, град	45
Вспомогательный угол в плане, град	45
Угол при вершине реза, град	90
Радиус при вершине, мм	1.6000000
Главный передний угол, град	16
Главный задний угол, град	10
Угол заострения реза, град	64
Коэффициент теплопроводности реза, Дж/м*с*град	27.2
Подача, мм/об	0.49
Частота вращения шпинделя, об/мин	640
Скорость резания, м/мин	110.58
Диаметр детали, мм	55
Глубина резания, мм	2

**Вычисление ширины и толщины среза**

Толщина среза, мм

Ширина среза, мм

Суммарная длина рабочих участков режущей кромки реза, мм

**Расчет и схемы**

**Вычисление сил резания**

Критерий Пекле

Тангенциальная составляющая силы стружкообразования, Н

Радиальная составляющая силы стружкообразования, Н

Сила трения, Н

Нормальная сила, Н

Сила трения на задней поверхности, Н

Нормальная сила на задней поверхности, Н

**Схемы и формулы**      **Расчет**

**Вычисление длин контакта**

Длина контакта на задней поверхности не изношенного инструмента, м

Длина контакта стружки с инструментом, м

Величина подниваемого слоя металла h, м

Величина подниваемого слоя металла h<sub>у</sub>, м

**Расчет и схемы**

**Определение температур в точках**

Максимальная температура трения в точке M

Максимальная контактная температура в точке M

Температура в точке C

Максимальная температура трения на задней поверхности реза

Координата макс суммарных контактных температур на задней поверхности реза

Суммарная контактная температура в точке N

Суммарная контактная температура в точке D

Средняя контактная температура на участке AD

**Схемы и формулы**      **Расчет**

**Расчет средних тепловых потоков**

Доля теплоты трения, уходящая в деталь

Доля теплоты трения уходящая в резац

Средний тепловой поток детали

Средний тепловой поток реза

**Расчет и схемы**

**Теплота стружки и детали**

Теплота детали, Дж/с

Теплота стружки, Дж/с

**Расчет и схемы**

**Закрыть**



### Рис. 4.1. Основная форма приложения

Панель «Вычисление ширины и толщины среза» используется для расчета сечения стружки. При нажатии на кнопку «Расчет и схемы» открывается дополнительная форма (рис. 4.2). При открытии формы осуществляется выбор схемы резания на основе сравнения глубины резания  $t$  и выражения  $r(1 - \cos \varphi)$  и величины подачи  $s$  с выражением  $2r \sin \varphi_1$ . В результате анализа этих зависимостей подбирается схема резания и формулы, по которым будут производиться расчеты. Эти данные представлены в окне формы. Вычисление параметров сечения стружки осуществляется после нажатия на кнопку «Расчет». Результаты расчетов отображаются в полях, помещенных на форму. Чтобы закрыть форму, нужно нажать на соответствующую кнопку, после чего рассчитанные данные переместятся в соответствующие поля главной формы.

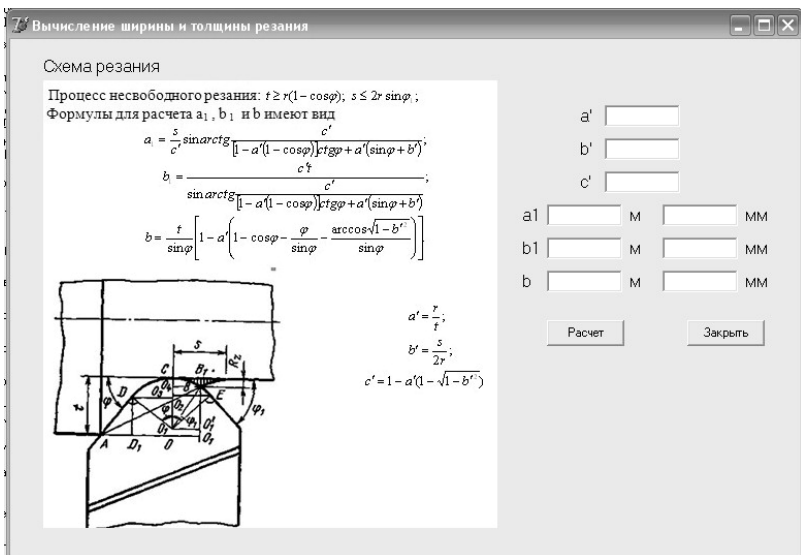


Рис. 4.2. Панель «Вычисление сечения стружки»

Панель «Вычисление сил резания» предназначена для определения сил, действующих на инструмент и заготовку во время точения. Схемы и формулы, по которым ведутся расчеты, приведены во вспомогательной форме (рис. 4.3), которую можно просмотреть, нажав кнопку «Схемы и формулы». Форма, где производятся вычисления (рис. 4.4), открывается при нажатии на кнопку «Расчет».

Силы резания определяются по формулам

$$R_x = \tau_p \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot \left(1 + \frac{1}{B}\right)$$

$$R_y = \tau_p \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot \left(\frac{1}{B} - 1\right)$$

$$F_n = \tau_p \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot \left(\frac{\cos \gamma + \sin \gamma}{B} - \cos \gamma + \sin \gamma\right)$$

$$N = \tau_p \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot \left(\frac{\cos \gamma - \sin \gamma}{B} + \cos \gamma + \sin \gamma\right)$$

$$F_1 = 0,625 \cdot \tau_p \cdot \rho_1 \cdot b \cdot \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}}$$

$$N_1 = 0,625 \cdot \frac{\tau_p \cdot \rho_1 \cdot b}{\mu_4} \cdot \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}}$$

Рис.1 Схема действия сил на передней поверхности инструмента

Рис.2 Схема действия сил на задней поверхности инструмента

Закреть

Рис. 4.3. Форма «Схемы сил резания и формулы»

Вычисление сил резания

Критерий пекле  $Pe$   m

Критерий  $F$   n

Критерий  $D$   k

Значение 2-го столбика таблицы 1  p

Значение 3-го столбика таблицы 1  q

Критерий  $B$

Кoeffициент трения на задней контактной площадке

Тангенциальная составляющая силы стружкообразования  $R_z$ , Н

Радиальная составляющая силы стружкообразования  $R_y$ , Н

Сила трения на передне поверхности  $F_n$ , Н

Нормальная сила  $N$ , Н

Сила трения на задней поверхности  $F_1$ , Н

Нормальная сила на задней поверхности  $N_1$ , Н

Расчет  Закреть

Рис. 4.4. Форма «Вычисление сил резания»

Вычисление длин контакта

Процессы резания характеризуются наличием трех основных быстро движущихся по отношению к стружке и детали плоских источников тепла шириной  $b_1$  и длиной  $AB = \frac{a_1}{\sin \beta_1}$  м,  $AC=l$  и  $AD=\Delta$  (рис.3). Источники  $AC$  и  $AD$  по отношению к резу являются неподвижными.

Величину участка  $AD=\Delta$  определим по формуле:

$$\Delta = 1,25 \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}} \rho_1,$$

где  $\rho_1$ —радиус скругления режущей кромки реза.

Длину контакта стружки с инструментом  $AC=l$  вычислим по формуле:

$$l = 1,45 \left( \frac{\cos \gamma + \sin \gamma}{B} - \cos \gamma + \sin \gamma \right) a_1$$

Величины поднимаемого слоя металла  $h$  и  $h_y$  определяются следующим образом (рис.4):

$$h = A_1 \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + B^2}} \right),$$

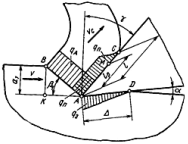
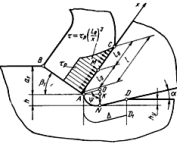
$$h_y = \frac{h \cdot B}{\cos \gamma + B \sin \gamma}$$



Рис.3 Схема распределения суммарных интенсивностей тепловыделения в плоскости сдвига и на контактных поверхностях инст-

Рис.4 Схема к расчету контактных площадок на передней и задней поверхностях инструмента

Длина контакта на задней поверхности изношенного инструмента дельта  м  мм

Длина контакта стружки с инструментом l  м  мм

Величина поднимаемого слоя металла h  м  мм

Величина поднимаемого слоя металла h<sub>y</sub>  м  мм

Расчет      Закрыть

Рис. 4.5. Форма «Вычисление длины контакта стружки»

Панель «Вычисление длин контакта» используется для расчета длины контакта стружки с передней и задней поверхностью режущего инструмента. Схемы и формулы представлены на форме (рис. 4.5), которая появляется на экране после нажатия на соответствующую кнопку. Также на данной форме производится и расчет.

В панели «Определение температур в точках» осуществляется вычисление температуры в зоне резания. Формулы и расчет представлены на разных вспомогательных формах (рис. 4.6). Форма вычислений представлена на рис. 4.7. В ней имеется кнопка «График», которая выводит графическую зависимость суммарной контактной температуры на передней поверхности реза от длины контакта стружки с инструментом (рис. 4.8).

Панель «Расчет средних тепловых потоков» отвечает за вычисление тепловых потоков в системе заготовка – режущий инструмент – стружка. Панель «Теплота стружки и детали» рассчитывает параметры, заявленные в ее названии. Аналогично другим панелям для этих двух созданы вспомогательные формы (рис. 4.9 – 4.10), производящие расчет и показывающие формулы производимых вычислений.

Закрытие главной формы осуществляется нажатием кнопки «Закрыть», после чего все данные, вычисленные в подпрограмме, передаются в текстовый файл. Теперь они могут быть использованы другими модулями САПР.

Максимальную температуру трения на передней поверхности (в точке  $M$ ) найдем как:

$$\theta_M = 0,9675 \cdot \frac{n \cdot r_p \cdot \sqrt{P_e}}{c \cdot \rho} \cdot \sqrt{\frac{\cos \gamma + \sin \gamma - B \cdot (\cos \gamma - \sin \gamma)}{\cos \gamma + B \cdot \sin \gamma}},$$

где  $n = \frac{1}{1+b_0}$ ,  $b_0 = \frac{0,25 \cdot F \cdot D^{0,3} \sqrt{\cos \gamma + B \cdot \sin \gamma}}{\sqrt{P_e \cdot B} \cdot [\cos \gamma + \sin \gamma - B \cdot (\cos \gamma - \sin \gamma)]}$ ,  $c$  – теплоемкость материала заготовки,  $\rho$  – плотность материала заготовки.

Максимальная контактная температура на передней поверхности имеет место в точке  $M$  ( $x=2l_0$ ), т.е. в конце зоны пластического контакта, и выражается уравнением

$$\theta_M = \theta_A \cdot (1 + \psi_M),$$

где  $\theta_A = \frac{r_p}{c \cdot \rho \cdot B} \cdot \text{erf} \sqrt{\frac{P_e B}{4}}$  – максимальная температура пластических деформаций в условной плоскости сдвига (в точке  $A$ , на режущей кромке);

$\psi_M = \frac{0,9675 \cdot n \cdot B \cdot \sqrt{P_e} \sqrt{\cos \gamma + \sin \gamma - B \cdot (\cos \gamma - \sin \gamma)}}{\text{erf} \sqrt{\frac{P_e \cdot B}{4}} \sqrt{\cos \gamma + B \cdot \sin \gamma}}$  – отношение температур  $\theta_M / \theta_A$

Температура в точке  $C$  – месте отрыва стружки от передней поверхности инструмента (при  $x=2l_0$ ) определяется по формуле

$$\theta_C = \theta_A \cdot (1 + 0,66 \cdot \psi_M)$$

Максимальная температура трения на задней поверхности инструмента (в точке  $N$ ):

$$\theta_N = 0,6 \cdot n_1 \cdot \sqrt{P_e \cdot E} \cdot \frac{r_p \cdot B^{0,25} \cdot \cos \alpha}{c \cdot \rho \cdot \sin^{0,25} \alpha},$$

$$n_1 = \frac{1}{1+b_1}, \quad b_1 = \frac{0,25 \cdot F \cdot D^{0,3} \cdot \sin^{0,1} \alpha}{\sqrt{P_e \cdot E^{0,2}} \cdot B^{0,1}}, \quad E = \rho / a_1.$$

Координата, которой соответствует максимум суммарной контактной температуры на задней поверхности инструмента

$$\left(\frac{x}{\Delta}\right)_m = 0,25 + \sqrt{0,0625 - \frac{0,1 \cdot \sin^{0,5} \alpha \cdot \text{erf} \sqrt{\frac{P_e \cdot B}{4}}}{n_1 \cdot P_e \cdot E \cdot B^{0,5} \cdot \cos \alpha}},$$

Суммарные контактные температуры в точках  $N$  ( $x=0,499\Delta$ ) и  $D$  ( $x=\Delta$ ):

$$\theta_N = \theta_A \cdot \left(0,5 + \frac{0,36 \cdot \sin^{0,25} \alpha}{B^{0,25} \cdot \sqrt{P_e \cdot E}} + \psi_N\right), \quad \theta_D = \theta_A \cdot \left(0,5 + \frac{0,25 \cdot \sin^{0,25} \alpha}{B^{0,25} \cdot \sqrt{P_e \cdot E}} + 0,71 \cdot \psi_N\right),$$

$$\psi_N = \frac{0,6 \cdot n_1 \cdot B^{0,25} \cdot \sqrt{P_e \cdot E} \cdot \cos \alpha}{\sin^{0,25} \alpha \cdot \text{erf} \sqrt{\frac{P_e \cdot B}{4}}}.$$

Закреть

Рис. 4.6. Форма «Формулы определения температур в точках»

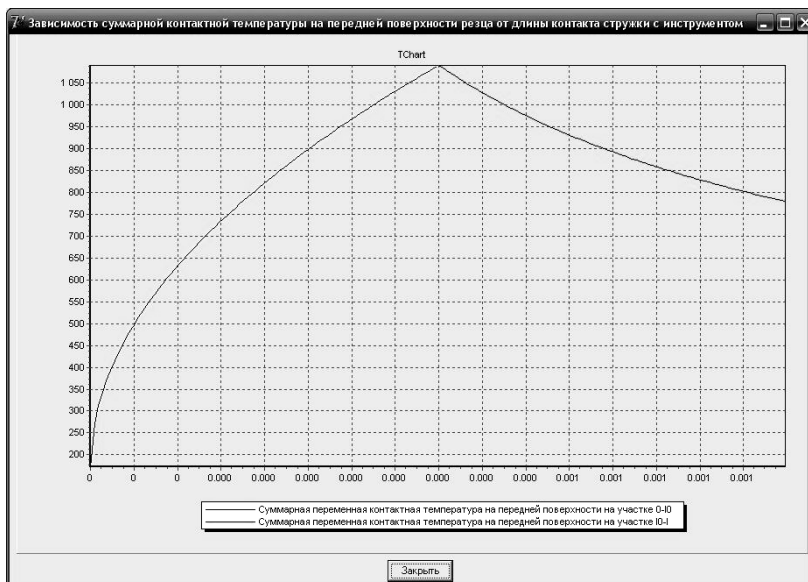
**7.4. Определение температур в точках**

$b_0$         $b_1$         $u$    
 $n$         $n_1$         $m$    
 Отношение температур        $E$         $k_{cin}$

Максимальная температура пластических деформаций в плоскости сдвига, град С       Координата max суммарных контактных температур на задней поверхности реза   
 Максимальная температура трения в точке M       Суммарная контактная температура в точке N   
 Максимальная контактная температура в точке M       Суммарная контактная температура в точке D   
 Температура в точке C       Средняя контактная температура на участке AD   
 Максимальная температура трения на задней поверхности реза

**Рис. 4.7. Форма «Вычисление температур в точках»**



**Рис. 4.8. Форма «Построение графика»**

7.4 Определе ние температур в точках

b1  Доля теплоты трения, уходящая в деталь

n1  Доля теплоты трения уходящая в резец

E  Средний тепловой поток детали

Средний тепловой поток: резаца

$Q_{\text{дз}}$  и  $Q_{\text{рз}}$ -доли теплоты трения, уходящей соответственно с контактной площадки задней поверхности в деталь и резец, Дж/с.

$$Q_{\text{дз}} = 0,625 \cdot n_1 \cdot \tau_p \cdot b \cdot \rho_1 \cdot v \cdot \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}} \cos \alpha,$$

$$Q_{\text{рз}} = 0,625 \cdot (1 - n_1) \cdot \tau_p \cdot b \cdot \rho_1 \cdot v \cdot \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}} \cos \alpha,$$

$$n_1 = \frac{1}{1 + b_1}, \quad b_1 = \frac{0,25 \cdot F \cdot D^{0,3} \cdot \sin^{0,1} \alpha}{\sqrt{Fe} \cdot E^{0,2} \cdot B^{0,1}}, \quad E = \rho_1 / a_1.$$

Средние удельные тепловые потоки:

$$\bar{q}_{\text{дз}} = 0,5 \cdot n_1 \cdot \tau_p \cdot v \cdot \cos \alpha,$$

$$\bar{q}_{\text{рз}} = 0,5 \cdot (1 - n_1) \cdot \tau_p \cdot v \cdot \cos \alpha$$

Рис. 4.9. Определение температур в точках

7.4 Теплота стружки и детали

E  kсис  Теплота детали, Дж/с

n2  n  Теплота стружки, Дж/с

n3  n1

M

Теплота детали определяется как:

$$Q_d = \tau_p \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot v \cdot M \left[ \frac{0,665 \cdot n_2 \cdot \text{erf} \sqrt{\frac{Fe \cdot B}{4}}}{\sqrt{Fe \cdot B}} + \frac{0,625 \cdot E \cdot n_3 \cdot B^{1,5}}{\sin^{0,55} \alpha} \right],$$

$$n_2 = \frac{1}{1 + \frac{0,27 \cdot F \cdot D^{0,3} \cdot B^{0,3}}{\sqrt{Fe} \cdot \sin^{0,15} \alpha}}, \quad n_3 = \frac{1}{1 + \frac{0,35 \cdot F \cdot D^{0,3} \cdot \sin^{0,1} \alpha}{\sqrt{Fe} \cdot B^{0,2}}}.$$

Теплота стружки определяется как:

$$Q_c = \frac{\tau_p \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot v}{B} \left[ \psi_c \cdot n_1 \cdot \text{erf} \sqrt{\frac{Fe \cdot B}{4}} + B \cdot n \frac{\cos \gamma + \sin \gamma - B \cdot (\cos \gamma - \sin \gamma)}{\cos \gamma + \sin \gamma} \right],$$

$$\psi_c = 1 - \frac{2}{Fe \cdot B} + \frac{1,125}{\sqrt{Fe \cdot B}} \frac{\exp\left(-\frac{Fe \cdot B}{4}\right)}{\text{erf} \sqrt{\frac{Fe \cdot B}{4}}}, \quad n = \frac{1}{1 + \frac{0,325 \cdot F \cdot D^{0,3} \cdot (1 - \sin \gamma)^{0,25}}{\sqrt{Fe}}}$$

$$n_1 = \frac{1}{1 + \frac{0,225 \cdot F \cdot D^{0,3}}{Fe \cdot (1 - \sin \gamma)^{0,4}}}$$

Рис. 4.10. Определение теплоты стружки и детали

Листинг разработанного модуля представлен в работе [26].

Таким образом, создана подпрограмма, осуществляющая расчет параметров математической модели процесса резания на примере наружного точения деталей типа тела вращения. Данная подпрограмма, используя заданные пользователем начальные условия: физико-механические и теплофизические свойства материала заготовки и режущей части инструмента, его геометрические параметры и т.д., рассчитываются составляющие силы резания, сечение стружки, длина контакта стружки с передней поверхностью режущего инструмента, температуры в зоне резания, а также тепловые потоки в системе заготовка – режущий инструмент – стружка.

## 5. РАЗРАБОТКА БЛОКА АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАГРУЗОК, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

После того, как были вычислены составляющие математической модели процесса резания, следующим этапом исследования условий обработки является анализ напряженно-деформированного состояния режущего инструмента. В результате его проведения могут быть получены распределения напряжений по телу инструмента и перемещения его режущих кромок. По этим показателям делается вывод о допустимости принятых режимов резания в зависимости, например, от требуемых показателей к качеству изготавливаемой детали или жесткости системы станок – приспособление – инструмент-деталь (СПИД). Таким образом появляется необходимость в создании подпрограммы, которая могла бы обработать данные, полученные после моделирования нагрузок, действующих на режущий инструмент.

### 5.1. МОДЕЛИРОВАНИЯ НАГРУЗОК, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ, В СРЕДЕ AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL

Для моделирования используется твердотельная модель реза (рис. 5.1), которая связана с полем «Чертеж» базы данных режущих инструментов.

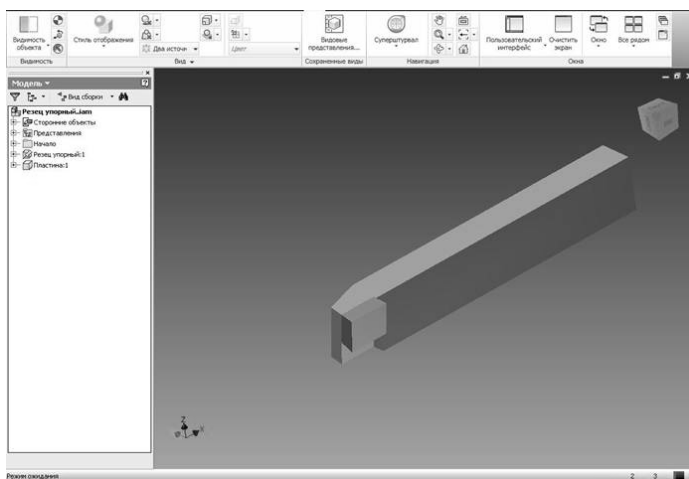


Рис. 5.1. Твердотельная модель реза, созданная в Autodesk Inventor Professional



С целью приближения модели к реальным условиям обработки была создана трехмерная модель четырехпозиционной резцовой головки. Также был создан файл сборки (рис. 5.2), в котором имитируется закрепление реза в резцовой головке. Для этой сборки произведен анализ напряжений.

Для моделирования нагрузок на резец приложим нагрузку на переднюю и заднюю поверхности инструмента нормальными силами  $N$  и  $N_1$ , рассчитанными в модуле расчета параметров математической модели. Значение сил можно найти в окне Подсказка (рис. 5.3), которое открывается при нажатии кнопки «Моделирование нагрузок» на Главной форме приложения.

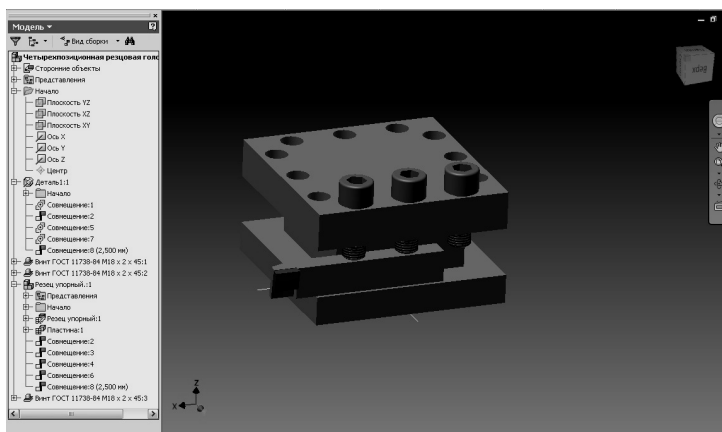


Рис. 5.2. Закрепление реза в резцовой головке

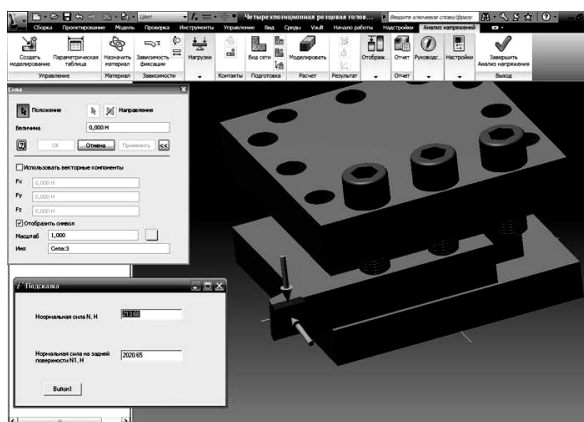


Рис. 5.3. Приложение нагрузки к режущей кромке

Зависимости фиксации были наложены так, как показано на рис. 5.4.

При расчете в среде Autodesk Inventor Professional в качестве выходных параметров получаем напряжение по Мизесу, 1-е основное напряжение, коэффициент запаса прочности и разложение смещений по осям X, Y и Z (рис. 5.5 – 5.10).

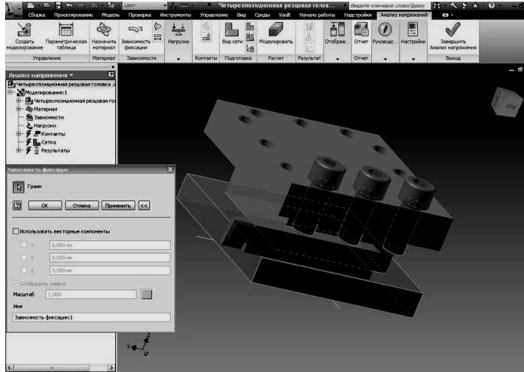


Рис. 5.4. Наложение зависимостей фиксации на модель

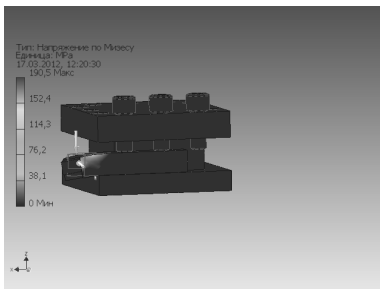


Рис. 5.5. Напряжение по Мизесу

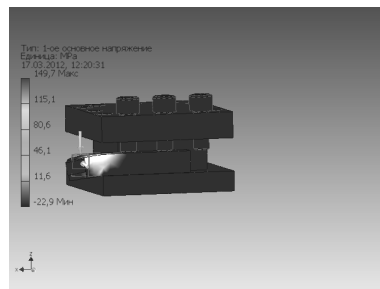


Рис. 5.6. 1-ое основное напряжение

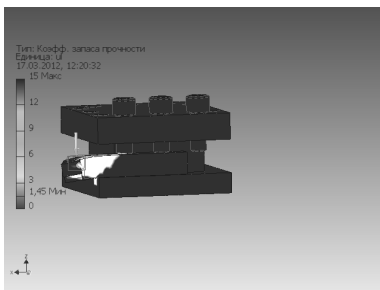


Рис. 5.7. Коэффициент запаса прочности

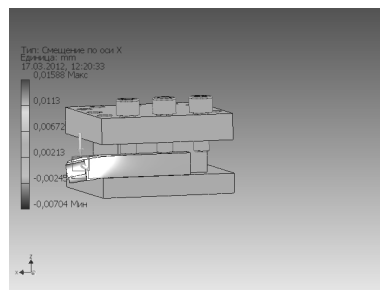


Рис. 5.8. Смещение по оси X

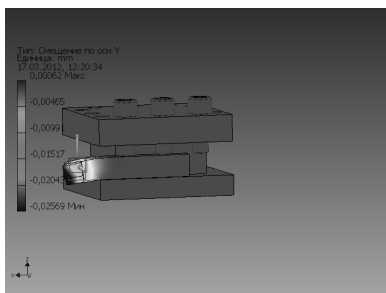


Рис. 5.9. Смещение по оси Y

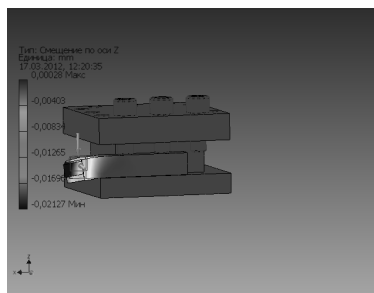
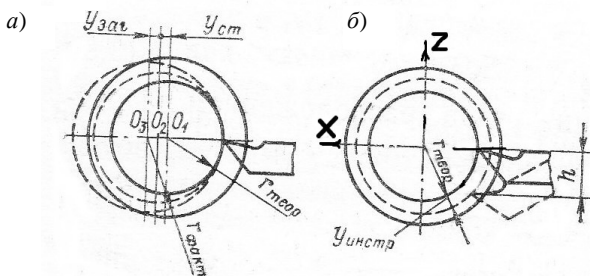


Рис. 5.10. Смещение по оси Z

По этим данным, в частности по смещениям резца, и ведется расчет в модуле.

## 5.2. КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ БЛОКА АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАГРУЗОК

При настройке станка резец устанавливают в положение, в котором должна осуществляться обточка заготовки на некоторый радиус  $r_{\text{теор}}$  (рис. 5.11. а). Однако в результате упругого отжатия узлов станка  $y_{\text{ст}}$  и отжатия заготовки  $y_{\text{заг}}$  ось вращения заготовки смещается из положения  $O_1$  в положение  $O_3$ , что приводит к увеличению фактического расстояния вершины резца до оси вращения заготовки [24]. Одновременно в связи с прогибом и отжатием резца (рис. 5.11, б) расстояние его вершины до центра вращения заготовки дополнительно увеличивается на величину  $y_{\text{инстр}}$ . Упругие отжатия в технологической системе приводят к увеличению фактического радиуса обточки заготовки ( $t_{\text{факт}} = t_{\text{теор}} - (y_{\text{ст}} + y_{\text{заг}} + y_{\text{инстр}})$ ), соответствующем уменьшению фактической глубины резания до величины  $t_{\text{факт}} = t_{\text{теор}} - (y_{\text{ст}} + y_{\text{заг}} + y_{\text{инстр}})$ .



**Рис. 5.11. Влияние упругих отжатий на размер обрабатываемой заготовки**

Общее увеличение диаметра  $\Delta D$  обрабатываемого изделия по сравнению с его теоретическим значением, установленным при настройке станка, равно удвоенному приращению фактического радиуса или удвоенному суммарному отжатию технологической системы, т.е.

$$\Delta D = 2(r_{\text{факт}} - r_{\text{теор}}) = 2(y_{\text{ст}} + y_{\text{заг}} + y_{\text{инстр}}) = 2y = 2P_y / j. \quad (5.1)$$

Отжатие узлов станка  $y_{\text{ст}}$  можно вычислить, используя формулу определения жесткости, предложенную А.П. Соколовским:

$$j = P_y / y. \quad (5.2)$$

Отсюда, зная жесткость станка, можно определить упругое ожатие его узлов при резании уст:

$$y_{\text{ст}} = P_y / j. \quad (5.3)$$

Отжатие узла, зависящее от метода установки заготовок на станке, можно подсчитать по обычным формулам сопротивления материалов. Так, при обтачивании гладкого вала в центрах можно определять величину его прогиба как прогиба балки, свободно лежащей на двух опорах. Наибольший прогиб вала по его середине

$$y_{\text{заг}} = P_y l^3 / (48EJ), \quad (5.4)$$

где  $l$  – длина заготовки;  $E$  – модуль упругости;  $J$  – момент инерции сечения заготовки (для круглого вала  $J = 0,05D^4$ ).

Для гладкого вала, консольно закрепленного в патроне:

$$y_{\text{заг}} = P_y l^3 / (3EJ), \quad (5.5)$$

а для гладкого вала, закрепленного в патроне и поддерживаемого центром (с учетом податливости заднего центра и упругости крепления в патроне):

$$y_{\text{заг}} = P_y l^3 / (100EJ). \quad (5.6)$$

Из рисунка 5.11, б, используя теорему Пифагора, можно вычислить отжатие резца  $y_{\text{инстр}}$  по формуле

$$y_{\text{инстр}} = \sqrt{((d/2) + x)^2 + h^2} - d/2, \quad (5.7)$$

где  $d$  – диаметр детали;  $x$  – смещение резца по оси  $X$ .

Используя описанные формулы и данные моделирования нагрузок на режущий инструмент, можно вычислить жесткость системы СПИД и определить ее влияние на точность размеров и формы обрабатываемой заготовки. Форма приложения, реализующего эти задачи, показана на рис. 5.12.

**Рис. 5.12. Блок анализа результатов моделирования нагрузок, действующих на режущий инструмент**

При запуске подпрограммы в панели «Начальные данные» уже отображены диаметр детали  $d$ , модуль Юнга обрабатываемого материала  $E$  и нормальная составляющая силы резания  $P_y$ . Эта информация была передана из блока задания исходных параметров. Для начала расчета пользователю остается только ввести длину заготовки и допуск на обрабатываемый диаметр.

Панель «Смещение заготовки» отвечает за определение отжатия заготовки. Для начала расчета нужно выбрать способ закрепления заготовки, благодаря чему будет выбрана формула расчета максимального прогиба вала, и нажать соответствующую кнопку. Отжатие заготовки, выраженное в миллиметрах, отображается в соответствующем окне.

В панели «Смещение узлов станка» происходит вычисление упругого отжатия узлов станка. Его можно вычислить по следующей формуле:

$$y_{ст} = P_y / j_{ст}, \quad (5.8)$$

где  $j_{ст}$  – жесткость станка, Н/мм.

После ввода в соответствующее окно значения жесткости и нажатия кнопки «Расчет» значение упругого отжатия узлов станка появится в соответствующем окне.

Панель «Смещение резца» отвечает за определение отжатия резца. Для начала расчета нужно заполнить окошки смещений резца по оси  $X$  и  $Z$ . Эти данные были получены при проведении моделирования нагрузок, действующих на режущий инструмент. При нажатии на кнопку «Расчет» модуль рассчитывает отжатие резца по формуле (5.7) и записывает его в соответствующее окошко.

Панель «Проверка точности обработки» осуществляет анализ влияния жесткости системы СПИД на точность обработки. Для этого по формуле (5.1) вычисляется приращение диаметра  $\Delta D$ . Потом программа сравнивает полученное значение с допуском на обрабатываемый диаметр. Если приращение диаметра меньше допуска, делается вывод, что погрешность обработки не превышает допуск. В случае, когда приращение диаметра больше допуска, приложение сообщает о том, что погрешность обработки превышает допуск и дает рекомендации по увеличению жесткости системы СПИД. Рекомендации даются в зависимости от того, какое из отжатий, вычисленных в ходе расчетов, было большим. Например, когда преобладает смещение резца даются рекомендации уменьшить его вылет.

Листинг разработанного модуля представлен в работе [26].

## 6. РАЗРАБОТКА БЛОКА ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Теоретические основы работы блока изложены в п. 1.3. Главная форма приложения показана на рис. 6.1. Рассмотрим основные элементы, помещенные на нее.

Исследование динамики процесса резания

Данные для расчета характеристик системы

Толщина среза, мм: 0.6231    Скорость резания, м/мин: 75.4    Контактная жесткость материала, кг/мм<sup>2</sup>:    Удельная сила резания K, кг/мм<sup>2</sup>:  
Ширина среза, мм: 2.8888    Высота фаски реза h<sub>f</sub>, мм:    Среднее значение усадки материала:     
Выбор параметров    W/lagamma    Wpsht    Wp

Данные для расчета устойчивости системы

Жесткость системы, Н/мм: 12085.26    Масса заготовки, кг: 15.91    Логарифмический декремент:     
Расчет    Отрезок отсекающей графиком на отрицательной вещественной оси:    Предельная ширина среза, мм:   

Im

0

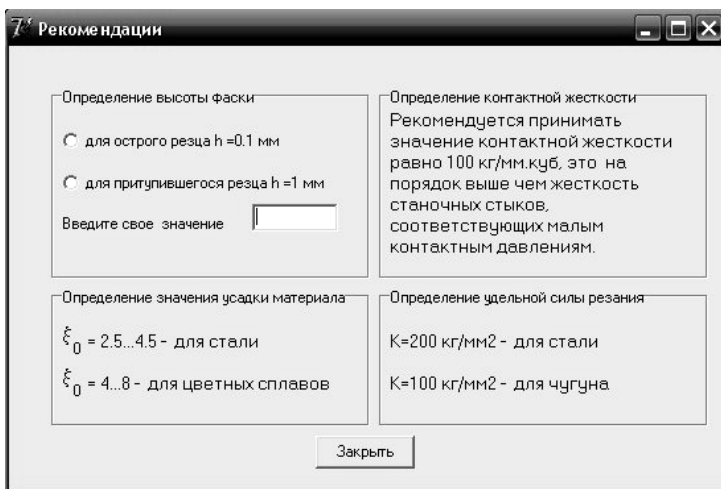
0

Re

Вывод

Рис. 6.1. Главная форма приложения блока исследования динамики процесса резания

Первая панель называется «Данные для расчета характеристик системы». В расположенных на этой панели окошках отображается информация, необходимая модулю для расчета динамических характеристик резания ( $W_p$ ,  $W_{ay}$ ,  $W_p$ ). Некоторые окошки заполняются автоматически при открытии окна формы. Данные берутся из текстовых файлов, созданных в предыдущих блоках системы. Для заполнения других исходных данных расчета предназначена кнопка «Выбор параметров». После нажатия на нее открывается вспомогательная форма (рис. 6.2),



**Рис. 6.2. Вспомогательная форма приложения**

на которой отображаются рекомендации по выбору недостающих параметров для расчета. Расчет динамических характеристик резания осуществляется после нажатия на соответствующие кнопки. После того, как программа завершит вычисления, рассчитанные ею графики отобразятся в специальном графическом редакторе, помещенном на форме.

Панель «Данные для расчета устойчивости системы» предназначена для анализа устойчивости системы по критерию Найквиста. Также как и в предыдущей панели некоторые окошки начальных данных заполняются автоматически, на основе информации полученной от предыдущих блоков системы. После добавления необходимых параметров для вычислений пользователь может приступить к анализу, нажав кнопку «Расчет». Программой будет построена АФЧХ передаточной функции разомкнутой системы, вычислен отрезок, отсекаемый графиком на отрицательной вещественной оси, и определена предельная ширина срезаемого слоя, после которой система, при данной скорости резания, потеряет устойчивость.

Выводы, сделанные модулем после исследования динамики процесса резания, можно просмотреть, нажав соответствующую кнопку.

Листинг разработанного модуля преставлен в работе [26].



## 7. РАЗРАБОТКА БЛОКА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Выбор целевой функции и технических ограничений процесса резания были описаны в п. 1.4, выведенные в котором формулы и расчеты, легли в основу подпрограммы.

Форма приложения представлена на рис. 7.1.

Диаметр детали, мм 90	Ширина резца, мм 40	Наибольшая подача, мм/об 2.8	Наибольшая частота вращения шпинделя, об/мин 1600
Глубина резания, мм 1.75	Высота резца, мм 50	Наименьшая подача, мм/об 0.05	Наименьшая частота вращения шпинделя, об/мин 125
Длина вылета резца из резцодержателя, мм [ ]	Предел прочности державки резца при изгибе, Н/мм <sup>2</sup> [ ]	Мощность станка, кВт 10	
Коэффициент запаса прочности для резцодержки [ ]	Шероховатость поверхности Rz, мкм 10	КПД станка 0.75	
Мемо1 [ ]			
[ Расчет и формулы ]			
[ Оптимизация ]			
		Оптимальная частота вращения шпинделя, об/мин [ ]	
		Оптимальная подача, мм/об [ ]	

Рис. 7.1. Главная форма приложения

Как видно из рисунка, при старте приложения происходит автоматическое заполнение окошек значений исходных данных. Они были получены из блока задания начальных параметров. Тем самым пользователь освобожден от обязанности каждый раз вводить одну и ту же информацию.

При нажатии на кнопку «Расчет и формулы» открывается форма (рис. 7.2), показывающая уравнения, по которым производится оптимизация.

Сама оптимизация запускается после нажатия кнопки «Оптимизация». В результате работы модуля задаются оптимальные значения подачи и частоты вращения шпинделя, выбранные с учетом технических характеристик станка, прочности инструмента и заданной шероховатости обрабатываемой поверхности.

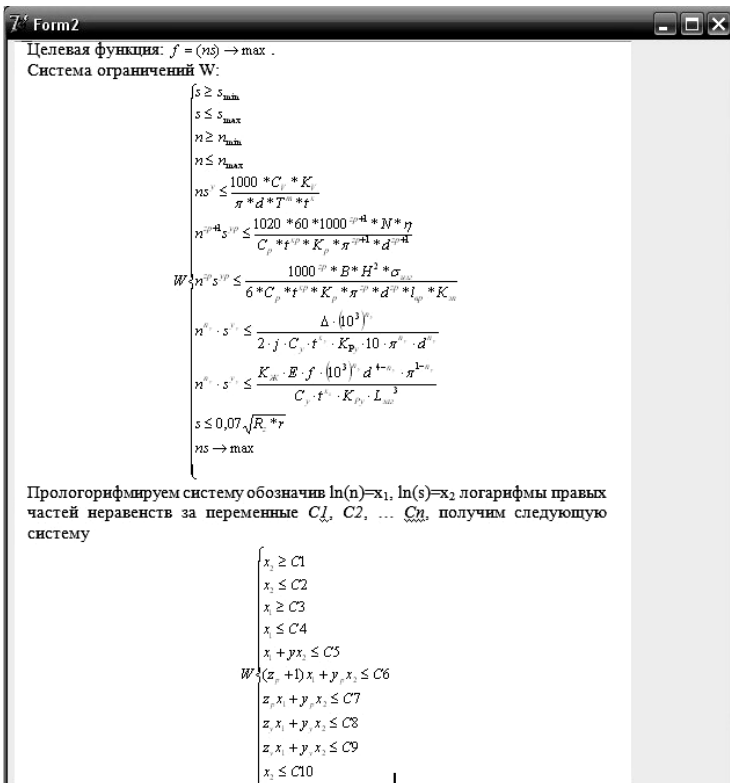


Рис. 7.2. Вспомогательная форма приложения

Листинг разработанного модуля представлен в работе [26].

## 8. ПРОВЕДЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

С целью проверки адекватности работы блоков системы проведем численные эксперименты. Для этого вручную произведем расчеты, осуществляемые разработанными модулями, и сравним получившиеся результаты с теми, которые выдаст система.

Задание на проверку: на токарно-винторезном станке 16К20 производится черновое обтачивание на проход шейки вала  $d_3 = 100$  мм;  $D = 96/12 - 0,35$  мм; длина обрабатываемой поверхности  $l = 280$  мм; длина вала  $l_B = 430$  мм; заготовка – поковка из стали 40Х с пределом прочности  $\sigma_B = 700$  МПа; способ крепления заготовки в центрах. Система станок – инструмент – заготовка недостаточно жесткая. Параметр шероховатости поверхности  $Rz = 80$  мкм.

Выбираем резец и его геометрические параметры (по нормативам [22]). Принимаем токарный проходной резец прямой правый. Материал пластины – твердый сплав Т5К10 [22, прил. 1]. У станка 16К20 расстояние от опорной поверхности резца в резцедержателе до линии центров равно 25 мм. Поэтому для установки резца на станке по центру высота резца должна быть равна 25 мм. Длину проходного резца выбирают в пределах 100...250 мм, она зависит в основном от размеров резцедержателя станка. Этим требованиям в ГОСТе соответствует резец с обозначением 2100-0159. Сечение державки резца  $B \times H = 16 \times 25$ ; длина  $L = 140$  мм. Геометрические параметры резца: главный угол резца в плане  $\phi = 600$ , вспомогательный угол резца в плане  $\phi_1 = 300$ , главный задний угол резца  $\alpha = 100$ , передний угол резца  $\gamma = 160$ , угол заострения резца  $\beta = 640$  [25, табл. 30], угол при вершине резца в плане  $\epsilon = 1100$ , радиус при вершине резца в плане  $r = \rho_1 = 0,001$  м [25, табл. 32].

Материал режущего инструмента – сплав Т5К10, материал заготовки – сталь 40Х. Теплофизические и механические свойства указанных материалов приведены в табл. 8.1 [6].

### 8.1. Теплофизические и механические свойства материалов

Материал	Предел прочности при растяжении $\sigma_B \cdot 106$ , Н/м <sup>2</sup>	Сопротивление пластическому сдвигу $\tau_p \cdot 106$ , Н/м <sup>2</sup>	Коэффициент теплопроводности, Дж/(м·с·град)	Коэффициент температуропроводности, м <sup>2</sup> /с
Сплав Т15К6			$\lambda = 20,9$	
Сталь 40Х	615	563	$\lambda_p = 33,9$	$a = 6,75 \cdot 10^{-6}$

## 8.1. НАЗНАЧЕНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ

Назначаем режимы резания (по справочнику [23]).

Устанавливаем глубину резания

$$t = \frac{D-d}{2} = \frac{100-96}{2} = 2 \text{ мм.}$$

Для обработки заготовки из конструкционной стали диаметром до 100 мм резцом сечением 16×25 мм, при глубине резания до 3 мм принимаем подачу  $s = 0,9$  мм/об.

Назначаем период стойкости резца. При одноинструментальной обработке рекомендуется  $T = 60$  мин.

Определяем скорость резания (м/мин), допускаемую режущими свойствами резца:

$$v = \frac{C_v}{T^m t^x S^y} K_v$$

Выписываем из [23, табл. 17] коэффициент и показатели степеней формулы:  $C_v = 280$ ;  $y_v = 0,45$ ;  $m = 0,2$ ;  $x = 0,15$ .

Учитываем поправочные коэффициенты на скорость резания:

$$K_v = K_{mv} K_{iv} K_{pv},$$

где  $K_{mv}$  – коэффициент на обрабатываемый материал [23, табл. 1–2],  $K_{mv} = 1,07$ ;  $K_{iv}$  – коэффициент на инструментальный материал [23, табл. 6],  $K_{iv} = 0,65$ ;  $K_{pv}$  – коэффициент учитывающий состояние поверхности [23, табл. 5],  $K_{pv} = 1$ .

$$K_v = 1,07 \cdot 0,65 \cdot 1 = 0,7;$$

$$v = \frac{280}{60^{0,2} \cdot 2^{0,15} \cdot 0,9^{0,45}} \cdot 0,7 = 81,25 \text{ м/мин.}$$

Определяем частоту вращения шпинделя,  $\text{мин}^{-1}$ :

$$n = \frac{1000v}{\pi D};$$

$$n = \frac{1000 \cdot 81,25}{3,14 \cdot 96} = 269,5 \text{ мин}^{-1}.$$

Принимаем  $n = 250 \text{ мин}^{-1}$ .

Действительная скорость резания

$$v = \frac{\pi D n}{1000},$$

$$v = \frac{3,14 \cdot 96 \cdot 250}{1000} = 75,4 \text{ м/мин.}$$

Определяем составляющие силы резания по формуле

$$P_{z,y} = 10C_p t^x s^y v^n K_p$$

Значение CM и показателей степени определяем по [23, табл. 42].

$$C_{pz} = 300; x_z = 1; y_z = 0,75; n_z = -0,15.$$

$$C_{py} = 243; x_y = 0,9; y_y = 0,6; n_y = -0,3.$$

Коэффициент, учитывающий фактические условия обработки:

$$K_p = K_{mp} K_{fi},$$

где  $K_{mp}$  – коэффициент на обрабатываемый материал [23, табл. 9],  $K_{mpz} = 0,95$ ;  $K_{mpy} = 0,95$ ;  $K_{fi}$  – коэффициент на инструментальный материал [23, табл. 23],  $K_{fiz} = 0,94$ ;  $K_{fiy} = 0,77$ .  $K_{pz} = 0,95 \cdot 0,94 = 0,89$ ;  $K_{py} = 0,95 \cdot 0,77 = 0,73$ ;  $P_z = 10 \cdot 300 \cdot 2 \cdot 0,9^{0,75} \cdot 75,4^{-0,15} \cdot 0,89 = 2580 \text{ Н}$ ;  $P_y = 10 \cdot 243 \cdot 2^{0,9} \cdot 0,9^{0,6} \cdot 75,4^{-0,3} \cdot 0,73 = 849,55 \text{ Н}$ .

Начальные данные из задания были введены в блок задания исходных параметров (рис. 8.1) и были получены результаты, представленные на рис. 8.2.

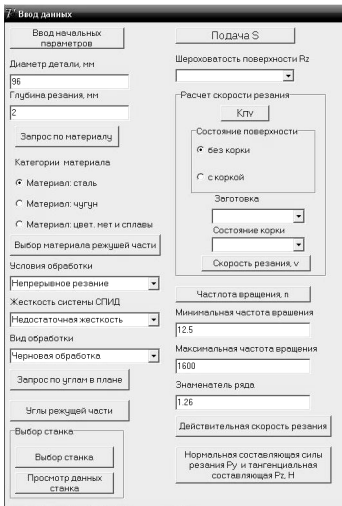


Рис. 8.1. Ввод начальных данных в приложение

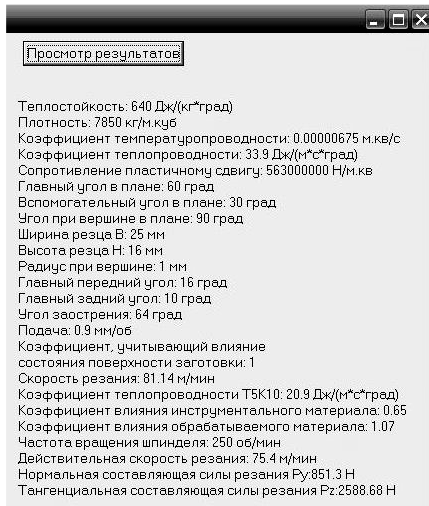


Рис. 8.2. Полученные результаты

## 8.2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Результаты расчетов по формулам (1.8) – (1.17) приведены в табл. 8.2. За расчетные силы принимаем  $N = 2258,74$  Н и  $N_1 = 5316,11$  Н.

Сила стружкообразования  $R = \sqrt{R_z^2 + R_y^2} = \sqrt{2479,6^2 + 452,8^2} = 2520,6$  Н.

Из треугольника сил  $R_c = R \cos 45 = 1782,34$  Н.

Результаты расчетов по формулам (1.18) – (1.24) приведены в табл. 8.3.

### 8.2. Результаты расчета нагрузок, действующих на режущий инструмент

Расчетный параметр	Величина
Критерий Пекле $Pe$	116,01
Тангенциальная составляющая силы стружкообразования $R_z$ , Н	2479,6
Радиальная составляющая силы стружкообразования $R_y$ , Н	452,8
Сила трения на передней поверхности $F_{п}$ , Н	1118,73
Нормальная сила $N$ , Н	2258,74
Сила трения на задней поверхности $F_1$ , Н	2633,03
Нормальная сила на задней поверхности $N_1$ , Н	5316,11
Толщина среза $a_1$ , м	0,0006231
Ширина среза $b_1$ , м	0,00289
Коэффициент трения на задней контактной площадке $\mu_1$	0,4953

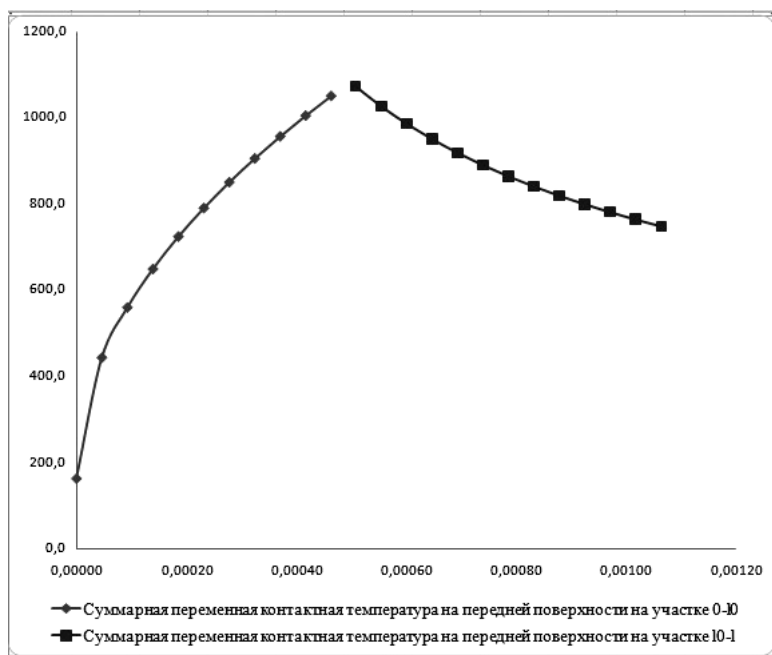
### 8.3. Результаты расчета температуры на передней поверхности реза

Расчетный параметр	Величина
Длина $AD$ , м	0,0024938
Длина $AC$ , м	0,0009974
$h$ , м	0,0001774
$h_y$ , м	0,0001064
Максимальная температура трения на передней поверхности $\theta'_M$ , °С	921,09
Максимальная контактная температура на передней поверхности $\theta_M$ , °С	1083,22
Максимальная температура пластических деформаций в условной плоскости сдвига $\theta_A$ , °С	162,13
Температура в месте отрыва стружки от передней поверхности инструмента $\theta_C$ , °С	770,05

Результаты расчетов по формулам (1.28) – (1.31): координата, которой соответствует максимум суммарной контактной температуры на задней поверхности инструмента  $(x/\Delta)_m = 0,499$ ; максимальная температура трения на задней поверхности инструмента  $\theta'_N = 1260,31$  °С; суммарная контактная температура в точке N:  $\theta_N = 1345,76$  °С; суммарная контактная температура в точке D:  $\theta_D = 978,93$  °С; средняя контактная температура на участке AD:  $\bar{\theta}_3 = 1174,17$  °С.

Результаты расчетов по формулам (1.32) – (1.37): доля теплоты трения, уходящей с контактной площадки задней поверхности в деталь  $Q_{д.з} = 3218,16$  Дж/с; доля теплоты трения, уходящей с контактной площадки задней поверхности в резец  $Q_{р.з} = 40,41$  Дж/с;  $\bar{q}_{д.з} = 344056912,6$  Дж/с;  $\bar{q}_{р.з} = 4320471,35$  Дж/с; теплота детали  $Q_d = 11947,3$  Дж/с.

Согласно принятым исходным данным теплота на поверхности стружки составит  $Q_c = 16887,6$  Дж/с (см. формулу (1.38)).



**Рис. 8.3.** Зависимость суммарной контактной температуры на передней поверхности резца от длины контакта стружки с инструментом

Результаты работы блока расчета параметров математической модели представлены на рис. 8.4 и 8.5.

**Расчет параметров математической модели**

<b>Данные для расчета</b>		<b>Вычисление ширины и толщины среза</b>		<b>Определение температур в точках</b>	
Теплоемкость заготовки, Дж/(кг*град)	640	Толщина среза, мм	0.6231	Максимальная температура трения в точке M	921.08637
Плотность заготовки, кг/м <sup>3</sup>	7850	Ширина среза, мм	2.8888	Максимальная контактная температура в точке M	1003.2157
Коэф-т теплопроводности заготовки, м/кв/с	0.0000067	Суммарная длина рабочих участков режущей кромки среза, мм	3.7507	Температура в точке C	770.0523
Коэф-т теплопроводности заготовки, Дж/м <sup>2</sup> *с*град	33.9	<input type="button" value="Расчет и схемы"/>		Максимальная температура трения на задней поверхности среза	1260.3125
Сопротивление обрабатываемого материала, Н/мм <sup>2</sup>	66300000			Координата max суммарных контактных температур на задней поверхности среза	0.4987971
Главный угол в плане, град	60	<b>Вычисление сил резания</b>		Суммарная контактная температура в точке N	1345.7610
Вспомогательный угол в плане, град	30	Критерий Пахла	116.01	Средняя контактная температура в точке D	978.93151
Угол при вершине реза, град	90	Тангенциальная составляющая силы стружкиобразования, Н	2479.6	Средняя контактная температура на участке AD	1174.1725
Радиус при вершине, мм	1	Радиальная составляющая силы стружкиобразования, Н	452.8	<input type="button" value="Схемы и формулы"/> <input type="button" value="Расчет"/>	
Главный передний угол, град	16	Сила трения, Н	1118.73	<b>Расчет средних тепловых потоков</b>	
Главный задний угол, град	10	Нормальная сила, Н	2258.74	Доля теплоты трения, уходящая в деталь, Дж/с	3218.14995
Угол заострения реза, град	64	Сила трения на задней поверхности, Н	2633.03	Доля теплоты трения уходящая в резец, Дж/с	40.4172820
Коэффициент теплопроводности реза, Дж/м <sup>2</sup> *с*град	20.9	Нормальная сила на задней поверхности, Н	5316.11	Средний тепловой поток детали, Дж/с	344056.323
Падана, мм/об	0.9	<input type="button" value="Схемы и формулы"/> <input type="button" value="Расчет"/>		Средний тепловой поток реза, Дж/с	4321060.74
Частота вращения шпинделя, об/мин	250	<b>Вычисление длины контакта</b>		<input type="button" value="Расчет и схемы"/>	
Скорость резания, м/мин	75.4	Длина контакта на задней поверхности не изнашиваемого инструмента, м	0.0024938	<b>Температура стружки и детали</b>	
Диаметр детали, мм	96	Длина контакта стружки с инструментом, м	0.0008974	Теплота детали, Дж/с	2574.4286
Глубина резания, мм	2	Величина поднимаемого слоя металла h, м	0.0001773	Теплота стружки, Дж/с	2564.8275
<input type="button" value="Закрыть"/>		Величина поднимаемого слоя металла fu, м	0.0001064	<input type="button" value="Расчет и схемы"/>	
		<input type="button" value="Расчет и схемы"/>			

Рис. 8.4. Результаты работы модуля

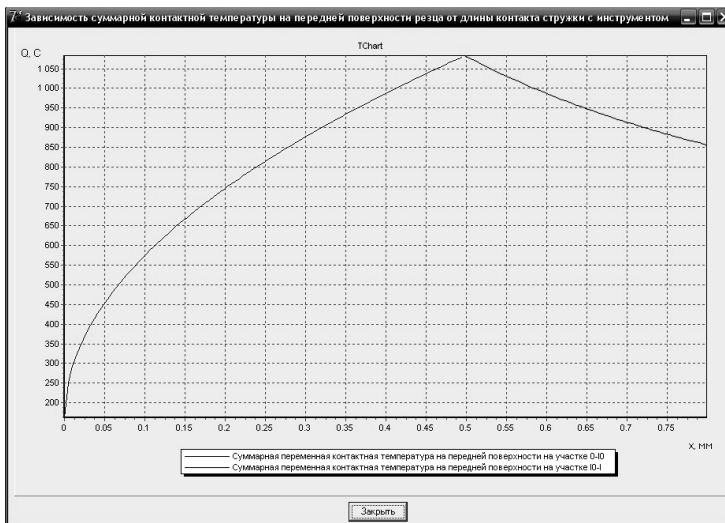


Рис. 8.5. График модуля



### 8.3. ВЫЧИСЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ СИСТЕМЫ СПИД И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ ВЛИЯНИЯ НА ТОЧНОСТЬ РАЗМЕРОВ И ФОРМЫ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ЗАГОТОВКИ

После проведения моделирования нагрузок, действующих на режущий инструмент в Autodesk Inventor 2011, были получены результаты размещенные в табл. 8.4.

Отжатие узлов станка при резании:

$$y_{ст} = P_y / j.$$

Жесткость станка примем 20 000 Н/мм.

$$y_{ст} = 851,3 / 20000 = 0,0425 \text{ мм.}$$

Определение отжатия  $y_{заг}$

$$y_{заг} = P_y l^3 / (48EJ),$$

где  $l$  – длина заготовки  $l = 280$  мм;  $E$  – модуль упругости  $E = 21\,0000$  Н/мм<sup>2</sup>;  $J$  – момент инерции сечения заготовки (для круглого вала  $J = 0,05D^4$ )  $J = 0,05 \cdot 964 = 4\,246\,732,8$  мм<sup>4</sup>.

$$y_{заг} = 849,55 \cdot 280^3 / (48 \cdot 210000 \cdot 4246732,8) = 0,000437 \text{ мм.}$$

Вычислим отжатие реза  $y_{инстр}$  по формуле

$$y_{инстр} = \sqrt{((d/2) + x)^2 + h^2} - d/2,$$

где  $h$  – смещение реза по оси  $Z$ ,  $h = 0,022$  мм;  $z$  – смещение реза по оси  $X$ ,  $x = 0,031$  мм.

$$y_{инстр} = \sqrt{((96/2) + 0,031)^2 + 0,022^2} - 96/2 = 0,031 \text{ мм.}$$

### 8.4. Результаты моделирования

Имя	Минимальная	Максимальная
Объем	1 741 590 мм <sup>3</sup>	
Масса	13,6707 кг	
Напряжение по Мизесу	0 МПа	475,843 МПа
1-е основное напряжение	-227,603 МПа	510,281 МПа
3-е основное напряжение	-665,715 МПа	106,648 МПа
Смещение	0 мм	0,210726 мм
Коэффициент запаса прочности	0,474267 бр	15 бр
Смещение по оси X	-0,0314288 мм	0,0292064 мм
Смещение по оси Y	-0,210588 мм	0,000326223 мм
Смещение по оси Z	-0,0229507 мм	0,0189765 мм

7 Оценка погрешности обработки

Начальные данные		Длина заготовки L, мм		Нормальная составляющая силы резания F <sub>y</sub> , Н	
Модуль Юнга E, Н/мм.кв	210000	280		851.3	
Диаметр детали d, мм	96	Допуск на диаметр, мм	0.35		
Смещение узлов станка					
Укажите жесткость станка	20000	Расчет			
Упругое отжатие узлов станка, мм	0.04				
Смещение заготовки					
Расчет					
<input checked="" type="radio"/> Установка заготовки в центре					
<input type="radio"/> Установка заготовки в патроне					
<input type="radio"/> Заготовка закреплена в патроне и поддерживается центром					
Отжатие заготовки y, мм					
0.000437					
Смещение реза			Проверка точности обработки		
Смещение реза по оси X, мм	0.031	Приращение диаметра, мм		0.142884076824848	
Смещение реза по оси Z, мм	0.022	Расчетная жесткость системы СПИД, Н/мм		11915.95	
Расчет			Расчет		
Упругое отжатие инструмента, мм	0.0310050384124239	Вывод: Погрешность обработки не превышает допуск			

Рис. 8.6. Результаты работы модуля «Оценка погрешности обработки»

Определяем общее увеличение диаметра  $\Delta D$  по формуле (5.1):

$$\Delta D = 2(0,0425 + 0,000437 + 0,031) = 0,148 \text{ мм.}$$

$\Delta D$  не превышает допуска на обрабатываемый диаметр, что свидетельствует о соблюдении необходимой точности обработки.

Те же расчеты были произведены в модуле «Оценки погрешности обработки».

Результаты расчета модуля и выводы сделанные им представлены на рис. 8.6.

#### 8.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Имея в качестве исходных данных результаты моделирования силовых и тепловых нагрузок на режущий инструмент, исследуем передаточную функцию процесса резания (1.47).

На рисунках 8.7 – 8.9 приведены амплитудно-фазовые частотные характеристики (АФЧХ) процесса резания во всем диапазоне автоколебаний, построенные в плоскости комплексного переменного.

При этом постоянная времени  $T_{cy} < 0$  и происходит отставание изменения силы резания от изменения величины срезаемого слоя. При увеличении главного угла в плане происходит увеличение величины срезаемого слоя, что, в свою очередь, приводит к снижению отставания изменения силы резания. Это позволяет говорить о том, что необходимо увеличивать в определенных пределах главный угол в плане.

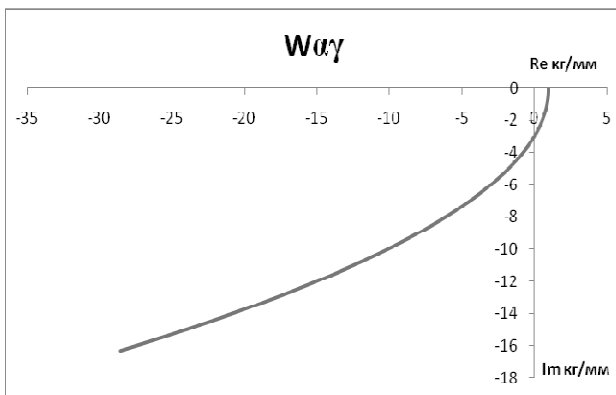


Рис. 8.7. АФЧХ процесса резания, характеристика  $W_{ay}$

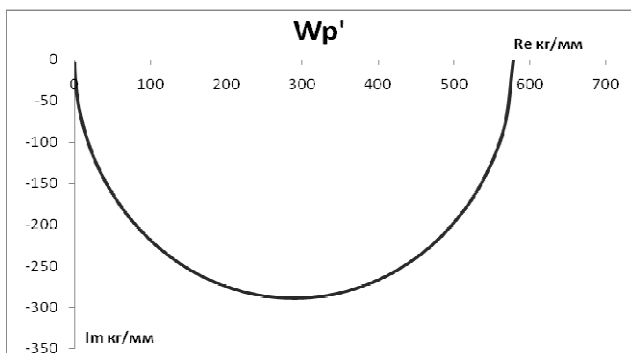


Рис. 8.8. АФЧХ процесса резания, характеристика  $W_p'$

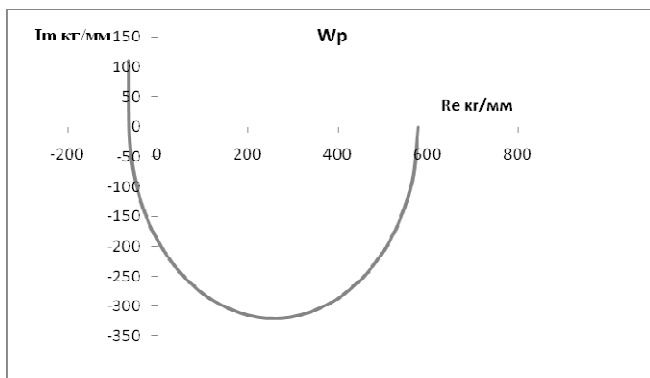


Рис. 8.9. АФЧХ процесса резания, характеристика  $W_p$

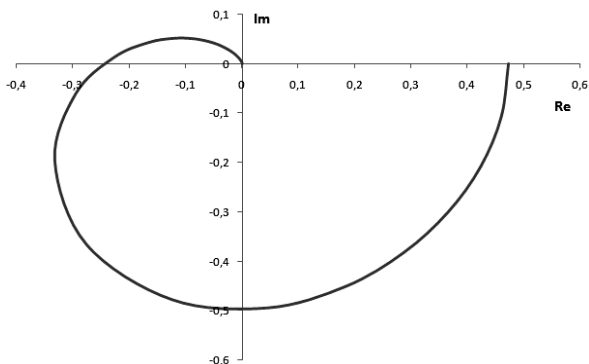


Рис. 8.10. АФЧХ упругой системы

По выражению (1.51) построим АФЧХ упругой системы (рис. 8.10).

Из рисунка 8.10 видно, что, согласно критерию устойчивости Найквиста, данная упругая система собственно устойчива, так как АФЧХ не выходит за границы точки с координатами  $-1,0$  на ее вещественной оси. Однако, отрезок  $Re_{yc}^*$ , отсекаемый характеристикой УС на отрицательной вещественной оси меньше отрезка, отсекаемого характеристикой УС на положительной вещественной оси. Это свидетельствует о высокой виброустойчивости системы, при этом деформации системы оказывают сильное влияние на точность обработки.

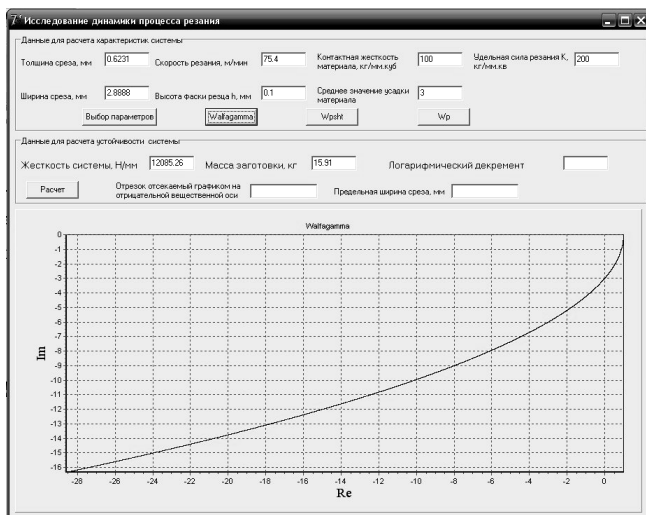


Рис. 8.11. АФЧХ процесса резания, характеристика  $W_{ay}$ , построенная модулем

Оценим предельную величину ширины срезаемого слоя по выражению (1.53). Исходя из принятых ранее параметров резания, имеем  $b_{пр} = 11,94$  мм. Данная величина больше рассчитанной ширины среза  $b = 2,88$  мм, что свидетельствует о большом запасе устойчивости системы.

Графики и расчеты, выполненные модулем исследования динамики процесса резания, показаны на рис. 8.11 – 8.14.

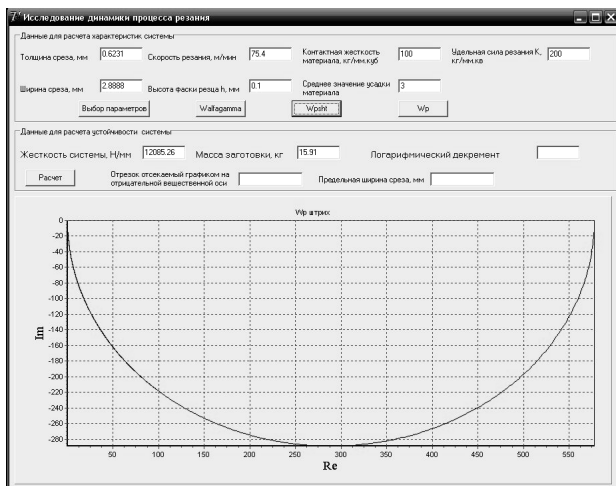


Рис. 8.12. АФЧХ процесса резания, характеристика  $W_p'$ , построенная модулем

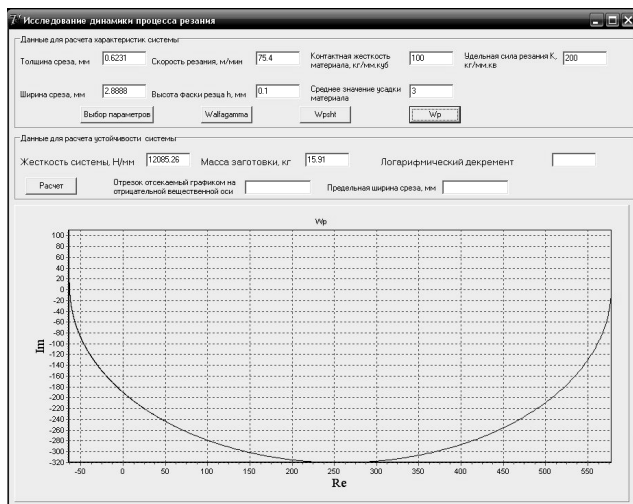


Рис. 8.13. АФЧХ процесса резания, характеристика  $W_p$ , построенная модулем

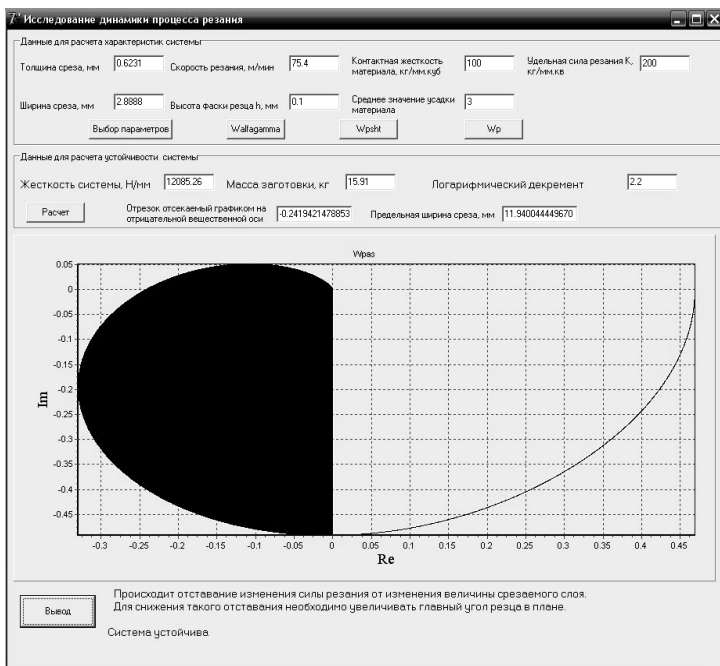


Рис. 8.14. АФЧХ упругой системы, построенная модулем

## 8.5. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ

Сформулируем ограничения на целевую функцию согласно выражениям (1.56) – (1.65):

$$1) \quad n s^{y_v} \leq \frac{1000 C_v K_v}{T^m t^{x_v} d \pi},$$

где  $C_v = 280$ ;  $y_v = 0,45$ ;  $m = 0,2$ ;  $x = 0,15$ ;  $T = 60$  мин;  $d = 96$  мм;  $K_v = 0,7$ .

$$n s^{0,45} \leq \frac{1000 \cdot 280 \cdot 0,7}{60^{0,2} \cdot 2^{0,15} \cdot 96 \cdot 3,14}$$

$$2) \quad n^{n_z+1} s^{y_z} \leq \frac{N_H \eta \cdot 6120 \cdot (10^3)^{n_z+1}}{C_z t^{x_z} d^{n_z+1} \pi^{n_z+1} K_z},$$

где  $N_H = 10$  кВт (для станка 16К20);  $\eta = 0,75$  – к.п.д. станка;  $C_{pz} = 300$ ;  $x_z = 1$ ;  $y_z = 0,75$ ;  $n_z = -0,15$ ;  $K_{pz} = 0,89$ .

$$n^{-0,15+1} s^{0,75} \leq \frac{10 \cdot 0,75 \cdot 6120 \cdot (10^3)^{-0,15+1}}{300 \cdot 2^1 \cdot 96^{-0,15+1} \cdot 3,14^{-0,15+1} \cdot 0,89} = 238,102 ;$$

3)  $n \geq n_{\text{ст.мин}}$ , где  $n_{\text{ст.мин}} = 12,5$  об/мин – минимально возможная частота вращения шпинделя станка 16К20;

4)  $n \leq n_{\text{ст.макс}} = 1600$  об/мин, где  $n_{\text{ст.макс}}$  – максимально возможная частота вращения шпинделя для станка 16К20;

$$5) n^{n_z} s^{y_z} \leq \frac{BH^2 (10^3)^{n_z} \sigma_{\text{изг}}}{60 \cdot C_z t^{x_z} d^{n_z} \pi^{n_z} K_z l K_{3,п}}$$

где  $BH = 16 \cdot 25$  мм – сечение резца;  $l = 50$  мм – вылет резца;  $K_{3,п} = 1,5$  – коэффициент запаса прочности.

$$n^{-0,15} s^{0,75} \leq \frac{16 \cdot 25^2 \cdot (10^3)^{-0,15} \cdot 800}{60 \cdot 300 \cdot 2^1 \cdot 96^{-0,15} \cdot 3,14^{-0,15} \cdot 0,89 \cdot 50 \cdot 1,5} = 2,7813 ;$$

6)  $s \geq s_{\text{ст.мин}}$ , где  $s_{\text{ст.мин}} = 0,05$  мм/об – минимально допустимая подача для станка 16К20;

7)  $s \leq s_{\text{ст.макс}}$ , где  $s_{\text{ст.макс}} = 2,8$  мм/об – максимально допустимая подача для станка 16К20;

$$8) n^{n_y} s^{y_y} \leq \frac{\Delta (10^3)^{n_y} j}{20 C_y t^{x_y} K_{py} \pi^{n_y} d^{n_y}}$$

где  $j = 11\,915,95$  Н/мм – жесткость системы СПИД;  $\Delta = 0,35$  мм – допуск на размер;

$$n^{-0,3} s^{0,6} \leq \frac{0,35 \cdot (10^3)^{-0,3} \cdot 11\,915,95}{20 \cdot 243 \cdot 2^{0,9} \cdot 0,73 \cdot 3,14^{-0,3} \cdot 96^{-0,3}} = 0,44 ;$$

$$9) n^{n_y} s^{y_y} \leq \frac{K_{ж} E f \cdot (10^3)^{n_y} d^{4-n_y} \pi^{1-n_y}}{C_y t^{x_z} K_{py} L_{\text{заг}}^3}$$

где  $K_{ж} = 0,075$  – коэффициент изменяющийся в зависимости от способа закрепления заготовки;  $f = 0,2 \cdot \Delta = 0,2 \cdot 0,35 = 0,07$  мм – допустимая стрела прогиба заготовки;  $L_{\text{заг}} = 280$  мм – длина заготовки.

$$n^{-0,3} s^{0,6} \leq \frac{0,075 \cdot 210000 \cdot 0,07 \cdot (10^3)^{-0,3} \cdot 96^{4+0,3} \pi^{1+0,3}}{243 \cdot 2^{0,9} \cdot 0,73 \cdot 280^3} = 28,26 \$$$

$$10) s \leq 0,07 \sqrt{R_z r}, \text{ где } R_z = 80 \text{ мкм; } r = 1 \text{ мм.}$$

$$s \leq 0,07 \sqrt{80 \cdot 1} = 0,6261.$$

Прологарифмировав и обозначив  $\ln(n) = x_1$ ,  $\ln(s) = x_2$ , получим систему ограничений

$$W \begin{cases} x_2 \geq -2,9957 \\ x_2 \leq 1,0296 \\ x_1 \geq 2,5257 \\ x_1 \leq 7,3778 \\ x_1 + 0,45x_2 \leq 5,5539 \\ 0,85x_1 + 0,75x_2 \leq 5,47 \\ -0,15x_1 + 0,75x_2 \leq 1,023 \\ -0,3x_1 + 0,6x_2 \leq -0,81 \\ -0,3x_1 + 0,6x_2 \leq 3,34 \\ x_2 \leq -0,4682 \end{cases}$$

Представим эту математическую модель в графическом виде (рис. 8.15). Решением системы неравенств является многоугольник, выделенный на рисунке черным. Критерий оптимальности будет максимален в точке пересечения графиков ограничения 5 и 8.

Для нахождения этой точки нужно решить систему уравнений

$$\begin{cases} x_1 + 0,45x_2 = 5,5539; \\ x_2 = -0,4682, \end{cases}$$

отсюда

$$x_1 = 5,5539 - 0,45x_2;$$

$$x_1 = 5,5539 - 0,45 \cdot (-0,4682) = 5,7646.$$

Находим значение оптимальных режимов резания:

$$n = \exp(x_1) = \exp(5,7646) = 318,81 \text{ мин}^{-1};$$

$$s = \exp(x_2) = \exp(-0,4682) = 0,6261 \text{ об/мин}.$$

Оптимальные режимы резания, рассчитанные блоком расчета оптимальных параметров процесса резания, показаны на рис. 8.16.



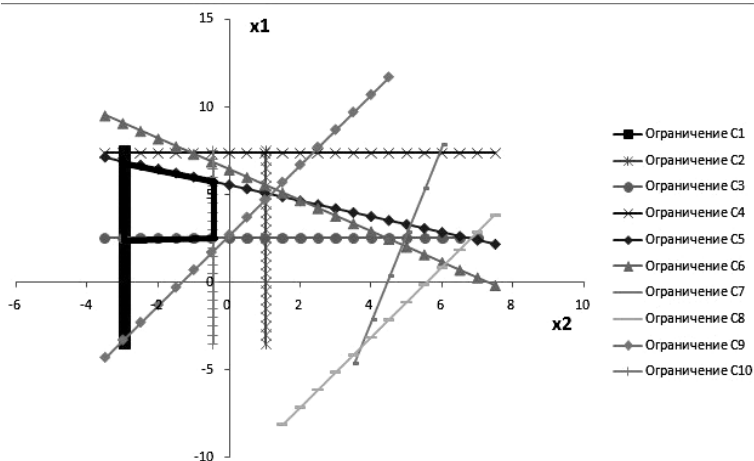


Рис. 8.15. Графическое решение системы неравенств

Оптимизация параметров процесса резания

Диаметр детали, мм 96	Ширина реза, мм 16	Наибольшая подача, мм/об 2,8	Наибольшая частота вращения шпинделя, об/мин 1600
Глубина резания, мм 2	Высота реза, мм 25	Наименьшая подача, мм/об 0,05	Наименьшая частота вращения шпинделя, об/мин 12,5
Длина вылета реза из резцодержателя, мм 50	Предел прочности державки реза при изгибе, Н/мм <sup>2</sup> 800	Мощность станка, кВт 10	
Коэффициент запаса прочности для резцодержки 1,5	Шероховатость поверхности R <sub>a</sub> , мкм 80	КПД станка 0,75	

C1=-2,99573227355399  
 C2=-1,02961941718116  
 C3=-2,52572864430826  
 C4=-7,37775890822787  
 C5=-5,4750115476871  
 C6=-5,48933508035329  
 C7=-1,01955688652546  
 C8=-0,82376028808925  
 C9=-3,33925105344317  
 C10=-0,468246719395937

Оптимальная частота вращения шпинделя, об/мин: 316,781598118251  
 Оптимальная подача, мм/об: 0,62609803693941

Рис. 8.16. Результаты расчетов блока

Результаты работы созданных модулей системы совпадают с результатами, полученными после проведения численных экспериментов. Небольшие расхождения в значениях некоторых из рассчитанных величин связаны с округлениями, принятыми во время ручных вычислений.

Таким образом, численные эксперименты доказали адекватность и точность алгоритмов, заложенных в разработанные приложения, что позволяет использовать их в качестве блоков системы автоматизированного проектирования процессов резания.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

---

В настоящей работе создана теоретическая база для работы САПР, осуществляющей подбор оптимальных параметров процесса резания, а также представлена разработка основных блоков этой системы и отработана передача данных между ними.

Показана возможность создания специализированной САПР процессов резания на основе работы программ объектно-ориентированного программирования и программ твердотельного моделирования.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

---

1. Силин С.С. Метод подбора при резании материалов. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.
2. Подгорков В.В. Резание металлов. Электронный конспект лекций [Электронный ресурс] / Ивановский государственный энергетический университет. – Режим доступа: <http://elib.ispu.ru/library/lessons/Podgorkov/index.html>.
3. Исследование температуры в зоне резания при точении на токарном станке. Студенческая контрольная работа [Электронный ресурс] / Тольяттинский филиал Самарского государственного педагогического университета. – Тольятти – 1999 – Режим доступа: <http://mixport.ru/referat/referat/57696/>.
4. Ульман Е. На пути к новым режущим материалам. Станки, современные технологии и инструмент для металлообработки [Электронный ресурс] / Информационно-аналитический сайт по материалам зарубежной печати. – Режим доступа: <http://www.stankoinform.ru/index.htm>.
5. Кудинов В.А. Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
6. Пестрецов С.И. Компьютерное моделирование и оптимизация процессов резания: учеб. пособие. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009 – 104 с.
7. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001. – Т. 1. – 656 с.
8. Горанский Г.К. Расчет режимов резания при помощи электронно вычислительных машин. – Минск: Государственное издательство БССР, 1963. – 192 с.
9. Виноградов Ю.В. Моделирование процесса резания металла методом конечных элементов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Тула: ТулГУ, 2004. – 16 с.
10. Иващенко А.П. Математическое моделирование численными методами напряженно-деформированного состояния элемента стружки в программе ANSYS // Прогрессивные технологии в обучении и производстве. IV Всероссийская конференция. – Камышин, 2006. – Т. 1. – 104 с.
11. ANSYS – simulation driven product development [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ansys.com/>.

12. Сайт компании КАДФЕМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ansys.msk.ru/>.

13. Сайт ELCUT® – программы моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://elcut.ru/>.

14. Pro|TECHNOLOGIES – системный интегратор в области поставки и внедрения CAD/CAM/CAE/PDM/PLM решений. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.pro-technologies.ru/product/Pro-ENGINEER>.

15. Сайт компании CSoft, поставщика Unigraphics-NX [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.csoft.ru/catalog/soft/nx/unigraphics-nx.html>.

16. ГОСТ 34.003–90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Термины и определения. Введ. 01.01.1992. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 68 с.

17. Кошелев В.Е. Access 2007. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2008. – 592 с.

18. Климова Л.М. Delphi 7. Основы программирования. Решение типовых задач. Самоучитель. – 2-е изд., доп. – М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2005. – 480 с.

19. Бобровский С.И. Delphi 7. Учебный курс. — СПб.: Питер, 2004. – 736 с.

20. Consistent Software [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.consistent.ru/soft/>.

21. Пономарев В.А. Базы данных в Delphi 7. Самоучитель. – СПб.: Питер, 2003 – 224 с.

22. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1974. – Ч. 1. – 406 с.

23. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001. – Т. 2. – 912 с.

24. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник для машиностроительных вузов по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты». – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.

25. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / под ред. А.Н. Малова [и др.]. – 3-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1972, – Т. 2. – 568 с.

26. Комплект программ для ЭВМ «Управление блоками САПР процессов резания». Программа находится на стадии регистрации.

27. Алтунин К.А., Пестрецов, С.И. Применение CAD/CAE/CAM-систем в моделировании и оптимизации процессов резания // Материалы II-ой Междунар. кластерной науч.-практ. конф. «Аспекты ноосферной безопасности в приоритетных направлениях деятельности человека». «ТР-принт». 2011. – С. 18–19.

28. Алтунин К.А., Пестрецов С.И. Разработка элементов системы автоматизированного проектирования процессов резания // Материалы IV-ой Межвуз. науч.-практ. ежегодной конф. «Новые технологии и инновационные разработки». – Тамбов: Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – С. 114–115.

29. Алтунин К.А., Пестрецов С.И. Оценка возможности применения CAD/CAE/CAM-систем при проектировании процессов резания и металлорежущих станков. [Электронный ресурс] // Материалы III-ей Всерос. науч.-практ. кластерной заочной электронной конф. «Кооперация науки, образования, производства и бизнеса: новые идеи и перспективы безопасного развития в ближайшем будущем». 2011 – С. 347 – 348. – Режим доступа: <http://innovatika.web.tstu.ru/word/konf-el/sbornik.rar>.

30. Алтунин К.А., Пестрецов С.И. Программа расчета параметров математической модели процесса резания. [Электронный ресурс] // Материалы круглого стола «Аспекты техносферной безопасности в приоритетных направлениях деятельности человека». – Тамбов, 2011. – Режим доступа: [http://innovatika.web.tstu.ru/word/konf-el/2012/ techno\\_altunin.doc](http://innovatika.web.tstu.ru/word/konf-el/2012/ techno_altunin.doc).

## ПРИЛОЖЕНИЯ

---

### Приложение А

#### ЛИСТИНГ БЛОКА ЗАДАНИЯ НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

```
unit Unit1;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls,
Forms,
  Dialogs, DB, ADODB, StdCtrls, Grids, DBGrids, OleServer,
CmAdmCtl,
  ShellAPI, Math, ExtCtrls;

type
  TDann = class(TForm)
    ADOConnection1: TADOConnection;
    ADODataset1: TADODataset;
    DataSource1: TDataSource;
    Stuli: TADOTable;
    Button1: TButton;
    Label1: TLabel;
    ADOTable2: TADOTable;
    Button2: TButton;
    Button3: TButton;
    Chugun: TADOTable;
    RadioButton1: TRadioButton;
    RadioButton2: TRadioButton;
    RadioButton3: TRadioButton;
    Cvetmet: TADOTable;
    RadioButton4: TRadioButton;
    Rudiustab: TADOTable;
    Button4: TButton;
    Label2: TLabel;
    Button5: TButton;
    Edit1: TEdit;
    Edit2: TEdit;
```

Label3: TLabel;  
Label4: TLabel;  
ComboBox1: TComboBox;  
Label5: TLabel;  
ComboBox2: TComboBox;  
Label6: TLabel;  
Button8: TButton;  
ComboBox5: TComboBox;  
ComboBox6: TComboBox;  
Rezhchast: TADOTable;  
Label8: TLabel;  
Label10: TLabel;  
Button11: TButton;  
Edit3: TEdit;  
Edit4: TEdit;  
Edit5: TEdit;  
Label11: TLabel;  
Label12: TLabel;  
Label13: TLabel;  
Button12: TButton;  
Tverd: TADOTable;  
Button13: TButton;  
Stanki: TADOTable;  
GroupBox1: TGroupBox;  
Label7: TLabel;  
Label9: TLabel;  
Button6: TButton;  
ComboBox3: TComboBox;  
Button7: TButton;  
ComboBox4: TComboBox;  
RadioGroup1: TRadioGroup;  
Button9: TButton;  
GroupBox2: TGroupBox;  
Button14: TButton;  
Button15: TButton;  
procedure Button1Click(Sender: TObject);  
procedure Button2Click(Sender: TObject);  
procedure Button3Click(Sender: TObject);  
procedure Button4Click(Sender: TObject);  
procedure Button5Click(Sender: TObject);  
procedure Button6Click(Sender: TObject);  
procedure Button7Click(Sender: TObject);

```

    procedure Button8Click(Sender: TObject);
    procedure Button11Click(Sender: TObject);
    procedure Button12Click(Sender: TObject);
    procedure Button13Click(Sender: TObject);
    procedure Button14Click(Sender: TObject);
    procedure Button15Click(Sender: TObject);
    procedure Button9Click(Sender: TObject);
    { Private declarations }
public
    { Public declarations }
end;

var
    Dann: TDann;
    nmin, nmax, Nst, kpd, smin, smax: string;

implementation

uses Unit2;

{$R *.dfm}

var
    mat, marka, res, kt, tau, fi, fi1, epsilon, r, alfa, Kiv, gamma, betta: variant;
    splav, Kpv, rh, vh, Kmv, Kg, nv, step, n, ffi, vd, nd, d, t, v, Cv, x: variant;
    y, m, a, f, nd1, s: variant;
    tfile, Pfile, optimfile, stanfile: TextFile;
    xpz, ypz, npz, Cpz, np1, Py, sechB, sechH, Rz: variant;
    sigmap, skobka, Kmp, Kfi, Kfiz, Krp, Krpz, mE, Pz: variant;
    xp, yp, np, Cp: variant;
    h, glub, dium, cher, hst: string;
    rezec, str: string;
    sigma, rezh: string;

    procedure Errorrezec;
    var
    h: hwnd;
    begin
    ShowMessage('Данного резца нет в базе данных. Задайте его
    характеристики');
    repeat
    {$I-}
        ShellExecute(h, 'open', 'BDrezec\Baza.accdb', nil, nil, SW_SHOW);
    until

```



```

{$I+}
res:=IOResult;
if res <> 0 then
  ShellExecute(h,'open','Baza.accdb',nil,nil,SW_SHOW);
until (res= 0);
end;

procedure TDann.Button9Click(Sender: TObject);
begin
  dium:=InputBox('Задание начальных условий','Укажите диаметр детали в мм и щелкните на ОК,');
  glub:=InputBox('Задание начальных условий','Укажите глубину резания в мм и щелкните на ОК,');
  Edit1.Text:=glub;
  Edit2.Text:=dium;
  if Edit1.Text="" then
    ShowMessage('Укажите глубину резания');
  if Edit2.Text="" then
    ShowMessage('Укажите диаметр детали');
  t:=StrToFloat(Edit1.Text);
  d:=StrToFloat(Edit2.Text);
  end;

  procedure TDann.Button1Click(Sender: TObject);
  begin
  if RadioButton4.Checked then
    ShowMessage('Укажите категорию материала')
  else
    begin
    h:=InputBox('Выборка информации из базы данных','Укажите марку материала и щелкните на ОК,');
    if RadioButton1.Checked then
      if h <> '' then
        begin
          marka:=Stuli.Lookup('Марка',h,'Теплостойкость');
          mat:=Stuli.Lookup('Марка',h,'Плотность');

          res:=Stuli.Lookup('Марка',h,'Коэффициент_температуропроводности');
          kt:=Stuli.Lookup('Марка',h,'Коэффициент_теплопроводности');
          tau:=Stuli.Lookup('Марка',h,'Сопротивление пластичному сдвигу');
          mE:=Stuli.Lookup('Марка',h,'Модуль упругости E');
        end;
    end;
  end;

```

```

if RadioButton2.Checked then
  if h <> " then
    begin
      marka:=Chugun.Lookup('Марка',h,'Теплостойкость');
      mat:=Chugun.Lookup('Марка',h,'Плотность');

res:=Chugun.Lookup('Марка',h,'Коэффициент_температуропроводности');
  kt:=Chugun.Lookup('Марка',h,'Коэффициент_теплопроводности');
  tau:=Chugun.Lookup('Марка',h,'Сопротивление пластичному
сдвигу');
  mE:=Stuli.Lookup('Марка',h,'Модуль упругости E');
  end;
  if RadioButton3.Checked then
    if h <> " then
      begin
        marka:=Cvetmet.Lookup('Марка',h,'Теплостойкость');
        mat:=Cvetmet.Lookup('Марка',h,'Плотность');

res:=Cvetmet.Lookup('Марка',h,'Коэффициент_температуропроводности');
  kt:=Cvetmet.Lookup('Марка',h,'Коэффициент_теплопроводности');
  tau:=Cvetmet.Lookup('Марка',h,'Сопротивление пластичному
сдвигу');
  splav:=Cvetmet.Lookup('Марка',h,'Вид сплава');
  mE:=Stuli.Lookup('Марка',h,'Модуль упругости E');
  end;
end;
if (marka = Null) or (res = Null) or (kt = Null) or (mat = Null) or
(tau = Null) then
  begin
    ShowMessage('Данного материала нет в базе данных или не заданны
все его характеристики. Задайте его характеристики');
    ShellExecute(handle,'open','Baza.accdb',nil,nil,SW_SHOW);
  end;
end;

  procedure TDann.Button8Click(Sender: TObject);
  begin
    if ComboBox1.Text="" then
      ShowMessage('Укажите вид обработки');
    if ComboBox5.Text="" then
      ShowMessage('Укажите условия обработки');
    if ComboBox6.Text="" then

```

```

ShowMessage('Укажите жесткость системы СПИД');
if RadioButton4.Checked then
  ShowMessage('Укажите категорию материала');
if RadioButton1.Checked then
begin
if ComboBox1.Text='Черновая обработка' then
begin
if ComboBox5.Text='Прерывистое резание (с ударом)' then
begin
case ComboBox6.ItemIndex of
0: rezh:= 'T5K10';
1: rezh:= 'BK8';
2: rezh:= 'P6M5';
end;
end;
if ComboBox5.Text='Непрерывное резание' then
begin
case ComboBox6.ItemIndex of
0: rezh:= 'T15K6';
1: rezh:= 'T14K8';
2: rezh:= 'T5K10';
end;
end;
end;
if ComboBox1.Text='Чистовая обработка' then
begin
if ComboBox5.Text='Прерывистое резание (с ударом)' then
begin
case ComboBox6.ItemIndex of
0: rezh:= 'T15K6';
1: rezh:= 'T14K8';
2: rezh:= 'T5K10';
end;
end;
end;
if ComboBox5.Text='Непрерывное резание' then
begin
case ComboBox6.ItemIndex of
0: rezh:= 'T30K4';
1: rezh:= 'T15K6';
2: rezh:= 'T15K6';
end;
end;
end;
end;

```

```

end;
end;
if RadioButton2.Checked then
begin
  if ComboBox1.Text='Черновая обработка' then
  begin
    if ComboBox5.Text='Прерывистое резание (с ударом)' then
    begin
      case ComboBox6.ItemIndex of
        0: rezh:= 'BK6';
        1: rezh:= 'BK6';
        2: rezh:= 'BK8';
      end;
    end;
  end;
  if ComboBox5.Text='Непрерывное резание' then
  begin
    case ComboBox6.ItemIndex of
      0: rezh:= 'BK6';
      1: rezh:= 'BK6';
      2: rezh:= 'BK8';
    end;
  end;
end;
if ComboBox1.Text='Чистовая обработка' then
begin
  if ComboBox5.Text='Прерывистое резание (с ударом)' then
  begin
    case ComboBox6.ItemIndex of
      0: rezh:= 'BK6';
      1: rezh:= 'BK6';
      2: rezh:= 'BK8';
    end;
  end;
  if ComboBox5.Text='Непрерывное резание' then
  begin
    case ComboBox6.ItemIndex of
      0: rezh:= 'BK4';
      1: rezh:= 'BK3';
      2: rezh:= 'BK6';
    end;
  end;
end;
end;
end;

```

```

end;
if RadioButton3.Checked then
begin
  if ComboBox1.Text='Черновая обработка' then
  begin
    if ComboBox5.Text='Прерывистое резание (с ударом)' then
    begin
      case ComboBox6.ItemIndex of
        0: rezh:= 'BK6';
        1: rezh:= 'BK6';
        2: rezh:= 'P6M5';
      end;
    end;
    if ComboBox5.Text='Непрерывное резание' then
      rezh:= 'BK6';
  end;
  if ComboBox1.Text='Чистовая обработка' then
  begin
    if ComboBox5.Text='Прерывистое резание (с ударом)' then
    begin
      case ComboBox6.ItemIndex of
        0: rezh:= 'BK6';
        1: rezh:= 'BK6';
        2: rezh:= 'BK6';
      end;
    end;
    if ComboBox5.Text='Непрерывное резание' then
    begin
      case ComboBox6.ItemIndex of
        0: rezh:= 'BK4';
        1: rezh:= 'BK4';
        2: rezh:= 'BK4';
      end;
    end;
  end;
end;
rh:=Rezhchast.Lookup('Марка',rezh,'Коэффициент_теплопроводности');
vh:=Rezhchast.Lookup('Марка',rezh,'Вид материала');
end;

procedure TDann.Button2Click(Sender: TObject);
var

```

```

h: hwnd;
l, p: integer;
str1: string;
sechenie: variant;
begin
str1 := 'x';
rezec := InputBox('Выборка информации из базы данных', 'Укажите
обозначение реза (например 2100-0552) и щелкните на ОК,');
if rezh = " then
  ShowMessage('Выберите материал режущей части');
if rezh = 'P6M5' then
  if rezec <> " then
  begin
    fi := ADOTable2.Lookup('Обозначение', rezec, 'Главный угол в
плане');
    fi1 := ADOTable2.Lookup('Обозначение', rezec, 'Вспомогательный
угол в плане');
    epsilon := ADOTable2.Lookup('Обозначение', rezec, 'Угол при вер-
шине в плане');
    r := ADOTable2.Lookup('Обозначение', rezec, 'Радиус при
вершине');
    sechenie := ADOTable2.Lookup('Обозначение', rezec, 'Сечение реза
H x B, мм');
  end;
  if rezh <> 'P6M5' then
    if rezec <> " then
    begin
      fi := Tverd.Lookup('Обозначение', rezec, 'Главный угол в плане');
      fi1 := Tverd.Lookup('Обозначение', rezec, 'Вспомогательный угол в
плане');
      epsilon := Tverd.Lookup('Обозначение', rezec, 'Угол при вершине в
плане');
      r := Tverd.Lookup('Обозначение', rezec, 'Радиус при вершине');
      sechenie := Tverd.Lookup('Обозначение', rezec, 'Сечение реза H x
B, мм');
    end;
    if (fi = Null) or (fi1 = Null) or (epsilon = Null) or (r = Null) then
    begin
      ShowMessage('Данного реза нет в базе данных. Задайте его харак-
теристики. Или резец не соответствует материалу режущей части');
      ShellExecute(h, 'open', 'Baza.accdb', nil, nil, SW_SHOW);
    end
  end
end

```

```

else
begin
    P:=Pos(Str1, sechenie);
    L:=Length(sechenie);
    sechB:=Copy(sechenie,1,P-1);
    sechH:=Copy(sechenie,P+1,L);
end;
    end;

    procedure TDann.Button4Click(Sender: TObject);
    begin
if RadioButton1.Checked then
begin
    sigma:=InputBox('Укажите временное сопротивление обрабаты-
ваемого материала в МПа и щелкните на ОК,');
    if StrToInt(sigma)>800 then
        gamma:=12
    else
        gamma:=16;
    end;
if RadioButton2.Checked then
begin
    sigma:=InputBox('Укажите твердость по Бринелю обрабатываемо-
го материала и щелкните на ОК,');
    if StrToInt(sigma)>220 then
        gamma:=12
    else
        gamma:=16;
    end;
if RadioButton3.Checked then
    gamma:=12;
if RadioButton4.Checked then
    ShowMessage('Укажите категорию материала');
    alfa:=10;
    betta:=90-(gamma+alfa);
    end;

    procedure TDann.Button14Click(Sender: TObject);
    var
res: integer;
    begin

```

```

hst:=InputBox('Выборка информации из базы данных','Укажите модель станка и щелкните на ОК,');
if hst <> ""then
begin
  Nst:=Stanki.Lookup('Модель станка',hst,'Мощность двигателя, кВт');
  kpd:=Stanki.Lookup('Модель станка',hst,'КПД станка');
  nmin:=Stanki.Lookup('Модель станка',hst,'Минимальная частота вращения шпинделя, об/мин');
  nmax:=Stanki.Lookup('Модель станка',hst,'Максимальная частота вращения шпинделя, об/мин');
  smin:=Stanki.Lookup('Модель станка',hst,'Минимальная продольная подача, мм/об');
  smax:=Stanki.Lookup('Модель станка',hst,'Максимальная продольная подача, мм/об');
end;
if (Nst = Null) or (kpd = Null) or (nmin = Null) or (nmax = Null) or (smin = Null) or (smax = Null) then
begin
  ShowMessage('Данного станка нет в базе данных или не заданы все его характеристики. Задайте его характеристики');
  ShellExecute(handle,'open','Baza.accdb',nil,nil,SW_SHOW);
end
else
begin
  Edit3.Text:=nmin;
  Edit4.Text:=nmax;
  Nst:=nst;
  kpd:=kpd;
  nmin:=nmin;
  nmax:=nmax;
  smin:=smin;
  smax:=smax;
  AssignFile(stanfile, 'optimizer\stanfile.txt');
  repeat
    {$I-}
    Rewrite(stanfile);
    {$I+}
    res:=IOResult;
    if res <> 0 then
      AssignFile(stanfile, 'stanfile.txt');
  until (res= 0);
  DecimalSeparator:= '.';

```



```

writeln(stanfile, Nst);
writeln(stanfile, kpd);
writeln(stanfile, nmin);
writeln(stanfile, nmax);
writeln(stanfile, smin);
writeln(stanfile, smax);
Closefile(stanfile);
end;
end;

procedure TDann.Button15Click(Sender: TObject);
begin
Form2.Show;
end;

procedure TDann.Button5Click(Sender: TObject);
begin
if ComboBox1.Text="" then
  ShowMessage('Укажите вид обработки');
if RadioButton4.Checked then
  ShowMessage('Укажите категорию материала');
t:=StrToFloat(Edit1.Text);
d:=StrToFloat(Edit2.Text);
if ComboBox1.Text='Черновая обработка' then
begin
  if (Edit1.Text<>") and (Edit2.Text<>") then
  begin
    if RadioButton1.Checked then
    begin
      if d<=20 then s:=0.35;
      if (d>20) and (d<=40) then
      begin
        if t<=3 then s:=0.45;
        if (t>3) and (t<=5) then s:=0.35;
      end;
      if (d>40) and (d<=60) then
      begin
        if t<=3 then s:=0.7;
        if (t>3) and (t<=5) then s:=0.6;
        if (t>5) and (t<=8) then s:=0.5;
      end;
      if (d>60) and (d<=100) then

```

```

begin
  if t<=3 then s:=0.9;
  if (t>3) and (t<=5) then s:=0.8;
  if (t>5) and (t<=8) then s:=0.7;
  if (t>8) and (t<=12) then s:=0.6;
end;
if (d>100) and (d<=400) then
begin
  if t<=3 then s:=1.05;
  if (t>3) and (t<=5) then s:=0.95;
  if (t>5) and (t<=8) then s:=0.8;
  if (t>8) and (t<=12) then s:=0.7;
end;
if (d>400) and (d<=500) then
begin
  if t<=3 then s:=1.25;
  if (t>3) and (t<=5) then s:=1.15;
  if (t>5) and (t<=8) then s:=0.95;
  if (t>8) and (t<=12) then s:=0.9;
  if t>12 then s:=0.75;
end;
if (d>500) and (d<=600) then
begin
  if t<=3 then s:=1.35;
  if (t>3) and (t<=5) then s:=1.2;
  if (t>5) and (t<=8) then s:=1.05;
  if (t>8) and (t<=12) then s:=0.95;
  if t>12 then s:=0.65;
end;
if (d>600) and (d<=1000) then
begin
  if t<=3 then s:=1.5;
  if (t>3) and (t<=5) then s:=1.3;
  if (t>5) and (t<=8) then s:=1.15;
  if (t>8) and (t<=12) then s:=1.1;
  if t>12 then s:=1;
end;
if (d>1000) and (d<=2500) then
begin
  if t<=3 then s:=1.65;
  if (t>3) and (t<=5) then s:=1.55;
  if (t>5) and (t<=8) then s:=1.4;

```

```

    if (t>8) and (t<=12) then s:=1.3;
    if t>12 then s:=1.25;
end;
end;
if RadioButton2.Checked or RadioButton3.Checked then
begin
    if (d>=20) and (d<=40) then s:=0.45;
    if (d>40) and (d<=60) then
    begin
        if t<=3 then s:=0.75;
        if (t>3) and (t<=5) then s:=0.65;
        if (t>5) and (t<=8) then s:=0.55;
    end;
    if (d>60) and (d<=100) then
    begin
        if t<=3 then s:=1.1;
        if (t>3) and (t<=5) then s:=0.95;
        if (t>5) and (t<=8) then s:=0.8;
        if (t>8) and (t<=12) then s:=0.7;
    end;
    if (d>100) and (d<=400) then
    begin
        if t<=3 then s:=1.25;
        if (t>3) and (t<=5) then s:=1.35;
        if (t>5) and (t<=8) then s:=0.95;
        if (t>8) and (t<=12) then s:=0.75;
    end;
    if (d>400) and (d<=500) then
    begin
        if t<=3 then s:=1.45;
        if (t>3) and (t<=5) then s:=1.35;
        if (t>5) and (t<=8) then s:=1.1;
        if (t>8) and (t<=12) then s:=0.8;
    end;
    if (d>500) and (d<=600) then
    begin
        if t<=3 then s:=1.65;
        if (t>3) and (t<=5) then s:=1.4;
        if (t>5) and (t<=8) then s:=1.2;
        if (t>8) and (t<=12) then s:=1.05;
        if t>12 then s:=0.6;
    end;
end;

```

```

if (d>600) and (d<=1000) then
begin
  if t<=3 then s:=1.75;
  if (t>3) and (t<=5) then s:=1.55;
  if (t>5) and (t<=8) then s:=1.2;
  if (t>8) and (t<=12) then s:=1.15;
  if t>12 then s:=1.05;
end;
if (d>1000) and (d<=2500) then
begin
  if t<=3 then s:=2;
  if (t>3) and (t<=5) then s:=1.8;
  if (t>5) and (t<=8) then s:=1.6;
  if (t>8) and (t<=12) then s:=1.5;
  if t>12 then s:=1.45;
end;
end;
end;
Rz:=0;
end;
if ComboBox1.Text='Чистовая обработка' then
begin
  if ComboBox2.Text='' then
    ShowMessage('Укажите шероховатость поверхности Ra');
  if ComboBox2.Text<>'' then
begin
  if ComboBox2.Text='3.2' then
begin
  if r<=0.4 then s:=0.07;
  if (r>0.4) and (r<=0.8) then s:=0.1;
  if (r>0.8) and (r<=1.2) then s:=0.12;
  if (r>1.2) and (r<=1.6) then s:=0.14;
  if (r>1.6) and (r<=2) then s:=0.15;
  if (r>2) and (r<=2.5) then s:=0.17;
end;
  if ComboBox2.Text='6.3' then
begin
  if r<=0.4 then s:=0.1;
  if (r>0.4) and (r<=0.8) then s:=0.13;
  if (r>0.8) and (r<=1.2) then s:=0.165;
  if (r>1.2) and (r<=1.6) then s:=0.19;
  if (r>1.6) and (r<=2) then s:=0.21;

```

```

    if (r>2) and (r<=2.5) then s:=0.23;
end;
if ComboBox2.Text='10' then
begin
    if r<=0.4 then s:=0.144;
    if (r>0.4) and (r<=0.8) then s:=0.2;
    if (r>0.8) and (r<=1.2) then s:=0.246;
    if (r>1.2) and (r<=1.6) then s:=0.29;
    if (r>1.6) and (r<=2) then s:=0.32;
    if (r>2) and (r<=2.5) then s:=0.35;
end;
if ComboBox2.Text='20' then
begin
    if r<=0.4 then s:=0.25;
    if (r>0.4) and (r<=0.8) then s:=0.33;
    if (r>0.8) and (r<=1.2) then s:=0.42;
    if (r>1.2) and (r<=1.6) then s:=0.49;
    if (r>1.6) and (r<=2) then s:=0.55;
    if (r>2) and (r<=2.5) then s:=0.60;
end;
if ComboBox2.Text='40' then
begin
    if r<=0.4 then s:=0.35;
    if (r>0.4) and (r<=0.8) then s:=0.51;
    if (r>0.8) and (r<=1.2) then s:=0.63;
    if (r>1.2) and (r<=1.6) then s:=0.72;
    if (r>1.6) and (r<=2) then s:=0.8;
    if (r>2) and (r<=2.5) then s:=0.87;
end;
if ComboBox2.Text='80' then
begin
    if r<=0.4 then s:=0.47;
    if (r>0.4) and (r<=0.8) then s:=0.66;
    if (r>0.8) and (r<=1.2) then s:=0.81;
    if (r>1.2) and (r<=1.6) then s:=0.94;
    if (r>1.6) and (r<=2) then s:=1.04;
    if (r>2) and (r<=2.5) then s:=1.14;
end;
RZ:=ComboBox2.Text;
end;
if RadioButton1.Checked then
begin

```

```

if StrToInt(sigma)<700 then
  s:=s*0.45;
if (StrToInt(sigma)>=700) and (StrToInt(sigma)<900) then
  s:=s;
if StrToInt(sigma)>900 then
  s:=s*1.25;
end;
end;
end;

procedure TDann.Button7Click(Sender: TObject);
begin
case RadioGroup1.ItemIndex of
0: Kpv:=1;
1: begin
  if RadioButton3.Checked then
    Kpv:=0.9
  else
    case ComboBox3.ItemIndex of
    0: Kpv:=0.9;
    1: begin
      Kpv:=0.8;
    end;
    2: begin
      if ComboBox4.Text='Нормальная корка' then
        Kpv:=0.83;
      if ComboBox4.Text='Сильно загрязненная корка' then
        Kpv:=0.83;
      if ComboBox4.Text='' then
        ShowMessage('Укажите состояние корки');
    end;
    else
      ShowMessage('Укажите вид заготовки');
    end;
  end;
end;
else
  ShowMessage('Укажите состояние поверхности заготовки');
end;
end;

procedure TDann.Button6Click(Sender: TObject);
begin

```

```

if Edit1.Text="" then
  ShowMessage('Укажите глубину резания');
if RadioButton4.Checked then
  ShowMessage('Укажите категорию материала');
if rezh='' then
  ShowMessage('Выберите материал режущей части');
if (Edit1.Text<>") then
begin
  if RadioButton1.Checked then
  begin
    x:=0.15;
    m:=0.2;
    if s<=0.3 then
    begin
      Cv:=350;
      y:=0.35;
    end;
    if (s>0.3) and (s<=0.7) then
    begin
      Cv:=290;
      y:=0.35;
    end;
    if s>0.7 then
    begin
      Cv:=280;
      y:=0.45;
    end;
    if rezh='T5K10' then
      Kiv:=0.65;
    if rezh='T14K8' then
      Kiv:=0.8;
    if rezh='T15K6' then
      Kiv:=1;
    if rezh='T30K4' then
      Kiv:=1.4;
    if rezh='BK8' then
      Kiv:=0.4;
    if rezh='P6M5' then
      Kiv:=1;
    step:=750/StrToInT(sigma);
    Kmv:=Power(step,1);
    Kmv:=RoundTo(Kmv,-2);

```

```

end;
if RadioButton2.Checked then
begin
  if rezh='BK8' then
    Kiv:=0.83;
  if rezh='BK6' then
    Kiv:=1;
  if rezh='BK4' then
    Kiv:=0.85;
  if rezh='BK3' then
    Kiv:=1.15;
  if (h[1]='C') and (h[2]='Ч') then
  begin
    x:=0.15;
    m:=0.2;
    if s<=0.4 then
    begin
      Cv:=292;
      y:=0.2;
    end;
    if s>0.4 then
    begin
      Cv:=243;
      y:=0.4;
    end;
    if vh='Быстрорежущая сталь' then
      nv:=1.7;
    if vh='Твердый сплав' then
      nv:=1.25;
    step:=190/StrToInT(sigma);
    Kmv:=Power(step,nv);
    Kmv:=RoundTo(Kmv,-2);
  end;
  if (h[1]='K') and (h[2]='Ч') then
  begin
    x:=0.15;
    m:=0.2;
    if s<=0.4 then
    begin
      Cv:=317;
      y:=0.2;
    end;
  end;

```



```

if s>0.4 then
begin
  Cv:=215;
  y:=0.45;
end;
if vh='Быстрорежущая сталь' then
  nv:=1.7;
if vh='Твердый сплав' then
  nv:=1.25;
step:=150/StrToInT(sigma);
Kmv:=Power(step,nv);
Kmv:=RoundTo(Kmv,-2);
end;
end;
if RadioButton3.Checked then
begin
  if rezh='BK6' then
    Kiv:=2.7;
  if rezh='BK4' then
    Kiv:=2.4;
  if rezh='P6M5' then
    Kiv:=1;
  if splav='Медный сплав' then
  begin
    x:=0.12;
    m:=0.23;
    if s<=0.2 then
    begin
      Cv:=270;
      y:=0.25;
    end;
    if s>0.2 then
    begin
      Cv:=182;
      y:=0.3;
    end;
    Kmv:= 1;
  end;
  if splav='Алюминиевый сплав' then
  begin
    x:=0.12;
    m:=0.28;

```

```

if s<=0.2 then
begin
  Cv:=485;
  y:=0.25;
end;
if s>0.2 then
begin
  Cv:=328;
  y:=0.5;
end;
if h[1]='Д' then
  Kmv:= 1.2
else
  Kmv:= 1;
end;
end;
t:=StrToFloat(Edit1.Text);
d:=StrToFloat(Edit2.Text);
v:=(Kpv*Kiv*Kmv*Cv)/(Power(60,m)*Power(t,x)*Power(s,y));
v:=RoundTo(v,-2);
end;
end;

```

```

procedure TDann.Button1Click(Sender: TObject);
begin
n:=(1000*v)/(Pi*d);
if Edit3.Text="" then
  ShowMessage('Укажите минимальную частоту вращения
шпинделя');
if Edit4.Text="" then
  ShowMessage('Укажите максимальную частоту вращения
шпинделя');
if Edit5.Text="" then
  ShowMessage('Укажите знаменатель ряда фи');
if (Edit3.Text<>") and (Edit4.Text<>") and (Edit5.Text<>") then
begin
  ffi:=StrTofloat(Edit5.Text);
  nd1:=nmin;
  repeat
    nd:=nd1*ffi;
    f:=nd/nd1;
    nd1:=nd;

```

```

    until (nd<=n) and (n/nd<ffi);
end;
if nd>nmax then
    nd:=nmax;
if nd<=125 then
    nd:=Round(nd);
if (nd>125) and (nd<=800) then
    nd:=RoundTo(nd,1);
if nd>800 then
    nd:=RoundTo(nd,2);
    end;

    procedure TDann.Button12Click(Sender: TObject);
    begin
vd:=(Pi*d*nd)/1000;
vd:=RoundTo(vd,-2);
    end;

    procedure TDann.Button13Click(Sender: TObject);
    begin
if Edit1.Text="" then
    ShowMessage("Укажите глубину резания");
if (Edit1.Text<>") then
begin
    if RadioButton1.Checked then
    begin
        sigma:=strToInt(sigma);
        skobka:=sigma/750;
        if vh='Твердый сплав'then
        begin
            Cp:=243;
            xp:=0.9;
            yp:=0.6;
            np:=-0.3;
            Cpz:=300;
            xpz:=1;
            ypz:=0.75;
            npz:=-0.15;
            Kmp:=Power(skobka,0.75);
            Kmp:=RoundTo(Kmp,-2);
            end;
        if vh='Быстрорежущая сталь'then

```

```

begin
  Cp:=125;
  xp:=0.9;
  yp:=0.75;
  np:=0;
  Cpz:=200;
  xpz:=1;
  ypz:=0.75;
  npz:=0;
  if sigmap>=600 then
    Kmp:=Power(skobka,0.75)
  else
    Kmp:=Power(skobka,0.35);
    Kmp:=RoundTo(Kmp,-2);
  end;
end;
if RadioButton2.Checked then
begin
  skobka:=sigmap/190;
  if (h[1]='C') and (h[2]='Ч') then
  begin
    if vh='Быстрорежущая сталь' then
    begin
      Cp:=158;
      xp:=1;
      yp:=1;
      np:=0;
      Cpz:=158;
      xpz:=1;
      ypz:=1;
      npz:=0;
      Kmp:=Power(skobka,0.55);
      Kmp:=RoundTo(Kmp,-2);
    end;
    if vh='Твердый сплав' then
    begin
      Cp:=54;
      xp:=0.9;
      yp:=0.75;
      np:=0;
      Cpz:=92;
      xpz:=1;

```

```

    ypz:=0.75;
    npz:=0;
    Kmp:=Power(skobka,0.4);
    Kmp:=RoundTo(Kmp,-2);
end;
end;
if (h[1]='K') and (h[2]='Ч') then
begin
    Cp:=43;
    xp:=0.9;
    yp:=0.75;
    np:=0;
    Cpz:=81;
    xpz:=1;
    ypz:=0.75;
    npz:=0;
    if vh='Твердый сплав' then
    begin
        Kmp:=Power(skobka,0.4);
        Kmp:=RoundTo(Kmp,-2);
    end;
    if vh='Быстрорежущая сталь' then
    begin
        Kmp:=Power(skobka,0.55);
        Kmp:=RoundTo(Kmp,-2);
    end;
end;
end;
if RadioButton3.Checked then
begin
    if splav='Медный сплав' then begin
        Cp:=55;
        xp:=1;
        yp:=0.66;
        np:=0;
        Cpz:=55;
        xpz:=1;
        ypz:=0.66;
        npz:=0;
        Kmp:=1;
    end;
    if splav='Алюминиевый сплав' then

```

```

begin
  Cp:=40;
  xp:=1;
  yp:=0.75;
  np:=0;
  Cpz:=40;
  xpz:=1;
  ypz:=0.75;
  npz:=0;
  if h[1]='Д' then
    Kmp:= 2
  else
    Kmp:= 1;
  end;
end;
end;
if vh='Твердый сплав' then
begin
  if fi=45 then
  begin
    Kfi:=1;
    Kfiz:=1;
  end;
  if (fi=60) or (fi=75) then
  begin
    Kfi:=0.77;
    Kfiz:=0.94;
  end;
  if fi=90 then
  begin
    Kfi:=0.5;
    Kfiz:=0.89;
  end;
  Krp:=1;
  Krpz:=1;
end;
if vh='Быстрорежущая сталь' then
begin
  if fi=45 then
  begin
    Kfi:=1;
    Kfiz:=1;

```

```

end;
if (fi=60) or (fi=75) then
begin
    Kfi:=0.71;
    Kfiz:=0.98;
end;
if fi=90 then
begin
    Kfi:=0.44;
    Kfiz:=1.08;
end;
if r=0.5 then
    Krp:=0.66;
if r=1 then
    Krp:=0.82;
if (r=1.6) or (r=2) then
    Krp:=1;
if (r=2.5) then
    Krp:=1.14;
if r=4 then
    Krp:=1.33;
if r=0.5 then
    Krpz:=0.87;
if r=1 then
    Krpz:=0.93;
if (r=1.6) or (r=2) then
    Krpz:=1;
if (r=2.5) then
    Krpz:=1.044;
if r=4 then
    Krpz:=1.1;
end;
Py:=10*Cp*Power(t,xp)*Power(s,yp)*Power(vd,np)*Kmp*Kfi*Krp;
Py:=RoundTo(Py,-2);
Pz:=10*Cpz*Power(t,xpz)*Power(s,ypz)*Power(vd,npz)*Kmp*Kfiz*Krpz;
Pz:=RoundTo(Pz,-2);
end;

procedure TDann.Button3Click(Sender: TObject);
var
es: integer;
begin

```

```

AssignFile(tfile,'Matlab/tfile.txt');
repeat
  {$I-}
  Rewrite(tfile);
  {$I+}
  es:=IOResult;
  if es <> 0 then
    AssignFile(tfile, 'tfile.txt');
until (es= 0);
if (marka<> Null) or (res<> Null) or (kt<> Null) or (mat<> Null) or
(fi<> Null) or (fi1<> Null) or (epsilon<> Null) or (r<> Null) or
(tau<> Null) or (alfa<> Null) or (beta<> Null) or (gamma<> Null) then
begin
  Label1.Caption:= 'Теплостойкость: '+ string(marka) + ' Дж/(кг*град)' +
#13 + 'Плотность: '+ string(mat) + ' кг/м.куб' + #13 + 'Коэффициент тем-
пературопроводности: ' + string(res) + ' м.кв/с' + #13 + 'Коэффициент
теплопроводности: ' + string(kt) + ' Дж/(м*с*град)' + #13 +
'Спротивление пластичному сдвигу: ' + string(tau) + ' Н/м.кв'+ #13 +
'Главный угол в плане: ' + string(fi) + ' град' + #13 + 'Вспомогательный
угол в плане: ' + string(fi1) + ' град' + #13 + 'Угол при вершине в плане: '
+ string(epsilon) + ' град' + #13 + 'Ширина реза В: ' + sechB + ' мм' +
#13 + 'Высота реза Н: ' + sechH + ' мм' + #13 + 'Радиус при вершине: ' +
string(r) + ' мм' + #13 + 'Главный передний угол: ' + string(gamma) +
' град' + #13 + 'Главный задний угол: ' + string(alfa) + ' град' + #13 +
'Угол заострения: ' + string(beta) + ' град'+ #13 + 'Подача: ' + Float-
ToStr(s) + ' мм/об'+ #13 + 'Коэффициент, учитывающий влияние' + #13 +
'состояния поверхности заготовки: ' + FloatToSTR(Kpv) + #13 +
'Скорость резания: ' + FloatToSTR(v) + ' м/мин'+ #13 + 'Коэффициент
теплопроводности '+ rezh + ': ' + string(rh) + ' Дж/(м*с*град)' + #13 +
'Коэффициент влияния инструментального материала: ' + Float-
ToSTR(Kiv)+ #13 + 'Коэффициент влияния обрабатываемого материа-
ла: ' + string(Kmv) + #13 + 'Частота вращения шпинделя: ' + Float-
ToSTR(nd) + ' об/мин'+ #13 + 'Действительная скорость резания: ' +
string(vd) + ' м/мин'+ #13 + 'Нормальная составляющая силы резания
Py:'+ string(Py) + ' Н'+ #13 + 'Тангенциальная составляющая силы ре-
зания Pz:'+ string(Pz) + ' Н';
  DecimalSeparator:= '.';
  s:=FloatToStr(s);
  r:=FloatToStr(r);
  t:=FloatToStr(t);
  nd:=FloatToStr(nd);
  vd:=FloatToStr(vd);

```



```

d:=FloatToStr(d);
writeln(tfile, marka);
write(tfile, mat);
writeln(tfile,");
writeln(tfile, res);
writeln(tfile, kt);
writeln(tfile, tau);
writeln(tfile, fi);
writeln(tfile, fi1);
writeln(tfile, epsilon);
writeln(tfile, r);
writeln(tfile, gamma);
writeln(tfile, alfa);
writeln(tfile, beta);
writeln(tfile, rh);
writeln(tfile, s);
writeln(tfile, nd);
writeln(tfile, vd);
writeln(tfile, d);
writeln(tfile, t);
Closefile(tfile);
Py:=FloatToStr(Py);
AssignFile(Pfile, 'Word\Pfile.txt');
repeat
{$I-}
Rewrite(Pfile);
{$I+}
es:=IOResult;
if es <> 0 then AssignFile(Pfile, 'Pfile.txt');
until (es= 0);
writeln(Pfile, d);
writeln(Pfile, me);
writeln(Pfile, Py);
Closefile(Pfile);
end;
Cv:=FloatToStr(Cv);
x:=FloatToStr(x);
y:=FloatToStr(y);
m:=FloatToStr(m);
Cpz:=FloatToStr(Cpz);
xpz:=FloatToStr(xpz);
ypz:=FloatToStr(ypz);

```

```

npz:=FloatToStr(npz);
Cp:=FloatToStr(Cp);
xp:=FloatToStr(xp);
yp:=FloatToStr(yp);
np:=FloatToStr(np);
kiv:=FloatToStr(Kiv);
Kpv:=FloatToStr(Kpv);
Kmv:=FloatToStr(Kmv);
krpz:=FloatToStr(Krpz);
Kfi:=FloatToStr(Kfi);
krp:=FloatToStr(Krp);
Kfiz:=FloatToStr(Kfiz);
Kmp:=FloatToStr(Kmp);
sechB:=FloatToStr(sechB);
sechH:=FloatToStr(sechH);
r:=FloatToStr(r);
AssignFile(optimfile, 'optimizator\optimfile.txt');
repeat
  {$I-}
  Rewrite(optimfile);
  {$I+}
  es:=IOResult;
  if es <> 0 then AssignFile(optimfile, 'optimfile.txt');
until (es= 0);
DecimalSeparator:= '.';
writeln(optimfile, Cv);
writeln(optimfile, x);
writeln(optimfile, y);
writeln(optimfile,Cp);
writeln(optimfile,xp);
writeln(optimfile,yp);
writeln(optimfile,np);
writeln(optimfile,Cpz);
writeln(optimfile,xpz);
writeln(optimfile,ypz);
writeln(optimfile,npz);
writeln(optimfile, m);
writeln(optimfile, d);
writeln(optimfile, t);
writeln(optimfile, Kiv);
writeln(optimfile, Kpv);
writeln(optimfile, Kmv);

```

```
writeln(optimfile, Krpz);
writeln(optimfile, Kfiz);
writeln(optimfile, Krp);
writeln(optimfile, Kfi);
writeln(optimfile, Kmp);
writeln(optimfile, sechB);
writeln(optimfile, sechH);
writeln(optimfile, Rz);
writeln(optimfile, r);
Closefile(optimfile);
end;
```

end.

```
unit Unit2;
```

```
interface
```

```
uses
```

```
Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls,
Forms,
Dialogs, StdCtrls, Unit1;
```

```
type
```

```
TForm2 = class(TForm)
  Label1: TLabel;
  Edit1: TEdit;
  Edit2: TEdit;
  Label2: TLabel;
  Edit3: TEdit;
  Label3: TLabel;
  Label4: TLabel;
  Edit4: TEdit;
  Label5: TLabel;
  Edit5: TEdit;
  Edit6: TEdit;
  Label6: TLabel;
  procedure FormActivate(Sender: TObject);
private
  { Private declarations }
public
```

```

    { Public declarations }
end;

var
    Form2: TForm2;

implementation

{$R *.dfm}

procedure TForm2.FormActivate(Sender: TObject);
begin
    Edit1.Text:=FloatToStr(Nst);
    Edit2.Text:=FloatToStr(kpd);
    Edit3.Text:=FloatToStr(Nmin);
    Edit4.Text:=FloatToStr(Nmax);
    Edit5.Text:=FloatToStr(smin);
    Edit6.Text:=FloatToStr(smax);
end;
end.

program Project1;

uses
    Forms,
    Unit1 in 'Unit1.pas' {Dann},
    Unit2 in 'Unit2.pas' {Form2};

{$R *.res}

begin
    Application.Initialize;
    Application.CreateForm(TDann, Dann);
    Application.CreateForm(TForm2, Form2);
    Application.Run;
end.

```

**ЛИСТИНГ БЛОКА РАСЧЕТА ПЕРАМЕТРОВ  
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

```
unit Unit1;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Con-
trols, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, Math, Unit4;

type
  TForm1 = class(TForm)
    GroupBox1: TGroupBox;
    Label1: TLabel;
    Edit1: TEdit;
    Label2: TLabel;
    Edit2: TEdit;
    Label3: TLabel;
    Edit3: TEdit;
    Label4: TLabel;
    Edit4: TEdit;
    Label5: TLabel;
    Edit5: TEdit;
    Label6: TLabel;
    Edit6: TEdit;
    Label7: TLabel;
    Edit7: TEdit;
    Label8: TLabel;
    Edit8: TEdit;
    Label9: TLabel;
    Edit9: TEdit;
    Label10: TLabel;
    Edit10: TEdit;
    Label11: TLabel;
    Edit11: TEdit;
    Label12: TLabel;
    Edit12: TEdit;
    Label13: TLabel;
    Edit13: TEdit;
```

Label14: TLabel;  
Edit14: TEdit;  
Label15: TLabel;  
Edit15: TEdit;  
Label16: TLabel;  
Edit16: TEdit;  
Label17: TLabel;  
Edit17: TEdit;  
Label18: TLabel;  
Edit18: TEdit;  
GroupBox2: TGroupBox;  
Label19: TLabel;  
Edit19: TEdit;  
Label20: TLabel;  
Edit20: TEdit;  
Label21: TLabel;  
Edit21: TEdit;  
Button1: TButton;  
GroupBox3: TGroupBox;  
Label22: TLabel;  
Label23: TLabel;  
Label24: TLabel;  
Edit22: TEdit;  
Edit23: TEdit;  
Edit24: TEdit;  
Button3: TButton;  
Button4: TButton;  
Label25: TLabel;  
Label26: TLabel;  
Label27: TLabel;  
Edit25: TEdit;  
Edit26: TEdit;  
Edit27: TEdit;  
Edit28: TEdit;  
Label28: TLabel;  
GroupBox4: TGroupBox;  
Label29: TLabel;  
Label30: TLabel;  
Label31: TLabel;  
Edit29: TEdit;  
Edit30: TEdit;  
Edit31: TEdit;  
Button2: TButton;

```
Label32: TLabel;
Edit32: TEdit;
GroupBox5: TGroupBox;
Label33: TLabel;
Label34: TLabel;
Label35: TLabel;
Label36: TLabel;
Label37: TLabel;
Label38: TLabel;
Label39: TLabel;
Edit33: TEdit;
Edit34: TEdit;
Edit35: TEdit;
Button5: TButton;
Button6: TButton;
Edit36: TEdit;
Edit37: TEdit;
Edit38: TEdit;
Edit39: TEdit;
Label41: TLabel;
Edit41: TEdit;
GroupBox6: TGroupBox;
Label40: TLabel;
Label42: TLabel;
Label43: TLabel;
Label44: TLabel;
Edit40: TEdit;
Edit42: TEdit;
Edit43: TEdit;
Button7: TButton;
Edit44: TEdit;
GroupBox7: TGroupBox;
Label45: TLabel;
Label47: TLabel;
Edit45: TEdit;
Button8: TButton;
Edit47: TEdit;
Button9: TButton;
procedure FormActivate(Sender: TObject);
procedure Button1Click(Sender: TObject);

procedure Button4Click(Sender: TObject);
procedure Button3Click(Sender: TObject);
```

```

    procedure Button2Click(Sender: TObject);
    procedure Button5Click(Sender: TObject);
    procedure Button7Click(Sender: TObject);
    procedure Button8Click(Sender: TObject);
    procedure Button9Click(Sender: TObject);
    procedure Button6Click(Sender: TObject);
private
    { Private declarations }
public
    { Public declarations }
end;

var
    Form1: TForm1;
    c, ro, a, lambda, tau, fi, fi1, epsi, r, gamma, alfa, betta, rh, s, n:
string;
    v, d, t: string;
    s1, v1, t1, r1, fir, fi11, c1, ro1, a11, lambda1, tau1, epsi1, gam-
ma1, alfa1, betta1, rh1, n1, d1: real;

implementation
uses Unit2, Unit3, Unit5, Unit6, Unit8, Unit9, Unit10;
{$R *.dfm}
var
    textf: TextFile;
    asht, bsht,csht, Pe, krF, krD, St1, St2, sindop: variant;
    res : integer;

procedure Resulting;
var
    a1s, b1s, vs:string;
    mfile: TextFile;
    res: integer;
begin
    a1s:=Form1.Edit19.Text;
    b1s:=Form1.Edit20.Text;
    vs:=Form1.Edit16.Text;
    DecimalSeparator:= '.';
    AssignFile(mfile, 'AΦΧ\mmfile.txt');
    Rewrite(mfile);
    DecimalSeparator:= '.';
    writeln(mfile, a1s);
    writeln(mfile, b1s);

```



```

writeln(mfile, vs);
writeln(mfile, d);
writeln(mfile, ro);
Closefile(mfile);
end;

```

```

procedure TForm1.FormActivate(Sender: TObject);
begin
    DecimalSeparator:= '.';
    AssignFile(textf, 'Matlab/tfile.txt');
    repeat
        {$I-}
        Reset(textf);
        {$I+}
        res:=IOResult;
        if res <> 0 then AssignFile(textf, 'tfile.txt');
    until (res= 0);
    DecimalSeparator:= '.';
    readln(textf,c);
    readln(textf,ro);
    readln(textf,a);
    readln(textf,lambda);
    readln(textf,tau);
    readln(textf,fi);
    readln(textf,fi1);
    readln(textf,epsi);
    readln(textf,r);
    readln(textf,gamma);
    readln(textf,alfa);
    readln(textf,betta);
    readln(textf,rh);
    readln(textf,s);
    readln(textf,n);
    readln(textf,v);
    readln(textf,d);
    readln(textf,t);
    Edit1.Text:=c;
    Edit2.Text:=ro;
    Edit3.Text:=a;
    Edit4.Text:=lambda;
    Edit5.Text:=tau;
    Edit6.Text:=fi;
    Edit7.Text:=fi1;

```

```

Edit8.Text:=epsi;
Edit9.Text:=r;
Edit10.Text:=gamma;
Edit11.Text:=alfa;
Edit12.Text:=beta;
Edit13.Text:=rh;
Edit14.Text:=s;
Edit15.Text:=n;
Edit16.Text:=v;
Edit17.Text:=d;
Edit18.Text:=t;
end;

procedure perevod;
begin
  s1:=StrToFloat(s);
  t1:=StrToFloat(t);
  r1:=StrToFloat(r);
  fir:=StrToFloat(fi);
  fi11:=StrToFloat(fi1);
  c1:=StrToFloat(c);
  a11:=StrToFloat(a);
  ro1:=StrToFloat(ro);
  lambda1:=StrToFloat(lambda);
  tau1:=StrToFloat(tau);
  epsi1:=StrToFloat(epsi);
  gamma1:=StrToFloat(gamma);
  alfa1:=StrToFloat(alfa);
  betta1:=StrToFloat(betta);
  rh1:=StrToFloat(rh);
  n1:=StrToFloat(n);
  v1:=StrToFloat(v);
  d1:=StrToFloat(d);
  s1:=s1/1000;
  t1:=t1/1000;
  r1:=r1/1000;
  fir:=fir*pi/180;
  fi11:=fi11*pi/180;
  epsi1:=epsi1*pi/180;
  gamma1:=gamma1*pi/180;
  alfa1:=alfa1*pi/180;
  betta1:=betta1*pi/180;
  v1:=v1/60;

```

```

end;

procedure Result;
var
  Nfile: TextFile;
  res: integer;
  Nss, N1ss: string;
begin
  if Ns<> Null then
    if N1s<> Null then
      begin
        Nss:=FloatToStr(Ns);
        N1ss:=FloatToStr(N1s);
      end;
    DecimalSeparator:= '.';
    AssignFile(Nfile, 'Matlab/Nfile.txt');
    Rewrite(Nfile);
    DecimalSeparator:= '.';
    writeln(Nfile, Nss);
    writeln(Nfile, N1ss);
    Closefile(Nfile);
  end;

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
begin
  Form2.Show;
end;

procedure TForm1.Button4Click(Sender: TObject);
begin
  perevod;
  Form4.Show;
end;

procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);
begin
  perevod;
  Form3.Show;
end;

procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
  perevod;

```

```

    Form5.Show;
end;

procedure TForm1.Button5Click(Sender: TObject);
begin
    perevod;
    Form6.Show;
end;

procedure TForm1.Button7Click(Sender: TObject);
begin
    perevod;
    Form8.Show;
end;

procedure TForm1.Button8Click(Sender: TObject);
begin
    perevod;
    Form9.Show;
end;

procedure TForm1.Button9Click(Sender: TObject);
begin
    form1.Close;
    Result;
    Resulting;
end;

procedure TForm1.Button6Click(Sender: TObject);
begin
    Form10.Show;
end;

end.
unit Unit2;

interface

uses
    Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Con-
trols, Forms,
    Dialogs, StdCtrls, jpeg, ExtCtrls, Math;

```

```

type
  TForm2 = class(TForm)
    Label1: TLabel;
    Image1: TImage;
    Label2: TLabel;
    Edit1: TEdit;
    Edit2: TEdit;
    Label3: TLabel;
    Label4: TLabel;
    Edit3: TEdit;
    Label5: TLabel;
    Label6: TLabel;
    Label7: TLabel;
    Edit4: TEdit;
    Edit5: TEdit;
    Edit6: TEdit;
    Label8: TLabel;
    Label9: TLabel;
    Label10: TLabel;
    Edit7: TEdit;
    Edit8: TEdit;
    Edit9: TEdit;
    Label11: TLabel;
    Label12: TLabel;
    Label13: TLabel;
    Button2: TButton;
    Button1: TButton;
    procedure FormActivate(Sender: TObject);
    procedure Button2Click(Sender: TObject);
    procedure FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAc-
tion);
    procedure Button1Click(Sender: TObject);

  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;

var
  Form2: TForm2;
  a1, b1, b: variant;
  iw,ih: integer;

```

```

implementation
uses Unit1;
{$R *.dfm}
var
  asht, bsht,csht: variant;
  s1, v1, t1, r1, fir, fi11, a1m, b1m, bm, a1m1, b1m1, bm1: variant;
  a1s, b1s, vs:string;

procedure TForm2.FormActivate(Sender: TObject);
begin
  s1:=StrToFloat(s);
  t1:=StrToFloat(t);
  r1:=StrToFloat(r);
  fir:=StrToFloat(fi);
  fi11:=StrToFloat(fi1);
  s1:=s1/1000;
  t1:=t1/1000;
  r1:=r1/1000;
  fir:=fir*pi/180;
  fi11:=fi11*pi/180;
  Label1.Caption:='Схема резания';
  if (t1>=(r1*(1-cos(fir)))) and (r1<>0) then
    Form2.Image1.Picture.LoadFromFile('Схемы\Первый
случай.jpg');
  if (t1<(r1*(1-cos(fir)))) and (r1<>0) then
    Form2.Image1.Picture.LoadFromFile('Схемы\Второй
случай.jpg');
  end;

procedure TForm2.Button2Click(Sender: TObject);
begin
  Form2.Close;
  Form1.Edit19.Text:=FloatToStr(a1m1);
  Form1.Edit20.Text:=FloatToStr(b1m1);
  Form1.Edit21.Text:=FloatToStr(bm1);
end;

procedure TForm2.FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
begin
  Form1.Edit19.Text:=FloatToStr(a1m1);
  Form1.Edit20.Text:=FloatToStr(b1m1);
  Form1.Edit21.Text:=FloatToStr(bm1);

```

```

end;

procedure TForm2.Button1Click(Sender: TObject);
begin
    DecimalSeparator:= '.';
    s1:=StrToFloat(s);
    t1:=StrToFloat(t);
    r1:=StrToFloat(r);
    fir:=StrToFloat(fi);
    fi11:=StrToFloat(fi1);
    s1:=s1/1000;
    t1:=t1/1000;
    r1:=r1/1000;
    fir:=fir*pi/180;
    fi11:=fi11*pi/180;
    if (t1>=(r1*(1-cos(fir)))) and (r1<>0) then
    begin
        asht:=r1/t1;
        bsht:=s1/(2*r1);
        csht:=1-(asht*(1-(sqrt(1-(bsht*bsht)))));
        a1:=(s1*sin(arctan((csht/(((1-asht*(1-
cos(fir))*cotan(fir)+(asht*(sin(fir)+bsht)))))))/csht;
        b1:=(t1*csht)*(sin(arctan((csht/(((1-asht*(1-
cos(fir))*cotan(fir)+(asht*(sin(fir)+bsht))))))));
        b:=(t1/sin(fir))*(1-(asht*(1-cos(fir))-(fir/sin(fir))-((arccos(sqrt(1-
bsht*bsht)))/(sin(fir)))));
        a1m:=a1*1000;
        b1m:=b1*1000;
        bm:=b*1000;
        a1m1:=RoundTo(a1m,-4);
        b1m1:=RoundTo(b1m,-4);
        bm1:=RoundTo(bm,-4);
        Edit1.Text:=FloatToStr(asht);
        Edit2.Text:=FloatToStr(bsht);
        Edit3.Text:=FloatToStr(csht);
        Edit4.Text:=FloatToStr(a1);
        Edit5.Text:=FloatToStr(b1);
        Edit6.Text:=FloatToStr(b);
        Edit7.Text:=FloatToStr(a1m);
        Edit8.Text:=FloatToStr(b1m);
        Edit9.Text:=FloatToStr(bm);
    end;
    if (t1<(r1*(1-cos(fir)))) and (r1<>0) then

```

```

begin
  asht:=r1/t1;
  bsht:=s1/(2*r1);
  csht:=1-(asht*(1-(sqrt(1-(bsht*bsht)))));
  a1:=(s1*sin(arctan((csht/(sqrt((2*asht)-1)+(asht*bsht))))))/csht;
  b1:=(t1*csht)*(sin(arctan((csht/(sqrt((2*asht)-
1)+(asht*bsht))))));
  b:=r1*(arccos(1-(1/asht))+arccos(sqrt(1-(bsht*bsht))));
  a1m:=a1*1000;
  b1m:=b1*1000;
  bm:=b*1000;
  a1m1:=RoundTo(a1m,-4);
  b1m1:=RoundTo(b1m,-4);
  bm1:=RoundTo(bm,-4);
  Edit1.Text:=FloatToStr(asht);
  Edit2.Text:=FloatToStr(bsht);
  Edit3.Text:=FloatToStr(csht);
  Edit4.Text:=FloatToStr(a1);
  Edit5.Text:=FloatToStr(b1);
  Edit6.Text:=FloatToStr(b);
  Edit7.Text:=FloatToStr(a1m);
  Edit8.Text:=FloatToStr(b1m);
  Edit9.Text:=FloatToStr(bm);
end;
end;
end.

unit Unit3;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Con-
trols, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, Math, Unit2, ExtCtrls;

type
  TForm3 = class(TForm)
    Edit1: TEdit;
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;
    Edit2: TEdit;
    Label3: TLabel;

```



```

Edit3: TEdit;
Label4: TLabel;
Edit4: TEdit;
Label5: TLabel;
Edit5: TEdit;
Edit6: TEdit;
Label6: TLabel;
Label7: TLabel;
Edit7: TEdit;
Label8: TLabel;
Edit8: TEdit;
Label9: TLabel;
Edit9: TEdit;
Label10: TLabel;
Edit10: TEdit;
Label22: TLabel;
Edit22: TEdit;
Label23: TLabel;
Edit23: TEdit;
Label24: TLabel;
Edit24: TEdit;
Label25: TLabel;
Edit25: TEdit;
Label26: TLabel;
Edit26: TEdit;
Label27: TLabel;
Edit27: TEdit;
Label11: TLabel;
Label12: TLabel;
Edit11: TEdit;
Edit12: TEdit;
Button1: TButton;
Button2: TButton;
procedure FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAc-
tion);
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
    procedure Button2Click(Sender: TObject);
private
    { Private declarations }
public
    { Public declarations }
end;

```

```

var
  Form3: TForm3;
  Rz, Ry,Fn, Ns, F1, N1s, Pe, krF, krD, krB, Rz1, Ry1,Fn1, Ns1,
F11, N1s1, Pe1: variant;
implementation
uses Unit1;

{$R *.dfm}
procedure Result;
var
  Nfile: TextFile;
  res: integer;
  Nss, N1ss: string;
begin
  if Ns<> Null then
    if N1s<> Null then
      begin
        Nss:=FloatToStr(Ns);
        N1ss:=FloatToStr(N1s);
      end;
  DecimalSeparator:= '.';
  AssignFile(Nfile, 'Matlab\Nfile.txt');
  Rewrite(Nfile);
  DecimalSeparator:= '.';
  writeln(Nfile, Nss);
  writeln(Nfile, N1ss);
  Closefile(Nfile);
end;

procedure TForm3.FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
begin
  Rz1:=RoundTo(Rz,-2);
  Ry1:=RoundTo(Ry,-2);
  Fn1:=RoundTo(Fn,-2);
  Ns1:=RoundTo(Ns,-2);
  F11:=RoundTo(F1,-2);
  N1s1:=RoundTo(N1s,-2);
  Pe1:=RoundTo(Pe,-2);
  Form1.Edit22.Text:=FloatToStr(Rz1);
  Form1.Edit23.Text:=FloatToStr(Ry1);
  Form1.Edit24.Text:=FloatToStr(Fn1);
  Form1.Edit25.Text:=FloatToStr(Ns1);

```

```

Form1.Edit26.Text:=FloatToStr(F11);
Form1.Edit27.Text:=FloatToStr(N1s1);
Form1.Edit28.Text:=FloatToStr(Pe1);
end;

```

```

procedure TForm3.Button1Click(Sender: TObject);
var
  St1, St2, sindop: variant;
  m1, krB11, krB12, krB2, m, n, k, p, q:real;
begin
  Pe:=(v1*a1)/a11;
  krF:=(rh1*betta1*epsi1)/lambda1;
  krD:=a1/b1;
  sindop:=1-sin(gamma1);
  St1:=(krF*(Power(krD,0.3))*(Power(sindop,0.25)))/sqrt(Pe);
  St2:=(krF*(Power(krD,0.3)))/((Power(sindop,0.4))*Pe);
  if Pe<=10 then begin
    if St1<=0.03 then begin
      if St2<=0.05 then
        begin
          m:=0.18;
          n:=0.23;
          k:=-0.13;
          p:=-0.04;
          q:=1.47;
        end;
    end;
    if St1<=0.45 then begin
      if St2<=0.665 then begin
        m:=0.09;
        n:=0.40;
        k:=0.03;
        p:=0.01;
        q:=1.6;
      end
    else begin
      m:=0.01;
      n:=1.51;
      k:=0.88;
      p:=0.26;
      q:=2.4;
    end;
  end;
end;

```

```

if St1>0.45 then begin
  if St2<=0.665 then begin
    m:=0.08;
    n:=0.51;
    k:=0.26;
    p:=0.08;
    q:=1.66;
    end
  else begin
    m:=0.0066;
    n:=1.7;
    k:=1.26;
    p:=0.38;
    q:=2.5;
    end;
end;
end;
if (Pe>10) and (Pe<=50) then begin
  if St1<=0.03 then begin
    if St2<=0.05 then begin
      m:=0.20;
      n:=0.13;
      k:=-0.04;
      p:=-0.12;
      q:=1.27;
      end;
    end;
  if St1<=0.45 then begin
    if St2<=0.665 then begin
      m:=0.11;
      n:=0.28;
      k:=0.12;
      p:=0.03;
      q:=1.35;
      end
    else begin
      m:=0.018;
      n:=1.18;
      k:=0.91;
      p:=0.26;
      q:=1.92;
      end;
    end;
  end;
end;

```

```

if St1>0.45 then begin
  if St2<=0.665 then begin
    m:=0.095;
    n:=0.39;
    k:=0.33;
    p:=0.09;
    q:=1.43;
    end
  else begin
    m:=0.0135;
    n:=1.35;
    k:=1.25;
    p:=0.36;
    q:=2;
    end;
end;
end;
if (Pe>50) and (Pe<=120)then begin
  if St1<=0.03 then begin
    if St2<=0.05 then begin
      m:=0.56;
      n:=-0.06;
      k:=-0.03;
      p:=-0.01;
      q:=1.02;
      end;
    end;
  end;
  if St1<=0.45 then begin
    if St2<=0.665 then begin
      m:=0.37;
      n:=0.05;
      k:=0.09;
      p:=0.03;
      q:=1.08;
      end
    else begin
      m:=0.18;
      n:=0.56;
      k:=0.64;
      p:=0.18;
      q:=1.33;
      end;
    end;
  end;
end;

```

```

if St1>0.45 then begin
  if St2<=0.665 then begin
    m:=0.33;
    n:=0.13;
    k:=0.26;
    p:=0.08;
    q:=1.12;
    end
  else begin
    m:=0.15;
    n:=0.68;
    k:=0.87;
    p:=0.25;
    q:=1.4;
    end;
  end;
end;
if Pe>=120 then begin
  if St1<=0.03 then begin
    if St2<=0.05 then begin
      m:=0.8;
      n:=-0.14;
      k:=-0.03;
      p:=-0.01;
      q:=0.95;
      end;
    end;
  if St1<=0.45 then begin
    if St2<=0.665 then begin
      m:=0.56;
      n:=-0.06;
      k:=0.09;
      p:=0.03;
      q:=1;
      end
    else begin
      m:=0.35;
      n:=0.36;
      k:=0.56;
      p:=0.16;
      q:=1.2;
      end;
    end;
  end;
end;

```

```

if St1>0.45 then begin
  if St2<=0.665 then begin
    m:=0.51;
    n:=0.02;
    k:=0.23;
    p:=0.07;
    q:=1.04;
    end
  else begin
    m:=0.3;
    n:=0.47;
    k:=0.76;
    p:=0.23;
    q:=1.25;
  end;
end;
end;
krB11:=Power(Pe,n);
krB12:=m*krB11;
krB2:=(power(krF,k)*(power(krD,p))*(power(sindop,q)));
krB:=krB12/krB2;
Rz:=tau1*a1*b1*(1+(1/krB));
Ry:=tau1*a1*b1*((1/krB)-1);
Fn:=tau1*a1*b1*(((cos(gamma1)+sin(gamma1))/krB)-
cos(gamma1)+sin(gamma1));
Ns:=tau1*a1*b1*(((cos(gamma1)-
sin(gamma1))/krB)+cos(gamma1)+sin(gamma1));
F1:=0.625*tau1*r1*b*sqrt(krB/sin(alfa1));
m1:=(cos(gamma1)+sin(gamma1)-(krB*(cos(gamma1)-
sin(gamma1))))/(cos(gamma1)-
sin(gamma1)+(krB*(cos(gamma1)+sin(gamma1))));
N1s:=(0.625*tau1*r1*b*sqrt(krB/sin(alfa1)))/m1;
Edit1.Text:=FloatToStr(Pe);
Edit2.Text:=FloatToStr(krF);
Edit4.Text:=FloatToStr(St1);
Edit3.Text:=FloatToStr(krD);
Edit5.Text:=FloatToStr(St2);
Edit6.Text:=FloatToStr(m);
Edit7.Text:=FloatToStr(n);
Edit8.Text:=FloatToStr(k);
Edit9.Text:=FloatToStr(p);
Edit10.Text:=FloatToStr(q);
Edit11.Text:=FloatToStr(krB);

```

```

    Edit12.Text:=FloatToStr(m1);
    Edit22.Text:=FloatToStr(Rz);
    Edit23.Text:=FloatToStr(Ry);
    Edit24.Text:=FloatToStr(Fn);
    Edit25.Text:=FloatToStr(Ns);
    Edit26.Text:=FloatToStr(F1);
    Edit27.Text:=FloatToStr(N1s);
end;

procedure TForm3.Button2Click(Sender: TObject);
begin
    form3.Close;
    Result
end;
end.

unit Unit4;

interface

uses
    Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Con-
controls, Forms,
    Dialogs, ExtCtrls, StdCtrls;

type
    TForm4 = class(TForm)
        Image1: TImage;
        Image2: TImage;
        Button2: TButton;
        procedure FormActivate(Sender: TObject);
        procedure Button2Click(Sender: TObject);
    private
        { Private declarations }
    public
        { Public declarations }
    end;

var
    Form4: TForm4;

implementation

```



```

{$R *.dfm}

procedure TForm4.FormActivate(Sender: TObject);
begin
    Form4.Image1.Picture.LoadFromFile('Схемы\Расчет сил реза-
ния формулы.jpg');
    Form4.Image2.Picture.LoadFromFile('Схемы\Расчет сил реза-
ния схемы.jpg');
end;

procedure TForm4.Button2Click(Sender: TObject);
begin
    form4.Close;
end;
end.

unit Unit5;

interface

uses
    Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Con-
trols, Forms,
    Dialogs, Unit1, Unit2, Unit3, Math, StdCtrls, ExtCtrls;

type
    TForm5 = class(TForm)
        Label29: TLabel;
        Edit29: TEdit;
        Edit30: TEdit;
        Label30: TLabel;
        Label31: TLabel;
        Edit31: TEdit;
        Edit32: TEdit;
        Label32: TLabel;
        Label8: TLabel;
        Label9: TLabel;
        Label10: TLabel;
        Edit7: TEdit;
        Edit8: TEdit;
        Edit9: TEdit;
    end;

```

```

Label11: TLabel;
Label12: TLabel;
Label13: TLabel;
Label1: TLabel;
Edit1: TEdit;
Label2: TLabel;
Button1: TButton;
Image1: TImage;
Image2: TImage;
Button2: TButton;
procedure FormActivate(Sender: TObject);
procedure FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAc-
tion);
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
    procedure Button2Click(Sender: TObject);
private
    { Private declarations }
public
    { Public declarations }
end;

var
    Form5: TForm5;
    delta, l, h, hy: extended;
implementation

{$R *.dfm}

procedure TForm5.FormActivate(Sender: TObject);
begin
    Form5.Image1.Picture.LoadFromFile('Схемы\Расчет длины
контактных площадок.jpg');
    Form5.Image2.Picture.LoadFromFile('Схемы\Расчет длины
контактных площадок формулы.jpg');
end;

procedure TForm5.FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
begin
    Form1.Edit29.Text:=FloatToStr(delta);
    Form1.Edit32.Text:=FloatToStr(hy);
    Form1.Edit30.Text:=FloatToStr(l);
    Form1.Edit31.Text:=FloatToStr(h);

```

```

end;

procedure TForm5.Button1Click(Sender: TObject);
var
    deltam, lm, hm, hym, l1, l2: real;
begin
    delta:=1.25*sqrt(krB/sin(alfa1))*r1;
    l1:=(cos(gamma1)+sin(gamma1))/krB;
    l2:=l1-cos(gamma1)+sin(gamma1);
    l:=1.45*l2*a1;
    h:=r1*(1-(1/sqrt(1+(krB*krB))));
    hy:=(h*krB)/(cos(gamma1)+(krB*sin(gamma1)));
    deltam:=delta*1000;
    lm:=l*1000;
    hm:=h*1000;
    hym:=hy*1000;
    Edit29.Text:=FloatToStr(delta);
    Edit32.Text:=FloatToStr(hy);
    Edit30.Text:=FloatToStr(l);
    Edit31.Text:=FloatToStr(h);
    Edit7.Text:=FloatToStr(deltam);
    Edit1.Text:=FloatToStr(hym);
    Edit8.Text:=FloatToStr(lm);
    Edit9.Text:=FloatToStr(hm);
end;

```

```

procedure TForm5.Button2Click(Sender: TObject);
begin
    form5.Close;
end;
end.

```

```

unit Unit6;

```

```

interface

```

```

uses

```

```

    Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs, Unit1, Unit2, Unit3, Unit5, Math, StdCtrls;

```

```

type

```

```

    TForm6 = class(TForm)

```

```

        Button1: TButton;

```

```
Label39: TLabel;  
Edit39: TEdit;  
Edit1: TEdit;  
Label1: TLabel;  
Edit2: TEdit;  
Label2: TLabel;  
Label3: TLabel;  
Edit3: TEdit;  
Edit33: TEdit;  
Label33: TLabel;  
Label34: TLabel;  
Edit34: TEdit;  
Edit4: TEdit;  
Label4: TLabel;  
Edit5: TEdit;  
Button2: TButton;  
Label5: TLabel;  
Label6: TLabel;  
Label7: TLabel;  
Edit6: TEdit;  
Edit7: TEdit;  
Edit8: TEdit;  
Label35: TLabel;  
Edit35: TEdit;  
Edit36: TEdit;  
Label36: TLabel;  
Edit37: TEdit;  
Edit38: TEdit;  
Label38: TLabel;  
Label37: TLabel;  
Edit41: TEdit;  
Label41: TLabel;  
Label8: TLabel;  
Label9: TLabel;  
Label10: TLabel;  
Edit9: TEdit;  
Edit10: TEdit;  
Edit11: TEdit;  
Button3: TButton;  
procedure Button1Click(Sender: TObject);  
procedure Button2Click(Sender: TObject);  
procedure FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAc-
```

tion);

```

    procedure Button3Click(Sender: TObject);
    private
      { Private declarations }
    public
      { Public declarations }
    end;

var
  Form6: TForm6;
  Qmcht, Qm, Qc, erf, Qa, kcim, koordmax, Qncht, Qn, Qd, Qzcp:
variant;
implementation

uses Unit7;

{$R *.dfm}

procedure TForm6.Button1Click(Sender: TObject);
var
  cosdop, b0, krn, aa, KrE, KRB1,krn1, kcin, u, m, b01, b02,
krb11, krb12: real;
begin
  aa:=Pe*krb;
  if aa<=5 then
    erf:=0.52*(Power(aa,0.35));
  if (aa>5) and (aa<=20) then
    erf:=0.85*(Power(aa,0.05));
  if aa>20 then
    erf:=1;
  cosdop:=cos(gamma1)-sin(gamma1);
  b01:=(sqrt(Pe)*(Power(krB,0.3))*(cos(gamma1)+sin(gamma1)-
(krB*(Power(cosdop,0.2)))));
  b02:=(0.25*krF*(Power(krD,0.3))*sqrt(cos(gamma1)+(krB*sin(
gamma1))));
  b0:=b02/b01;
  krn:=1/(1+b0);
  Qmcht:=0.9675*((krn*tau1*sqrt(Pe))/(c1*ro1))*sqrt(((cos(gamm
a1)+sin(gamma1)-(krB*(cos(gamma1)-
sin(gamma1)))/(cos(gamma1)+(krB*sin(gamma1)))));
  Qa:=(tau1/(c1*ro1*krB))*erf;
  kcim:=((0.9675*krn*krB*sqrt(Pe))/erf)*sqrt((cos(gamma1)+sin(
gamma1)-(krB*(cos(gamma1)-
sin(gamma1)))/(cos(gamma1)+(krB*sin(gamma1))));

```

```

Qm:=Qa*(1+kcim);
Qc:=Qa*(1+(0.66*kcim));
krE:=r1/a1;
krb11:=(0.25*krF*(Power(krD,0.3))*(Power(sin(alfa1),0.1)));
krb12:=(sqrt(Pe)*(Power(krE,0.2))*(Power(krB,0.1)));
krb1:=krb11/krb12;
krn1:=1/(1+krb1);
Qncht:=0.6*krn1*sqrt(Pe*krE)*((tau1*(Power(krB,0.25))*cos(alfa1))/(c1*ro1*(Power(sin(alfa1),0.25))));
koordmax:=0.25+sqrt(0.0625-
((0.1*(Power(sin(alfa1),0.5))*erf)/(krn1*Pe*krE*(Power(krB,2.5))*cos(alfa1))));
kcin:=(0.6*krn1*(Power(krB,1.25))*sqrt(Pe*krE)*cos(alfa1))/(Power(sin(alfa1),0.25))*erf;
Qn:=Qa*(0.5+((0.36*(Power(sin(alfa1),0.25)))/(Power(krB,1.25))*sqrt(Pe*krE))+kcin);
Qd:=Qa*(0.5+((0.25*(Power(sin(alfa1),0.25)))/(Power(krB,1.25))*sqrt(Pe*krE))+0.71*kcin));
u:=(sqrt(Pe*krE)*(Power(krB,1.25)))/(Power(sin(alfa1),0.25));
m:=(1.035*krn1*cos(alfa1))/erf;
Qzcp:=0.5*Qa*(1+(1/u)+(m*u));
Edit39.Text:=FloatToStr(Qmcht);
Edit6.Text:=FloatToStr(krb1);
Edit7.Text:=FloatToStr(krn1);
Edit8.Text:=FloatToStr(krE);
Edit35.Text:=FloatToStr(Qncht);
Edit1.Text:=FloatToStr(b0);
Edit2.Text:=FloatToStr(krn);
Edit4.Text:=FloatToStr(kcim);
Edit3.Text:=FloatToStr(Qa);
Edit33.Text:=FloatToStr(Qm);
Edit34.Text:=FloatToStr(Qc);
Edit5.Text:=FloatToStr(erf);
Edit36.Text:=FloatToStr(koordmax);
Edit37.Text:=FloatToStr(Qn);
Edit38.Text:=FloatToStr(Qd);
Edit41.Text:=FloatToStr(Qzcp);
Edit9.Text:=FloatToStr(u);
Edit10.Text:=FloatToStr(m);
Edit11.Text:=FloatToStr(kcin);
end;

```

```

procedure TForm6.Button2Click(Sender: TObject);

```

```

begin
  Form7.Show;
end;

procedure TForm6.FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
begin
  Form1.Edit39.Text:=FloatToStr(Qmcht);
  Form1.Edit33.Text:=FloatToStr(Qm);
  Form1.Edit34.Text:=FloatToStr(Qc);
  Form1.Edit35.Text:=FloatToStr(Qncht);
  Form1.Edit36.Text:=FloatToStr(koordmax);
  Form1.Edit37.Text:=FloatToStr(Qn);
  Form1.Edit38.Text:=FloatToStr(Qd);
  Form1.Edit41.Text:=FloatToStr(Qzcp);
end;

procedure TForm6.Button3Click(Sender: TObject);
begin
  form6.Close;
end;
end.

unit Unit7;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, Math, Unit1, Unit2, Unit3, Unit5, Unit6, TeEngine, Series,
  ExtCtrls, TeeProcs, Chart, TeeFunci, StdCtrls;

type
  TForm7 = class(TForm)
    Chart1: TChart;
    Series2: TLineSeries;
    Series1: TLineSeries;
    TeeFunction1: TMultiplyTeeFunction;
    Button1: TButton;
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;

```

```

    procedure FormActivate(Sender: TObject);
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
private
    { Private declarations }
public
    { Public declarations }
end;

var
    Form7: TForm7;

implementation

{$R *.dfm}

var
x1,x2: double;
y1,y2: double;
k1,k2: double;
p1,p2: double;
X: double;
Y: double;
k: double;
p: double;
dx: double;
dk: double;
Function f(x:double):double;
begin
f:=Qa*(1+(kcim*(sqrt(x/(1/2)))));
end;
Function q(k:double):double;
begin
q:=Qa*(1+(kcim*(Power(((1/2)/k),0.6)))));
end;

procedure TForm7.FormActivate(Sender: TObject);
begin
    Series1.Clear;
    Series2.Clear;
    x1:=0; // нижняя граница диапазона аргумента
    X2:=1/2; // верхняя граница диапазона аргумента
    dx:=0.000004625; // шаг аргумента
    k1:=1/2; // нижняя граница диапазона аргумента

```



```

k2:=0.0008; // верхняя граница диапазона аргумента
dk:=0.000004625; // шаг аргумента
x:=x1;
repeat
  y:=f(x);
  Series1.AddXY(x*1000,y,"clGreen);
  x:=x+dx;
until (x >= x2);
k:=k1;
repeat
  p:=q(k);
  Series2.AddXY(k*1000,p,"clRed);
  k:=k+dk;
until (k >= k2);
end;

procedure TForm7.Button1Click(Sender: TObject);
begin
  form7.Close;
end;
end.

unit Unit8;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Con-
trols, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, Math, Unit1, Unit2, Unit3, Unit5, Unit6,
  ExtCtrls;

type
  TForm8 = class(TForm)
    Button1: TButton;
    Label5: TLabel;
    Label6: TLabel;
    Label7: TLabel;
    Edit6: TEdit;
    Edit7: TEdit;
    Edit8: TEdit;
    Edit40: TEdit;
    Label40: TLabel;

```

```

Edit42: TEdit;
Label42: TLabel;
Label43: TLabel;
Edit43: TEdit;
Edit44: TEdit;
Label44: TLabel;
Button2: TButton;
Image1: TImage;
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAc-
tion);
    procedure Button2Click(Sender: TObject);
    procedure FormActivate(Sender: TObject);
private
    { Private declarations }
public
    { Public declarations }
end;

var
    Form8: TForm8;
    Qdz, Qrz, cudz, curz:variant;
implementation

{$R *.dfm}

var
    E,krb1,krn1, krb11, krb12:real;

procedure TForm8.Button1Click(Sender: TObject);
begin
    E:=r1/a1;
    krb11:=(0.25*krF*(Power(krD,0.3))*(Power(sin(alfa1),0.1)));
    krb12:=(sqrt(Pe)*(Power(E,0.2))*(Power(krB,0.1)));
    krb1:=krb11/krb12;
    krn1:=1/(1+krb1);
    Qdz:=0.625*krn1*tau1*b*r1*v1*sqrt(krB/(sin(alfa1)))*cos(alfa1);
    Qrz:=0.625*(1-
krn1)*tau1*b*r1*v1*sqrt(krB/sin(alfa1))*cos(alfa1);
    cudz:=0.5*krn1*tau1*v1*cos(alfa1);
    curz:=0.5*(1-krn1)*tau1*v1*cos(alfa1);
    Edit6.Text:=FloatToStr(krb1);
    Edit7.Text:=FloatToStr(krn1);

```

```

    Edit8.Text:=FloatToStr(E);
    Edit40.Text:=FloatToStr(Qdz);
    Edit42.Text:=FloatToStr(Qrz);
    Edit43.Text:=FloatToStr(cudz);
    Edit44.Text:=FloatToStr(curz);
end;

procedure TForm8.FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
begin
    Form1.Edit40.Text:=FloatToStr(Qdz);
    Form1.Edit42.Text:=FloatToStr(Qrz);
    Form1.Edit43.Text:=FloatToStr(cudz);
    Form1.Edit44.Text:=FloatToStr(curz);
end;

procedure TForm8.Button2Click(Sender: TObject);
begin
    form8.Close;
end;

procedure TForm8.FormActivate(Sender: TObject);
begin
    Form8.Image1.Picture.LoadFromFile('Схемы\Расчет средних
тепловых потоков формулы.jpg');
end;
end.

unit Unit9;

interface

uses
    Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
    Dialogs, StdCtrls, Math, Unit1, Unit2, Unit3, Unit5, Unit6, ExtCtrls;

type
    TForm9 = class(TForm)
        Button1: TButton;
        Edit45: TEdit;
        Label45: TLabel;

```

```

Label5: TLabel;
Label6: TLabel;
Label7: TLabel;
Edit6: TEdit;
Edit7: TEdit;
Edit8: TEdit;
Edit1: TEdit;
Label1: TLabel;
Edit47: TEdit;
Label47: TLabel;
Label2: TLabel;
Label3: TLabel;
Label4: TLabel;
Edit2: TEdit;
Edit3: TEdit;
Edit4: TEdit;
Button2: TButton;
Image1: TImage;
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAc-
tion);

procedure Button2Click(Sender: TObject);
procedure FormActivate(Sender: TObject);
private
  { Private declarations }
public
  { Public declarations }
end;

var
  Form9: TForm9;
  Qdet, Qstr: variant;
implementation

{$R *.dfm}

procedure TForm9.Button1Click(Sender: TObject);
var
  E, n2, n3, M, kcic, krn, krn1: real;
begin
  E:=r1/a1;
  n2:=1/(1+((0.27*krF*(Power(krD,0.3))*(Power(E,0.3)))/(sqrt(Pe)*
*(Power(sin(alfa1),0.15))))));

```

```

n3:=1/(1+((0.35*krF*(Power(krD,0.3))*(Power(sin(alfa1),0.1)))/
(sqrt(Pe)*
*(Power(E,0.2))));
M:=b/b1;
Qdet:=tau1*a1*b1*v1*M*(((0.665*n2*erf)/sqrt(Pe*krB))+((0.62
5*E*n3*
*(Power(krB,1.5)))/(Power(sin(alfa1),0.55))));
kcic:=1-(2/(Pe*krB))+((1.125/sqrt(Pe*krB))*(exp((-
1)*((Pe*krB)/4)/erf));
krn:=1/(1+((0.325*krF*(Power(krD,0.3))*
*(Power((1-sin(gamma1)),0.25))/sqrt(Pe)));
krn1:=1/(1+((0.225*krF*(Power(krD,0.3)))/(Pe*
*(Power((1-sin(gamma1)),0.4))));
Qstr:=((tau1*a1*b1*v1)/krB)*((kcic*krn1*erf)+((krB*krn)*
*((cos(gamma1)+sin(gamma1)-(krB*(cos(gamma1)-
-sin(gamma1))))/(cos(gamma1)+sin(gamma1))));
Edit6.Text:=FloatToStr(n2);
Edit7.Text:=FloatToStr(n3);
Edit8.Text:=FloatToStr(E);
Edit1.Text:=FloatToStr(M);
Edit45.Text:=FloatToStr(Qdet);
Edit4.Text:=FloatToStr(kcic);
Edit2.Text:=FloatToStr(krn);
Edit3.Text:=FloatToStr(krn1);
Edit47.Text:=FloatToStr(Qstr);
end;

```

```

procedure TForm9.FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);

```

```

begin
Form1.Edit45.Text:=FloatToStr(Qdet);
Form1.Edit47.Text:=FloatToStr(Qstr);
end;

```

```

procedure TForm9.Button2Click(Sender: TObject);
begin
form9.Close;
end;

```

```

procedure TForm9.FormActivate(Sender: TObject);
begin
Form9.Image1.Picture.LoadFromFile('Схемы\Теплота стружки
и резца.jpg');

```

```

end;
end.

unit Unit10;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Con-
  trols, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, ExtCtrls;

type
  TForm10 = class(TForm)
    Image1: TImage;
    Button1: TButton;
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
    procedure FormActivate(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;

var
  Form10: TForm10;

implementation

uses Unit4;

{$R *.dfm}

procedure TForm10.Button1Click(Sender: TObject);
begin
  Form10.Close;
end;

procedure TForm10.FormActivate(Sender: TObject);
begin
  Form10.Image1.Picture.LoadFromFile('Схемы\Определение
  температур в точках формулы.jpg');
end;

```

```
end.  
  
program Matmod;  
  
uses  
  Forms,  
  Unit1 in 'Unit1.pas' {Form1},  
  Unit2 in 'Unit2.pas' {Form2},  
  Unit3 in 'Unit3.pas' {Form3},  
  Unit4 in 'Unit4.pas' {Form4},  
  Unit5 in 'Unit5.pas' {Form5},  
  Unit6 in 'Unit6.pas' {Form6},  
  Unit7 in 'Unit7.pas' {Form7},  
  Unit8 in 'Unit8.pas' {Form8},  
  Unit9 in 'Unit9.pas' {Form9},  
  Unit10 in 'Unit10.pas' {Form10};  
  
{ $R *.res }  
  
begin  
  Application.Initialize;  
  Application.CreateForm(TForm1, Form1);  
  Application.CreateForm(TForm2, Form2);  
  Application.CreateForm(TForm3, Form3);  
  Application.CreateForm(TForm4, Form4);  
  Application.CreateForm(TForm5, Form5);  
  Application.CreateForm(TForm6, Form6);  
  Application.CreateForm(TForm7, Form7);  
  Application.CreateForm(TForm8, Form8);  
  Application.CreateForm(TForm9, Form9);  
  Application.CreateForm(TForm10, Form10);  
  Application.Run;  
end.
```

**ЛИСТИНГ БЛОКА АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ  
МОДЕЛИРОВАНИЯ НАГРУЗОК, ДЕЙСТВУЮЩИХ  
НА РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ**

```
unit Unit1;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls,
Forms,
  Dialogs, ComObj, StdCtrls, OleServer, clipbrd, Grids, DBGrids,
Math;

type
  TForm1 = class(TForm)
    GroupBox1: TGroupBox;
    Edit2: TEdit;
    Edit4: TEdit;
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;
    GroupBox2: TGroupBox;
    Edit3: TEdit;
    Edit5: TEdit;
    Edit6: TEdit;
    Edit7: TEdit;
    Label6: TLabel;
    Label5: TLabel;
    Label4: TLabel;
    Label3: TLabel;
    GroupBox3: TGroupBox;
    RadioButton1: TRadioButton;
    RadioButton2: TRadioButton;
    RadioButton3: TRadioButton;
    RadioButton4: TRadioButton;
    Edit8: TEdit;
    Label7: TLabel;
    Button3: TButton;
```



```
GroupBox4: TGroupBox;  
Edit9: TEdit;  
Label8: TLabel;  
Button5: TButton;  
Edit10: TEdit;  
Label9: TLabel;  
Edit11: TEdit;  
Label10: TLabel;  
Button4: TButton;  
Edit12: TEdit;  
Label11: TLabel;  
GroupBox5: TGroupBox;  
Label12: TLabel;  
Edit13: TEdit;  
Button6: TButton;  
Label13: TLabel;  
Label14: TLabel;  
Label15: TLabel;  
Edit14: TEdit;
```

```
procedure Button3Click(Sender: TObject);  
procedure FormActivate(Sender: TObject);  
procedure Button5Click(Sender: TObject);  
procedure Button4Click(Sender: TObject);  
procedure Button6Click(Sender: TObject);  
procedure FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
```

```
private  
  { Private declarations }  
public  
  { Public declarations }  
end;
```

```
var  
  Form1: TForm1;  
  MEs, ds, Pys:string;  
implementation
```

```
{ $R *.dfm }
```

```

var
Ptextf, Pytextf, afchtextf: TextFile;
E, J, l, d, yzag, yst, yrez, Kg, jst,jspid, xs, zs, deltax, dopd: variant;
Py: real;

procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);
begin
if (Edit3.Text='') or (Edit5.Text='') or (Edit6.Text='') or (Edit7.Text='')
then
ShowMessage('указаны не все параметры')
else
begin
E:=StrToFloat(Edit3.Text);
d:=StrToFloat(Edit5.Text);
l:=StrToFloat(Edit6.Text);
Py:=StrToFloat(Edit7.Text);
J:=0.05*Power(d,4);
if radiobutton4.Checked then
ShowMessage('Укажите вид закрепления заготовки')
else
begin
if radiobutton1.Checked then
begin
Kg:=0.075;
yzag:=(Py*Power(l,3))/(48*E*J);
end;
if radiobutton2.Checked then
begin
yzag:=(Py*Power(l,3))/(3*E*J);
Kg:=0.005;
end;
if radiobutton3.Checked then
begin
yzag:=(Py*Power(l,3))/(100*E*J);
Kg:=0.16;
end;
yzag:=Roundto(yzag,-6);
Edit8.Text:=FloatToStr(yzag);
end;
end;
end;

```

```

end;

procedure TForm1.FormActivate(Sender: TObject);
var
res : integer;
begin
DecimalSeparator:= '.';
AssignFile(Ptextf, 'Word/Pfile.txt');
repeat
{$I-}
Reset(Ptextf);
{$I+}
res:=IOResult;
if res <> 0 then AssignFile(Ptextf, 'Pfile.txt');
until (res= 0);
readln(Ptextf,ds);
readln(Ptextf,MEs);
readln(Ptextf,Pys);
Closefile(Ptextf);
Edit3.Text:=MEs;
Edit5.Text:=ds;
Edit7.Text:=Pys;
end;

procedure TForm1.Button5Click(Sender: TObject);
begin
if (Edit9.Text="") or (Edit7.Text="") then
ShowMessage('указаны не все параметры')
else
begin
Py:=StrToFloat(Edit7.Text);
jst:=StrToFloat(Edit9.Text);
yst:=Py/jst;
yst:=Roundto(yst,-2);
Edit10.Text:=FloatToStr(yst);
end;
end;

procedure TForm1.Button4Click(Sender: TObject);
begin

```

```

DecimalSeparator:= '.';
if (Edit4.Text="") or (Edit5.Text=") or (Edit2.Text=") then
  ShowMessage('указаны не все параметры')
else
begin
  xs:=StrToFloat(Edit4.Text);
  zs:=StrToFloat(Edit2.Text);
  d:=StrToFloat(Edit5.Text);
  yrez:=sqrt(sqrt((d/2)+xs)+sqrt(zs))-(d/2);
  Edit11.Text:=FloatToStr(yrez);
end;
  end;

  procedure TForm1.Button6Click(Sender: TObject);
  begin
deltad:=2*(yst+yzag+yrez);
jspid:=Py/(yst+yzag+yrez);
jspid:=Roundto(jspid,-2);
Edit14.Text:=FloatToStr(jspid);
dopd:=StrToFloat(Edit12.Text);
Edit13.Text:=FloatToStr(deltad);
if dopd<deltad then
begin
  Label13.Caption:='Вывод: Погрешность обработки превышает
допуск';
  Label14.Visible:=true;
  If (yzag>yrez) and (yzag>yst) then
    Label14.Caption:='Рекомендации: уменьшите смещение заготовки';
  If (yrez>yzag) and (yrez>yst) then
    Label14.Caption:='Рекомендации: уменьшите вылет реза';
  If (yst>yrez) and (yst>yzag) then
    Label14.Caption:='Рекомендации: повысить жесткость станка
станка';
  end
else
begin
  Label13.Caption:='Вывод: Погрешность обработки не превышает
допуск';
  Label14.Caption:='Рекомендации: ';
end;

```

```

end;

procedure TForm1.FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
var
res: integer;
begin
if (dopd <> Null) and (jspid <> Null) and (E <> Null) and (Kg <> Null)
and
(l <> Null) and then
begin
dopd:=FloatToStr(dopd);
jspid:=FloatToStr(jspid);
E:=FloatToStr(E);
Kg:=FloatToStr(Kg);
l:=FloatToStr(l);
AssignFile(Pytextf, 'optimizator/Pytext.txt');
repeat
{$I-}
Rewrite(Pytextf);
{$I+}
res:=IOResult;
if res <> 0 then AssignFile(Pytextf, 'Pytext.txt');
until (res= 0);
writeln(Pytextf,dopd);
writeln(Pytextf,jspid);
writeln(Pytextf,E);
writeln(Pytextf,Kg);
writeln(Pytextf,l);
Closefile(Pytextf);
AssignFile(afchtextf, 'AΦΨX/afchtext.txt');
repeat
{$I-}
Rewrite(afchtextf);
{$I+}
res:=IOResult;
if res <> 0 then AssignFile(afchtextf, 'afchtext.txt');
until (res = 0);
writeln(afchtextf,jspid);
writeln(afchtextf,l);

```

```
    Closefile(afchtextf);  
end;  
    end;  
    end.
```

```
program ReadRTF;
```

```
uses
```

```
    Forms,
```

```
    Unit1 in 'Unit1.pas' {Form1};
```

```
{ $R *.res }
```

```
begin
```

```
    Application.Initialize;
```

```
    Application.CreateForm(TForm1, Form1);
```

```
    Application.Run;
```

```
end.
```

**ЛИСТИНГ БЛОКА ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ  
ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ**

```
unit Unit1;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls,
Forms,
  Dialogs, StdCtrls, TeEngine, Series, ExtCtrls, TeeProcs, Chart,
VarCmplx, Math,
  DbChart;

type
  TForm1 = class(TForm)
    Chart1: TChart;
    GroupBox1: TGroupBox;
    Edit1: TEdit;
    Edit2: TEdit;
    Edit3: TEdit;
    Edit4: TEdit;
    Edit5: TEdit;
    Edit6: TEdit;
    Edit7: TEdit;
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;
    Label3: TLabel;
    Label4: TLabel;
    Label5: TLabel;
    Label6: TLabel;
    Label7: TLabel;
    Series1: TLineSeries;
    Label18: TLabel;
    Button6: TButton;
    GroupBox2: TGroupBox;
    Label15: TLabel;
    Edit9: TEdit;
    Label16: TLabel;
    Edit10: TEdit;
    Label17: TLabel;
```

```

Edit11: TEdit;
Button4: TButton;
Button1: TButton;
Button2: TButton;
Button3: TButton;
Button5: TButton;
Edit12: TEdit;
Edit13: TEdit;
Label9: TLabel;
Label10: TLabel;
Label11: TLabel;
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure FormActivate(Sender: TObject);
procedure Button2Click(Sender: TObject);
procedure Button3Click(Sender: TObject);
procedure Button4Click(Sender: TObject);
procedure Button5Click(Sender: TObject);
procedure Button6Click(Sender: TObject);

```

```

private
  { Private declarations }
public
  { Public declarations }
end;

```

```

var
  Form1: TForm1;

```

```

implementation
uses Unit2;

```

```

{$R *.dfm}

```

```

var
omega: variant; // приращение аргумента
e0, sigma0, b1, a1, v, Kp, KK, Kgamma, m1n, TP, Tgamma, Talfagamma: real;
h, Halfa, Talfap, Talfa, Re0, bpr: real;
omega, WalfagammaR, WalfagammaI, WpshtR, WpshtI, WpR, WpI: real;
A, j, kus, ws, T1, T2, lamda, REwus, Imwus, WrusR, WrusI, m: real;
Wp, Walfagamma, Wpsht, Wrus, Wus:variant;
TPP, cdd, cdc, d, ro, l, vc, m1:real;

```



```
dip: real;
a1s, b1s, vs, ds, ros, ls, js:string;
afch, afch1: textfile;
```

```
    procedure chislu;
    begin
Form1.Series1.Clear;
a1:=StrTofloat(Form1.Edit1.Text);
b1:=StrTofloat(Form1.Edit2.Text);
v:=StrTofloat(Form1.Edit3.Text);
m1n:=1;
h:=StrTofloat(Form1.Edit4.Text);
Halfa:=StrTofloat(Form1.Edit5.Text);
e0:=StrTofloat(Form1.Edit6.Text);
KK:=StrTofloat(Form1.Edit7.Text);
Kgamma:=1;
v:=v*1000/60;
Kp:=KK*b1;
TP:=m1n*((a1*e0)/v);
Talfa:=(h*h*Halfa)/(2*v*KK);
Tgamma:=(a1*Kgamma)/(v*e0);
Talfagamma:=(1/v)*(((h*h*Halfa)/(2*KK))-((Kgamma*a1)/e0));
Talfap:=sqrt(Talfa*TP);
domega:=5;
    end;
```

```
    procedure TForm1.FormActivate(Sender: TObject);
    var
res:integer;
    begin
DecimalSeparator:= '.';
Series1.Clear;
AssignFile(afch, 'AФЧХ\mmfile.txt');
repeat
    {$I-}
    Reset(afch);
    {$I+}
    res:=IOResult;
    if res <> 0 then AssignFile(afch, 'mmfile.txt');
until (res= 0);
DecimalSeparator:= '.';
readln(afch,a1s);
```

```

readln(afch,b1s);
readln(afch,vs);
readln(afch,ds);
readln(afch,ros);
Closefile(afch);
Edit1.Text:=a1s;
Edit2.Text:=b1s;
Edit3.Text:=vs;
ro:=StrTofloat(ros);
d:=StrTofloat(ds);
AssignFile(afch1, 'AΦΧ\afchtext.txt');
repeat
  {$I-}
  Reset(afch1);
  {$I+}
  res:=IOResult;
  if res <> 0 then AssignFile(afch1, 'afchtext.txt');
until (res= 0);
DecimalSeparator:= '.';
readln(afch1,js);
readln(afch1,ls);
Closefile(afch1);
Edit9.Text:=js;
l:=StrTofloat(ls);
vc:=pi*sqr(d/2)*l;
m1:=ro*(vc/1000000000);
m1:=Roundto(m1,-2);
Edit10.Text:=FloatToStr(m1);
  end;

  procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
  begin
chislu;
repeat
  WalfagammaR:=1-(Talfap*Talfap*omega*omega);
  WalfagammaI:=Talfagamma*omega;
  Series1.AddXY(WalfagammaR,WalfagammaI,',clGreen);
  omega:=omega+domega;
  until (omega >= 100000);
  Chart1.Title.Text:='Walfagamma';
  end;

  procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);

```

```

begin
chislu;
omega:=0;
repeat
  TPP:=1/(1+(TP*TP)*omega*omega);
  WpshtR:=Kp*TPP;
  cdd:=(Kp*TP*omega);
  cdc:=1/(1+(TP*TP*omega*omega));
  WpshtI:=(-1)*(cdd*cdc);
  Series1.AddXY(WpshtR,WpshtI,"clRed);
  omega:=omega+domega;
until (omega >= 100000);
Chart1.Title.Text.Text:='Wp штрих';
end;

procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);
begin
chislu;
Walfagamma:=VarComplexCreate;
Wp:=VarComplexCreate;
Wpsht:=VarComplexCreate;
Walfagamma.Real:=WalfagammaR;
Walfagamma.Imaginary:=WalfagammaI;
Wpsht.Real:=WpshtR;
Wpsht.Imaginary:=WpshtI;
Wp:=Wpsht*Walfagamma;
omega:=0;
repeat
  WalfagammaR:=1-(Talfap*Talfap*omega*omega);
  WalfagammaI:=Talfagamma*omega;
  TPP:=1/(1+(TP*TP)*omega*omega);
  WpshtR:=Kp*TPP;
  cdd:=(Kp*TP*omega);
  cdc:=1/(1+(TP*TP*omega*omega));
  WpshtI:=(-1)*(cdd*cdc);
  Walfagamma:=VarComplexCreate;
  Wp:=VarComplexCreate;
  Wpsht:=VarComplexCreate;
  Walfagamma.Real:=WalfagammaR;
  Walfagamma.Imaginary:=WalfagammaI;
  Wpsht.Real:=WpshtR;
  Wpsht.Imaginary:=WpshtI;
  Wp:=Wpsht*Walfagamma;

```

```

WpR:=Wp.Real;
WpI:=Wp.Imaginary;
Series1.AddXY(WpR,WpI,".clBlue);
omega:=omega+domega;
until (omega >= 100000);
Chart1.Title.Text.Text:='Wp';
end;

procedure TForm1.Button4Click(Sender: TObject);
begin
Form2.Show;
end;

procedure TForm1.Button5Click(Sender: TObject);
begin
Form1.Series1.Clear;
chislu;
j:=StrTofloat(Form1.Edit9.Text);
m:=StrTofloat(Form1.Edit10.Text);
lamda:=StrTofloat(Form1.Edit11.Text);
domega:=0.5;
kus:=1/j;
T1:=sqrt(m/(1000*j));
T2:=lamda*t/pi;
Wus:=VarComplexCreate;
Wpsht:=VarComplexCreate;
Wpsht.Real:=WpshtR;
Wpsht.Imaginary:=WpshtI;
Wp:=Wpsht*Walfagamma;
omega:=0;
repeat
REwus:=(kus*(1-(omega*omega*T1*T1)))/
/(sqrt((1-(omega*omega*T1*T1)))+(omega*omega*T2*T2));
Imwus:=(-1)*(kus*omega*T2)/
/(sqrt((1-(omega*omega*T1*T1)))+(omega*omega*T2*T2));
TPP:=1/(1+(TP*TP)*omega*omega);
WpshtR:=9.81*Kp*TPP;
cdd:=(9.81*Kp*TP*omega);
cdc:=1/(1+(TP*TP)*omega*omega);
WpshtI:=(-1)*(cdd*cdc);
Wus:=VarComplexCreate;
Wpsht:=VarComplexCreate;
Wrus:=VarComplexCreate;

```

```

Wpsht.Real:=WpshtR;
Wpsht.Imaginary:=WpshtI;
Wus.Real:=REWus;
Wus.Imaginary:=Imwus;
Wrus:=Wus*Wpsht;
WrusR:=Wrus.Real;
WrusI:=Wrus.Imaginary;
Series1.AddXY(WrusR,WrusI,",clGreen);
omega:=omega+domega;
until (omega >= 10000);
Chart1.Title.Text.Text:='Wпаз';
Re0:=9.81*((-
1)*(Kp/(1/kus)))*((TP*T1*T1/T2)/((T1*T1)+(TP*TP)+(TP*T2)));
bpr:=((T2*j)/(KK*TP*T1*T1))*((T1*T1)+(TP*TP)+(TP*T2))/9.81;
Edit12.Enabled:=True;
Edit13.Enabled:=True;
Edit12.Text:=FloatToStr(Re0);
Edit13.Text:=FloatToStr(bpr);
end;

procedure TForm1.Button6Click(Sender: TObject);
begin
if Talfagamma<0 then
Label18.Caption:='Происходит отставание изменения силы резания
от изменения величины срезаемого слоя.'+ #13 +'Для снижения такого
отставания необходимо увеличивать главный угол резца в плане.';
if Re0<-1 then
Label11.Caption:='Система неустойчива'
else
Label11.Caption:='Система устойчива';
end;
end.

unit Unit2;

interface

uses
Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls,
Forms,
Dialogs, StdCtrls, ExtCtrls, Unit1;

```

```

type
  TForm2 = class(TForm)
    GroupBox1: TGroupBox;
    RadioButton1: TRadioButton;
    RadioButton2: TRadioButton;
    RadioButton3: TRadioButton;
    GroupBox2: TGroupBox;
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;
    Label3: TLabel;
    Label4: TLabel;
    Label5: TLabel;
    Label6: TLabel;
    Button1: TButton;
    Label7: TLabel;
    Edit1: TEdit;
    GroupBox3: TGroupBox;
    Label8: TLabel;
    GroupBox4: TGroupBox;
    Label9: TLabel;
    Label10: TLabel;
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
    procedure FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;

```

```

var
  Form2: TForm2;
  ph:string;
implementation

```

```

{$R *.dfm}

```

```

procedure TForm2.Button1Click(Sender: TObject);
begin
Form2.Close;
end;

```

```
procedure TForm2.FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
begin
  If RadioButton1.Checked then
    ph:='0.1';
  If RadioButton2.Checked then
    ph:='1';
  If RadioButton3.Checked then
    ph:=Edit1.Text;
  Form1.Edit4.Text:=ph;
end;
end.
```

```
program AFCHh;
```

```
uses
```

```
  Forms,
```

```
  Unit1 in 'Unit1.pas' {Form1},
```

```
  Unit2 in 'Unit2.pas' {Form2};
```

```
{ $R *.res }
```

```
begin
```

```
  Application.Initialize;
```

```
  Application.CreateForm(TForm1, Form1);
```

```
  Application.CreateForm(TForm2, Form2);
```

```
  Application.Run;
```

```
end.
```

**ЛИСТИНГ БЛОКА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ**

```
unit Unit1;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls,
Forms,
  Dialogs, StdCtrls, Math, ExtCtrls, Unit2;

type
  TForm1 = class(TForm)
    Label3: TLabel;
    Label4: TLabel;
    Edit2: TEdit;
    Edit3: TEdit;
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;
    Edit4: TEdit;
    Edit5: TEdit;
    Label5: TLabel;
    Label6: TLabel;
    Edit6: TEdit;
    Edit7: TEdit;
    Label7: TLabel;
    Edit8: TEdit;
    Edit9: TEdit;
    Label8: TLabel;
    Label9: TLabel;
    Label10: TLabel;
    Edit10: TEdit;
    Edit11: TEdit;
    Button1: TButton;
    Label11: TLabel;
    Edit13: TEdit;
    Label12: TLabel;
    Edit20: TEdit;
    Button2: TButton;
```



```

Edit21: TEdit;
Edit22: TEdit;
Label13: TLabel;
Label14: TLabel;
Memo1: TMemo;
Label15: TLabel;
Label16: TLabel;
Edit1: TEdit;
Edit12: TEdit;
procedure FormActivate(Sender: TObject);
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure Button2Click(Sender: TObject);
private
  { Private declarations }
public
  { Public declarations }
end;

```

```

var
  Form1: TForm1;

```

```

implementation

```

```

{$R *.dfm}

```

```

var

```

```

  Cvs, xs, ys, ms, xps, yps, nps, Cps, xpzs, ypzs, npzs, Cpzs, Kivs, Kpvs:
string;

```

```

  Kmvs, ds, ts, Krpzs, Kfizs, Krps, Kfis, Kmps: string;

```

```

  sbs,shs, Rzs,Rs, Nsts, kpds, nmins, nmaxs, smins, smaxs, dopds: string;

```

```

  jspids, Es, Kgs, Lzags:string;

```

```

  Cv, x, y, m, xp, yp, np, Cp, xpz, ypz, npz, Cpz, Kiv, Kpv, Kmv, d, t: va-
riant;

```

```

  C1, Kv, Krpz, Kfiz, Krp, Kfi, Kmp, Kp,Kpz: variant;

```

```

  c2, nst, kpd, sigmaizg, lv, kzp, c3, sb, sh,c4, c5, c6, c7, Rz, c8, r: variant;

```

```

  dopd, jspid, E, Kg, C9a, C9b, C9, Lzag:variant;

```

```

  optim, stan, Pytext: TextFile;

```

```

  Procedure Ed(a, b, c, d, e, f:variant; var w1,w2: variant);

```

```

  begin

```

```

  if (a+b)=(c+d) then

```

```

    if (a+b)>(e+f)then

```

```

begin
  w1:=a;
  w2:=b;
end
else
begin
  w1:=e;
  w2:=f;
end;
if (a+b)=(e+f) then
if (a+b)>(c+d)then
begin
  w1:=a;
  w2:=b;
end
else
begin
  w1:=c;
  w2:=d;
end;
If (c+d)=(e+f) then
if (a+b)>(e+f)then
begin
  w1:=a;
  w2:=b;
end
else
begin
  w1:=c;
  w2:=d;
end;
end;
end;

```

Procedure Bd(a, b, c, d:variant; var w1,w2: variant);

```

begin
  If (a+b)>(c+d) then
  begin
    w1:=exp(a);
    w2:=exp(b);
  end
  else
  begin

```

```

    w1:=exp(c);
    w2:=exp(d);
end;
end;

```

```

Procedure cd(a, b, c, d, e, f:variant; var w1,w2: variant);
begin
  If ((a+b)>(c+d)) and ((a+b)>(e+f))then
  begin
    w1:=a;
    w2:=b;
  end;
  If ((c+d)>(a+b)) and ((c+d)>(e+f))then
  begin
    w1:=c;
    w2:=d;
  end;
  If ((e+f)>(a+b)) and ((e+f)>(c+d))then
  Begin
    w1:=e;
    w2:=f;
  end;
end;
end;

```

```

    procedure TForm1.FormActivate(Sender: TObject);
    var
res:integer;
    begin
AssignFile(stan, 'optimizer/stanfile.txt');
repeat
  {$I-}
  Reset(stan);
  {$I+}
  res:=IOResult;
  if res <> 0 then AssignFile(stan, 'stanfile.txt');
until (res= 0);
DecimalSeparator:= '.';
readln(stan,Nsts);
readln(stan,kpds);
readln(stan,nmins);
readln(stan,nmaxs);
readln(stan,smins);
readln(stan,smaxs);

```

```

Closefile(stan);
AssignFile(Pytext, 'optimizer/Pytext.txt');
repeat
  {$I-}
  Reset(Pytext);
  {$I+}
  res:=IOResult;
  if res <> 0 then AssignFile(Pytext, 'Pytext.txt');
until (res= 0);
DecimalSeparator:= '.';
readln(Pytext,dopds);
readln(Pytext,jspids);
readln(Pytext,Es);
readln(Pytext,Kgs);
readln(Pytext,Lzags);
Closefile(Pytext);
AssignFile(optim, 'optimizer/optimfile.txt');
repeat
  {$I-}
  Reset(optim);
  {$I+}
  res:=IOResult;
  if res <> 0 then AssignFile(optim, 'optimfile.txt');
until (res= 0);
DecimalSeparator:= '.';
readln(optim,Cvs);
readln(optim,xs);
readln(optim,ys);
readln(optim,Cps);
readln(optim,xps);
readln(optim,yps);
readln(optim,nps);
readln(optim,Cpzs);
readln(optim,xpzs);
readln(optim,ypzs);
readln(optim,npzs);
readln(optim, ms);
readln(optim, ds);
readln(optim, ts);
readln(optim, Kivs);
readln(optim, KPvs);
readln(optim, Kmvs);
readln(optim, Krpzs);

```

```
readln(optim, Kfzs);
readln(optim, Krps);
readln(optim, Kfis);
readln(optim, Kmps);
readln(optim, shs);
readln(optim, sbs);
readln(optim, Rzs);
readln(optim, Rs);
Closefile(optim);
Cv:=StrToFloat(Cvs);
Cpz:=StrToFloat(Cpzs);
Cp:=StrToFloat(Cps);
x:=StrToFloat(xs);
y:=StrToFloat(ys);
xp:=StrToFloat(xps);
yp:=StrToFloat(yps);
np:=StrToFloat(nps);
xpz:=StrToFloat(xpzs);
ypz:=StrToFloat(ypzs);
npz:=StrToFloat(npzs);
m:=StrToFloat(ms);
d:=StrToFloat(ds);
t:=StrToFloat(ts);
kiv:=StrToFloat(kivs);
kpv:=StrToFloat(kpvs);
kmv:=StrToFloat(kmvs);
krpz:=StrToFloat(krpzs);
kfiz:=StrToFloat(kfzs);
krp:=StrToFloat(krps);
kfi:=StrToFloat(kfis);
kmp:=StrToFloat(kmps);
sb:=StrToFloat(sbs);
sh:=StrToFloat(shs);
Rz:=StrToFloat(Rzs);
R:=StrToFloat(Rs);
jspid:=StrToFloat(jspids);
E:=StrToFloat(Es);
Kg:=StrToFloat(Kgs);
dopd:=StrToFloat(dopds);
Lzag:=StrToFloat(Lzags);
Edit3.Text:=d;
Edit2.Text:=t;
Edit7.Text:=smxs;
```

```

Edit6.Text:=smins;
Edit8.Text:=nmaxs;
Edit9.Text:=nmins;
Edit5.Text:=Nsts;
Edit4.Text:=kpds;
Edit12.Text:=sbs;
Edit1.Text:=shs;
if Rz<>'0' then
begin
  Rz:=StrToFloat(Rzs);
  Edit20.Text:=Rz;
end;
end;

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
begin
Form2.Show;
end;

procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);

var
n1, s1, n2, s2, n3, s3, n4, s4, n5, s5, s6, n6, s7, n7, n,s,fn1, fn2, fs1: va-
riant;
fs2, fn3, fs3: variant;
begin
Memo1.Lines.Clear;
d:=StrToFloat(Edit3.Text);
t:=StrToFloat(Edit2.Text);
Nst:=StrToFloat(Edit5.Text);
Rz:=StrToFloat(Edit20.Text);
kpd:=StrToFloat(Edit4.Text);
sigmaizg:=StrToFloat(Edit13.Text);
lv:=StrToFloat(Edit11.Text);
kzp:=StrToFloat(Edit10.Text);
c1:=StrToFloat(Edit6.Text);
c2:=StrToFloat(Edit7.Text);
c3:=StrToFloat(Edit9.Text);
c4:=StrToFloat(Edit8.Text);
c1:=ln(c1);
Memo1.Lines.Add('C1='+FloatToStr(C1));
c2:=ln(c2);
Memo1.Lines.Add('C2='+FloatToStr(C2));

```

```

c3:=ln(c3);
Memo1.Lines.Add('C3='+FloatToStr(C3));
c4:=ln(c4);
Memo1.Lines.Add('C4='+FloatToStr(C4));
Kv:=Kiv*Kmv*KpV;
c5:=(1000*Cv*KV)/(pi*d*Power(60,m)*Power(t,x));
c5:=ln(c5);
Memo1.Lines.Add('C5='+FloatToStr(C5));
Kp:=Krp*Kmp*Kfi;
Kpz:=Krpz*Kmp*Kfiz;
c6:=(1020*60*Power(1000,(npz+1))*Nst*kpd)/(10*cpz*Power(pi,(npz+1))*
*Power(d,(npz+1))*Kpz*Power(t,xpz));
c6:=ln(c6);
Memo1.Lines.Add('C6='+FloatToStr(C6));
c7:=(Power(1000,(npz))*sb*Power(sh,2)*sigmaizg)/(60*cpz*Power(pi,(npz))*
*Power(d,(npz))*Kpz*Power(t,xpz)*lv*Kzp);
c7:=ln(c7);
Memo1.Lines.Add('C7='+FloatToStr(C7));
C9a:=(dopd*Power(1000,np)*jspid)/(20*cp*Power(pi,(np))*Power(d,(np))*
Kp*
*Power(t,xp));
C9b:=(Kg*E*0.2*dopd*Power(pi,(1-np))*Power(d,(4-np))*
*Power(1000,np))/(Kp*Power(t,xp)*Cp*Power(t,xp)*Power(Lzag,3));
if C9a<C9b then
  C9:=C9b
else
  C9:=C9a;
Memo1.Lines.Add('C8='+FloatToStr(C9a));
Memo1.Lines.Add('C9='+FloatToStr(C9b));
c8:=0.07*sqrt(Rz*r);
c8:=ln(c8);
Memo1.Lines.Add('C10='+FloatToStr(C8));
if (c8<C2) then
begin
  C2:=C8;
  s4:=C8;
  s5:=C8;
  S6:=C8;
  S7:=C8;
end
else

```

```

begin
  s4:=C2;
  s5:=C2;
  S6:=C2;
  S7:=C2;
end;
n4:=C5-(y*s4);
n5:=(c6-(ypz*s5))/(npz+1);
n7:=(C9-(yp*s7))/np;
if npz<>0 then
  n6:=(c7-(ypz*s6))/(npz)
else
  n6:=C3;
if (n4>C4) or (n4<C3) then
  n4:=C3;
if (n5>C4) or (n5<C3) then
  n5:=C3;
if (n6>C4) or (n6<C3) then
  n6:=C3;
if (n5<>C3) or (n4<>C3) then
  if n5>n4 then
    n5:=C3
  else
    n4:=C3;
if (n6<>C3) or (n7<>C3) then
  if n6>n7 then
    n7:=C3
  else
    n6:=C3;
s1:=(C7-(npz*C5))/(ypz-y);
n1:=C5-(y*s1);
if (n1>C4) or (n1<C3) then
  n1:=C3;
if (s1>C2) or (s1<C1) then
  s1:=C1;
s2:=(C6-(npz*C5)-C5)/(ypz-y-npz);
n2:=C5-(y*s2);
if (n2>C4) or (n2<C3) then
  n2:=C3;
if (s2>C2) or (s2<C1) then
  s2:=C1;
n3:=C6-C7;
s3:=(C7-(npz*n3))/ypz;

```



```

if (n3>C4) or (n3<C3) then
  n3:=C3;
if (s3>C2) or (s3<C1) then
  s3:=C1;
If ((n1+s1)◊(n2+s2)) and ((n1+s1)◊(n3+s3))and ((n2+s2)◊(n3+s3))then
  cd(n1,s1,n2,s2,n3,s3,Fn1,Fs1)
else
  ed(n1,s1,n2,s2,n3,s3,Fn1,Fs1);
If ((n4+s4)◊(n5+s5)) and ((n4+s4)◊(n6+s6))and ((n5+s5)◊(n6+s6))then
  cd(n4,s4,n5,s5,n6,s6,Fn2,Fs2)
else
  ed(n4,s4,n5,s5,n6,s6,Fn2,Fs2);
BD(fn1,fs1,fn2,fs2,fn3,fs3);
BD(ln(fn3),ln(fs3),n7,s7,n,s);
if n=exp(C3) then n:=exp(C4);
if s=exp(C1) then s:=exp(C2);
if ln(n)<C3 then n:=exp(C3);
if ln(s)<C1 then s:=exp(C1);
Edit21.Text:=n;
Edit22.Text:=s;
end;
end.

```

unit Unit2;

interface

uses

Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls,  
Forms,

Dialogs, ExtCtrls, jpeg;

type

TForm2 = class(TForm)

Image1: TImage;

procedure FormActivate(Sender: TObject);

private

{ Private declarations }

public

{ Public declarations }

end;

```

var
  Form2: TForm2;

implementation

{$R *.dfm}

procedure TForm2.FormActivate(Sender: TObject);
begin
Form2.Image1.Picture.LoadFromFile('Схемы/целевая функция.jpg');
end;
end.

program Project1;

uses
  Forms,
  Unit1 in 'Unit1.pas' {Form1},
  Unit2 in 'Unit2.pas' {Form2};

{$R *.res}

begin
  Application.Initialize;
  Application.CreateForm(TForm1, Form1);
  Application.CreateForm(TForm2, Form2);
  Application.Run;
end.

```

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. 1. ЛИТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНЫЙ ОБЗОР МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ .....	4
<b>1.1. Общие сведения о математических моделях</b> .....	4
1.1.1. Объекты моделирования в машиностроении .....	4
1.1.2. Виды математических моделей .....	4
1.1.3. Требования, предъявляемые к математическим моделям .....	7
<b>1.2. Математические модели силовых и тепловых         процессов при точении материалов</b> .....	8
1.2.1. Физическая модель процесса точения .....	8
1.2.2. Математическая модель процесса точения .....	15
<b>1.3. Динамика процессов резания</b> .....	25
<b>1.4. Оптимизация процессов резания</b> .....	32
1.4.1. Методы оптимизации процессов резания .....	32
1.4.2. Основные принципы выбора критериев оптимальности .....	38
<b>1.5. Метод конечных элементов как средство моделиро-         вания процессов резания</b> .....	39
1.5.1. Применение метода конечных элементов для моде- лирования процессов резания .....	39
1.5.2. Программное обеспечение, реализующее МКЭ .....	46
2. КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ .....	48
<b>2.1. Обобщенная блок-схема проектирования процессов         резания</b> .....	48
<b>2.2. Выбор программных средств для разработки блоков         САПР</b> .....	51
2.2.1. Характеристика СУБД Microsoft Access .....	51
2.2.2. Характеристика среды программирования Delphi 7 .....	53
2.2.3. Характеристика системы твердотельного моделиро- вания Autodesk Inventor 2011 .....	56

3.	РАЗРАБОТКА БЛОКА ЗАДАНИЯ ИСХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ .....	61
	<b>3.1. Разработка базы данных режущих инструментов и обрабатываемых материалов .....</b>	<b>61</b>
	<b>3.2. Создание блока обработки начальных данных .....</b>	<b>68</b>
4.	РАЗРАБОТКА БЛОКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕЗАНИЯ .....	80
5.	РАЗРАБОТКА БЛОКА АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАГРУЗОК, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ .....	88
	<b>5.1. Моделирования нагрузок, действующих на режущий инструмент, в среде Autodesk Inventor Professional .....</b>	<b>88</b>
	<b>5.2. Концепция создания блока анализа результатов моделирования нагрузок .....</b>	<b>91</b>
6.	РАЗРАБОТКА БЛОКА ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ .....	95
7.	РАЗРАБОТКА БЛОКА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ .....	97
8.	ПРОВЕДЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ .....	99
	<b>8.1. Назначение режимов резания .....</b>	<b>100</b>
	<b>8.2. Расчет параметров математической модели .....</b>	<b>102</b>
	<b>8.3. Вычисление жесткости системы СПИД и определение ее влияния на точность размеров и формы обрабатываемой заготовки .....</b>	<b>105</b>
	<b>8.4. Исследование динамики процесса резания .....</b>	<b>106</b>
	<b>8.5. Оптимизация процесса токарной обработки .....</b>	<b>110</b>
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	114
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	115
	ПРИЛОЖЕНИЯ .....	118

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**Пестрецов Сергей Иванович,  
Алтунин Константин Анатольевич,  
Соколов Михаил Владимирович,  
Однолько Валерий Григорьевич**

**КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ  
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ  
В ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Редактор *З.Г. Чернова*  
Инженер по компьютерному макетированию *Т.Ю. Зотова*



Сдано в набор 22.06.2012 г.  
Подписано в печать 20.08.2012 г.

Формат 60 × 84/16.

Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.

Печать офсетная.

Усл. печ. л. 12,32. Уч.-изд. л. 10,0.

Тираж 400 экз. Заказ № 434

ООО «Издательский дом «Спектр»,  
119048, Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1  
[Http://www.idspektr.ru](http://www.idspektr.ru). E-mail: [idspektr@rambler.ru](mailto:idspektr@rambler.ru)

Подготовлено к печати и отпечатано  
в Издательско-полиграфическом центре  
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»

392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14

По вопросам приобретения книги обращаться по телефону 8(4752)638108  
E-mail: [izdatelstvo@admin.tstu.ru](mailto:izdatelstvo@admin.tstu.ru)