

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»
(ФГБОУ ВО «КнАГУ»)



УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор

И.В. Макурин

12 2018 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

по дисциплине

Б1.В.ДВ.1.2 «Моделирование производственных процессов»

к ОПОП ВО

Направление 15.06.01 – Машиностроение

направленность

05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической
обработки

Форма обучения

Технология обучения

Трудоемкость дисциплины

Язык преподавания

очная

традиционная

4 ЗЕТ


русский

Комсомольск-на-Амуре 2018

Рабочая программа дисциплины «Моделирование производственных процессов»
обсуждена и одобрена на заседании
кафедры «Технология машиностроения»

Протокол № 10 от
«03» 12 2018 г.

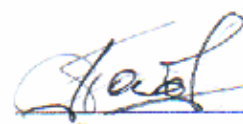
Заведующий кафедрой
«Технология машиностроения»

 А.И. Пронин
«03» 12 2018 г.

Рабочая программа дисциплины «Моделирование производственных процессов»
обсуждена и одобрена на заседании совета
ИКП МТО


Протокол № 3.1 от
«17» 12 2018 г.

Председатель совета ИКП МТО

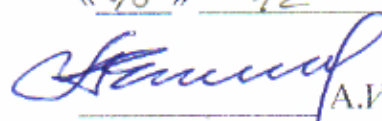
 П.А. Саблин
«17» 12 2018 г.

СОГЛАСОВАНО

Директор библиотеки

 И.А. Романовская
«18» 12 2018 г.

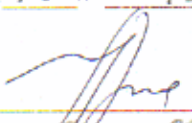
Проректор по науке и
инновационной работе

 А.И. Евстигнеев
«18» 12 2018 г.

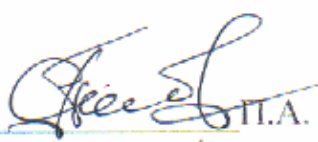
Начальник УМУ

 Е.Е. Поздеева
«18» 12 2018 г.

Начальник ОПА НПК

 Е.В. Чепухалина
«18» 12 2018 г.

Автор рабочей программы дисциплины
Доцент, канд. техн. наук

 П.А. Саблин
«03» 12 2018 г.

Введение

Учебная дисциплина «Моделирование производственных процессов» входит в состав вариативной части учебного плана и является обязательной дисциплиной подготовки аспирантов направления 15.06.01 «Машиностроение» очной формы обучения.

Данная рабочая программа по дисциплине «Моделирование производственных процессов» является базовым и руководящим документом для аспирантов указанного направления подготовки и преподавателей, которые ведут занятия по данной дисциплине. Рабочая программа предназначена для четкой ориентации и представления, чем конкретно предстоит заниматься при изучении и освоении данной дисциплины. Содержание программы охватывает основные положения дисциплины.

В целом, содержание дисциплины «Моделирование производственных процессов» и способы его усвоения соответствуют компетентностному подходу в образовании и нацелено на деятельностное овладение учебным материалом.

Распределение нагрузки по часам для всех форм обучения при изучении дисциплины «Моделирование производственных процессов» показано в таблице 1.

Таблица 1 – Распределение нагрузки

Вид нагрузки	Очная форма, объем в часах
Лекции	4
Самостоятельная работа	140
Общее количество часов	144

1 Пояснительная записка

1.1 Предмет, цели, задачи и принципы построения и реализации дисциплины

Предметом изучения данной дисциплины являются методы построения и анализа моделей производственных процессов в машиностроении.

Цель. Изучение дисциплины «Моделирование производственных процессов» имеет цель получения навыков разработки и использования моделей для описания, исследования и оптимизации производственных процессов в машиностроении.

Задачи. При изучении дисциплины необходимо усвоить:

- общие понятия моделирования (структуры, классификации и областей применения моделей, предъявляемых к ним требований);
- теоретические основы моделирования и оптимизации процессов в машиностроении;

- вопросы моделирования физических процессов в технологических системах;
- вопросы моделирования и оптимизации технологических станочных систем
- вопросы технико-экономических процессов на предприятии.

Построение курса «Моделирование производственных процессов» основывается на **принципах**:

Научность - при изучении теоретического материала, как во время аудиторных занятий, так и при самостоятельном изучении разделов курса, аспиранты, знакомятся с общей методологией моделирования, с общими требованиями, предъявляемыми к моделям. Этому способствуют использование проблемных ситуаций, в том числе ситуаций личностного выбора, специальное обучение умению наблюдать явления, фиксировать и анализировать результаты наблюдений, работать с учебной и научной литературой.

преемственность - дисциплина «Моделирование производственных процессов» является необходимой составной частью подготовки аспиранта. Знания, полученные аспирантом при изучении теоретических разделов курса, требуется для выполнения научно-исследовательских работ для подготовки научного доклада и диссертации.

системности - предполагает, что учебный материал изучается в определенной последовательности и логике, которые дают системное представление о дисциплине. Для этого темы учебной программы структурированы и систематизированы. От одной темы к другой сохраняется определенная преемственность.

1.2 Роль и место дисциплины в структуре реализуемой образовательной программы. Планируемые результаты обучения

Учебная дисциплина «Моделирование производственных процессов» входит в состав вариативной части учебного плана и является дисциплиной по выбору подготовки аспирантов. Она изучается в течение первого и второго полугодий второго года обучения. В каждом из полугодий учебным планом предусмотрен зачет по дисциплине.

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование у аспирантов знаний, умений и владений следующих компетенций:

Формируемые компетенции (код компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
ОПК-2	В1 (ОПК-2-III) владеть навыками анализа и синтеза нетиповых задач при проектировании, изготовлении и эксплуатации новой техники
ОПК-5	З1 (ОПК-5-II) Знать методы регистрации и обработки результатов экспериментальных исследований У1 (ОПК-5-II) Уметь провести экспериментальные исследования, с последующей обработкой результатов В1 (ОПК-5-II) Владеть навыками проведения экспериментальных

	<p>исследований и обработки результатов</p> <p>31 (ОПК-5-III) Знать критерии адекватности результатов экспериментальных исследований</p> <p>У1 (ОПК-5-III) Уметь адекватно оценить получаемые результаты с применением математического аппарата</p> <p>В1 (ОПК-5-III) Владеть навыками оценки получаемых результатов с применением математического аппарата</p>
ПК-1	<p>32 (ПК-1-I) Знать теоретические основы, методы моделирования и экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и химических эффектов</p> <p>34 (ПК-1-I) Знать методы оптимизации параметров процесса в целях повышения производительности, качества и экономичности обработки, а также снижения энергопотребления</p> <p>У1 (ПК-1-I) Уметь моделировать процессы механической и физико-технической обработки, технологического оборудования и режущих инструментов при формообразовании поверхностей деталей машин</p> <p>У3 (ПК-1-I) Уметь разрабатывать конструкцию, выполнять расчеты и оптимизацию параметров инструмента и технологической оснастки, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы механической и физико-технической обработки</p> <p>31 (ПК-1-II) Знать особенности применения процессов механической и физико-технической обработки в автоматизированном производстве, в т.ч.: управление; моделирование и оптимизацию параметров процессов, оборудования и инструментов; теорию надежности;</p> <p>У1 (ПК-1-II) Уметь оптимизировать параметры процесса в целях повышения производительности, качества и экономичности обработки, а также снижения энергопотребления</p> <p>У2 (ПК-1-II) Уметь прогнозировать и создавать технологические процессы механической и физико-технической обработки, оборудование и инструменты, основанные на новых физических эффектах</p> <p>31 (ПК-1-III) Знать методологию проектирования, расчета и оптимизации параметров режущих инструментов, инструментальных систем и оснастки, обеспечивающих технически, экономически и энергетически эффективные процессы механической и физико-технической обработки</p> <p>У1 (ПК-1-III) Уметь проектировать металлорежущие станки, станочные системы, автоматические линии и оборудование для физико-технической обработки, выполнять расчеты и оптимизировать их компоновки, состав оборудования, и параметры станочного оборудования</p>
ПК-2	<p>31 (ПК-2-II) Знать методы анализа, планирования и управления различными технологическими процессами обработки материалов резанием</p> <p>У1 (ПК-2-II) Уметь решать проблемы рациональной эксплуатации технологического оборудования, режущего инструмента и оснастки</p> <p>В1 (ПК-2-II) Владеть методами анализа, планирования и управления различными технологическими процессами обработки материалов резанием</p> <p>В2 (ПК-2-III) Владеть методологией проектирования, расчета и оптимизации параметров режущих инструментов, инструментальных</p>

	систем и оснастки, обеспечивающих технически, экономически и энергетически эффективные процессы механической и физико-технической обработки
--	---

1.3 Характеристика трудоемкости дисциплины и ее отдельных компонентов

Согласно учебному плану дисциплина «Моделирование производственных процессов» изучается на втором курсе. Характеристика трудоемкости дисциплины для очной формы обучения представлена в таблице 2.

Таблица 2 - Характеристика трудоемкости дисциплины для очной формы обучения (срок 4 года)

Наименование показателей	Полугодия	Значение трудоемкости									
		Всего					в том числе:				
		зет	часы				аудиторные занятия, часы			самостоятельная работа в часах	промежуточная аттестация в часах
			всего	в неделю		всего	в неделю				
очно				очно							
1 Трудоемкость дисциплины в целом (по рабочему учебному плану программы)	1, 2	4	144	4,24	-	4	0,12	-	140	-	
2 Трудоемкость дисциплины в каждом полугодии (по рабочему учебному плану программы)	1	2	72	5,14	-	2	0,14	-	70	-	
	2	2	72	3,6	-	2	0,1	-	70	-	
3 Трудоемкость по видам аудиторных занятия - лекции	1	-	-	-	-	2	0,14	-	-	-	
	2	-	-	-	-	2	0,1	-	-	-	
4 Промежуточная аттестация (число зачисляемых зет): 4.1 Зачет	1, 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

1.4 Входные требования для освоения дисциплины

Знания, умения и владения, необходимые для освоения дисциплины формируются в виде общепрофессиональных и профессиональных компетенций при изучении общетехнических и специальных дисциплин в рамках

освоения программ специалитета по направлению 151001 «Технология машиностроения» и/или магистратуры по направлению 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

2 Структура и содержание дисциплины

Структура и содержание дисциплины для очной формы обучения представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Структура и содержание дисциплины

1	Наименование разделов	Содержание разделов	Трудоемкость разделов, академические часы	Основные результаты изучения разделов
				Знания, умения, владения компетенций
1	2	3	4	5
Первое полугодие второго года обучения				
1	Задачи и объекты моделирования при подготовке и управлении машиностроительным производством.	Общие принципы моделирования. Роль моделирования при исследовании и создании объектов и процессов машиностроения. Модель и ее адекватность объекту моделирования, достоверность результатов моделирования.	32	31 (ОПК-5-II), У1 (ОПК-5-II), В1 (ОПК-5-II), 31 (ОПК-5-III), У1 (ОПК-5-III), В1 (ОПК-5-III), 32 (ПК-1-I), 31 (ПК-2-II), У1 (ПК-2-II), В1 (ПК-2-II), В2 (ПК-2-III)
2	Моделирование дискретных объектов и процессов	Элементы теории графов. Основные определения. Теоретическое определение графа. Отношение порядка и эквивалентности на графе. Разновидности моделей в виде графа в производстве. Типовые задачи, использующие элементы дискретной математики. Моделирование технических систем и взаимосвязи между ними и их элементами. Задачи определения кратчайшего пути на графе (задача о размещении оборудования, минимальной стоимости транспортировки, наибольшей пропускной способности транспортной сети)	40	В1 (ОПК-2-III), 32 (ПК-1-I), 34 (ПК-1-I), У1 (ПК-1-I), У3 (ПК-1-I), 31 (ПК-1-II), У1 (ПК-1-II), У2 (ПК-1-II), 31 (ПК-1-III), У1 (ПК-1-III), 31 (ПК-2-II), У1 (ПК-2-II), В1 (ПК-2-II), В2 (ПК-2-III)
Итого в первом полугодии			72	

Второе полугодие второго года обучения				
1	<p>Моделирование процессов принятия решений</p>	<p>Методы реализации задач принятия решений. Принятие решений в условиях полной определенности. Классификация задач оптимизации. Последовательность действий при принятии оптимальных решений. Многопараметрическая оптимизация. Задачи линейного программирования.</p> <p>Типовые задачи по выбору оптимальных решений: задачи распределения ресурсов, задачи оптимального финансирования, оптимизация параметров изделия, выбор наилучшей структуры объектов проектирования. Оптимизация параметров технологических процессов.</p> <p>Проблемы принятия решений в условиях неполной определенности. Постановка задачи принятия решений. Декомпозиция задачи принятия решений и оценка свойств альтернатив. Организация принятия решений, постановка задач выбора оптимального решения при наличии нескольких критериев оценки. Методы разработки, анализа и корректировки таблиц соответствий. Алгоритмы поиска решений по таблицам соответствий. Область применения моделей в производственных задачах.</p> <p>Задача расчета оптимальных режимов резания методами линейного программирования. Ме-</p>	50	<p>В1 (ОПК-2-III), 31 (ОПК-5-II), У1 (ОПК-5-II), В1 (ОПК-5-II), 31 (ОПК-5-III), У1 (ОПК-5-III), В1 (ОПК-5-III), 32 (ПК-1-I), 34 (ПК-1-I), У1 (ПК-1-I), У3 (ПК-1-I), 31 (ПК-1-II), У1 (ПК-1-II), У2 (ПК-1-II), 31 (ПК-1-III), У1 (ПК-1-III), 31 (ПК-2-II), У1 (ПК-2-II), В1 (ПК-2-II), В2 (ПК-2-III)</p>

		тод динамического программирования. Принцип оптимальности.		
2	Имитационные методы анализа производственных проблем	Понятие имитационного эксперимента. Планирование, проведение и обработка результатов имитационного эксперимента. Регрессионный анализ. Имитационные системы, реализуемые на ЭВМ.	22	В1 (ОПК-2-III), 31 (ОПК-5-II), У1 (ОПК-5-II), В1 (ОПК-5-II), 31 (ОПК-5-III), У1 (ОПК-5-III), В1 (ОПК-5-III), 32 (ПК-1-I), 34 (ПК-1-I), У1 (ПК-1-I), У3 (ПК-1-I), 31 (ПК-1-II), У1 (ПК-1-II), У2 (ПК-1-II), 31 (ПК-1-III), У1 (ПК-1-III), 31 (ПК-2-II), У1 (ПК-2-II), В1 (ПК-2-II), В2 (ПК-2-III)
Итого во втором полугодии			72	
Итого в полугодиях:			144	-
В целом по дисциплине:			144	-

3 Календарный график изучения дисциплины

3.1 График проведения лекционных занятий

В процессе изучения дисциплины учебным планом для аспирантов очной формы обучения предусмотрены лекции объемом 4 академических часа в первом полугодии и втором полугодии второго курса обучения (по 2 часа в каждом полугодии). Лекционные занятия предназначены для теоретического осмысления и обобщения сложных разделов курса, которые освещаются, в основном, на проблемном уровне.

График лекционных занятий представлен в таблице 4.

Таблица 4 - Программа лекций для очной формы обучения

Тематика лекций	Трудоемкость (академические часы)		Ориентация материала лекций на формирование
	Лекции в целом	в том числе с использованием активных методов обучения	Знаний, умений и навыков компетенций
1	2	3	4
Первое полугодие второго года обучения			
Задачи и объекты моделирования при подготовке и управлении машиностроительным производством.	2	Лекция-беседа 2	32 (ПК-1-I), 31 (ПК-1-II), 31 (ПК-2-II)
Итого в первом полугодии	2	2	-
Второе полугодие второго года обучения			
Оптимизация	2	Лекция-беседа 2	34 (ПК-1-I), У1 (ПК-1-I), У3 (ПК-1-I), 31 (ПК-1-III), 31

			(ПК-2-II)
Итого во втором полугодии	2	2	–
Итого в целом по дисциплине	4	4	–

В ходе проведения лекционных занятий могут использоваться такие методы активного обучения, как проблемная лекция, лекция-беседа, лекция-визуализация, дискуссия.

3.2 График проведения практических занятий

В процессе изучения дисциплины учебным планом для аспирантов очной формы обучения практические занятия не предусмотрены.

3.3 Характеристика трудоемкости, структуры и содержания самостоятельной работы аспирантов, график её реализации

Самостоятельная работа является внеаудиторной и предназначена для самостоятельного ознакомления аспирантов с определенными разделами дисциплины по рекомендованным преподавателем материалам и подготовки к выполнению индивидуальных заданий по дисциплине.

Самостоятельная работа аспиранта по изучению дисциплины «Моделирование производственных процессов» включает:

- самостоятельное изучение разделов дисциплины (перечень тем для самостоятельного изучения представлен в приложении А);
- выполнение индивидуального задания (перечень индивидуальных заданий представлен в приложении Б);
- обработка результатов, оформление отчета и подготовка к защите индивидуального задания.

Программа самостоятельной работы аспирантов очной формы обучения представлена в таблице 5.

Таблица 5 – Программа выполнения самостоятельной работы для очной формы обучения (срок обучения 4 года)

	Вид самостоятельной работы	Трудоемкость (академические часы)	В неделю	Планируемые основные результаты самостоятельной работы
			очно	Знаний, умений, владения компетенций выпускников
Первое полугодие второго года обучения				
1	Самостоятельное изучение разделов дисциплины	50	3,57	31 (ОПК-5-II), 31 (ОПК-5-III), 32 (ПК-1-I), 34 (ПК-1-I), 31 (ПК-1-II), 31 (ПК-1-III), 31 (ПК-2-II)
2	Выполнение индивиду-	20	1,42	В1 (ОПК-2-III), У1 (ОПК-5-III),

	ального задания			В1 (ОПК-5-III), У1 (ПК-1-I), В2 (ПК-2-III)
	Итого за полугодие	70	4,99	–
Второе полугодие				
1	Самостоятельное изучение разделов дисциплины	40	2	31 (ОПК-5-II), 31 (ОПК-5-III), 32 (ПК-1-I), 34 (ПК-1-I), 31 (ПК-1-II), 31 (ПК-1-III), 31 (ПК-2-II)
2	Выполнение индивидуального задания	30	1,5	У1 (ОПК-5-II), В1 (ОПК-5-II), У3 (ПК-1-I), У1 (ПК-1-II), У2 (ПК-1-II), У1 (ПК-1-III), У1 (ПК-2-II), В1 (ПК-2-II)
	Итого за полугодие	70	3,5	–
	Итого дисциплине	140	8,49	–

График самостоятельной работы аспирантов очной формы обучения представлен в таблице 6.

Таблица 6 – График выполнения самостоятельной работы аспирантов очной (4 года) формы обучения

Первое полугодие второго года обучения (14 недель)

Виды работ	Число академических часов в неделю														Итого
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Самостоятельное изучение разделов дисциплины	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	4,5	50
Выполнение индивидуального задания	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	20
Итого	5,5	5,5	5,5	5,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	7,5	70

Второе полугодие второго года обучения (20 недель)

Виды работ	Число академических часов в неделю																				Итого
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Самостоятельное изучение разделов дисциплины	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	40
Выполнение индивидуального задания	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	30
Итого	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	70

4 Технология и методическое обеспечение контроля результатов учебной деятельности аспирантов. Фонд оценочных средств

Контроль результатов учебной деятельности аспирантов проходит в трех формах: текущая аттестация, промежуточная аттестация и отложенный контроль знаний, умений и владений.

4.1 Технологии и методическое обеспечение контроля текущей успеваемости аспирантов

Контроль текущей успеваемости аспирантов ведется по результатам усвоения материала лекционных занятий, освоения тем для самостоятельного изучения, а также при защите индивидуальных заданий.

Степень усвоения материала лекционных занятий и тем для самостоятельного изучения определяется по результатам выполнения теста. Каждому аспиранту раз в полугодие выдается тест. Тестовые вопросы приведены в приложении В.

Отчеты по индивидуальным заданиям оформляются и сдаются в печатном (бумажном) виде. Знания аспирантов проверяются преподавателем в форме беседы при защите работ. Каждому аспиранту выдается одно индивидуальное задание в полугодии.

4.2 Технологии и методическое обеспечение контроля промежуточной успеваемости (учебных достижений) аспирантов. Фонд оценочных средств

Промежуточная аттестация аспирантов по дисциплине «Моделирование производственных процессов» осуществляется в форме зачета.

Зачет выставляется аспирантам по результатам следующих работ:

- усвоение материала лекционных занятий, освоение тем для самостоятельного изучения (выполнение теста). Вопросы теста представлены в приложении В;
- выполнение индивидуального задания.

Фонд оценочных средств знаний, умений и владений соответствующих компетенций по дисциплине «Моделирование производственных процессов» для аспирантов очной формы обучения представлен в таблице 7.

Таблица 7 – Фонд оценочных средств знаний, умений и владений соответствующих компетенций по дисциплине «Моделирование производственных процессов»

Оценочное средство	Знание, умение, владение	Оценка результата	Критерии оценивания результата обучения	Процедура оценивания степени сформированности знания/умения/владения соответствующей компетенции с помощью оценочного средства
Первое полугодие второго года обучения				
Тест	31 (ОПК-5-II)	1	Не знает	Менее 50 % правильных ответов на вопросы теста
		2	Фрагментарные представления о методах регистрации и обработки результатов экспериментальных исследований	51-60 % правильных ответов на вопросы теста
		3	Неполные представления о методах регистрации и обработки результатов экспериментальных исследований	61-70 % правильных ответов на вопросы теста
		4	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы представления о методах регистрации и обработки результатов экспериментальных исследований	71-90 % правильных ответов на вопросы теста
		5	Сформированные систематические представления о методах регистрации и обработки результатов экспериментальных исследований	91-100 % правильных ответов на вопросы теста
	31 (ОПК-5-III)	1	Не знает	Менее 50 % правильных ответов на вопросы теста
		2	Фрагментарные представления о критериях адекватности результатов экспериментальных исследований	51-60 % правильных ответов на вопросы теста
		3	Неполные представления о критериях адекватности результатов экспериментальных исследований	61-70 % правильных ответов на вопросы теста
		4	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы представления о критериях адекватности результатов экспериментальных исследований	71-90 % правильных ответов на вопросы теста
		5	Сформированные систематические представления о критериях адекватности результатов экспериментальных исследований	91-100 % правильных ответов на вопросы теста
	32 (ПК-1-I)	1	Отсутствие знаний	Менее 50 % правильных ответов на вопросы теста

		2	Фрагментарные знания теоретических основ, методов моделирования и экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и химических эффектов	51-60 % правильных ответов на вопросы теста
		3	Неполные знания теоретических основ, методов моделирования и экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и химических эффектов	61-70 % правильных ответов на вопросы теста
		4	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания теоретических основ, методов моделирования и экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и химических эффектов	71-90 % правильных ответов на вопросы теста
		5	Сформированные и систематические знания теоретических основ, методов моделирования и экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и химических эффектов	91-100 % правильных ответов на вопросы теста
	34 (ПК-1-1)	1	Отсутствие знаний	Менее 50 % правильных ответов на вопросы теста
		2	Фрагментарные знания методов оптимизации параметров процесса в целях повышения производительности, качества и экономичности обработки, а также снижения энергопотребления	51-60 % правильных ответов на вопросы теста
		3	Неполные знания методов оптимизации параметров процесса в целях повышения производительности, качества и экономичности обработки, а также снижения энергопотребления	61-70 % правильных ответов на вопросы теста
		4	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы, знания методов оптимизации параметров процесса в целях повышения производительности, качества и экономичности обработки, а также снижения энергопотребления	71-90 % правильных ответов на вопросы теста
		5	Сформированные и систематические знания методов оптимизации	91-100 % правильных ответов

			параметров процесса в целях повышения производительности, качества и экономичности обработки, а также снижения энергопотребления	на вопросы теста
31 (ПК-1-II)	1		Отсутствие знаний	Менее 50 % правильных ответов на вопросы теста
	2		Фрагментарные знания особенностей применения процессов механической и физико-технической обработки в автоматизированном производстве, в т.ч.: управление; моделирование и оптимизацию параметров процессов, оборудования и инструментов; теории надежности;	51-60 % правильных ответов на вопросы теста
	3		Неполные знания особенностей применения процессов механической и физико-технической обработки в автоматизированном производстве, в т.ч.: управление; моделирование и оптимизацию параметров процессов, оборудования и инструментов; теории надежности;	61-70 % правильных ответов на вопросы теста
	4		Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания особенностей применения процессов механической и физико-технической обработки в автоматизированном производстве, в т.ч.: управление; моделирование и оптимизацию параметров процессов, оборудования и инструментов; теории надежности;	71-90 % правильных ответов на вопросы теста
	5		Сформированные и систематические знания особенностей применения процессов механической и физико-технической обработки в автоматизированном производстве, в т.ч.: управление; моделирование и оптимизацию параметров процессов, оборудования и инструментов; теории надежности;	91-100 % правильных ответов на вопросы теста
31 (ПК-1-III)	1		Отсутствие знаний	Менее 50 % правильных ответов на вопросы теста
	2		Фрагментарные знания методологии проектирования, расчета и оптимизации параметров режущих инструментов, инструментальных систем и оснастки, обеспечивающих технически, экономически и энергетически эффективные процессы механической и физико-технической обработки	51-60 % правильных ответов на вопросы теста

		3	Неполные знания методологии проектирования, расчета и оптимизации параметров режущих инструментов, инструментальных систем и оснастки, обеспечивающих технически, экономически и энергетически эффективные процессы механической и физико-технической обработки	61-70 % правильных ответов на вопросы теста
		4	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания методологии проектирования, расчета и оптимизации параметров режущих инструментов, инструментальных систем и оснастки, обеспечивающих технически, экономически и энергетически эффективные процессы механической и физико-технической обработки	71-90 % правильных ответов на вопросы теста
		5	Сформированные и систематические знания методологии проектирования, расчета и оптимизации параметров режущих инструментов, инструментальных систем и оснастки, обеспечивающих технически, экономически и энергетически эффективные процессы механической и физико-технической обработки	91-100 % правильных ответов на вопросы теста
	31 (ПК-2-II)	1	Отсутствие знаний	Менее 50 % правильных ответов на вопросы теста
		2	Фрагментарные знания методов анализа, планирования и управления различными технологическими процессами обработки материалов резанием	51-60 % правильных ответов на вопросы теста
		3	Неполные знания методов анализа, планирования и управления различными технологическими процессами обработки материалов резанием	61-70 % правильных ответов на вопросы теста
		4	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания методов анализа, планирования и управления различными технологическими процессами обработки материалов резанием	71-90 % правильных ответов на вопросы теста
		5	Сформированные и систематические знания методов анализа, планирования и управления различными технологическими процессами обработки материалов резанием	91-100 % правильных ответов на вопросы теста
Индивидуальное задание	В1 (ОПК-2-III)	1	Отсутствие навыков	Задание не выполнено
		2	Фрагментарное применение навыков анализа и синтеза нетиповых задач при проектировании, изготовлении и эксплуатации новой техники	Задание выполнено менее, чем на 50%

		3	В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа и синтеза нетиповых задач при проектировании, изготовлении и эксплуатации новой техники	Задание выполнено не более чем на 80 %
		4	В целом успешное, но сопровождающееся отдельными ошибками применение навыков анализа и синтеза нетиповых задач при проектировании, изготовлении и эксплуатации новой техники	Задание выполнено на 80 %
		5	Успешное и систематическое применение навыков анализа и синтеза нетиповых задач при проектировании, изготовлении и эксплуатации новой техники	Задание выполнено в полном объеме
	У1 (ОПК-5-III)	1	Не умеет	Задание не выполнено
		2	Частично освоенное умение по оценке получаемые результаты с применением математического аппарата	Задание выполнено менее, чем на 50%
		3	В целом успешное, но не систематическое умение по оценке получаемые результаты с применением математического аппарата	Задание выполнено не более чем на 80 %
		4	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение по оценке получаемые результаты с применением математического аппарата	Задание выполнено на 80 %
		5	Успешное и систематическое умение по оценке получаемые результаты с применением математического аппарата	Задание выполнено в полном объеме
	В1 (ОПК-5-III)	1	Не имеет навыков	Задание не выполнено
		2	Фрагментарное применение навыков оценки получаемых результатов с применением математического аппарата	Задание выполнено менее, чем на 50%
		3	В целом успешное, но не систематическое применение навыков оценки получаемых результатов с применением математического аппарата	Задание выполнено не более чем на 80 %
		4	В целом успешное применение навыков оценки получаемых результатов с применением математического аппарата	Задание выполнено на 80 %
		5	Успешное и систематическое применение навыков оценки получаемых результатов с применением математического аппарата	Задание выполнено в полном объеме
	У1 (ПК-1-I)	1	Отсутствие умений	Задание не выполнено
		2	Частично освоенное умение моделировать процессы механической и физико-технической обработки, технологического оборудования и	Задание выполнено менее, чем на 50%

			режущих инструментов при формообразовании поверхностей деталей машин	
		3	В целом успешное, но не систематическое умение моделировать процессы механической и физико-технической обработки, технологического оборудования и режущих инструментов при формообразовании поверхностей деталей машин	Задание выполнено не более чем на 80 %
		4	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение моделировать процессы механической и физико-технической обработки, технологического оборудования и режущих инструментов при формообразовании поверхностей деталей машин	Задание выполнено на 80 %
		5	Успешное и систематическое умение моделировать процессы механической и физико-технической обработки, технологического оборудования и режущих инструментов при формообразовании поверхностей деталей машин	Задание выполнено в полном объеме
	В2 (ПК-2-III)	1	Отсутствие навыков владения	Задание не выполнено
		2	Фрагментарное применение навыков владения методологией проектирования, расчета и оптимизации параметров режущих инструментов, инструментальных систем и оснастки, обеспечивающих технически, экономически и энергетически эффективные процессы механической и физико-технической обработки	Задание выполнено менее, чем на 50%
		3	В целом успешное, но не систематическое применение навыков владения методологией проектирования, расчета и оптимизации параметров режущих инструментов, инструментальных систем и оснастки, обеспечивающих технически, экономически и энергетически эффективные процессы механической и физико-технической обработки	Задание выполнено не более чем на 80 %
		4	В целом успешное, но сопровождающееся отдельными ошибками применение навыков владения методологией проектирования, расчета и оптимизации параметров режущих инструментов, инструментальных систем и оснастки, обеспечивающих технически, экономически и энергетически эффективные процессы механической и физико-технической обработки	Задание выполнено на 80 %
		5	Успешное и систематическое применение навыков владения мето-	Задание выполнено в полном

			дологией проектирования, расчета и оптимизации параметров ре- жущих инструментов, инструментальных систем и оснастки, обес- печивающих технически, экономически и энергетически эффектив- ные процессы механической и физико-технической обработки	объеме
Итоговая оценка за полугодие формируется по формуле: $0,5 \cdot \text{оценка за тест} + 0,5 \cdot \text{оценка за индивидуальное задание}$. Для получения зачета, необходимо получить оценку не менее 3.				
Второе полугодие второго года обучения				
Тест	31 (ОПК-5-II)	1	Не знает	Менее 50 % правильных ответов на вопросы теста
		2	Фрагментарные представления о методах регистрации и обработки ре- зультатов экспериментальных исследований	51-60 % правильных ответов на вопросы теста
		3	Неполные представления о методах регистрации и обработки результа- тов экспериментальных исследований	61-70 % правильных ответов на вопросы теста
		4	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы представления о методах регистрации и обработки результатов экспериментальных ис- следований	71-90 % правильных ответов на вопросы теста
		5	Сформированные систематические представления о методах регистра- ции и обработки результатов экспериментальных исследований	91-100 % правильных ответов на вопросы теста
	31 (ОПК-5-III)	1	Не знает	Менее 50 % правильных ответов на вопросы теста
		2	Фрагментарные представления о критериях адекватности результатов экспериментальных исследований	51-60 % правильных ответов на вопросы теста
		3	Неполные представления о критериях адекватности результатов экспе- риментальных исследований	61-70 % правильных ответов на вопросы теста
		4	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы представления о критериях адекватности результатов экспериментальных исследований	71-90 % правильных ответов на вопросы теста
		5	Сформированные систематические представления о критериях адекват- ности результатов экспериментальных исследований	91-100 % правильных ответов на вопросы теста
	32 (ПК-1-I)	1	Отсутствие знаний	Менее 50 % правильных ответов на вопросы теста
		2	Фрагментарные знания теоретических основ, методов моделирования и экспериментального исследования процессов механической и физико-	51-60 % правильных ответов на вопросы теста

			технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и химических эффектов	
		3	Неполные знания теоретических основ, методов моделирования и экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и химических эффектов	61-70 % правильных ответов на вопросы теста
		4	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания теоретических основ, методов моделирования и экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и химических эффектов	71-90 % правильных ответов на вопросы теста
		5	Сформированные и систематические знания теоретических основ, методов моделирования и экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и химических эффектов	91-100 % правильных ответов на вопросы теста
	34 (ПК-1-I)	1	Отсутствие знаний	Менее 50 % правильных ответов на вопросы теста
		2	Фрагментарные знания методов оптимизации параметров процесса в целях повышения производительности, качества и экономичности обработки, а также снижения энергопотребления	51-60 % правильных ответов на вопросы теста
		3	Неполные знания методов оптимизации параметров процесса в целях повышения производительности, качества и экономичности обработки, а также снижения энергопотребления	61-70 % правильных ответов на вопросы теста
		4	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы, знания методов оптимизации параметров процесса в целях повышения производительности, качества и экономичности обработки, а также снижения энергопотребления	71-90 % правильных ответов на вопросы теста
		5	Сформированные и систематические знания методов оптимизации параметров процесса в целях повышения производительности, качества и экономичности обработки, а также снижения энергопотребления	91-100 % правильных ответов на вопросы теста
	31 (ПК-1-II)	1	Отсутствие знаний	Менее 50 % правильных ответов на вопросы теста

		2	Фрагментарные знания особенностей применения процессов механической и физико-технической обработки в автоматизированном производстве, в т.ч.: управление; моделирование и оптимизацию параметров процессов, оборудования и инструментов; теории надежности;	51-60 % правильных ответов на вопросы теста
		3	Неполные знания особенностей применения процессов механической и физико-технической обработки в автоматизированном производстве, в т.ч.: управление; моделирование и оптимизацию параметров процессов, оборудования и инструментов; теории надежности;	61-70 % правильных ответов на вопросы теста
		4	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания особенностей применения процессов механической и физико-технической обработки в автоматизированном производстве, в т.ч.: управление; моделирование и оптимизацию параметров процессов, оборудования и инструментов; теории надежности;	71-90 % правильных ответов на вопросы теста
		5	Сформированные и систематические знания особенностей применения процессов механической и физико-технической обработки в автоматизированном производстве, в т.ч.: управление; моделирование и оптимизацию параметров процессов, оборудования и инструментов; теории надежности;	91-100 % правильных ответов на вопросы теста
		31 (ПК-1-III)	1	Отсутствие знаний
		2	Фрагментарные знания методологии проектирования, расчета и оптимизации параметров режущих инструментов, инструментальных систем и оснастки, обеспечивающих технически, экономически и энергетически эффективные процессы механической и физико-технической обработки	51-60 % правильных ответов на вопросы теста
		3	Неполные знания методологии проектирования, расчета и оптимизации параметров режущих инструментов, инструментальных систем и оснастки, обеспечивающих технически, экономически и энергетически эффективные процессы механической и физико-технической обработки	61-70 % правильных ответов на вопросы теста
		4	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания методологии проектирования, расчета и оптимизации параметров режущих инструментов, инструментальных систем и оснастки, обеспечивающих технически, экономически и энергетически эффективные процессы механической и физико-технической обработки	71-90 % правильных ответов на вопросы теста

	31 (ПК-2-II)	5	Сформированные и систематические знания методологии проектирования, расчета и оптимизации параметров режущих инструментов, инструментальных систем и оснастки, обеспечивающих технически, экономически и энергетически эффективные процессы механической и физико-технической обработки	91-100 % правильных ответов на вопросы теста
		1	Отсутствие знаний	Менее 50 % правильных ответов на вопросы теста
		2	Фрагментарные знания методов анализа, планирования и управления различными технологическими процессами обработки материалов резанием	51-60 % правильных ответов на вопросы теста
		3	Неполные знания методов анализа, планирования и управления различными технологическими процессами обработки материалов резанием	61-70 % правильных ответов на вопросы теста
		4	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания методов анализа, планирования и управления различными технологическими процессами обработки материалов резанием	71-90 % правильных ответов на вопросы теста
		5	Сформированные и систематические знания методов анализа, планирования и управления различными технологическими процессами обработки материалов резанием	91-100 % правильных ответов на вопросы теста
Индивидуальное задание	У1 (ОПК-5-II)	1	Не умеет	Задание не выполнено
		2	Частично освоенное умение по проведению экспериментальных исследований, с последующей обработкой результатов	Задание выполнено менее, чем на 50%
		3	В целом успешное, но не систематическое умение по проведению экспериментальных исследований, с последующей обработкой результатов	Задание выполнено не более чем на 80 %
		4	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение по проведению экспериментальных исследований, с последующей обработкой результатов	Задание выполнено на 80 %
		5	Успешное и систематическое умение по проведению экспериментальных исследований, с последующей обработкой результатов	Задание выполнено в полном объеме
	В1 (ОПК-5-II)	1	Не имеет навыков	Задание не выполнено
		2	Фрагментарное применение навыков проведения экспериментальных исследований и обработки результатов	Задание выполнено менее, чем на 50%

		3	В целом успешное, но не систематическое применение навыков проведения экспериментальных исследований и обработки результатов	Задание выполнено не более чем на 80 %
		4	В целом успешное применение навыков проведения экспериментальных исследований и обработки результатов	Задание выполнено на 80 %
		5	Успешное и систематическое применение навыков проведения экспериментальных исследований и обработки результатов	Задание выполнено в полном объеме
	У3 (ПК-1-I)	1	Отсутствие умений	Задание не выполнено
		2	Частично освоенное умение разрабатывать конструкцию, выполнять расчеты и оптимизацию параметров инструмента и технологической оснастки, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы механической и физико-технической обработки	Задание выполнено менее, чем на 50%
		3	В целом успешное, но не систематическое умение разрабатывать конструкцию, выполнять расчеты и оптимизацию параметров инструмента и технологической оснастки, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы механической и физико-технической обработки	Задание выполнено не более чем на 80 %
		4	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение разрабатывать конструкцию, выполнять расчеты и оптимизацию параметров инструмента и технологической оснастки, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы механической и физико-технической обработки	Задание выполнено на 80 %
		5	Успешное и систематическое умение разрабатывать конструкцию, выполнять расчеты и оптимизацию параметров инструмента и технологической оснастки, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы механической и физико-технической обработки	Задание выполнено в полном объеме
	У1 (ПК-1-II)	1	Отсутствие умений	Задание не выполнено
		2	Частично освоенное умение оптимизировать параметры процесса в целях повышения производительности, качества и экономичности обработки, а также снижения энергопотребления	Задание выполнено менее, чем на 50%
		3	В целом успешное, но не систематическое умение оптимизировать параметры процесса в целях повышения производительности, качества и экономичности обработки, а также снижения энергопотребления	Задание выполнено не более чем на 80 %
		4	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение оптими-	Задание выполнено на 80 %

			зировать параметры процесса в целях повышения производительности, качества и экономичности обработки, а также снижения энергопотребления	
		5	Успешное и систематическое умение оптимизировать параметры процесса в целях повышения производительности, качества и экономичности обработки, а также снижения энергопотребления	Задание выполнено в полном объеме
	У2 (ПК-1-II)	1	Отсутствие умений	Задание не выполнено
		2	Частично освоенное умение прогнозировать и создавать технологические процессы механической и физико-технической обработки, оборудование и инструменты, основанные на новых физических эффектах	Задание выполнено менее, чем на 50%
		3	В целом успешное, но не систематическое умение прогнозировать и создавать технологические процессы механической и физико-технической обработки, оборудование и инструменты, основанные на новых физических эффектах	Задание выполнено не более чем на 80 %
		4	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение прогнозировать и создавать технологические процессы механической и физико-технической обработки, оборудование и инструменты, основанные на новых физических эффектах	Задание выполнено на 80 %
		5	Успешное и систематическое умение прогнозировать и создавать технологические процессы механической и физико-технической обработки, оборудование и инструменты, основанные на новых физических эффектах	Задание выполнено в полном объеме
	У1 (ПК-1-III)	1	Отсутствие умений	Задание не выполнено
		2	Частично освоенное умение проектировать металлорежущие станки, станочные системы, автоматические линии и оборудование для физико-технической обработки, выполнять расчеты и оптимизировать их компоновки, состав оборудования, и параметры станочного оборудования	Задание выполнено менее, чем на 50%
		3	В целом успешное, но не систематическое умение проектировать металлорежущие станки, станочные системы, автоматические линии и оборудование для физико-технической обработки, выполнять расчеты и оптимизировать их компоновки, состав оборудования, и параметры станочного оборудования	Задание выполнено не более чем на 80 %

		4	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение проектировать металлорежущие станки, станочные системы, автоматические линии и оборудование для физико-технической обработки, выполнять расчеты и оптимизировать их компоновки, состав оборудования, и параметры станочного оборудования	Задание выполнено на 80 %
		5	Успешное и систематическое умение проектировать металлорежущие станки, станочные системы, автоматические линии и оборудование для физико-технической обработки, выполнять расчеты и оптимизировать их компоновки, состав оборудования, и параметры станочного оборудования	Задание выполнено в полном объеме
	У1 (ПК-2-II)	1	Отсутствие умений	Задание не выполнено
		2	Частично освоенное умение решать проблемы рациональной эксплуатации технологического оборудования, режущего инструмента и оснастки	Задание выполнено менее, чем на 50%
		3	В целом успешное, но не систематическое умение решать проблемы рациональной эксплуатации технологического оборудования, режущего инструмента и оснастки	Задание выполнено не более чем на 80 %
		4	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение решать проблемы рациональной эксплуатации технологического оборудования, режущего инструмента и оснастки	Задание выполнено на 80 %
		5	Успешное и систематическое умение решать проблемы рациональной эксплуатации технологического оборудования, режущего инструмента и оснастки	Задание выполнено в полном объеме
	В1 (ПК-2-II)	1	Отсутствие навыков	Задание не выполнено
		2	Фрагментарное применение навыков владения методами анализа, планирования и управления различными технологическими процессами обработки материалов резанием	Задание выполнено менее, чем на 50%
		3	В целом успешное, но не систематическое применение навыков владения методами анализа, планирования и управления различными технологическими процессами обработки материалов резанием	Задание выполнено не более чем на 80 %
		4	В целом успешное, но сопровождающееся отдельными ошибками применение навыков владения методами анализа, планирования и управления различными технологическими процессами обработки материалов	Задание выполнено на 80 %

		резанием	
	5	Успешное и систематическое применение навыков владения методами анализа, планирования и управления различными технологическими процессами обработки материалов резанием	Задание выполнено в полном объеме
Итоговая оценка за полугодие формируется по формуле: $0,5 \cdot \text{оценка за тест} + 0,5 \cdot \text{оценка за индивидуальное задание}$. Для получения зачета, необходимо получить оценку не менее 3.			

4.3 Технологии, методическое обеспечение и условия отложенного контроля знаний, умений, навыков обучающихся, сформированных в результате изучения дисциплины

Отложенный контроль знаний аспирантов по дисциплине «Моделирование производственных процессов» проводится в процессе сдачи кандидатского экзамена по специальности, государственного экзамена и публичной защиты научного доклада.

5 Ресурсное обеспечение курса

5.1 Список основной учебной, учебно-методической, нормативной и другой литературы и документации

1. Советов, Б.Я. Моделирование систем / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев, 3-е издание. Москва, Высшая школа, 2013. – 343 с.
2. Теория резания: математическое моделирование и системный анализ: Монография / С. Г. Емельянов, С. В. Швец, А. И. Ремнев и др. - Старый Оскол: Изд-во ТНТ, 2014. - 311с
3. Маликов, Р.Ф. Основы математического моделирования: учебное пособие для вузов / Р. Ф. Маликов. - М.: Горячая линия - Телеком, 2010. – 366 с.
4. Кобелев, Н. Б. Введение в общую теорию имитационного моделирования. Пособие для разработчиков имитационных моделей и их пользователей [Электронный ресурс] / Н. Б. Кобелев. - М. : Принт–Сервис, 2007. - 126 с. - Режим доступа: <http://www.znanium.com>.
5. Кобелев, Н. Б. Имитационное моделирование [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н. Б. Кобелев, В. А. Половников, В. В. Девятков; под общ. Ред. Н. Б. Кобелева. - М. : КУРС : НИЦ Инфра-М, 2013. - 368 с. – Режим доступа: <http://www.znanium.com>.

5.2 Список дополнительной учебной, учебно-методической, нормативной и другой литературы и документации

7. Зарубин, В.С. Математическое моделирование в технике: учебник для вузов / В. С. Зарубин. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2010. - 495 с.
8. Сухарев, Э.А. Методы моделирования и оптимизации механических систем машин и оборудования: Учебное пособие / Э. А. Сухарев. - Ровно: Изд-во Нац.ун-та водного хоз-ва и природопользования, 2008. – 194 с.
9. Физулаков, Р.А. Применение статистического моделирования для решения экстремальных задач технологии обработки материалов: Учебное пособие / Р. А. Физулаков. - Комсомольск-на-Амуре: Изд-во Комсомольского-на-Амуре гос.техн.ун-та, 2007. – 102 с.
10. Моделирование систем: учебник для вузов / С. И. Дворецкий, Ю. Л. Муромцев, В. А. Погонин, А. Г. Схиртладзе. - М.: Академия, 2009. - 316 с.

11. Феклистов, С.И. Конечно-элементное моделирование технологических процессов в машиностроении: Монография / С. И. Феклистов, П. В. Бахматов, В. И. Муравьев. - Владивосток: Дальнаука, 2011
12. Берлинер, Э. М. САПР конструктора машиностроителя [Электронный ресурс] / Э. М. Берлинер, О. В. Таратынов - М. : Форум, НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 288 с. – Режим доступа: <http://www.znanium.com>.
13. Прошин, Д. И. Комплекс программ компьютерно-имитационного моделирования технологических процессов машиностроения и теплоэнергетики [Электронный ресурс] / Д. И. Прошин, Р. Д. Прошина, Е. А. Данишкина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. - 2013. - № 12 (16). - с. 72-77. – Режим доступа : <http://elibrary.ru>.
14. Зибров, П. Ф. Проблема математического моделирования точности в технологии машиностроения [Электронный ресурс] / П. Ф. Зибров // Вектор науки Тольяттинского гос. ун-та. - 2012. - № 1. - С. 57-61. – Режим доступа : <http://elibrary.ru>.
15. Болотеин, А. Н. Применение компьютерного моделирования при назначении технологических условий обработки высокоточных деталей [Электронный ресурс] / А. Н. Болотеин // Вестник Рыбинской гос. авиац. технологической акад. им. П. А. Соловьева. - 2013. - № 3 (26). - С. 104-108. – Режим доступа : <http://elibrary.ru>

Периодические издания

1. Журнал «Науковедение».
2. Журнал «Металлообработка и станкостроение».
3. Журнал «Вестник машиностроения».
4. Журнал «СТИН».
5. Журнал «Технология машиностроения».

5.3 Перечень программных продуктов, используемых при изучении дисциплины

В процессе изучения дисциплины «Моделирование производственных процессов» аспиранты используют следующие программные продукты:

Для оформления индивидуального задания:

1. Программные пакеты «Microsoft Office Excel», «Microsoft Office Word», «MathCAD».

5.4 Перечень электронных библиотечных систем, используемых при изучении дисциплины

1 Электронно-библиотечная система ZNANIUM.COM - <http://www.znanium.com/>.

2 Электронные информационные ресурсы издательства Springer Springer Journals <https://link.springer.com>.

3 Политематическая реферативно-библиографическая и наукометрическая база данных Web of Science (<http://apps.webofknowledge.com>).

4 База данных международных индексов научного цитирования Scopus.

5 Информационно-справочная система «Консультант плюс».

6 Информационно-справочная система «Техэксперт».

5.5 Другие информационные и материально-технические ресурсы

Материально-техническое обеспечение дисциплины – комплекс компьютерной техники и коммуникационных средств вычислительного центра ИКП МГО.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)

Перечень вопросов для самостоятельного изучения
Первое полугодие второго года обучения

1. Общие принципы моделирования
2. Роль моделирования при исследовании и создании объектов и процессов машиностроения
3. Модель и ее адекватность объекту моделирования
4. Достоверность результатов моделирования
5. Элементы теории графов
6. Теоретико-множественное определение графа
7. Отношение порядка и эквивалентности на графе
8. Разновидности моделей в виде графа на производстве
9. Типовые задачи, использующие элементы дискретной математики
10. Моделирование технических систем и взаимосвязи между ними и их элементами
11. Задачи определения кратчайшего пути на графе
12. Методы реализации задач принятия решений
13. Принятие решений в условиях полной определенности
14. Классификация задач оптимизации
15. Последовательность действий при принятии оптимальных решений
16. Многопараметрическая оптимизация
17. Задачи линейного программирования

Второе полугодие второго года обучения

18. Типовые задачи по выбору оптимальных решений: задачи распределения ресурсов, задачи оптимального финансирования, оптимизация параметров изделия, выбор наилучшей структуры объектов проектирования
19. Оптимизация параметров технологических процессов
20. Проблемы принятия решений в условиях неполной определенности.
21. Постановка задачи принятия решений.
22. Декомпозиция задачи принятия решений и оценка свойств альтернатив.
23. Организация принятия решений, постановка задач выбора оптимального решения при наличии нескольких критериев оценки.
24. Методы разработки, анализа и корректировки таблиц соответствий.
25. Алгоритмы поиска решений по таблицам соответствий.
26. Область применения оптимизационных моделей в производственных задачах
27. Задача расчета оптимальных режимов резания методами линейного программирования.
28. Метод динамического программирования.
29. Принцип оптимальности
30. Понятие имитационного эксперимента.

31. Планирование, проведение и обработка результатов имитационного эксперимента.

32. Регрессионный анализ.

33. Имитационные системы, реализуемые на ЭВМ

ПРИЛОЖЕНИЕ Б (рекомендуемое)

Перечень индивидуальных заданий

Индивидуальное задание состоит из разделов:

1. Разработка физической модели процесса резания.
2. Разработка математической модели процесса резания.
3. Проведение численного эксперимента (расчётов).
4. Выполнение геометрической модели режущего инструмента (2D и 3D-проекции).
5. Оптимизация процесса резания (результаты оптимизации и 3D-чертеж режущего инструмента).

В первом полугодии второго года обучения аспирант выполняет п. 1-3, а во втором полугодии второго года обучения п. 4-5.

Индивидуальное задание оформляется в соответствии с требованиями РД ФГБОУ ВО КнАГТУ 013 «Текстовые студенческие работы. Правила оформления».

Номер варианта выбираете в зависимости от суммы последней цифры года поступления и порядкового номера аспиранта в приказе на зачисление. Например, вы поступаете в 2015 году и вы второй в приказе на зачисление, значит ваш вариант $5 + 2 = 7$. Если сумма получается больше 10, то необходимо просуммировать цифры суммы. Это действие повторить пока сумма не окажется меньше и равной 10.

Варианты заданий.

Вариант 1.

Обрабатываемый инструмент – токарный проходной отогнутый резец с пластиной из быстрорежущей стали (рисунок Б.1) и имеет характеристики:

- $H = 16$ мм;
- $B = 10$ мм;
- $L = 100$ мм;
- $m = 6$ мм;
- $a = 10$ мм;
- $r = 0,5$ мм.

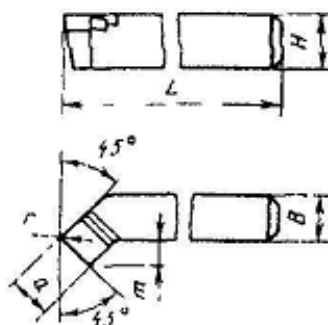


Рисунок Б.1

Вариант 2.

Обрабатываемый инструмент – токарный проходной отогнутый резец с пластиной из твердого сплава (рисунок Б.2) и имеет характеристики:

- $H = 40$ мм;
- $B = 25$ мм;
- $L = 200$ мм;
- $m = 12$ мм;
- $a = 25$ мм;
- $r = 2$ мм.

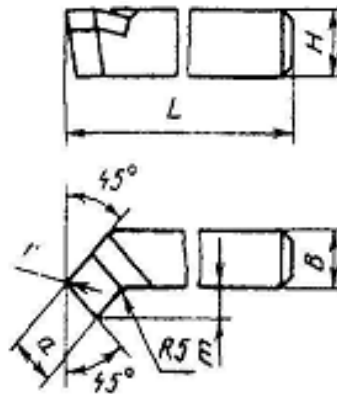


Рисунок Б.2

Вариант 3.

Обрабатываемый инструмент – расточной державочный резец с углом в плане $\varphi = 60^\circ$ из быстрорежущей стали (рисунок Б.3) и имеет характеристики:

- $H \times B = 10$ мм;
- $L = 40$ мм;
- $n = 4$ мм.

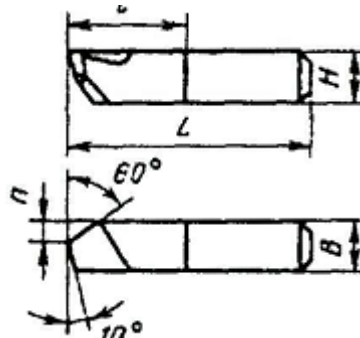


Рисунок Б.3

Вариант 4.

Обрабатываемый инструмент – полукруглая выпуклая фреза (рисунок Б.4) и имеет характеристики:

- $R = 3$ мм;
- $D(h15) = 63$ мм;
- $B(h14) = 6$ мм;
- $d(h7) = 22$ мм;
- число зубьев – 12.

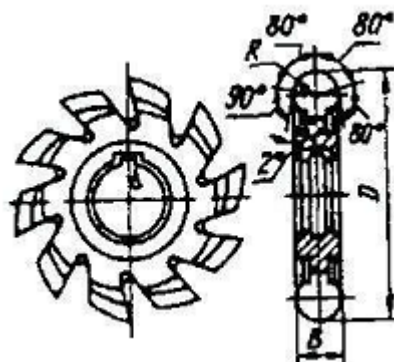


Рисунок Б.4

Вариант 5.

Обрабатывающий инструмент – полукруглая выпуклая фреза (рисунок Б.5) и имеет характеристики:

- $R = 14$ мм;
- $D(h15) = 125$ мм;
- $B(h14) = 28$ мм;
- $d(h7) = 32$ мм;
- число зубьев – 10.

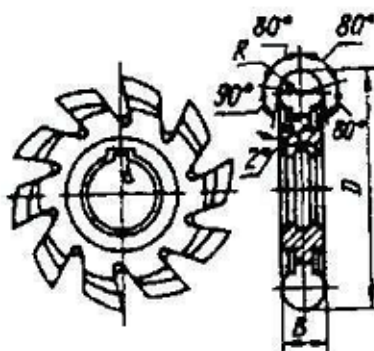


Рисунок Б.5

Вариант 6.

Обрабатывающий инструмент – токарный проходной отогнутый резец с пластиной из быстрорежущей стали (рисунок Б.6) и имеет характеристики:

- $H = 32$ мм;
- $B = 20$ мм;
- $L = 170$ мм;
- $m = 10$ мм;
- $a = 18$ мм;
- $r = 1,5$ мм.

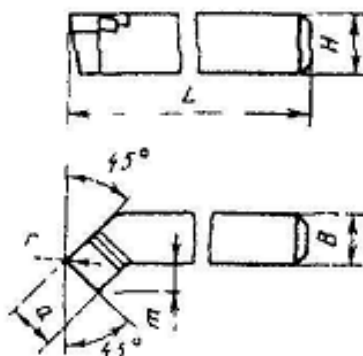


Рисунок Б.6

Вариант 7.

Обрабатывающий инструмент – токарный проходной отогнутый резец с пластиной из твердого сплава (рисунок Б.7) и имеет характеристики:

- $H = 25$ мм;
- $B = 16$ мм;
- $L = 140$ мм;
- $m = 8$ мм;
- $a = 14$ мм;
- $r = 1$ мм.

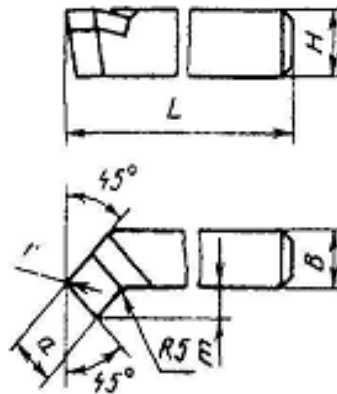


Рисунок Б.7

Вариант 8.

Обрабатывающий инструмент – расточной державочный резец с углом в плане $\varphi = 60^\circ$ из быстрорежущей стали (рисунок Б.8) и имеет характеристики:

- $H \times B = 6$ мм;
- $L = 25$ мм;
- $n = 2$ мм.

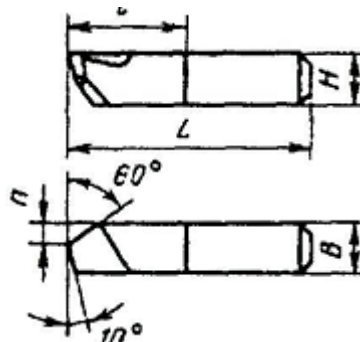


Рисунок Б.8

Вариант 9.

Обрабатывающий инструмент – круг шлифовальный чашечный конический (рисунок Б.9) и имеет характеристики:

- $D = 150$ мм;
- $T = 100$ мм;
- $H = 50$ мм.

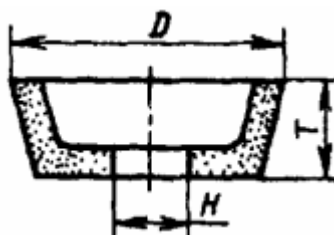


Рисунок Б.9

Вариант 10.

Обрабатываемый инструмент – круг шлифовальный тарельчатый (рисунок Б.10) и имеет характеристики:

- $D = 80$ мм;
- $T = 25$ мм;
- $H = 25$ мм.

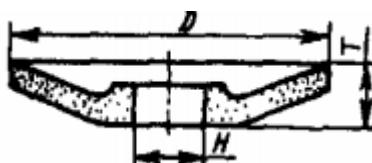


Рисунок Б.10

Методические указания к выполнению индивидуального задания.

Б1 Математические модели силовых и тепловых процессов при резании материалов

Б1.1 Точение

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. Б.11, а). 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_n и нормальная сила N . Эти силы определяют силу стружкообразования R (рис. Б.12). 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 АВ, то угол между силами R_z и R_c равен углу наклона условной плоскости сдвига β_1 .

На заднюю поверхность инструмента действуют сила трения F_1 и нормальная сила N_1 (рис. Б.13).

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*.

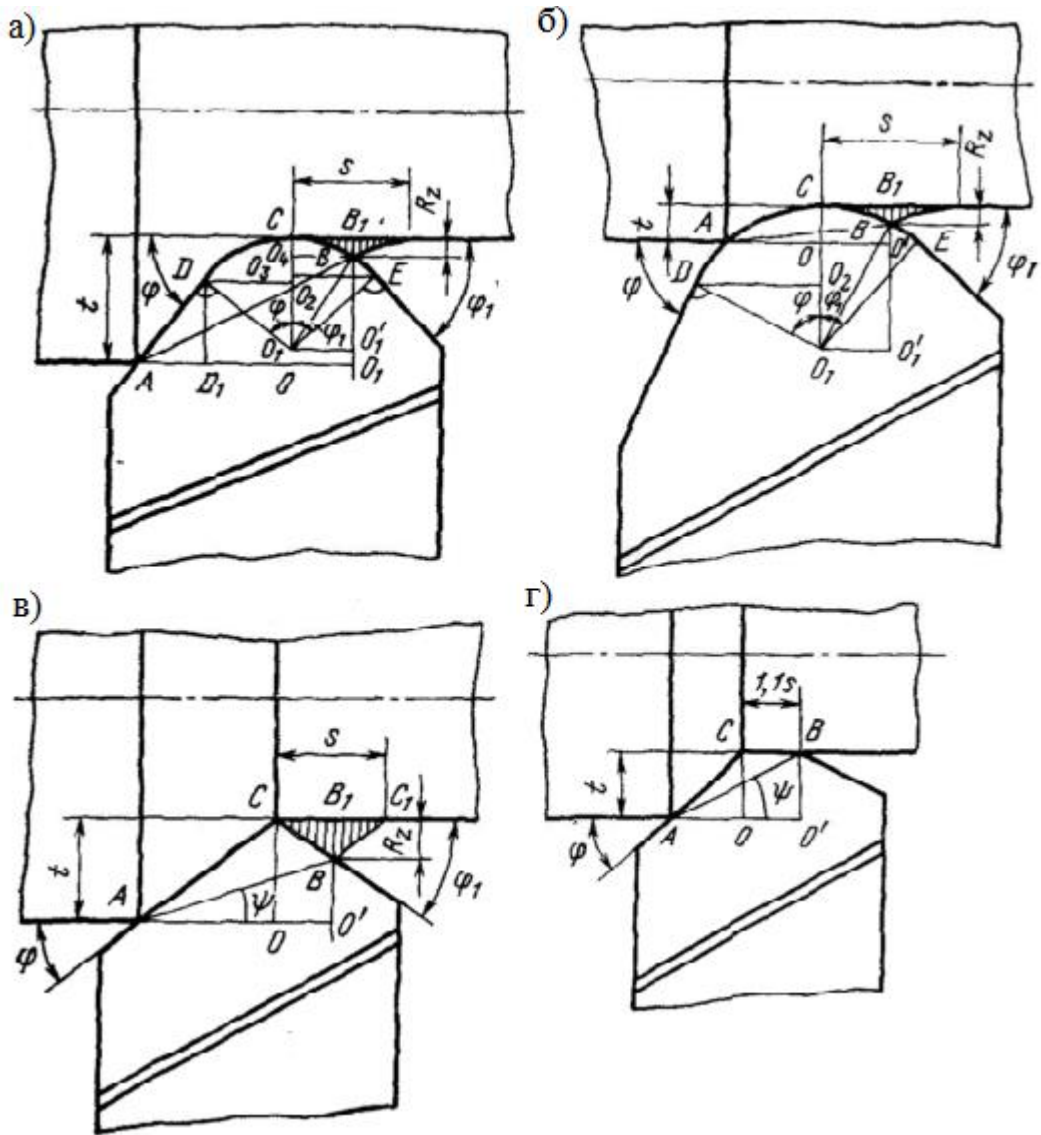


Рисунок Б.11 – Расчетная схема процесса резания
 а – снятие припуска радиусной и прямолинейной частями главной режущей кромки; б – снятие припуска радиусной частью главной режущей кромки; в – работа проходным резцом; г – работа проходным резцом с режущей кромкой, параллельной оси детали (резцы Колесова для работы с большими подачами)

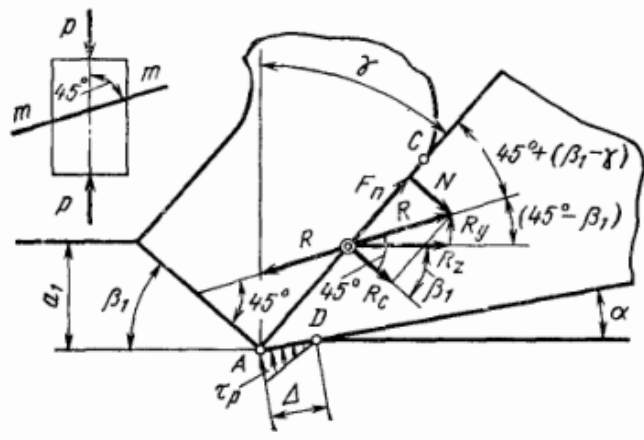


Рисунок Б.12 - Схема действия сил на передней поверхности инструмента

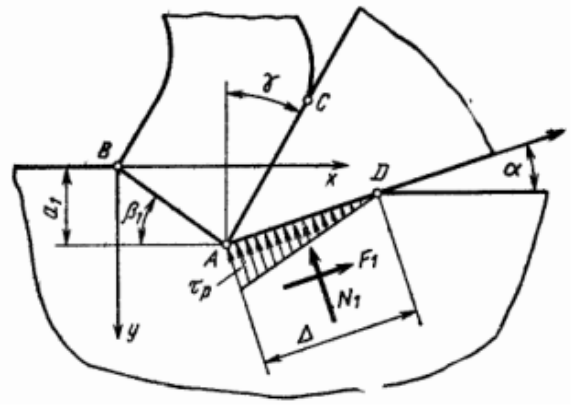


Рисунок Б.13 - Схема действия сил на задней поверхности инструмента

Процесс образования стружек скалывания происходит в описанной последовательности (рис. Б.14).

Под действием силы P резец внедряется в обрабатываемый материал и производит его смятие. По мере перемещения резца длина площадки смятия $l_{см}$ увеличивается и на элемент будущей стружки действует возрастающая сила. Увеличение этой силы идёт до тех пор, пока не произойдёт скалывание элемента по плоскости 1–1 под углом β_1 . Эта плоскость называется *плоскостью скалывания*, а угол – *углом скалывания*.

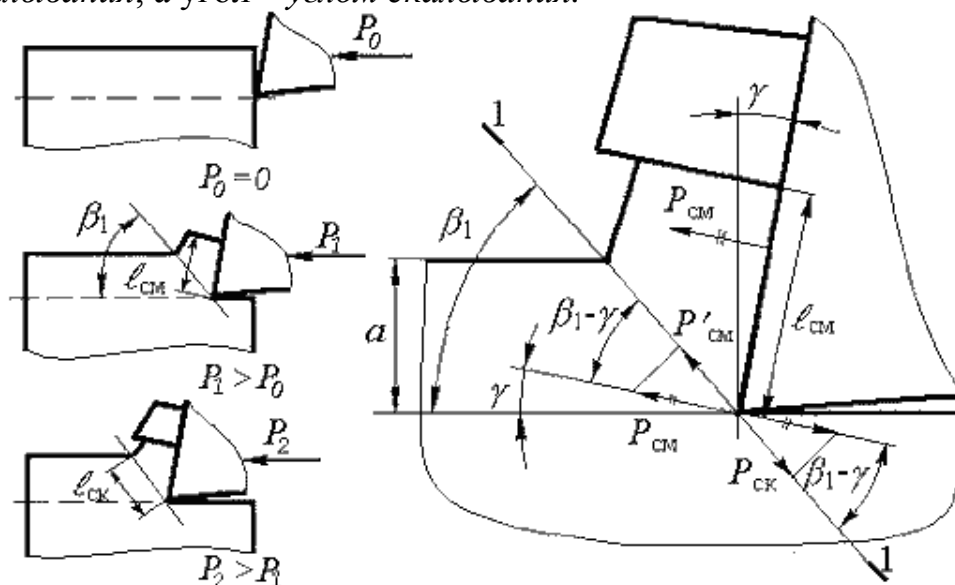


Рисунок Б.14 – Схема образования стружек скалывания

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

$$P_{см} = \sigma_{см} f_{см} = \sigma_{см} l_{см} b, \quad (Б1)$$

где $\sigma_{см}$ – предел прочности обрабатываемого материала на смятие;

b – ширина среза;

$l_{см}$ – длина площадки смятия.

Элемент удерживается силой $P_{ск}$:

$$P_{ск} = \tau_{ск} f_{ск} = \tau_{ск} l_{ск} b, \quad l_{ск} = \frac{a}{\sin \beta_1}, \quad (Б2)$$

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

Для скалывания элемента необходимо, чтобы:

$$P'_{см} = P_{см} \cos(\beta_1 - \gamma) \geq P_{ск}. \quad (Б3)$$

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 своё 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 идёт по поверхности, произвольно охватывающей напряжённую зону, поэтому обработанная поверхность получается неровной.

Тепловые явления при точении. Теплота Q (ккал/мин) в процессе резания образуется в результате:

- 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)

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

где $R = P_z v$ – работа резания, кгс·м/мин;

v – скорость резания, м/мин;

$E = 427$ кгс·м/ккал – механический эквивалент теплоты;

α_0 – коэффициент, учитывающий переход работы резания в потенциальную энергию искажённой кристаллической решётки, указанные потери незначительны по величине и в обычных расчётах этой потерей пренебрегают).

В процессе образования сливной стружки теплота концентрируется в трёх основных зонах (рис. Б.15): 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.

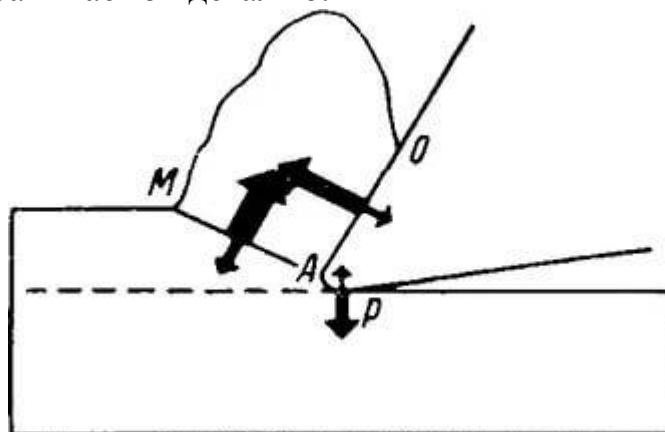


Рисунок Б.15 – Зоны концентрации теплоты в системе резец-стружка

Наиболее высокая температура (температура резания) наблюдается в стружке в зоне контакта её с передней поверхностью инструмента, так как наибольшее количество теплоты, образующейся вследствие деформации (на

поверхности AM), остаётся в стружке и частично поглощается обрабатываемой деталью. Теплота трения стружки (на поверхности AO) остаётся 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 достичь 35...45 % всей теплоты резания.

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

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

где $p = \frac{P_z}{ba}$ – удельная сила резания, кгс/мм²;

α_0 – коэффициент, учитывающий потерю теплоты на скрытую энергию деформации (принимается $\alpha_0 = 0,95$);

β_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);

μ_0 – коэффициент трения стружки;

ξ – коэффициент усадки стружки;

c – теплоёмкость нагретой стружки, ккал/(кгс·°С);

$\rho_{\text{стр}}$ – плотность стружки, кгс/мм³;

b – ширина среза, мм;

a – толщина среза, мм;

E – модуль упругости материала стружки, кгс/мм².

Покидая зону деформации, нагретая до температуры $\theta_{\text{деф.сп}}$ стружка трётся 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 $Q_{\text{тр.п}} = \frac{F_{\text{п}} v}{E \cdot \xi}$.

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

$$\theta_{\text{тр.п}} = \frac{F_{\text{п}} \sqrt{v \cdot \frac{\pi}{\xi}}}{2Eb \sqrt{\lambda_p c_p \rho_p l}},$$

где $F_{\text{п}}$ – площадь передней поверхности резца;
 $\lambda_{\text{р}}$ – коэффициент теплопроводности резца;
 $c_{\text{р}}$ – теплоемкость резца;
 $\rho_{\text{р}}$ – плотность материала резца.

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

$$\theta_{\text{рез}} = \theta_{\text{деф.сп}} + \theta_{\text{тр.п}} = \frac{\alpha_0 p \left((1 - \beta_0) - (\sin \gamma + \mu_0 \cos \gamma) \frac{1}{\xi} \right)}{E c_{\text{р}} \rho_{\text{р}}} + \frac{F_{\text{п}} \sqrt{\frac{v}{\xi}} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2}}{E b \sqrt{\lambda c_{\text{р}} \rho_{\text{р}} l}}.$$

Температура резания в действительности должна быть более высокой, чем получается расчётом 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 $\theta_{\text{деф.сп}}$. Подобный вывод подтверждается на практике при работе острым резцом в нормальных условиях. По мере затупления резца и значительного уменьшения заднего угла α и угла в плане φ 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. Б.16). 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.

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 её 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. Низкая теплопроводность твердых сплавов и особенно минералокерамики является причиной того, что теплота резания сосредотачивается в передней части резца, прилегающей к его вершине, что способствует её пластической деформации. При этом режущие способности ин-

струмента сохраняются ввиду его значительной красностойкости. Однако очень высокий температурный градиент, свойственный минералокерамическому резцу, способствует тепловому удару, разрушающему режущую кромку инструмента.

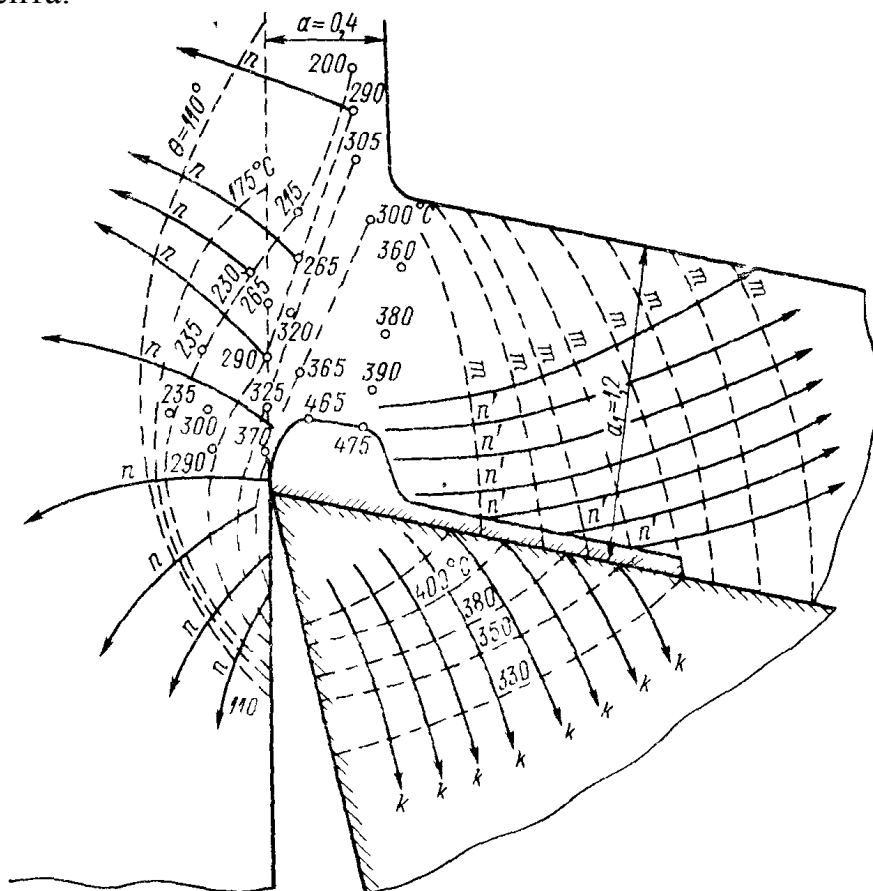


Рисунок Б.16 – Температурное поле в зоне резания резца

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 удалён повреждённый слой детали.

Теоретический расчёт температуры резания встречает значительные трудности, так как в расчётных формулах переменные являются взаимозависимыми параметрами. Так, теплоёмкость c увеличивается, а теплопроводность λ уменьшается с возрастанием температуры. Длина контакта стружки и резца уменьшается с увеличением скорости резания, но заметно растёт по мере износа резца и образования лунки на передней поверхности резца.

Значения постоянных коэффициентов (α_0 , β_0 , μ_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 расчёта температуры резания чаще пользуются эмпирическими формулами, показывающими закономерности изменения температуры реза-

ния в зависимости от различных факторов и справедливыми в определённых границах и условиях.

Влияние конструктивных параметров резца и режимных параметров процесса резания на температуру резания. Температура резания повышается с увеличением подачи s , но в меньшей степени, чем при повышении скорости v .

Ещё 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 уменьшается. Следовательно, с увеличением скорости резания v температура резца 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 резца температура резания уменьшается.

С увеличением угла резания δ увеличивается сила резания и повышаются количество образующейся теплоты и температура резания.

С уменьшением угла в плане φ несколько увеличивается нагрузка на резец, удлиняется режущая кромка, увеличивается угол при вершине ε и, как следствие, значительно улучшается теплоотвод, снижающий температуру резания.

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

Математическая модель процесса точения. Силы резания определяются по формулам:

$$R_z = \tau_p a_1 b_1 \left(1 + \frac{1}{B} \right), \quad (Б4)$$

$$R_y = \tau_p a_1 b_1 \left(\frac{1}{B} - 1 \right), \quad (Б5)$$

$$F_n = \tau_p a_1 b_1 \left(\frac{\cos \gamma + \sin \gamma}{B} - \cos \gamma + \sin \gamma \right), \quad (Б6)$$

$$N = \tau_p a_1 b_1 \left(\frac{\cos \gamma - \sin \gamma}{B} + \cos \gamma + \sin \gamma \right), \quad (Б7)$$

$$F_1 = 0,625\tau_p\rho_1b\sqrt{\frac{B}{\sin\alpha}}, \quad (\text{Б8})$$

$$N_1 = 0,625\frac{\tau_p\rho_1b}{\mu_1}\sqrt{\frac{B}{\sin\alpha}}, \quad (\text{Б9})$$

где τ_p – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, Н/м²;

$$a_1 = \frac{s}{c'} \sin \left(\arctg \frac{c'}{(1-a'(1-\cos\varphi))\text{ctg}\varphi + a'(\sin\varphi + b')} \right) - \text{толщина среза, м;}$$

$$b_1 = \frac{c't}{\sin \left(\arctg \frac{c'}{(1-a'(1-\cos\varphi))\text{ctg}\varphi + a'(\sin\varphi + b')} \right)} - \text{ширина среза, м;}$$

$$a' = \frac{r}{t};$$

$$c' = 1 - a' \left(1 - \sqrt{1 - b'^2} \right);$$

$$B = \frac{(\text{Pe}B - 2)\text{erf}(0,5\sqrt{\text{Pe}B}) + 1,125\sqrt{\text{Pe}B} \cdot e^{-0,25\text{Pe}B}}{\sqrt{\text{Pe}B}(\sqrt{\text{Pe}} + 0,325FD^{0,3}(1 - \sin\gamma)^{0,25})} +$$

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

$$+ \frac{\text{Pe}B(1 - \sin\gamma)^{0,4}(\cos\gamma + \sin\gamma - B(\cos\gamma - \sin\gamma))}{(\cos\gamma + B\sin\gamma)(\text{Pe}(1 - \sin\gamma)^{0,4} + 0,225FD^{0,3})} - 1;$$

$\text{Pe} = \frac{va_1}{a}$ – критерий Пекле, характеризующий степень влияния режимных

условий процесса va_1 по сравнению с влиянием теплофизических свойств обрабатываемого материала a ;

$F = \frac{\lambda_p}{\lambda} \beta \varepsilon$ – критерий, отражающий влияние геометрии инструмента и

отношения теплопроводностей инструментального и обрабатываемого материалов;

$D = \frac{a_1}{b_1}$ – критерий, характеризующий геометрию сечения среза;

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

μ_1 – коэффициент трения на задней контактной площадке.

Для случаев:

– рис. Б.11, б: $t < r(1 - \cos\varphi)$; $s \leq 2r \sin\varphi$;

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

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

– рис. Б.11, в :

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

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

– рис. Б.11, г :

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

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

При приближённых расчётах средний коэффициент трения можно приравнять к μ_1 .

Тогда

$$\mu = \mu_1 = \frac{\cos \gamma + \sin \gamma - B \cos(\cos \gamma - \sin \gamma)}{\cos \gamma - \sin \gamma + B \cos(\cos \gamma + \sin \gamma)} \quad (\text{Б10})$$

Процессы резания характеризуются наличием трёх основных быстро движущихся по отношению к стружке и детали плоских источников тепла шириной b_1 и длиной $AB = \frac{a_1}{\sin \beta_1}$, $AC = l$ и $AD = \Delta$ (рис. Б.17).

Источники AC и AD по отношению к резу являются неподвижными.

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

$$\Delta = 1,25 \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}} \rho_1, \quad (\text{Б11})$$

где ρ_1 – радиус скругления режущей кромки реза.

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

$$l = 1,45 \left(\frac{\cos \gamma + \sin \gamma}{B} - \cos \gamma + \sin \gamma \right) a_1. \quad (\text{Б12})$$

Величины подминаемого слоя металла h и h_y определяются следующим образом (рис. Б.18):

$$h = \rho_1 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+B^2}} \right); \quad (\text{Б13})$$

$$h_y = \frac{hB}{\cos \gamma + B \sin \gamma}. \quad (\text{B14})$$

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

$$\theta'_M = 0,9675 \frac{n\tau_p \sqrt{Pe}}{c\rho} \sqrt{\frac{\cos \gamma + \sin \gamma - B(\cos \gamma - \sin \gamma)}{\cos \gamma + B \sin \gamma}}, \quad (\text{B15})$$

где $n = \frac{1}{1+b_0}$;

$$b_0 = \frac{0,25FD^{0,3} \sqrt{\cos \gamma + B \sin \gamma}}{\sqrt{Pe}B^{0,3} (\cos \gamma + \sin \gamma - B(\cos \gamma - \sin \gamma)^{0,2})};$$

c – теплоёмкость материала заготовки;
 ρ – плотность материала заготовки.

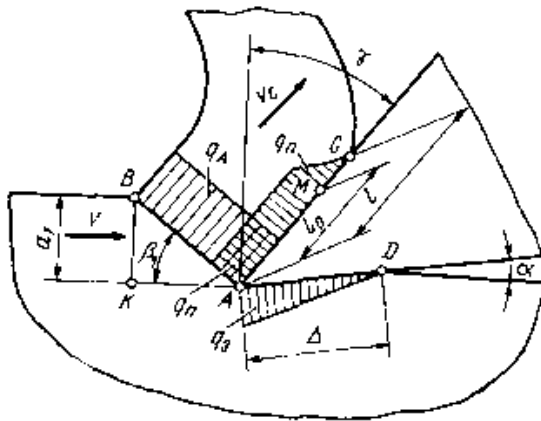


Рисунок Б.17 - Схема распределения суммарных интенсивностей тепловыделения в плоскости сдвига и на контактных поверхностях инструмента

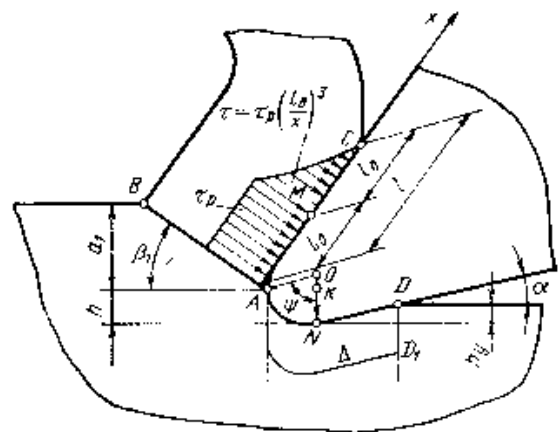


Рисунок Б.18 - Схема к расчёту контактных площадок на передней и задней поверхностях инструмента

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

$$\theta_M = \theta_A (1 + \psi_M), \quad (\text{B16})$$

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

$$\psi_M = \frac{0,9675nB\sqrt{Pe}}{\operatorname{erf} \sqrt{\frac{PeB}{4}}} \sqrt{\frac{\cos \gamma + \sin \gamma - B(\cos \gamma - \sin \gamma)}{\cos \gamma + B \sin \gamma}} \quad \text{– отношение темпе-}$$

ратур θ'_M / θ_A .

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

$$\theta_C = \theta_A (1 + 0,66\psi_M). \quad (\text{Б17})$$

Суммарная контактная температура на передней поверхности равна

$$\theta_{\text{II}} = \theta_A \left(1 + \psi_M \sqrt{\frac{x}{l_0}} \right), \quad 0 \leq x \leq l_0 \quad (\text{Б18})$$

$$\theta_{\text{II}} = \theta_A \left(1 + \psi_M \left(\frac{x}{l_0} \right)^{0,6} \right), \quad x > l_0 \quad (\text{Б19})$$

Максимальная температура трения на задней поверхности инструмента (в точке N) (рис. Б.19)

$$\theta'_N = 0,6n_1 \sqrt{\text{Pe} E} \frac{\tau_p B^{0,25} \cos \alpha}{c \rho \sin^{0,25} \alpha} \quad (\text{Б20})$$

$$n_1 = \frac{1}{1 + b_1}, \quad b_1 = \frac{0,25FD^{0,3} \sin^{0,1} \alpha}{\sqrt{\text{Pe} E^{0,2} B^{0,1}}}, \quad E = \frac{\rho_1}{a_1}.$$

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

$$\left(\frac{x}{\Delta} \right)_m = 0,25 + \sqrt{0,0625 - \frac{0,1 \sin^{0,5} \alpha \operatorname{erf} \sqrt{\frac{\text{Pe} B}{4}}}{n_1 \text{Pe} E B^{2,5} \cos \alpha}}. \quad (\text{Б21})$$

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

$$\theta_N = \theta_A \left(0,5 + \frac{0,36 \sin^{0,25} \alpha}{B^{1,25} \sqrt{\text{Pe} E}} + \psi_N \right) \quad (\text{Б22})$$

$$\theta_D = \theta_A \left(0,5 + \frac{0,25 \sin^{0,25} \alpha}{B^{1,25} \sqrt{\text{Pe} E}} + 0,71\psi_N \right) \quad (\text{Б23})$$

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

Средняя контактная температура на участке AD:

$$\bar{\theta}_3 = 0,5\theta_A \left(1 + \frac{1}{u} + m \cdot u \right), \quad (\text{Б24})$$

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

Для определения тепловых потоков в заготовке воспользуемся схемой, изображённой на рис. Б.19.

Теплота Q_3 распределяется между стружкой и резцом:

$$Q_3 = Q_{\text{дз}} + Q_{\text{рз}}, \quad (\text{Б25})$$

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

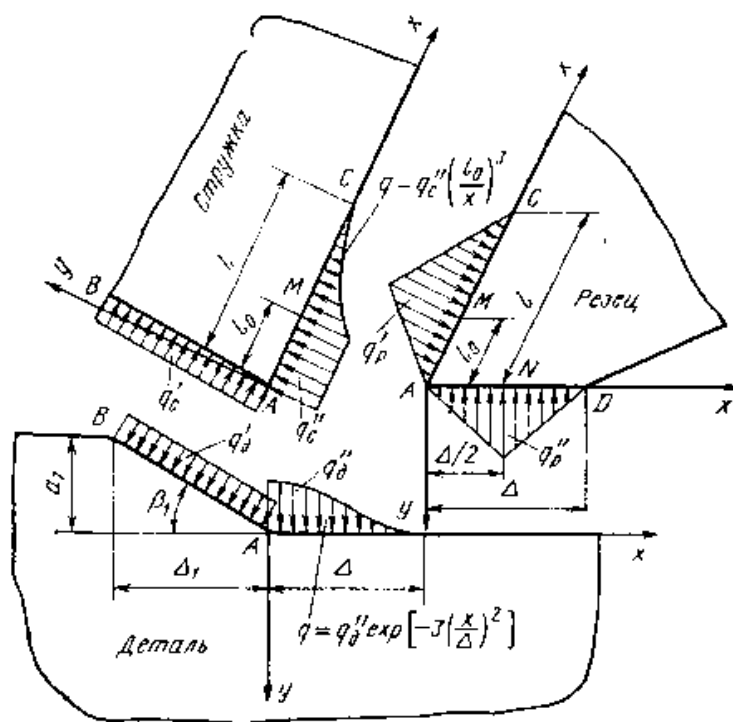


Рисунок Б.19 – Общая схема расчета тепловых явлений при резании

$$Q_{дз} = 0,625n_1\tau_p b\rho_1 v \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}} \cos \alpha, \quad (Б.26)$$

$$Q_{пз} = 0,625(1-n_1)\tau_p b\rho_1 v \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}} \cos \alpha \quad (Б.27)$$

$$n_1 = \frac{1}{1+b_1}, \quad b_1 = \frac{0,25FD^{0,3} \sin^{0,1} \alpha}{\sqrt{Pe} E^{0,2} B^{0,1}}, \quad E = \frac{\rho_1}{a_1}$$

Средние удельные тепловые потоки

$$\bar{q}_{дз} = 0,5n_1\tau_p v \cos \alpha \quad (Б.28)$$

$$\bar{q}_{пз} = 0,5(1-n_1)\tau_p v \cos \alpha \quad (Б.29)$$

Теплота детали определяется как:

$$Q_d = \tau_p a_1 b_1 v M \left(\frac{0,665n_2 \operatorname{erf} \sqrt{\frac{Pe B}{4}}}{\sqrt{Pe B}} + \frac{0,625En_3 B^{1,5}}{\sin^{0,55} \alpha} \right) \quad (Б.30)$$

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

Теплота стружки определяется как:

$$Q_c = \frac{\tau_p a_1 b_1 v}{B} \left(\psi_c n_1 \operatorname{erf} \sqrt{\frac{Pe B}{4}} + Bn \frac{\cos \gamma + \sin \gamma - B(\cos \gamma - \sin \gamma)}{\cos \gamma + \sin \gamma} \right) \quad (Б.31)$$

$$\psi_c = 1 - \frac{2}{PeB} + \frac{1,125}{\sqrt{PeB}} \frac{e^{-\frac{PeB}{4}}}{\operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{PeB}{4}}\right)},$$

$$n = \frac{1}{1 + \frac{0,325FD^{0,3}(1 - \sin \gamma)^{0,25}}{\sqrt{Pe}}},$$

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

Б1.2 Фрезерование

Фрезерованием обрабатываются плоские или фасонные линейчатые поверхности. Фрезерование ведётся многолезвийными инструментами – цилиндрическими и торцовыми фрезами. В связи с этим различают цилиндрическое или торцовое фрезерование. Главное движение придаётся фрезе, движение подачи обычно придаётся обрабатываемой детали, но может придаваться и инструменту – фрезе. Чаще всего оно является поступательным, но может быть вращательным или сложным.

Физическая модель процесса фрезерования. Фрезерование может производиться двумя способами: против подачи и по подаче. Первое фрезерование называется встречным, а второе – попутным. Каждый из этих способов имеет свои преимущества и недостатки.

Встречное фрезерование является основным. Попутное фрезерование проводят при обработке заготовок без корки и материалов, склонных к сильному обработочному упрочнению, так как при фрезеровании против подачи зуб фрезы, врезаясь в материал, довольно значительный путь проходит по сильно наклёпанному слою. Износ фрез в этом случае протекает излишне интенсивно.

При работе торцовыми или концевыми фрезами различают симметричное и несимметричное резание. При симметричном резании ось фрезы совпадает с плоскостью симметрии обрабатываемой поверхности, а при несимметричном – не совпадает.

Отличительной особенностью фрезерования является периодичность смены рабочих и холостых циклов каждого из зубьев фрезы. За время рабочего цикла затрачивается энергия, пропорциональная толщине a срезаемого слоя и силе трения между поверхностями лезвия, сходящей стружкой и поверхностью резания. Примерно 95 % затраченной энергии превращается в теплоту, которая нагревает срезаемую стружку, обрабатываемую заготовку вблизи зоны резания, лезвие инструмента и частично отводится в окружающую среду. Наиболее высокое значение температуры наблюдается на поверхности лезвия.

В связи с периодической сменой рабочего и холостого циклов развитие тепловых явлений при фрезеровании имеет несколько другой характер, чем

при точении, сверлении, зенкерования и развёртывании. За время рабочего цикла лезвие каждого зуба фрезы успевает нагреться до температуры около 400 °С, что примерно в два раза ниже, чем на резцах и свёрлах. За время последующего холостого цикла лезвие зуба фрезы охлаждается, а накопленная за рабочий цикл теплота отводится в окружающую среду и в глубь массы фрезы. Даже с учётом роста температуры в период рабочего цикла значение температуры недостаточно велико, чтобы существенно повысить интенсивность изнашивания фрез.

Существенную роль в условиях циклического температурного нагружения лезвий зубьев фрезы играет среда, в которой происходит их перемещение во время холостого цикла. При фрезеровании всухую колебания температуры лезвий во время рабочих и холостых циклов незначительны, так как воздушная среда слабо способствует отводу теплоты. Полив фрезы СОТС позволяет более интенсивно охлаждать лезвия фрез. Эффективность использования СОТС определяется видом обрабатываемого и инструментального материалов.

При обработке чугунов и других хрупких материалов, когда образующаяся стружка мало трётся о переднюю поверхность инструмента, нагрев режущих лезвий незначителен и использование СОТС не требуется.

Обработка стальных заготовок фрезами, зубья которых оснащены твердосплавными пластинками, также ведётся всухую. Это объясняется тем, что при применении охлаждения твердосплавные пластинки, нагретые за время рабочего цикла до высоких температур, в начале холостого цикла попадают под воздействие струи СОТС. Вследствие резкого охлаждения поверхностных слоёв пластинки в ней возникают большие внутренние напряжения. Эти периодически возникающие напряжения часто приводят к растрескиванию пластин и выкрашиванию лезвий.

Обработка стальных заготовок быстрорежущими фрезами обычно ведётся с поливом фрезы, стружки и заготовки в зоне резания струёй СОТС. Быстрорежущие стали благодаря своим физико-механическим свойствам менее чувствительны к температурным циклическим нагрузкам, чем твёрдые сплавы. СОТС, омывая фрезу, способствует отводу теплоты и снижению интенсивности изнашивания лезвий.

Расчет сил резания при фрезеровании. Плавность работы фрезы зависит от глубины резания, диаметра фрезы и числа зубьев. Она определяется величиной угла δ контакта фрезы с обрабатываемой заготовкой (центральный угол, соответствующий длине дуги соприкосновения фрезы с обрабатываемой заготовкой) (рис. Б.20): $\cos \delta = 1 - \frac{2t}{D}$.

Для обеспечения плавности работы фрезы число одновременно работающих зубьев должно быть не менее двух: $Z_{pz} = \frac{\delta Z}{360^\circ}$. Толщина среза при фрезеровании переменная, её величина зависит от подачи на зуб s_z и угла контакта фрезы δ : $a = S_z \sin \delta$.

При расчёте режима резания глубина резания t назначается максимально возможной по условиям жёсткости технологической системы, ширина фрезерования B определяется размерами обрабатываемой поверхности. Подача на зуб S_z выбирается по таблицам справочников в зависимости от вида и размеров применяемого инструмента, мощности станка и свойств обрабатываемого материала.

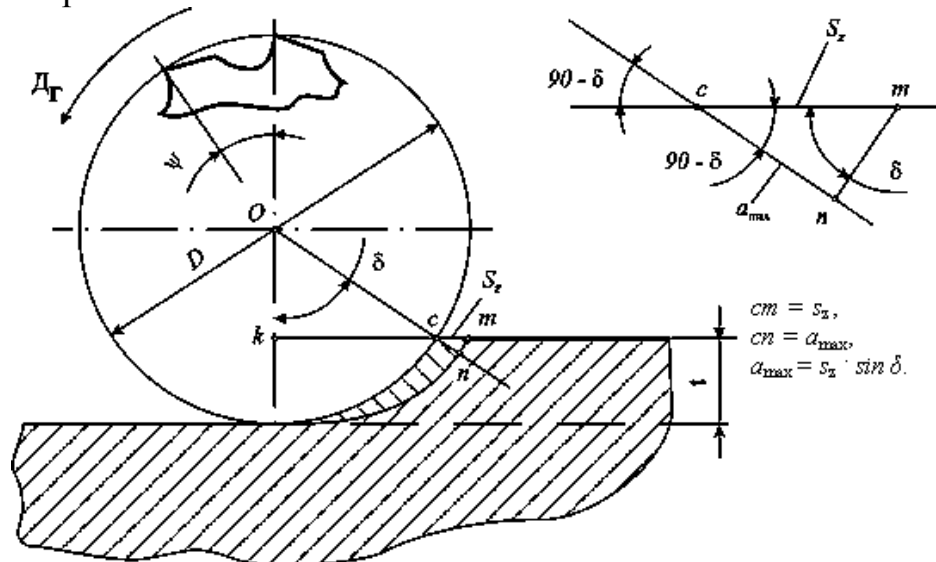


Рисунок Б.20 – Угол контакта фрезы

В условиях равномерного фрезерования сила резания P_n , нормальная к винтовому лезвию зуба, равна:

$$P_z = \frac{2\pi k_p \sigma_B S_z t k}{Z \sin \delta} \quad (\text{Б32})$$

Учитывая угол наклона винтового зуба, окружная составляющая силы резания

$$P_{окр} = P_z \cos \delta, \quad (\text{Б33})$$

а осевая составляющая, действующая вдоль оси вращения фрезы:

$$P_{ос} = P_z \sin \delta. \quad (\text{Б34})$$

Обобщённые результаты экспериментальных исследований окружной (главной) составляющей силы $P_{окр}$ различными видами фрез выражаются уравнением:

$$P_{окр} = C_p t^x S_z^y Z_{pz} B D^n, \quad (\text{Б35})$$

где t – глубина фрезерования;

S_z – подача на зуб;

B – ширина фрезерования;

D – диаметр фрезы.

Значения коэффициентов C_p , а также показатели степени для некоторых видов фрез и обрабатываемых материалов приведены в таблице Б.1.

Значения скорости резания и переднего угла зубьев фрезы учитывают, умножая число, полученное по уравнению (Б35), на поправочные коэффициенты k_v и k_γ (табл. Б.2).

Эффективная мощность, кВт, затрачиваемая в процессе фрезерования металлов, равна:

$$N_{эф} = \frac{P_{окр} v}{60}, \quad (Б36)$$

где v – скорость резания, м/мин;

$P_{окр}$ – окружная сила резания, кН.

Масса металла, кг, превращённая в стружку за один час фрезерования:

$$m = 610^{-8} n z t B S_z \rho, \quad (Б37)$$

где t – глубина фрезерования, мм;

B – ширина фрезерования, мм;

S_z – подача, мм/зуб;

z – число зубьев фрезы;

n – частота вращения фрезы, об/мин;

ρ – плотность обрабатываемого металла, кг/м³.

Энергозатраты, кВт·ч, при фрезеровании определяются отношением работы, затраченной в течение часа, к массе срезанной при этом стружки:

$$\mathcal{E} = \frac{0,278 \cdot 10^6 P_{окр} v}{n z t B S_z \rho}. \quad (Б38)$$

Таблица Б.1 – Коэффициенты и показатели степени в уравнении (Б35)

Обрабатываемый материал	Фрезы	C_p	x	y	n
Сталь	Цилиндрические, концевые	68	0,86	0,74	-0,86
	Угловые	39			
	Торцовые (симметричное фрезерование), дисковые, отрезные	82	0,95	0,8	-1,1
	Торцовые (несимметричное фрезерование)	68	0,86	0,74	-0,86
Чугун	Торцовые (несимметричное фрезерование), цилиндрические, концевые	48	0,83	0,65	-0,83
	Торцовые (симметричное фрезерование), дисковые, отрезные	70	0,9	0,7	-1,14

Таблица Б.2 – Поправочные коэффициенты k_v и k_γ

v , м/мин	50	75	100	125	150	175	200	250
k_v	1,04	1,02	1,00	0,98	0,96	0,94	0,92	0,88
γ	+15	+10	+5	0	-5	-10	-15	-20
k_γ	0,75	0,83	0,92	1,00	1,08	1,17	1,25	1,33

Б1.3 Шлифование

При изготовлении деталей машин и приборов шлифование применяется для завершающей чистовой обработки, позволяя получать поверхности с точностью размеров по 6–7-му квалитетам с шероховатостью $R_a = 0,08..0,32$ мкм.

Различают следующие основные схемы шлифования: наружное и внутреннее круглое шлифование, плоское шлифование и заточку.

Физическая модель процесса шлифования. В процессе шлифования каждое режущее зерно абразивного инструмента вырезает царапину на поверхности обрабатываемой заготовки, превращая срезаемый металл в стружку. На протяжении всего рабочего цикла, соответствующего углу контакта ψ , срезаемая каждым зерном стружка может накапливаться в порах инструмента. За время холостого цикла, соответствующего повороту круга на угол $(2\pi - \psi)$, накопившаяся в объёме поры стружка под действием центробежных сил и потока охлаждающей жидкости имеет возможность удаляться из пор. Часть стружки застрекает в объёмах пор и через некоторый промежуток времени поры на режущей поверхности оказываются заполненными обрабатываемым материалом (засаливание круга). Засаленный круг теряет режущие свойства, вызывает повышение затрат энергии, выделение большого количества теплоты и повышение температуры на режущей поверхности круга и обрабатываемой поверхности заготовки, что приводит к снижению качества обработки и браку детали.

Расчёт сил резания при шлифовании. При наружном и внутреннем круглом шлифовании, а также при плоском шлифовании сила резания раскладывается на две составляющие – тангенциальную P_z и радиальную P_r .

Составляющая P_z действует в направлении главного движения резания и определяет значение эффективной мощности $N_{\text{э}} = P_z v_k$. Сила P_z определяется для:

– наружного внутреннего и круглого шлифования

$$P_{z\text{круг}} = \frac{C_0 D_3^n S_{\text{прод}} S_{\text{окр}}^{0,7} S_{\text{поп}}^{0,7} k_1 k_2 k_3}{v_k}, \quad (\text{Б39})$$

– а для плоского шлифования

$$P_{z\text{пл}} = \frac{C_0 S_{\text{прод}}^{0,7} S_{\text{верт}}^{0,7} S_{\text{поп}} k_1 k_2 k_3}{v_k}, \quad (\text{Б40})$$

где $S_{\text{прод}} = (0,6..0,8) \cdot B$ – продольная подача (для плоского шлифования – поперечная подача), мм/об;

$S_{\text{поп}} = 0,005..0,05$ – поперечная подача, мм/дв. ход (для плоского шлифования – вертикальная подача);

$S_{\text{окр}} = v_3$ – окружная подача, равная линейной скорости точек на обрабатываемой поверхности заготовки, м/мин;

B – ширина шлифовального круга, мм;

k_1, k_2, k_3 – коэффициенты, учитывающие твердость круга, ширину круга B , вид обрабатываемого материала (табл. Б.3).

Энергозатраты при шлифовании]

$$\mathcal{E} = \frac{N_{\mathcal{E}}}{6 \cdot 10^{-5} S_{\text{прод}} S_{\text{поп}} S_{\text{верт}}} . \quad (\text{Б41})$$

Таблица Б.3 - Значения коэффициентов k_1, k_2, k_3

Твёрдость круга	k_1	Ширина шлифовального круга, мм	k_2	Обрабатываемый материал	k_3
М2, М3	0,9	26...40	0,8	Серый чугун	0,9
СМ1, СМ2	1,0	40...63	0,9	Сталь	1
С1, С2	1,16	63...100	1	Термообработанная сталь	1,1
СТ1, СТ2	1,36			Жаропрочная сталь	1,2
СТ3, Т1	1,58				

Б2 Методы оптимизации процессов резания

Для оптимизации математическая модель должна иметь следующие элементы:

- критерий (критерии) оптимизации;
- целевую функцию;
- систему ограничений;
- систему уравнений, описывающих объект;
- входные, выходные и внутренние параметры;
- управляемый (варьируемый) или управляемые (варьируемые) параметры, которые выделяются из числа внутренних параметров.

Целевая функция – это аналитическая зависимость между критерием (критериями) оптимальности и подлежащими оптимизации параметрами с указанием направления экстремума.

Отличие понятий «критерий» и «целевая функция» состоит в следующем: целевая функция может включать в себя более одного критерия и для целевой функции всегда обязательно указывается вид экстремума:

$$f(x) \rightarrow \max \quad (f(x) \rightarrow \min).$$

Различают два вида задач оптимизации: задачу минимизации и задачу максимизации.

Задача минимизации функции f на множестве $X: a \leq x \leq b, f(x) \rightarrow \min$. Целевая функция имеет вид, как показано на рис. Б.21. Здесь x_0 – глобальный минимум, а x_1 – локальный минимум целевой функции.

Задача максимизации функции f на множестве $X: a \leq x \leq b, f(x) \rightarrow \max$, а целевая функция имеет вид, как показано на рис. Б.22. Здесь x_0 – точка глобального максимума, а x_1 – точка локального максимума целевой функции.

Эти задачи оптимизации имеют решение не при любых целевых функциях и допустимых множествах. Существуют задачи, в которых невозможно найти оптимальное решение и экстремум целевой функции. Например, не существует точек минимума функции одной переменной f на множестве $X (f(x) \rightarrow \min)$ в случаях, приведённых в табл. Б.4.

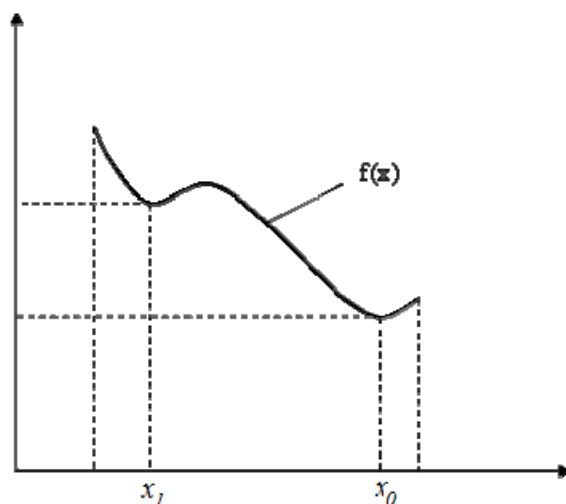


Рисунок Б.21 - Иллюстрация понятий «локальный минимум» и «глобальный минимум» целевой функции

Задача оптимизации разрешима, если выполняются следующие три условия: множество допустимых решений X замкнуто (предельные точки принадлежат этому множеству) и ограничено, целевая функция $f(x)$ непрерывна.

Существуют однокритериальные задачи оптимизации (задачи математического программирования) двух видов: линейного и нелинейного программирования. Формулировка такой задачи: найти значения переменных x_1, x_2, \dots, x_n , при которых целевая функция $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ имеет максимум (минимум) при условиях: $g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq (\geq, =) b_j, j = 1, m$.

Задачу математического программирования (максимум двухпараметрическую задачу оптимизации) можно решить графоаналитическим методом.

Постановка задачи однопараметрической однокритериальной задачи оптимизации: дан один критерий y . Объект (процесс) описан уравнением (уравнениями), включающим один искомый параметр $y = f(x)$. Имеется система ограничений: $x \geq a_1; a_2 \leq x \leq b_1$ и т.д. Необходимо найти оптимальное значение параметра $x = x_{\text{опт}}$, обращающее целевую функцию $f(x)$ в максимум или минимум.

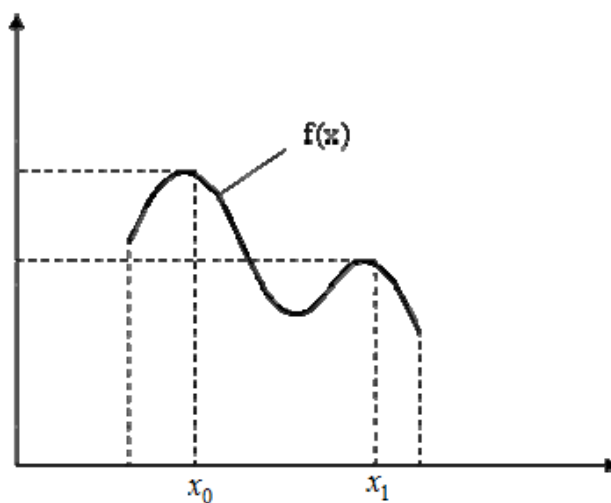
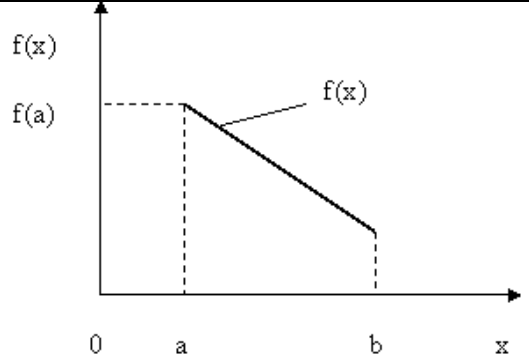
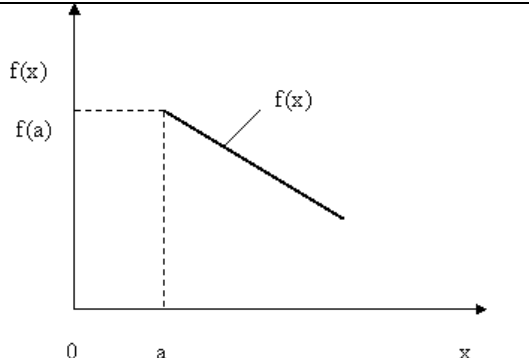
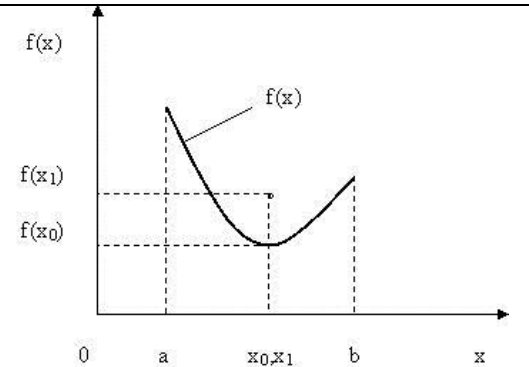


Рисунок Б.22 - Иллюстрация понятий «локальный максимум» и «глобальный максимум» целевой функции

Таблица Б.4 - Случаи, при которых невозможно найти решение задачи оптимизации

 <p>The graph shows a coordinate system with a vertical axis labeled $f(x)$ and a horizontal axis labeled x. The origin is marked with 0. A point a is marked on the x-axis, and a point b is marked to its right. A horizontal dashed line extends from $f(a)$ on the $f(x)$-axis to the point $(a, f(a))$ on the curve. The curve is horizontal from $x=a$ to a point, then slopes downward linearly to a point at $x=b$. A vertical dashed line extends from b on the x-axis to the curve. The label $f(x)$ is placed near the downward-sloping part of the curve.</p>	<p>Множество допустимых решений не замкнуто: граница «a» множества допустимых решений в интервал входит, а граница «b» нет. $X = (a, b)$ – множество X не замкнуто, следовательно, $f(b)$ – не существует</p>
 <p>The graph shows a coordinate system with a vertical axis labeled $f(x)$ and a horizontal axis labeled x. The origin is marked with 0. A point a is marked on the x-axis. A horizontal dashed line extends from $f(a)$ on the $f(x)$-axis to the point $(a, f(a))$ on the curve. The curve is horizontal from $x=a$ to a point, then slopes downward linearly towards the right. A vertical dashed line extends from a on the x-axis to the curve. The label $f(x)$ is placed near the downward-sloping part of the curve.</p>	<p>Неограниченность множества допустимых решений: определена лишь одна левая граница множества допустимых решений $X = (a, \infty)$ – множество допустимых решений неограниченно</p>
 <p>The graph shows a coordinate system with a vertical axis labeled $f(x)$ and a horizontal axis labeled x. The origin is marked with 0. Points a, x_0, x_1, and b are marked on the x-axis. Points $f(x_1)$ and $f(x_0)$ are marked on the $f(x)$-axis. The curve starts at $(a, f(x_1))$, is horizontal to x_0, then drops vertically to $(x_0, f(x_0))$, which is a minimum. From x_0, the curve increases to $(b, f(x_1))$. Vertical dashed lines connect a, x_0, x_1, b on the x-axis to the curve. Horizontal dashed lines connect $f(x_1)$ and $f(x_0)$ on the $f(x)$-axis to the curve. The label $f(x)$ is placed near the curve.</p>	<p>Функция $f(x)$ не является непрерывной в т. $x_0(x_1)$ существуют два значения функции – $f(x_0)$ и $f(x_1)$</p>

Задача решается в два этапа.

На первом этапе рассматривается система ограничений, которые должны выполняться. Выполнение первого ограничения означает, что искомое значение параметра x должно находиться правее a_1 , причём a_1 в разрешённый интервал входит (рис. Б.23). Выполнение второго ограничения означает, что искомое значение параметра x должно находиться в интервале $[a_2, b_1]$, при этом границы в интервал входят.

На втором этапе применяют метод перебора. В пределах области допустимых решений (ОДР) через интервал h выбирается ряд значений параметра x_i (ОДР разбита на четыре отрезка и выбрано пять значений параметра x_i). Для каждого x_i рассчитываются соответствующие значения целевой функции. Среди них находят минимальное (максимальное) значение. Значение параметра x_i , обращающее целевую функцию в минимум (максимум), является оптимальным (если $f(x)$ стремится к минимуму, то $x_{\text{опт}} = x_3$, если к максимуму, то $x_{\text{опт}} = x_5$).

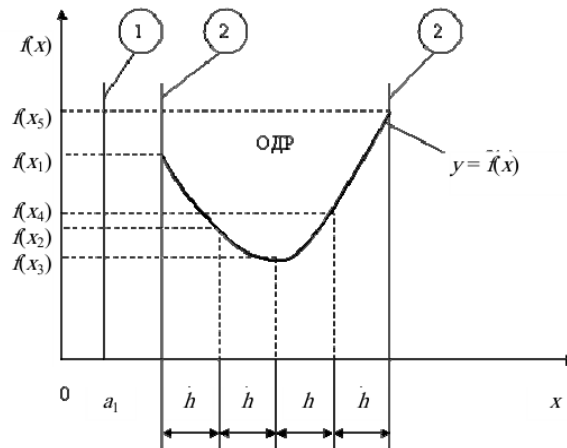


Рисунок Б.23 - Графическая иллюстрация решения однопараметрической однокритериальной задачи оптимизации

Если целевая функция линейная (рис. Б.24), то на втором этапе вычисляют её значения только на границах ОДР. Эти значения сравнивают и выбирают наименьшее или наибольшее. Если $f(x) \rightarrow \min$, то $x_{\text{опт}} = b_1$, если $f(x) \rightarrow \max$, то $x_{\text{опт}} = a_2$.

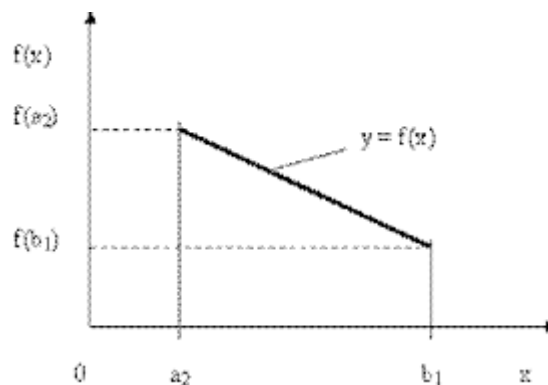


Рисунок Б.24 - Графическая иллюстрация решения однопараметрической однокритериальной задачи оптимизации для случая линейной целевой функции

Б2.1 Задачи нелинейного программирования

Методы решения задач нелинейного программирования классифицируются следующим образом.

Б2.1.1 Численные методы поиска экстремума функции одной переменной

Постановка задачи: найти значение переменной x , при которой целевая функция $y = f(x)$ имеет минимум или максимум при условиях $g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq (\geq, =) b_j, j = \overline{1, m}$.

1.1 Классический метод

Пусть $a \leq x \leq b$, функция $f(x)$ непрерывна на этом отрезке и имеет на нём непрерывную производную. Вычисляют значение производной $f'(x)$ и определяют критические точки (точки отрезка $[a, b]$, в которых производная обращается в нуль или не существует). В окрестности каждой критической точки исследуют знак производной и отбирают те из них, при переходе через которые производная меняет знак с минуса на плюс (точки локального ми-

нимума) или с плюса на минус (точки локального максимума). Затем вычисляют значения целевой функции в этих точках и на границах отрезка $[a, b]$. Эти значения сравнивают между собой и определяют точку, в которой достигается минимум (максимум) целевой функции. Эта точка является точкой глобального минимума (максимума) функции $f(x)$ на отрезке $[a, b]$.

При решении реальных задач оптимизации данный метод применяется редко, так как зачастую производную целевой функции определить сложно или невозможно.

Б2.1.2 Метод равномерного перебора

Пусть дана функция $y = f(x) \rightarrow \min$ (рис. Б.26).

Фиксируют величину шага $h > 0$. Вычисляют значения целевой функции в точках $x_1 = a$ и $x_2 = x_1 + h - f(x_1)$ и $f(x_2)$. Полученные значения сравнивают. Запоминают меньшее из этих двух значений. Далее выбирается точка $x_3 = x_2 + h$ и в ней вычисляется значение целевой функции $f(x_3)$. Сравнивается оставшееся на предыдущем шаге значение и значение $f(x_3)$. Наименьшее из них опять запоминают. Так поступают до тех пор, пока очередное значение x не превысит b . Последнее оставшееся значение является приближённым значением глобального минимума.

Если целевая функция имеет узкую впадину (рис. Б.26), то можно её проскочить, и вместо точки глобального минимума определить точку локального минимума (вместо x' можно найти x''). Эта проблема частично снимается, если выбрать очень маленький шаг, но при этом потребуется много времени (в том числе и машинного) для решения задачи.

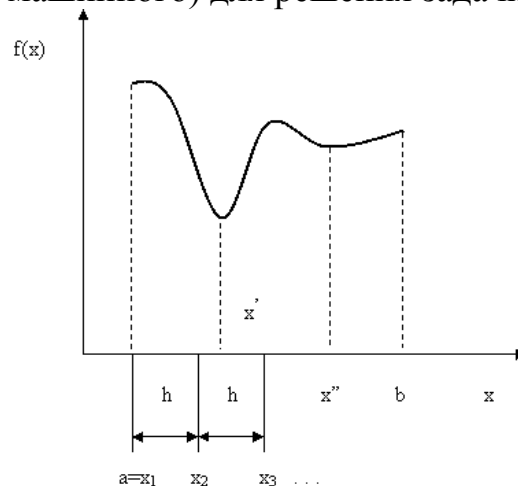


Рисунок Б.26 - Графическая иллюстрация метода равномерного перебора

Б2.1.3 Метод золотого сечения прост, эффективен и широко применяется в практической оптимизации.

Рассматриваемая в данном методе функция должна быть унимодальной. Функция $f(x)$ является унимодальной на отрезке $[a, b]$, если она на этом отрезке имеет единственную точку глобального минимума и слева от этой точки является строго убывающей, а справа строго возрастающей.

Суть метода золотого сечения заключается в том, чтобы определить точку глобального минимума на отрезке $[a, b]$ за минимальное количество шагов (за минимальное количество вычислений целевой функции).

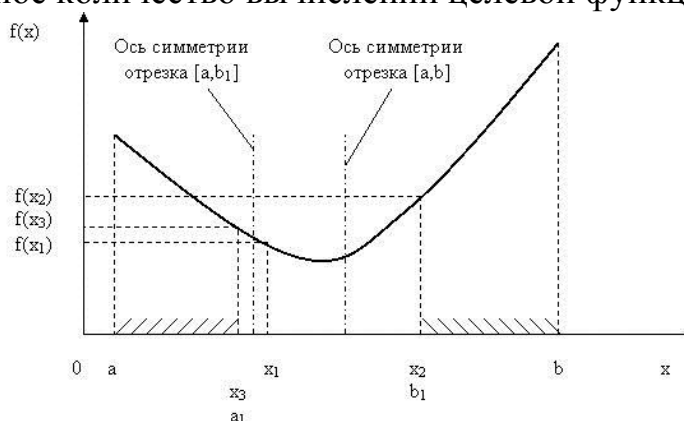


Рисунок Б.27 – Иллюстрация алгоритма метода золотого сечения

Алгоритм метода золотого сечения заключается в следующем (рис. Б.27). На исходном отрезке $[a, b]$ выбираются две точки x_1 и x_2 . Вычисляются значения целевой функции в этих точках $f(x_1), f(x_2)$ и сравниваются.

Из дальнейшего рассмотрения исключается отрезок, прилегающий к точке, дающей большее значение целевой функции (отрезок $[x_2, b]$). Для нового отрезка $[a, b_1]$ находится его середина, и по отношению к ней симметрично оставшейся точке x_1 ставится точка x_3 . Для нее рассчитывается значение целевой функции $f(x_3)$ и сравнивается с $f(x_1)$. Из дальнейшего рассмотрения опять исключается отрезок, прилегающий к точке с большим значением целевой функции, здесь это отрезок $[a, x_3]$. Текущий отрезок «стягивается» до нового отрезка $[a_1, b_1]$ и т.д.

Б2.2 Численные методы поиска экстремума функции n переменных.

Б2.2.1 Численные методы в задачах без ограничений.

Б2.2.1.1 Метод покоординатного спуска.

Это задача безусловной минимизации (задачи минимизации целевой функции $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ на всем пространстве переменных). Если требуется решить задачу максимизации, то выражение целевой функции умножают на (-1) и снова решается задача минимизации. При этом строится последовательность точек $x^{(0)}, x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(n)}$, монотонно уменьшающих значение целевой функции $f(x^{(0)}) \geq f(x^{(1)}) \geq f(x^{(2)}) \geq \dots \geq f(x^{(n)})$. Направление спуска выбирается параллельно координатным осям (сначала спуск осуществляется вдоль первой оси Ox_1 , затем вдоль второй оси Ox_2 и так до последней оси Ox_n).

Имеем начальную точку $x^{(0)}$ и некоторое положительное число a (рис. Б.28). Вычисляем значение целевой функции $f(x^{(0)})$, значение целевой функции при $x = x^{(0)} + a$ и проверяем выполнение неравенства:

$$f(x^{(0)} + a) < f(x^{(0)}) \quad (\text{Б.42})$$

Если это неравенство справедливо, то вдоль направления оси Ox_1 значение функции f уменьшилось, и поэтому полагают $x^{(1)} = x^{(0)} + a$. Если неравенство (Б.42) не выполняется, то делают шаг в противоположном направлении и проверяют выполнение неравенства

$$f(x^{(0)} - a) < f(x^{(0)}). \quad (\text{Б.43})$$

В случае выполнения этого неравенства полагают $x^{(1)} = x^{(0)} - a$. Если оба неравенства (Б.42) и (Б.43) не выполняются, то $x^{(1)} = x^{(0)}$.

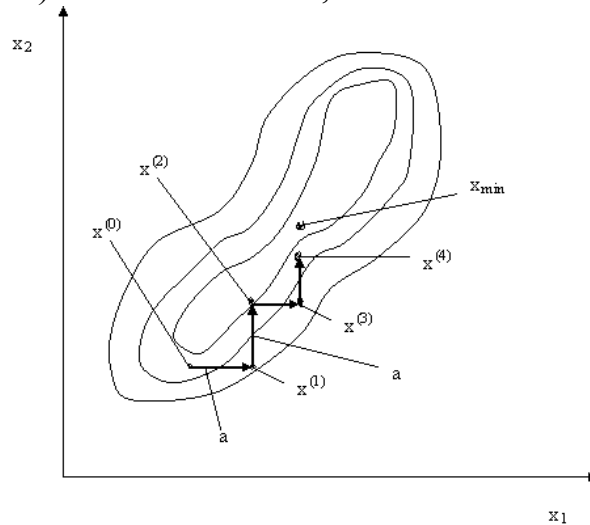


Рисунок Б.28 - Графическая иллюстрация поиска точки минимума методом покоординатного спуска

Второй шаг производят вдоль координатной оси Ox_2 . Вычисляют значение функции в точке $(x^{(1)} + a)$ и сравнивают его с предыдущим значением:

$$f(x^{(1)} + a) < f(x^{(1)}). \quad (\text{Б.44})$$

Если это неравенство выполняется, то полагают $x^{(2)} = x^{(1)} + a$. Если оно не выполняется, то делают шаг в противоположном направлении и проверяют выполнение неравенства

$$f(x^{(1)} - a) < f(x^{(1)}). \quad (\text{Б.45})$$

В случае выполнения неравенства (Б.45) считают, что $x^{(2)} = x^{(1)} - a$. Если оба неравенства (Б.44) и (Б.45) не выполняются, то принимают $x^{(2)} = x^{(1)}$.

Так перебирают все n направлений координатных осей. На этом первая итерация закончена. На n -м шаге будет получена некоторая точка $x(n)$. Если $x(n) \neq x(0)$, то аналогично, начиная с $x(n)$, осуществляют вторую итерацию. Если же $x(n) = x(0)$ (это имеет место, если на каждом шаге ни одно из пары неравенств не окажется выполненным), то величину шага нужно уменьшить, взяв, например, $a_{n+1} = a_{n/2}$, и в следующей итерации использовать новое значение величины шага.

Последующие итерации выполняют аналогично. Вычисления прекращают при выполнении какого-либо условия окончания счёта, например $|f(x)_{(k+1)} - f(x)_{(k)}| < \delta$, где $f(x)_{(k+1)}$ – значение целевой функции на $(k + 1)$ итерации; $f(x)_{(k)}$ – значение целевой функции на k -й итерации; δ – некоторое положительное число, характеризующее точность решения исходной задачи минимизации целевой функции.

Применяют также следующие методы: метод Хука-Дживса, градиентный метод, метод Ньютона, метод сопряжённых направлений и т.д.

Б2.2.2. Численные методы в задачах с ограничениями.

Б2.2.2.1. Метод покоординатного спуска.

Данный метод распространяется на задачи с простыми ограничениями типа: $a_1 \leq x_1 \leq b_1, a_2 \leq x_2 \leq b_2, \dots, a_n \leq x_n \leq b_n$. Основные процедуры данного метода аналогичны предыдущему методу.

Б2.2.2.2 Метод линеаризации

Данный метод применим для приведения задачи нелинейного программирования к задаче линейного программирования. Его целесообразно применять в случае, когда искомые переменные в целевой функции и системе ограничений возведены в степень, например x^a . Тогда по правилам логарифмирования $\lg(x^a) = a \lg x$. Можно ввести новые переменные, $t = \lg x$, что позволит нам упростить расчеты.

Далее задача решается с применением симплекс-алгоритма или графоаналитически.

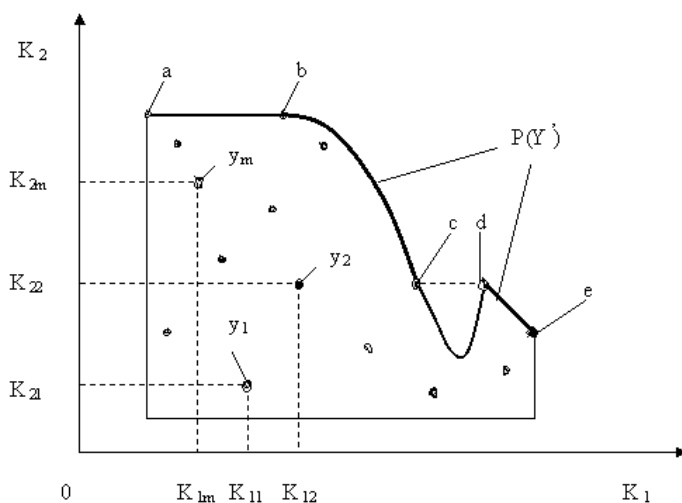
Б2.2.3 Методы решения многокритериальных задач оптимизации

Рассмотрим некоторые методы решения многокритериальных задач оптимизации.

Метод поиска Парето-эффективных решений.

Пусть имеется множество вариантов решения, по которым определены значения всех критериев.

Представим множество оценок вариантов решения в пространстве равнозначных критериев (рис. Б.29):



K_1 и K_2 – критерии оценки вариантов решения;

$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ – множество оценок альтернативных вариантов решения;

$K_{11}, K_{12}, \dots, K_{1m}$ – значения первого критерия для 1, 2, ..., m -го варианта решения;

$K_{21}, K_{22}, \dots, K_{2m}$ – значения второго критерия для 1, 2, ..., m -го варианта решения;

$P(Y)$ – множество Парето-эффективных оценок решений

Рисунок Б.29 - Иллюстрация поиска Парето-эффективных решений

Парето-эффективные оценки состоят из точек кривой bc , исключая точку c , и линии de .

Правило. Множество Парето-эффективных оценок $P(Y)$ представляет собой «северо-восточную» границу множества Y без тех его частей, которые параллельны одной из координатных осей или лежат в «глубоких» провалах.

К преимуществам метода относят равнозначность критериев и математическую объективность метода. Недостаток метода: одно окончательное решение получается только в частном случае (количество Парето-эффективных решений, как правило, более одного).

Метод решения многокритериальных задач оптимизации с использованием обобщённого (интегрального) критерия основан на объединении частных критериев $F_i(X)$, $i = \overline{1, n}$ в один интегральный критерий $F(X) = \Phi(F_1(X), F_2(X), \dots, F_n(X))$ и нахождении затем максимума или минимума данного критерия.

В зависимости от того, каким образом частные критерии объединяются в обобщённый критерий, различают следующие виды обобщённых критериев:

- аддитивный;
- мультипликативный;
- максиминный (минимаксный).

В аддитивных критериях целевая функция в общем виде имеет следующий вид:

$$F(X) = \sum_{i=1}^n C_i \frac{F_i(X)}{F_i^0(X)} = \sum_{i=1}^n C_i f_i(X) \rightarrow \max(\min)$$

где n – количество объединяемых частных критериев;

C_i – весовой коэффициент i -го частного критерия;

$F_i(X)$ – числовое значение i -го частного критерия;

$F_i^0(X)$ – i -й нормирующий делитель;

$f_i(X)$ – нормированное значение i -го частного критерия.

В качестве нормирующих делителей принимаются директивные значения параметров или критериев, заданных заказчиком (считается, что значения параметров, заложенные в техническом задании, являются оптимальными или наилучшими), или максимальные (минимальные) значения критериев, достигаемые в области допустимых решений.

Обобщённый аддитивный критерий является безразмерной величиной. Преимущество данного метода: как правило, всегда удаётся определить единственный оптимальный вариант решения.

Недостатки:

- трудности (субъективизм) в определении весовых коэффициентов;
- аддитивный критерий не вытекает из объектной роли частных критериев и поэтому выступает как формальный математический приём;
- в аддитивном критерии происходит взаимная компенсация частных критериев, т.е. уменьшение одного из них может быть компенсировано увеличением другого критерия.

В мультипликативном критерии целевая функция записывается следующим образом:

$$F(X) = \prod_{i=1}^n C_i F_i(X) \rightarrow \max(\min),$$

где C_i – весовой коэффициент i -го частного критерия;

$F_i(X)$ – числовое значение i -го частного критерия.

Преимущества мультипликативного критерия:

- не требуется нормирование частных критериев;
- практически всегда определяется одно оптимальное решение.

Недостатки:

- трудности (субъективизм) в определении весовых коэффициентов;
- перемножение разных размерностей;
- взаимная компенсация значений частных критериев.

Максиминный (минимаксный) критерий основывается на идее равномерности: стараются найти такие значения переменных (параметров) $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, при которых нормированные значения всех частных критериев равны между собой:

$$C_i f_i(X) = K,$$

где C_i – весовой коэффициент i -го частного критерия;

$f_i(X)$ – нормированное значение i -го частного критерия;

K – константа.

На практике так варьируют значениями переменных проектирования x_1, x_2, \dots, x_m , при которых последовательно «подтягиваются» те нормированные критерии, численные значения которых в исходном решении оказались наименьшими. При этом подтягивание «отстающего» критерия неизбежно приводит к снижению значений части остальных критериев. Но при проведении ряда шагов можно добиться определённой степени уравнивания противоречивых частных критериев.

Формально принцип максимина формулируется следующим образом: выбрать такой набор переменных $X^{(0)} \in X$, при котором реализуется максимум из минимальных нормированных значений частных критериев: $F(X^{(0)}) = \max/\min f_i(X)$. Такой принцип выбора $X^{(0)}$ иногда носит название гарантированного результата. Если частные критерии необходимо минимизировать, то самым отстающим критерием является тот, который принимает максимальное значение. В этом случае применяют принцип минимакса: $F(X^{(0)}) = \min/\max f_i(X)$.

Универсального метода, с помощью которого можно было бы решить любую задачу оптимизации, не существует. Поэтому для решения конкретной задачи применяют один или несколько своих численных методов.

Б2.3 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 учётом 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.

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 $\tau_{\text{сми}}$ и поворот режущей пластины $\tau_{\text{прп}}$. Время обслуживания и отдыха ($\tau_{\text{обсл}} + \tau_{\text{отд}}$) можно не учитывать.

Система ограничений для процессов резания приведена в табл. Б.5.

Таблица Б.5 – Технические ограничения при точении

Ограничения		Станок	Зажимное приспособление	Оптимальные рабочие режимы	Заготовка
Геометрические		Рабочее пространство (максимальный, минимальный диаметр заготовки, высота рабочей зоны, максимальная длина обработки и др.)	Диапазоны запрещённых 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	Статическая	Упругость (шпиндель, станина, суппорт, задняя бабка, механизм подачи)	Жёсткость закрепления	Прогиб державки	Прогиб заготовки (упругость заготовки)
	Динамическая	Аналитически пока не описано	Колебания (появление вибрации) в системе СПИД		
	Термическая		Термические деформации		

Основное время $\tau_{\text{осн}}$, 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 $C_{\text{инстр}}$.

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

Б3 Метод конечных элементов как средство моделирования процессов резания

Б3.1 Программное обеспечение, реализующее метод конечных элементов

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).

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 или (русский, сокращённый вариант) на сайте компании CAD-FEM-Russia. Достоинством этой системы является наиболее полная документация и система помощи.

Имеются следующие конфигурации программы ANSYS, различающиеся своими возможностями:

- ANSYS Structural™ – статические и динамические расчёты в линейной и нелинейной постановках;
- ANSYS Mechanical™ (с модулем ANSYS Thermal) – расчёт полей температур из решения задач стационарной и нестационарной теплопроводности, конвекции, теплообмена излучением, расчёты фазовых превращений (заморозание, плавление, сварка и т.д.). Поля температур можно автоматически передать в ANSYS Structural для прочностных расчётов;
- ANSYS Professional™ – решение контактных задач, проведение геометрически нелинейных расчётов и оптимизации;
- ANSYS DesignSpace® – несложные прочностной, частотный или температурный расчёты, 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.

ELCUT – это интерактивная система моделирования двумерных краевых задач методом МКЭ.

Система позволяет решать плоские и осесимметричные задачи стационарной и нестационарной теплопередачи, анализа упругого напряжённого состояния, совмещённые 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 тепломассопередачи и переноса, выполнять прочностные расчёты, 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. Основным достоинством данного пакета является графическое представление расчётной модели на координатной сетке. Сетка может быть выполнена в реальном масштабе моделируемого объекта.

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

LS-DYNA (LSTC) предназначена для анализа нелинейного динамического отклика трёхмерных 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 жёстких, 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.

Б3.2 Пакет твёрдотельного моделирования SolidWorks и его модули

Программа SolidWorks® – это САПР, использующая привычный графический интерфейс пользователя Microsoft Windows®. Для проектируемых трёхмерных деталей и сборок можно создавать двухмерные чертежи. Детали, сборки и чертежи являются связанными документами; при внесении любых изменений в детали или сборки документ чертежа изменяется.

Пакет SolidWorks содержит следующие основные модули.

DriveWorksXpress используется для автоматизации процесса проектирования, которая позволяет внедрить правила проектирования и повторно использовать проектную информацию в целях сохранения времени и средств.

COSMOSMotion (в версии SolidWorks Office Premium) даёт возможность определить движение механизмов, моделировать его и анимировать результаты без выхода из среды SolidWorks, а также рассчитывать нагрузки, которые могут быть использованы для определения эпюр нагрузок в структурном анализе. Источниками движения могут быть перемещения/углы поворота, скорости/ускорения и силы/моменты. В качестве результатов программа предоставляет набор диаграмм, отображающих координаты, скорости, ускорения, усилия в зависимости от времени.

Используя функциональность ScanTo3D (в версии SolidWorks Office Premium), можно открыть данные сканирования любого сканирующего устройства, подготовить данные и затем преобразовать их в поверхность или твёрдотельную модель.

SolidWorks Routing создаёт пути маршрута трубопровода, труб или электрических кабелей между компонентами, также включает в себя выравнивание проводки и функции оформления, позволяющие получать двухмерные чертежи по изготовлению проводки из трёхмерных электрических маршрутных сборок.

SolidWorks Toolbox включает библиотеку стандартных деталей: подшипники, болты, гайки, кулачки, зубчатые колеса, кондукторные втулки, вкладыши, стопорные кольца, винты, звёздочки, конструкционные профили, включая алюминий и сталь, шкивы для зубчатых ремней, шайбы, канавки для добавления стандартных канавок в цилиндрическую деталь.

К сожалению, крепежи являются приблизительными изображениями и не включают точное описание резьбы, что может повлиять на их использование в некоторых типах анализов, например расчётов напряжения. Кроме того, SolidWorks Toolbox позволяет выполнить расчёт балки для определения напряжения и отклонения балки и расчёт подшипника для определения нагрузки и жизненного цикла подшипника.

TolAnalyst™ – анализ допусков для определения влияния допусков и методов сборки на размерный анализ между двух элементов сборки.

COSMOSXPress позволяет провести статический анализ конструкции. Результаты расчёта представляются в виде изображения на конструкции эквивалентных напряжений, запаса прочности и деформированного вида.

Б3.3 Продукты-аналоги SolidWorks

MSC.visualNastran 4D позволяет имитировать кинематику и динамику механизмов. Его функциональность сопоставима с COSMOSMotion. При этом реальная податливость деталей также не учитывается. Нагрузки в местах соединений и силы инерции могут быть использованы в качестве граничных условий, приложенных к детали при её псевдостатическом анализе; добавлен кинематический анализ зубчатых зацеплений, имитации качения.

Возможности vNastran 2002, отсутствующие в COSMOSWorks: температурная зависимость коэффициента теплоотдачи при конвекционном теплообмене и трансляция динамических нагрузок из динамического в статический анализ.

В vNastran, в частности, отсутствуют возможность задания контактных граничных условий (выход из контакта, вступление в контакт, посадка с натягом, нелинейный контакт с большими перемещениями) и модель контактной теплопроводности.

Продукт оптимален для динамического анализа механизмов с последующим статическим расчётом деталей.

CATIA V5 & Structural Analysis – CAD/CAE-комплекс расчёта на прочность. Можно воспользоваться продуктами из конфигурации Structural Analysis:

- Generative Part Structural Analysis (GPS) – статический анализ и расчёт собственных частот единственной детали;
- Generative Assembly Structural Analysis (GAS) – статический анализ и расчёт собственных частот сборки. При наложении граничных условий в зонах контакта используется информация о сопряжениях в геометрической модели сборки;
- Elfini Structural Analysis – выбор типов конечных элементов, пре- и постпроцессоров;
- FEM Surface – модуль генерации сеток на поверхностях с возможностью управления качеством сетки.

Pro/ENGINEER & Pro/MECHANICA содержит следующие модули:

- Structural Simulation Package – статический и динамический анализы, расчёт собственных частот деталей и сборок, анализ чувствительности конструкции к изменению параметров, определяющих форму. Геометрическая модель разрабатывается или импортируется. Граничные условия могут быть взяты также из модулей теплового и кинематического анализа.
- Motion Simulation Package – кинематическое и динамическое моделирование механизмов;
- Thermal Simulation Package – стационарный тепловой расчёт деталей и сборок;
- Fatigue Advisor – прогноз долговечности конструкции в зависимости от формы циклов напряжений, типа материала, состояния поверхности и вида технологической обработки.

Функциональность Pro/MECHANICA, если исключить из рассмотрения Fatigue Advisor, несколько более ограничена по сравнению с комбинацией COSMOSWorks+COSMOSMotion. У COSMOSWorks лучше возможности моделирования поверхностей и более обширная номенклатура моделей контактного взаимодействия.

MechSoft (функционирует как приложение CAD-программ: SolidWorks, SolidEdge и др.) позволяет выполнить поверочный и проектировочный расчёты типовых объектов машиностроительных конструкции (можно определить статическую прочность или ресурс, уточнить геометрию на основе требований к конструкции). В базе данных присутствуют:

- прямозубые, косозубые и червячные, ременные, цепные и клиноременные передачи;
- шпоночные, сварные, штифтовые, резьбовые и паяные соединения;
- эвольвентные профили;
- подшипники скольжения;
- цилиндрические соединения с натягом.

Программа наделена инструментами параметрической оптимизации, позволяет анализировать плоские и пространственные размерные цепи.

MechSoft основана на аналитических вычислениях и не имеет никакого отношения к конечно-элементным и сходным процедурам. Из этого вытекают достоинства и ограничения программы. К числу первых относятся высокая степень достоверности расчётов (методы апробированы и в подавляющем большинстве узаконены в отраслевых документах), скорость и возможность проектировочного расчёта с учётом статической, усталостной и, в некоторых ситуациях, динамической прочности. Границы применимости – это стандартизированные объекты и условия их функционирования.

Б3.4 Программное обеспечение, реализующее твёрдотельное моделирование

Одними из наиболее распространённых и освоенных специалистами комплексов САД являются AutoCAD и созданный на его основе Autodesk Mechanical Desktop. Эти продукты имеют понятный и доступный интерфейс, а также обладают большими возможностями для моделирования в двух- и трёхмерном пространстве. Дополнительным удобством является наличие литературы об этих комплексах на русском языке.

Графические пакеты T-Flex, Компас-3D, SolidWorks также позволяют выполнять чертежи в 2D и 3D-проекциях. Кроме того, пакеты T-Flex и SolidWorks содержат расчётные модули, позволяющие проводить механические расчёты и решать задачи оптимизации.

CADWorx – пакет на базе AutoCAD® для проектирования промышленных предприятий. Комплект программ CADWorx полностью поддерживает и легко адаптируется ко всем отраслям промышленности. Модули CADWorx обеспечивают следующие возможности:

- CADWorx Plant и Plant Professional: проектирование трубопроводов, оборудования, металлоконструкций, кабельных трасс, а также связи с базой данных; реализована возможность конвертации режимов черчения из 2D в 3D и наоборот, в любой момент времени;

- CADWorx Steel и Steel Professional (Металлоконструкции) – полнофункциональный пакет трёхмерного моделирования металлоконструкций;

CADfix (Finite Element Graphical Systems, FECS) – проектирование, инженерный анализ, моделирование производственных процессов, обмен данными и моделями между комплексами САПР без потери данных. Программа восстанавливает геометрические модели, вплоть до получения твёрдотельной модели по несвязанному каркасному набору опорных линий, а также производит модификации и экспорт геометрических файлов. CADfix может использоваться для создания расчётных моделей для конечно-элементного расчёта (доводка твёрдотельной геометрии до приемлемого для разбиения состояния и непосредственная разбивка на конечные элементы).

ПРИЛОЖЕНИЕ В (рекомендуемое)

Тестовые вопросы Первое полугодие второго года обучения

- 1) Каким путем были получены формулы $P_x = C_{P_x} t^{X_{P_x}} s^{Y_{P_x}} V^{Z_{P_x}} K_{ОБЩ}$, $P_y = C_{P_y} t^{X_{P_y}} s^{Y_{P_y}} V^{Z_{P_y}} K_{ОБЩ}$, $P_z = C_{P_z} t^{X_{P_z}} s^{Y_{P_z}} V^{Z_{P_z}} K_{ОБЩ}$ для расчета сил резания при точении
 - а) теоретическим;
 - б) эмпирическим;
 - в) полуэмпирическим;
 - г) алгоритмическим;
 - д) экспериментальным.
- 2) Какие приборы используются для проведения силовых экспериментов?
 - а) барометры;
 - б) микрометры;
 - в) ареометры;
 - г) динамометры;
 - д) индикаторы.
- 3) При установлении силовых зависимостей, как правило, проводят:
 - а) однофакторные эксперименты;
 - б) многофакторные эксперименты;
 - в) двухфакторные эксперименты;
 - г) компьютерные эксперименты.
- 4) Конечная цель силовых экспериментов заключается в:
 - а) описании зависимости между варьируемым параметром и силой резания;
 - б) установление функциональной связи между варьируемым параметром и силой резания;
 - в) установление теоретической связи между варьируемым параметром и силой резания и описания этой зависимости математической формулой;
 - г) установление функциональной связи между варьируемым параметром и силой резания и описания этой зависимости математической формулой.
- 5) Перед математической обработкой экспериментальных данных силовых экспериментов полученные значения силы резания
 - а) проверяют;
 - б) анализируют;
 - в) усредняют;
 - г) ничего не делают;
 - д) логарифмируют.

- б) Какие требования предъявляют к аппроксимирующей формуле, описывающей экспериментальные данные?
- а) простота;
 - б) универсальность;
 - в) максимальная точность описания устанавливаемой зависимости;
 - г) быстрота обработки экспериментальных данных;
 - д) наглядность.
- 7) Зависимость силы резания от параметров резания хорошо описывается формулой
- а) $y = kx + b$;
 - б) $y = Cx^k$;
 - в) $y = \ln Cx^k$;
 - г) $y = ax^2 + bx + c$;
 - д) $y = \cos(ax + b)$.
- 8) Для обработки экспериментальных данных применяют:
- а) интерполяцию;
 - б) экстраполяцию;
 - в) метод наименьших квадратов;
 - г) метод Лагранжа;
 - д) метод конечных разностей.
- 9) В основе метода наименьших квадратов лежит критерий
- а) $S = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \rightarrow \min$;
 - б) $S = \sum_{i=1}^n (y_i + f(x_i))^2 \rightarrow \min$;
 - в) $S = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \rightarrow \max$;
 - г) $S = \sum_{i=1}^n (y_i^2 - f^2(x_i)) \rightarrow \min$;
 - д) $S = \sum_{i=1}^n (y_i + f(x_i))^2 \rightarrow \max$.
- 10) Формулу, полученную при обработке экспериментальных данных можно использовать при любых значениях параметра. Так ли это?
- а) нет;
 - б) да;
 - в) не всегда;
 - г) в зависимости от вида функции.
- 11) Линейная модель исследуемого объекта имеет вид:
- а) $y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$;
 - б) $y = a_1x_1 - a_2x_2 + a_3x_3 - a_4x_4 + \dots + a_nx_n$;
 - в) $y = x_1^{a1} + x_2^{a2} + \dots + x_n^{an}$;
 - г) $y = x_1 + x_2 + \dots + x_n + C$;
 - д) $y = \ln(a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n)$.

- 12) В чем заключаются достоинства экспериментальных методов построения математических моделей?
- а) простота;
 - б) малая трудоемкость;
 - в) требуют минимум знаний о сути процесса;
 - г) позволяют с приемлемой точностью определять неизвестные параметры модели;
 - д) в независимости от конкретных условий.
- 13) В чем заключается главный недостаток экспериментальных методов построения математических моделей?
- а) в применении сложного математического аппарата исследования;
 - б) в невозможности определить связи между входными параметрами и конструктивными характеристиками;
 - в) в том, что используется только для систем, производящих эргодические процессы;
 - г) в невозможности применения на стадии проектирования объекта;
 - д) в невозможности создать универсальную математическую модель.
- 14) В чем заключается активный метод экспериментального исследования?
- а) в искусственном внесении возмущения в объект и регистрации данных;
 - б) в наблюдении и статистической обработке полученных данных;
 - в) в активном изменении параметров объекта;
 - г) в активной регистрации входных и выходных параметров;
 - д) в частотном преобразовании входного сигнала.
- 15) В чем заключается пассивный метод экспериментального исследования?
- а) в искусственном внесении возмущения в объект и регистрации данных;
 - б) в наблюдении и статистической обработке полученных данных;
 - в) в активном изменении параметров объекта;
 - г) в активной регистрации входных и выходных параметров;
 - д) в частотном преобразовании входного сигнала.
- 16) В чем заключается задача обработки результатов наблюдений?
- а) в выборе значения коэффициентов, зависимости выходного параметра от входных параметров, минимизирующих функцию ошибки;
 - б) в регистрации полученных данных;
 - в) в обработке полученных данных;
 - г) в регистрации и обработке полученных данных;
 - д) в применении методов ЦОС.
- 17) Что такое "величина ошибки" при проведении эксперимента?
- а) разность максимальной и минимальной частоты;
 - б) плотность вероятности, рассчитанная в критической точке;
 - в) разница между средним и текущим значением измеряемого параметра;
 - г) промах;

- д) разница между расчетным и экспериментально полученным значением.
- 18) Что такое полный факторный эксперимент?
- а) эксперимент, учитывающий всю полноту действующих факторов;
 - б) эксперимент, реализующий все возможные неповторяющиеся комбинации уровней всех независимых управляемых факторов, каждый из которых варьируется на двух уровнях;
 - в) эксперимент, полностью учитывающий влияние управляемых факторов на процесс;
 - г) эксперимент, позволяющий статистически обработать полученные данные;
 - д) эксперимент, состоящий из одного опыта.
- 19) Переводят ли при полном факторном эксперименте управляемые физические размерные факторы в безразмерные?
- а) только при числе факторов больше двух;
 - б) нет;
 - в) только если целью эксперимента является построение линейной модели;
 - г) да;
 - д) только если эксперимент воспроизводим.

Второе полугодие второго года обучения

- 20) Перечислите достоинства использования кодированных обозначений факторов
- а) простота построения матрицы планирования;
 - б) упрощение последующих расчетов;
 - в) абстрагирование от физической природы факторов;
 - г) применение стандартного алгоритма в независимости от физической природы факторов и их численного значения;
 - д) простота реализации эксперимента.
- 21) Позволяет ли метод полного факторного эксперимента получить зависимость параметра оптимизации от факторов?
- а) нет;
 - б) только при трехуровневом планировании;
 - в) только при числе факторов меньше двух;
 - г) да;
 - д) да, но только в виде статистической функции.
- 22) Уравнение регрессии имеет вид:
- а) квадратичной модели;
 - б) линейной модели;
 - в) уравнения третьего порядка;
 - г) кубической параболы;
 - д) логарифмической зависимости.

- 23) Проводят ли рандомизацию при реализации полного факторного эксперимента?
- нет;
 - проведение рандомизации никак не скажется на результатах эксперимента;
 - только при двухфакторном эксперименте;
 - да;
 - только при трехфакторном эксперименте.
- 24) Каким критерием пользуются для проверки воспроизводимости эксперимента?
- критерием Фишера;
 - критерием Гурвица;
 - критерием Кохрэна;
 - критерием Найквиста;
 - критерием Рейнольдса.
- 25) Каким критерием пользуются для оценки значимости коэффициентов регрессии?
- критерием Фишера;
 - критерием Гурвица;
 - критерием Найквиста;
 - критерием Кохрэна;
 - критерием Стьюдента.
- 26) Каким критерием пользуются для проверки адекватности математического описания при проведении полного факторного эксперимента?
- критерием Фишера;
 - критерием Лапласа;
 - критерием Лейбница;
 - критерием Кохрэна;
 - критерием Стьюдента.
- 27) Сколько требуется провести опытов при трехфакторном эксперименте?
- 8;
 - 4;
 - 3;
 - 6;
 - 1.
- 28) Уравнение регрессии для двухфакторного эксперимента имеет вид:
- $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2$;
 - $y = b_0 + b_1x_1^2 + b_2x_2^2 + b_{12}x_1x_2$;
 - $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2$;
 - $y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2$.
- 29) Является ли эксперимент воспроизводимым, если расчетное значение критерия Кохрэна $G = 0,5157$, а критическое значение $G_{кр} = 0,3910$:
- только при двухуровневом эксперименте;
 - только при двухфакторном эксперименте;

- в) да;
г) нет.
- 30) Является ли значимым коэффициент регрессии $b_2 = -2,451$, если критерий Стьюдента $\Delta b = 1,52$?
- а) только при двухуровневом эксперименте;
б) только при двухфакторном эксперименте;
в) да;
г) нет.
- 31) Можно ли провести проверку адекватности модели с использованием критерия Фишера, если все коэффициенты в уравнении регрессии значимы?
- а) нет;
б) только при двухфакторном эксперименте;
в) да;
г) только при двухуровневом эксперименте.
- 32) Является ли модель $y = 34 + 1,23x_1 - 2,56x_2$ адекватной, если расчетное значение критерия Фишера $F = 3,339$, а критическое значение $F_{кр} = 3,34$?
- а) только при двухуровневом эксперименте;
б) да;
в) только при двухфакторном эксперименте;
г) нет.
- 33) Если независимые наблюдения в отдельных опытах имеют нормальное распределение, то будет ли их совместное распределение так же нормальным?
- а) только если опыт воспроизводим;
б) нет;
в) да;
г) только при двух независимых наблюдениях;
д) проверку нормальности совместного распределения никогда не проводят.
- 34) Что такое случайный процесс?
- а) непрерывное случайное изменение входных и выходных параметров объекта под действием возмущающих факторов;
б) случайное поведение объекта;
в) хаотическое поведение объекта;
г) рывки в выходных и входных характеристиках объекта;
д) детерминированное поведение объекта.
- 35) Что такое эргодический процесс?
- а) случайный процесс, описывающий эволюцию системы с заранее непредсказуемыми траекториями точек в фазовом пространстве;
б) полностью детерминированный процесс эволюции системы;
в) процесс эволюции, корреляционная функция которого быстро затухает;
г) процесс, описываемый с помощью алгоритмов Лоренца;

- д) процесс, описывающий эволюцию системы, при котором почти каждая точка проходит с определенной правильностью вблизи любой другой точки системы.
- 36) Что характеризует математическое ожидание системы?
- а) степень детерминированности системы;
 - б) полезный сигнал на выходе системы;
 - в) шум, излучаемый системой;
 - г) эволюцию системы;
 - д) отсутствие влияния внешних факторов на систему.
- 37) Что характеризует корреляционная функция при нулевом фазовом сдвиге?
- а) ошибку системы;
 - б) полезный сигнал на выходе системы;
 - в) шум, излучаемый системой;
 - г) степень хаотичности системы;
 - д) вероятность следующего нулевого значения корреляционной функции.
- 38) Существует ли связь между корреляционной функцией и спектральной плотностью случайного процесса?
- а) да, через преобразование Лапласа;
 - б) да, через преобразование Лагранжа;
 - в) нет;
 - г) да, через преобразование Фурье;
 - д) да, через несобственный интеграл первого рода.
- 39) В каком случае процесс можно привести к стационарному путем центрирования?
- а) только если к процессу применимы алгоритмы описания детерминированных систем;
 - б) если математическое ожидание процесса равно нулю;
 - в) нельзя нестационарный процесс привести к стационарному;
 - г) если математическое ожидание меняется незначительно, а коэффициент корреляции меняется значительно;
 - д) если математическое ожидание меняется незначительно, а коэффициентом корреляции можно пренебречь.
- 40) Если известны динамические свойства объекта и статические характеристики входных сигналов, а требуется определить характеристики случайной функции на выходе системы, то это
- а) прямая задача исследования линейных стационарных систем;
 - б) обратная задача исследования линейных стационарных систем;
 - в) прямая задача исследования нелинейных стационарных систем;
 - г) прямая задача исследования линейных нестационарных систем;
 - д) обратная задача исследования нелинейных нестационарных систем.

