

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Кафедра подъемно-транспортных, строительных,
дорожных машин и оборудования**

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

_____ Е.И. Луковникова

« _____ » _____ 201__ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ

Б1.В.ДВ.04.01

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ

23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства

ПРОГРАММА СПЕЦИАЛИТЕТА

**Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и
оборудование**

Квалификация выпускника: инженер

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ	3
2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ	3
3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ	4
3.1 Распределение объёма дисциплины по формам обучения.....	4
3.2 Распределение объёма дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости	4
4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	5
4.1 Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий	5
4.2 Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам	7
4.3 Лабораторные работы.....	8
4.4 Практические занятия.....	8
4.5 Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат.....	8
5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	9
6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ	10
7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....	10
8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	11
9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....	11
9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных занятий.	11
10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ	37
11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ	38
Приложение 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.....	39
Приложение 2. Аннотация рабочей программы дисциплины	44
Приложение 3. Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе	45
Приложение 4. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости по дисциплине.....	46

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Вид деятельности выпускника

Дисциплина охватывает круг вопросов, относящихся к производственно-технологическому виду профессиональной деятельности выпускника в соответствии с компетенциями и видами деятельности, указанными в учебном плане.

Цель дисциплины

Изучение современных методов прочностных и динамических расчетов деталей и механизмов дорожно-строительных машин.

Задачи дисциплины

- овладение современными методами динамических и прочностных расчетов элементов дорожно-строительных машин в целях повышения их надежности и производительности;
- использование методов исследования, проектирования и расчета режимов работы дорожно-строительных машин;
- формирование навыков в составлении динамических моделей дорожно-строительных машин и на основе анализа данных моделей получение обоснованных суждений о динамической прочности, надёжности и производительности машины.

Код компетенции	Содержание компетенций	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
1	2	3
ПК-12	способность проводить стандартные испытания наземных транспортно-технологических средств и их технологического оборудования;	знать: современные методы динамических и прочностных расчетов элементов дорожно-строительных машин; уметь: проводить стандартные испытания наземных транспортно-технологических средств и их технологического оборудования; владеть: навыками составления и анализа динамических моделей дорожно-строительных машин.
ПСК-2.9	способность проводить стандартные испытания средств механизации и автоматизации подъемно-транспортных, строительных и дорожных работ.	знать: основные способы моделирования прочности и долговечности деталей подъемно-транспортных, строительных, дорожных машин; уметь: проводить стандартные испытания средств механизации и автоматизации подъемно-транспортных, строительных и дорожных работ; владеть: методиками расчета на прочность и долговечность деталей машин при переменных нагрузках.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина Б1.В.ДВ.04.01 Динамика и прочность относится к элективной части.

Дисциплина Динамика и прочность базируется на знаниях, полученных при изучении таких учебных дисциплин, как теоретическая механика, теория механизмов и машин,

сопротивление материалов.

Основываясь на изучении перечисленных дисциплин, Динамика и прочность представляет основу для преддипломной практики и подготовки к государственной итоговой аттестации.

Такое системное междисциплинарное изучение направлено на достижение требуемого ФГОС уровня подготовки по квалификации инженер.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ

3.1. Распределение объема дисциплины по формам обучения

Форма обучения	Курс	Семестр	Трудоемкость дисциплины в часах						Курсовая работа (проект), контрольная работа, реферат, РГР	Вид промежуточной аттестации
			Всего часов	Аудиторных часов	Лекции	Лабораторные работы	Практические занятия	Самостоятельная работа		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Очная	5	А	108	18	9	9	-	90	-	зачет
Заочная	4	-	108	4	2	2	-	100	-	зачет
Заочная (ускоренное обучение)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Очно-заочная	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3.2. Распределение объема дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости

Вид учебных занятий	Трудоемкость (час.)	в т.ч. в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)	Распределение по семестрам, час
			А
1	2	3	4
I. Контактная работа обучающихся с преподавателем (всего)	18	6	18
Лекции (Лк)	9	-	9
Лабораторные работы (ЛР)	9	6	9
Групповые (индивидуальные) консультации	+	-	+
II. Самостоятельная работа обучающихся (СР)	90	-	90
Подготовка к практическим занятиям	70	-	70
Подготовка к зачету	20	-	20
III. Промежуточная аттестация зачет	+	-	+
Общая трудоемкость дисциплины час.	108	-	108
зач. ед.	3	-	3

4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий

- для очной формы обучения:

№ раздела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоемкость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)		
			учебные занятия		Самостоятельная работа обучающихся
			лекции	лабораторные работы	
1	2	3	4	5	6
1.	Методы анализа механических систем СДМ.	36	3	3	30
1.1.	Принцип Германа-Эйлера-Даламбера для материальной точки и для механической системы.	18	1,5	1,5	15
1.2.	Дифференциальные уравнения движения механической системы в обобщенных координатах.	18	1,5	1,5	15
2.	Расчет на прочность и долговечность деталей машин при переменных нагрузках.	36	3	3	30
2.1.	Определение расчетных характеристик сопротивления усталости.	18	1,5	1,5	15
2.2.	Долговечность при переменных напряжениях.	18	1,5	1,5	15
3.	Расчеты на усталость по максимальным переменным напряжениям и напряжениям ниже предельных.	36	3	3	30
3.1.	Усталость деталей машин, ее природа и процесс разрушения.	18	1,5	1,5	15
3.2.	Расчеты по максимальным переменным напряжениям и напряжениям ниже предельных.	18	1,5	1,5	15
ИТОГО		108	9	9	90

- для заочной формы обучения:

№ раздела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоемкость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)		
			учебные занятия		Самостоятельная работа обучающихся
			лекции	лабораторные работы	
1	2	3	4	5	6
1.	Методы анализа механических систем СДМ.	27	1	1	25
1.1.	Принцип Германа-Эйлера-Даламбера для материальной точки и для механической системы.	16	0,5	0,5	15
1.2.	Дифференциальные уравнения движения механической системы в обобщенных координатах.	16	0,5	0,5	10
2.	Расчет на прочность и долговечность деталей машин при переменных нагрузках.	27	1	1	25
2.1.	Определение расчетных характеристик сопротивления усталости.	16	0,5	0,5	15
2.2.	Долговечность при переменных напряжениях.	16	0,5	0,5	10
3.	Расчеты на усталость по максимальным переменным напряжениям и напряжениям ниже предельных.	50	-	-	50
3.1.	Усталость деталей машин, ее природа и процесс разрушения.	25	-	-	25
3.2.	Расчеты по максимальным переменным напряжениям и напряжениям ниже предельных.	25	-	-	25
ИТОГО		104	2	2	100

4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам.

<i>№ раздела и темы</i>	<i>Наименование раздела и темы дисциплины</i>	<i>Содержание лекционных занятий</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	2	3	4
1.	Методы анализа механических систем СДМ.		-
1.1.	Принцип Германа-Эйлера-Даламбера для материальной точки и для механической системы.	Принцип Германа-Эйлера-Даламбера для материальной точки. Примеры применения принципа Германа-Эйлера-Даламбера. Принцип Германа-Эйлера-Даламбера для несвободной механической системы. Приведение сил инерции точек твердого тела к простейшему виду.	-
1.2.	Дифференциальные уравнения движения механической системы в обобщенных координатах.	Уравнения Лагранжа второго рода. Кинетический потенциал. Уравнение Лагранжа второго рода для консервативной системы. Циклические координаты. Циклические интегралы. Уравнения Нильсена.	-
2.	Расчет на прочность и долговечность деталей машин при переменных нагрузках.		-
2.1.	Определение расчетных характеристик сопротивления усталости.	Циклы напряжений. Характеристики цикла. Характеристики сопротивления усталости при регулярном нагружении. Разновидности уравнений кривых усталости. Расчетные методы оценки характеристик сопротивления усталости материалов и конструкций (детерминированный подход).	-
2.2.	Долговечность при переменных напряжениях.	Приближенный способ моделирования прочности и долговечности деталей, работающих при переменных напряжениях. Взаимосвязь усталостной прочности деталей машин и долговечности машин в условиях эксплуатации. Параметры, оценивающие сопротивление материалов переменным и длительным статическим нагрузкам.	-
3.	Расчеты на усталость по максимальным переменным напряжениям и напряжениям ниже предельных.		
3.1.	Усталость деталей машин, ее природа и процесс разрушения.	Механическая теория усталости. Кинетическая теория усталости. Деформационная (малоцикловая) усталость. Усталостная природа изнашивания.	-
3.2.	Расчеты по максимальным переменным напряжениям и напряжениям ниже предельных.	Предел выносливости. Диаграммы предельных амплитуд и предельных напряжений. Расчет на прочность при переменных напряжениях.	

4.3. Лабораторные работы.

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование тем лабораторных работ</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	1.	Принцип Германа-Эйлера-Даламбера для материальной точки и для механической системы.	1,5	Решение практических задач с использованием ПК (1 час.)
2		Дифференциальные уравнения движения механической системы в обобщенных координатах.	1,5	Решение практических задач с использованием ПК (1 час.)
3	2.	Определение расчетных характеристик сопротивления усталости.	1,5	Решение практических задач с использованием ПК (1 час.)
4		Долговечность при переменных напряжениях.	1,5	Решение практических задач с использованием ПК (1 час.)
5	3.	Усталость деталей машин, ее природа и процесс разрушения.	1,5	Решение практических задач с использованием ПК (1 час.)
6		Расчеты по максимальным переменным напряжениям и напряжениям ниже предельных.	1,5	Решение практических задач с использованием ПК (1 час.)
ИТОГО			9	6

4.4. Практические занятия.

Учебным планом не предусмотрено.

4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат.

Учебным планом не предусмотрено.

5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

<i>№, наименование разделов дисциплины</i>	<i>Кол-во часов</i>	<i>Компетенции</i>		<i>Σ комп.</i>	<i>t_{ср} час</i>	<i>Вид учебных занятий</i>	<i>Оценка результатов</i>
		<i>ПК-12</i>	<i>ПСК-2.9</i>				
1	2	3	4	5	6	7	8
1. Методы анализа динамических систем СДМ.	36	+	+	2	18	Лк, ЛР, СР	зачет
2. Расчет на прочность и долговечность деталей машин при переменных нагрузках.	36	+	+	2	18	Лк, ЛР, СР	зачет
3. Расчет на усталость по максимальным переменным напряжениям и напряжениям ниже предельных.	36	+	+	2	18	Лк, ЛР, СР	зачет
<i>всего часов</i>	108	54	54	2	54		

6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1) Прикладная механика: учебное пособие / Х.С. Гумерова, В.М. Котляр, Н.П. Петухов, С.Г. Сидорин; Министерство образования и науки России, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет». - Казань: Издательство КНИТУ, 2014. - 142 с. [Электронный ресурс].
URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=428011>

2) Рахматулин Х.А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках /

Х.А. Рахматулин, Ю.А. Демьянов. - изд. 2-е, дополн. - Москва: Логос, 2009. - 512 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=84891>

3) Вильке В.Г. Механика систем материальных точек и твердых тел: учебник / В.Г. Вильке; Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». - Москва: Физматлит, 2013. - 268 с. [Электронный ресурс].

URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=275429>

7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

№	Наименование издания	Вид занятия	Количество экземпляров в библиотеке, шт.	Обеспеченность, (экз./ чел.)
1	2	3	4	5
Основная литература				
1.	Лоскутов Ю.В. Лекции по теоретической механике: учебное пособие / Ю.В. Лоскутов; Поволжский государственный технологический университет. - Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. - 180 с. [Электронный ресурс]. URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=439200	Лк ЛР	ЭР	1
2.	Прикладная механика: учебное пособие / Х.С. Гумерова, В.М. Котляр, Н.П. Петухов, С.Г. Сидорин; Министерство образования и науки России, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет». - Казань: Издательство КНИТУ, 2014. - 142 с. [Электронный ресурс]. URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=428011	Лк ЛР СР	ЭР	1
Дополнительная литература				
3.	Богомаз И.В. Механика: учебное пособие / И.В. Богомаз. - Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2012. - 346 с. [Электронный ресурс]. URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=229251	Лк ЛР	ЭР	1
4.	Рахматулин Х.А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках / Х.А. Рахматулин, Ю.А. Демьянов. - изд. 2-е, дополн. - Москва: Логос, 2009. - 512 с. [Электронный ресурс]. URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=84891	ЛР СР	ЭР	1
5.	Вильке В.Г. Механика систем материальных точек и твердых тел: учебник / В.Г. Вильке; Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». - Москва: Физматлит, 2013. - 268 с.	ЛР СР	ЭР	1

8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО - ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Электронный каталог библиотеки БрГУ
http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r_15/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=.
2. Электронная библиотека БрГУ
<http://ecat.brstu.ru/catalog> .
3. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online»
<http://biblioclub.ru> .
4. Электронно-библиотечная система «Издательство «Лань»
<http://e.lanbook.com> .
5. Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам"
<http://window.edu.ru> .
6. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU <http://elibrary.ru> .
7. Университетская информационная система РОССИЯ (УИС РОССИЯ)
<https://uisrussia.msu.ru/> .
8. Национальная электронная библиотека НЭБ
<http://xn--90ax2c.xn--p1ai/how-to-search/> .

9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Работа на лекциях: ведение конспекта лекционного материала для успешного использования его при подготовке к зачету, закреплению и расширения теоретических знаний. После проработки лекционного материала обучающийся должен четко владеть следующими аспектами по каждой лекции:

- знать тему;
- четко представлять план лекции;
- уметь выделять основное, главное;
- усвоить значение примеров и иллюстраций.

Работа на лабораторных занятиях заключается в решении практических задач на составление моделей поведения динамических систем строительно-дорожных машин, производятся расчеты на прочность и долговечность деталей машин при переменных нагрузках с использованием ИКТ.

Самостоятельная работа выполняет функцию закрепления, повторения изученного материала. Выполнение самостоятельной работы способствует углублению знаний и более успешному формированию умений и навыков, связанных с изучением конкретных тем.

Характер самостоятельной работы: развитие способностей самостоятельно работать с информацией, используя учебную и научную литературу. Самостоятельная работа дисциплинирует обучающихся, развивает произвольное внимание и совершенствует навыки целесообразного восприятия.

9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ.

Лабораторная работа № 1 (1,5 часа).

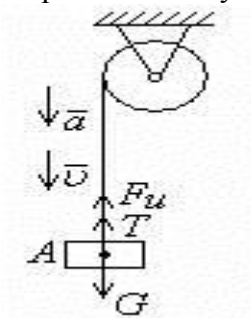
Тема: Принцип Германа-Эйлера-Даламбера для материальной точки и для механической системы.

Цель работы: изучить методику применения принципа Германа-Эйлера-Даламбера для материальной точки и для механической системы.

Ход работы: решение практических задач.

Образец задачи № 1.

Груз массой 200 кг опускается равноускоренно с помощью невесомого троса, перекинутого через блок, и в первые 5с проходит 10м. Определить силу натяжения троса.



Указание. При решении задачи рекомендуется такая последовательность:

1. выделить точку, движение которой рассматривается в данной задаче;
2. выяснить, какие активные силы действуют на точку и изобразить их на рисунке;
3. освободить точку от связей, заменив их реакциями;
4. к образовавшейся системе сил добавить силу инерции, помня, что направлена она по линии вектора ускорения точки, но в противоположную сторону;
5. выбрать расположение осей координат и составить два уравнения проекции всех сил на эти оси ($\sum X_i = 0, \sum Y_i = 0$);
6. решив уравнения, определить искомые значения величин.

Решение.

Обозначив груз точкой A , приложим к нему силу тяжести G , реакцию троса T , и добавим к ним силу инерции $F_{ин}$, направив ее в сторону, противоположную ускорению.

Ускорение a определяем из уравнения равнопеременного движения $s = at^2 / 2$ так как начальная скорость $v_0 = 0$

$$a = \frac{2s}{t^2} = \frac{2 \cdot 10}{5^2} = 0.8 \text{ м/с}^2$$

Согласно принципу Даламбера силы G , T и $F_{ин}$ находятся в равновесии, т.е.

$$T + F_{ин} - G = 0, \text{ откуда } T = G - F_{ин}.$$

Выражая силу инерции и силу тяжести через массу груза ($F_{ин} = ma$, $G = mg$), получаем

$$T = mg - ma = m(g - a) = 20(9.81 - 0.8) = 1802 \text{ Н}$$

Ответ: $\approx 1,8 \text{ кН}$

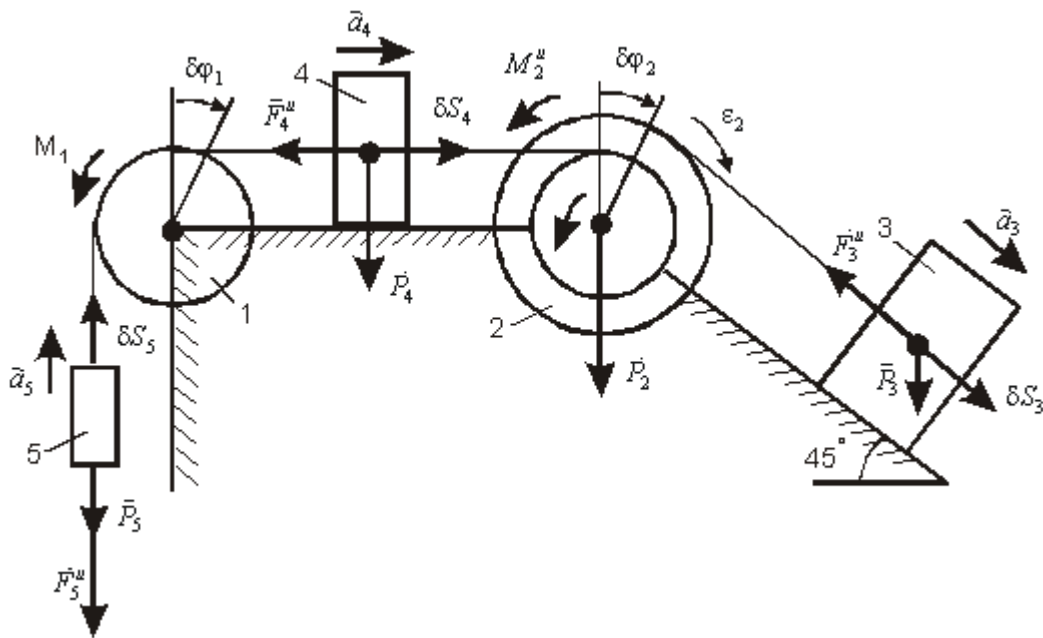
Образец задачи № 2.

Механическая система состоит из обмотанных нитями блока 1 радиуса R_1 и ступенчатого шкива 2 (радиусы ступеней R_2 и r_2 , радиус инерции относительно оси вращения I_2), а также из грузов 3, 4 и 5, прикрепленных к нитям. Система движется в вертикальной плоскости под действием сил тяжести и пары сил с моментом M_1 , приложенной к блоку 1.

Дано: $P_1 = 0$; $P_2 = 40 \text{ Н}$; $P_3 = 30 \text{ Н}$; $P_4 = 20 \text{ Н}$; $P_5 = 10 \text{ Н}$; $M = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $R_1 = 0,2 \text{ м}$; $R_2 = 0,3 \text{ м}$; $r_2 = 0,15 \text{ м}$; $I_2 = 0,2 \text{ м}^2$.

Определить: a_3 (трением пренебречь).

Указания. Задача – на применение к изучению движения системы общего уравнения динамики (принципа Даламбера – Лагранжа). Ход решения задачи такой же, как в задаче Д10, только предварительно надо присоединить к действующим на систему силам соответствующие силы инерции. Учесть при этом, что для однородного тела, вращающегося вокруг своей оси симметрии (шкива), система сил инерции приводится к паре с моментом $M'' = I_z \varepsilon$, где I_z – момент инерции тела относительно оси вращения, ε – угловое ускорение тела; направление M'' противоположно направлению ε .



Решение.

1. Рассмотрим движение механической системы, состоящей из тел 1, 2, ..., 5, соединенных нитями. Система имеет 1 степень свободы. Связи, наложенные на систему, – идеальные.

Для определения ускорения a_3 применим общее уравнение динамики:

$$\sum \delta A_k^a + \sum \delta A_k^u = 0 \quad (1)$$

где $\sum \delta A_k^a$ – сумма элементарных работ активных сил на любом возможном перемещении системы;

$\sum \delta A_k^u$ – сумма элементарных работ сил инерции соответственно.

2. Изображаем на чертеже активные силы: силы тяжести $\vec{P}_2, \vec{P}_3, \vec{P}_4, \vec{P}_5$ и пару сил с моментом M .

Задавшись направлением ускорения a_3 , изображаем на чертеже силы инерции $\vec{F}_3^u, \vec{F}_4^u, \vec{F}_5^u$ и пару сил с моментом M_2^u , величины которых равны:

$$F_3^u = \frac{P_3}{g} a_3;$$

$$F_4^u = \frac{P_4}{g} a_4; F_5^u = \frac{P_5}{g} a_5; M_2^u =$$

$$= I_2 \cdot \varepsilon_2 = \frac{P_2}{g} \rho_2^2 \varepsilon_2. \quad (2)$$

3. Сообщаем системе возможное перемещение и, составляя уравнение (1), получим

$$P_3 \cos 45^\circ \cdot \delta s_3 - F_3^u \delta s_3 - M_2^u \cdot \delta \varphi_2 - F_4^u \cdot \delta s_4 -$$

$$- M \delta \varphi_1 - P_5 \cdot \delta s_5 - F_5^u \cdot \delta s_5 = 0. \quad (3)$$

Выразим все возможные переменные через $\delta \varphi_1$:

$$\delta s_5 = \delta \varphi_1 \cdot R_1; \delta s_4 = \delta \varphi_1 \cdot R_1; \delta \varphi_2 = \frac{R_1}{r_2} \delta \varphi_1;$$

$$\delta s_3 = \delta \varphi_2 \cdot R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{r_2} \delta \varphi_1. \quad (4)$$

Подставим величины (2) и (4) в уравнение (3), приведем его к виду:

$$\left[P_3 \left(\cos 45^\circ - \frac{a_3}{g} \right) \cdot R_2 - \frac{P_2}{g} \rho_2^2 \varepsilon_2 - \frac{P_4}{g} a_4 R_1 - M - P_3 \left(1 + \frac{a_5}{g} \right) R_1 \right] \cdot \delta \varphi_1 = 0. \quad (5)$$

Входящие сюда величины ε_2 , a_4 , a_5 выразим через искомую величину a_3 :

$$\varepsilon_2 = \frac{a_3}{R_2}; a_4 = \frac{r_2}{R_2} a_3; a_5 = a_4 = \frac{r_2}{R_2} a_3.$$

Затем, учтя, что $\delta \varphi_1 \neq 0$, приравняем к нулю выражение, стоящее в (5) в квадратных скобках.

Из полученного уравнения найдем:

$$a_3 = \frac{(P_3 \cos 45^\circ R_2 - M - P_3 P_1) g}{P_3 R_2 + P_2 \rho_2^2 / R_2 + P_4 r_2 R_1 / R_2 + P_3 r_2 R_1 / R_2}.$$

Вычисления дают следующий ответ: $a_3 = -0,3 \text{ м/с}^2$. Знак «-» указывает, что ускорение груза 3 и ускорения других тел направлены противоположно.

Форма отчетности: отчет по лабораторной работе в электронном виде.

Задания для самостоятельной работы: повторение теоретического и практического материала по теме лабораторной работы с целью закрепления полученных навыков и умений.

Основная литература:

1) Лоскутов Ю.В. Лекции по теоретической механике: учебное пособие / Ю.В. Лоскутов; Поволжский государственный технологический университет. - Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. - 180 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=439200>

2) Прикладная механика: учебное пособие / Х.С. Гумерова, В.М. Котляр, Н.П. Петухов, С.Г. Сидорин; Министерство образования и науки России, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет». - Казань: Издательство КНИТУ, 2014. - 142 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=428011>

Дополнительная литература:

1) Богомаз И.В. Механика: учебное пособие / И.В. Богомаз. - Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2012. - 346 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=229251>

2) Вильке В.Г. Механика систем материальных точек и твердых тел: учебник / В.Г. Вильке; Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». - Москва: Физматлит, 2013. - 268 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=275429>

Лабораторная работа № 2 (1,5 часа).

Тема: Дифференциальные уравнения движения механической системы в обобщенных координатах.

Цель работы: изучить методы составления и решения дифференциальных уравнений движения механической системы в обобщенных координатах.

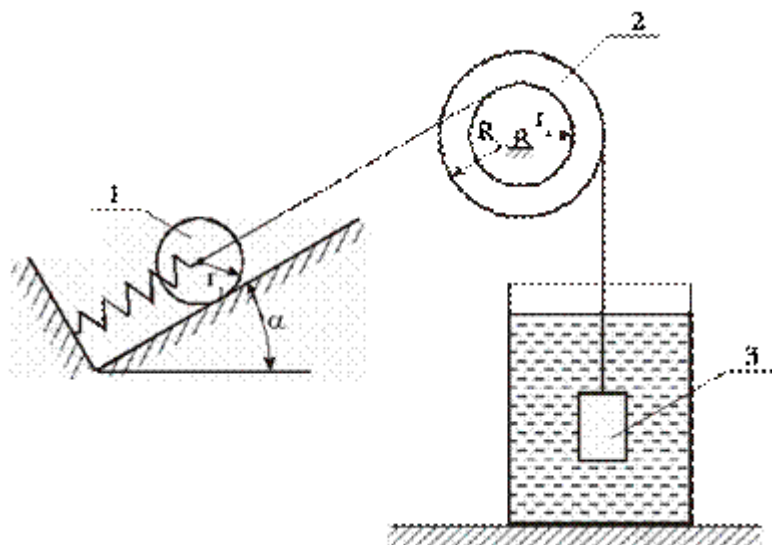
Ход работы: решение практических задач.

Образец задачи:

Исследовать движение механизма с одной степенью свободы, изображенного на рисунке. Определить реакции внешних и внутренних связей. Массами нитей и упругих элементов пренебречь. Нити считать нерастяжимыми и абсолютно гибкими. Соппротивление, возникающее в демпфирующем устройстве, принять пропорциональным первой степени скорости груза 3. В качестве координаты, определяющей положение системы, принять

перемещение груза 3 – S . Качение катка 1 происходит без скольжения. К грузу 3 приложена возмущающая сила $F(t)$.

Дано: m_1, m_2, m_3 - массы тел механической системы, c - жесткость упругого элемента, r_1 - радиус однородного катка 1, r_2, R_2 - радиусы ступеней блока 2, i_2 - радиус инерции блока 2, μ - коэффициент сопротивления среды, α - угол наклона плоскости, по которой катится каток 1.



Решение.

Общее уравнение динамики системы есть математическое выражение принципа Даламбера-Лагранжа

$$\sum_{k=1}^n \delta A_k^a + \sum_{k=1}^n \delta A_k^U = 0 \quad (1)$$

Здесь

$$\sum_{k=1}^n \delta A_k^a = \sum_{k=1}^n \vec{F}_k \cdot \delta \vec{r}_k$$

- сумма элементарных работ всех активных сил

на возможном перемещении системы;

$$\sum_{k=1}^n \delta A_k^U = - \sum_{k=1}^n m_k \cdot \vec{a}_k \cdot \delta \vec{r}_k$$

- сумма элементарных работ всех сил инерции

на возможном перемещении системы.

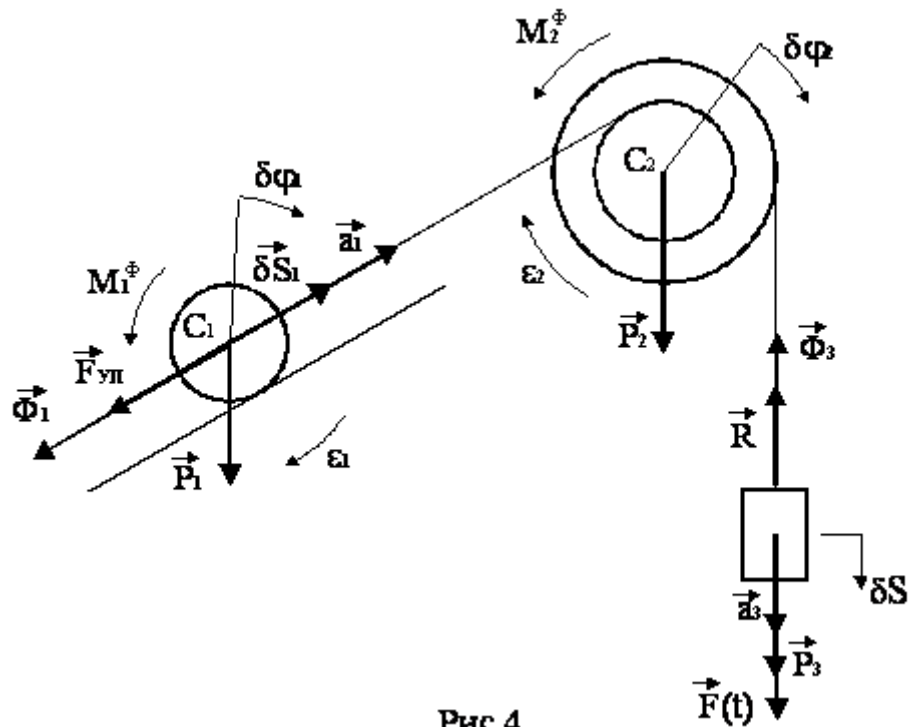


Рис.4

Изобразим на рисунке активные силы и силы инерции (рис.4). Реакции идеальных связей $\vec{N}_1, \vec{F}_{cy}, \vec{X}_2, \vec{Y}_2$ не учитывают и не отображают на расчетной схеме, поскольку по определению работа их реакций на любом возможном перемещении системы равна нулю. Пружина является неидеальной связью. Введем реакцию этой связи в число активных сил.

Сообщим системе возможное перемещение. Возможная работа активных сил определяется как сумма следующих элементарных работ:

$$\sum_{k=1}^n \delta A_k^a = \delta A_{F_1} + \delta A_{F_{up}} + \delta A_{F_2} + \delta A_{F_3} + \delta A_R \quad (2)$$

Вычисляя последовательно элементарные работы активных сил и суммируя их, получаем после несложных преобразований

$$\sum_{k=1}^n \delta A_k^a = \left[-c \cdot \frac{r_2^2}{R_2^2} \cdot S - \mu \cdot \dot{S} + F(t) \right] \cdot \delta S = F_{np} \cdot \delta S \quad (3)$$

Найдем возможную работу сил инерции:

$$\sum_{k=1}^n \delta A_k^I = -\Phi_1 \cdot \delta S_1 - M_1^{\phi} \cdot \delta \varphi - \Phi_3 \cdot \delta S - M_2^{\phi} \cdot \delta \varphi_2 \quad (4)$$

Для величин главных векторов и главных моментов сил инерции имеем следующие выражения:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= m_1 \cdot a_1 = m_1 \cdot \ddot{S}_1; & M_1^{\phi} &= J_{C1} \cdot \epsilon_1 = J_{C1} \cdot \ddot{\varphi}_1; \\ \Phi_3 &= m_3 \cdot a_3 = m_3 \cdot \ddot{S}; & M_2^{\phi} &= J_{C2} \cdot \epsilon_2 = J_{C2} \cdot \ddot{\varphi}_2. \end{aligned} \quad (5)$$

Используя кинематические соотношения, можно записать

$$\begin{aligned} \delta \varphi_2 &= \frac{1}{R_2} \cdot \delta S; & \ddot{\varphi}_2 &= \frac{1}{R_2} \cdot \ddot{S}; \\ \delta S_1 &= \frac{r_2}{R_2} \cdot \delta S; & \ddot{S}_1 &= \frac{r_2}{R_2} \cdot \ddot{S}; \\ \delta \varphi &= \frac{r_2}{r_1 \cdot R_2} \cdot \delta S; & \ddot{\varphi}_1 &= \frac{r_2}{r_1 \cdot R_2} \cdot \ddot{S}. \end{aligned} \quad (6)$$

Тогда возможную работу сил инерции можно преобразовать к виду

$$\sum_{k=1}^n \delta A_k^H = - \left(\frac{3}{2} \cdot m_1 \frac{r_2^2}{R_2^2} + m_2 \frac{i_2^2}{R_2^2} + m_3 \right) \cdot \ddot{S} \cdot \delta S \quad (7)$$

или

$$\sum_{k=1}^n \delta A_k^H = -m_{np} \cdot \ddot{S} \cdot \delta S \quad (8)$$

где

$$m_{np} = \frac{3}{2} \cdot m_1 \frac{r_2^2}{R_2^2} + m_2 \frac{i_2^2}{R_2^2} + m_3 \quad (9)$$

Подставляя выражения (3) и (8) в общее уравнение динамики (1), получаем

$$\left[-c \cdot \frac{r_2^2}{R_2^2} \cdot S - \mu \cdot \dot{S} + F(t) \right] \cdot \delta S - m_{np} \cdot \ddot{S} \cdot \delta S = 0 \quad (10)$$

Поделив (10) на $\delta S \neq 0$, получим дифференциальное уравнение вынужденных колебаний системы:

$$\ddot{S} + 2 \cdot n \cdot \dot{S} + k^2 \cdot S = \frac{F_0}{m_{np}} \cdot \sin(pt) \quad (11)$$

где

$$k = \frac{r_2}{R_2} \sqrt{\frac{c}{m_{np}}};$$

$$n = \frac{\mu}{2 \cdot m_{np}} \quad (12)$$

Составление дифференциального уравнения движения механизма с помощью уравнений Лагранжа 2-го рода.

Составим теперь уравнения Лагранжа 2-го рода. Для механической системы с одной степенью свободы дифференциальное уравнение движения в обобщенных координатах имеет вид:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{S}} - \frac{\partial T}{\partial S} = Q \quad (13)$$

где T - кинетическая энергия системы;

Q - обобщенная сила;

S - обобщенная координата;

\dot{S} - обобщенная скорость.

Выражение для кинетической энергии системы было найдено ранее (1.8):

$$T = \frac{1}{2} \cdot m_{np} \cdot V^2$$

где

$$m_{np} = \frac{3}{2} \cdot m_1 \frac{r_2^2}{R_2^2} + m_2 \frac{i_2^2}{R_2^2} + m_3$$

Учитывая, что $V^2 = \dot{S}^2$, получаем

$$T = \frac{1}{2} \cdot m_{np} \cdot \dot{S}^2 \quad (14)$$

Производные от кинетической энергии

$$\frac{\partial T}{\partial S} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{S}} = m_{np} \dot{S}; \quad \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{S}} = m_{np} \ddot{S} \quad (15)$$

Для определения обобщенной силы Q сообщим системе возможное перемещение δS^1 (рис. 4) и вычислим сумму элементарных работ всех активных сил на возможных перемещениях точек их приложения:

$$\sum_{k=1}^n \delta A_k^a = \left[-c \cdot \frac{r_2^2}{R_2^2} \cdot S - \mu \cdot \dot{S} + F(t) \right] \cdot \delta S$$

С другой стороны для системы с одной степенью свободы

$$\sum_{k=1}^n \delta A_k^a = Q \cdot \delta S \quad (16)$$

Сравнивая два последних соотношения, получаем

$$Q = -c \cdot \frac{r_2^2}{R_2^2} \cdot S - \mu \cdot \dot{S} + F(t) \quad (17)$$

Подставляя производные от кинетической энергии (15) и обобщенную силу (16) в уравнение Лагранжа, получаем

$$m_{np} \cdot \ddot{S} = -c \cdot \frac{r_2^2}{R_2^2} \cdot S - \mu \cdot \dot{S} + F(t)$$

или

$$\ddot{S} + 2 \cdot n \cdot \dot{S} + k^2 \cdot S = \frac{F_0}{m_{np}} \cdot \sin(pt) \quad (18)$$

Форма отчетности: отчет по лабораторной работе в электронном виде.

Задания для самостоятельной работы: повторить теоретическую часть материала по теме лабораторной работы с целью закрепления полученных навыков и умений.

Основная литература:

1) Лоскутов Ю.В. Лекции по теоретической механике: учебное пособие / Ю.В. Лоскутов; Поволжский государственный технологический университет. - Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. - 180 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=439200>

2) Прикладная механика: учебное пособие / Х.С. Гумерова, В.М. Котляр, Н.П. Петухов, С.Г. Сидорин; Министерство образования и науки России, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет». - Казань: Издательство КНИТУ, 2014. - 142 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=428011>

Дополнительная литература:

1) Богомаз И.В. Механика: учебное пособие / И.В. Богомаз. - Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2012. - 346 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=229251>

2) Вильке В.Г. Механика систем материальных точек и твердых тел: учебник / В.Г. Вильке; Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». - Москва: Физматлит, 2013. - 268 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=275429>

Лабораторная работа № 3 (1,5 часа).

Тема: Определение расчетных характеристик сопротивления усталости.

Цель работы: изучить основные методы определения расчетных характеристик сопротивления усталости

Ход работы: решение практических задач.

Методика расчета:

1. Основы расчета сопротивления усталости.

Рассмотрим особенности методики оценки сопротивления усталости. При этом будем следовать набору шагов, предлагаемому в государственных стандартах и широко распространенных нормах расчета на прочность [14]. В соответствии с указанными документами данную последовательность шагов можно схематично представить в виде диаграммы, приведенной на рис. 1.

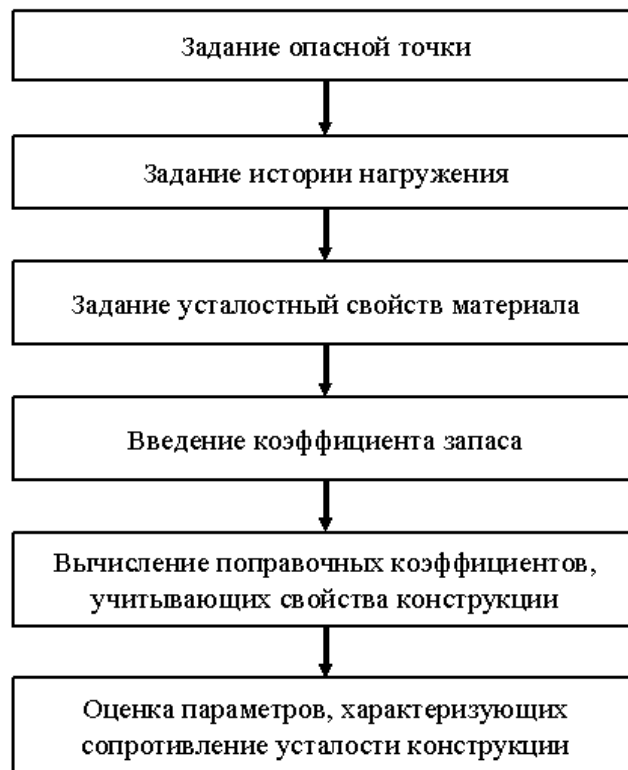


Рис. 1. Последовательность действий при оценке сопротивления усталости

Остановимся подробнее на первой стадии процесса оценки сопротивления усталости – «задание опасной точки». Наличие данного этапа было обусловлено тем, что все приведенные выше нормы по оценке сопротивления усталости были сформулированы для исследования стандартных элементов конструкций – элементов сводимых к стержням или пластинам, находящихся в условиях пропорционального нагружения (данный термин будет рассмотрен подробнее ниже). При сочетании приведенных выше условий на геометрию конструкции и характер нагружения опасная точка всегда может быть заранее однозначно локализована, поэтому в дальнейшем рассматривается не все конструкция в целом, а только опасная точка. В настоящее время возник достаточно большой класс элементов конструкций, которые могут быть рассмотрены только как трехмерные тела без возможности упрощения их геометрии. Помимо этого, достаточно часто возникает ситуация когда нагружение является не пропорциональным. Вследствие указанного априорная локализация опасной точки становится невозможной, и возникает задача оценки распределения по конструкции полей параметров, характеризующих сопротивление усталости. Таким образом, из последовательности действий при оценке сопротивления усталости исчезает первый пункт.

2. Задание истории нагружения

Перед определением последовательности действий, соответствующих блоку «задание истории нагружения», ответим сначала на два вопроса: что есть история нагружения и что должно получиться на выходе из данного блока.

Под историей нагружения конструкции будем понимать зависимость от времени всех компонент тензора напряжений в каждой точке рассматриваемой конструкции за весь период эксплуатации. Данное определение, на первый взгляд, выглядит достаточно запутанным и должно приводить к большому объему вычислений, так как оно требует знания зависимости от времени каждой из компонент тензора напряжений в каждой точке. Так ли это?

Напомним определение процесса многоциклового усталости: *многоцикловая усталость материала – это усталость материала, при которой усталостное повреждение и разрушение происходит в основном при упругом деформировании*. Обратим внимание на то, что процесс происходит в основном при упругом деформировании, следовательно, система в ходе рассматриваемого процесса является линейной: напряжения, деформации и перемещения, возникающие в точках системы, прямо пропорциональны внешним усилиям.

Схематично данная методика, приведена на диаграмме, представленной на рис. 2. Согласно рассматриваемому подходу на первом этапе производится статический расчет изучаемой конструкции под действием системы сил F . На втором этапе задается некоторый временной ряд $T(t)$, который описывает историю изменения системы сил F в течение времени эксплуатации системы. Окончательно история изменения системы внешних сил за время эксплуатации конструкции будет определяться по формуле

$$F(t) = k_{sc} FT(t), \quad (1)$$

где k_{sc} – шкалирующий множитель, служащий для подгона значения статической силы F к интервалу изменения переменной нагрузки.



Рис. 2. Схема определения истории нагружения

С учетом линейности системы зависимость некоторой компоненты напряженного состояния в некоторой точке конструкции с координатами (x, y, z) от времени будет иметь вид

$$\sigma_{ij}(t) = \sigma_{ij}^{FE} k_{sc} T(t), \quad (2)$$

где $i, j = \overline{x, y, z}$, σ_{ij}^{FE} – значение рассматриваемой компоненты напряженного состояния в изучаемой точке, полученное в результате решения статической задачи. Таким образом, задача о нахождении истории нагружения сводится к определению временного ряда $T(t)$ и его последующего преобразования, так как с учетом линейности системы зависимость от времени всех компонент напряженного состояния во всех точках конструкции будет одинакова. Такой вид нагружения так же называют *пропорциональным нагружением*.

Перейдем к рассмотрению второго вопроса, поставленного в начале данного подпункта: что должно получиться на выходе из блока задание истории нагружения. Ответ на этот вопрос, очевидно, связан с входной информацией используемой в последующих блоках, а, именно, в блоке «оценка параметров, описывающих сопротивление усталости». Данная оценка базируется на соотношениях, задающих связь между долговечностью изделия и уровнем внешнего нагружения. Указанные зависимости базируются на описании

экспериментальных данных, полученных по результатам испытаний образцов в условиях одноосного нагружения, изменяющегося по закону синуса с постоянными параметрами цикла нагружения – *регулярного нагружения*. Таким образом, анализ приведенных выше сведений показывает, что в качестве выходных параметров для блока задание истории нагружения должны выступать характеристики регулярного цикла нагружения, например: амплитудное и среднее значение напряжения в цикле.

3. Случай пропорционального нагружения.

С учетом сформулированных ответов на поставленные в начале подпункта 1 вопросы общая схема сведения истории нагружения к виду пригодному для последующего использования будет иметь вид, представленный на рис. 3.



Рис. 3. Схема сведения истории нагружения в случае пропорционального нагружения

С учетом формулы (2), в данной схеме в качестве истории нагружения должен быть рассмотрен временной ряд $T(t)$. Как видно из рис. 3 в случае регулярного нагружения процесс заканчивается определением амплитудного T_a и среднего значения T_m рассматриваемого временного ряда в ходе цикла нагружения.

В случае *блочного нагружения* сначала определяются параметры блока нагружения: число ступеней в блоке l и длительность n_g ($g = \overline{1, l}$) – число циклов в каждой ступени. На следующем этапе, учитывая, что в пределах каждой ступени нагружение является регулярным, для каждой ступени определяются характеристики регулярного цикла нагружения: амплитудное T_{a_g} и среднее значения T_{m_g} цикла нагружения.

В случае *случайного нагружения* на первом этапе проводится замена исходного случайного нагружения эквивалентным по повреждаемости блочным нагружением путем, так называемой, схематизации процесса нагружения. Наиболее распространены в настоящее время два метода, реализующих данную процедуру: «падающего дождя» и «полных циклов»

После проведения процесса схематизации дальнейшая последовательность шагов совпадает с последовательностью в случае блочного нагружения.

Таким образом, результатом описанной выше схемы в общем случае является набор T_{ag} , T_{mg} и n_g при $\mathbf{g} = \overline{1, l}$, характеризующий историю внешнего воздействия (в случае регулярного нагружения n_g отсутствует, а $l = 1$). Для конструкции с учетом формулы (2) получим характеристики истории нагружения для компонент тензора напряжений

$$\begin{cases} \sigma_{ija g} = \sigma_{ij}^{FE} k_{sc} T_{a g} ; i, j = \overline{x, y, z}; g = \overline{1, l} . \\ \sigma_{ijm g} = \sigma_{ij}^{FE} k_{sc} T_{m g} \end{cases} \quad (3)$$

Полученные соотношения (3) предполагают, что в точках конструкции возникает многоосное напряженное состояние. Существующие зависимости, связывающие долговечность изделия и внешнее нагружение, получены в условиях одноосного нагружения. Поэтому необходимо полученные характеристики истории нагружения для компонент тензора напряжений свести к эквивалентным по повреждаемости характеристикам в условиях одноосного нагружения. Для выполнения данного перехода применяются различные соотношения, базирующиеся в своей массе на критериях прочности в статическом случае, и позволяющие материалов различного типа. С использованием подобны соотношений ниже записаны зависимости для приведенных (эквивалентных по повреждаемости одноосных) амплитудных и средних значений напряжений цикла нагружения [13]

максимального главного напряжения

$$\begin{cases} \sigma_a^{пр} = \begin{cases} \sigma_{1a}, |\sigma_{1a}| \geq |\sigma_{3a}| \\ \sigma_{3a}, |\sigma_{1a}| < |\sigma_{3a}| \end{cases} ; \\ \sigma_m^{пр} = \begin{cases} \sigma_{1m}, |\sigma_{1m}| \geq |\sigma_{3m}| \\ \sigma_{3m}, |\sigma_{1m}| < |\sigma_{3m}| \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

максимального касательного напряжения

$$\begin{cases} \sigma_a^{пр} = \sigma_{1a} - \sigma_{3a} ; \\ \sigma_m^{пр} = \sigma_{1m} - \sigma_{3m} \end{cases} \quad (5)$$

удельной энергии формоизменения

$$\begin{cases} \sigma_a^{пр} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{1a} - \sigma_{2a})^2 + (\sigma_{2a} - \sigma_{3a})^2 + (\sigma_{3a} - \sigma_{1a})^2} \\ \sigma_m^{пр} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{1m} - \sigma_{2m})^2 + (\sigma_{2m} - \sigma_{3m})^2 + (\sigma_{3m} - \sigma_{1m})^2} \end{cases} , \quad (6)$$

где $\sigma_{1a}, \sigma_{2a}, \sigma_{3a}$ и $\sigma_{1m}, \sigma_{2m}, \sigma_{3m}$ – главные напряжения тензоров амплитудных и средних значений напряжений соответственно, получаемых с использованием соотношений (3).

Так же как и в случае рассмотрения статического нагружения использование соотношений (4) предпочтительно в случае хрупких материалов, а использование соотношений (5) и (6) предпочтительнее в случае пластичных материалов. При анализе соотношений (5) и (6)

можно заметить, что приведенное среднее напряжений цикла принимает только неотрицательные значения. При этом, средние напряжения существенно влияют на сопротивление усталости.

Для учета данного замечания реализуется зависимость для приведенных (эквивалентных по повреждаемости одноосных) амплитудных и средних значений напряжений цикла нагружения

удельной энергии формоизменения со знаком

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_a^{\text{пр}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{1a} - \sigma_{2a})^2 + (\sigma_{2a} - \sigma_{3a})^2 + (\sigma_{3a} - \sigma_{1a})^2} \cdot \text{sign}(\sigma_{1a}) \\ \sigma_m^{\text{пр}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{1m} - \sigma_{2m})^2 + (\sigma_{2m} - \sigma_{3m})^2 + (\sigma_{3m} - \sigma_{1m})^2} \cdot \text{sign}(\sigma_{1m}) \end{array} \right. , \quad (7)$$

где $\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$ – функция знак числа.

Таким образом, вместо истории нагружения, задаваемой формулой (3), для каждой точки конструкции с координатами (x, y, z) получаем набор приведенных характеристик истории нагружения $\sigma_{ag}^{\text{пр}}$ и $\sigma_{mg}^{\text{пр}}$, $g = \overline{1, l}$ с использованием одной из формул (4)–(7).

Обратимся снова к зависимостям, связывающим долговечность и характеристики внешнего нагружения. В большинстве случаев указанные соотношения получены при симметричном цикле нагружения, и, значит, не учитывают наличие среднего напряжения цикла. Как было отмечено выше, средние напряжения существенно влияют на сопротивление усталости [18]. Следовательно, полученные характеристики истории нагружения сведем к эквивалентным по повреждаемости характеристикам в условиях симметричного цикла нагружения. Для выполнения данного перехода используем соотношения для амплитуды эквивалентного симметричного цикла напряжений $\sigma_{a\text{экв}}$:

на основании зависимости Гудмана

$$\sigma_{a\text{экв}} = \begin{cases} \frac{\sigma_a^{\text{пр}}}{1 - \frac{\sigma_m^{\text{пр}}}{\sigma_B}}, & \sigma_m^{\text{пр}} \geq 0 \\ 0, & \sigma_m^{\text{пр}} < 0 \end{cases} , \quad (8)$$

на основании зависимости Гербера

$$\sigma_{a\text{экв}} = \frac{\sigma_a^{\text{пр}}}{1 - \left(\frac{\sigma_m^{\text{пр}}}{\sigma_B} \right)^2} , \quad (9)$$

на основании зависимости Зодерберга

$$\sigma_{a\text{экв}} = \begin{cases} \frac{\sigma_a^{\text{пр}}}{1 - \frac{\sigma_m^{\text{пр}}}{\sigma_T}}, & \sigma_m^{\text{пр}} \geq 0 \\ 0, & \sigma_m^{\text{пр}} < 0 \end{cases} , \quad (10)$$

где σ_B – предел прочности материала, σ_T – предел текучести материала.

Результатом задания и сведения истории нагружения к форме пригодной для дальнейшей обработки является последовательность эквивалентных характеристик истории нагружения $\sigma_{a \text{ экв } g}$, $g = \overline{1, l}$, полученная с использованием одной из формул (8)–(10).

Форма отчетности: отчет по лабораторной работе в электронном виде.

Задания для самостоятельной работы: повторить теоретическую часть материала по теме лабораторной работы с целью закрепления полученных навыков и умений.

Основная литература:

1) Лоскутов Ю.В. Лекции по теоретической механике: учебное пособие / Ю.В. Лоскутов; Поволжский государственный технологический университет. - Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. - 180 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=439200>

2) Прикладная механика: учебное пособие / Х.С. Гумерова, В.М. Котляр, Н.П. Петухов, С.Г. Сидорин; Министерство образования и науки России, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет». - Казань: Издательство КНИТУ, 2014. - 142 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=428011>

Дополнительная литература:

1) Богомаз И.В. Механика: учебное пособие / И.В. Богомаз. - Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2012. - 346 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=229251>

2) Вильке В.Г. Механика систем материальных точек и твердых тел: учебник / В.Г. Вильке; Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». - Москва: Физматлит, 2013. - 268 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=275429>

3) Рахматулин Х.А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках / Х.А. Рахматулин, Ю.А. Демьянов. - изд. 2-е, дополн. - Москва: Логос, 2009. - 512 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=84891>

Лабораторная работа № 4 (1,5 часа).

Тема: Долговечность при переменных напряжениях.

Цель работы: изучить основные методы расчета долговечности при переменных напряжениях для случая нагружения общего вида.

Ход работы: решение практических задач.

Методика расчета:

Рассмотрим случай, когда к телу приложена система внешних сил F_1 история нагружения, которой описывается временным рядом $T_1(t)$, и система внешних сил F_2 история нагружения, которой описывается временным рядом $T_2(t)$. Пусть эти системы сил таковы, что хотя бы в одной точке рассматриваемой конструкции направления главных напряжений от сил первой системы не совпадают с направлениями главных напряжений от сил второй системы. В этом случае в процессе нагружения во время эксплуатации конструкции в указанной точке направления главных напряжений будут изменяться. Такое нагружение будем называть *непропорциональным нагружением*. Примером подобного нагружения является комбинация циклического изгибающего $M_{и}$ и крутящего $M_{к}$ моментов, приложенных к стержню с круговым поперечным сечением и изменяющихся не синфазно. Направления главных напряжений в данном случае для различных моментов нагружения приведены на рис. 4.

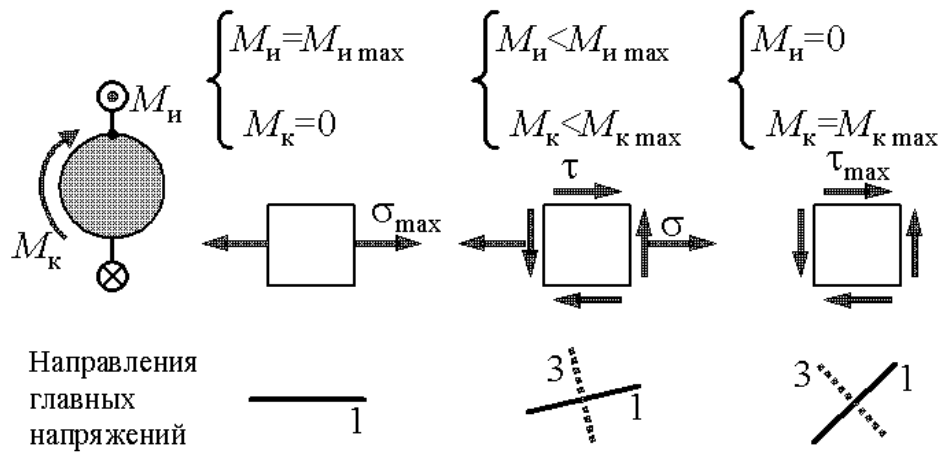


Рис. 4. Изменение направления главных напряжений во время цикла нагружения при противофазном приложении изгибающего и крутящего момента

Таким образом, в случае непропорционального нагружения формула (2) и все приведенные после нее соотношения напрямую не применимы в случае непропорционального нагружения. Данное утверждение приводит к вопросу: означает ли высказанное положение, что при непропорциональном нагружении необходимо для каждой компоненты тензора напряжений в каждой точке конструкции находить историю нагружения и схематизировать ее самостоятельно?

Ответ на поставленный вопрос заключен в постановке задачи, с которой было начато рассмотрение текущего подпункта: есть набор сил, и каждая из сил набора имеет собственную историю нагружения. Следовательно, изложенную в подпункте 1.1.1 методику можно применить к каждой силе, а затем провести комбинацию характеристик историй нагружения от каждой силы по отдельности в единую историю от всех сил. Схематично подобная процедура описана на рис. 5.

Рассмотрим подробнее принципы, изложенные на рис. 5.

На первом этапе осуществляется обработка каждого временного ряда T_p $p = \overline{1, k}$ по отдельности, в соответствии с изложенной в подпункте 1.1.1 методикой. Результатом указанной обработки являются набор характеристик эквивалентной по повреждаемости блочной регулярной истории нагружения для каждой из внешних нагрузок T_{ag}^p , T_{mg}^p и n_g^p при $g = \overline{1, l_p}$ и $p = \overline{1, k}$, характеризующий историю внешнего воздействия (в случае регулярного нагружения n_g^p отсутствует, а $l_p = 1$).

Порядок действий выполняемых на втором этапе зависит от виде нагружения: при пропорциональном нагружении $k = 1$ проводится сведение истории нагружения к форме пригодной для дальнейшей обработки является последовательность эквивалентных характеристик истории нагружения $\sigma_{a_{\text{эв}g}}$, $g = \overline{1, l}$

Рассмотрим более подробно случай непропорционального нагружения.



Рис. 5. Схема сведения истории нагружения в общем случае нагружения

В случае указанного типа нагружения для конструкции с учетом формулы (2) получим характеристики истории нагружения для компонент тензора напряжений для каждой из внешних нагрузок F_p $p = \overline{1, k}$

$$\begin{cases} \sigma_{ija g}^p = \sigma_{ij p}^{FE} k_{sc} T_{a g}^p \\ \sigma_{ijm g}^p = \sigma_{ij p}^{FE} k_{sc} T_{m g}^p \end{cases}; i, j = \overline{x, y, z}; g = \overline{1, l_p}; p = \overline{1, k}, \quad (11)$$

где $\sigma_{ij p}^{FE}$ значение рассматриваемой компоненты напряженного состояния в изучаемой точке, полученное в результате решения статической задачи при условии воздействия только силы F_p .

Следующим этапом при обработке истории непропорционального нагружения является свертка нескольких историй нагружения в одну. Рассмотрим особенности проведения данной операции. Основной задачей, возникающей в указанном случае, является задача о методе свертки. Предположим, имеются две истории нагружения некоторой компоненты σ_{xx} в некоторой точке конструкции. Характерный вид данных зависимостей приведен на рис. 6 в случае различной величины сдвига фаз.

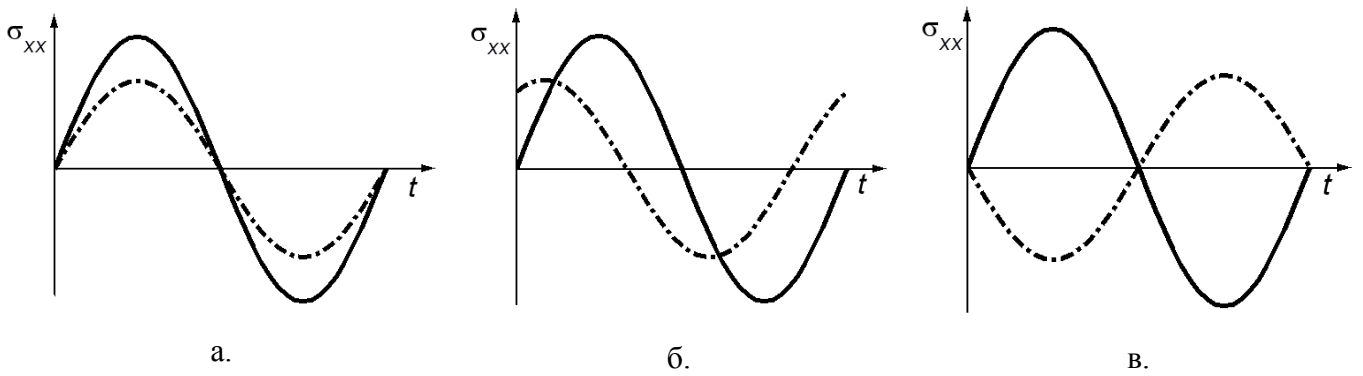


Рис. 6. Зависимость напряжения от времени в случае двух внешних нагрузок, изменяющихся синфазно (а), с произвольным сдвигом по фазе (б) и противофазно (в).

Представленные на рис. 6 значения показаны для одного периода нагружения.

Целью является получение эквивалентной по повреждаемости единичной истории нагружения. Простое суммирование характеристик истории нагружения недопустимо, так как, во-первых, возможен сдвиг фаз (рис. 6 б и в), а, во-вторых, периоды циклов рассматриваемых историй нагружения могут не совпадать.

Предположим, что результатом свертки является некоторая история нагружения, для которой исходные истории нагружения являются огибающими (рис. 7 а). В данном случае при построении свертки учитывается влияние, как сдвига фаз, так и возможное не совпадение периодов нагружения (рис. 7 б)

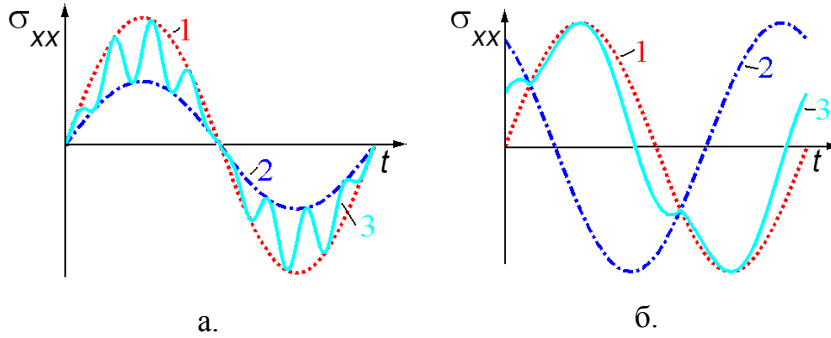


Рис. 7. Вид историй напряжения (1 и 2) и результата свертки (3) при синфазном нагружении (а) и нагружении со сдвигом фазы (б)

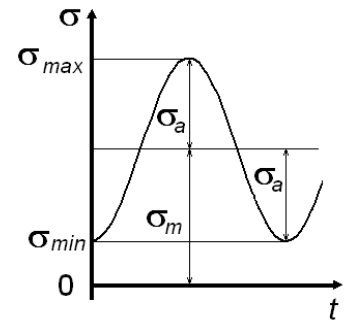


Рис. 8. Параметры регулярного цикла нагружения

С учетом введенного выше предположения о методе свертке выражения для единичной истории нагружения в рассматриваемом случае имеет вид

$$\sigma_{xx}(t) = \frac{\sigma_{xx}^1(t) + \sigma_{xx}^2(t)}{2} + \frac{|\sigma_{xx}^1(t) - \sigma_{xx}^2(t)|}{2} \sin 2\pi \nu t, \quad (12)$$

где $\sigma_{xx}^1(t), \sigma_{xx}^2(t)$ – история изменения компоненты σ_{xx} от первой и второй нагрузки соответственно, ν – частота цикла нагружения.

В общем случае k внешних нагрузок с использованием формулы (12) получим следующие соотношения для характеристик цикла нагружения после свертки в некоторой точке конструкции с координатами (x, y, z)

$$\sigma_{ij \max g} = \max_{p \in [1, k]} \{ \sigma_{ij \max g}^p \}; \quad i, j = \overline{x, y, z}; \quad g = \overline{1, l}, \quad (13)$$

$$\sigma_{ij \min g} = \begin{cases} \min_{p \in [1, k]} \{ \sigma_{ij \max g}^p \}, \text{sign} \left[\prod_{p=1}^k \sigma_{ij p}^{FE} \right] \geq 0 \\ \min_{p \in [1, k]} \{ \sigma_{ij \min g}^p \}, \text{sign} \left[\prod_{p=1}^k \sigma_{ij p}^{FE} \right] < 0 \end{cases} ; i, j = \overline{x, y, z}; g = \overline{1, l} , \quad (14)$$

где $\sigma_{ij \max g}, \sigma_{ij \min g}$ – максимальное и минимальное напряжение цикла рассматриваемой компоненты напряженного состояния после свертки, $\sigma_{ij \max g}^p, \sigma_{ij \min g}^p$ и – максимальное и минимальное напряжение цикла рассматриваемой компоненты напряженного состояния при условии воздействия только внешней силы F_p . Смысл максимального и минимального напряжения цикла, амплитудного и среднего значения напряжения в цикле пояснен на рис. 8. С учетом данного рисунка искомый набор характеристик истории нагружения после свертки примет вид

$$\sigma_{ija g} = \frac{\sigma_{ij \max g} - \sigma_{ij \min g}}{2}; i, j = \overline{x, y, z}; g = \overline{1, l} , \quad (15)$$

$$\sigma_{ijm g} = \frac{\sigma_{ij \max g} + \sigma_{ij \min g}}{2}; i, j = \overline{x, y, z}; g = \overline{1, l} , \quad (16)$$

$\sigma_{ija g}, \sigma_{ijm g}$ – амплитудное и среднее значение напряжение цикла рассматриваемой компоненты напряженного состояния после свертки.

Последующие два этапа обработки истории нагружения при непропорциональном нагружении идентичны соответствующим этапам при обработке пропорционального нагружения. Найденный с применением формул (15) и (16) набор характеристик истории нагружения $\sigma_{ija g}, \sigma_{ijm g} \quad g = \overline{1, l}$, с использованием описанной в подпункте 1.1.1 процедуры сначала сводится к набору приведенных характеристик истории нагружения $\sigma_{ag}^{пр}$ и $\sigma_{mg}^{пр}$, $g = \overline{1, l}$, получаемому с использованием одной из формул (4), (5), (6) или (7); который приводится к последовательности эквивалентных характеристик истории нагружения $\sigma_{a экв g}$, $g = \overline{1, l}$, получаемой с использованием одной из формул (8), (9) или (10).

Форма отчетности: отчет по лабораторной работе в электронном виде.

Задания для самостоятельной работы: повторить теоретическую часть материала по теме лабораторной работы с целью закрепления полученных навыков и умений.

Основная литература:

1) Лоскутов Ю.В. Лекции по теоретической механике: учебное пособие / Ю.В. Лоскутов; Поволжский государственный технологический университет. - Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. - 180 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=439200>

2) Прикладная механика: учебное пособие / Х.С. Гумерова, В.М. Котляр, Н.П. Петухов, С.Г. Сидорин; Министерство образования и науки России, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет». - Казань: Издательство КНИТУ, 2014. - 142 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=428011>

Дополнительная литература:

1) Богомаз И.В. Механика: учебное пособие / И.В. Богомаз. - Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2012. - 346 с. [Электронный ресурс].

URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=229251>

2) Вильке В.Г. Механика систем материальных точек и твердых тел: учебник / В.Г. Вильке; Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». - Москва: Физматлит, 2013. - 268 с.

[Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=275429>

Лабораторная работа № 5 (1,5 часа).

Тема: Усталость деталей машин, ее природа и процесс разрушения.

Цель работы: изучить основные подходы к оценке усталостных свойств материалов деталей машин, их выбор при расчете усталостных характеристик.

Ход работы: решение практических задач.

Методика расчета:

При оценке сопротивления усталости необходимым этапом является задание свойств материала конструкции. Выбор вида зависимостей, связывающих приложенную нагрузку с параметрами, характеризующими сопротивление усталости: долговечностью и уровнем накопленных повреждений.

При изучении процесса многоциклового усталости основной характеристикой материала, используемой для описания связи уровня внешней нагрузки с соответствующей ему долговечностью, является кривая усталости. Эта кривая описывает зависимость максимального значения напряжения (амплитуды деформации) в цикле от числа циклов до разрушения при данном уровне максимального напряжения, постоянного в ходе всего процесса нагружения. Указанная кривая является аппроксимацией экспериментальных данных.

Согласно приведенному выше определению кривой усталости существуют два показателя существенно влияющих на описание сопротивления усталости указанной кривой. Во-первых, кривая усталости строится для некоторого уровня асимметрии цикла нагружения с коэффициентом асимметрии

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} \quad (17)$$

В том случае, если существующая кривая построена для одного уровня асимметрии цикла нагружения, а изделие должно эксплуатироваться при другом уровне асимметрии нагружения, то либо историю нагружения надо свести к известному уровню асимметрии нагружения, например, с использованием зависимостей (8) – (10), либо воспользоваться таким описанием кривой усталости, в котором учитывается уровень асимметрии цикла нагружения (в этом случае из цепочек на схеме, приведенной на рис. 5, выбрасывается этап «Учет асимметрии цикла»). Во-вторых, конструкции могут содержать локальные концентраторы напряжений, например: надрезы на поверхности изделия, для металлов крупные включения (с размером больше размера зерна) и т.п. Наличие подобных объектов будет приводить к возникновению областей локальных пластических деформаций при уровне внешней нагрузки близкой к границе между областями многоциклового и малоциклового усталости. Последнее требует учета влияния локальной пластичности на сопротивление усталости, следовательно, внешнее нагружение должно быть описано уровнем полной деформации. Таким образом, при отсутствии локальной пластичности кривая усталости представляет собой зависимость долговечности от уровня напряжений, а при наличии локальной пластичности кривая усталости представляет собой зависимость долговечности от уровня полной деформации. Общая схема определения требуемого набора параметров материала для описания сопротивления усталости конструкции приведена на рис. 9.

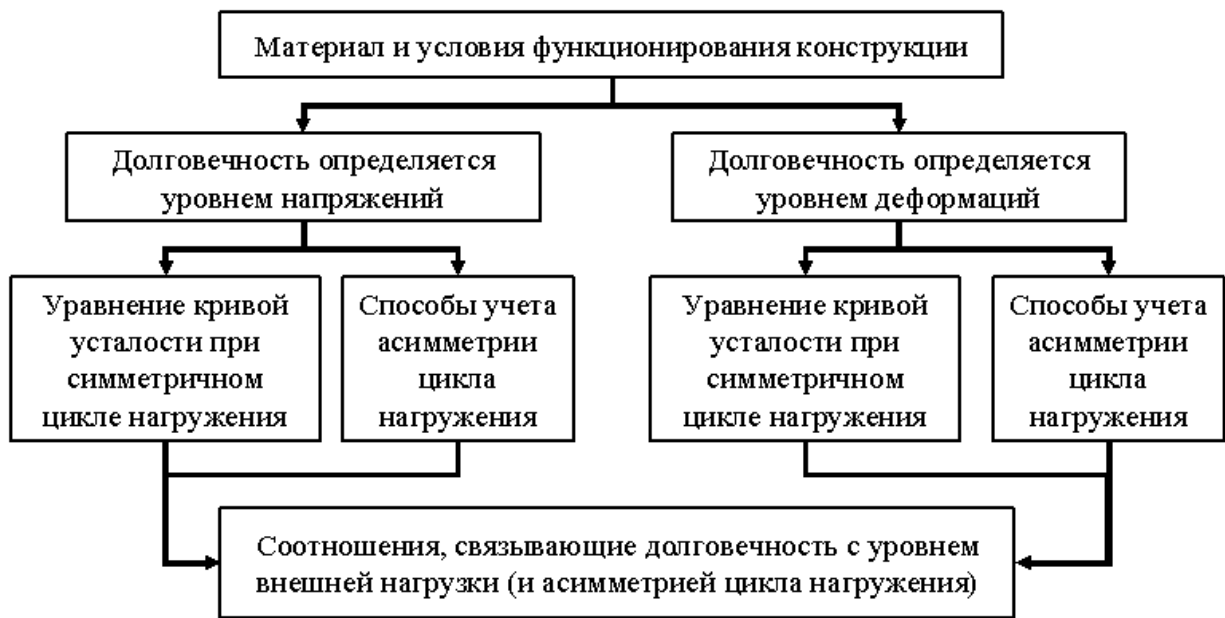


Рис. 9. Схема задания усталостных свойств материала конструкции

Рассмотрим подробнее особенности задания свойств материала для каждой из цепочек, приведенных на рис. 9.

В области многоциклового усталости описание долговечности, как функции от характеристик цикла напряжений является общепринятым классическим описанием. Кривая усталости в данном случае носит название кривой Велера (Wöhler) [11, 13]. Достаточно часто в зарубежной литературе подобный подход носит название SN подхода, а кривая усталости при таком описании – SN кривой (название связано с аббревиатурой от названий осей координат на кривой Велера: напряжение vs. число циклов до отказа, что на английском языке *Stress vs. N*) [11].

Вид SN кривой для различных материалов показан на рис. 10 [13].

При рассмотрении кривых усталости, изображенных на рис. 10, можно заметить, что наклонные участки должны достаточно хорошо описываться степенной функцией. Подобную зависимость предложил Басквин (Basquin)

$$\sigma_{\max} = CN^b \quad (18)$$

В настоящее время для каждого из типов кривой усталости предложено уравнение, базирующееся на зависимости Басквина [13].

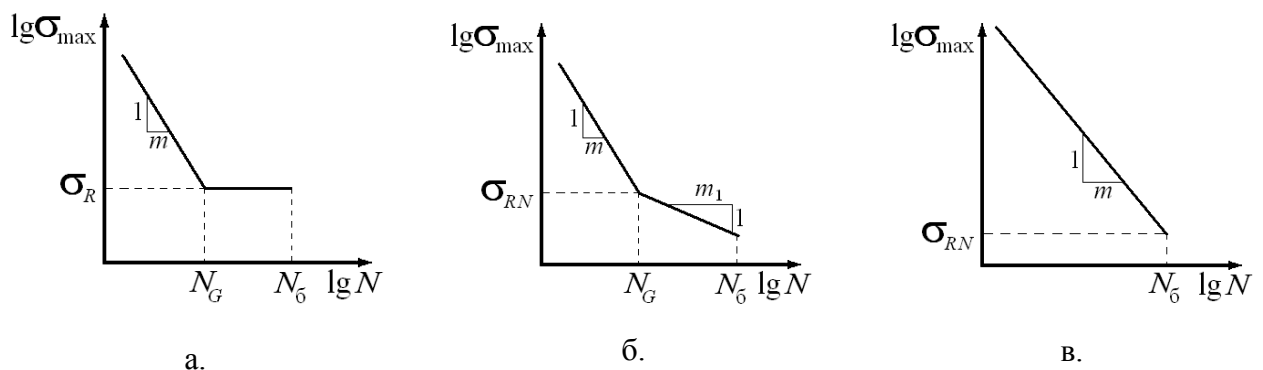


Рис. 10. Схематичный вид кривой Велера для разных материалов: углеродистые и среднелегированные стали (а), алюминий, медь и их сплавы и нержавеющие стали (б) и высокопрочные стали и титановые сплавы (в)

Для материалов с физическим пределом выносливости σ_R уравнение кривой усталости имеет вид

$$N = \begin{cases} \frac{\sigma_R^m N_G}{\sigma_{\max}^m}, & \sigma_{\max} \geq \sigma_R \\ \infty, & \sigma_{\max} < \sigma_R \end{cases} . \quad (19)$$

Для материалов с кривой усталости, содержащей два наклонных участка, уравнение имеет вид

$$N = \begin{cases} \frac{\sigma_{RN}^m N_G}{\sigma_{\max}^m}, & \sigma_{\max} \geq \sigma_{RN} \\ \frac{\sigma_{RN}^{m_1} N_G}{\sigma_{\max}^{m_1}}, & \sigma_{\max} < \sigma_{RN} \end{cases} , \quad (20)$$

где m – показатель наклона первого участка кривой усталости, m_1 – показатель наклона второго участка кривой усталости, N_G – абсцисса точки перегиба кривой усталости обозначается, σ_{RN} – предел ограниченной выносливости на базе N_G , N – число циклов до отказа.

Для материалов с кривой усталости, показанной на рис. 10в, уравнение кривой Вёлера имеет вид

$$N = \frac{\sigma_{RN}^m N_{\sigma}}{\sigma_{\max}^m} . \quad (21)$$

Сравнение кривых Вёлера для различных материалов позволяет заметить, что вид кривой усталости существенно зависит от типа материала, и для ее описания требуется различное число уравнений. Данная особенность SN кривых не вполне удобна при реализации методики оценки сопротивления усталости, требующей минимального числа настроек расчетчика, поэтому кривая усталости задается набором точек $[\sigma_{ah}, N_h]$, $h = \overline{1, q}$, таких что $\sigma_{ah} \leq \sigma_{ah+1}$, $h = \overline{1, q-1}$, при заданном уровне асимметрии цикла нагружения. Для описания кривой Вёлера на интервалах между указанными точками $h = \overline{1, q}$ используется [9]

линейная

$$N = \frac{(N_h - N_{h+1})\sigma_a + \sigma_{ah+1}N_h - \sigma_{ah}N_{h+1}}{\sigma_{ah+1} - \sigma_{ah}} , \quad (22)$$

полулогарифмическая

$$\lg N = \frac{(\lg N_h - \lg N_{h+1})\sigma_a + \sigma_{ah+1} \lg N_h - \sigma_{ah} \lg N_{h+1}}{\sigma_{ah+1} - \sigma_{ah}} , \quad (23)$$

и двойная логарифмическая интерполяция

$$\lg N = \frac{(\lg N_h - \lg N_{h+1})\lg \sigma_a + \lg \sigma_{ah+1} \lg N_h - \lg \sigma_{ah} \lg N_{h+1}}{\lg \sigma_{ah+1} - \lg \sigma_{ah}} , \quad (24)$$

где σ_a – значение амплитуды напряжения, для которого надо найти долговечность N .

В том случае если $\sigma_a < \sigma_{a1}$ полагается, что долговечность $N = N_{\sigma}$, где N_{σ} – база эксперимента.

При выборе метода интерполирования необходимо обратить внимание на то, что практически для всех материалов экспериментальные данные достаточно хорошо аппроксимируются ломанной прямой линией в двойных логарифмических координатах.

Приведенные выше соотношения (18) – (24) описывают кривую Велера только при заданном значении коэффициента асимметрии цикла нагружения или уровне среднего напряжения цикла. Для учета асимметрии цикла нагружения в общем случае можно задать еще несколько набором $[\sigma_{ah}, N_h]$, $h = \overline{1, q}$ при отличающихся значениях коэффициента R . Данный подход, во-первых, неудобен тем, что при исследовании сопротивления усталости конструкций, особенно, при нерегулярном случайном нагружении возможно возникновение циклов с широким спектром средних напряжений, причем с такими значениями, которые заранее не известны. Во-вторых, каждая SN кривая – это экспериментальная кривая, и не для каждого значения асимметрии цикла нагружения такой набор данных существует. Поэтому при оценке сопротивления усталости нашел широкое применение следующий подход [13]: кривая Велера задается для случая симметричного цикла нагружения $R = -1$ (большинство существующих экспериментальных данных получены для этого случая); история нагружения предварительно с использованием соотношений (8) – (10) приводится к эквивалентному по повреждаемости симметричному циклу напряжений и затем используются соотношения (22) – (24) для оценки долговечности.

Параметры кривой усталости существенно зависят от вида эксперимента, в условиях которого она получена. Следовательно, при оценке сопротивления усталости конструкции желательно использовать SN кривую, соответствующую такому виду эксперимента напряженное состояние, которого совпадало с типом напряженного состояния, возникающего в изучаемой конструкции. Эксперименты по определению кривой усталости в основном проводятся в условиях циклического изгиба, циклического растяжения-сжатия и циклического кручения. Первые два типа эксперимента относятся одноосному напряженному состоянию. Третий типа эксперимента соответствует чистому сдвигу. Для разделения изгиба от растяжения необходимо вспомнить, что в случае растяжения возникает однородное напряженное состояние (равномерное распределение напряжений). Для отделения первых двух типов от третьего нужно ввести некоторую вычисляемую величину. Достаточно удобно использовать следующую характеристику вида напряженного состояния

$$\beta = \begin{cases} \sigma_1/\sigma_3, & |\sigma_1| < |\sigma_3| \\ \sigma_3/\sigma_1, & |\sigma_1| > |\sigma_3| \end{cases}, \quad (25)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения тензора напряжений в некоторой точке, полученного в результате статического расчета. Очевидно, введенный параметр принимает значения из отрезка $[-1, 1]$. В зависимости от значения параметра β напряженное состояние соответствует одному из следующих видов

- $\beta = -1$ – чистый сдвиг (желательно использовать результаты в случае циклического кручения);
- $\beta = 0$ – одноосное напряженное состояние (желательно использовать результаты в случае циклического изгиба или растяжения-сжатия в зависимости от вида распределения напряжений);
- $\beta = 1$ – чистое двухосное растяжение (сжатие) (желательно использовать результаты в случае растяжения сжатия).

Форма отчетности: отчет по лабораторной работе в электронном виде.

Задания для самостоятельной работы: повторить теоретическую часть материала по теме лабораторной работы с целью закрепления полученных навыков и умений.

Основная литература:

- 1) Лоскутов Ю.В. Лекции по теоретической механике: учебное пособие / Ю.В. Лоскутов; Поволжский государственный технологический университет. - Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. - 180 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=439200>
- 2) Прикладная механика: учебное пособие / Х.С. Гумерова, В.М. Котляр, Н.П. Петухов,

С.Г. Сидорин; Министерство образования и науки России, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет». - Казань: Издательство КНИТУ, 2014. - 142 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=428011>

Дополнительная литература:

1) Богомаз И.В. Механика: учебное пособие / И.В. Богомаз. - Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2012. - 346 с. [Электронный ресурс].

URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=229251>

2) Вильке В.Г. Механика систем материальных точек и твердых тел: учебник / В.Г. Вильке; Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». - Москва: Физматлит, 2013. - 268 с.

[Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=275429>

Лабораторная работа № 6 (1,5 часа).

Тема: Расчеты по максимальным переменным напряжениям и напряжениям ниже предельных.

Цель работы: изучить применение метода расчета по максимальным переменным напряжениям и напряжениям ниже предельных для случая оценки сопротивления усталости конструкции при условии наличия локальных концентраторов напряжений.

Ход работы: решение практических задач.

Методика расчета:

Рассмотрим случай оценки сопротивления усталости конструкции при условии наличия локальных концентраторов напряжений. Исходным положением в данной постановке является то, что вся конструкция деформируется упруго, за исключением изолированных локальных областей, в которых возникает пластическая деформация вследствие наличия концентрации напряжений. Подобный подход позволяет в качестве основы для дальнейшей оценки сопротивления усталости во всем теле использовать результаты решения в упругой постановке. Будем, как и выше, упругие поля напряжений и деформаций обозначать символами σ , ε . Значения упругих напряжений и деформаций получаемые с учетом концентрации напряжений будут определяться по следующим формулам [19]

$$\begin{cases} \sigma^e = \alpha_\sigma \sigma \\ \varepsilon^e = \alpha_\varepsilon \varepsilon \end{cases}, \quad (26)$$

где α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений рассматриваемого концентратора напряжений.

Для обозначения локальных полей напряжений и деформаций, обусловленных концентрацией напряжений, будем использовать символы ξ , e соответственно. В данном случае e - полная деформация являющаяся суммой упругой и пластической деформации.

Для нахождения локальных полей напряжений и деформаций, обусловленных концентрацией напряжений, воспользуемся правилом Нейбера (H. Neuber). Согласно данному правилу *плотность полной энергии в упругом случае равна плотности действительной (локальной) полной энергии*. Смысл приведенного утверждения иллюстрируется на рис. 1.

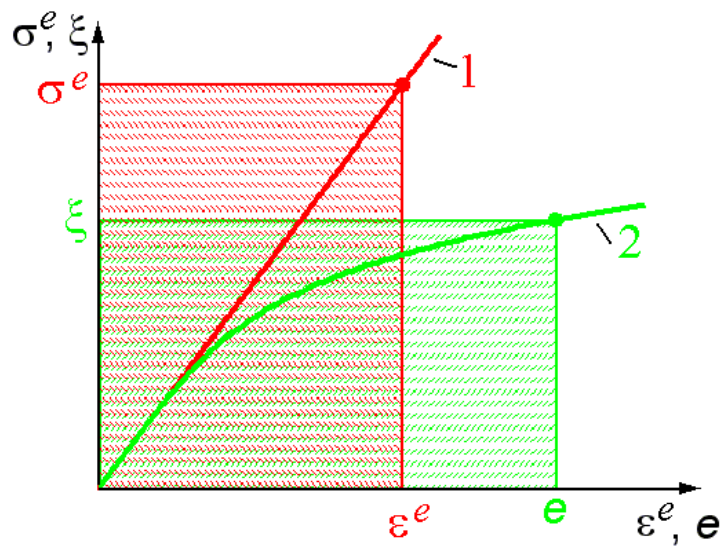


Рис. 1. Иллюстрация правила Нейбера

На данном рисунке линия 1 – диаграмма деформирования упругого тела, линия 2 – диаграмма деформирования материала с учетом неупругих деформаций. Площадь с заливкой вверх и налево соответствует плотности полной энергии в упругом случае. Площадь с заливкой штрихами вверх и направо соответствует плотности действительной (локальной) полной энергии. Формализованная запись правила Нейбера имеет вид

$$\sigma^e \varepsilon^e = \xi e . \quad (27)$$

С учетом соотношений (26) и принимая во внимание упругое поведение материала в левой части соотношения (27) правило Нейбера примет вид

$$\alpha_\sigma^2 \frac{\sigma^2}{E} = \xi e , \quad (28)$$

где E – модуль Юнга материала.

При описании диаграммы деформирования в неупругом случае одним из достаточно широко распространенных соотношений является зависимость Ромберга-Осгуда (Ramberg-Osgood) [21]

$$e = \frac{\xi}{E} + \left(\frac{\xi}{K'} \right)^{1/n'} , \quad (29)$$

где K' – коэффициент упрочнения (циклического упрочнения), n' – степень упрочнения (циклического упрочнения).

В случае циклического нагружения воспользуемся гипотезой Мазинга (Massing): *параметры стабилизированной петли гистерезиса $\Delta\xi, \Delta e$ могут быть получены удвоением значений диаграммы деформирования.*

Петля гистерезиса есть путь, который проходит точка в пространстве напряжение деформация за цикл нагружения. В ходе процесса нагружения форма и размеры данной кривой могут изменяться. Начиная с некоторого момента, размеры и форма указанного объекта во время процесса многоциклового усталости становятся неизменными практически до начала роста макротрещины. В данном случае рассматриваемая кривая называется стабилизированной петлей гистерезиса.

Рассмотрим вместо параметров петли гистерезиса $\Delta\xi, \Delta e$ используемые выше амплитудные значения ξ_a, e_a , которые равны половине соответствующий значений $\Delta\xi, \Delta e$. С учетом гипотезы Мазинга соотношение (29) при описании циклической диаграммы деформирования примет вид

$$e_a = \frac{\xi_a}{E} + \left(\frac{\xi_a}{K'} \right)^{1/n'} . \quad (30)$$

При рассмотрении циклического нагружения исходные упругие поля напряжений, получаемые без учета локальной концентрации напряжений – это набор приведенных характеристик истории нагружения $\sigma_{ag}^{пр}$ и $\sigma_{mg}^{пр}$, $g = \overline{1, l}$. Опишем в начале частный случай симметричного цикла. Для удобства вывода соотношений будем считать, что имеет место случай регулярного нагружения. Подставляя в формулу (28) вместо локальных напряжений амплитуды локальных напряжений за цикл, а вместо локальных деформаций их амплитудные значения за цикл нагружения, определяемые по формуле (30), получим нелинейное уравнение, позволяющее найти амплитудные значения локальных напряжений за цикл нагружения [9]

$$\alpha_\sigma^2 \frac{\sigma_a^2}{E} = \xi_a \left[\frac{\xi_a}{E} + \left(\frac{\xi_a}{K'} \right)^{1/n'} \right] . \quad (31)$$

Определив из соотношения (31) амплитудные значения локальных напряжений за цикл ξ_a подставим их в формулу (30) и найдем амплитудные значения локальных деформаций за цикл e_a .

Для определения сопротивления усталости при наличии локальных концентраторов напряжений воспользуемся уравнением Морроу-Мэнсона (Morrow-Manson) [5]

$$e_a = \frac{\sigma_f}{E} (2N)^b + \varepsilon_f (2N)^c , \quad (32)$$

где σ_f – усталостная прочность (значение амплитуды напряжений, при котором разрушение (отказ) произойдет в ходе одного полуцикла нагружения при условии отсутствия пластических деформаций), ε_f – усталостная вязкость (значение амплитуды пластической деформации, при котором разрушение (отказ) произойдет в ходе одного полуцикла нагружения при условии отсутствия упругих деформаций), b – экспонента усталостной прочности (экспонента Басквина), c – экспонента усталостной вязкости. Смысл введенных выше параметров иллюстрируется на рис. 12. На данном рисунке линия 1 – кривая Морроу-Мэнсона, линия 2 – связь амплитуды упругой деформации с числом циклов до отказа (первое слагаемое в правой части (32)), линия 3 – связь амплитуды пластической деформации с числом циклов до отказа (второе слагаемое в правой части (32)).

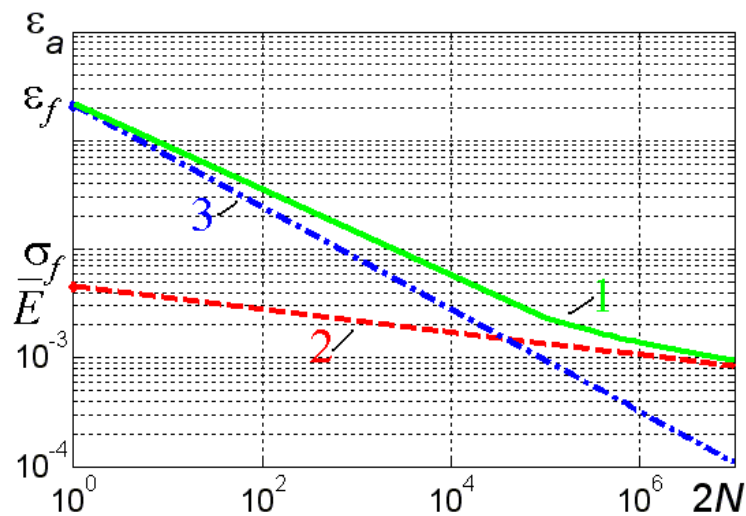


Рис. 12. Иллюстрация параметров уравнения Морроу-Мэнсона.

Достаточно часто в зарубежной литературе подход, при котором долговечность определяется уровнем полной деформации, носит название EN подхода, а кривая усталости при таком описании EN кривой (название связано с аббревиатурой от названий осей координат на кривой Велера: деформация vs. число циклов до отказа, что на английском языке *Elongation vs. N*).

Рассмотренная выше EN кривая (32) была получена в предположении о симметрии цикла нагружения. Так как в EN подходе учитываются пластические деформации и диаграмма деформирования имеет вид (29), а связь между исходными упругими напряжениями, получаемыми без учета локальной концентрации напряжений, и локальными напряжениями определяется нелинейным уравнением (31), то, в общем случае, говорить о сохранении степени асимметрии на локальном уровне нельзя. Получим характеристики петли гистерезиса в случае асимметричного нагружения. Для описания цикла нагружения достаточно знать два любые его параметра. Нам известно амплитудное значение цикла локальных напряжений ξ_a . Без ограничения общности, в качестве второй характеристики рассмотрим ξ_{\max} . Для нахождения данной величины с использованием максимального напряжения цикла упругих напряжений σ_{\max} базируясь на приведенной выше методике, получим нелинейное уравнение, аналогичное уравнению (31),

$$\alpha_{\sigma}^2 \frac{\sigma_{\max}^2}{E} = \xi_{\max} \left[\frac{\xi_{\max}}{E} + \left(\frac{\xi_{\max}}{K'} \right)^{1/n'} \right]. \quad (33)$$

Для учета общего случая асимметрии цикла нагружения предложено несколько модификаций соотношения (32).

В первом случае предполагается, что средние напряжения цикла не оказывают влияние на сопротивление усталости связанное с пластической деформацией [], поэтому корректировке подвергается только первое слагаемое правой части соотношения (32). Полученное соотношение носит название уравнения Морроу или формулы учета средних напряжений Морроу и имеет вид [5]

$$e_a = \frac{\sigma_f - \xi_m}{E} (2N)^b + \varepsilon_f (2N)^c. \quad (34)$$

Во втором случае предполагается, что средние напряжения цикла оказывают влияние сопротивление усталости, связанное как с упругой, так и с пластической деформацией. Подобное взаимоотношение устанавливается связью между удельной энергией и числом циклов до отказа [23]. Данный вид кривой усталости носит название уравнения Смита-Уотсона-Топпера (Smith-Watson-Torper) или SWT моделью, или формулой учета средних напряжений Смита-Уотсона-Топпера [23]. Уравнение EN кривой в рассматриваемом случае имеет вид

$$\xi_{\max} e_a = \frac{\sigma_f^2}{E} (2N)^{2b} + \sigma_f \varepsilon_f (2N)^{b+c}. \quad (35)$$

Остановимся подробнее на особенностях уравнения Морроу и SWT модели.

Модель Морроу при малых долговечностях становится некорректной, так как решающий вклад в процесс усталости при указанных значениях долговечности дают пластические деформации, а модель Морроу не учитывает влияния средних напряжений цикла на сопротивление усталости, определяемое пластической деформацией.

Анализ формулы (35) показывает, что данное соотношение применимо только при положительных значениях максимального напряжения цикла $\xi_{\max} > 0$.

Следовательно, при выборе метода учета среднего напряжения цикла в случае применения EN подхода надо руководствоваться следующими замечаниями

- при $\xi_{\max} > 0$ более консервативные оценки сопротивления усталости дает SWT модель;

- при $\xi_{\max} \leq 0$ надо использовать модель Морроу. Данная модель будет давать консервативные оценки только при долговечностях больших точки пересечения кривых 2 и 3 на рис. 12. С учетом формулы (32) данная долговечность будет равняться

$$N_t = \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_f E}{\sigma_f} \right)^{1/(b-c)} \quad (36)$$

Форма отчетности: отчет по лабораторной работе в электронном виде.

Задания для самостоятельной работы: повторить теоретическую часть материала по теме лабораторной работы с целью закрепления полученных навыков и умений.

Основная литература:

1) Лоскутов Ю.В. Лекции по теоретической механике: учебное пособие / Ю.В. Лоскутов; Поволжский государственный технологический университет. - Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. - 180 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=439200>

2) Прикладная механика: учебное пособие / Х.С. Гумерова, В.М. Котляр, Н.П. Петухов, С.Г. Сидорин; Министерство образования и науки России, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет». - Казань: Издательство КНИТУ, 2014. - 142 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=428011>

Дополнительная литература:

1) Богомаз И.В. Механика: учебное пособие / И.В. Богомаз. - Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2012. - 346 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=229251>

2) Вильке В.Г. Механика систем материальных точек и твердых тел: учебник / В.Г. Вильке; Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». - Москва: Физматлит, 2013. - 268 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=275429>

3) Рахматулин Х.А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках / Х.А. Рахматулин, Ю.А. Демьянов. - изд. 2-е, дополн. - Москва: Логос, 2009. - 512 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=84891>

10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Информационно-коммуникационные технологии (ИКТ) – преподаватель использует для:

- получения информации при подготовке к практическим занятиям;
- создания презентационного материала для аудиторных занятий;

ПО:

- ОС Windows 7 Professional;
- Microsoft Office 2007 Russian Academic OPEN No Level;
- Антивирусное программное обеспечение Kaspersky Security.

**11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ
ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

<i>Вид занятия</i>	<i>Наименование аудитории</i>	<i>Перечень основного оборудования</i>	<i>№ ЛР</i>
1	2	3	4
ЛР	лаборатория автоматизации систем проектирования	Системный блок (AMD 690G,mANX,HDD Seagate 250Gb,DIMM DDR//2*512Mb,DVDRV,FDD (3 шт.); Системный блок Cel D-315 (2 шт); Системный блок CPU 4000.2*512MB (5 шт); Монитор Терминал TFT 19 LG L1953S-SF; Системный блок AMD Athlon 64X2; Системный блок Celeron 2,66; Сканер HP 3770; Монитор 15 LG (6 шт.); Системный блок iCel 433 (5 шт.); Принтер HP LJ P2015	№ 1- № 6
Лк	лекционная аудитория (мультимедийный класс)	Проектор мультимедийный «CASIO» XJ-UT310WN с настенным креплением CASIO YM-88 Интерактивная доска Promethean 88 ActivBoard Touch Dry Erase 6 касаний с настенным креплением и программным обеспечением Promethean ActivInspire Монитор 17"LG L1753-SF (silver-blek) Системный блок (AMD 690G,mANX,HDD Seagate 250Gb,DIMM DDR//2*512Mb,DVDRV,FDD	№ 1- № 6
СР	ЧЗ-1	Оборудование 10-ПК i5-2500/H67/4Gb(монитор TFT19 Samsung); принтер HP LaserJet P2055D	-

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ
ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС
ПК-12 ПСК-2.9	способность проводить стандартные испытания наземных транспортно-технологических средств и их технологического оборудования;	1. Методы анализа динамических систем СДМ.	1.1. Принцип Германа-Эйлера-Даламбера для материальной точки и для механической системы. 1.2. Дифференциальные уравнения движения механической системы в обобщенных координатах.	Вопросы к зачету №1-25
	способность проводить стандартные испытания средств механизации и автоматизации подъемно-транспортных, строительных и дорожных работ.	2. Расчет на прочность и долговечность деталей машин при переменных нагрузках.	2.1. Определение расчетных характеристик сопротивления усталости. 2.2. Долговечность при переменных напряжениях.	Вопросы к зачету №26-28
		3. Расчеты на усталость по максимальным переменным напряжениям и напряжениям ниже предельных.	3.1. Усталость деталей машин, ее природа и процесс разрушения. 3.2. Расчеты по максимальным переменным напряжениям и напряжениям ниже предельных.	Вопросы к зачету №29-30

2. Вопросы к зачету.

№ п/п	Компетенции		ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ	№ и наименование раздела
	Код	Определение		
1	2	3	4	5
1.	ПК-12	способность проводить стандартные испытания наземных транспортно-технологических средств и их технологического оборудования;	1. Основное уравнение динамики. 2. Дифференциальные уравнения движения материальной точки в инерциальной системе отсчета. 3. Дифференциальные уравнения движения материальной точки в проекциях на естественные оси координат. 4. Две основные задачи динамики материальной точки. 5. Прямолинейные колебания материальной точки. Основные типы колебаний. Классификация сил. 6. Дифференциальное уравнение прямолинейных колебаний материальной точки. Амплитуда, период, частота и фаза колебаний. 7. Дифференциальные уравнения движения материальной точки в неинерциальной системе отсчета. 8. Механическая система. Масса системы. Центр масс системы и его координаты. 9. Момент инерции твердого тела относительно плоскости, оси и полюса. Радиус инерции. 10. Теорема о движении центра масс механической системы. Закон сохранения центра масс. 11. Количество движения точки и системы. Теоремы об изменении количества движения	1. Методы анализа динамических систем СДМ.
2.	ПСК-2.9	способность проводить стандартные испытания средств механизации и автоматизации подъемно-транспортных, строительных и дорожных работ.		

			<p>точки и механической системы.</p> <p>12. Теорема об изменении кинетического момента механической системы (относительно центра, оси, центра масс).</p> <p>13. Кинетический момент вращающегося твердого тела относительно оси вращения. Дифференциальное уравнение вращения твердого тела вокруг неподвижной оси.</p> <p>14. Элементарная работа силы. Работа силы тяжести, силы упругости, силы тяготения. Работа сил, приложенных к твердому телу, вращающемуся вокруг неподвижной оси.</p> <p>15. Вычисление кинетической энергии твердого тела в различных случаях его движения.</p> <p>16. Теорема об изменении кинетической энергии материальной точки и механической системы.</p> <p>17. Потенциальная энергия. Закон сохранения механической энергии.</p> <p>18. Число степеней свободы. Классификация связей. Возможные перемещения системы.</p> <p>19. Принцип возможных перемещений. Принцип возможных мощностей.</p> <p>20. Принцип Даламбера для материальной точки и механической системы. Главный вектор и главный момент сил инерции.</p> <p>21. Общее уравнение динамики. Идеальные связи. Виртуальная работа.</p> <p>22. Обобщенные координаты, обобщенные скорости, число степеней свободы. Обобщенные силы.</p> <p>23. Уравнение Лагранжа 2-го</p>	
--	--	--	--	--

			<p>рода. Обобщенные силы.</p> <p>24. Кинетический потенциал. Уравнение Лагранжа 2-го рода для консервативной системы.</p> <p>25. Устойчивость равновесия твердого тела и механической системы. Теорема Лагранжа-Дирихле.</p> <p>26. Основные теории прочности.</p> <p>27. Понятие долговечности деталей машин.</p> <p>28. Основные подходы к оценке прочности и долговечности деталей машин при переменных нагрузках.</p> <p>29. Усталостные напряжения.</p> <p>30. Основные подходы к оценке усталостных напряжений.</p>	<p>2. Расчет на прочность и долговечность деталей машин при переменных нагрузках.</p> <p>3. Расчеты на усталость по максимальным переменным напряжениям и напряжениям ниже предельных.</p>
--	--	--	---	--

3. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
<p>Знать: ПК-12: современные методы динамических и прочностных расчетов элементов дорожно-строительных машин; ПСК-2.9: основные способы моделирования прочности и долговечности деталей подъемно-транспортных, строительных, дорожных машин;</p> <p>Уметь: ПК-12: проводить стандартные испытания наземных транспортно-технологических средств и их технологического оборудования; ПСК-2.9: проводить стандартные испытания средств механизации и автоматизации подъемно-транспортных, строительных и дорожных работ;</p>	зачтено	оценка «зачтено» выставляется обучающемуся, если вопросы по динамике и прочности раскрыты, изложены логично, без существенных ошибок, продемонстрированы знания основных законов динамики, показано умение применять на практике основные методы динамических и прочностных расчетов, показано усвоение изученных вопросов и сформированность компетенций. Допускаются незначительные ошибки.
	не зачтено	оценка «не зачтено» выставляется, если не раскрыто основное содержание учебного материала; обнаружено незнание или непонимание большей или наиболее важной части учебного материала; допущены ошибки в определении понятий динамики и

<p>Владеть: ПК-12: навыками составления и анализа динамических моделей дорожно-строительных машин; ПСК-2.9: методиками расчета на прочность и долговечность деталей машин при переменных нагрузках.</p>		прочности, которые не исправлены после нескольких наводящих вопросов преподавателя; не сформированы компетенции, умения и навыки.
--	--	---

4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности.

Изучение дисциплины «Динамика и прочность» основывается на обучении будущих специалистов изучению основных принципов и основных подходов к решению задач динамики, долговечности, ресурса, надежности и безопасности машин, конструкций.

В ходе освоения всех разделов дисциплины обучающиеся должны:

- а) изучить основные методы моделирования и расчета динамических систем;
- б) освоить основные методы расчетов на прочность и долговечность деталей машин при переменных нагрузках;
- б) научиться решать основные задачи динамики для применения на практике в будущей профессиональной деятельности.

При подготовке к зачету рекомендуется особое внимание уделить следующим вопросам:

1. Принцип Германа-Эйлера-Даламбера для материальной точки и для механической системы.
2. Дифференциальные уравнения движения механической системы в обобщенных координатах.
3. Две основные задачи динамики материальной точки.
4. Общее уравнение динамики. Идеальные связи. Виртуальная работа.
5. Обобщенные координаты, обобщенные скорости, число степеней свободы. Обобщенные силы.
6. Уравнение Лагранжа 2-го рода. Обобщенные силы.
7. Кинетический потенциал. Уравнение Лагранжа 2-го рода для консервативной системы.
8. Устойчивость равновесия твердого тела и механической системы. Теорема Лагранжа-Дирихле.

Закрепление всех вопросов, рекомендуемых для лабораторных работ, а также при подготовке к зачету, требует основательной самостоятельной подготовки. Учитывая значимость самостоятельной работы, литература, вопросы для самопроверки - в разделах «Практическая работа» и «Фонд оценочных средств».

Работа с литературой является обязательной. При этом приветствуется привлечение дополнительных источников из Интернета. В случае возникновения определенных вопросов, обучающийся может обратиться к преподавателю за консультацией как на лабораторных работах, так и во время индивидуальных консультаций.

Предусмотрено проведение аудиторных занятий в виде лекций, лабораторных работ в сочетании с внеаудиторной работой.

АННОТАЦИЯ
рабочей программы дисциплины
Динамика и прочность

1. Цели и задачи дисциплины

Целью изучения дисциплины является: изучение современных методов прочностных и динамических расчетов деталей и механизмов дорожно-строительных машин.

Задачей изучения дисциплины является:

- овладение современными методами динамических и прочностных расчетов элементов дорожно-строительных машин в целях повышения их надёжности и производительности; - использование методов исследования, проектирования и расчета режимов работы дорожно-строительных машин;
- формирование навыков в составлении динамических моделей дорожно-строительных машин и на основе анализа данных моделей получение обоснованных суждений о динамической прочности, надёжности и производительности машины.

2. Структура дисциплины

2.1 Общая трудоемкость дисциплины составляет 108 часов, 3 зачетных единицы.

2.2 Основные разделы дисциплины:

- 1 – Методы анализа динамических систем СДМ;
- 2 - Расчет на прочность и долговечность деталей машин при переменных нагрузках;
- 3 - Расчеты на усталость по максимальным переменным напряжениям и напряжениям ниже предельных.

3. Планируемые результаты обучения (перечень компетенций)

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

ПК-12 – способность проводить стандартные испытания наземных транспортно-технологических средств и их технологического оборудования;

ПСК-2.9 - способность проводить стандартные испытания средств механизации и автоматизации подъемно-транспортных, строительных и дорожных работ.

4. Вид промежуточной аттестации: зачет.

*Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе
на 20___-20___ учебный год*

1. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие дополнения:

2. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие изменения:

Протокол заседания кафедры иностранных языков №___ от «___» _____ 20___ г.,

Заведующий кафедрой _____

(подпись)

(Ф.И.О.)

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ТЕКУЩЕГО
КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС
ПК-12 ПСК-2.9	способность проводить стандартные испытания наземных транспортно-технологических средств и их технологического оборудования;	1. Методы анализа динамических систем СДМ.	1.1. Принцип Германа-Эйлера-Даламбера для материальной точки и для механической системы. 1.2. Дифференциальные уравнения движения механической системы в обобщенных координатах.	Глоссарий основных терминов и определений; отчеты по ЛР.
	способность проводить стандартные испытания средств механизации и автоматизации подъемно-транспортных, строительных и дорожных работ.	2. Расчет на прочность и долговечность деталей машин при переменных нагрузках.	2.1. Определение расчетных характеристик сопротивления усталости. 2.2. Долговечность при переменных напряжениях.	
		3. Расчеты на усталость по максимальным переменным напряжениям и напряжениям ниже предельных.	3.1. Усталость деталей машин, ее природа и процесс разрушения. 3.2. Расчеты по максимальным переменным напряжениям и напряжениям ниже предельных.	

Глоссарий основных терминов и определений:

- 1) **Материальная точка** Particle - Точка, обладающая массой.
- 2) **Механическая система** Система System Любая совокупность взаимодействующих материальных точек.
- 3) **Масса механической системы** Mass of system Сумма масс материальных точек, образующих систему.
- 4) **Материальное тело** Material body, body Механическая система, образованная совокупностью материальных точек, непрерывно заполняющей конечный объем пространства.

- 5) **Неизменяемая система** Механическая система у которой расстояния между любыми двумя точками не изменяются.
- 6) **Абсолютно твердое тело** Rigid body Материальное тело, в котором расстояние между двумя любыми точками всегда остается неизменным.
- 7) **Свободное твердое тело** Free body Твердое тело, на перемещение которого не наложено никаких ограничений (связей). Примечание В противном случае твердое тело называется несвободным.
- 8) **Система отсчета** Frame of reference Система координат, связанная с твердым телом (телами), по отношению к которому определяется положение других тел (или механических систем) в разные моменты времени.
- 9) **Инерциальная система отсчета** Inertial of frame reference Система отсчета, по отношению к которой изолированная материальная точка находится в покое или движется прямолинейно и равномерно. Примечание. Система отсчета, не обладающая этим свойством, называется неинерциальной системой отсчета.
- 10) **Динамика** Dynamics Раздел механики, в котором изучаются движения механических систем под действием сил.
- 11) **Прямая задача динамики** Direct problem Определение силовых характеристик, действующих на тело, при заданном движении тела.
- 12) **Обратная задача динамики** Inverse problem Определение движения тела по известным силам и начальному состоянию.
- 13) **Центр масс механической системы** Центр масс Центр инерции Centre of mass; mass centre Геометрическая точка, для которой сумма произведений масс всех материальных точек, образующих механическую систему, на их радиус-векторы, проведенные из этой точки, равна нулю.
- 14) **Кенигова система координат** Система координат с началом в центре масс, поступательно с ним перемещающаяся.
- 15) **Плотность тела** Density Масса элементарного объема тела (плотность материала).
- 16) **Однородное тело** Homogeneous body Тело плотность которого постоянна в каждой точке.
- 17) **Момент инерции механической системы относительно оси** Осевой момент инерции Moment of inertia of system about axis Величина, равная сумме произведений масс всех материальных точек, образующих механическую систему, на квадраты их расстояний от данной оси.
- 18) **Радиус инерции системы относительно оси** Радиус инерции Radius of gyration of system about axis Величина, квадрат которой равен отношению момента инерции механической системы относительно данной оси к массе этой системы.
- 19) **Центробежный момент инерции** Произведение инерции Product of inertia Величина, равная сумме произведений масс всех материальных точек, образующих механическую систему, на две их координаты в данной прямоугольной системе координат.
- 20) **Тензор инерции** Tensor of inertia Симметричный тензор второго ранга, компонентами которого являются осевые и взятые с обратными знаками центробежные моменты инерции системы.
- 21) **Эллипсоид инерции для данной точки** Эллипсоид инерции Ellipsoid of inertia; momental ellipsoid Эллипсоид с центром в данной точке, для которого квадрат радиус-вектора каждой его точки, проведенного из этого центра, обратно пропорционален моменту инерции механической системы относительно оси, направленной вдоль радиус-вектора.
- 22) **Центральный эллипсоид инерции** Momental ellipsoid at centre of gravity; ellipsoid of inertia at centre of gravity Эллипсоид инерции для центра масс системы.
- 23) **Главная ось инерции для данной точки** Principal axis of inertia at given point Любая из главных осей эллипсоида инерции для этой точки Примечание. Одна из прямоугольных

координатных осей, проходящих через данную точку, например ось x , будет для этой точки главной, если два центробежных момента инерции, содержащие координаты x , будут равны нулю.

24) **Главная центральная ось инерции** Центральная главная ось инерции Principal axis of inertia at centre of gravity Главная ось инерции для центра масс системы.

25) **Главный момент инерции** Principal moment of inertia Момент инерции системы относительно главной оси инерции.

26) **Главный центральный момент инерции** Центральный главный момент инерции Principal moment of inertia at centre of gravity Момент инерции системы относительно главной центральной оси инерции.

27) **Количество движения точки** Импульс Momentum of particle Векторная мера механического движения, равная произведению массы материальной точки на ее скорость.

28) **Количество движения системы** Momentum of system Величина, равная сумме количества движения всех материальных точек, образующих механическую систему.

30) **Момент количества движения точки относительно центра** Кинетический момент точки относительно центра Angular momentum of particle about point; moment of momentum of particle about point Величина, равная векторному произведению радиус - вектора материальной точки, проведенного из этого центра, на количество движения.

31) **Момент количества движения точки относительно оси** Кинетический момент точки относительно оси Moment of momentum of particle about axis; angular momentum of particle about axis Величина, равная проекции на эту ось момента количества движения точки относительно любого выбранного на данной оси центра.

32) **Главный момент количества движения системы относительно центра** Кинетический момент системы относительно центра Moment of momentum of system about point; angular momentum of system about point Величина, равная сумме моментов количеств движения всех точек механической системы относительно центра.

33) **Главный момент количества движения системы относительно оси** Кинетический момент системы относительно оси Moment of momentum of system about axis; angular momentum of system about axis Величина, равная сумме моментов количеств движения всех точек механической системы относительно оси.

34) **Кинетическая энергия точки** Kinetic energy of particle Скалярная мера механического движения, равная половине произведения массы материальной точки на квадрат ее скорости.

35) **Кинетическая энергия системы** Kinetic energy of system Величина, равная сумме кинетических энергий всех точек механической системы.

36) **Элементарный импульс силы** Импульс силы Impulse of force Векторная мера действия силы, равная произведению силы на элементарный промежуток времени ее действия.

37) **Импульс силы за конечный промежуток времени** Whole force Величина, равная определенному интегралу от элементарного импульса силы, где пределами интеграла являются моменты начала и конца данного промежутка времени.

38) **Элементарная работа силы** Работа силы на элементарном перемещении Elementary work of force Скалярная мера действия силы, равная скалярному произведению силы на элементарное перемещение точки ее приложения.

40) **Работа силы на конечном перемещении** Work of force Величина, равная криволинейному интегралу от элементарной работы силы, взятому вдоль дуги кривой, описанной точкой приложения силы при этом перемещении. Примечание. Если сила последовательно действует на разные точки механической системы (тела), то ее работа при конечном перемещении системы определяется как предел суммы соответствующих элементарных работ.

- 41) **Мощность силы** Мощность Power of force; activity of force Величина, равная скалярному произведению силы на скорость точки ее приложения.
- 42) **Центральная сила** Central force Сила, линия действия которой постоянно проходит через некоторую точку, неподвижную в данной системе отсчета и называемую центром силы.
- 43) **Сила всемирного тяготения** Гравитационная сила Attractive force Центральная сила, пропорциональная массе материальной точки, на которую она действует, обратно пропорциональная квадрату расстояния между этой точкой и центром силы и направленная к центру силы.
- 44) **Сила тяжести** Gravity force Сила, действующая на материальную точку, находящуюся вблизи земной поверхности, равная произведению массы этой точки на ускорение ее свободного падения в вакууме. Примечание. Сила тяжести может быть вычислена как сумма силы земного притяжения и переносной силы инерции, обусловленной суточным вращением Земли. Аналогично сила тяжести определяется на любом небесном теле.
- 45) **Ускорение свободного падения** Acceleration of gravity Ускорение, которое приобретает свободная материальная точка под действием силы тяжести в безвоздушном пространстве. Примечание. Такое ускорение имеет центр тяжести любого тела. Зависит от широты места. Приблизительно равна $g = 9,8156 \text{ м/с}^2$ 173. Вес тела Weight of body Модуль равнодействующей силы тяжести, действующих на частицы этого тела.
- 46) **Силовое поле** Force field Область пространства, в которой на помещенную туда материальную точку действует сила, зависящая от координат этой точки в рассматриваемой системе отсчета и от времени.
- 47) **Стационарное силовое поле** Stationary force field Силовое поле, в котором действующие силы не зависят от времени. Примечание. Силовое поле, в котором действующие силы зависят от времени, называется нестационарным силовым полем.
- 48) **Однородное силовое поле** Uniform force field Силовое поле, в любой точке которого сила поля имеет для данной материальной точки одно и то же значение.
- 49) **Силовая функция** Force function Скалярная функция координат и, может быть, времени, градиент которой равен силе, действующей на материальную точку, находящуюся в рассматриваемом силовом поле.
- 50) **Потенциал Потенциальная энергия** Potential Скалярная функция противоположная по знаку силовой функции.
- 51) **Потенциальное силовое поле** Potential force field Силовое поле, для которого существует силовая функция (или потенциал). Примечание. Силы в этом силовом поле называются потенциальными силами.
- 52) **Потенциальная энергия точки** Потенциал точки Potential energy of particle Величина, равная работе, которую произведет сила, действующая на материальную точку, находящуюся в потенциальном силовом поле, при перемещении этой точки из данного положения в положение, для которого значение потенциальной энергии условно считается равным нулю.
- 53) **Потенциальная энергия системы** Потенциал системы Potential energy of system Величина, равная работе, которую произведут силы, действующие на систему, находящуюся в потенциальном силовом поле при перемещении ее из заданного положения, для которого потенциальная энергия системы условно считается равной нулю.
- 54) **Полная механическая энергия точки** Total energy of particle Величина, равная сумме кинетической и потенциальной энергий материальной точки.
- 55) **Полная механическая энергия системы** Total energy of system Величина, равная сумме кинетической и потенциальной энергий механической системы.
- 56) **Консервативная механическая система** Conservative system Механическая система, которая а) подчиненна геометрическим связям, б) находится в стационарном потенциальном силовом поле, в) кинетическая энергия не зависит от времени.

Примечание: 1. Если связи стационарные, последнее условие выполняется автоматически.
2. Для консервативной системы справедлив закон сохранения полной механической энергии.

57) **Сила инерции** Inertia force Векторная величина, модуль которой равен произведению массы материальной точки на модуль ее ускорения и направленная противоположно этому ускорению.

58) **Переносная сила инерции** Force of moving space При рассмотрении движения материальной точки в неинерциальной системе отсчета - векторная величина, модуль которой равен произведению массы точки на модуль ее переносного ускорения и направленная противоположно этому ускорению.

60) **Уравнения связей** Constraints equations Уравнения, которым в силу наложенных связей должны удовлетворять координаты точек механической системы и их скорости (первые производные от координат по времени).

61) **Геометрические связи** Geometric constraints Связи, уравнения которых содержат только координаты точек механической системы (возможно время).

62) **Дифференциальные связи** Differential constraints Связи, уравнения которых, кроме координат точек механической системы, содержат еще первые производные от этих координат по времени (и время).

63) **Голономные связи Интегрируемые связи** Holonomic constraints Геометрические связи и дифференциальные связи, уравнения которых могут быть проинтегрированы.

64) **Кинематические связи** Неголономные связи Неинтегрируемые связи Nonholonomic constraints Дифференциальные связи, уравнения которых не могут быть проинтегрированы.

65) **Стационарные связи** Scleronome constraints Связи, в уравнения которых время явно не входит.

66) **Нестационарные связи** Rheonomic constraints Связи, в уравнения которых явно входит время. Примечание. В случае неголономных связей нестационарными являются также связи, уравнения которых не содержат явно времени, но не удовлетворяются, когда скорости всех точек равны нулю.

67) **Возможное положение точки** Любое допускаемое наложенными геометрическими связями положение материальной точки в данный момент времени.

68) **Возможное положение системы** Любая совокупность возможных положений точек системы в данный момент времени.

69) **Возможная скорость точки** Possible velocity of particle Совокупность векторов, удовлетворяющая дифференциальным связям для возможного положения точки, занимаемого ею в данный момент времени.

70) **Возможное перемещение точки** Possible displacement of particle Любое элементарное перемещение материальной точки допускаемое наложенными связями из возможного положения в направлении возможной скорости для данного момента времени.

71) **Виртуальное перемещение точки** Virtual displacement of particle Любое допускаемое наложенными связями элементарное перемещение материальной точки из возможного положения, занимаемого ею в данный момент времени, выражаемое изохронной вариацией радиус- вектора этой точки.

72) **Действительное перемещение точки** True displacement of particle Элементарное перемещение материальной точки допускаемое связями из возможного положения для данного момента времени при заданных силах.

73) **Функция Лагранжа** Лагранжиан Кинетический потенциал Lagrangian function Kinetic potential Разность между кинетической и потенциальной энергиями механической системы, выраженная через обобщенные координаты и обобщенные скорости. Примечание: Для случая обобщено-консервативных систем — разность между кинетической энергией системы и обобщенным потенциалом.

- 74) **Обобщенный потенциал** Generalized potential Скалярная функция, зависящая от обобщенных скоростей (линейно) и от обобщенных координат, для определения обобщенно-потенциальных сил.
- 75) **Обобщенно-потенциальные силы** Непотенциальные силы, определяемые через уравнения Лагранжа второго рода с помощью обобщенного потенциала.
- 76) **Натуральные системы** Голономные механические системы, в которых силы потенциальные или обобщенно-потенциальные.
- 77) **Обобщенный импульс** Generalized momentum Величина, равная частной производной от кинетической энергии механической системы (или от функции Лагранжа) по обобщенной скорости.
- 78) **Переменные Гамильтона** Канонические переменные Hamiltonian variables; canonical variables Совокупность времени, обобщенных координат и обобщенных импульсов механической системы.
- 79) **Переменные Лагранжа** Lagrangian coordinates Совокупность времени, обобщенных координат и обобщенных скоростей механической системы.
- 80) **Функция Гамильтона** Hamiltonian function Для систем со стационарными связями полная механическая энергия системы, выраженная через канонические переменные. Функция Гамильтона имеет размерность энергии и называется ещё обобщенной механической энергией.
- 81) **Действие по Лагранжу** Action Величина, равная интегралу по времени от удвоенной кинетической энергии механической системы.
- 82) **Гироскопические силы** Gyroscopic forces Непотенциальные силы, мощность которых равна нулю.
- 83) **Интеграл уравнений движения** Integral of motion equation Дифференциальное соотношение порядок которого меньше на одну (первый интеграл) или две единицы (второй интеграл) чем у исходных уравнений движения.

Программа составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по специальности 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства от 11.08.2016г. № 1022

для набора 2013 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для заочной формы обучения от «03» июля 2018г. № 413;

для набора 2014 года: и учебными планами ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «03» июля 2018г. № 413, для заочной формы обучения от «03» июля 2018г. № 413;

для набора 2015 года: и учебными планами ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «03» июля 2018г. № 413, для заочной формы обучения от «03» июля 2018г. № 413;

для набора 2016 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для заочной формы обучения от «03» июля 2018г. №413;

для набора 2017 года: и учебными планами ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «03» июля 2018г. № 413, для заочной формы обучения от «03» июля 2018г. № 413;

для набора 2018 года: и учебными планами ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «03» июля 2018г. №413, для заочной формы обучения от«03» июля 2018г. №413.

Программу составил:

Фигура Константин Николаевич, к.т.н., доцент

Рабочая программа рассмотрена и утверждена на заседании кафедры СДМ от «__» _____ 2018г., протокол № __

И.о. заведующего кафедрой СДМ

К.Н. Фигура

СОГЛАСОВАНО:

И.о. заведующего кафедрой СДМ

К.Н. Фигура

Директор библиотеки

Т.Ф. Сотник

Рабочая программа одобрена методической комиссией МФ от «__» _____ 20__ г., протокол № _____

Председатель методической комиссии МФ

Г.Н. Плеханов

СОГЛАСОВАНО:

Начальник
учебно-методического управления

Г.П. Нежевец

Регистрационный № _____

