МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, МИНИСТЕРСТВО НАУКИ, ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И ИННОВАЦИЙ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

МОО ВО Кыргызско-Российский Славянский университет
имени первого Президента Российской Федерации Б.Н. Ельцина

УТВЕРЖДАЮ

Директор
(должность)
Лоцев Г.В
(ФИО)
3 сентября____2026 г.

Экспериментальная механика деформируемого твердого тела

рабочая программа дисциплины (модуля)

Закреплена за кафедрой **Высшая школа Природопользования, мехатроники и транспорта**

Учебный план Направление 15.03.03 - РФ, 650500 - КР Прикладная механика
Профиль "Вычислительная механика и компьютерный инжиниринг"

Квалификация **бакалавр**

Форма обучения **очная**

Общая трудоемкость **4 ЗЕТ**

Часов по учебному плану 144

в том числе:

аудиторные занятия 48

самостоятельная работа 64

Виды контроля в семестрах:

экзамен 7

Распределение часов дисциплины по семестрам

Семестр (<Курс>.<Семестр на курсе>)	**7 (4.1)**		Итого	
Недель	18			
Вид занятий	УП	РП	УП	РП
Лекции	16	16	16	16
Лабораторные	16	16	16	16
Практические	16	16	16	16
Контактная работа в период экзаменационной сессии	0,3	0,3	0,3	0,3
В том числе инт.	2	2	2	2
В том числе в форме практ.подготовки	18	18	18	18
Итого ауд.	48	48	48	48
Контактная работа	48,3	48,3	48,3	48,3
Сам. работа	64	64	64	64
Часы на контроль	31,7	31,7	31,7	31,7
Итого	144	144	144	144

Программу составил(и):
к.ф.-м.н., Герман Константин Анатольевич

к.т.н, Джаманкулов Азамат Кенешбекович

Рецензент(ы):
к.ф.-м.н., Комарцов Никита Михайлович

д.т.н, Муслимов Аннас Поясович

Согласовано РОП:
к.ф.-м.н., Герман Константин Анатольевич

Рабочая программа дисциплины
Экспериментальная механика деформируемого твердого тела

разработана в соответствии с ФГОС 3++:

Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования - бакалавриат по направлению подготовки 15.03.03 Прикладная механика (приказ Минобрнауки России от 09.08.2021 г. № 729)

составлена на основании учебного плана:

Направление 15.03.03 - РФ, 650500 - КР Прикладная механика
Профиль "Вычислительная механика и компьютерный инжиниринг"
утвержденного учёным советом вуза от 26.06.2026 протокол № 11.

Рабочая программа одобрена на заседании **Высшей школы Природопользования, мехатроники и транспорта**

Протокол от 02.09.2026 г. № 1
Срок действия программы: 2026-2032 уч.г.
Руководитель подразделения: Алсеитов Мирлан Тилегенович

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ
к рабочей программе дисциплины (модуля)

Экспериментальная механика деформируемого твердого тела

№ п/п	Основание внесения изменения	Раздел/ пункт	Содержание изменения
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			

1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	
1.1	Цель изучения дисциплины – получить представление о методах экспериментального определения напряжений, деформаций, перемещений и усилий. С применением этих методов научиться исследовать напряженно-
1.2	деформированное состояние деформируемых элементов машин и конструкций от действия механических, тепловых и других нагрузок.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП	
Цикл (раздел) ООП:	Б1.В.1.ДВ.04
2.1	**Требования к предварительной подготовке обучающегося:**
2.1.1	Б1.О.2.06. Физика
2.1.2	Б1.О.2.01. Введение в высшую математику
2.1.3	Б1.В.1.01. Теория упругости
2.1.4	Б1.О.3.12. Аналитическая механика
2.1.5	Б1.В.1.06. Метод конечных элементов
2.1.6	Б1.О.3.10. Вариационное исчисление
2.1.7	Б1.О.2.03. Линейная алгебра и аналитическая геометрия
2.1.8	Б1.О.2.05. Теория вероятностей и математическая статистика
2.1.9	Б1.О.3.03. Сопротивление материалов
2.1.10	Б1.О.3.05. Материаловедение
2.1.11	Б1.О.3.01. Введение в профессиональную деятельность
2.1.12	Б1.В.1.ДВ.07.01. Сопротивление материалов (продвинутый курс)
2.1.13	Б1.О.2.02. Математический анализ
2.2	**Дисциплины и практики, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее:**
2.2.1	Б3.О.02. Подготовка к сдаче и сдача государственного экзамена
2.2.2	Б2.О.02(Пд). Преддипломная практика
2.2.3	Б3.О.03. Подготовка к процедуре защиты и защита выпускной квалификационной работы

3. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)	
ПК-1: Способностью применять физико-математический аппарат, теоретические, расчетные и экспериментальные методы исследования, методы математического и компьютерного моделирования в процессе профессиональной деятельности	
Знать:	
Уровень 1	Физико-математический аппарат, теоретические, расчетные и экспериментальные методы исследований, методы математического и компьютерного моделирования в процессе профессиональной деятельности;
Уровень 2	
Уровень 3	
Уметь:	
Уровень 1	Применять физико-математический аппарат, теоретические, расчетные и экспериментальные методы исследований, методы математического и компьютерного моделирования в процессе профессиональной деятельности;
Уровень 2	
Уровень 3	
Владеть:	
Уровень 1	физико-математический аппаратом для проведения исследований; навыками использования математического и компьютерного моделирования в процессе профессиональной деятельности
Уровень 2	
Уровень 3	

В результате освоения дисциплины обучающийся должен

3.1	**Знать:**
3.1.1	основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического и компьютерного моделирования в теоретических и расчетно-экспериментальных исследованиях

3.2	**Уметь:**
3.2.1	использовать фундаментальные законы природы, законы естественнонаучных дисциплин и механики в процессе профессиональной деятельности
3.3	**Владеть:**
3.3.1	основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, иметь навыки работы с компьютером как средством управления информацией

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Код занятия	Наименование разделов и тем /вид занятия/	Семестр / Курс	Часов	Компетен-ции	Литература	Инте ракт.	Пр. подг.	Примечание
	Раздел 1. Измерения и испытания в механике							
1.1	Эксперимент и измерительная система Задачи натурного и модельного эксперимента: определение перемещений, деформаций, усилий и восстановление напряжений по физической модели. Измерительная цепь: образец, нагружение, чувствительный элемент, преобразование, регистрация и обработка сигнала; согласование диапазонов. Статические испытательные машины: силовая рама, захваты, привод и измерительные каналы; влияние жесткости машины и податливости захватов. Механические тензометры и экстензометры: база, увеличение, разрешение; отличие деформации рабочей базы от перемещения траверсы. Схема испытания и программа нагружения: соосность, закрепление, ступени нагрузки, повторения и условия безопасного проведения. /Лек/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
1.2	Выбор измерительной системы и программы статического испытания /Пр/	7	2		Л1.1Л2.1Л3.1			

1.3	Тензорезисторы и подготовка измерения Изменение электрического сопротивления при деформировании; коэффициент тензочувствительности и связь $\Delta R/R = K\varepsilon$ для малых деформаций. Проволочные, фольговые и полупроводниковые тензорезисторы: база, сопротивление, допустимая деформация и температурные ограничения. Выбор места и ориентации датчика; усреднение деформации по базе и ошибки измерения в зоне концентрации. Подготовка поверхности, приклеивание, защита и контроль монтажа; влияние клеевого слоя и качества передачи деформации. Градуировка измерительного канала, проверка нуля и повторяемости; различия градуировки, калибровки и поверки. /Лек/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
1.4	Расчет деформации по показаниям механического тензометра и подбор тензорезистор /Пр/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
1.5	Мостовые схемы и регистрация деформаций Мост Уитстона: условие равновесия, выходной сигнал и линейное приближение; зависимость знака сигнала от включения датчика. Четвертьмост, полумост и полный мост при растяжении и изгибе; выбор активных плеч для выделения требуемого вида деформации. Компенсация температурного влияния и сопротивления проводов; возможности и ограничения компенсационного датчика и трехпроводного включения. Метод непосредственного отсчета и нулевой метод; усиление, питание моста и аналого-цифровое преобразование. Электромагнитные помехи, дрейф нуля и самонагрев; выбор частоты регистрации для квазистатического испытания и контроль качества сигнала. /Лек/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			

1.6	Расчет выходного сигнала мостовых схем и температурной компенсации /Пр/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
1.7	Тензорозетки и определение напряженного состояния Преобразование компонент плоской деформации при повороте осей; физический смысл нормальных и сдвиговых компонент. Прямоугольная розетка 0°–45°–90°: восстановление εx, εy и инженерной сдвиговой деформации γxy. Главные деформации и направления главных осей; выбор угла через функцию atan2 и случай близких главных значений. Закон Гука при плоском напряженном состоянии; определение σx, σy, τxy и главных напряжений по E и ν. Тензометрия при растяжении и кручении тонкостенной трубы; проверка применимости упругой модели и влияние температурной составляющей. /Лек/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
1.8	Восстановление главных деформаций и напряжений по прямоугольной тензорозетке /Пр/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
1.9	Сравнение схем испытательных машин и способов измерения удлинения образца. Подбор базы и схемы размещения тензорезисторов для балки с концентратором. Сравнение мостовых схем при механической и температурной деформации. Обработка данных тензорозетки и проверка допущения плоского напряженного состояния. /Ср/	7	32	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
	Раздел 2. Оптические методы исследования полей							

2.1	Поляризационно оптическое исследование напряжений Двойное лучепреломление нагруженного оптически чувствительного материала; плоская модель и пределы фотоупругого подобия. Устройство плоского и кругового полярископа: поляризатор, анализатор и четвертьволновые пластины. Изоклины и изохромы: направления главных напряжений и их разность; интерпретация наблюдаемой картины. Закон фотоупругости $\sigma 1 - \sigma 2 = Nf\sigma/t$: порядок полосы, толщина модели, оптическая постоянная материала и ее определение. Метод полос и метод компенсации; оптически чувствительные покрытия и ограничения восстановления отдельных компонент напряжений. /Лек/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
2.2	Расшифровка фотоупругой картины и расчет разности главных напряжений /Пр/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1	2	2	Работа в команде
2.3	Методы полей перемещений и цифровая корреляция изображений Метод сеток и муаровые полосы: получение перемещений и переход к деформациям; чувствительность к шагу сетки. Голографическая интерферометрия: связь интерференционной картины с компонентой перемещения и зависимость от геометрии наблюдения. Цифровая корреляция изображений (DIC): контрастный рисунок, эталонный и деформированный кадры, подмножества и шаг расчета. Различия двумерной и стереоскопической DIC; калибровка масштаба, влияние внеплоскостных движений и качество освещения. Дифференцирование полей перемещений, пространственное разрешение и сглаживание; краткое сопоставление с хрупкими и гальваническими покрытиями как локальными индикаторными методами. /Лек/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			

2.4	Расчет перемещений и деформаций по сетке и изображениям DIC /Пр/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
2.5	Анализ фотоупругого подобия модели и натурного элемента. Сравнение сеточных, интерференционных и корреляционных методов измерения полей. /Ср/	7	16		Л1.1Л2.1Л3.1			
	Раздел 3. Достоверность результатов и компьютерный инжиниринг							
3.1	Обработка результатов и оценка неопределенности Первичные данные и метрологическая прослеживаемость: единицы, нулевые отсчеты, характеристики каналов и журнал условий измерения. Градуировочная прямая методом наименьших квадратов; чувствительность, свободный член, остатки и проверка линейности. Повторные измерения: среднее, стандартное отклонение и стандартная неопределенность среднего; условия независимости наблюдений. Оценивание неопределенности по типам A и B; распространение входных неопределенностей через модель косвенного измерения. Суммарная и расширенная неопределенность; представление результата с единицами, коэффициентом охвата и обоснованным округлением. /Лек/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
3.2	Построение градуировочной зависимости и бюджета неопределенности /Пр/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			

3.3	Сопоставление эксперимента с конечно элементной моделью Выбор проверяемой величины: перемещение, деформация на базе датчика, усилие или разность главных напряжений. Согласование геометрии, материала, закреплений и нагрузки в эксперименте и МКЭ; влияние реальной податливости и внецентренности. Верификация численного решения и валидация модели по эксперименту: различие задач и проверка сеточной сходимости. Учет положения, направления и базы датчика при извлечении расчетного результата; сравнение полей в общей системе координат. Идентификация упругих параметров по одной серии данных и проверка на независимой серии; оценка расхождения с учетом неопределенности и границ применимости. /Лек/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
3.4	Сравнение измеренных деформаций с конечно элементным расчетом /Пр/	7	2	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
3.5	Повторная обработка серии измерений и составление бюджета неопределенности. Подготовка расчетно экспериментального сопоставления /Ср/	7	16	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
3.6	Консультации и проведение экзамена /КрЭк/	7	0,3	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1			
	Раздел 4. Лабораторный практикум							
4.1	Градуировка тензометрического измерительного канала /Лаб/	7	4	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1		4	
4.2	Градуировка силоизмерительного канала испытательной установки /Лаб/	7	4	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1		4	
4.3	Испытание тонкостенного трубчатого образца на растяжение /Лаб/	7	4	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1		4	
4.4	Испытание тонкостенного трубчатого образца на кручение /Лаб/	7	4	ПК-1	Л1.1Л2.1Л3.1		4	

5. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

5.1. Контрольные вопросы и задания

6 Контрольные вопросы и задания
6 1 Вопросы для текущего контроля
По лекции 1
1. Какие величины непосредственно измеряются в эксперименте, а какие определяются по расчетной модели?
2. Почему перемещение траверсы может отличаться от удлинения рабочей базы образца?

3. Как жесткость машины и захватов влияет на регистрируемую диаграмму?
4. Как назначить диапазон измерения и расположить датчик при изгибе балки?
По лекции 2
5. Что характеризует коэффициент тензочувствительности и какова его размерность?
6. Как база датчика влияет на измерение неоднородного поля деформаций?
7. Какие дефекты монтажа вызывают дрейф и неполную передачу деформации?
8. Чем различаются градуировка канала, калибровка средства измерений и поверка?
По лекции 3
9. От чего зависит чувствительность четвертьмоста, полумоста и полного моста?
10. При каких условиях температурные изменения сопротивления компенсируются?
11. Чем отличаются нулевой метод измерения и метод непосредственного отсчета?
12. Как обнаружить самонагрев, электрическую помеху и дрейф нуля?
По лекции 4
13. Как получить γxy по показаниям розетки 0°–45°–90°?
14. Почему нельзя отождествлять инженерную сдвиговую деформацию и тензорную компоненту εxy?
15. Какие допущения необходимы для восстановления напряжений по поверхностной розетке?
16. Почему угол главной оси следует определять с учетом квадранта?
По лекции 5
17. Какая механическая величина определяется по изохромам?
18. Чем различаются изохромы и изоклины?
19. Для чего применяют четвертьволновые пластины в полярископе?
20. Почему один порядок полосы не позволяет определить оба главных напряжения отдельно?
По лекции 6
21. Какая информация получается методом сеток и методом муаровых полос?
22. От чего зависит чувствительность голографической интерферометрии к перемещению?
23. Почему выход объекта из плоскости создает ошибку в двумерной DIC?
24. Как связаны размер подмножества, шаг расчета, шум и пространственное разрешение DIC?
По лекции 7
25. Чем различаются стандартное отклонение выборки и неопределенность среднего?
26. Почему оценивание по типу B не означает исключительно систематическую ошибку?
27. Как учесть коэффициенты чувствительности и корреляцию входных величин?
28. Почему коэффициент охвата k = 2 нельзя автоматически считать точной гарантией 95 % для любой выборки?
По лекции 8
29. Чем отличаются верификация численного решения и валидация физической модели?
30. Как сопоставить деформацию конечного элемента с показанием датчика конечной базы?
31. Почему совпадение расчета с одной серией после подбора E еще не подтверждает модель?
32. Какие причины расхождения следует проверить до изменения параметров материала?
6 2 Расчетные задания для текущего контроля
Числовые данные ниже являются учебными условиями, а не результатами реальных испытаний. Решение должно содержать схему, модель, единицы, расчет и инженерное толкование. Эти задания используются также в экзаменационных билетах.
З1 Деформация и напряжение
База экстензометра L = 50 мм, удлинение ΔL = 0,025 мм. Материал линейно упругий, E = 200 ГПа; состояние одноосное. Определите ε и σ. Объясните, можно ли вместо ΔL использовать перемещение траверсы 0,080 мм.
З2 Сигнал четвертьмоста
Идеальный первоначально уравновешенный четвертьмост имеет один активный тензорезистор: K = 2,10; ε = 600 мкм/м; напряжение питания 5 В. Найдите модуль Uвых в линейном приближении. Укажите причину, по которой знак сигнала без схемы подключения не задан.
З3 Прямоугольная тензорозетка
При малых деформациях ε0 = 500, ε45 = 350, ε90 = −100 мкм/м. Найдите εx, εy, γxy, главные деформации и направление ε1. Затем при E = 200 ГПа, ν = 0,30 определите σx, σy, τxy и главные напряжения; принять плоское напряженное состояние и отсутствие температурной деформации.
З4 Фотоупругость
Для плоской модели толщиной t = 6 мм порядок изохромы N = 3,2. Цена полосы материала fσ = 12 Н/мм. Определите σ1 − σ2. Укажите дополнительную информацию, необходимую для определения σ1 и σ2 по отдельности.
З5 Перемещения по изображениям
Масштаб изображения 0,020 мм/пиксель. Продольные перемещения двух точек составляют 2,0 и 3,5 пикселя; расстояние между ними до деформирования 10 мм. Определите среднюю малую продольную деформацию между точками. Объясните, почему эти данные не задают полную двумерную деформацию.
З6 Градуировочная характеристика
При нагрузках F = 0; 1; 2; 3; 4 кН зарегистрированы U = 0,02; 0,53; 1,01; 1,54; 2,02 мВ. По МНК найдите U = aF + b, остатки и нагрузку при U = 1,30 мВ. Объясните, почему малые остатки не заменяют оценку неопределенности эталонной нагрузки.
З7 Неопределенность косвенного измерения
В одноосном упругом состоянии σ = Eε. E = 200 ГПа, ε = 500 мкм/м; стандартные неопределенности u(E) = 4 ГПа, u(ε) = 10 мкм/м. Входные величины независимы. Найдите σ, uc(σ) и U при принятом k = 2. Запишите результат.
З8 Сопоставление с МКЭ
Измеренная средняя деформация по базе датчика 480 мкм/м, расчетная по той же базе 510 мкм/м. Найдите расхождение относительно измеренного значения. Стандартные неопределенности двух оценок равны 12 и 10 мкм/м, оценки

независимы. Сопоставьте разность с 2uc разности. Укажите, достаточно ли результата для общей валидации модели.
6 3 Вопросы для промежуточной аттестации
Э1. Измерительная система и испытательная машина: выбор каналов, диапазонов и схемы нагружения.
Э2. Механические тензометры, экстензометры и определение деформаций на заданной базе.
Э3. Принцип действия тензорезистора, выбор датчика и подготовка поверхности.
Э4. Градуировка тензометрического и силоизмерительного каналов, линейность и гистерезис.
Э5. Мост Уитстона при растяжении и изгибе; расчет чувствительности выбранной схемы.
Э6. Температурное влияние, сопротивление проводов, дрейф нуля и подавление помех.
Э7. Прямоугольная тензорозетка, главные деформации и ориентация главных осей.
Э8. Восстановление напряжений из деформаций: материальная модель и условия ее применимости.
Э9. Полярископ, изохромы и изоклины; закон фотоупругости и фотоупругое подобие.
Э10. Метод полос, компенсация и оптически чувствительные покрытия.
Э11. Методы сеток, муара и голографической интерферометрии: измеряемые величины и ограничения.
Э12. Цифровая корреляция изображений: подготовка, калибровка, обработка и ошибки.
Э13. Статистическая обработка и градуировочная зависимость: выбор модели и анализ остатков.
Э14. Стандартная и расширенная неопределенность; бюджет косвенного измерения.
Э15. Измерение деформаций при растяжении и кручении тонкостенной трубы.
Э16. Проверка конечно-элементного решения, сопоставление с экспериментом и независимая проверка параметров модели.

5.2. Темы курсовых работ (проектов)

курсовых работ не предусмотрено

5.3. Фонд оценочных средств

6 Контрольные вопросы и задания
6 1 Вопросы для текущего контроля
По лекции 1
1. Какие величины непосредственно измеряются в эксперименте, а какие определяются по расчетной модели?
2. Почему перемещение траверсы может отличаться от удлинения рабочей базы образца?
3. Как жесткость машины и захватов влияет на регистрируемую диаграмму?
4. Как назначить диапазон измерения и расположить датчик при изгибе балки?
По лекции 2
5. Что характеризует коэффициент тензочувствительности и какова его размерность?
6. Как база датчика влияет на измерение неоднородного поля деформаций?
7. Какие дефекты монтажа вызывают дрейф и неполную передачу деформации?
8. Чем различаются градуировка канала, калибровка средства измерений и поверка?
По лекции 3
9. От чего зависит чувствительность четвертьмоста, полумоста и полного моста?
10. При каких условиях температурные изменения сопротивления компенсируются?
11. Чем отличаются нулевой метод измерения и метод непосредственного отсчета?
12. Как обнаружить самонагрев, электрическую помеху и дрейф нуля?
По лекции 4
13. Как получить γxy по показаниям розетки 0°–45°–90°?
14. Почему нельзя отождествлять инженерную сдвиговую деформацию и тензорную компоненту εxy?
15. Какие допущения необходимы для восстановления напряжений по поверхностной розетке?
16. Почему угол главной оси следует определять с учетом квадранта?
По лекции 5
17. Какая механическая величина определяется по изохромам?
18. Чем различаются изохромы и изоклины?
19. Для чего применяют четвертьволновые пластины в полярископе?
20. Почему один порядок полосы не позволяет определить оба главных напряжения отдельно?
По лекции 6
21. Какая информация получается методом сеток и методом муаровых полос?
22. От чего зависит чувствительность голографической интерферометрии к перемещению?
23. Почему выход объекта из плоскости создает ошибку в двумерной DIC?
24. Как связаны размер подмножества, шаг расчета, шум и пространственное разрешение DIC?
По лекции 7
25. Чем различаются стандартное отклонение выборки и неопределенность среднего?
26. Почему оценивание по типу B не означает исключительно систематическую ошибку?
27. Как учесть коэффициенты чувствительности и корреляцию входных величин?
28. Почему коэффициент охвата k = 2 нельзя автоматически считать точной гарантией 95 % для любой выборки?
По лекции 8
29. Чем отличаются верификация численного решения и валидация физической модели?
30. Как сопоставить деформацию конечного элемента с показанием датчика конечной базы?
31. Почему совпадение расчета с одной серией после подбора E еще не подтверждает модель?
32. Какие причины расхождения следует проверить до изменения параметров материала?
6 2 Расчетные задания для текущего контроля
Числовые данные ниже являются учебными условиями, а не результатами реальных испытаний. Решение должно содержать схему, модель, единицы, расчет и инженерное толкование. Эти задания используются также в экзаменационных билетах.

31 Деформация и напряжение
База экстензометра L = 50 мм, удлинение ΔL = 0,025 мм. Материал линейно упругий, E = 200 ГПа; состояние одноосное. Определите ε и σ. Объясните, можно ли вместо ΔL использовать перемещение траверсы 0,080 мм.
32 Сигнал четвертьмоста
Идеальный первоначально уравновешенный четвертьмост имеет один активный тензорезистор: K = 2,10; ε = 600 мкм/м; напряжение питания 5 В. Найдите модуль Uвых в линейном приближении. Укажите причину, по которой знак сигнала без схемы подключения не задан.
33 Прямоугольная тензорозетка
При малых деформациях ε0 = 500, ε45 = 350, ε90 = −100 мкм/м. Найдите εx, εy, γxy, главные деформации и направление ε1. Затем при E = 200 ГПа, ν = 0,30 определите σx, σy, τxy и главные напряжения; принять плоское напряженное состояние и отсутствие температурной деформации.
34 Фотоупругость
Для плоской модели толщиной t = 6 мм порядок изохромы N = 3,2. Цена полосы материала fσ = 12 Н/мм. Определите σ1 − σ2. Укажите дополнительную информацию, необходимую для определения σ1 и σ2 по отдельности.
35 Перемещения по изображениям
Масштаб изображения 0,020 мм/пиксель. Продольные перемещения двух точек составляют 2,0 и 3,5 пикселя; расстояние между ними до деформирования 10 мм. Определите среднюю малую продольную деформацию между точками. Объясните, почему эти данные не задают полную двумерную деформацию.
36 Градуировочная характеристика
При нагрузках F = 0; 1; 2; 3; 4 кН зарегистрированы U = 0,02; 0,53; 1,01; 1,54; 2,02 мВ. По МНК найдите U = aF + b, остатки и нагрузку при U = 1,30 мВ. Объясните, почему малые остатки не заменяют оценку неопределенности эталонной нагрузки.
37 Неопределенность косвенного измерения
В одноосном упругом состоянии σ = Eε. E = 200 ГПа, ε = 500 мкм/м; стандартные неопределенности u(E) = 4 ГПа, u(ε) = 10 мкм/м. Входные величины независимы. Найдите σ, uc(σ) и U при принятом k = 2. Запишите результат.
38 Сопоставление с МКЭ
Измеренная средняя деформация по базе датчика 480 мкм/м, расчетная по той же базе 510 мкм/м. Найдите расхождение относительно измеренного значения. Стандартные неопределенности двух оценок равны 12 и 10 мкм/м, оценки независимы. Сопоставьте разность с 2uc разности. Укажите, достаточно ли результата для общей валидации модели.
6 3 Вопросы для промежуточной аттестации
Э1. Измерительная система и испытательная машина: выбор каналов, диапазонов и схемы нагружения.
Э2. Механические тензометры, экстензометры и определение деформаций на заданной базе.
Э3. Принцип действия тензорезистора, выбор датчика и подготовка поверхности.
Э4. Градуировка тензометрического и силоизмерительного каналов, линейность и гистерезис.
Э5. Мост Уитстона при растяжении и изгибе; расчет чувствительности выбранной схемы.
Э6. Температурное влияние, сопротивление проводов, дрейф нуля и подавление помех.
Э7. Прямоугольная тензорозетка, главные деформации и ориентация главных осей.
Э8. Восстановление напряжений из деформаций: материальная модель и условия ее применимости.
Э9. Полярископ, изохромы и изоклины; закон фотоупругости и фотоупругое подобие.
Э10. Метод полос, компенсация и оптически чувствительные покрытия.
Э11. Методы сеток, муара и голографической интерферометрии: измеряемые величины и ограничения.
Э12. Цифровая корреляция изображений: подготовка, калибровка, обработка и ошибки.
Э13. Статистическая обработка и градуировочная зависимость: выбор модели и анализ остатков.
Э14. Стандартная и расширенная неопределенность; бюджет косвенного измерения.
Э15. Измерение деформаций при растяжении и кручении тонкостенной трубы.
Э16. Проверка конечно-элементного решения, сопоставление с экспериментом и независимая проверка параметров модели.

7 1 Паспорт и связь с компетенцией
Контролируемая компетенция ПК-1: «Способностью применять физико-математический аппарат, теоретические, расчетные и экспериментальные методы исследования, методы математического и компьютерного моделирования в процессе профессиональной деятельности». Формулировка воспроизведена по аннотации. Официальные коды индикаторов не приведены; приведенные ниже критерии являются критериями данного ФОС.
Проверяемое действие Разделы и средства Признак достижения
Выбирать метод измерения и схему испытания Лекции 1–3; ПР 1–3; опрос; тест Выбор соответствует величине, диапазону, полю деформаций и источникам влияния.
Определять деформации и восстанавливать напряжения Лекции 4–6; ПР 4–6; З1–З5; ЛР 3–4 Указаны допущения, корректны преобразования, единицы и физический смысл результата.
Получать и обрабатывать экспериментальные данные Лекция 7; ПР 7; ЛР 1–4; З6–З7 Сохранены первичные данные, построена зависимость, оценена неопределенность.
Сопоставлять эксперимент с компьютерной моделью Лекция 8; ПР 8; З8; защита сопоставления Согласованы измеряемые величины и база, выявлены ограничения модели.
Обосновывать расчетно экспериментальное решение Экзамен: Э1–Э16 и З1–З8 Даны самостоятельные объяснения, выполнен расчет и обоснован вывод.

7 2 Организация оценивания
Текущий контроль проводится после соответствующих тем; защита лабораторной работы — после представления отчета. Краткий тест охватывает лекции 1–8. Экзамен включает два теоретических вопроса и одну задачу. Предлагается 30 минут на подготовку и до 15 минут на ответ; конкретный регламент устанавливает преподаватель в соответствии с локальными правилами.

При выполнении расчетов допустим непрограммируемый калькулятор. Для лабораторных отчетов и расчетного сопоставления используется доступное учебное ПО. Все студенты получают одинаковые условия и критерии до выполнения работ. Формальные условия допуска, пересдач и учета пропусков определяются действующими локальными документами университета; новые штрафы данным ФОС не вводятся.
Средство Количество и баллы Баллы
Практические расчеты ПР 1–7 7 работ × 4 28
Лабораторные отчеты и защита 4 работы × 8 32
Краткий тест 8 вопросов × 1 8
Расчетно экспериментальное сопоставление ПР 8 1 работа × 8 8
Тематическое сообщение по самостоятельной работе 1 сообщение × 4 4
Текущий контроль всего Без повторного учета одной работы 80
Экзамен 2 вопроса × 5 + задача × 10 20
Итог Текущий контроль + экзамен 100

Самостоятельная работа обеспечивает подготовку к перечисленным средствам и отдельно повторно не оценивается, кроме одного тематического сообщения. Устный опрос дает обратную связь и не добавляет баллы сверх указанного максимума.
7 3 Критерии и шкалы
Практический расчет ПР 1–7
За каждую работу: 1 балл — обоснованные схема и допущения; 1 — верные формулы и единицы; 1 — расчет и проверка; 1 — интерпретация и ответ на уточняющий вопрос. Каждый критерий оценивается 0 или 1. Для ПР 1 вместо числового расчета проверяются диапазон канала и программа нагрузки; для ПР 2–7 — соответствующий расчет.
Лабораторная работа
За каждую работу: схема и подготовка — 0–1; полный протокол первичных данных — 0–2; обработка и неопределенность — 0–2; вывод с ограничениями — 0–1; индивидуальная защита — 0–2. В двухбалльных критериях: 2 — выполнено корректно; 1 — выполнено частично с устранимыми недочетами; 0 — отсутствует или принципиально неверно. Максимум — 8.
Перед включением установки обязателен допуск преподавателя и соблюдение инструкции по безопасности. При опасном действии испытание останавливается; к работе возвращаются после устранения нарушения. Фиктивные данные не принимаются как экспериментальные; такая работа подлежит повторному выполнению с реальным протоколом.
Сопоставление с МКЭ и тематическое сообщение
ПР 8: 0–2 балла за согласование модели и условий испытания; 0–2 за сопоставление одинаковых величин и базы датчика; 0–2 за учет неопределенности и анализ причин расхождения; 0–2 за обоснованный вывод и защиту. Значения 2, 1 и 0 соответствуют полному, частичному и отсутствующему либо ошибочному выполнению.
Сообщение: 1 балл — корректно определен метод; 1 — проанализирован проверяемый источник; 1 — показан инженерный пример; 1 — названы ограничения и даны ответы. Максимум — 4. Пересказ без ссылки на источник не удовлетворяет второму критерию.
Экзамен
Каждый теоретический вопрос: 0–2 балла — физический принцип и основные понятия; 0–2 — схема, зависимости и их применение; 0–1 — ограничения и самостоятельность объяснения. Для двухбалльных критериев: 2 — полный корректный ответ; 1 — частичный; 0 — отсутствующий или принципиально неверный. Максимум за вопрос — 5.
Задача: схема и допущения — 0–2; формулы и преобразования — 0–3; вычисления и единицы — 0–3; проверка и интерпретация — 0–2. В трехбалльных критериях: 3 — полностью верно; 2 — одна локальная ошибка при верном ходе решения; 1 — только отдельные верные элементы; 0 — решение отсутствует или неверно по существу. Максимум — 10. Арифметическая ошибка не обнуляет верно выбранную модель.
Итоговые баллы Оценка
85–100 Отлично
70–84 Хорошо
60–69 Удовлетворительно
0–59 Неудовлетворительно

Границы итоговой шкалы сохранены по исходной РПД; для экзамена применены наименования оценок без слов «зачтено». Применение суммы баллов и требования к положительному результату экзамена следует согласовать с действующей технологической картой, поскольку в РПД встречаются различные шкалы промежуточного контроля.
7 4 Краткий тест
Выберите один правильный ответ в каждом вопросе. За правильный ответ — 1 балл; за ошибочный или отсутствующий — 0. Максимум — 8 баллов; ориентировочное время — 12 минут.
Т1. Что показывает механический экстензометр на рабочей базе?
А — перемещение траверсы; Б — изменение длины между точками крепления; В — силу в захватах; Г — главное напряжение.
Т2. При K = 2 и ε = 500 мкм/м относительное изменение сопротивления равно:
А — 0,1; Б — 0,01; В — 0,001; Г — 0,0001.
Т3. Какое условие необходимо для компенсации температурного влияния парой одинаковых датчиков?
А — одинаковое тепловое воздействие и соответствующая мостовая схема; Б — только разная длина проводов; В — любое размещение датчиков; Г — только увеличение питания.
Т4. Для розетки 0°–45°–90° инженерная сдвиговая деформация равна:
А — ε0 + ε90; Б — ε45/2; В — ε0 − ε90; Г — 2ε45 − ε0 − ε90.
Т5. По порядку изохромы плоской фотоупругой модели определяется:
А — сумма главных напряжений; Б — разность главных напряжений; В — абсолютное перемещение; Г — модуль

упругости без градуировки.
Т6. Какое явление является характерным источником ошибки двумерной DIC?
А — запись масштаба; Б — сохранение эталонного кадра; В — выход поверхности из плоскости; Г — указание системы координат.
Т7. Для n независимых повторений неопределенность среднего по типу А оценивается как:
А — $s/\sqrt{n}$; Б — $s\sqrt{n}$; В — ns; Г — s^2n.
Т8. Что необходимо при сравнении тензорезистора с МКЭ в неоднородном поле?
А — взять максимум во всей модели; Б — изменить единицы только в расчете; В — сравнить только цветовую шкалу; Г — учесть направление и усреднение по базе датчика.
7 5 Задания и защита лабораторных работ
ЛР 1 Градуировка тензометрического канала
Задание. По не менее чем пяти уровням эталонной деформации получить сигнал при нагружении и разгрузке; выполнить повторную серию в допустимом упругом диапазоне. Построить зависимость сигнала от деформации, оценить чувствительность, нулевое смещение, остатки, повторяемость и гистерезис. Отдельно указать неопределенность эталонного значения.
Вопросы защиты. Как исключается пластическое деформирование? Почему проверяют разгрузку? Какие ошибки относятся к каналу, а какие — к эталону?
ЛР 2 Градуировка силоизмерительного канала
Задание. При разрешенных для установки эталонных нагрузках зарегистрировать не менее пяти уровней при нагружении и разгрузке. Получить F(U), определить рабочий диапазон и оценить неопределенность с учетом эталонной силы. При отсутствии эталонного средства допускается учебная обработка предоставленного преподавателем протокола, с явным указанием такого формата.
Вопросы защиты. Откуда известно эталонное усилие? Чем градуировка отличается от официальной поверки? Как выявляется гистерезис?
ЛР 3 Растяжение тонкостенной трубы
Задание. Измерить геометрию образца, записать силу и продольную и поперечную деформации на нескольких ступенях в упругом диапазоне. Рассчитать $\sigma = F/A$, определить E по наклону упругого участка, ν по связи поперечной и продольной деформаций; оценить неопределенность и возможную внецентренность.
Вопросы защиты. Почему нельзя определять E по перемещению траверсы без учета податливости? Как определить площадь кольцевого сечения? Что вызывает различие датчиков на противоположных сторонах?
ЛР 4 Кручение тонкостенной трубы
Задание. Записать крутящий момент и деформации датчиков под ±45° к оси трубы в упругом диапазоне. Для круглой трубы использовать $\tau = Tr/J$, $J = \pi(D^4 - d^4)/32$; для тонкой стенки сопоставить с $\tau \approx T/(2\pi r_{ср}^2 t)$. Определить $\gamma = \varepsilon_{+45} - \varepsilon_{-45}$, оценить G и сопоставить с $E/[2(1+\nu)]$.
Вопросы защиты. Почему выбраны углы ±45°? Когда допустима тонкостенная формула? Как осевая сила или изгиб искажают оценку кручения?
Для всех работ отчет включает название и схему, идентификацию образца и каналов, диапазоны и условия, первичные таблицы с единицами, алгоритм обработки, графики, оценку неопределенности и вывод. Фактические марки приборов, параметры и допустимые нагрузки заносятся по лабораторной инструкции; они здесь не вымышляются.
7 6 Темы сообщений
Влияние базы тензорезистора на измерение деформации у отверстия.
Температурная компенсация тензометрии нагретого элемента конструкции.
Фотоупругое подобие и ограничения переноса результатов с полимерной модели.
Выбор параметров DIC и компромисс между шумом и пространственным разрешением.
Учет податливости испытательной машины при определении модуля упругости.
Сопоставление точечных и полевых измерений с конечно-элементной моделью.
7 7 Комплект экзаменационных билетов
Формулировки вопросов Э1–Э16 приведены в разделе 6.3, полные условия задач З1–З8 — в разделе 6.2. В каждом билете представлены разные содержательные блоки. При выдаче студенту условие задачи и оба вопроса воспроизводятся полностью.
Билет Первый вопрос Второй вопрос Задача
1 Э1 Э9 З1
2 Э2 Э10 З2
3 Э3 Э11 З3
4 Э4 Э12 З4
5 Э5 Э13 З5
6 Э6 Э14 З6
7 Э7 Э15 З7
8 Э8 Э16 З8

7 8 Эталоны решений расчетных заданий
З1
$\varepsilon = \Delta L/L = 0{,}0005 = 500$ мкм/м; $\sigma = E\varepsilon = 100$ МПа. Перемещение траверсы содержит податливость установки и может включать проскальзывание; без коррекции использовать 0,080 мм как удлинение базы нельзя.
З2
$|U_{вых}| \approx U_{питK}|\varepsilon|/4 = 1{,}575$ мВ. Линейное приближение допустимо при $|K\varepsilon| \ll 1$; полярность определяется расположением активного плеча и выводов измерения.
З3

εx = 500; εy = −100; γxy = 300 мкм/м. Средняя нормальная деформация — 200; радиус круга деформаций — √(300² + 150²) = 335,41 мкм/м. ε1 = 535,41; ε2 = −135,41 мкм/м. θ1 = 0,5 atan2(300,600) = 13,28° от оси x. σx = E(εx + νεy)/(1−ν²) = 103,30 МПа; σy = 10,99 МПа; τxy = Eγxy/[2(1+ν)] = 23,08 МПа. σ1 ≈ 108,74; σ2 ≈ 5,54 МПа. Инженерная γxy = 2εxy.
34
σ1 − σ2 = Nfσ/t = 6,4 Н/мм² = 6,4 МПа. Нужны дополнительные независимые данные, например сумма напряжений либо значение одной компоненты из граничных условий и процедуры разделения напряжений.
35
Разность перемещений Δu = (3,5 − 2,0) × 0,020 = 0,030 мм. εср = Δu/10 = 0,003 = 3000 мкм/м. Для полного двумерного поля нужны обе компоненты перемещения и их производные в двух направлениях; данная оценка является средней по отрезку.
36
Fср = 2 кН; Uср = 1,024 мВ. a = 0,501 мВ/кН; b = 0,022 мВ. Остатки U − (aF+b): −0,002; 0,007; −0,014; 0,015; −0,006 мВ. F(1,30) = (1,30 − 0,022)/0,501 ≈ 2,551 кН. Для неопределенности дополнительно нужны сведения об эталоне, повторяемости, разрешении и условиях измерения.
37
σ = 100 МПа. uc²(σ) = ε²u²(E) + E²u²(ε). Относительная стандартная неопределенность √[(4/200)² + (10/500)²] = 0,02828. uc = 2,83 МПа; U = 5,66 МПа. После округления: σ = (100,0 ± 5,7) МПа, k = 2. Вероятность охвата без дополнительных предпосылок не утверждается.
38
Разность 30 мкм/м; относительное расхождение 30/480 × 100 % = 6,25 %. uc разности = √(12²+10²) = 15,62 мкм/м; 2uc = 31,24 мкм/м. Разность меньше принятой расширенной неопределенности разности. При данных предпосылках явное несогласие не обнаружено, но одной точки недостаточно для валидации модели в целом.

5.4. Перечень видов оценочных средств

Устный опрос по измерительным схемам, физическим принципам и ограничениям методов.
Краткий тест по тензометрии, оптическим методам и обработке данных.
Расчетные задания по мостам, тензорозеткам, фотоупругости и неопределенности.
Отчеты по четырем лабораторным работам и их индивидуальная защита.
Расчетно-экспериментальное сопоставление с МКЭ по практической работе и его защита.
Тематическое сообщение с анализом источника по одной из самостоятельных работ.
Экзаменационный билет с двумя теоретическими вопросами и расчетным заданием.

6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

6.1. Рекомендуемая литература

6.1.1. Основная литература

	Авторы, составители	Заглавие	Издательство, год
Л1.1	Работнов Ю.Н.	Механика деформируемого твердого тела: учебное пособие для вузов	М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1988

6.1.2. Дополнительная литература

	Авторы, составители	Заглавие	Издательство, год
Л2.1	Рычков Б.А.	Экспериментальная механика деформируемого твердого тела: учебник	Бишкек: Изд-во КРСУ 2019

6.1.3. Методические разработки

	Авторы, составители	Заглавие	Издательство, год
Л3.1	Рычков Б.А., Ковригин В.А., Юрченко Н.Н., Зайцев В.Ф.	Экспериментальная механика: учебно-методическое пособие	Бишкек: Изд-во КРСУ 2006

6.3. Перечень информационных и образовательных технологий

6.3.1 Компетентностно-ориентированные образовательные технологии

6.3.1.1	1 LibreOffice Calc
6.3.1.2	Таблицы первичных данных, графики, линейная регрессия и простой бюджет неопределенности. Открытое ПО; подходит для базовых расчетов без программирования.
6.3.1.3	https://books.libreoffice.org/en/GS262/GS26203-GettingStartedWithCalc.html
6.3.1.4	2 MATLAB
6.3.1.5	Обработка серий, матричные преобразования розеток и регрессия. Curve Fitting Toolbox используется при наличии соответствующей лицензии; базовая линейная аппроксимация возможна средствами MATLAB.
6.3.1.6	https://www.mathworks.com/discovery/data-fitting.html
6.3.1.7	3 Python с NumPy SciPy и Matplotlib
6.3.1.8	Воспроизводимая обработка, статистические оценки, аппроксимация и визуализация. Студентам можно выдавать подготовленные сценарии, чтобы не подменять дисциплину курсом программирования.

6.3.1.9	https://scipy.org/
6.3.1.10	4 ZEISS CORRELATE
6.3.1.11	Корреляция изображений и анализ перемещений и деформаций в поддерживаемой конфигурации. Издание и функциональность выбираются по условиям доступа; бесплатность полного набора функций не предполагается.
6.3.1.12	https://www.zeiss.co.in/metrology/software/zeiss-correlate.html
6.3.1.13	5 Ansys Mechanical
6.3.1.14	Расчет напряженно-деформированного состояния и сопоставление с экспериментом. Требуются доступная лицензия и проверка ограничений учебной редакции; в ФОС оценивается корректность модели, а не владение конкретным интерфейсом.
6.3.1.15	https://ansys.synopsys.com/products/structures/ansys-mechanical
6.3.2 Перечень информационных справочных систем и программного обеспечения	
6.3.2.1	Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU
6.3.2.2	Поиск русскоязычных статей по тензометрии, экспериментальному определению механических свойств и сравнению с МКЭ. Доступ к полным текстам зависит от правообладателя.
6.3.2.3	https://elibrary.ru/
6.3.2.4	NIST Measurement Uncertainty
6.3.2.5	Официальные справочные материалы по оцениванию стандартной, суммарной и расширенной неопределенности. Используются как методический источник; не заменяют применимые локальные правила.
6.3.2.6	https://www.nist.gov/itl/sed/topic-areas/measurement-uncertainty
6.3.2.7	International Digital Image Correlation Society
6.3.2.8	Профессиональные рекомендации по DIC и материалы DIC Challenge для проверки обработки изображений. Руководство рассматривает подготовку измерений, корреляцию и постобработку.
6.3.2.9	https://www.idics.org/guide/
6.3.2.10	NI Sensor Fundamentals
6.3.2.11	Техническая справочная система по тензорезисторам, мостовым схемам, регистрации и температурным влияниям. При работе с конкретной аппаратурой используется документация именно этой модели.
6.3.2.12	https://www.ni.com/en/shop/data-acquisition/sensor-fundamentals/measuring-strain-with-strain-gages.html
6.3.2.13	Каталоги Российского института стандартизации
6.3.2.14	Поиск документов по механическим испытаниям и средствам измерений, проверка обозначения и статуса стандарта. Применимость документа в Кыргызской Республике устанавливается отдельно; российский статус автоматически на КР не переносится.
6.3.2.15	https://new.gostinfo.ru/catalog?catalog=direct-application

7. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

8. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

8 1 Работа с лекциями

До лекции повторите соответствующие положения сопротивления материалов и теории упругости. Для тензорозеток особенно важны преобразование компонент деформации и плоское напряженное состояние; для фотоупругости — поляризация света. После занятия восстановите измерительную схему и запишите, какую величину метод измеряет непосредственно и какую получает по модели.

В конспекте отделяйте принцип измерения, расчетную зависимость, исходные допущения и ограничения. Для каждой формулы указывайте единицы и смысл величин. Не смешивайте относительную деформацию, ее запись в мкм/м и процентное представление: 1 мкм/м = 10^{-6}, а 1 % = 0,01.

8 2 Подготовка к практическим работам

Начинайте со схемы: геометрия, нагрузка, оси, положение и направление датчика. Затем выберите модель и проверьте ее применимость — малые деформации, линейная упругость, плоское напряженное состояние или тонкостенность.

Переводите данные в согласованные единицы до вычислений.

Сначала выполните оценку порядка величины, затем расчет. Для мостовой схемы явно обозначьте плечи и полярность; для розетки — углы датчиков и использование инженерной γ_{xy}. Для фотоупругости проверяйте размерность цены полосы.

Получив ответ, оцените знак, порядок величины и физическую правдоподобность.

8 3 Подготовка и проведение лабораторного испытания

До работы прочитайте инструкцию конкретной установки и получите допуск. Уточните ограничения по силе, моменту, перемещению и деформации, порядок установки образца и аварийной остановки. Нагружение и изменение оснастки выполняйте по команде преподавателя; руки и предметы должны находиться вне опасной зоны.

Зафиксируйте геометрию образца, базу и ориентацию датчиков, единицы, коэффициенты преобразования, начальные показания и условия. Не подменяйте измеренную силу заданным значением привода. На каждой ступени дождитесь принятой в инструкции стабилизации, затем запишите показания; при необычном шуме, скачке сигнала или проскальзывании остановите испытание и сообщите преподавателю.

Сохраняйте первичные записи и файлы без перезаписи. Любую коррекцию, исключение точки и повторное измерение отмечайте с причиной. Обработанные таблицы и графики храните отдельно от первичных данных. Предоставленные учебные данные обозначайте как предоставленные, а не как собственные измерения.

8 4 Обработка и оформление результатов

Для градуировки представьте точки и аппроксимирующую зависимость с единицами осей, проанализируйте остатки и отдельно сравните нагружение с разгрузкой. Не исключайте точку только потому, что она ухудшает совпадение. При расчете неопределенности сначала запишите модель результата и перечень входных величин; затем оцените вклады и возможную корреляцию.

Стандартное отклонение отдельных отсчетов характеризует разброс, а неопределенность среднего при независимых повторениях равна s/√n. Систематические влияния, разрешение и неопределенность градуировки не исчезают автоматически при увеличении n. Расширенную неопределенность приводите вместе с коэффициентом охвата и использованными предпосылками.

Отчет оформляйте в последовательности: схема и условия, первичные данные, обработка, графики, неопределенность, сопоставление и вывод. В выводе укажите полученные значения, границы применимости и наиболее существенный источник неопределенности. Формулировка «результаты совпадают» должна иметь числовое обоснование.

8 5 Работа с полевыми измерениями и расчетом

При анализе DIC проверьте масштаб, калибровку, качество контрастного рисунка и области потери корреляции. Укажите размер подмножества, шаг расчета и параметры сглаживания. Оценивайте шум по серии без нагружения; мелкий шаг вывода сам по себе не означает высокую независимую пространственную разрешающую способность.

При сопоставлении с МКЭ используйте одинаковую нагрузку, систему координат и меру деформации. Для тензорезистора сравнивайте среднюю деформацию в его направлении по рабочей базе; для полевого метода согласуйте координаты и пространственную фильтрацию. Сначала проверьте сеточную сходимость и граничные условия, затем обсуждайте изменение материала.

8 6 Самостоятельная работа и подготовка к экзамену

Распределите 64 часа по восьми тематическим блокам раздела 3. Часть каждого блока отведите на чтение и повторение, часть — на обработку соответствующих расчетов и отчетов. Для сообщения выберите одну тему, найдите первичный источник и подготовьте краткое объяснение принципа, инженерного применения и ограничений метода.

К экзамену составьте ответы на Э1–Э16 и самостоятельно решите З1–З8 без просмотра эталонов. Для каждого решения объясните, почему выбранная формула применима. Отдельно повторите преобразование единиц, схемы мостов, розетки, закон фотоупругости и распространение неопределенности. На ответе сначала изложите физическую модель и схему, затем формулы, расчет и ограничения.