

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Чайковский филиал
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»

Кафедра Автоматизации, информационных и инженерных технологий

МП 12-8-2021

**МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРЕДПИСАНИЯ И ЗАДАНИЯ
К КУРСОВОЙ РАБОТЕ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ»**

по направлению подготовки 08.03.01 Строительство

Чайковский, 2021

Методические предписания предназначены для выполнения курсовой работы на тему: «Расчёты на прочность, жёсткость и устойчивость стержневых элементов конструкций». В методических предписаниях представлен порядок выполнения и оформления курсовой работы, варианты заданий и рекомендуемая литература.

Методические предписания рекомендованы обучающимся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 08.03.01 Строительство, по дисциплине «Сопротивление материалов», для студентов очной форм обучения.

Методические предписания по выполнению курсовой работы по дисциплине «Сопротивление материалов» / Сост. Канд. Физ.-мат. наук, Г.Ю. Германюк. – Чайковский: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2021. – **39**с.

Рецензент: кандидат техн. наук, доцент кафедры АИИТ Красильников С. Н.

Методические предписания для студентов по выполнению курсовой работы рассмотрены и одобрены на заседании кафедры Автоматизации, информационных и инженерных технологий ЧФ ПНИПУ 06.12.2021 г., протокол № 14.

Методические предписания для студентов по выполнению курсовой работы рекомендованы методической комиссией ЧФ ПНИПУ для использования в учебном процессе (протокол № 4 от 30.12.2021 г.)

©Пермский национальный исследовательский
политехнический университет
Чайковский филиал, 2021
©Германюк Г.Ю., 2021

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Цель и задачи курсовой работы	4
2 Требования к оформлению курсовой работы.....	5
3 Рекомендации и правила решения задач по сопромату	6
4 Рекомендуемая литература	7
5 Содержание теоретической части курса	8
5.1 Основные термины и определения.....	8
5.2 Теоретические основы курса.....	9
Тема 1 – Основы статики.....	9
Тема 2 – Общие принципы конструирования и расчёта элементов конструкции .	10
Тема 3 – Основы расчёта типовых элементов конструкций.....	10
5.3 Вопросы к экзамену.....	12
6 Задание к курсовой работе «Расчёты на прочность, жёсткость и устойчивость стержневых элементов конструкций».....	14
6.1 Расчёт на прочность и жёсткость ступенчатого стержня при деформации растяжения-сжатия.....	14
6.2 Пример решения задачи.....	17
6.3 Статически неопределимая задача	28
6.4 Пример решения задачи.....	30
Напряжения, возникающие под действием температуры.....	30
Приложения	322
1. Плотности некоторых твердых тел	32
(при нормальном атмосферном давлении, $t = 200\text{C}$)	32
2. Плотности некоторых жидкостей.....	32
3. Плотности некоторых газов	32
4. Свойства упругости некоторых твердых тел	33
5. Температурный коэффициент линейного расширения	33
6. Модуль сдвига	38
7. Коэффициент звукоизоляции D строительных материалов	39

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие строительства ставит перед инженером-строителем задачи связанные с квалифицированной подготовкой в области теории, практики расчёта задач на прочность, жёсткость и устойчивость элементов конструкций и сооружений того или иного типа.

Для успешного решения подобных проблем студенты должны глубоко освоить основы прочностных расчётов. В дисциплине «Сопротивление материалов» излагаются основные понятия и принципы расчёта отдельных наиболее распространённых элементов конструкций.

Цель настоящего пособия — оказать помощь студентам в освоении теоретических и практических основ прочностного расчета элементов строительных конструкций при растяжении и сжатии, а также дать возможность организовать самостоятельную работу над программным материалом.

Содержание и объём курсовой работы соответствует рабочим программам высшего образования по дисциплине «Сопротивление материалов» по направлениям подготовки 08.03.01 Строительство, для студентов очной и заочной форм обучения.

Выполнение курсовой работы по дисциплине «Сопротивление материалов» ориентировано на формирование следующих компетенций:

ОПК-1(ИД-2) – Умеет выбирать базовые физические и химические законы для решения задач профессиональной деятельности; решать инженерные задачи с помощью математического аппарата векторной алгебры, аналитической геометрии и математического анализа; решать уравнения описывающие основные физические процессы, с применением методов линейной алгебры и математического анализа; решать инженерно-геометрические задачи.

Вместе с освоением теоретического материала большое значение имеет выполнение самостоятельных индивидуальных заданий, а именно, курсовой работы, что способствует закреплению учебного материала и развитию навыков в самостоятельном решении инженерных задач различного уровня.

1 Цель и задачи курсовой работы

Цель курсовой работы «Расчёты на прочность, жёсткость и устойчивость стержневых элементов конструкций», является приобретение практических навыков расчёта стержневых элементов конструкций в условиях простого и сложного сопротивления.

Задачи курсовой работы:

- выполнение расчётов на прочность, жёсткость и устойчивость стержневых конструкций с элементами проектирования;
- умение составлять расчётные схемы и выполнять чертежи (эпюры) согласно расчётам;
- приобретение навыков в работе с технической литературой, справочниками и стандартами.

2 Требования к оформлению курсовой работы

Курсовую работу по курсу «Сопротивление материалов», студент выполняет в соответствии с индивидуальным вариантом. Курсовая работа должна содержать графическую часть, выполненную на стандартном листе чертежной или миллиметровой бумаги (формата А4) с необходимыми вычислениями и пояснениями, которые приводятся на том же листе.

Расчётная часть задания выполняется на листах формата А4 чернилами чётко и аккуратно, либо в печатном виде с соблюдением размера полей: левое – 20 мм, правое – 10 мм; верхнее и нижнее – 15 мм.

Графическая часть выполняется на листах миллиметровой бумаги карандашом строго в соответствии с выбранным масштабом с помощью чертёжных инструментов, либо с помощью программных средств автоматизированного проектирования. Схемы, содержащие эпюры внутренних усилий, выполняются чётко, аккуратно, в них необходимо указать масштабы длин и сил. В характерных сечениях на эпюрах усилий проставляются числовые значения последних. На эпюрах поперечных и продольных сил, а также на линиях влияния усилий проставляются знаки (+) и (–).

Все этапы работы должны быть снабжены заголовками и необходимыми пояснениями. Выполнения каждого задания необходимо начинать с новой страницы и по каждому заданию в конце проводиться вывод.

Начинать выполнять работу необходимо:

- 1 – выписать условие с исходными данными;
- 2 – составить эскиз, на котором указать все необходимые для расчёта численные значения;
- 3 – задачу сначала решать в алгебраической форме с использованием стандартных буквенных обозначений;
- 4 – после получения решения в общем виде подставляются числовые значения, с учётом размерности в системе СИ (для удобства допускается использование производных единиц).

Примечание. Нет необходимости вести расчёт с большим количеством значащих цифр, необходимая точность расчёта обеспечивается двумя тремя знаками после запятой.

Примеры выполнения заданий приведены ниже.

Курсовая работа состоит из титульного листа (не нумеруется), аннотации (пример см. ниже), содержания, введения (пример см. ниже), основной части, список используемой литературы.

Примерный текст аннотации:

Курсовая работа посвящена теме: «Расчёты на прочность, жёсткость и устойчивость стержневых элементов конструкций».

В работе приводятся результаты расчётов на прочность и жёсткость стержней при центральном растяжении-сжатии; проверочный расчёт стержня на устойчивость; расчёт статически неопределённых задач на изгиб (прочность, жёсткость).

Работа содержит ___ листов текста, ___ рисунков, ___ таблиц.

В структурном элементе «Введение» необходимо указать тему курсовой работы, цель, задачи и практическая значимость работы.

Примерный текст приведен ниже.

Курсовая работа на тему: «Расчёты на прочность, жёсткость и устойчивость стержневых элементов конструкций», выполнена по дисциплине «Сопротивление материалов».

Цель курсовой работы: приобретение практических навыков расчёта стержневых элементов конструкций в условиях простого и сложного сопротивления.

Задачи:

- выполнение расчётов на прочность, жёсткость и устойчивость стержневых конструкций с элементами проектирования;*
- приобретение навыков в работе с технической литературой, справочниками и стандартами.*

Курсовая работа включает в _____заданий. Каждое задание содержит условие задачи, расчётно-графическую схему, результаты расчёта и эпюры с указанием на них в числах всех величин.

Выполнение курсовой работы способствует закреплению учебного материала и развитию навыков в самостоятельном решении инженерных задач различного уровня.

В списке использованных источников следует привести литературу, используемую при выполнении курсовой работы.

Студент должен выполнить и защитить все работы. При защите проводится опрос по решению указанных пунктов работы, графическим построениям, предлагается объяснить полученные результаты или решить ряд задач по теме курсовой работы.

Курсовая работа должна быть сдана до начала экзаменационной сессии. Срок выполнения курсовой работы определяется календарным графиком учебного процесса.

3 Рекомендации и правила решения задач по сопромату

- 1.** Перед решением задачи необходимо переписать полностью условие задачи с числовыми данными, составить эскиз в масштабе и указать на нём в числах все величины, необходимые для дальнейшего расчёта.
- 2.** Решение задач дополняйте краткими пояснениями и чертежами, на которых визуализированы входящие в расчёт величины.
- 3.** Перед использованием формулы для определения напряженно-деформированного состояния необходимо изучить соответствующую тему лекций по сопромату, чтобы понять физический смысл всех величин, входящих в задачу.
- 4.** При подстановке в используемую формулу величин силы, момента или длины необходимо перевести их в одну систему единиц.
- 5.** При решении задач по сопромату точность расчётов не должна превышать трёх значащих цифр (результат решения задачи не может быть точнее заложенных в расчётные формулы предпосылок).

6. Заканчивать расчёты необходимо анализом результатов. При проверке анализ результатов решения поможет избежать ошибок и поможет их устранить.
7. Список использованной литературы.

4 Рекомендуемая литература

1. И. А. Биргер, Р.Р. Мавлютов. Сопротивление материалов. М. «Наука», 1986.
2. А. Г. Горшков, В. Н. Трошин, В.И. Шалашилин. Сопротивление материалов. Учеб.пос. – М.:Физматлит, 2005. -544 с.
3. Сборник задач по сопротивлению материалов с теорией и примерами/ Под ред. А. Г. Горшкова, Д.В. Тарлаковского. Учеб.пособие: Для вузов. М.:Физматлит, 2003. – 632 с.
4. Яблонский А. А. Курс теоретической механики: статика, кинематика, динамика: учебник / А. А. Яблонский, В. М. Никифорова. – 9-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2002. 768 с.
5. Бать М.И. Теоретическая механика в примерах и задачах: учебное пособие для вузов / М.И. Бать, Г.Ю. Джанелидзе, А.С. Кельзон. – 9-е. изд., перераб. – М.: Наука, 1990–1991. Т.2: Динамика. – 1991. - 638 с.
6. Буланов, Э. А. Решение задач по сопротивлению материалов / Э. А. Буланов. — 6-е изд. — Москва : Лаборатория знаний, 2020. — 216 с. — ISBN 978-5-00101-797-4. — Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/6567.html> (дата обращения: 23.04.2021). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.
7. Ганджунцев, М. И. Техническая механика. Часть 1. Сопротивление материалов: учебное пособие / М. И. Ганджунцев, А. А. Петраков, Л. П. Портаев. — Москва: Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2014. — 200 с. — ISBN 978-5-7264-0874-3. — Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/30364.html> (дата обращения: 23.04.2021). — Режим доступа: для авторизир. пользователей
8. Агаханов, М. К. Сопротивление материалов: учебное пособие / М. К. Агаханов, В. Г. Богопольский. — Москва: Московский государственный строительный университет, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ, 2016. — 268 с. — ISBN 978-5-7264-1252-8. — Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/42912.html> (дата обращения: 23.04.2021). — Режим доступа: для авторизир. пользователей
9. Сопротивление материалов в вопросах-ответах и сборник задач для самостоятельной работы с примерами их решений: Учеб. пособие/ Схиртладзе А.Г., Волкова В. В. - Старый Оскол: ТНТ, 2014.- 324 с.
10. Быков С. Ю. Испытание материалов. - Старый Оскол: ТНТ, 2013.

11. Александров А. В. и др. Сопротивление материалов: учеб. Для вузов/ Александров А. В., Потапов В. Д., Державин Б. П.; под ред. А. В. Александрова. – 4-е изд., испр. – М.: высш. шк., 2004.
12. Горшков А. Г. и др. Сопротивление материалов: учеб. пособие для вузов / Горшков А. Г., Трошин В. Н., Шалашилин В.И. – 2-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.
13. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учеб. Для вузов. - 11-е изд., стер. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003.
14. Интернет-ресурсы: <http://www.lib.-> сайт, посвящённый проблемам механики

5 Содержание теоретической части курса

5.1 Основные термины и определения

Сопротивление материалов – наука об инженерных методах расчёта на прочность, жёсткость и устойчивость элементов машин и сооружений.

Прочность – способность конструкции, её частей и деталей выдерживать определённую нагрузку, не разрушаясь.

Жёсткость – способность конструкции и её элементов противостоять внешним нагрузкам в отношении деформаций (изменение формы и размеров).

При заданных нагрузках деформации не должны превышать определённых величин, устанавливаемых в соответствии с требованиями к конструкции.

Устойчивость – способность конструкции и её элементов сохранять определённую начальную форму упругого равновесия.

Для того чтобы конструкция в целом отвечала требованиям прочности, жёсткости и устойчивости, необходимо придать её элементам наиболее рациональную форму и определить соответствующие размеры.

Сопротивление материалов решает указанные задачи, основываясь как на теоретических, так и на опытных данных, имеющих в этой науке одинаково важное значение. В теоретической части сопротивление материалов базируется на теоретической механике и математике, а в экспериментальной – на физике и материаловедении. Сопротивление материалов не исчерпывает всех вопросов механики деформируемого твёрдого тела. Этими вопросами занимаются такие смежные дисциплины, как строительная механика стержневых систем, теория упругости и теория пластичности.

Однако основная роль при решении задач на прочность принадлежит сопротивлению материалов. При всём разнообразии видов конструктивных элементов, встречающихся в сооружениях и машинах, их можно свести к сравнительно небольшому числу основных форм. Тела, имеющие эти основные формы, и являются объектами расчёта на прочность, жёсткость и устойчивость.

Таковыми объектами расчёта являются брусья (стержни), пластины, оболочки, массивные тела.

Брус – это деталь удлинённой формы, у которой высота и ширина малы по сравнению с третьим размером – длиной, т. е. третий размер – значительно больше двух других габаритных размеров: $L \gg b$ и $L \gg h$.

Брус условно рассматривают в виде совокупности параллельных или почти параллельных продольных волокон. Сечения бруса, нормальные волокнам, называются поперечными сечениями.

Прямой брус, работающий на растяжение – сжатие, называют стержнем.

Прямой брус, работающий на изгиб – кручение, называют балкой.

Прямой брус, работающий на кручение, называют валом.

Основными факторами работы бруса являются:

- 1) нагрузки;
- 2) усилия в сечениях;
- 3) деформации;
- 4) перемещения сечений.

Поперечное сечение – это сечение бруса плоскостью, перпендикулярной его оси. По схеме бруса рассчитывают валы редукторов, приводов, балки и стойки кранов, элементы конвейеров, транспортёров и многое другое.

Стержень – это тонкий и длинный брус, у которого размеры поперечного сечения ничтожны по сравнению с длиной оси.

Пластиной называется тело, у которого один из трёх размеров (толщина) значительно меньше двух других. Пластины могут быть круглыми, прямоугольными и иметь другие очертания контура.

Оболочка представляет собой тело, ограниченное двумя криволинейными поверхностями, близко расположенными друг от друга. По форме оболочки бывают цилиндрические, конические, сферические и др.

Массивное тело – это тело, у которого все три размера одного порядка.

Реальные тела под действием нагрузок или изменения температуры могут деформироваться, т. е. изменять свою форму и размеры.

Различают деформации упругие, пластические и остаточные.

Основные виды деформаций:

- 1) растяжение и сжатие;
- 2) сдвиг (или срез);
- 3) кручение;
- 4) изгиб.

Сочетание основных видов деформации приведёт к сложному виду деформации.

Растяжение или сжатие возникает, например, в случае, когда к стержню вдоль его оси приложены противоположно направленные силы. При этом происходит поступательное перемещение сечений вдоль оси стержня, который удлиняется, а при сжатии укорачивается. Изменение первоначальной длины стержня L , обозначенное ΔL , называется абсолютным удлинением (при растяжении) или абсолютным укорочением (при сжатии).

5.2 Теоретические основы курса

Тема 1 – Основы статики

1. Система сил, действующих на тело. Активные силы и реакции связей. Сосредоточенные силы. Распределённые нагрузки. Момент силы. Момент пары сил.

2. Виды связей. Главный момент системы сил. Главный вектор системы сил. Условия равновесия плоскости системы произвольно расположенных сил. Условия равновесия пространственной системы сил. Использование условий равновесия системы сил для определения реакций связи.

3. Геометрические характеристики плоских сечений.

Тема 2 – Общие принципы конструирования и расчёта элементов конструкции

1. Модели прочностей надёжности элементов конструкций: модели конструкционного материала; модели геометрической формы; модели нагружения, модель предельного состояния разрушения.

2. Критерии работоспособности деталей машин: прочность, жёсткость, устойчивость, вибростойкость, износостойкость и др.

3. Внутренние силы. Определение внутренних сил. Метод сечений. Характеристика внутренних сил при различных видах деформаций. Виды разрушения деталей при различных видах деформации.

4. Напряжение как основная характеристика внутренних сил. Напряжение в точке сечения. Средние напряжения по сечению. Гипотеза плоских сечений. Общие принципы расчёта элементов конструкций по напряжениям: нормальные и касательные напряжения, расчётные напряжения, допускаемые напряжения.

5. Механические характеристики материалов. Описать диаграмму растяжения низкоуглеродистой стали при статическом нагружении. Предел пропорциональности, предел текучести, предел прочности. Коэффициент запаса прочности, факторы, влияющие на выбор коэффициента запаса прочности.

6. Деформации. Продольная и поперечная деформации при растяжении-сжатии. Закон Гука. Модуль продольной упругости. Коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона). Деформации при сдвиге и кручении. Закон Гука для сдвига. Модуль сдвига, его связь с модулем Юнга. Деформации при сдвиге, Условие жёсткости при различных видах деформации.

Тема 3 – Основы расчёта типовых элементов конструкций

1. Расчёт на прочность при растяжении и сжатии. Внутренние силы и построение их эпюр. Определение напряжений в поперечных сечениях бруса. Определение опасного участка (сечения). Условие прочности при растяжении-сжатии и задачи, решаемые с его помощью. Выбор оптимального сечения бруса из условия прочности.

2. Расчёты на жёсткость при растяжении-сжатии. Определение осевых перемещений поперечных сечений бруса. Определение опасного участка (сечения). Условие жёсткости при растяжении-сжатии и задачи, решаемые с его помощью. Выбор оптимального сечения бруса из условия жёсткости.

3. Расчёты на прочность при сдвиге. Внутренние силы и напряжения, возникающие в сечении детали при сдвиге. Условия прочности при сдвиге. Определение допускаемых напряжений при сдвиге Закон Гука для сдвига. Какие детали считаются на сдвиг?

4. Расчёты на прочность при кручении. Внутренние силы и построение их эпюр. Определение напряжений в поперечных сечениях вала. Определение

опасного участка (сечения). Условия прочности при кручении и задачи, решаемые с его помощью. Выбор оптимального сечения вала из условия прочности.

5. Расчёты на жёсткость при кручении. Определение угловых перемещений и деформаций вала при кручении. Определение опасного участка (сечения). Связь между напряжениями и деформациями. Условие жёсткости при кручении и задачи, решаемые с его помощью. Выбор оптимального сечения вала из условия жёсткости.

6. Изгиб. Классификация видов изгиба, чистый и поперечный изгиб. Внутренние силовые факторы при прямом изгибе – поперечная сила и изгибающий момент. Принципы построения их эпюр. Дифференциальные зависимости между изгибающим моментом, поперечной силой, интенсивностью распределённой нагрузки.

7. Расчёты на прочность по нормальным напряжениям при плоском поперечном изгибе. Нахождение нормальных напряжений в произвольной точке сечения балки. Распределение нормальных напряжений по сечению балки при изгибе. Условие прочности по нормальным напряжениям при изгибе. Определение допускаемых нормальных напряжений. Выбор оптимального сечения балки из условия прочности по нормальным напряжениям. Рациональные формы сечений балок, изготовленных из материалов, одинаково и различно сопротивляющихся растяжению и сжатию.

8. Расчёты на прочность по касательным напряжениям. Распределение касательных напряжений по сечению балки при изгибе. Условие прочности по касательным напряжениям. Линейные и угловые перемещения при прямом изгибе. Понятие о расчёте балок на жёсткость при изгибе.

9. Сложное напряжённое состояние. Внутренние силовые факторы и напряжения в поперечном сечении детали при сложном напряжённом состоянии. Особенности расчёта. Физический смысл эквивалентного напряжения. Гипотезы прочности. Формулы для нахождения эквивалентного напряжения при гипотезе наибольших касательных напряжений и энергетической гипотезе прочности.

10. Прочность при переменных нагрузках. Циклы переменных напряжений и усталость материала. Кривая усталости. Предел выносливости. Влияние конструктивных и технологических факторов на сопротивление усталости элементов конструкции. Условия прочности при переменных напряжениях, запас усталостной прочности.

11. Поверхностная прочность. Точечный и линейный контакт двух поверхностей. Распределение напряжений по поверхности контакта. Понятие контактных напряжений. Формула Герца. Вид разрушения в зоне контакта двух тел. Условие контактной прочности. Факторы, влияющие на интенсивность контактного разрушения.

12. Устойчивость сжатых стержней. Понятие об устойчивых и неустойчивых формах упругого равновесия. Критическое сила. Условие устойчивости. Формула Эйлера. Критическое напряжение. Гибкость. Предел применения формулы Эйлера, предельная гибкость. Эмпирические формулы для критических

напряжений. Расчёты сжатых стержней по формуле Эйлера и по эмпирическим формулам.

5.3 Вопросы к экзамену

1. Цели и задачи дисциплины «Сопротивление материалов». Реальная конструкция и расчётная модель. Классификация тел и сил. Схематизация опор.
2. Метод сечения. Определение внутренних силовых факторов. Понятие о напряжениях, линейных и угловых деформациях.
3. Основные гипотезы и допущения сопротивления материалов.
4. Напряжения в поперечных и наклонных сечениях при растяжении-сжатии. Продольные и поперечные деформации. Закон Гука. Модуль упругости первого рода. Коэффициент Пуассона. Перемещения в стержневых системах при растяжении-сжатии.
5. Механические свойства конструкционных материалов. Виды стандартных испытаний материалов. Диаграмма растяжения малоуглеродистой стали. Упругая и остаточная деформации.
6. Пластическое и хрупкое разрушение. Основные механические характеристики прочности и пластичности. Диаграммы растяжения и сжатия различных конструкционных материалов.
7. Расчёты на прочность при растяжении и сжатии. Метод расчёта по допускаемым напряжениям. Понятие о предельных и допускаемых напряжениях. Коэффициенты запаса прочности.
8. Статический момент площади сечений. Определение положения центра тяжести сечения. Центр тяжести простых геометрических фигур.
9. Понятие о моментах инерции. Общие свойства моментов инерции. Моменты инерции при параллельном переносе осей. Моменты инерции при повороте осей.
10. Моменты инерции простейших фигур. Моменты инерции сложных фигур. Главные оси и главные моменты инерции. Экстремальные значения осевых моментов инерции. Радиус инерции. Эллипс инерции.
11. Понятие момента сопротивления. Моменты сопротивления простейших фигур.
12. Напряжения и деформации при сдвиге. Условия прочности. Закон Гука. Модуль сдвига. Расчёты на срез и смятие.
13. Определение внутренних силовых факторов при кручении. Построение эпюр крутящих моментов. Напряжения и деформации круглых валов. Основные результаты теории кручения некруглых валов. Рациональные формы сечения валов.
14. Классификация видов изгиба. Определение внутренних силовых факторов при изгибе и построение их эпюр. Дифференциальные зависимости между изгибающим моментом, поперечной силой и интенсивностью распределенной нагрузки.
15. Нормальные напряжения при чистом плоском прямом изгибе. Распределение напряжений по сечению. Условие прочности.

16. Поперечный изгиб. Нормальные напряжения при поперечном изгибе. Касательные напряжения при изгибе.
17. Понятие центра изгиба. Расчёты на прочность с учётом нормальных и касательных напряжений. Рациональные формы сечения балок с учётом неравнопрочности материалов. Условия жёсткости при изгибе.
18. Метод начальных параметров при определении перемещений точек и углов поворота сечения.
19. Определение перемещений в стержневых системах методом Мора. Способ Верещагина вычисления интеграла Мора.
20. Понятие о статической неопределимости стержневых систем. Степень статической неопределимости. Внешние и внутренние основные и дополнительные связи. Метод сил раскрытия статической неопределимости стержневых систем. Основная и эквивалентная системы.
21. Канонические уравнения метода сил. Вычисление коэффициентов канонических уравнений методом Мора и способом Верещагина. Определение перемещений в статически неопределимых системах.
22. Понятие о напряженном состоянии деформированного тела. Главные площадки и главные напряжения. Виды напряженного состояния. Плоское напряженное состояние. Обозначение компонент напряженного состояния. Правило знаков.
23. Определение положения главных площадок и значений главных напряжений. Экстремальные значения нормальных и касательных напряжений. Элементы теории объемного напряженного состояния.
24. Понятие о предельном напряженном состоянии. Равноопасные напряженные состояния. Эквивалентное напряжение. Область применения, недостатки и опытная проверка гипотез прочности. Гипотезы (теории) прочности.
25. Общие принципы расчета на сложное сопротивление. Косой изгиб. Определение внутренних силовых факторов. Правило знаков для изгибающих моментов. Напряжения при чистом косом изгибе. Нейтральная линия. Положение опасной точки в сечении. Условие прочности. Определение перемещений при косом изгибе.
26. Общие принципы расчёта на сложное сопротивление. Совместное действие растяжения и изгиба. Внецентренное растяжение (сжатие). Напряжения. Нейтральная линия. Положение опасной точки в сечении. Условие прочности. Понятие ядра сечения.
27. Общие принципы расчёта на сложное сопротивление. Совместное действие изгиба и кручения. Усилия в элементах передач. Определение внутренних силовых факторов. Напряженное состояние и условие прочности в опасной точке при совместном действии изгиба и кручения круглых валов. Расчет на прочность.
28. Понятие устойчивости. Критическая сила. Задача Эйлера определения критической силы. Влияние условий закрепления стержней на величину критической силы. Критические напряжения. Гибкость. Пределы применимости формулы Эйлера. Рациональный выбор материала и формы сечения сжатых стержней.

29. Типы динамических нагрузок, действующих на детали машин и элементы конструкций. Учет инерционных сил при заданных законах движения при расчетах на прочности и жесткость.

30. Виды ударных нагрузок. Основные гипотезы технической теории удара. Удар по невесомой упругой системе. Удар вертикально падающего тела. Меры, повышающие сопротивляемость конструкций ударным нагрузкам.

31. Принцип расчёта по несущей способности. Сравнение методов расчёта по допускаемым напряжениям и по несущей способности.

6 Задание к курсовой работе «Расчёты на прочность, жёсткость и устойчивость стержневых элементов конструкций»

6.1 Расчёт на прочность и жёсткость ступенчатого стержня при деформации растяжения-сжатия

На схеме 1, изображён ступенчатый стержень с площадями поперечных сечений участков A_1 , A_2 и A_3 нагружен осевыми силами F_1 , F_2 и F_3 , приложенными по концам или в середине участков длиной b , c и d .

Материал стержня – сталь, допускаемое напряжение $[\sigma]=160$ Мпа, модуль продольной упругости $E=2 \cdot 10^5$ Мпа.

Задание:

- 1) Расчёт опорной реакции при растяжении-сжатии.
- 2) Построение эпюры внутренних продольных сил при растяжении-сжатии.
- 3) Расчёт стержня на прочность.
- 4) Построение эпюры нормальных напряжений при растяжении-сжатии.
- 5) Расчёт деформации (жёсткости) стержня при растяжении-сжатии.
- 6) Построение эпюры перемещений при растяжении-сжатии.

В случаях, когда в задании не ставят дополнительных условий, полученный размер можно округлить до целого миллиметра, но только в большую сторону.

По ГОСТ 6636 окончательно принимаем ближайший в сторону увеличения линейный размер.

Числовые данные из таблицы согласно вашему варианту.

<i>№ - вар.</i>	<i>B, см</i>	<i>c, см</i>	<i>d, см</i>	<i>A₁, см²</i>	<i>A₂, см²</i>	<i>A₃, см²</i>	<i>F₁, кН</i>	<i>F₂, кН</i>	<i>F₃, кН</i>
1	40	80	50	25	22	12	60	180	160
2	80	40	30	25	20	10	80	160	80
3	70	50	60	24	18	10	100	120	140
4	50	40	60	30	22	12	70	140	120

5	70	30	40	25	18	15	180	80	120
6	50	50	70	30	20	12	120	80	200
7	60	30	40	30	22	14	160	120	80
8	40	60	80	22	15	10	100	140	100
9	30	80	40	20	16	10	50	100	150
10	40	80	50	25	22	12	60	180	160

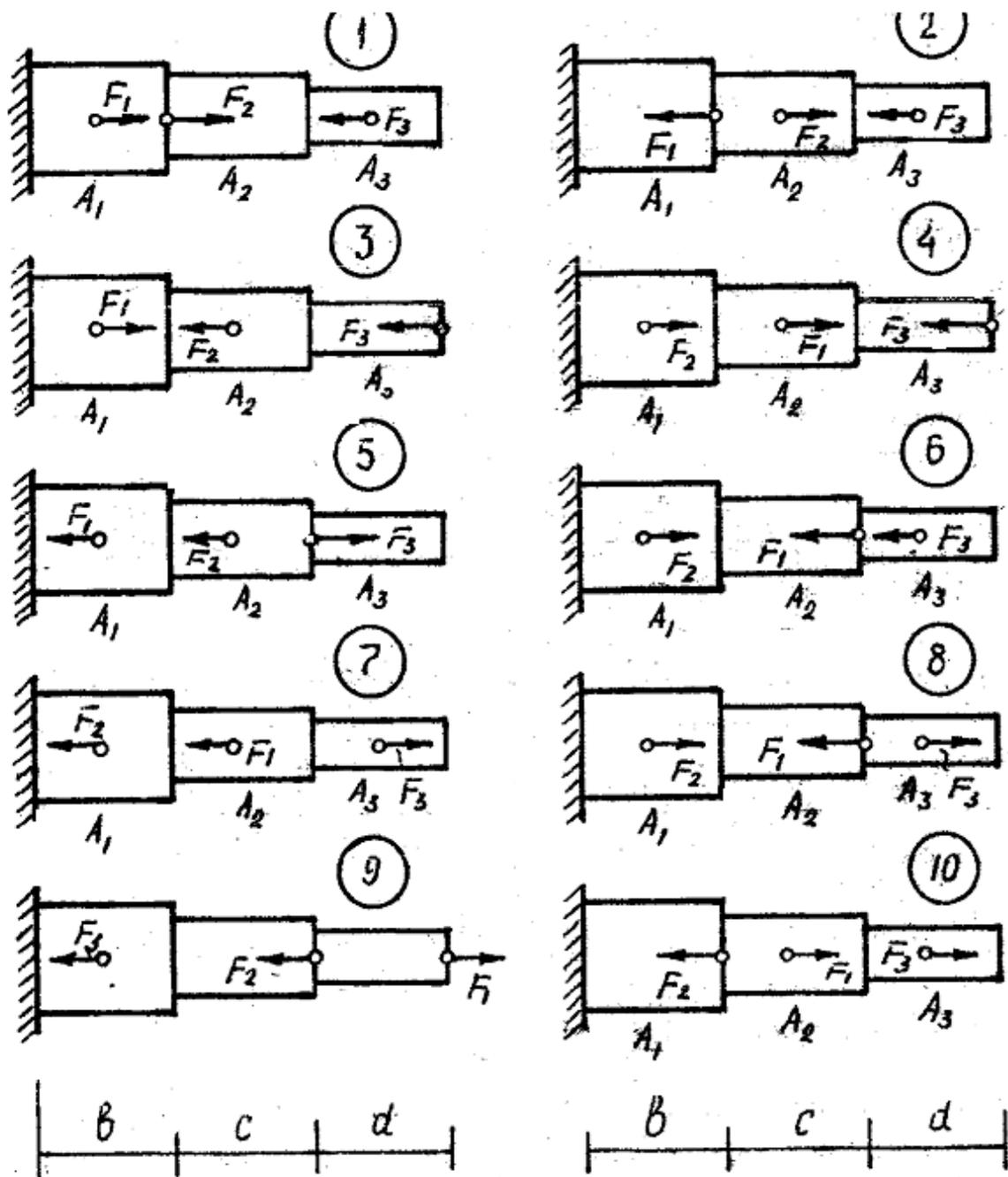


Схема 1 – Ступенчатый стержень

6.2 Пример решения задачи

Задание 1. Для прямого ступенчатого стержня, нагруженного системой продольных сил (рисунок 1), где $F_1=25\text{кН}$, $F_2=50\text{кН}$, $F_3=30\text{кН}$, требуется определить величину и направление опорной реакции в заделке.

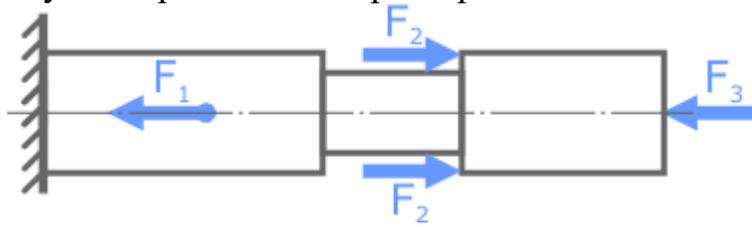


Рисунок 1 - Прямой ступенчатый стержень с нагрузкой

Проведем координатную ось z совпадающую с продольной осью стержня.

Так как при растяжении-сжатии все внешние силы, приложенные к стержню расположены вдоль его оси, то из возможных для заделки шести усилий здесь будет только одно — продольная реакция R .

Для того чтобы записать уравнение статики зададим этой силе произвольное направление, например влево (рисунок 2).

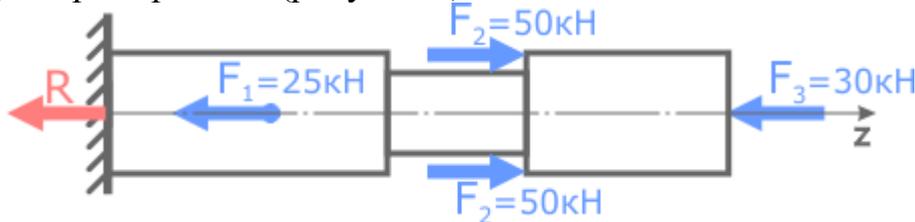


Рисунок 2 – Определение продольной реакции R

Запишем уравнение равновесия (неподвижности) стержня.

Для этого спроецируем все силы на ось z , сумма которых должна быть равна нулю. Силы, направление которых совпадает с направлением оси z примем положительными, а силы, имеющие обратное направление — соответственно отрицательными:

$$\Sigma F(z) = 0 = -R - F_1 + 2F_2 - F_3$$

Находим величину опорной реакции R :

$$R = -F_1 + 2F_2 - F_3 = -25 + 2 \cdot 50 - 30 = 45\text{кН}$$

Положительный знак реакции R означает что изначально выбранное направление оказалось правильным (рисунок 3).

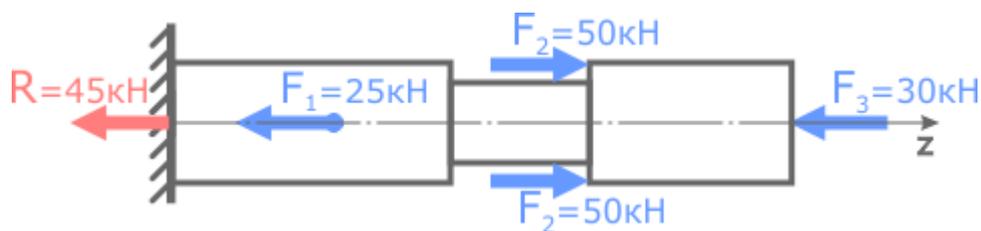


Рисунок 3 – Направление продольной реакции R

Для проверки правильности полученного результата можно просто сложить все силы, направленные вправо:

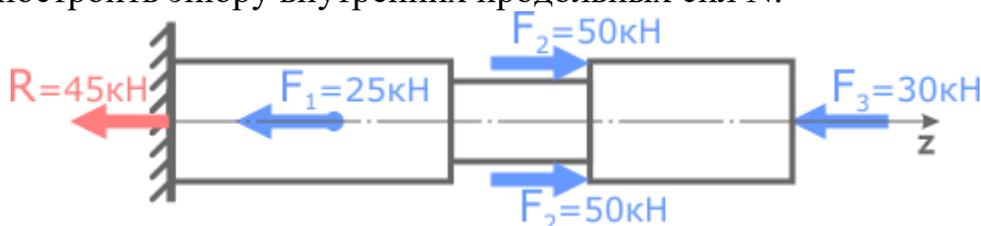
$$2F_2 = 2 \cdot 50 = 100 \text{ кН}$$

и силы, направленные влево (включая опорную реакцию R), эти суммы должны совпадать.

$$R + F_1 + F_3 = 45 + 25 + 30 = 100 \text{ кН}$$

Вывод: проверка показала, что сумма сил направленных вправо равна сумме сил, направленных влево.

Задание 2. Для прямого стержня нагруженного системой внешних сил требуется построить эпюру внутренних продольных сил N.



В предыдущем пункте решения задачи была определена опорная реакция R в заделке стержня.

Для расчёта величины внутренних сил воспользуемся методом сечения. Обозначим характерные сечения стержня (B, C, D, K и M) (рисунок 4).

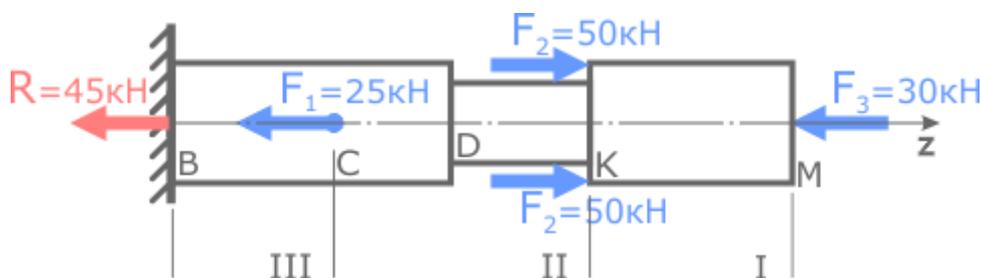


Рисунок 4 – Характерные сечения стержня (B, C, D, K и M)

Заданный стержень имеет 3 силовых участка: BC, CK и KM. Обозначим эти участки римскими цифрами, например, справа налево, начиная с незагруженного конца стержня. А также, для упрощения расчётов рекомендуется выбирать ту

часть стержня, к которой приложено меньше сил. Очевидно, это будет правая часть стержня (т. к. слева от сечения 4 силы, а справа всего одна).

Сечение D, где меняется поперечный размер стержня, границей силового участка не является. Так как по обе стороны действуют параллельные силы равные по модулю и направлению.

На каждом из этих участков определим величину и знак внутренней продольной силы.

Начнём с I силового участка (KM). Проведём мысленно сечение в пределах рассматриваемого участка. Это сечение делит стержень на две части: левую и правую.

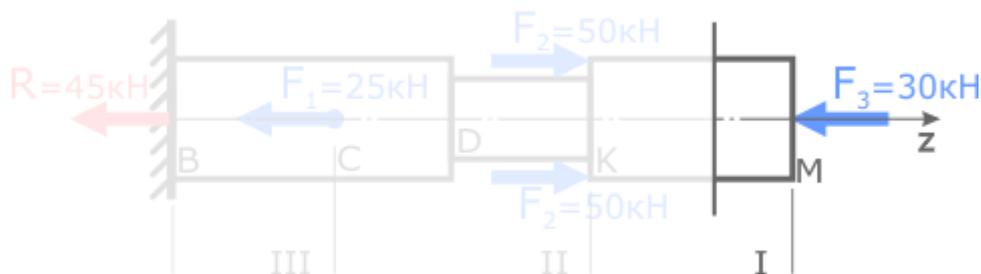


Рисунок 5 – I силовой участок (KM)

Внутренняя сила в данном сечении будет равна сумме внешних сил рассматриваемой правой части стержня. С учётом правила знаков при растяжении-сжатии эта сумма будет иметь следующий вид:

$$N_I = \overset{\text{прав}}{\sum} F_i = -F_3 = -30 \text{кН} \text{ (сжатие)}$$

Сила F_3 записана отрицательной, так как сжимает рассматриваемую часть стержня (направлена в сторону проведенного сечения).

Переходим на второй силовой участок (СК).

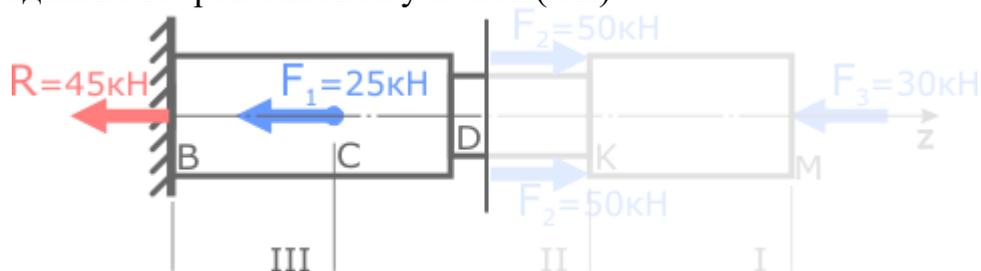


Рисунок 6 – II силовой участок (СК)

Рассекаем стержень в произвольном месте участка и рассматриваем, например левую его часть.

$$N_{II} = \overset{\text{лев}}{\sum} F_i = R + F_1 = 45 + 25 = 70 \text{кН} \text{ (растяжение)}$$

Здесь силы R и F_1 положительны, т. к. стремятся растянуть II участок стержня (направлены от сечения).

Аналогично для третьего силового участка (BC).

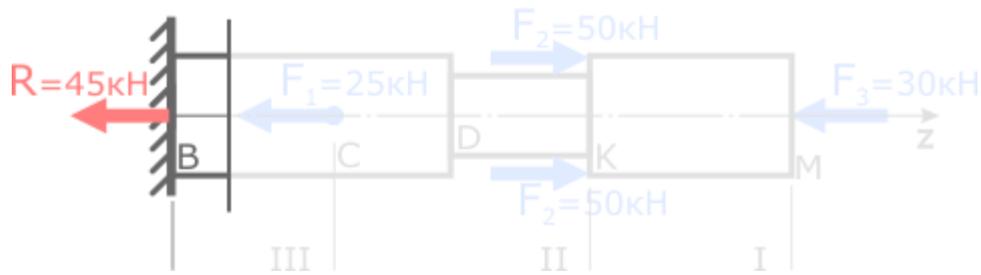


Рисунок 7 – III силовой участок (BC)

$$N_{III} = \sum_{\text{лев}} F_i = R = 45 \text{кН} \text{ (растяжение)}$$

По полученным данным строим эпюру продольных сил N.

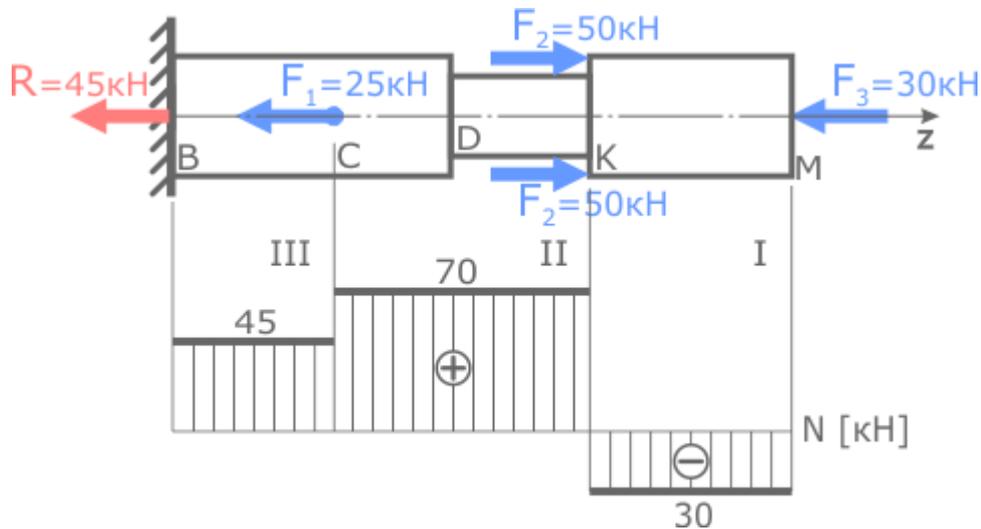


Рисунок 8 – Эпюра продольных сил N

Построенные эпюры внутренних продольных сил для стержня при его растяжении-сжатии легко можно проверить по скачкам.

В сечениях стержня, где приложена внешняя продольная сила, на эпюре должен быть скачок значения N на величину соответствующей силы.

Рассмотрим проверку на примере построенной эпюры N для стержня с тремя силовыми участками (рисунок 9).

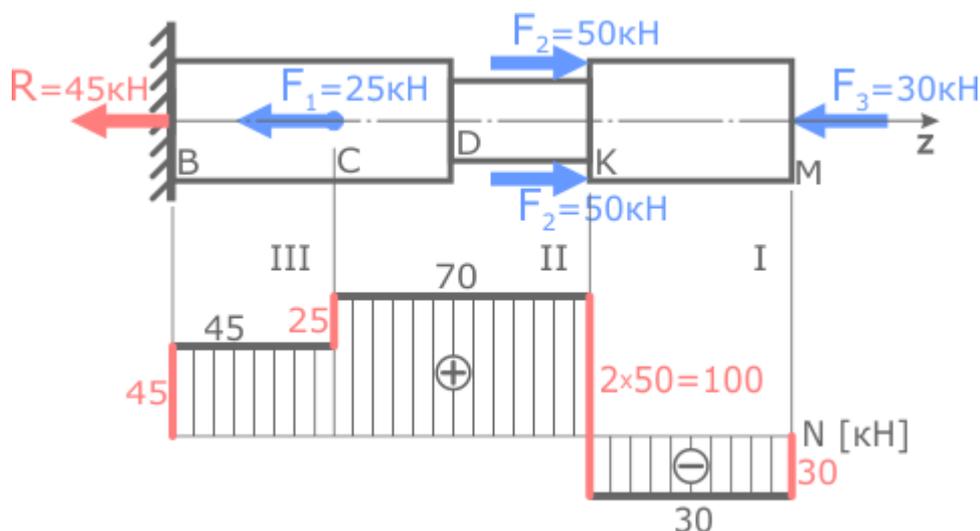
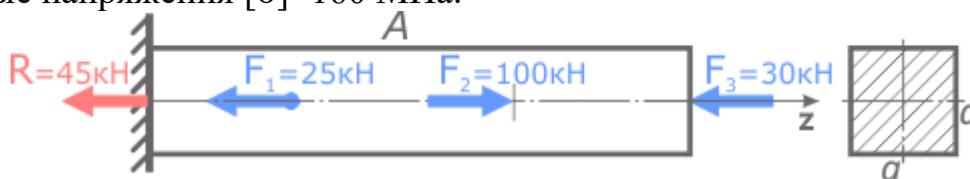


Рисунок 9 - Внешние силы приложены в сечениях В, С, К и М

Вывод: Как видно из рисунка, на эпюре N под этими сечениями имеются скачки (резкие изменения значений) внутренних сил на величину приложенной внешней силы.

Задание 3. Расчёт стержня на прочность.

Для прямого стержня постоянного сечения подобрать размер стороны a квадратного сечения по условию прочности. Материал стержня – сталь. Допустимые напряжения $[\sigma]=160$ МПа.



Полученные размеры принять согласно ГОСТ 6636.

Рассматриваемый стержень нагружен исключительно продольными силами, поэтому для подбора размеров его поперечного сечения воспользуемся условием прочности при растяжении-сжатии.

$$\sigma = \frac{N_i}{A} \leq [\sigma]$$

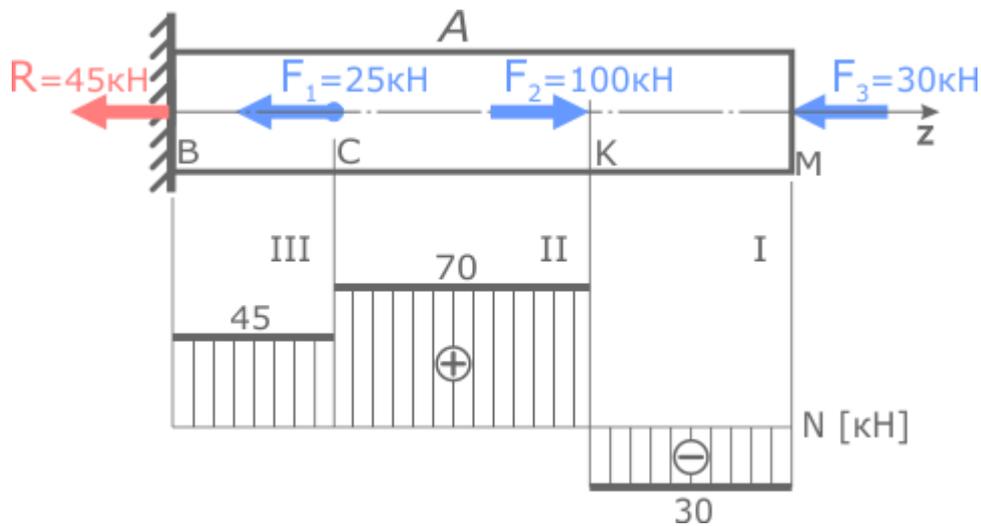
где N – внутренние продольные силы (найжены ранее),

A — площадь поперечного сечения стержня.

Чтобы найти размеры поперечного сечения стержня рассчитаем площадь A . Для этого запишем условие прочности относительно площади:

$$A \geq \frac{N}{[\sigma]}$$

Площадь сечения в данном случае постоянна по всей длине стержня и должна обеспечивать прочность на всех его силовых участках. Поэтому расчёт будем вести по самому нагруженному из них, т. е. где внутренняя сила максимальна (N_{max}) (см.рис.8).



По построенной эпюре внутренних сил видно, что наиболее нагруженным является II участок, где $N=N_{max}=70\text{кН}$.

Тогда расчётная площадь сечения стержня:

$$A_p \geq \frac{N_{max}}{[\sigma]} = \frac{70 \cdot 10^3}{160 \cdot 10^6} = 437,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 437,5 \text{ мм}^2$$

Таким образом для обеспечения необходимой прочности стержня площадь его поперечного сечения должна быть не менее $437,5 \text{ мм}^2$.

Теперь, зная площадь квадрата, рассчитаем его сторону:

$$a_p = \sqrt{A_p} = \sqrt{437,5} = 20,9 \text{ мм}$$

Это соответственно минимальный размер поперечного сечения стержня, обеспечивающий его прочность.

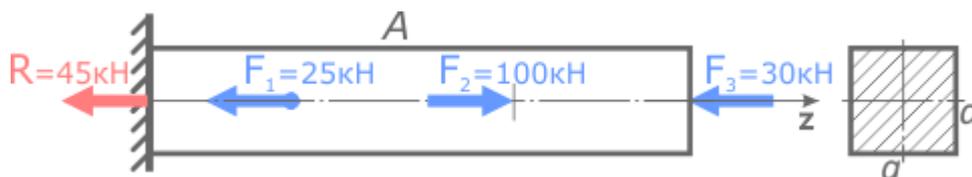
В случаях, когда в задании не ставится дополнительных условий полученный размер можно округлить до целого миллиметра, но только в **большую** сторону.

По ГОСТ 6636 окончательно принимаем ближайший в сторону увеличения линейный размер $a=22\text{мм}$.

Все дальнейшие расчеты стержня будем вести по этому размеру.

Задание 4. Построение эпюры нормальных напряжений при растяжении-сжатии.

Построить эпюру нормальных напряжений для стержня постоянного сечения, нагруженного продольными силами. Поперечное сечение стержня — квадрат со сторонами $a=22 \text{ мм}$. Допустимые напряжения $[\sigma]=160\text{МПа}$



Расчёт нормальных напряжений при растяжении-сжатии производится по формуле:

$$\sigma_i = \frac{N_i}{A_i}$$

т. е. напряжения в рассматриваемом сечении определяются отношением соответствующей величины внутренней силы к площади поперечного сечения стержня.

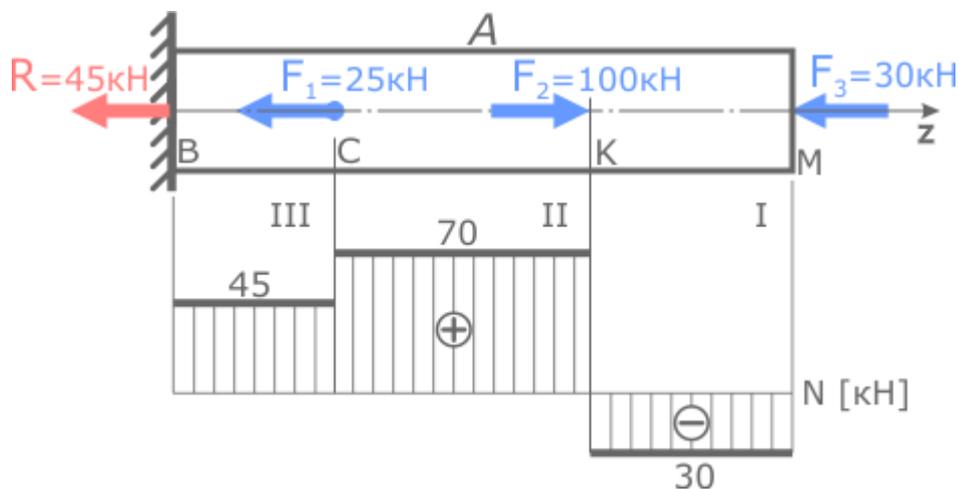
Площадь поперечного сечения стержня постоянна по всей его длине, и составляет

$$A = a^2 = 22^2 = 484 \text{ мм}^2 = 484 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

Очевидно, что в пределах участка стержня, на котором внутренняя сила и площадь постоянны, напряжения так же будут иметь одинаковую величину.

При одинаковой площади внутренние силы различаются на трёх силовых участках. Соответственно, на этих участках нормальные напряжения тоже будут отличаться.

Знак напряжений зависит от знака соответствующей внутренней продольной силы. Значения внутренних сил принимаются с построенной ранее эпюры N (см.рис.8).



Произведём расчёт напряжения на каждом силовом участке.

Нормальные напряжения на I силовом участке (KM):

$$\sigma_I = \sigma_{KM} = \frac{N_I}{A} = \frac{-30 \cdot 10^3}{484 \cdot 10^{-6}} \approx -62 \text{ МПа}$$

На II участке (СК):

$$\sigma_{II} = \sigma_{СК} = \frac{N_{II}}{A} = \frac{70 \cdot 10^3}{484 \cdot 10^{-6}} \approx 144,6 \text{ МПа}$$

На III участке (BC):

$$\sigma_{III} = \sigma_{BC} = \frac{N_{III}}{A} = \frac{45 \cdot 10^3}{484 \cdot 10^{-6}} \approx 93 \text{ МПа}$$

По полученным данным строим эпюру нормальных напряжений.

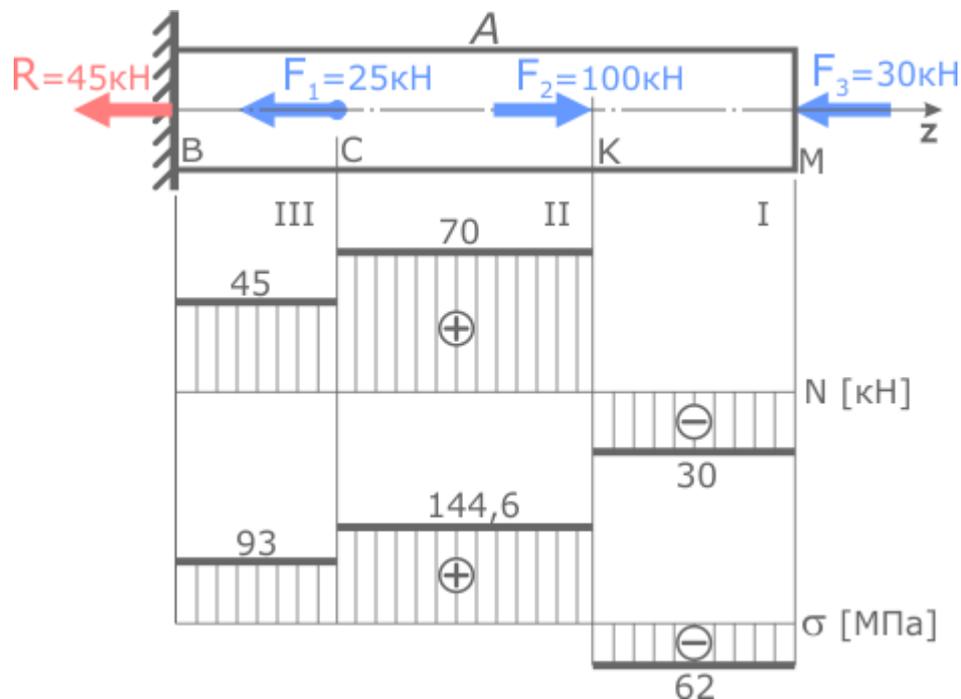
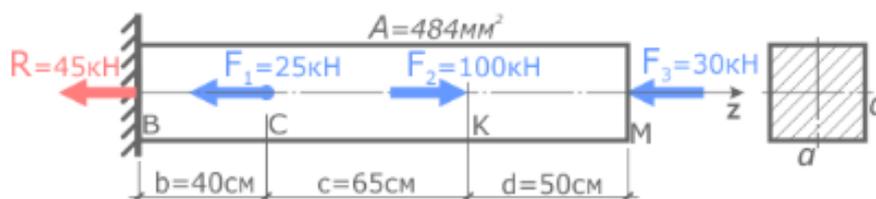


Рисунок 10 – Эпюра продольных сил N и напряжений

Вывод: По построенной эпюре видно, что напряжения не превышают заданных допустимых значений, следовательно, рассчитанные размеры стержня обеспечивают его прочность.

Задание 5. Рассчитать деформации участков и общее изменение длины прямого стержня постоянного сечения. Модуль упругости стали $E=200 \text{ ГПа}$.



Стержень имеет три силовых участка, на которых площадь сечения одинакова, но внутренние и нормальные напряжения отличаются, поэтому определим абсолютные деформации всех участков в отдельности, после чего сложив их, получим изменение длины всего стержня в целом.

Изменение длины участков стержня при растяжении-сжатии рассчитывается по формуле:

$$\Delta l_i = \frac{N_i \cdot l_i}{A_i \cdot E_i} = \frac{\sigma_i \cdot l_i}{E_i}$$

где N_i – величина внутренней продольной силы,

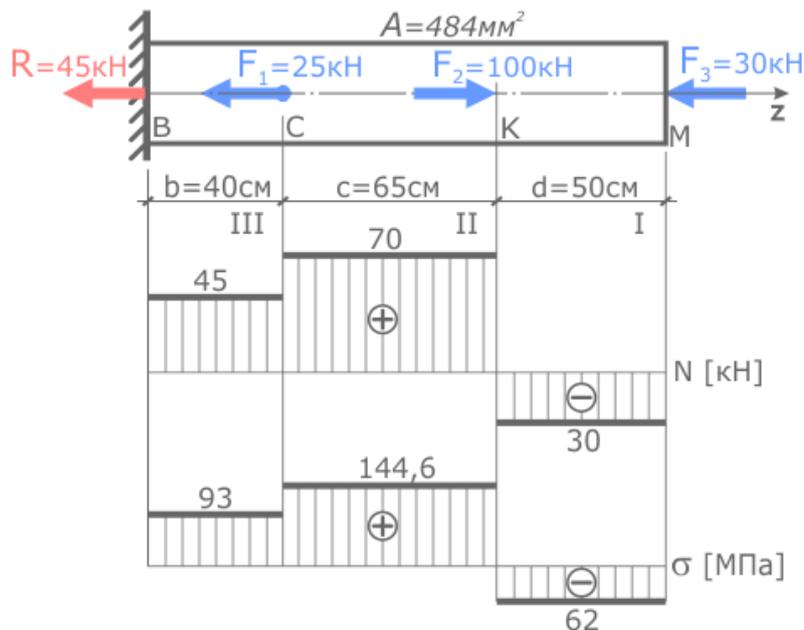
l_i – длина рассматриваемого участка,

A_i – площадь его поперечного сечения,

E_i – модуль Юнга (продольной упругости) для материала стержня,

σ_i – значение нормальных напряжений на рассматриваемом участке.

Значения внутренних сил и напряжений принимаются с построенных эпюр N (σ) (см. рис.10).



По эпюрам видно, что первый участок сжимается, а участки II и III растягиваются, следовательно, деформации Δl второго и третьего участков будут положительны (их длина увеличивается), а первого отрицательны (продольный размер уменьшается).

Рассчитаем их: Деформация I участка (KM)

$$\Delta l_I = \Delta l_{KM} = \frac{N_I \cdot d}{A \cdot E} = \frac{-30 \cdot 10^3 \cdot 0,5}{484 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \cdot 10^9} = -1,5 \cdot 10^{-4} \cdot m = -0,15 \text{ мм}$$

Деформация II участок (СК)

$$\Delta l_{II} = \Delta l_{СК} = \frac{N_{II} \cdot c}{A \cdot E} = \frac{70 \cdot 10^3 \cdot 0,65}{484 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \cdot 10^9} = 4,7 \cdot 10^{-4} \cdot m = 0,47 \text{ мм}$$

Деформация третьего участка ВС

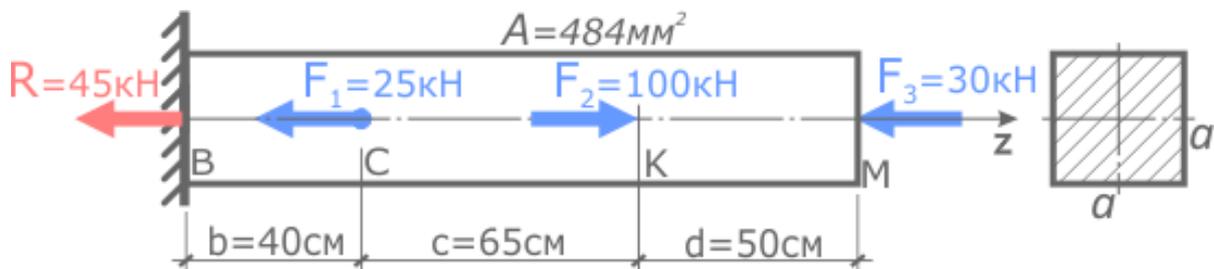
$$\Delta l_{III} = \Delta l_{BC} = \frac{N_{III} \cdot b}{A \cdot E} = \frac{45 \cdot 10^3 \cdot 0,4}{484 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \cdot 10^9} = 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0,19 \text{ мм}$$

Сложив, с учётом знака, деформации всех участков получим величину изменения длины всего стержня в целом:

$$\Delta l = \sum \Delta l_i = \Delta l_I + \Delta l_{II} + \Delta l_{III} = -0,15 + 0,47 + 0,19 = 0,51 \text{ мм}$$

В результате деформации общая длина стержня увеличится на 0,51 мм.

Задание 6. Рассчитать перемещения характерных сечений стержня постоянного сечения и построить их эпюру.



Под действием внешних сил стержень деформируется, вследствие чего его поперечные сечения перемещаются (в данном случае влево либо вправо).

Для расчёта величины и направления перемещений воспользуемся соответствующей формулой:

$$\delta_i = \delta_{i-1} + \Delta l_i$$

где δ_i – перемещение рассматриваемого сечения,

δ_{i-1} – перемещение предыдущего сечения,

Δl_i – деформация участка, расположенного между указанными сечениями (рассчитаны ранее).

По расчётной схеме видно, что сечение, расположенное в заделке (сечение В), перемещаться не может, следовательно, его перемещение равно нулю, т. е.

$$\delta_B = 0 \text{ (т.к. в заделке)}$$

Перемещение остальных сечений рассчитывается последовательно от него.

Следующим рассматриваем сечение С.

Его перемещение δ_C будет складываться из двух составляющих:

1. изменения длины участка ВС,
2. перемещения предыдущего сечения В с которым связан их общий участок.

Так как сечение В неподвижно, сечение С переместится ровно на ту величину, на которую растянется III участок ВС.

$$\delta_C = \delta_B + \Delta l_{BC} = \delta_B + \Delta l_{III} = 0 + 0,19 = 0,19 \text{ мм}$$

Перемещения остальных сечений рассчитываются аналогично:

$$\delta_K = \delta_C + \Delta l_{CK} = 0,19 + 0,47 = 0,66 \text{ мм}$$

$$\delta_M = \delta_K + \Delta l_{KM} = 0,66 + (-0,15) = 0,51 \text{ мм}$$

По этим данным строится эпюра перемещений δ . Для этого рассчитанные значения в выбранном масштабе откладываются от базовой линии под соответствующим сечением стержня (рисунок 11).

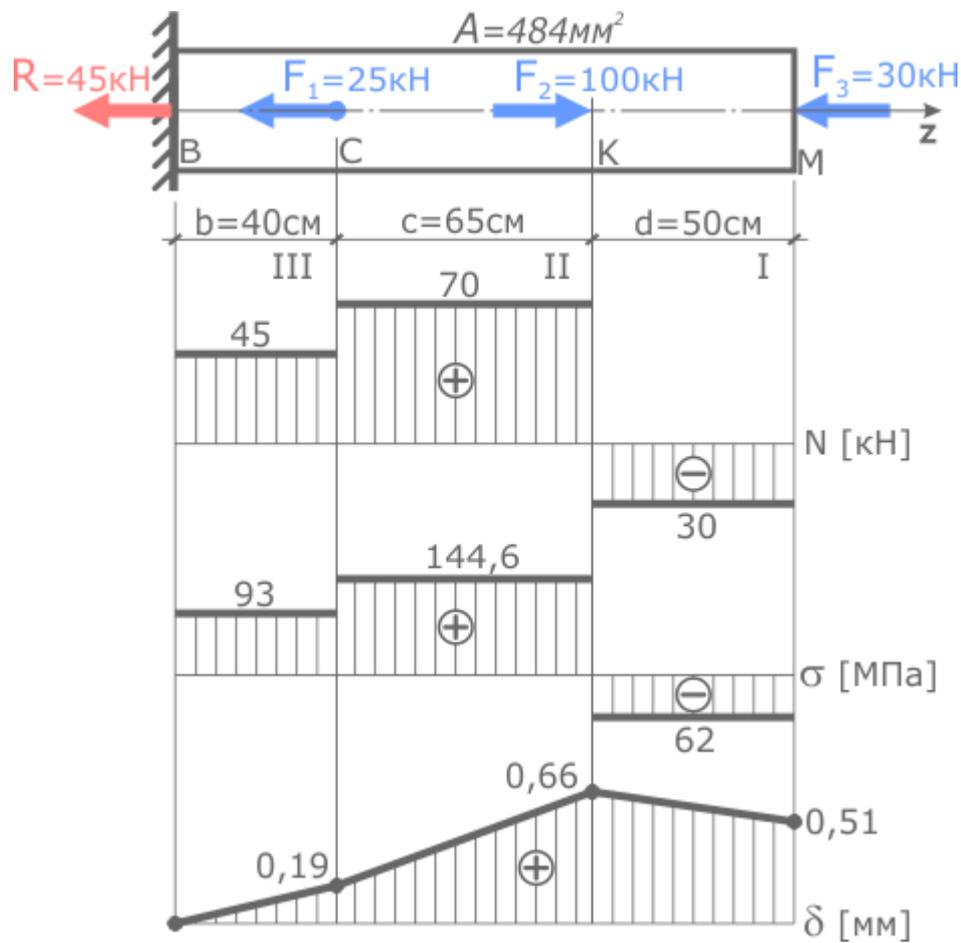


Рисунок 11 – Эпюра перемещений δ

Вывод: Эпюра наглядно показывает, что в результате деформации стержня наибольшее перемещение получило сечение К, которое переместилось вправо на 0,66 мм, а общая длина всего стержня увеличилась на 0,51 мм.

На участках, где нормальные напряжения положительны линия эпюры перемещений идёт на возрастание (при условии, что заделка слева) и, наоборот.

При этом, чем больше величина напряжений, тем больше угол наклона линии эпюры δ к базовой линии.

6.3 Статически неопределимая задача

Задачи на расчёт конструкций, в которых внутренние силовые факторы не могут быть определены с помощью одних лишь уравнений равновесия статики, называют **статически неопределимыми**.

Подобные задачи нередко встречаются при расчёте конструкций, подверженных температурным деформациям.

Для решения таких задач помимо уравнений равновесия составляют уравнение перемещений или деформаций.

➤ При расчёте составляются дополнительные уравнения перемещений, учитывающие характер деформации системы.

➤ Число дополнительных уравнений определяется степенью статической неопределимости системы. ***Степень статической неопределимости определяется разностью между числом неизвестных и числом независимых уравнений статики.***

➤ Все эти системы имеют «лишние связи» в виде дополнительных закреплений, но они необходимы с точки зрения эксплуатационных целей.

□ **Особенности статически неопределимых систем:**

1) чем больше жёсткость элемента EA , тем большую часть прилагаемой нагрузки он способен воспринять;

2) усилия в элементах системы зависят от температуры;

3) в элементах возникают усилия от неточности изготовления или сборки.

□ **Расчёт статически неопределимых систем производят по следующей схеме:**

1. Статическая часть задачи. Составляют уравнения равновесия и определяют степень статической неопределимости.

2. Геометрическая часть задачи. Составляют уравнения совместности перемещений, рассматривая систему в деформированном состоянии. Их число равно числу степени статической неопределимости.

3. Физическая часть задачи. Удлинения (укорочения), входящие в уравнения перемещений, с помощью закона Гука выражают через усилия.

4. Синтез. Находят усилия, решая совместно статические и физические уравнения.

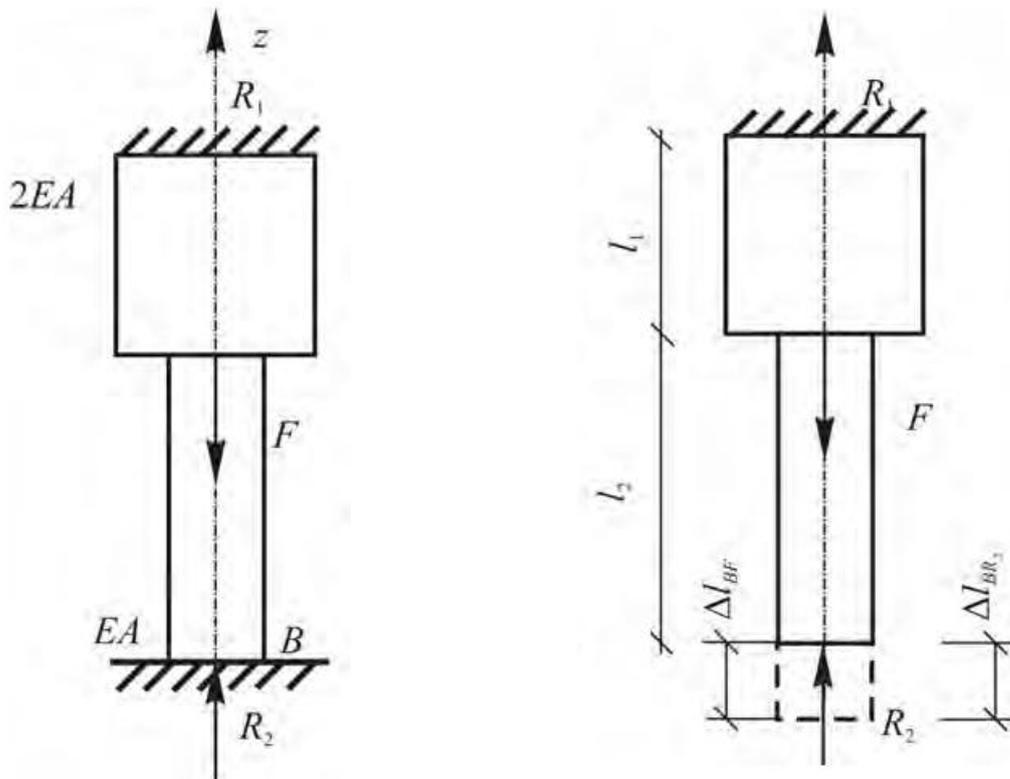
Часть 1 - Для ступенчатого бруса (рисунок), находящегося под действием силы F , построить эпюры продольных сил и нормальных напряжений. Площадь сечения A , модуль упругости (согласно материалу указанного в таблице), жёсткость сечения первой части бруса $2EA$, второй — EA , ℓ_1 — длина первой части бруса, ℓ_2 — длина второй части бруса.

Часть 2 – Брус нагрет на величину Δt^0 . Температурный коэффициент линейного расширения (согласно материалу указанного в таблице).

А) Определить влияние температуры на напряжения и деформации в брус.

Б) Определить продольные усилия и напряжения только от нагревания стержня без учёта силы $F=0$.

В) Сделать вывод. Сравнить значение продольных сил и нормальных напряжений при условии действия внешней силы, под влиянием температуры и без учёта действия силы.



№ вар.	Материал бруса	F , кН	A , см ²	Δt^0 , С	l_1 , см	l_2 , см.
1	Латунь	100	20	20	20	30
2	Сталь	100	20	25	20	30
3	Никель	100	20	30	20	30
4	Олово	100	20	35	20	30
5	Железо	100	20	40	20	30
6	Медь	100	20	45	20	30
7	Бетон	100	20	50	20	30
8	Алюминий	100	20	55	20	30
9	Мрамор	100	20	60	20	30
10	Чугун	100	20	65	20	30
11	Латунь	200	10	20	30	20
12	Сталь	200	10	25	30	20
13	Никель	200	10	30	30	20
14	Олово	200	10	35	30	20
15	Железо	200	10	40	30	20
16	Медь	200	10	45	30	20
17	Бетон	200	10	50	30	20
18	Алюминий	200	10	55	30	20

19	Мрамор	200	10	60	30	20
20	Чугун	200	10	65	30	20

6.4 Пример решения задачи

Напряжения, возникающие под действием температуры

При нагреве или охлаждении в элементах конструкций возникают напряжения. Рассмотрим стержень, защемленный с двух сторон и подвергающийся нагреву, т. е. имеем: $t_2 > t_1$.

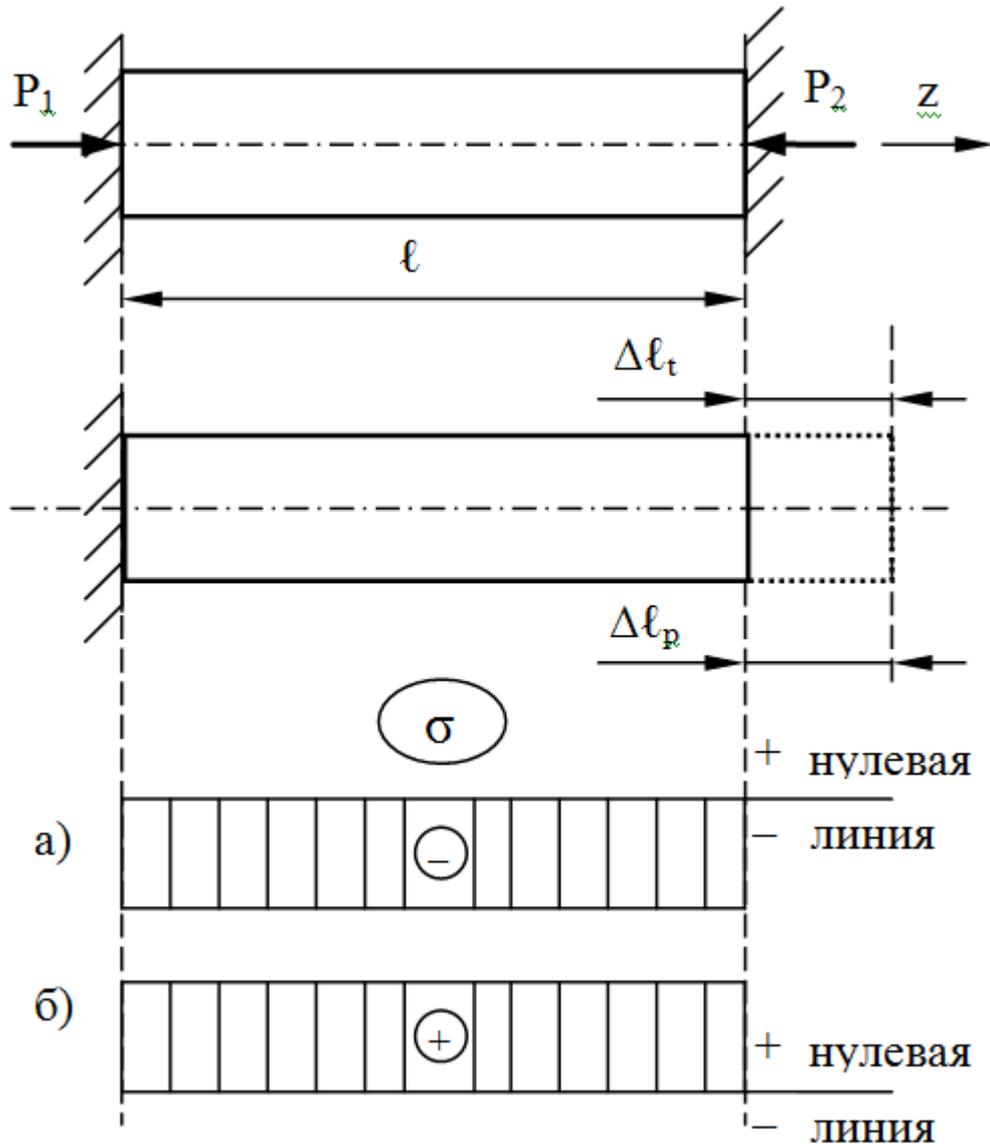


Схема к расчёту нагретого стержня

В случае, если при нагреве или охлаждения стержня, ничего не препятствует изменению его длины, то в нём не возникает никаких напряжений. Другое дело в

статически неопределимых системах. При нагреве бруса, жёстко закреплённого обоими концами (см. схему), заделки препятствуют его свободному удлинению, и в них возникают силы реакции P_1 и P_2 , вызывающие сжатие бруса.

Составим уравнение статики: $P_1 - P_2 = 0$

Как видим, задача статически неопределима.

Если мысленно снять правое защемление, то под действием усилия распора и температуры возникнут перемещения:

$$\Delta l_t = \Delta l_p, \quad \Delta l_p = \frac{P \cdot l}{EA}, \quad \Delta l_t = \alpha \cdot l \cdot \Delta t$$

где α – коэффициент линейного расширения материала.

Тогда имеем:

$$\frac{P \cdot l}{EA} = \alpha \cdot l \cdot \Delta t,$$

$$\text{или } \frac{\sigma}{E} = \alpha \cdot \Delta t,$$

$$\text{или } \sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

Напряжения, вызванные изменением температуры в стержне постоянного сечения, не зависят от его длины, площади поперечного сечения, а зависят от модуля упругости, коэффициента линейного расширения α и разности температур Δt .

При нагреве стержня в нём возникают сжимающие напряжения при невозможности свободного удлинения (**а**), при охлаждении – растягивающие, поскольку брус будет испытывать растяжение, не имея возможности свободно укорачиваться (**б**).

При изучении температурных напряжений следует строго разграничивать понятия: растяжение и удлинение, сжатие и укорочение, так как в некоторых задачах стержни могут удлиняться, испытывая при этом сжатие и наоборот.

Приложения

1. Плотности некоторых твердых тел (при нормальном атмосферном давлении, $t = 200\text{C}$)

Твердое тело	Плотность, кг/м ³	Твердое тело	Плотность, кг/м ³
Алюминий	$2,7 \cdot 10^3$	Нихром	$8,4 \cdot 10^3$
Бетон	$2,3 \cdot 10^3$	Олово	$7,2 \cdot 10^3$
Вольфрам	$19,75 \cdot 10^3$	Парафин	900
Железо (сталь)	$7,85 \cdot 10^3$	Платина	$21,4 \cdot 10^3$
Золото	$19,3 \cdot 10^3$	Пробка	240
Кирпич	$1,8 \cdot 10^3$	Свинец	$11,3 \cdot 10^3$
Латунь	$8,4 \cdot 10^3$	Серебро	$10,5 \cdot 10^3$
Лёд	900	Стекло оконное	$2,5 \cdot 10^3$
Медь	$8,8 \cdot 10^3$	Фарфор	$2,3 \cdot 10^3$
Мрамор	$2,7 \cdot 10^3$	Цинк	$7,1 \cdot 10^3$
Никель	$8,8 \cdot 10^3$	Чугун	$7 \cdot 10^3$

2. Плотности некоторых жидкостей (при нормальном атмосферном давлении, $t = 20^0\text{C}$)

Жидкость	Плотность, кг/м ³	Жидкость	Плотность, кг/м ³
Ацетон	790	Керосин	800
Бензин	710	Машинное масло	900
Бензол	880	Мёд	1350
Вода морская	1030	Нефть	800
Вода чистая	1000	Подсолнечное масло	930
Глицерин	1260	Ртуть	13600
Жидкое олово (при $t=400^0\text{C}$)	6800	Серная кислота	1800
Жидкий воздух (при $t=-194^0\text{C}$)	860	Спирт	800
Касторовое масло	900	Эфир	710

3. Плотности некоторых газов (при нормальном атмосферном давлении, $t = 20^0\text{C}$)

Газ	Плотность, кг/м ³	Газ	Плотность, кг/м ³
Азот	1,250	Гелий	0,180
Аргон	1,780	Кислород	1,430
Водяной пар (при $t=100^0\text{C}$)	0,590	Оксид углерода (IV) (углекислый газ)	1,980
Водород	0,090	Природный газ	0,800
Воздух (при $t=0^0\text{C}$)	1,290	Хлор	3,210

4. Свойства упругости некоторых твердых тел
(при комнатной температуре, $t = 20^{\circ}\text{C}$)

Вещество	Модуль упругости $E, 10^{10} \text{ Па}$	Коэффициент Пуассона ν
Алюминий	7,1	0,34
Вольфрам	39	0,29
Германий	8,1	0,31
Дюралюминий	7,3	0,34
Иридий	52,8	0,26
Кварцевое стекло	7,5	0,17
Константан	16,3	0,33
Латунь	9,8	0,35
Марганец	12,4	0,33
Медь	12,3	0,35
Плексиглас	0,32	0,35
Полистирол	0,32	0,35
Свинец	1,6	0,44
Серебро	7,9	0,37
Серый чугун	10,8	0,22
Сталь	20,6	0,28
Стекло оконное	7	0,25
Фарфор	5,8	0,23
Бетон	7-7,1	0,2 по СНиП , в расчётах возможно снижение до 0,15—0,17
Мрамор	5,6-7,3	
Кирпичная кладка	0,27-0,3	

5. Температурный коэффициент линейного расширения

Материал	Коэффициент линейного теплового расширения	
	$10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	$10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{F}^{-1}$
ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирол) термопласт	73.8	41
ABS - стекло, армированное волокнами	30.4	17
Акриловый материал, прессованный	234	130
Алмаз	1.1	0.6
Алмаз технический	1.2	0.67
Алюминий	22.2	12.3
Ацеталь	106.5	59.2
Ацеталь, армированный стекловолокном	39.4	22
Ацетат целлюлозы (СА)	130	72.2
Ацетат бутират целлюлозы (СAB)	25.2	14

Барий	20.6	11.4
Бериллий	11.5	6.4
Бериллиево-медный сплав (Cu 75, Be 25)	16.7	9.3
Бетон	14.5	8.0
Бетонные структуры	9.8	5.5
Бронза	18.0	10.0
Ванадий	8	4.5
Висмут	13	7.3
Вольфрам	4.3	2.4
Гадолиний	9	5
Гафний	5.9	3.3
Германий	6.1	3.4
Гольмий	11.2	6.2
Гранит	7.9	4.4
Графит, чистый	7.9	4.4
Диспрозий	9.9	5.5
Древесина, пихта, ель	3.7	2.1
Древесина дуба, параллельно волокнам	4.9	2.7
Древесина дуба, перпендикулярно волокнам	5.4	3.0
Древесина, сосна	5	2.8
Европий	35	19.4
Железо, чистое	12.0	6.7
Железо, литое	10.4	5.9
Железо, кованое	11.3	6.3
Золото	14.2	8.2
Известняк	8	4.4
Инвар (сплав железа с никелем)	1.5	0.8
Инконель (сплав)	12.6	7.0
Иридий	6.4	3.6
Иттербий	26.3	14.6
Иттрий	10.6	5.9
Кадмий	30	16.8
Калий	83	46.1 - 46.4

Кальций	22.3	12.4
Каменная кладка	4.7 - 9.0	2.6 - 5.0
Каучук, твёрдый	77	42.8
Кварц	0.77 - 1.4	0.43 - 0.79
Керамическая плитка (черепица)	5.9	3.3
Кирпич	5.5	3.1
Кобальт	12	6.7
Констанан (сплав)	18.8	10.4
Корунд, спеченный	6.5	3.6
Кремний	5.1	2.8
Лантан	12.1	6.7
Латунь	18.7	10.4
Лед	51	28.3
Литий	46	25.6
Литая стальная решетка	10.8	6.0
Лютеций	9.9	5.5
Литой лист из акрилового пластика	81	45
Магний	25	14
Марганец	22	12.3
Медноникелевый сплав 30%	16.2	9
Медь	16.6	9.3
Молибден	5	2.8
Монель-металл (никелево-медный сплав)	13.5	7.5
Мрамор	5.5 - 14.1	3.1 - 7.9
Мыльный камень (стеатит)	8.5	4.7
Мышьяк	4.7	2.6
Натрий	70	39.1
Нейлон, универсальный	72	40
Нейлон, Тип 11 (Туре 11)	100	55.6
Нейлон, Тип 12 (Туре 12)	80.5	44.7
Нейлон литой , Тип 6 (Туре 6)	85	47.2
Нейлон, Тип 6/6 (Туре 6/6), формовочный состав	80	44.4
Неодим	9.6	5.3

Никель	13.0	7.2
Ниобий (Columbium)	7	3.9
Нитрат целлюлозы (CN)	100	55.6
Окись алюминия	5.4	3.0
Олово	23.4	13.0
Осмий	5	2.8
Палладий	11.8	6.6
Песчаник	11.6	6.5
Платина	9.0	5.0
Плутоний	54	30.2
Полиалломер	91.5	50.8
Полиамид (РА)	110	61.1
Поливинилхлорид (PVC)	50.4	28
Поливинилденфторид (PVDF)	127.8	71
Поликарбонат (PC)	70.2	39
Поликарбонат - армированный стекловолокном	21.5	12
Полипропилен - армированный стекловолокном	32	18
Полистирол (PS)	70	38.9
Полисульфон (PSO)	55.8	31
Полиуретан (PUR), жесткий	57.6	32
Полифенилен - армированный стекловолокном	35.8	20
Полифенилен (PP), ненасыщенный	90.5	50.3
Полиэстер	123.5	69
Полиэстер, армированный стекловолокном	25	14
Полиэтилен (PE)	200	111
Полиэтилен - терефталый (PET)	59.4	33
Празеодимий	6.7	3.7
Припой 50 - 50	24.0	13.4
Прометий	11	6.1
Рений	6.7	3.7
Родий	8	4.5
Рутений	9.1	5.1
Самарий	12.7	7.1

Свинец	28.0	15.1
Свинцово-оловянный сплав	11.6	6.5
Селен	3.8	2.1
Серебро	19.5	10.7
Скандий	10.2	5.7
Слюда	3	1.7
Сплав твердый (Hard alloy) K20	6	3.3
Сплав хастелой (Hastelloy) C	11.3	6.3
Сталь	13.0	7.3
Сталь нержавеющая аустенитная (304)	17.3	9.6
Сталь нержавеющая аустенитная (310)	14.4	8.0
Сталь нержавеющая аустенитная (316)	16.0	8.9
Сталь нержавеющая ферритная (410)	9.9	5.5
Стекло витринное (зеркальное, листовое)	9.0	5.0
Стекло пирекс, пирекс	4.0	2.2
Стекло тугоплавкое	5.9	3.3
Строительный (известковый) раствор	7.3 - 13.5	4.1-7.5
Стронций	22.5	12.5
Сурьма	10.4	5.8
Таллий	29.9	16.6
Тантал	6.5	3.6
Теллур	36.9	20.5
Тербий	10.3	5.7
Титан	8.6	4.8
Торий	12	6.7
Тулий	13.3	7.4
Уран	13.9	7.7
Фарфор	3.6-4.5	2.0-2.5
Фенольно-альдегидный полимер без добавок	80	44.4
Фторэтилен пропилен (FEP)	135	75
Хлорированный поливинилхлорид (CPVC)	66.6	37
Хром	6.2	3.4
Чугун (литьё)	0,66	10,4

Цемент	10.0	6.0
Церий	5.2	2.9
Цинк	29.7	16.5
Цирконий	5.7	3.2
Шифер	10.4	5.8
Штукатурка	16.4	9.2
Эбонит	76.6	42.8
Эпоксидная смола, литая резина и незаполненные продукты из них	55	31
Эрбий	12.2	6.8
Этилен винилацетат (EVA)	180	100
Этилен и этилакрилат (EEA)	205	113.9
Эфир виниловый	16 - 22	8.7 - 12

6. Модуль сдвига

(при комнатной температуре, $t = 20^{\circ}\text{C}$)

Модуль сдвига G связан с модулем Юнга (модуль упругости) через коэффициент

Пуассона: $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$, где ν – значение коэффициента Пуассона для данного

материала.

Вещество	Модуль сдвига $G, 10^{10}$ Па
Алмаз	47,8
Алюминий	2,55
Германий	3,1
Дюралюминий	2,7
Кварцевое стекло	3,2
Константан	6,2
Латунь	3,6
Марганец	4,6
Медь	4,55
Полиэтилен	0,0117
Резина	0,00006
Свинец	0,57
Серебро	2,8
Серый чугун	4,4
Сталь	7,93
Титан	4,14

7. Коэффициент звукоизоляции D строительных материалов

Материал	Толщина d, 10 ² м	Коэффициент звукоизоляции D, дБ
Кирпичная стена, оштукатуренная: ¼ кирпича;	9	42
½ кирпича;	15	44
1/1 кирпича.	27	50
Древесноволокнистая плитка	2,5	35
Бетонная плитка	15...18	48
Клееная фанера	0,5	19
Толстое стекло	0,6.....0,7	29
Одинарное окно		15
Двойное окно		30
Одинарная дверь		до 20
Двойная дверь		40