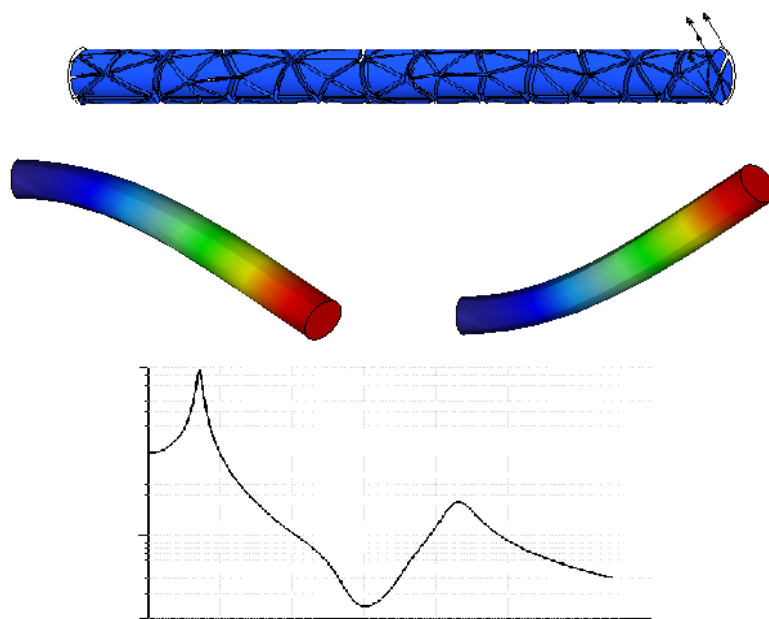


М.И. Евстифеев, Д.П. Елисеев, А.С. Воронов

**РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ
КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА**



**Санкт-Петербург
2020**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

М.И. Евстифеев, Д.П. Елисеев, А.С. Воронов

**РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ
КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки
24.03.02 Системы управления движением и навигация
в качестве учебного пособия для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования
бакалавриата

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург
2020

Евстифеев М.И., Елисеев Д.П., Воронов А.С. Расчет механических характеристик конструкций с использованием программы конечно-элементного анализа. Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2020. – 58 с.

Рецензент:

Грязин Дмитрий Геннадиевич, доктор технических наук, доцент, профессор (квалификационная категория "профессор практики") факультета систем управления и робототехники Университета ИТМО.

В пособии представлен лабораторный практикум по расчету механических характеристик конструкций с использованием метода конечных элементов. Приводятся указания к выполнению практической работы, направленной на освоение базовых практических навыков проектирования и расчета механических характеристик конструкций.

Предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров – 24.03.02 «Системы управления движением и навигация».



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2020

© М.И. Евстифеев, Д.П. Елисеев, А.С. Воронов, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Теоретическая часть.....	5
1.1. Требования к механическим характеристикам конструкций	5
1.2. Аналитические методы расчета механических характеристик	7
1.3. Компьютерные методы расчета механических характеристик	11
2. Постановка задачи.....	15
3. Варианты задания.....	16
4. Порядок выполнения.....	17
4.1. Построение модели	17
4.2. Вызов программы MECHANICA	18
4.3. Выбор материала	19
4.4. Ограничение степеней свободы модели	21
4.5. Создание внешних нагрузок	24
4.6. Создание измерений параметров модели.....	29
4.7. Создание анализов для расчета	33
4.8. Выполнение анализов	42
4.9. Просмотр результатов	44
5. Требования к оформлению лабораторной работы	53
6. Техника безопасности	54
7. Контрольные вопросы.....	55
Список литературы	56

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум направлен на освоение практических навыков расчета механических характеристик конструкции в условиях статических и динамических нагрузок и предназначен для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров – 24.03.02 «Системы управления движением и навигация».

Для выполнения работы требуется 4 академических часа.

В результате изучения выполнения работы студент должен

ИМЕТЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ:

- о современных принципах проектирования конструкций и о методах расчета их механических характеристик.

ЗНАТЬ:

- основные элементы создания трехмерных моделей в пакете CREO;
- основные элементы создания расчетных моделей в модуле MECHANICA.

УМЕТЬ:

- использовать знания основных принципов расчета и моделирования конструкций при различных условиях вибрационных воздействий;
- использовать специальную литературу и другие информационные данные (в том числе на иностранных языках);
- применять программу MECHANICA при решении практических задач.

ПОЛУЧИТЬ ПРАКТИЧЕСКИЕ НАВЫКИ:

- работы с технической документацией, технической литературой, справочниками и другими информационными источниками;
- использования вычислительной техники и программ моделирования.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1. Требования к механическим характеристикам конструкций

Развитие навигационных устройств и гироскопических систем связано с непрерывным повышением их точности и расширением областей применения в гражданской и военной технике. Для успешного функционирования приборов навигации и управления движением в различных условиях эксплуатации необходимо обеспечение требуемых характеристик приборов. Проектируемые приборы должны обладать стойкостью¹ и прочностью² к внешним воздействующим факторам (ВВФ), т.е. обеспечивать при воздействиях необходимую точность выработки параметров в пределах установленных норм и не ломаться.

Согласно ГОСТ 21964-76 «Внешние воздействующие факторы. Номенклатура и характеристики» в зависимости от характера воздействия на изделия все ВВФ делятся на следующие классы:

- механические (вибрация, удары, шум, давление);
- климатические (осадки, туман, пыль, коррозия);
- биологические (бактерии, плесневые грибы, обрастание);
- специальных сред (растворители, масла, смазки, топливо);
- термические (нагрев, охлаждение, тепловой удар);
- электромагнитных полей;
- радиационные.

Каждый класс делится на группы, а каждая группа – на виды с соответствующими каждому виду характеристиками.

Для навигационной аппаратуры, эксплуатируемой на подвижных объектах, таких как корабли, самолеты, вертолеты, автомобили и другие транспортные средства, наиболее значимым требованием является обеспечение механических характеристик приборов.

В соответствии с ГОСТ 30631-99 «Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам при эксплуатации» все изделия разбиваются на группы механического исполнения от М1 до М47 в зависимости от стойкости к механическим ВВФ.

¹ Стойкость изделия к ВВФ – свойство изделия сохранять работоспособное состояние во время и после воздействия на изделие определенного ВВФ в течение всего срока службы в пределах заданных значений.

² Прочность изделия к ВВФ – свойство изделия сохранять работоспособное состояние после воздействия на него определенного ВВФ в пределах заданных значений.

К группе M1 относятся изделия, размещаемые непосредственно на строительных конструкциях, строительно-дорожных машинах (кроме вибрационных), тракторах, в местах установки электродвигателей и насосов. При этом уровень вибрационных воздействий не превышает $5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ (0,5g) в диапазоне частот 0,5-35 Гц, а ударные воздействия отсутствуют.

К группе M46 относятся изделия, размещаемые на катерах и других судах, в том числе судах на подводных крыльях и воздушной подушке. Для этой группы уровень вибрационных воздействий составляет $20 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ (2g) в диапазоне частот 0,5-200 Гц, ударные воздействия доходят до $150 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ (15g). Для группы M47 уровень вибрационных воздействий может достигать $50 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ (5g) в диапазоне частот 200-500 Гц. Такой уровень воздействий называется экстремально высоким.

Как следует из приведенных требований, уровень механических воздействий достаточно широк для различных объектов, на которых размещается проектируемая аппаратура. Поэтому столь важно обеспечить функционирование приборов в условиях воздействия различных ВВФ.

При воздействии механических ВВФ основные требования, предъявляемые к приборам навигации и управления движением, заключаются в обеспечении прочности и в отсутствии механических резонансов³ конструкции в диапазоне частот вибрационных воздействий. Критерием первого требования является отсутствие в конструкции механических напряжений, приближающихся по значению к пределу прочности материала, при заданных условиях эксплуатации. Критерием второго требования является отсутствие в конструкции собственных частот⁴, значения которых лежат в области частот вибрационных воздействий.

В случае, если значения частот внешних воздействий близки к значениям собственных частот колебаний, в конструкции возникает механический резонанс, который приводит к увеличению амплитуды вынужденных колебаний. Это, в свою очередь, ведет к увеличению механических напряжений и к поломке прибора. Увеличение амплитуды вынужденных колебаний зависит от диссипативных свойств конструкции, характеризующих рассеяние механической энергии при колебаниях. Рассеяние энергии возникает как вследствие внутреннего трения в

³ Резонанс конструкции – явление увеличения амплитуды вынужденных колебаний конструкции изделия в два раза и более при постоянном внешнем воздействии, возникающее на частотах вибрационных нагрузок, близких к частоте собственных колебаний изделия.

⁴ Собственная частота колебаний – любая из частот свободных колебаний системы, происходящих без переменного внешнего воздействия и поступления энергии извне. Значения частот свободных колебаний определяются только свойствами самой системы (массой, моментами инерции, жесткостью, демпфированием) и не зависят от внешних воздействий.

материале детали (внутреннее демпфирование), так и вследствие трения в местах сопряжения деталей (конструкционное демпфирование). Величина рассеяния механической энергии определяется коэффициентом демпфирования.

Для успешного проектирования приборов навигации и управления движением, эксплуатируемых в жестких условиях, необходимы расчеты механических характеристик конструкции с определением допустимых механических напряжений и собственных частот колебаний.

1.2. Аналитические методы расчета механических характеристик

Хронологически аналитические методы расчета различных конструкций получили развитие, начиная с работ Роберта Гука⁵, являющихся основой современной теории упругости и сопротивления материалов. Использование формул позволяет оценить численные значения деформаций, напряжений, собственных частот и других механических параметров конструкции. Однако, для аналитического описания динамики сложных систем, таких как сборочные единицы приборов или изделие в целом, необходимо проводить процедуру декомпозиции⁶ и переходить к системам с сосредоточенными параметрами⁷ или составлять сложные математические выражения систем с распределенными параметрами⁸ с определенными допущениями. Получаемые громоздкие формулы, как правило, не имеют аналитического решения и для получения ответов приходится применять численные методы. Тем не менее, аналитические выражения позволяют понять

⁵ Роберт Гук (1635-1703) – английский естествоиспытатель и изобретатель, член Лондонского королевского общества. В 1660 году (в 25 лет!) сформулировал утверждение: «ut tensio sic vis» – «каково растяжение, такова и сила». Этот принцип известен как закон Гука – деформация, возникающая в упругом теле пропорциональна приложенной к этому телу силе.

⁶ Декомпозиция – метод, позволяющий заменить решение одной большой задачи решением серии меньших задач. При использовании этого метода сложную конструкцию разбивают на более простые компоненты, для которых известны формулы расчета.

⁷ Система с сосредоточенными параметрами (дискретная система) описывается в виде системы объектов с жестко фиксированной структурой. Примером может служить исследование маятника, когда масса подвешенного тела сосредоточена в точке, а нить подвеса является невесомой и нерастяжимой, или трехосного гироскопа с абсолютно жесткими элементами. Движение такой системы исследуется с использованием обобщенных координат и обыкновенных дифференциальных уравнений.

⁸ Система с распределенными параметрами (распределенная система) описывается с учетом того, что все тела не являются абсолютно твердыми. Примером может служить исследование механики деформируемых тел или решение задач колебаний сплошной среды в акустике. Движение таких систем исследуется с использованием уравнений в частных производных.

физику процесса и определить параметры конструкции, от величины которых зависит оцениваемые механические характеристики.

В качестве примера рассмотрим стержень как распределенную систему в одном измерении.

Проведем аналитический расчет характеристик стержня круглого сечения диаметром d и длиной l (рисунок 1).

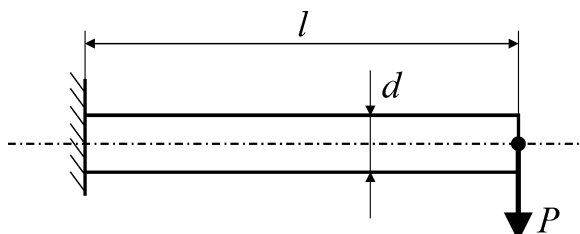


Рисунок 1 – Расчетная схема для определения характеристик стержня

Стержень неподвижно закреплен на одном конце, второй конец остается свободным. К свободному концу прикладывается сила P .

Максимальное перемещение стержня при изгибе под действием силы определяется выражением

$$\Delta_x = \frac{Pl^3}{3EJ_y}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости материала стержня; J_y – осевой момент инерции сечения стержня.

Отметим, что при оценке деформации стержня Δ_x по оси x в соответствии с формулой (1) момент инерции сечения J_y выбирается относительно оси y .

Осевым или экваториальным моментом инерции сечения (площади фигуры) называется интеграл произведений элементарных площадок на квадраты их расстояний от рассматриваемой оси. Моменты инерции произвольной фигуры относительно осей x и y соответственно равны

$$\begin{cases} J_x = \int_F y^2 dF \\ J_y = \int_F x^2 dF \end{cases}; \quad (2)$$

где F – площадь сечения фигуры.

Осевой момент инерции сечения (не путать с моментом инерции тела) зависит от формы и размеров сечения. Моменты инерции некоторых форм сечений приведены в таблице 1.

Момент инерции сложных сечений вычисляется как сумма моментов инерции отдельных простых сечений, моменты инерции которых известны. В случае, когда в сечении имеется отверстие, последнее можно

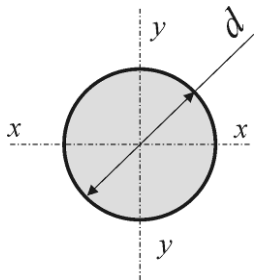
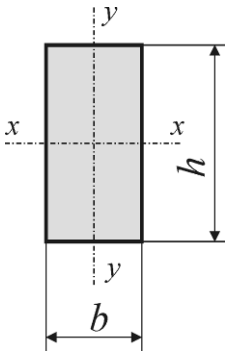
считать фигурой с отрицательной площадью. Например, момент инерции прямоугольного сечения с отверстием посередине будет иметь вид

$$J_x = \frac{bh^3}{12} - \frac{\pi d_0^4}{64}, \quad (3)$$

где d_0 – диаметр отверстия.

Таблица 1

Моменты инерции некоторых форм сечений

Форма сечения	Момент инерции сечения
	$J_x = J_y = \frac{\pi d^4}{64}$
	$J_x = \frac{bh^3}{12}$ $J_y = \frac{hb^3}{12}$

При смещении отверстия относительно центра на некоторое расстояние a_x по оси x или a_y по оси y моменты инерции сечения рассчитывается по формулам

$$\begin{cases} J_{x1} = J_x + a_y^2 F \\ J_{y1} = J_y + a_x^2 F \end{cases} \quad (4)$$

Максимальные нормальные напряжения в стержне постоянного сечения при действии нагрузки возникают в месте его крепления, в так называемой заделке. Величина нормальных напряжений в любом слое сечения стержня определяется формулой Навье

$$\sigma = \frac{My^*}{J_x} \quad (5)$$

где M – момент изгиба стержня вокруг оси x , обусловленный действием силы P ; y^* – расстояние слоя сечения от оси x . Для рассматриваемого случая $M = -Pl$.

Из формулы (5) следует, что максимальные напряжения возникают в слое с координатой $y^* = y_{\max}$, а минимальные напряжения равняются нулю при $y^* = 0$ в слое, который называют нейтральным.

Учитывая выражения для момента изгиба, максимальное напряжение в круглом стержне при $y^* = d/2$ в соответствии с формулой (5) будет

$$\sigma_{\max} = -\frac{Pl d}{2J_x}. \quad (6)$$

Частоты собственных (свободных) колебаний стержня зависят от параметров стержня и его заделки. Значения частот для каждой моды колебаний⁹ определяются по формуле

$$f_i = \frac{k_i^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EJ_x}{\rho F}}, \quad (7)$$

где k_i – корень частотного уравнения; i – номер моды колебаний; ρ – удельный вес материала стержня.

Для первой моды колебаний $k_1 = 1,875$, для второй моды $k_2 = 4,694$.

Рассчитаем механические характеристики стержня по формулам (1) – (7) при следующих параметрах:

$d = 10$ мм; $l = 100$ мм; $P = 1$ Н.

Материал – алюминий.

$E = 70$ ГПа; $\rho = 2,7 \cdot 10^3$ кг/м³; $\sigma_{\text{пр}} = 130$ МПа (предел прочности).

Имеем:

Момент инерции сечения $J_x = 4,9 \cdot 10^{-10}$ м⁴.

Максимальное перемещение $\Delta_x = 9,7 \cdot 10^{-3}$ мм.

Максимальное напряжение $\sigma_{\max} = 1,02$ Н/мм² = 1,02 МПа.

Частота первой моды колебаний $f_1 = 715$ Гц.

Частота второй моды колебаний $f_2 = 4481$ Гц.

Аналитические методы расчета позволяют оценить как те или иные параметры конструкции влияют на механические характеристики. Из выражения (1) следует, что величина изгиба пропорциональна длине стержня в кубе и обратно пропорциональна четвертой степени его диаметра. При этом максимальное напряжение согласно (6) пропорционально длине стержня в первой степени и обратно пропорционально кубу его диаметра. В зависимости от того, какие характеристики надо улучшить, можно определить какие параметры конструкции необходимо варьировать.

⁹ Мода колебаний характеризуется пространственной формой колеблющейся системы и значением собственной частоты.

1.3. Компьютерные методы расчета механических характеристик

Быстрое развитие современной техники невозможно без использования систем автоматизированного проектирования, составной частью которых являются современные методы анализа. Для расчета и проектирования механических характеристик конструкций навигационных приборов используется компьютерное моделирование конструкций с привлечением конечно-элементного анализа (КЭА) или FEM анализа (Finite Element Modeling). Использование КЭА позволяет существенно сократить время разработки и расчета новых вариантов конструкций.

В настоящее время существует большое количество компьютерных программ, которые позволяют анализировать конструкции большой сложности. Такие программные продукты способны дать представление о поведении реальной конструкции на основе изучения компьютерной физико-механической модели и представляют собой системы инженерного анализа, которые в англоязычной литературе носят наименование CAE-системы (Computer-Aided Engineering). Среди программ универсального назначения необходимо отметить программу ANSYS, занимающую лидирующее положение на рынке пакетов КЭА. Разработаны специализированные программы, предназначенные для проектирования микромеханических устройств, такие как MEMCAD, MEMS Pro, Coventor.

Различные конструкции могут быть проанализированы с использованием программы MECHANICA (Pro/Mechanica), входящей в состав программы CREO (Pro/Engineer) фирмы Parametric Technology.

Основные преимущества КЭА по сравнению с аналитическими методами исследования конструкций приведены ниже.

Универсальность. На конечные элементы можно разбить конструкцию практически любой сложности. При этом общий подход остается неизменным, а изменяется количество элементов, форма и время расчета.

Скорость и эффективность. Приблизительный результат можно получить очень быстро, а потом последовательно уточнять решение.

Достаточная точность. С увеличением числа конечных элементов поведение модели приближается к поведению реальной конструкции.

Наглядность результатов. Это преимущество относится к современным компьютерным средствам визуализации.

Многодисциплинарность. Конструкцию можно подвергнуть статическому, динамическому, тепловому, электромагнитному и другим видам анализов. Возможно проведение комбинированных видов анализа, так называемых многофункциональных анализов (multiphysics), что позволяет комплексно оценивать физико-механические характеристики конструкции (рисунок 2).

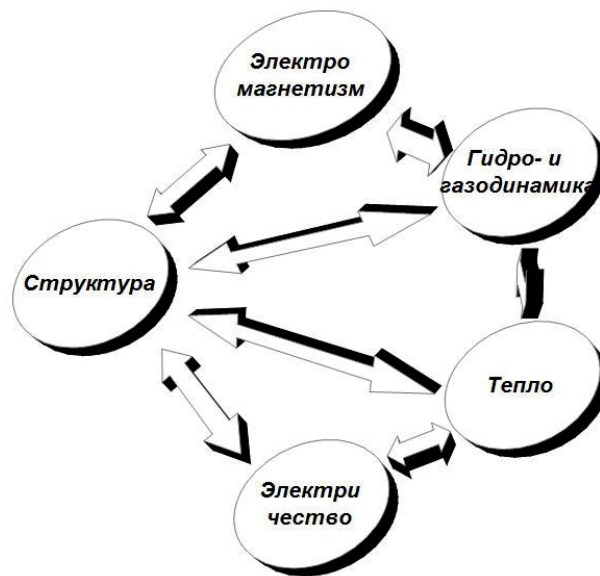


Рисунок 2 – Комбинированный конечно-элементный анализ.

КЭА имеет конкретную область применимости, вне границ которой результат может совершенно не соответствовать действительности. Для правильной интерпретации результатов необходимо понимание физических процессов, протекающих в конструкции, что требует определенных знаний и опыта. Аналитический расчет конструкции позволяет построить математическую модель, как правило, с сосредоточенными параметрами и наметить тенденции для оптимизации конструкции, определить значимость тех или иных параметров. КЭА помогает смоделировать конструкцию с распределенными параметрами и проверить аналитические выкладки. Для получения качественных результатов при исследовании конструкций необходимо совместное использование как аналитического подхода, так и КЭА. Естественно, критерием истины является только эксперимент, который необходим при разработке конструкции.

Проектирование конструкции навигационного прибора предполагает создание структуры изделия и обеспечение заданного состояния элементов конструкции. На этапе создания структуры определяются форма, пропорции, взаимное расположение частей, степени свободы, кинематика и прочее. На этапе обеспечения заданного состояния определяются напряжения и деформации, собственные частоты конструкции, стойкость к внешним инерционным воздействиям – вибрации и ударам.

Процедура проектирования конструкции прибора в общем случае включает следующие этапы:

Разработка вариантов конструкции. На этом этапе разрабатываются варианты принципиального построения конструкции навигационного прибора, количество и форма конструктивных элементов и т.д.

Определение собственных частот. Проводится КЭА с целью определения собственных частот конструкции.

Подбор параметров. Производится подбор и варьирование параметров конструкции для обеспечения стойкости конструкции к внешним вибрационным воздействиям. Как правило, это достигается повышением значений собственных частот конструкции выше диапазона заданной вибрации основания.

Определение характеристик. Для полученной конструкции определяется амплитудно-частотная характеристика, максимальные напряжения в конструкции, моменты трения и пр.

Варьирование геометрических размеров. Изменение геометрических размеров конструкции с целью выявления параметров, имеющих наибольшее влияние на механические характеристики. При изменении одного из геометрических параметров конструкции остальные принимаются постоянными и проводится оценка соответствующего изменения.

Оптимизация конструктивных параметров. Проводится оптимизация конструкции с целью уменьшения возникающих напряжений, изменения амплитудно-частотной характеристики и т.д.

Расчет ударопрочности конструкции. На этом этапе проводится определение напряжений в конструкции при ударных импульсных воздействиях. Здесь же может проводиться расчет на устойчивость к тепловым и вибрационным воздействиям.

Выбор наиболее приемлемого варианта конструкции. По полученным данным проводится сравнение различных конструкций и выбор наиболее приемлемого варианта конструкции.

Использование трехмерного моделирования и КЭА позволяет значительно сократить время разработки и расчета нового варианта конструкции прибора, избежать итераций методом «проб и ошибок». Тем не менее, точность расчета конечна и составляет несколько процентов от номинального значения частоты.

В начале 1996 г. семейство продуктов РТС расширилось специализированной программой MECHANICA (Механика), предназначенной для конечно-элементного анализа конструкций, а также оптимизации параметров конструкции на этапе проектирования. В MECHANICA используется р-сеть конечных элементов, что позволяет повысить степень достоверности полученных результатов и уменьшить расчетное время. Программа MECHANICA – это многофункциональный, компьютерный инструмент инженера, который позволяет производить анализ и оптимизацию проектов по статике, термическому анализу и динамике.

Программа MECHANICA состоит из двух взаимосвязанных модулей: Structure (статический, динамический и вибрационный анализ) и

Thermal (термический). Эти ветви работают независимо, но они совместимы на уровне модели. Таким образом, модель можно последовательно исследовать на статические и термические нагрузки, а также исследовать взаимодействие этих нагрузок.

MECHANICA Structure – модуль для выполнения широкого круга расчетов по структурному анализу для проектируемых в CREO (Pro/Engineer) моделей. Модуль выполняет следующие типы анализа:

Static – определение напряжений и деформаций;

Modal – определение частот и форм колебаний;

Buckling – определение критических нагрузок;

Contact – определение контактных нагрузок;

Optimization – подбор параметров модели в зависимости от выбранных критериев.

Кроме того, в рассматриваемый модуль входят анализы, позволяющие учитывать динамические процессы и оценивать соответствие конструкций требованиям по вибрации, производя моделирование периодических, случайных и ударных нагрузок, заданных во времени.

Dynamic Time – определение переходных характеристик;

Dynamic Frequency – определение амплитудно-частотных характеристик;

Dynamic Random – определение спектральной плотности и среднеквадратичных значений перемещений;

Dynamic Shock – определение перемещений в ответ на базовое возбуждение с определенным спектром.

Нагрузки, включая сосредоточенные и распределенные силы, давление, центробежные силы, гравитацию, тепловые нагрузки и реакции опор, могут быть однородными, изменяющимися в пространстве или заданными в виде функций координат.

MECHANICA Thermal – модуль для исследования и оптимизации термических характеристик проектируемой модели с помощью исследования процессов переноса тепла с мощными функциями для оптимизации геометрии проектируемой конструкции. В случае совместной работы с MECHANICA Structure можно оценивать изменение геометрии при действии тепловой нагрузки.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель задания лабораторного практикума состоит в изучении основ использования программы КЭА МЕCHANICA для расчета механических характеристик конструкций. При выполнении задания требуется построить трехмерную модель детали заданного сечения и определить механические параметры конструкции.

Исходные данные

Стержень заданного сечения длиной 100 мм. Сечение выбирается в соответствии с вариантом задания, указанного на следующей странице.

Материал стержня – алюминий.

Стержень закреплен за одну из торцевых поверхностей. Все степени свободы поверхности крепления жестко зафиксированы.

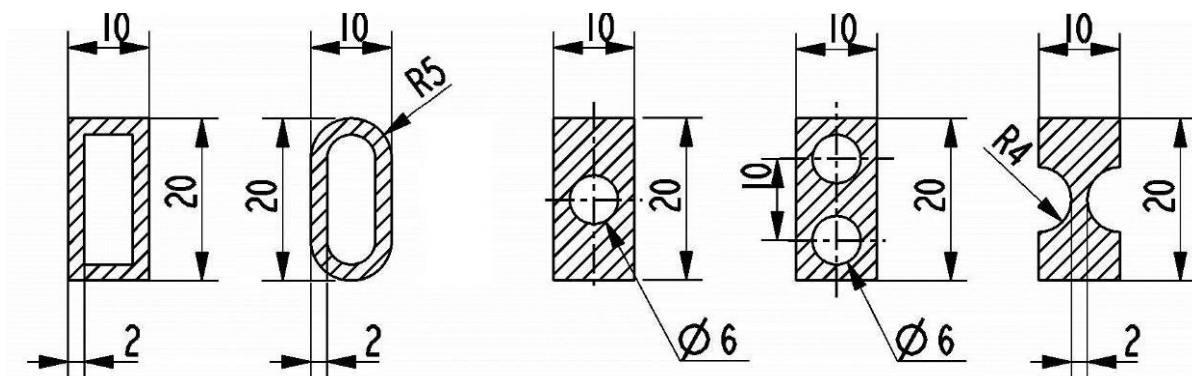
К другой торцевой поверхности стержня приложена распределенная нагрузка величиной 1 Н (0,1 кгс). Направление нагрузки – перпендикулярно длинной стороне стержня.

Результаты расчета

В результате выполненных расчетов требуется:

1. Аналитически рассчитать механические характеристики стержня с использованием формул (1) – (7).
2. Произвести расчет в программе МЕCHANICA максимальных перемещений и напряжений, возникающих в стержне при действии статической нагрузки.
3. Определить значения собственных частот и форм колебаний стержня.
4. Построить амплитудно-частотную характеристику колебаний стержня при действии нагрузки в заданной частотной области.

3. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЯ



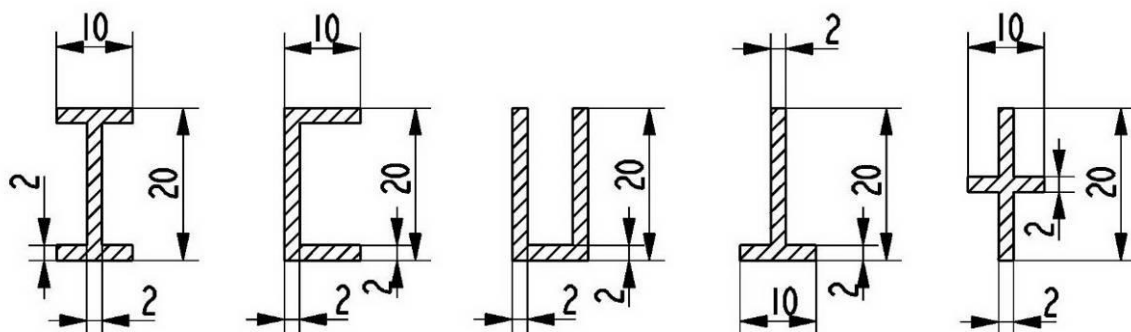
Вариант №1

Вариант №2

Вариант №3

Вариант №4

Вариант №5



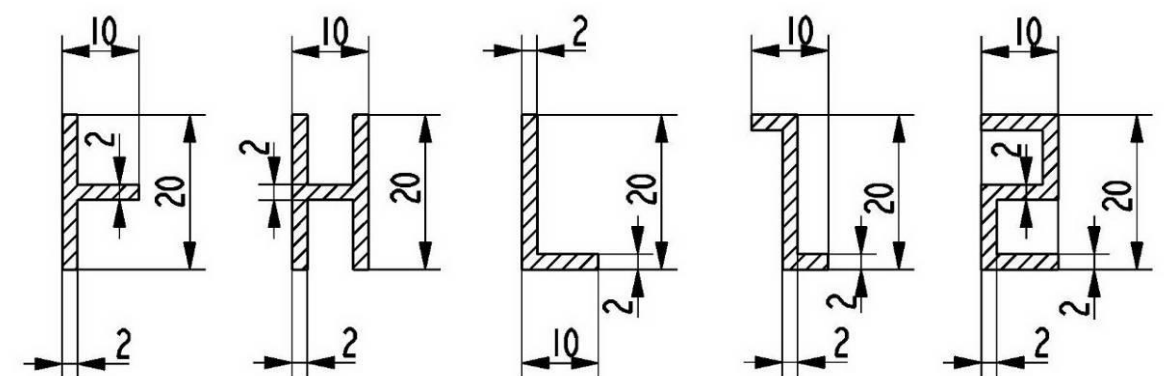
Вариант №6

Вариант №7

Вариант №8

Вариант №9

Вариант №10



Вариант №11

Вариант №12

Вариант №13

Вариант №14

Вариант №15

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ

Методика проведения любых расчетов в программе МЕCHANICA может быть описана следующей последовательностью:

1. Построение трехмерных моделей.
2. Определение материалов исследуемых моделей.
3. Ограничение степеней свободы моделей.
4. Создание внешних нагрузок (гравитация, силы, давление и т.п.).
5. Создание расчетных измерений модели (при необходимости).
6. Выбор и настройка расчета.
7. Вывод полученных результатов и их анализ.
8. Оформление пояснительной записки.

4.1. Построение модели

На первом этапе строится трехмерная модель в программе CREO. В качестве примера рассматривается круглый алюминиевый стержень диаметром 10 мм и длиной 100 мм (рисунок 3). Для построения модели используются общие правила, изложенные в руководстве по использованию программы. После построения модели необходимо создать опорную *Точку*, в которой будет производиться измерение параметров конструкции. При правильной настройке программы CREO единицы измерения величин модели следующие – длина в миллиметрах (mm); масса в килограммах (kg); время в секундах (sec). Для проверки корректности задания единиц измерения следует использовать последовательность команд в строке меню

Файл → Свойства → Единицы измерения.

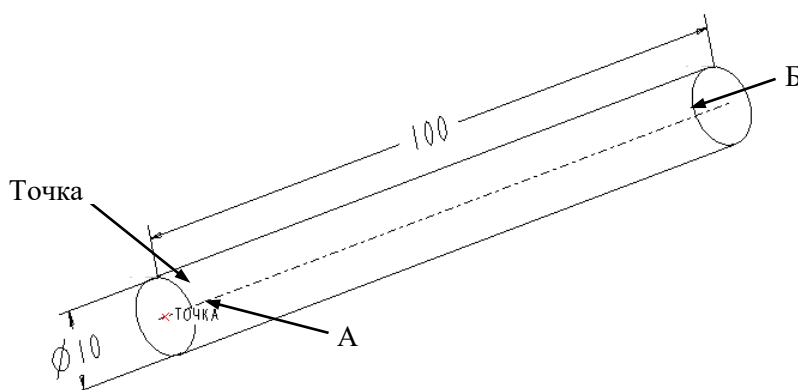


Рисунок 3 – Общий вид модели

4.2. Вызов программы MECHANICA

Программа MECHANICA вызывается в интегрированном режиме непосредственно из программы Creo, что позволяет быстро переключаться между программами для дополнения или изменения модели и выполнения повторных расчетов. Вызов программы MECHANICA из среды CREO осуществляется при выполнении команд в строке меню **Приложение → Механика**. После выбора этих команд появляется окно (рисунок 4) **Настроить модель Механика** с опциями, описанными в таблице 2.

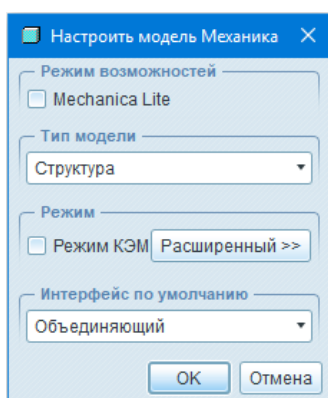


Рисунок 4 – Окно **Настроить модель Механика**

Таблица 2


Опции окна **Настроить модель Механика**

№	Опция	Комментарий
1	Mechanica Lite	Пробная версия модуля MECHANICA с ограниченными функциональными способностями. Режим Mechanica Lite можно использовать для моделей деталей и сборок с числом поверхностей до 200.
2	Тип модели	Указывается используемый тип расчета: структурный (исследование механических характеристик) или тепловой (исследование тепловых процессов).
3	Режим КЭМ	Позволяет создавать математическую модель на основе детали или сборки Creo, затем анализировать эту модель, используя один из нескольких решателей конечных элементов от стороннего производителя, например ANSYS.
4	Кнопка Расширенный	Открывает расширенные настройки, что позволяет сделать выбор между 3D и 2D-моделированием.
5	Интерфейс по умолчанию	Определяет тип взаимодействия для соединения компонентов в сборочной модели при наложении сетки и анализе.

Подробное описание предложенных настроек можно найти в руководстве по использованию программы. Для продолжения работы следует нажать кнопку **Ок**, после чего интерфейс программы изменяется и

появляются кнопки создания расчетной модели.

4.3. Выбор материала

Диалоговое окно **Назначение материала** (рисунок 5) доступно при выборе последовательности команд в строке меню **Свойства** → **Назначение материала** или при нажатии на значок .

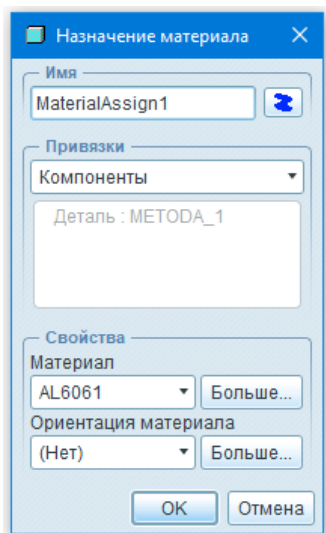


Рисунок 5 – Окно **Назначение материала**


Функции окна описаны в таблице 3.

Таблица 3

Опции окна **Назначение материала**

№	Опция	Комментарий
1	Имя	Определяет имя элемента «назначение материала».
2	Привязки	Показывает, какие модели соответствуют назначению материала. В режиме сборки можно выбирать детали, сборки или объемные области. В режиме детали выбирается сама деталь или ее объемные области.
3	Материал	Раскрывающийся список выбора имеющихся материалов для модели.
4	Ориентация материала	Позволяет определить анизотропные свойства материала.

Если необходимого материала нет в списке **Материал**, следует нажать кнопку **Больше**, которая вызывает окно **Материалы** (рисунок 6), позволяющее выбрать его из библиотеки или создать новый.

Окно **Материалы** также может быть вызвано при выборе последовательности команд в строке меню **Свойства** → **Материалы** или нажатии на значок . Указанное окно открывается и при определении связей, таких как *швы точечной сварки*, *крепежные элементы*, или при создании таких идеализаций, как *балки* и *оболочки*. Функции окна описаны

в таблице 4.

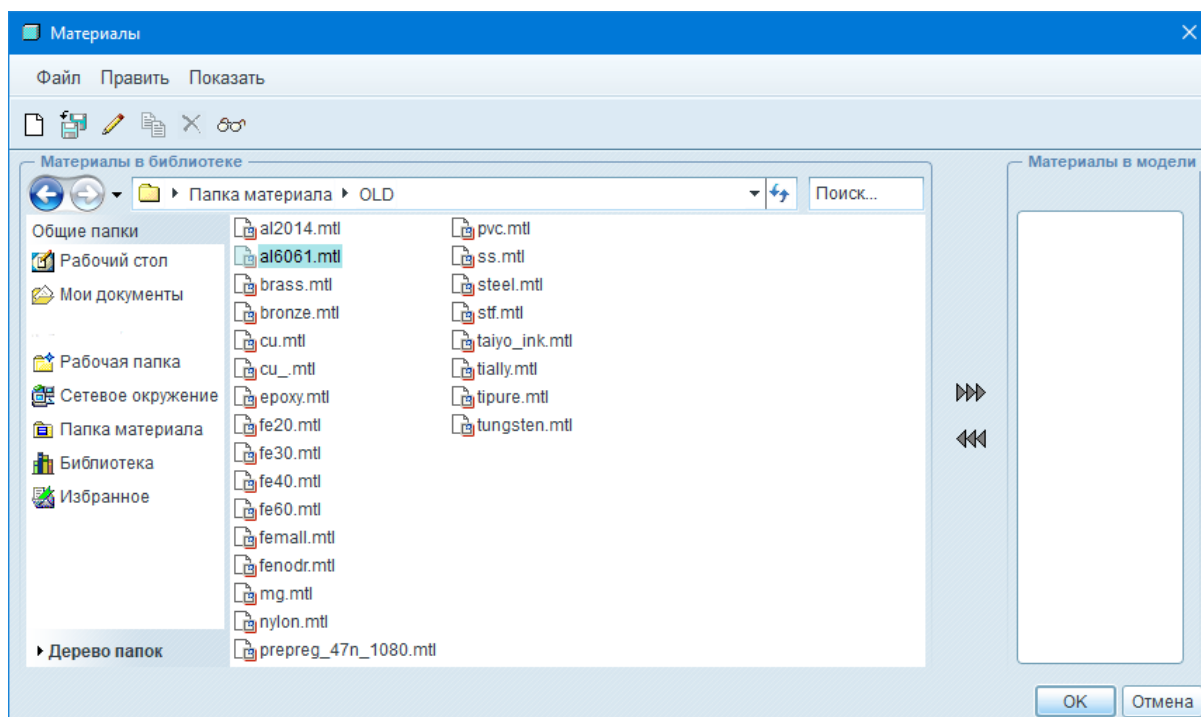



Рисунок 6 – Окно **Материалы**

Таблица 4

Опции окна **Материалы**

№	Опция	Комментарий
1	Кнопки	
1.1		Создает новый материал.
1.2		Сохраняет выбранный материал в файл с расширением «.mtl» и заданным именем.
1.3		Редактирует материал.
1.4		Копирует материал.
1.5		Удаляет выбранный материал.
1.6		Переключает показ или скрывание описания материала.
1.7		Добавляет материал в модель из библиотеки. Материал помещается в базу данных модели.
1.8		Добавляет материал в библиотеку из модели.
2	Материалы в библиотеке	Показывает список материалов, сохраненных в библиотеке. Для назначения модели можно выбрать один из материалов и нажать кнопку добавления.
3	Искать	В поле можно задать поиск материала в выбранной папке.
4	Материалы в модели	Показывает список материалов в базе данных модели. Можно выбрать один или несколько материалов для назначения объектам.

В библиотеке материалов следует найти файл *AL6061.mtl*, содержащий свойства одноименного алюминиевого сплава [ISO 6361],

отечественным аналогом которого является алюминиевый сплав АМг6 [ГОСТ 4784]. После чего нажать кнопку добавления материала в базу данных модели (п. 1.7, таблица 4) и кнопки **Ок** в окне **Материалы** (рисунок 6) и **Назначение материала** (рисунок 5). При успешном выполнении описанных действий на модели появляется значок , указывающий, что ей присвоен некоторый материал.

В ходе назначения материала для модели следует учитывать следующее:


1. Материал, назначенный в режиме сборки, имеет приоритет перед материалом, назначенным в режиме детализовки.

2. Материал, назначенный верхнему уровню сборки, замещает материалы, назначенные для ее подборок.

3. Для объемного назначения материалов МЕCHANICA обрабатывает материалы в порядке обратном их назначению. Это значит, что новые назначения материалов имеют более высокий приоритет, чем старые.

4.4. Ограничение степеней свободы модели

Для проведения расчетов необходимо ограничение степеней свободы модели в виде создания закрепления. Цель определения **закреплений** для модели в модуле **Структура** состоит в закреплении частей геометрических форм модели так, чтобы модель не могла перемещаться или перемещалась только заданным способом. **Закрепления** модели вместе с ее **нагрузками** используются как основа для анализа и программно реализуют реальные условия, которые существуют в конструкции на физическом уровне. Таким образом, при добавлении закреплений ограничивают степени свободы и определяют пределы, в которых модель может перемещаться относительно некой системы координат, путем указания поступательных и вращательных степеней свободы. Стоит иметь в виду, что по умолчанию CREO работает в предположении, что любая незакрепленная часть модели структуры имеет возможность перемещаться во всех шести направлениях (три поступательных и три вращательных движения).

Диалоговое окно **Закрепление** (рисунок 7) открывается, если выбрать команду в строке меню **Вставить** → **Закрепление смещения** или если нажать на кнопку .

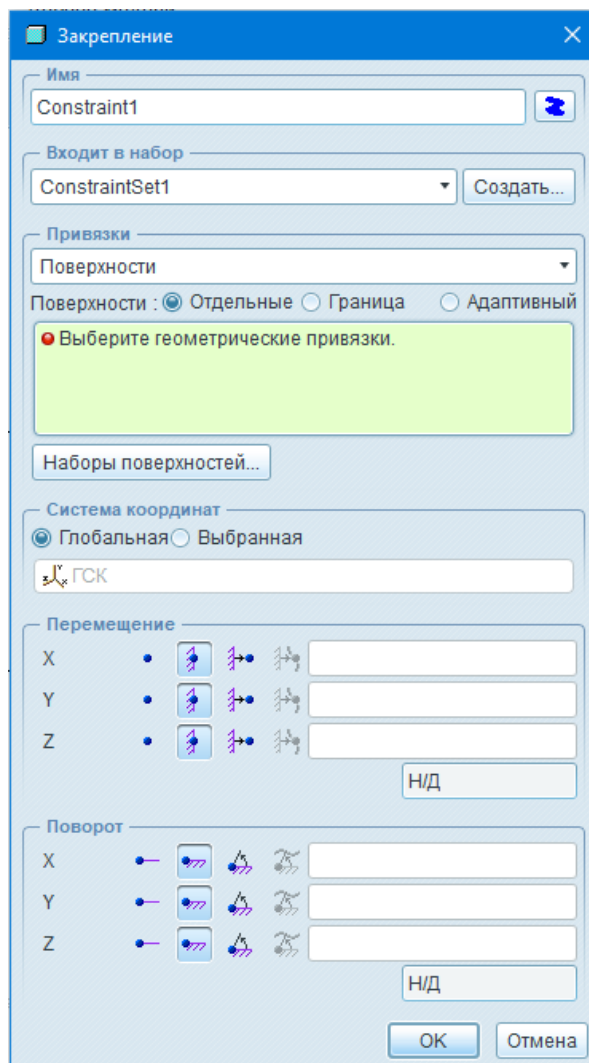


Рисунок 7 – Окно **Закрепление**




Для определения степеней свободы в модуле «Структура» используются элементы, приведенные в таблице 5.

Таблица 5

Опции окна **Закрепление**

№	Опция	Комментарий
1.	Имя	Название закрепления . Образец цвета рядом с кнопкой Имя позволяет изменять цвет значка, распределения и текста, отображаемых в модели.
2.	Входит в набор	Каждое закрепление , добавляемое в программу, является частью набора закреплений . Набор закреплений — это коллекция закреплений , которые действуют в модели совместно и одновременно. В один набор закреплений можно включить любое требуемое количество закреплений разных типов. Можно выбрать существующий набор закреплений из выпадающего списка либо создать новый набор закреплений, нажав кнопку Создать , чтобы открыть диалоговое окно Наборы закреплений .

Продолжение таблицы 5

3.	Привязки	Геометрические привязки можно выбрать до или после открытия диалогового окна. Выбор появится в коллекторе Привязки .
3.1	Поверхности	Позволяет выбирать одну или несколько поверхностей, границ деталей, адаптивных поверхностей или наборов поверхностей.
3.2	Кромки/Кривые	Позволяет выбирать одну или несколько кромок, кривых, композитных кривых или адаптивные цепи и адаптивные кривые.
3.3	Точки	Позволяет выбирать одну или несколько точек, вершин, элементы из точек, шаблоны точек или адаптивные точки.
4.	Система координат	Изменяет системы координат привязки. Значением по умолчанию является Глобальная система координат.
5.	Тип закрепления	Закрепления поступательного смещения и вращения, которые можно применить, отличаются в зависимости от типа модели (2D или 3D) и системы координат (декартова, цилиндрическая, сферическая).
5.1	Перемещение	Расстояние, на которое допускается перемещение модели вдоль главной оси ссылочной декартовой, цилиндрической или сферической системы координат.
5.2	Поворот	Угол, на который допускается поворот модели относительно оси привязанной декартовой, цилиндрической или сферической системы координат.
5.3		Свободное. Разрешается свободное перемещение в заданном направлении.
5.4		Фиксированное. Закрепление объекта, препятствующее перемещению в заданном направлении.
5.5		Задано. Предписывается конкретное смещение или поворот в заданном направлении. Настройка оказывает на объект влияние, сходное с нагрузкой.

В рассматриваемом случае для ограничения степеней свободы модели необходимо добавить торцевую поверхность, противоположную поверхности на которой расположена опорная точка (поверхность Б на рисунке 3) в опции **Привязки** (п. 3, таблица 5), а настройки типа закрепления оставить в фиксированном положении (п. 5.4, таблица 5). Для подтверждения свойств заданного закрепления следует нажать кнопку **Ок** (рисунок 7).

Ограничения степеней свободы изображаются в модели знаком в виде треугольника, опирающегося на закрашенный прямоугольник (рисунок 8). Прямоугольник, на который опирается треугольник знака «Закрепление» состоит из 6 ячеек. Верхние три ячейки отображают состояние поступательных степеней свободы, нижние три ячейки – вращательные степени свободы. Ячейки обозначены в системе координат по умолчанию в следующей последовательности (слева направо):

D_x, D_y, D_z – поступательные степени свободы (верхний ряд);

R_x, R_y, R_z – вращательные степени свободы (нижний ряд).

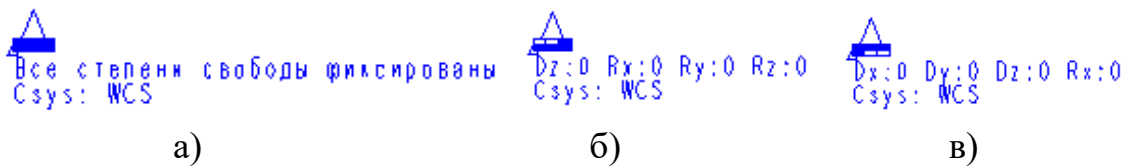


Рисунок 8 – Отображение ограничения степеней свободы: всех шести степеней (а); трех вращательных и одной поступательной степеней (б); трех поступательных и одной вращательной степеней (в)


Ячейки остаются незакрашенными в случае отсутствия ограничений по поступательным или вращательным степеням свободы.

4.5. Создание внешних нагрузок

В программе MECHANICA моделируется поведение модели под действием нагрузок. Для структурного типа модели нагрузкой являются: сила, момент, давление, ускорение, скорость или температура, которые прилагаются к части модели. В качестве тепловой нагрузки могут использоваться результаты одноименного анализа. Аналогично закреплениям, нагрузки можно группировать в **наборы нагрузок**.

Закон распределения нагрузки может быть как константой, так и линейным или функцией, определенной пользователем, что позволяет моделировать реальные условия. С точки зрения приложения нагрузок к модели можно выделить две основные категории: нагрузки на объект и нагрузки на тело. Нагрузка на объект – это нагрузка, определяемая для конкретных геометрических объектов в модели, таких как кривые и поверхности. Примерами нагрузок на объекты являются силы и моменты. Нагрузка на тело – это нагрузка, прилагаемая к модели в целом, например, сила тяжести. Обычно в наборе нагрузок можно использовать только одну нагрузку на тело. При приложении нагрузки на тело к сборке, она прилагается ко всем телам модели.

В случае нескольких объектов в программе MECHANICA эти объекты связываются по тому признаку, что для них задана общая нагрузка. Следовательно, нельзя изменить или удалить нагрузку отдельно для каждого из этих объектов. Более того, удаление любого из объектов, связанных с нагрузкой, устраняет нагрузку и с остальных связанных объектов.

Для создания нагрузок используется команда в строке меню **Вставка** → **Нагрузка сила/момент** или значок , которые открывают диалоговое окно **Нагрузка сила/момент** (рисунок 9).

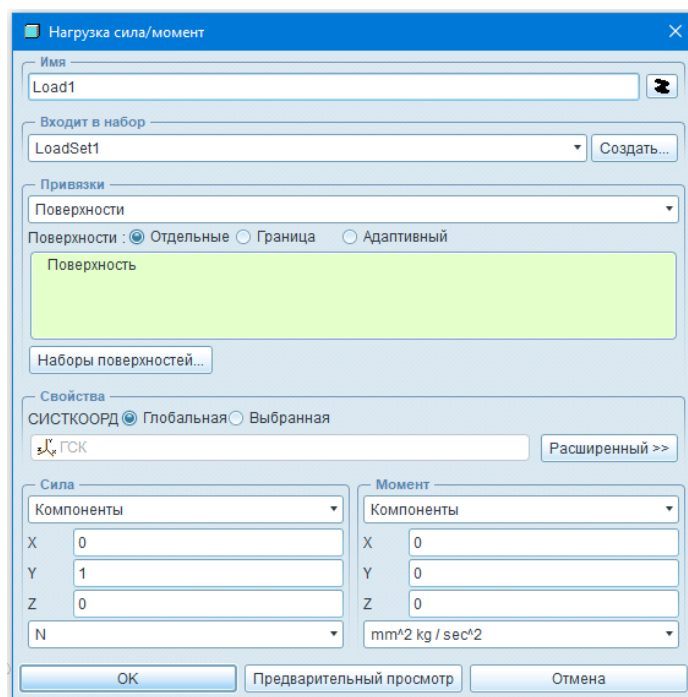


Рисунок 9 – Окно **Нагрузка сила/момент**

Пояснения к элементам окна приведены в таблице 6.

Таблица 6

Опции окна **Нагрузка сила/момент**


№	Опция	Комментарий
1.	Имя	Имя нагрузки . С помощью образца цвета, можно изменить цвет значка, распределения или текста, отображаемого для нагрузки.
2.	Входит в набор	Имя набора нагрузок. Можно выбрать существующий набор нагрузок в выпадающем списке или создать новый набор, нажав кнопку Создать .
3.	Привязки	Геометрические привязки можно выбрать до или после открытия диалогового окна. Выбор появится в коллекторе Привязки . Если выбрано несколько привязок, то создается одна распределенная нагрузка, а не по отдельной нагрузке для каждой привязки.
3.1	Поверхности	Позволяет выбирать одну или несколько поверхностей, границ деталей, адаптивных поверхностей или наборов поверхностей.
3.2	Кромки/Кривые	Позволяет выбирать одну или несколько кромок, кривых, композитных кривых или адаптивные цепи и адаптивные кривые.
3.3	Точки	Позволяет выбирать одну или несколько точек, вершин, элементы из точек, шаблоны точек или адаптивные точки.

Продолжение таблицы 6

№	Опция	Комментарий
4.	Система координат	Изменяет системы координат привязки. Значением по умолчанию является Глобальная система координат. Относительно выбранной системы координат рассчитываются координаты или вектор, используемые для задания силы или момента.
5.	Расширенный	Раскрывает дополнительные поля.
5.1	Распределение	Выпадающее меню настройки распределения нагрузки.
5.1.1.	Суммарная нагрузка	Используется для распределения нагрузки по длине или площади объекта, чтобы интеграл нагрузки по выбранному объекту был равен заданному суммарному значению.
5.1.2.	Сила на единицу объема/ площади/длины	Позволяет приложить нагрузку к каждой единице, из которых состоит выбранная сущность, где типом единицы является длина, площадь или объем. Например, если к поверхности 25x25 мм приложена нагрузка 100 Н (на каждый квадратный миллиметр площади действует нагрузка 0,16 Н), то в случае уменьшения размеров поверхности до 1x1 мм, приложенная нагрузка будет равна 0,16 Н.
5.1.3.	Суммарная нагрузка в точке	Используется для создания равных нагрузок к каждой из выбранных точек. Также позволяет создать нагрузку моментом вокруг выбранной точки.
5.1.4.	Суммарная нагрузка в подшипнике в точке	Используется для представления силы и момента, с которыми одна деталь цилиндрической формы действует на другую.
5.2	Закон распределения	Выпадающее меню настройки закона распределения нагрузки.
5.2.1.	Равномерный	Используется для приложения равномерной нагрузки.
5.2.2.	Функция координат	Используется для определения функции нагрузки от текущей системы координат.
5.2.3.	Интерполяция по объекту	Используется для линейного, квадратичного или кубического изменения нагрузки вдоль выбранной привязки.
6.	Сила	Настройки определения силы в модели.
6.1	Компоненты	Введите компоненты силы для каждого направления используемой системы координат.
6.2	Вектор направления и Величина	Определите направление силы, вводя значения для единичных векторов выбранной системы координат, и введите величину силы в поле ввода Величина .
6.3	Точки направления и Величина	Введите направление силы, выбирая две точки, а затем введите величину силы в поле ввода Величина .
6.4	Единицы измерения силы	Позволяет выбрать требуемую единицу измерения силы.

Продолжение таблицы 6

№	Опция	Комментарий
7.	Момент	Настройки определения моментов в модели.
7.1	Компоненты	Введите компоненты момента для каждого направления используемой системы координат.
7.2	Вектор направления и Величина	Определите направление момента, вводя значения для единичных векторов выбранной системы координат, и введите величину момента в поле ввода Величина .
7.3	Точки направления и Величина	Введите направление момента, выбирая две точки, а затем введите величину момента в поле ввода Величина .
7.4	Единицы измерения момента	Позволяет выбрать требуемую единицу измерения момента.
8.	Предварительный просмотр	Добавляет в модель последовательность стрелок, показывающую местонахождение и распределение нагрузки .

В рассматриваемом случае для создания нагрузки на модель необходимо добавить торцевую поверхность, на которой расположена опорная точка (поверхность А на рисунке 3) в опции **Привязки** (п. 3, таблица 6). Зададим нагрузку величиной 1 Н по оси Y (рисунок 9), перпендикулярной оси стержня, введя соответствующее число в поле компонента силы (п. 6.1, таблица 6) и выбрав соответствующую единицу измерения (п. 6.4, таблица 6). Для определения необходимого направления следует воспользоваться осями Глобальной системы координат (ГСК), отображение которой доступно после нажатия на кнопку . Подтверждение свойств заданной нагрузки происходит после нажатия на кнопку **Ок**.

Вид модели после выполнения действий, описанных в разделах 4.3 – 4.5 представлен на рисунке 10.

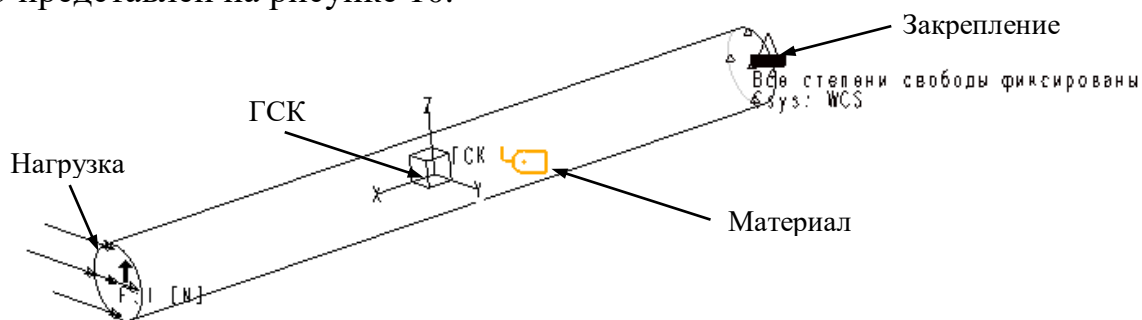


Рисунок 10 – Вид модели после выполнения действий

Для проверки и корректировки заданных параметров материала, закрепления или нагрузки следует выбрать соответствующий элемент в окне или в дереве модели, нажать правую кнопку мыши и выбрать опцию **править**. Удаление элементов происходит выбором опции **удалить**.

Для всех типов анализа, выполняемых в программе MECHANICA, требуются **нагрузки** и **закрепления**. В таблице 7 представлен обзор требований к ним.

Таблица 7

Требования по нагрузкам и закреплениям
для различных типов анализа

Тип анализа	Закрепление	Нагрузка
Модуль «Структура»		
Статический	Да ¹	Допускается
Модальный	Да ²	Нет
Потеря устойчивости	Да ³	Да
Большая статическая деформация	Да ¹	Допускается
Предварительное статическое напряжение	Да ¹	Да
Предварительное модальное напряжение	Да	Нет
Контакт	Да ¹	Допускается
Динамический переходной	Да	Да
Динамический гармонический	Да	Да
Динамический вибрационный	Да	Да
Динамический спектральный	Да	Да
Усталость	Нет	Да ⁴
Модуль «Тепловой»		
Стационарный тепловой	Да	Допускается
Нестационарный тепловой	Да	Допускается
<p>Примечания.</p> <p>1) Если модель содержит пружины типа "точка-земля", задавать закрепление не надо. Если для линейного статического анализа используется опция Освобождение инерции в диалоговом окне Определение статического анализа, задавать закрепления не надо.</p> <p>2) Если планируется проведение модального анализа с закреплением, необходимо добавить хотя бы одно закрепление. Однако для модального анализа без закреплений с поиском жестких форм закрепления не нужны.</p> <p>3) В анализе критической нагрузки используются нагрузки и закрепления, определяемые для статического анализа, который выбирается в качестве основы для анализа критической нагрузки.</p> <p>4) В анализе усталости результаты из статического анализа используются в качестве основы для расчета нагрузки.</p>		

4.6. Создание измерений параметров модели

Измерения – искомая скалярная величина, которую программа MECHANICA вычисляет во время анализа или проработки конструкции. Эта величина записывается в файл отчета (рассмотрен в разделе 4.8) и при правильном применении является эффективным средством анализа поведения модели. При этом в каждой модели автоматически создается набор **предопределенных измерений**, связанных с ГСК, которые вычисляются при проведении соответствующих анализов и которые нельзя удалять. Полный список таких измерений приведен в таблице 8.

Таблица 8

Предопределенные измерения

Имя измерения	Описание
buck_load_factor	Коэффициент критической силы потери устойчивости
com_x	Координата по оси X для центра масс
com_y	Координата по оси Y для центра масс
com_z	Координата по оси Z для центра масс
contact_area	Суммарная площадь контакта для всех контактов в модели
contact_max_pres	Максимальное давление для всех контактов в модели
inertia_xx	Компонент XX для момента инерции
inertia_xy	Компонент XY для момента инерции
inertia_xz	Компонент XZ для момента инерции
inertia_yy	Компонент YY для момента инерции
inertia_yz	Компонент YZ для момента инерции
inertia_zz	Компонент ZZ для момента инерции
max_beam_bending	Максимальное изгибное напряжение балки во всей модели
max_beam_tensile	Максимальное растягивающее напряжение балки во всей модели
max_beam_torsion ¹	Максимальное напряжение кручения балки во всей модели
max_beam_total ¹	Максимальное суммарное растягивающее и изгибное напряжение балки во всей модели
max_disp_mag ²	Максимальное перемещение во всей модели
max_disp_x	Максимальное перемещение по оси X во всей модели
max_disp_y	Максимальное перемещение по оси Y во всей модели
max_disp_z	Максимальное перемещение по оси Z во всей модели
max_prin_mag ²	Максимальная величина главного напряжения во всей модели
max_rot_mag ²	Максимальная величина поворота во всей модели
max_rot_x	Максимальная величина вращений вокруг оси X во всей модели
max_rot_y	Максимальная величина вращений вокруг оси Y во всей модели
max_rot_z	Максимальная величина вращений вокруг оси Z во всей модели


Продолжение таблицы 8

Имя измерения	Описание
max_stress_prin ²	Максимальная величина положительного главного напряжения во всей модели
max_stress_vm ²	Максимальная величина напряжения по Мизесу во всей модели
max_stress_xx	Максимальное напряжение компонента XX во всей модели
max_stress_xy	Максимальное напряжение компонента XY во всей модели
max_stress_xz	Максимальное напряжение компонента XZ во всей модели
max_stress_yy	Максимальное напряжение компонента YY во всей модели
max_stress_yz	Максимальное напряжение компонента YZ во всей модели
max_stress_zz	Максимальное напряжение компонента ZZ во всей модели
min_stress_prin ²	Минимальная величина положительного главного напряжения во всей модели
modal_frequency	Частота формы колебания
strain_energy	Суммарная энергия деформации модели
total_cost	Суммарная стоимость модели
total_mass	Суммарная масса модели
Примечания.	
1) Не вычисляются во всех динамических анализах.	
2) Не вычисляются в динамических вибрационных анализах.	

Создавая дополнительные или используя predetermined измерения можно производить расчеты таких показателей, как пределы прочности при растяжении, сжатии и сдвиге, крутильная жесткость, изменения массы, рефракционное поведение и т. д. При этом стоит иметь в виду, что при выполнении анализов рассчитываются только измерения, созданные заранее.

Кроме того, измерения могут использоваться как критерии сходимости в анализах или как цели и пределы при оптимизации конструкции или исследовании ее чувствительности к изменениям различных параметров (размеров).

При проведении динамических анализов измерения используются для отслеживания характеристик модели. Например, можно задать измерение в определенной точке модели, которое будет действовать как акселерометр, измеряя ускорение в этой точке. Также динамические измерения можно использовать для определения скорости или положения модели.

В рассматриваемом случае измерения максимальных перемещений и напряжений, возникающих в стержне при действии нагрузки, а также определение значения первых четырех собственных частот обеспечивается predetermined измерениями. Однако для получения амплитудно-частотной характеристики необходимо создать дополнительное измерение ускорения. Для этого сперва необходимо вызвать диалоговое окно **Измерения** (рисунок 11) при помощи команд меню **Вставить** → **Расчетное измерение** или кнопки .

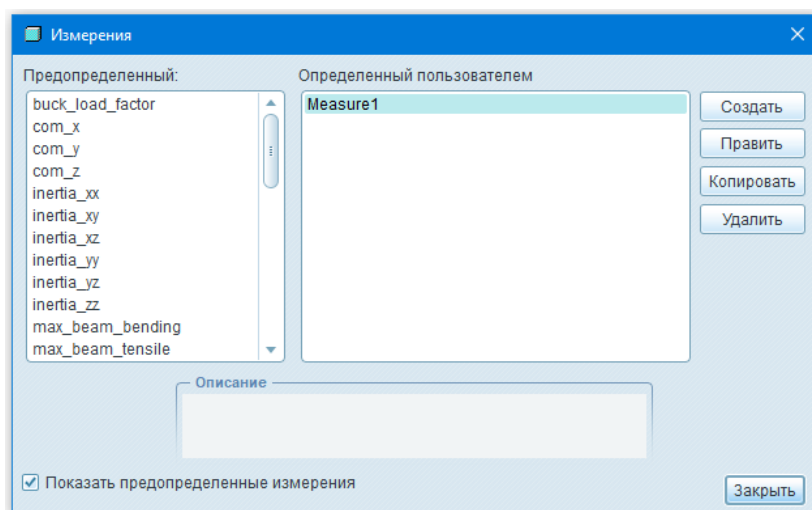


Рисунок 11 – Окно **Измерения**

Опции, доступные в вызванном окне, сведены в таблицу 9.

Таблица 9

Опции окна **Измерения**

№	Опция	Комментарий
1.	Показать предопределенные измерения	Открывает область с предопределенными измерениями.
2.	Предопределенный	Предопределенные измерения.
3.	Определенный пользователем	Все измерения, определенные для текущей модели.
4.	Кнопки	
4.1	Создать	Создание нового измерения.
4.2	Править	Просмотр и правка существующего измерения.
4.3	Копировать	Копирование существующего измерения. Особенно удобно, если необходимо применить один тип измерения для нескольких различных опорных точек. За один раз можно скопировать несколько измерений.
4.4	Удалить	Удаление существующего измерения. За один раз можно удалить несколько измерений.

Далее необходимо открыть окно **Определение измерения** (рисунок 12), нажав на кнопку **Создать** (п. 4.1, таблица 9). В открывшемся окне выполняется полное определение измерения. В зависимости от выполняемого типа анализа (структурный или тепловой) в верхней части диалогового окна доступны различные величины для выбора. Выбор опций в верхней части окна определяет, какие дополнительные опции и области станут активными в нижней части окна. Основные области диалогового окна **Определение измерения** перечислены в таблице 10.

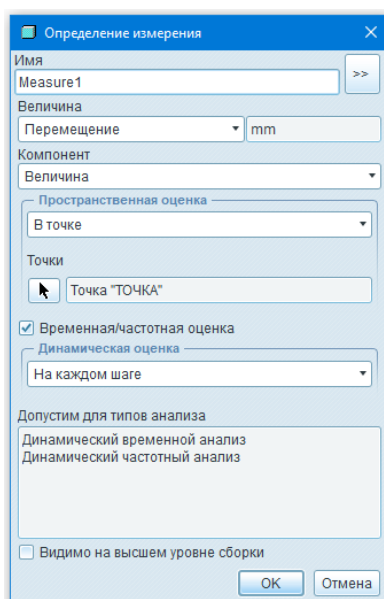



Рисунок 12 – Окно **Определение измерения**

Таблица 10


Опции окна **Определение измерения**

№	Опция	Комментарий
1.	Имя	Определяет имя измерения.
2.	Подробности >>	Отображает область описания и поля для ввода допустимых значений измерения.
3.	Величина	Выпадающий список величины, для которой определяется измерение. В списке показываются только допустимые для текущего режима величины. От выбранной величины зависит, какие дополнительные объекты появятся в диалоговом окне.
4.	Компонент	Направление, в котором происходит вычисление измерения: X; Y; Z или Величина (корень из суммы квадратов). Для опций X, Y или Z следует выбрать систему координат, относительно которой задается измерение. По умолчанию используется ГСК.
5.	Пространственная оценка	Позволяет выбрать метод пространственной оценки заданной величины: Максимум; Минимум; В точке.
6.	Временная/Частотная Оценка	Позволяет учитывать измерение при проведении динамических анализов.
7.	Динамическая оценка	Позволяет выбрать метод динамической оценки заданной величины: Максимум/Минимум в расчете, На каждом шаге, В определенный момент расчета.
8.	Допустим для типов анализа	Нередактируемое поле со списком анализов, для которых Mechanica вычисляет определяемое измерение.
9.	Видимый на высшем уровне	Установите этот флажок, если выполняется работа на уровне детали и необходимо, чтобы Mechanica показывала и вычисляла создаваемое измерение при работе на уровне сборки.

В рассматриваемом случае необходимо задать измерение **Величины Перемещения** точки, расположенной на поверхности А (рисунок 3) на каждом шаге решения. В нижнем поле меню (п. 8, таблица 10) должны отобразиться динамический временной и частотный анализы. Подтверждение задания измерения осуществляется кнопкой **ОК**, при этом возле точки в области построения модели должен появиться значок измерения .

Для проверки и корректировки заданного измерения следует нажать кнопку **Править** (п. 4.2, таблица 9) в окне **Измерения** (рисунок 11).

4.7. Создание анализов для расчета

Создание, изменение, выполнение и отслеживание расчетов осуществляется в окне **Анализ и проработки** (рисунок 13), которое вызывается последовательностью команд меню **Анализ** → **Анализ и проработки** или нажатием на кнопку . При работе в открывшемся диалоговом окне обычно используется пошаговый процесс, который начинается с определения анализа или проработки (расчета) и переходит к его выполнению и отслеживанию результатов. Опции окна сведены в таблицу 11.

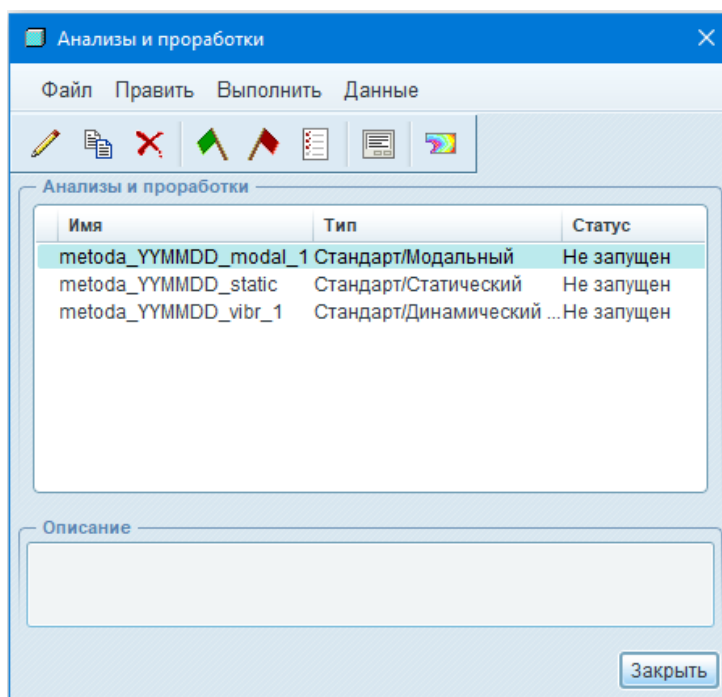


Рисунок 13 – Окно **Анализ и проработки**

Опции окна **Анализы и проработки**

№	Опция	Комментарий
1.	Панель меню Файл	Позволяет создавать новые анализы и проработки конструкции.
1.1	Новый Статический	Создает расчет деформаций и напряжений в конструкции при воздействии статических нагрузок.
1.2	Новый Модальный	Создает расчет собственных частот конструкции и их форм.
1.3	Новый Устойчивость¹	Создает анализ устойчивости конструкции к потере формы при заданных статических нагрузках.
1.4	Новый Усталость¹	Создает анализ усталостного повреждения конструкции при появлении циклической нагрузки.
1.5	Новый Преднапряженный¹	Создает анализ влияния предварительно напряженной конструкции на деформации и напряжения модели или на собственные частоты и их формы.
1.6	Новый Динамический²	Создает расчет воздействия на конструкцию динамических нагрузок: ударов, синусоидальной и случайной вибрации. Динамический переходной анализ – исследование отклика системы на непериодические (импульсные) нагрузки с зависимостью от времени. Динамический частотный анализ – исследование воздействия в заданной полосе частот. Анализ динамического воздействия – оценка отклика системы на воздействие с заданным спектром. Динамические случайные воздействия – оценка отклика системы на случайные воздействия, заданные в виде функции.
1.7	Новая Проработка конструкции Стандартная	Позволяет выполнить анализ результатов одного или нескольких анализов с измененными переменными (размерами или параметрами).
1.8	Новая Проработка конструкции Чувствительность	Позволяет выполнить анализ чувствительности результатов ранее выполненного расчета и получить их зависимости от изменения конструктивных переменных.
1.9	Новая оптимизационная проработка конструкции	Позволяет выполнить оптимизацию одной или нескольких конструктивных переменных для достижения заданной цели.

Продолжение таблицы 11

№	Опция	Комментарий
2.	Панель меню Править	Позволяет изменять новые анализы и проработки конструкции.
2.1	Анализ/Проработка... 	Открывает диалоговое окно выбранного анализа или проработки конструкции для изменения.
2.2	Копировать 	Копирует анализ или проработку конструкции.
2.3	Удалить 	Удаляет выбранный анализ или проработку конструкции.
3.	Панель меню Выполнить	Управляет ходом расчетов.
3.1	Начало 	Запускает выполнение анализа или проработки конструкции.
3.2	Стоп 	Останавливает выполнение анализа или проработки конструкции.
3.3	Пакетный	Создает пакетный файл для последовательного выполнения множества анализов и проработок без запуска Creo.
3.4	Настройки 	Открывает окно настройки опций выполнения анализа и проработки конструкции.
3.5	Сохранить результаты	Сохраняет и сжимает результаты в файле с расширением .mrs
4.	Панель меню Данные	
4.1	Состояние 	Открывает окно Статус выполнения , предоставляющее отслеживание состояния выполнения и просматривание подробного сводного отчета о выполнении расчета.
4.2	Проверить модель	Позволяет проверить модель на наличие ошибок до запуска расчета.
4.3	История оптимизации	Позволяет просматривать историю изменения формы модели в ходе проработки оптимизации конструкции.
5.	Анализы и проработки	Здесь перечислены имена и типы созданных расчетов конструкции текущей модели.
6.	Описание	Отображает описание выбранного из списка анализа или проработки конструкции, если доступно.
Примечания. 1) Необходимо предварительное выполнение статического анализа. 2) Необходимо предварительное выполнение модального анализа.		

Согласно заданию необходимо определить статические перемещения и напряжения при действии нагрузки (тип анализа **Статический**, п. 1.1 в таблице 11), собственные частоты и формы колебаний (тип анализа **Модальный**, п. 1.2 в таблице 11), амплитудно-частотную характеристику при действии нагрузки, заданной в частотной области (тип анализа **Динамический частотный**, п. 1.6 в таблице 11).

Первым из анализов задается **Статический** выбором соответствующей опции в окне **Анализы и проработки**. При этом открывается окно **Определение статического анализа** (рисунок 14), опции которого перечислены в таблице 12.

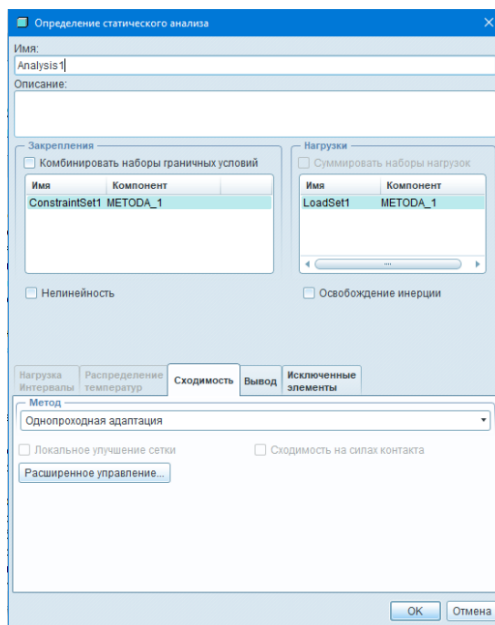


Рисунок 14 - Окно **Определение статического анализа**

Таблица 12

Опции окна **Определение статического анализа**

№	Опция	Комментарий
1.	Имя	Позволяет вводить имя анализа, которое может содержать только латинские буквы, цифры и нижнее подчеркивание, а начинаться может только с буквы.
2.	Описание	Позволяет вводить описание анализа.
3.	Закрепления	Позволяет выбрать один или несколько наборов закреплений.
4.	Нагрузки	Позволяет выбрать один или несколько наборов нагрузок. Для проведения расчета необходим хотя бы один набор нагрузок или набор закреплений, включающий заданное смещение.
5.	Освобождение инерции	Позволяет выполнить анализ без каких-либо закреплений. Эта возможность доступна только для линейного статического анализа.
6.	Нелинейность	Если этот флажок установлен, открываются дополнительные Опции нелинейностей, включающие: большие деформации, контакты, гиперупругость, пластичность.

Продолжение таблицы 12

№	Опция	Комментарий
7.	Метод Сходимости	
7.1	Многопроходная адаптация	Результаты рассчитываются с увеличением степени полинома, пока не будут удовлетворены условия сходимости (самый точный результат и наибольшая продолжительность).
7.2	Однопроходная адаптация	Анализ проходит в два прохода. На первом выполняется расчет со степенью полинома 3 и определяется локальная оценка ошибки напряжения. С помощью полученной оценки ошибки определяется новое распределение степени полинома и выполняется «чистовой проход».
7.3	Быстрая проверка	Выполняется один проход с равномерной степенью полинома, равной 3. Этот метод можно использовать для проверки правильности определения анализа.
8.	Вывод	
8.1	Вычислять	Позволяет выбирать величины для вычисления (напряжения, повороты, реакции, локальные ошибки).
8.2	Сетка отображения	Задаёт плотность сетки (не конечных элементов), определяющую узлы расчета результатов.
9.	Исключенные элементы	Позволяет исключить из вычислений сходимости напряжения и перемещения.

Имена анализам следует присваивать по следующему правилу: *(наименование или шифр модели)*_(дата в формате YYDDMM)_(тип анализа)_(порядковый номер или прочая уникальная информация). Так, в рассматриваемом случае название анализа может быть **val_150621_static_1**. Далее выбираем закрепление **ConstraintSet1** и нагрузку **LoadSet1**. Для подтверждения созданного анализа следует нажать кнопку **ОК**.

Следующий анализ, который необходимо создать – модальный, который используется для расчета мод колебаний (значений собственных частот и форм колебаний) и для построения амплитудно-частотной характеристики. Вид окна **Определение модального анализа** показан на рисунке 15, а его опции, отличные от опций статического анализа, перечислены в таблице 13.

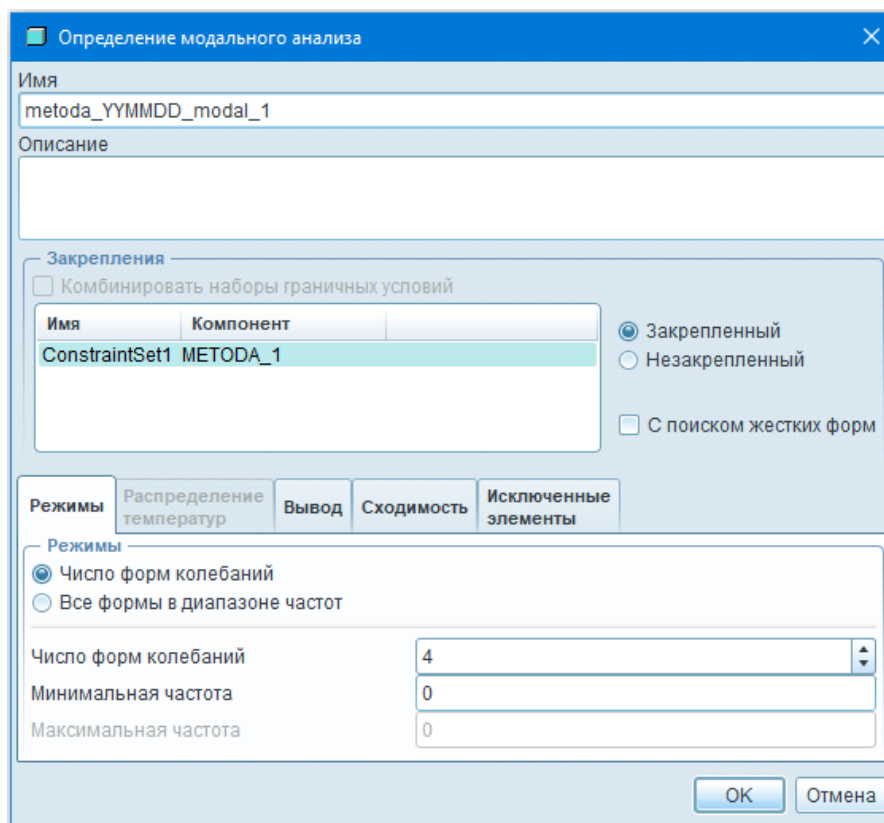


Рисунок 15 – Окно **Определение модального анализа**

Таблица 13

Опции окна **Определение модального анализа**

№	Опция	Комментарий
1.	Закрепленный	Позволяет провести расчет модели, все степени свободы которой ограничены. Затем выберите набор закреплений в списке Закрепления.
2.	Незакрепленный	Позволяет провести расчет модели, у которой ограничены не все степени свободы.
3.	С поиском жестких форм	Включает поиск форм жесткого тела в ходе выполнения анализа.
4.	Режимы	
4.1	Число форм	Позволяет установить конкретное число форм колебаний, которые необходимо рассчитать и частота которых превышает минимальное значение.
4.2	Все формы в диапазоне частот	Позволяет определить все формы собственных колебаний в заданном диапазоне частот.

В рассматриваемом случае задаем название анализа в соответствии с приведенным выше правилом (например, **val_150621_modal_1**), выбираем закрепление **ConstraintSet1** и количество мод 4. Для подтверждения созданного анализа следует нажать кнопку **OK**.

Следующим задается динамический частотный анализ. Все динамические анализы проходят с учетом определения конечной жесткости

твёрдого тела в виде его собственных частот и форм колебаний на них. Таким образом, для создания любого динамического анализа необходимо в первую очередь определить модальный анализ. В ходе выполнения указанного анализа измеряется реакция системы на периодическую или циклическую нагрузку с зависимостью от частоты. При этом входная нагрузка принимает форму управляющей частоты с соответствующими амплитудами. В динамическом частотном анализе рассчитываются амплитуда и фаза смещений, скоростей, ускорений и напряжений в модели в ответ на приложение нагрузки с разными частотами. Вид окна **Динамический частотный анализ** показан на рисунке 16.

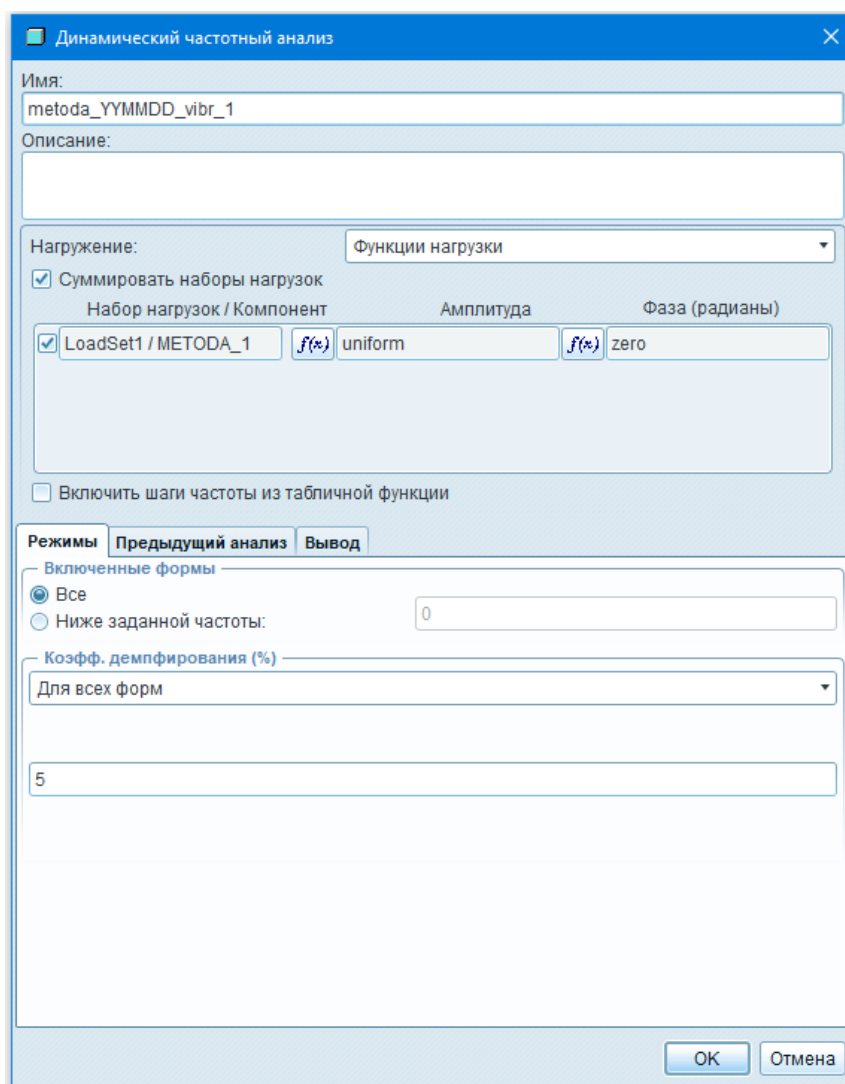


Рисунок 16 – Окно **Динамический частотный анализ**

Опции, отличные от опций, описанных выше анализов, перечислены в таблице 14.

Опции окна **Динамический частотный анализ**

№	Опция	Комментарий
1.	Нагружение	Позволяет выбрать вид воздействия на модель: или как Функции нагрузки или как Возмущение основания (закрепления). Последнее подходит для проведения расчетов воздействий извне.
1.1	Функции нагрузки	Чтобы воспользоваться опцией необходимо определить нагрузки для модели.
1.1.1.	Суммировать наборы нагрузок	Позволяет объединить результаты из всех выбранных наборов нагрузок.
1.1.2.	Набор нагрузок / Компонент	Следует установить флажки рядом с наборами нагрузки, которые требуется использовать.
1.1.3.		Позволяет выбрать и создать функции амплитуды и фазы нагрузки от частоты. Функция Uniform обладает равномерным распределением во всем спектре. Создание собственных функций возможно в символьном и табличном режиме.
1.2	Возмущение основания	Опция доступна только случае, если для динамического анализа выбран модальный анализ с закреплением.
1.2.1.	Зависимость от частоты	Позволяет выбрать и создать функции амплитуды внешнего воздействия.
1.2.2.	Направление	Позволяет выбрать направления внешнего воздействия относительно ГСК. Введенные значения служат масштабным коэффициентом для выбранной функции и умножаются на ее амплитуду.
1.2.3.	Относительно	Выбор элемента, относительно которого будут вычисляться результаты: Основание или Опоры. В первом случае вычисленные измерения ускорения, скорости и перемещений будут иметь абсолютный характер, с учетом внешней нагрузки. А во втором – относительный, то есть определяется собственный вклад систем на внешнюю нагрузку. Значения вычисленных измерений напряжений в конструкции не зависят от типа вычислений.
2.	Включить шаги частоты из табличной функции	Обеспечит включение во входную функцию решения всех шагов из созданных функций, а не только выбранных автоматически.
3.	Режимы	
3.1	Включенные формы	Позволяет указать, какие формы из модального анализа должны быть включены в динамический анализ.
3.1.1.	Все	Все формы из модального анализа будут включены в динамический анализ.
3.1.2.	Ниже заданной частоты	Ограничивает число включаемых мод частотой, введенной в соответствующее поле.

Продолжение таблицы 14

№	Опция	Комментарий
3.2	Коэффициент демпфирования	Назначение коэффициентов демпфирования формам в анализе. Коэффициент демпфирования представляет собой процент критического демпфирования и является логарифмическим коэффициентом затухания. Значение 100 % означает, что модель критически демпфирована и не может свободно колебаться. Коэффициент демпфирования, равный 1 %, означает, что амплитуда затухнет примерно на 6 % за один период колебания. Нормальный диапазон коэффициентов демпфирования – от 0 до 50 %. При вводе значений, выходящих за границы этого диапазона, в модуле Mechanics будет выведен запрос на подтверждение каждого из значений.
4.	Предыдущий анализ	
4.1	Использовать формы из предыдущей проработки конструкции	Позволяет использовать результаты предыдущего модального анализа. Если эта опция не выбрана, в ходе динамического анализа будет выполнен модальный анализ.
4.2	Проработка конструкции	Выбор модального анализа, результаты которого используются при выборе опции п. 4.1.
4.3	Модальный анализ	Выбор модального анализа, который должен быть включен в динамический анализ.
4.4	Набор закреплений	Выбор набора закреплений для используемого модального анализа.
5.	Вывод	
5.1	Вычислять	Выбор величин и коэффициентов, для которых вычисляются результаты: Напряжения, Повороты, Массовые коэффициенты вклада . Последние позволяют определить достаточность количества форм колебания, полученных из модального анализа, с целью обеспечения точности результатов.
5.2	Интервалы вывода	Количество интервалов в диапазоне частот, по которым должны выводиться результаты.
5.2.1.	Автоматические интервалы в пределах диапазона	Результаты расчета выводятся для введенного в соответствующие поля диапазона частот. При этом для каждого шага рассчитываются не все результаты, что позволяет сократить время проведения расчета.
5.2.2.	Пользовательские интервалы вывода	Гибкие настройки интервалов частот, на которых выполняется расчет с указанием на каких из них не следует производить все вычисления. К последним в большинстве случаев относятся измерения, связанные с графическим отображением модели при воздействии нагрузки.

В рассматриваемом случае задаем название анализа в соответствии с приведенным выше правилом (например, **val_150621_vibr_1**), выбираем тип нагружения **Функции нагрузки**, выбираем нагрузку LoadSet1 и назначаем для всех форм колебаний коэффициент демпфирования равный 5%. Остальные настройки оставляем по умолчанию. Для подтверждения созданного анализа следует нажать кнопку **ОК**. Задание частотного анализа возможно только, если заданы материал, закрепление, нагрузка, измерение и модальный анализ.

4.8. Выполнение анализов

Для выполнения анализов следует вернуться в окно **Анализы и проработки**, показанное на рисунке 13, выбрать нужный расчет (статический или динамический частотный) и запустить его согласно п. 3.1 таблицы 12. После запуска расчета появляется соглашение о выполнении диагностики (рисунок 17) и после нажатия кнопки **Да** решение запускается.

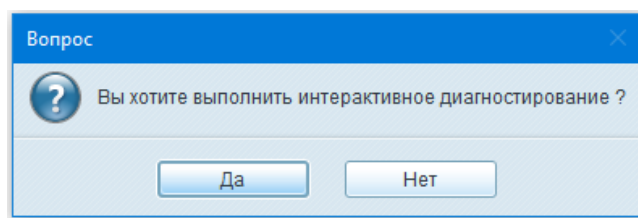




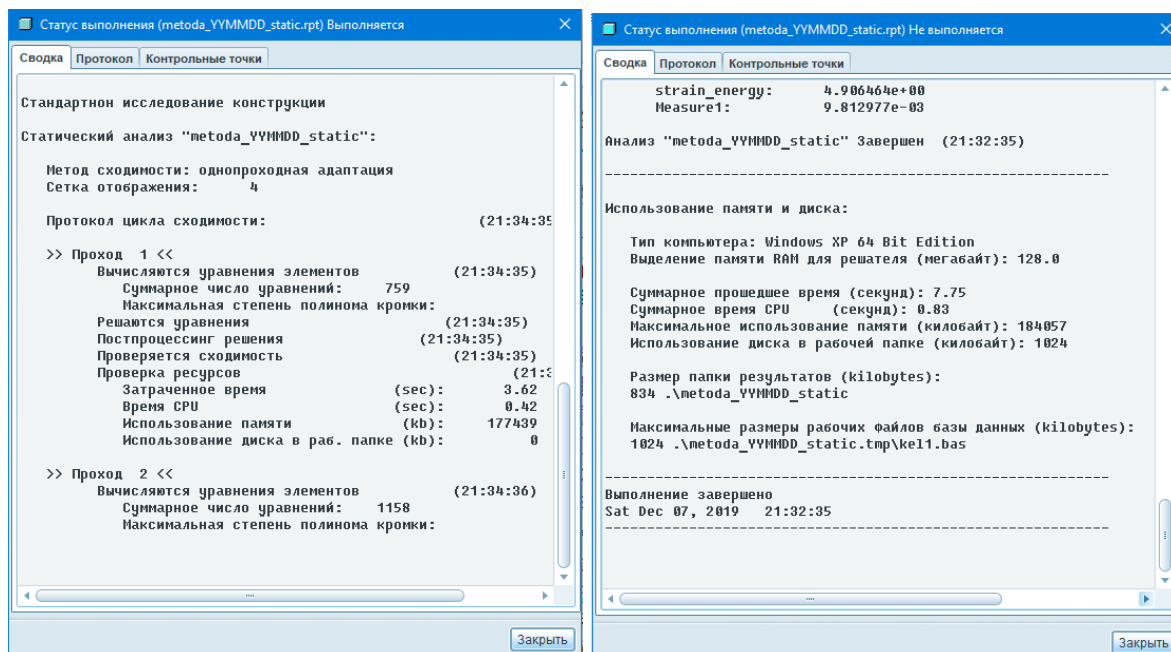


Рисунок 17 – Соглашение об интерактивном диагностировании

На состояние выполнения анализа указывают следующие значки, появляющиеся рядом с названием расчета:

-  – выполняется;
-  – сбой при выполнении;
-  – выполнение завершено;
-  – выполнение остановлено пользователем.

Ход выполнения расчета можно наблюдать в окне **Статус выполнения**, которое открывается согласно п. 4.1 таблицы 11. На рисунке 18 показано окно в процессе решения (а) и по его окончании (б). Информация о результатах записывается в директорию расчета в файл с названием аналогичным названию расчета, и расширением «.rpt» (отображается в заголовке окна).



а)

б)

Рисунок 18 – Окно Статус выполнения процесс решения (а); окончание решения (б)

После окончания анализа появляется окно результатов диагностики (рисунок 19), запущенной соглашением, показанным на рисунке 17.

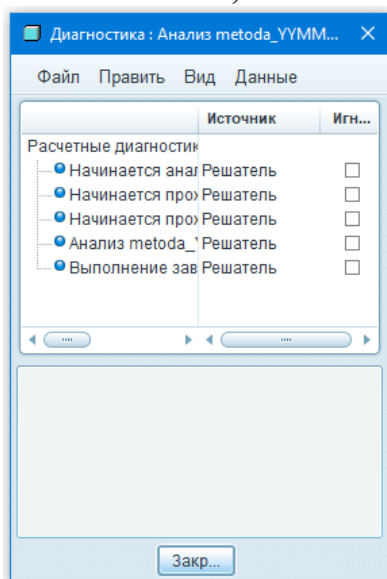


Рисунок 19 – Окно Диагностика

Результаты диагностики в указанном окне имеют следующую цветовую индикацию:

синий – штатная диагностика без замечаний;

желтый – имеются конфликты, снижающие точность и увеличивающие время выполнения расчета, но не препятствующие его выполнению;

красный – имеются конфликты, не позволяющие выполнить расчет.

При выборе любой строчки в верхней части окна, в нижней появляется подробное описание диагностики. Повторный вызов окна результатов диагностики осуществляется последовательностью команд меню **Анализ → Диагностика**.

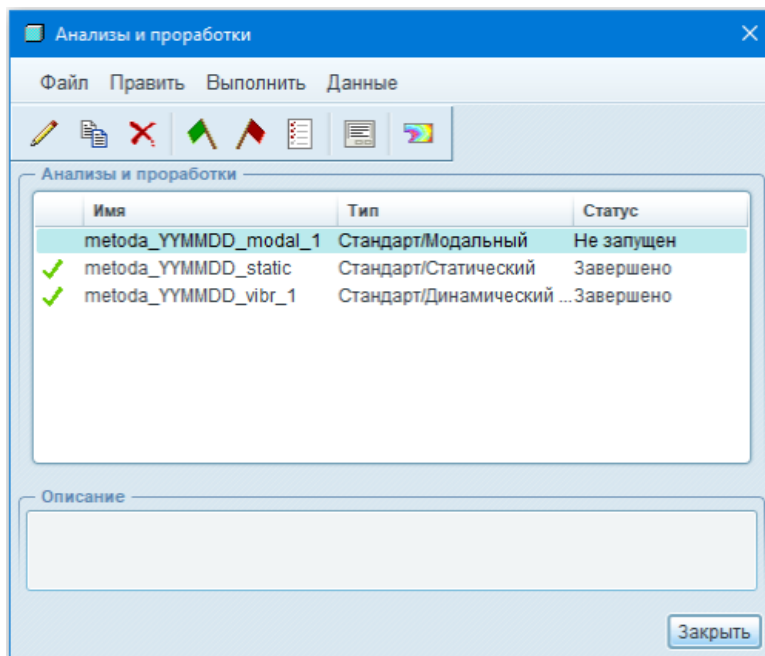



Рисунок 20 – Окно **Анализ и проработки** после выполнения расчетов

После выполнения всех анализов окно **Анализ и проработки** имеет вид, представленный на рисунке 20.

4.9. Просмотр результатов

После окончания решения анализов следует вернуться в окно **Анализ и проработки**, выбрать статический анализ и выбрать пункт **Результаты** .

После выборе команды **Анализ → Результаты** появляется диалоговое окно **Определение окна результата** (см. рисунок 21), которое позволяет настроить окно результата расчета конструкции. Следует учесть, что тип расчета влияет на перечень доступных вариантов показа результатов. Недопустимые комбинации не отображаются.

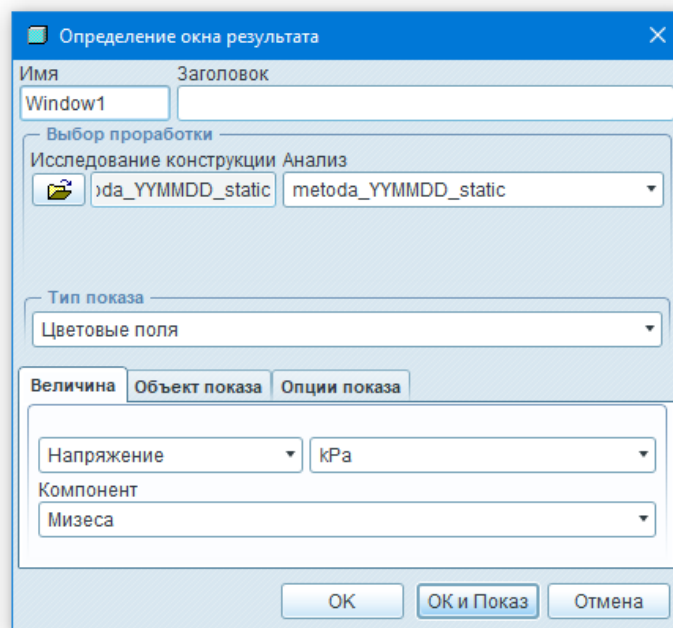



Рисунок 21 – Окно **Определение окна результата** для статического анализа

Опции окна **Определение окна результата** перечислены в таблице 15.

Таблица 15

Опции окна **Определение окна результата**

№	Опция	Комментарий
1.	Имя	Ввод имени для окна результата. Введенное имя отображается в списке в диалоговом окне Показ окна результата. Можно изменить в любой момент.
2.	Заголовок	Ввод заголовка для окна результата. Введенный заголовок отображается в середине нижней части окна результата. Можно изменить в любой момент.
3.	Выбор проработки	В этой области происходит выбор исследование конструкции/анализ для использования при показе результата.
3.1.	Исследование конструкции	Выбор проработки конструкции или анализа, для которого будут показаны результаты. По умолчанию подгружен файл исследования конструкции из текущей сессии. Если в режиме КЭМ результаты загружались непосредственно из файла .xdb нажмите кнопку  чтобы выбрать файл .xdb.
3.2.	Анализ	Выбор анализа, результаты которого будут отображаться
4.	Типа показа	Позволяет выбрать способ отображения результатов. В зависимости от выбранного исследования конструкции некоторые типы показа в списке могут быть недоступны

Продолжение таблицы 15

№	Опция	Комментарий
4.1.	Цветовые поля	Измерения указанной величины показаны в виде заполненных цветных областей — каждая из них соответствует цифровому диапазону, вычисленному анализом или проработкой конструкции. С помощью этого типа показа также можно создать контурный график.
4.2.	Векторы	Измерения и направления указанной величины показаны в виде цветных векторных стрелок. Этот тип показа недоступен в режиме КЭМ.
4.3.	График	Показ графика поведения модели. Графики отображают взаимоотношения между той или иной величиной и расположением графика, таким как проход полиномиального цикла, кривая или кромка, время или частота.
4.4.	Модель	Отображение геометрии модели в исходном или деформированном состоянии. Представления модели удобны, когда нужно при помощи простой анимации показать, как деформируется модель, или продемонстрировать ее оптимизированную форму. Этот тип показа недоступен для теплового расчета.
5.	Величина	Выбор физической величины для окна результата. Результаты анализа будут представлены в соответствии с выбранной физической величиной. После выбора физической величины в первом (левом) меню опций могут появиться дополнительные меню опций или кнопки, используемые для завершения выбора величины.
6.	Объект показа	Выбор различных элементов модели (поверхности, кромки, компоненты и др.) в окне результатов. Опции, доступные в этом меню, различаются в зависимости от выбранных исследований конструкции, типа показа и величины.
7.	Опции показа	Выбор опций для отображения результатов. Здесь доступно включение / выключение отображения деформированного состояния, изменение масштаба представления деформации, изменение количества цветов легенды, анимация и прочие настройки отображения.

Для лучшего понимания результатов расчета, в разделе **Опции показа** рекомендуется выбрать **Деформированное и Анимированное** отображение.

После нажатия кнопки **ОК** и **Показ** диалоговое окно **Определение окна результата** закроется и на экране отобразятся результаты проведенного расчета в соответствии с выбранными настройками отображения.

Результаты статического анализа показаны на рисунке 22. Максимальные перемещения стержня составили 9,8 мкм, максимальные напряжения 0,96 МПа.

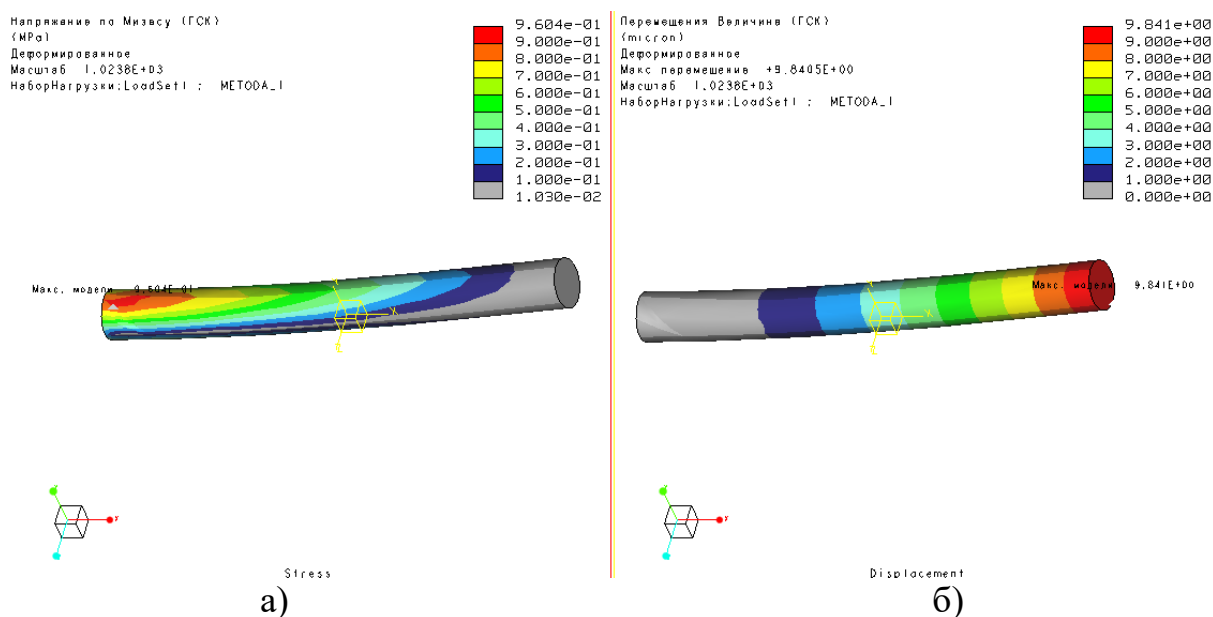



Рисунок 22 – Результаты статического анализа
максимальные напряжения (а); максимальные перемещения (б)

Аналитический расчет перемещений и напряжений в конструкции стержня дает следующие значения: максимальное перемещение стержня под нагрузкой 9,7 мкм, максимальное напряжение 1,02 МПа. Сравнение результатов, полученных с использованием аналитических выражений (1) – (7), с результатами КЭА, полученных в программе MECHANICA, дает удовлетворительное совпадение.

На рисунке 22 показано красным цветом, что максимальные напряжения возникают в заделке (рисунок 22, а), а максимальные перемещения происходят на свободном конце стержня в зоне действия нагрузки (рисунок 22, б).

Для просмотра результатов модального анализа следует вернуться в меню **Анализ и проработки**, выбрать модальный анализ и выбрать пункт **Результаты** .

После выборе команды **Анализ** → **Результаты** появляется диалоговое окно **Определение окна результата** для модального анализа (рисунок 23), где возможен выбор отображаемой формы колебаний.

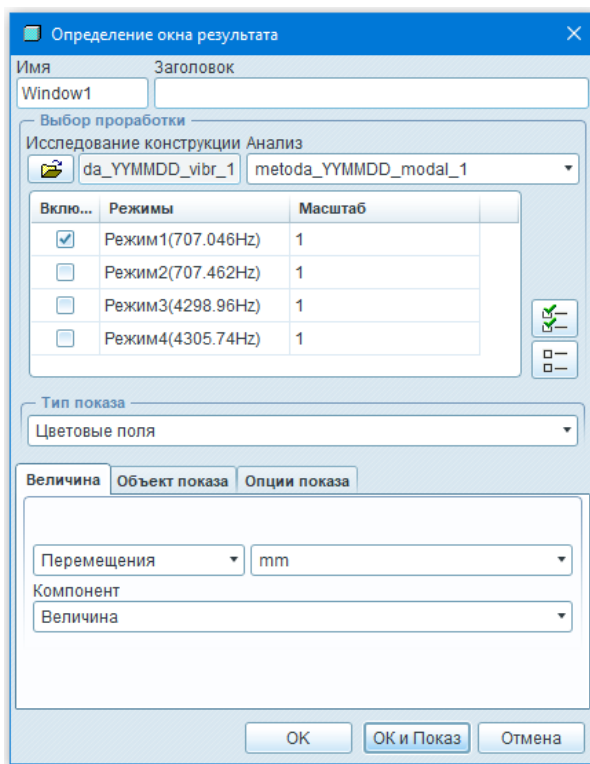


Рисунок 23 – Окно **Определение окна результата** для модального анализа

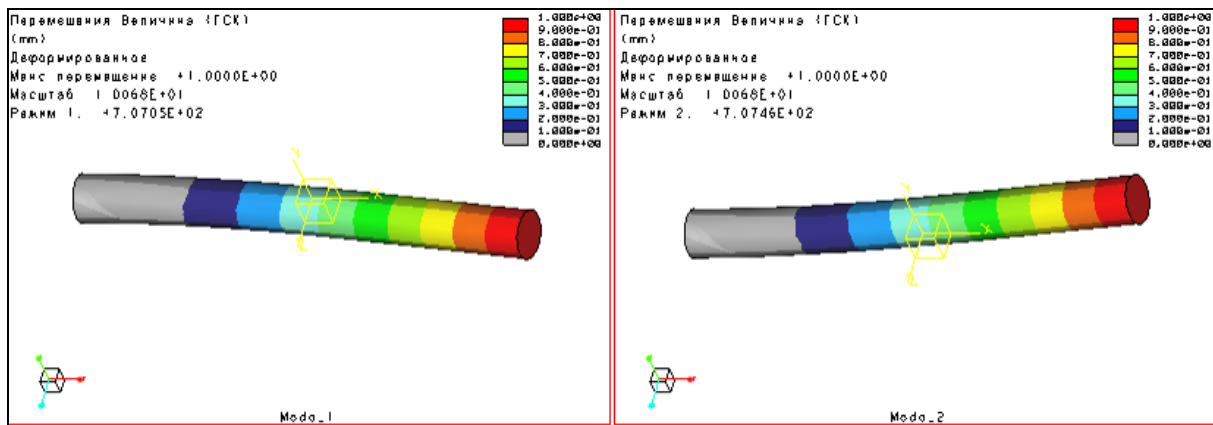
Результаты модального анализа показаны на рисунке 24.

Первый и второй рисунок (рис. 24, а и 24, б) определяют первую моду колебаний с частотой 707 Гц.

Третий и четвертый рисунок (рис. 24, в и 24, г) определяют вторую моду колебаний с частотой 4305 Гц.

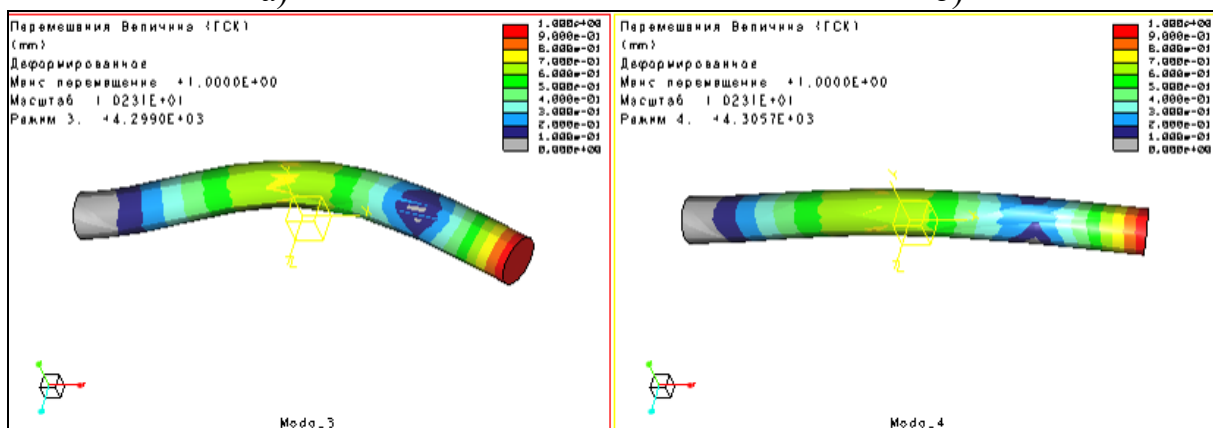
Отличие рисунков (а), (б) и (в), (г) состоит в показе форм колебаний по двум осям в двух взаимоперпендикулярных плоскостях, проходящих через ось стержня.

Аналитические результаты расчета дают значения частоты колебаний для первой моды – 715 Гц, для второй моды – 4481 Гц, что довольно близко к значениям, полученным в программе MECHANICA.



а)

б)



в)

г)

Рисунок 24 – Результаты модального анализа:
 первая мода колебаний стержня по двум осям (а), (б);
 вторая мода колебаний стержня по двум осям (в), (г)

После вызова окна **Определение окна результата** для частотного анализа (см. рисунок 25) в графе **Тип показа** установлен единственный возможный вариант показа – **График**. Вкладки **Объект показа** и **Опции показа** в данном случае недоступны для настройки.

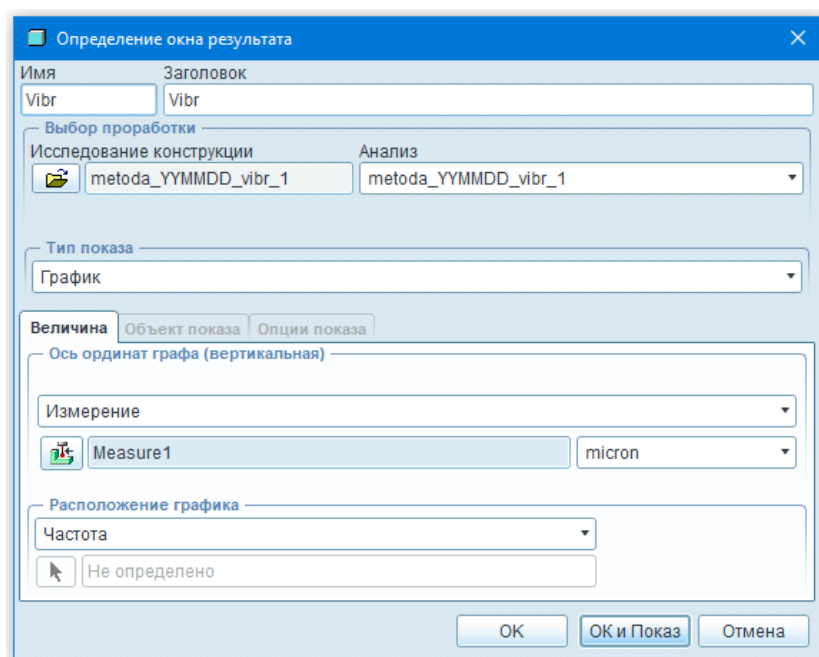



Рисунок 25 – Окно **Определение окна результата** для частотного анализа

Здесь следует запустить выбор возможных измерений (кнопка ) и выбрать **Measure1** в меню выбора решения частотного анализа (рисунок 26).

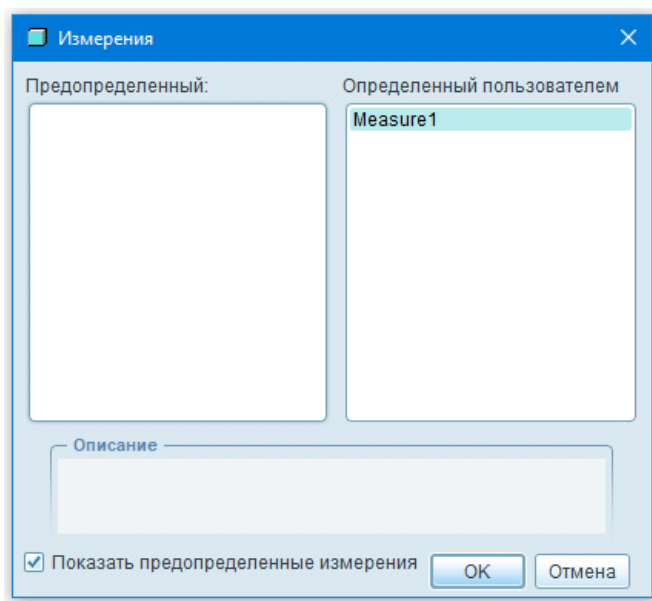


Рисунок 26 – Окно **Измерения**

Результат частотного анализа – амплитудно-частотная характеристика - показан на рисунке 27.

Measure |
(micron)
Частота
Масштаб 1.0000E+00
Набор Нагрузки: LoadSet1 : METODA_1

Vibr

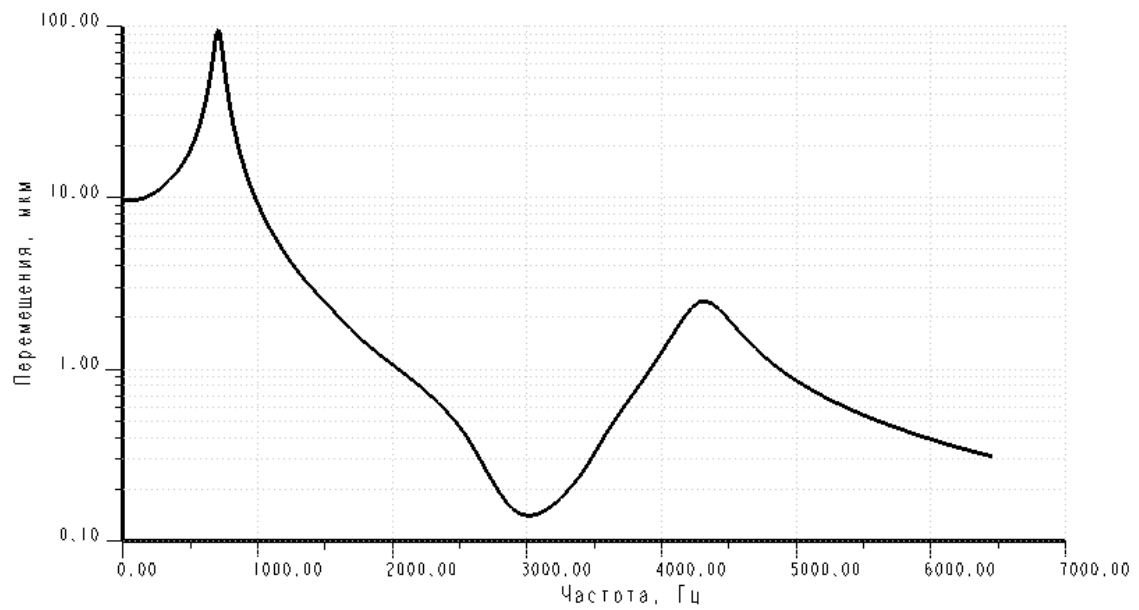


Рисунок 27 – Результат решения частотного анализа

Настройки показа графика доступны в меню **Формат – График**

5. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Отчет о лабораторном практикуме выполняется в электронном виде и должен содержать:

1. Общий вид и сечение исследуемого стержня.
2. Аналитический расчет характеристик стержня в соответствии с формулами (1) – (7).
3. Схема граничных условий в программе MECHANICA.
4. Краткий алгоритм расчета.
5. Результаты решения статического и модального анализов.
6. Сравнение аналитических и компьютерных расчетов и краткий анализ полученных результатов.

6. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При проведении лабораторной работы следует руководствоваться ГОСТ Р 12.1.019-2009 «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты» и ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность. Общие требования».

Студенты допускаются к выполнению лабораторной работы только после проведения преподавателем инструктажа по вопросам безопасности и методики выполнения работы с обязательной отметкой в соответствующем журнале по технике безопасности.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите основные преимущества конечно-элементного анализа.
2. В каких случаях используются модели с сосредоточенными параметрами, а в каких – с распределенными параметрами?
3. Что такое метод конечных элементов?
4. Опишите процедуру проектирования конструкций.
5. Какие основные программные пакеты используются для трехмерного компьютерного моделирования?
6. Какие основные модули включает в себя программа MECHANICA? Опишите и назовите их назначения.
7. Какие свойства материалов используются для анализа конструкции?
8. Назовите виды закреплений конструкции.
9. Что такое мода колебаний?
10. В каких случаях исследуются статические или динамические воздействия?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пешехонов В.Г.** Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. – 2011. – №1. – С.3-16.
2. **Буланов А.** Wildfire 3.0. Первые шаги / А. Буланов, О. Шевченко, С. Гусаров – М.: Поматур, 2008. – 240 с.: ил.
3. **Вержбинский В.М.** Основы численных методов: Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 2005. – 840 с.
4. **Евстифеев М.И., Елисеев Д.П.** Методика обучения основам конструирования гироскопических приборов // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: Сборник трудов XXVI международной научно-технической конференции, 14-20 сентября 2017 г., Алушта. – М.: ИД «МЕДПРАКТИКА-М», 2017. – С.120-121.
5. **Евстифеев М.И., Елисеев Д.П.** Современный подход к конструированию навигационных приборов // Труды МАИ. 2017. № 97 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://trudymai.ru/upload/iblock/070/Evstifeev_Eliseev_rus.pdf, доступ: свободный.
6. **Евстифеев М.И.** Методы проектирования конструкций микромеханических гироскопов. Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2019. – 182 с.
7. **Клебанов Я.М.** Современные методы компьютерного моделирования процессов деформирования конструкций: учеб. пособие / Я.М. Клебанов, В.Г. Фокин, А.Н. Давыдов – Самара: СамГТУ, 2004. – 100 с. – ISBN 5-7964-0553-5.
8. **Минеев М.А.** PRO/ENGINEER WILDFIRE 2.0/3.0/4.0. Самоучитель / М.А. Минеев, Р.Г. Прокди – М.: Наука и Техника, 2008. – 352 с.: ил.
9. **Окопный Ю.А.** Механика материалов и конструкций: учебник для вузов / Ю.А. Окопный, В.П. Радин, В.П. Чирков – М.: Машиностроение, 2001, – 408с., ил.
10. **Филин А.П.** Прикладная механика твердого деформируемого тела. Том 1. – М.: Наука, 1975. – 832 с.
11. Manfred Vogel, Thomas Ebel Creo parametric und Creo Simulate – Hanser Fachbuchverlag, 2012 – 369 p.
12. Roger Toogood Creo Simulate Tutorial Releases 1.0 & 2.0 – SDC Publications, 2012. – 296 p.
13. Randy Shih Introduction to Finite Element Analysis Using Creo Simulate 1.0 – SDC Publications, 2011. – 424 p.

Евстифеев Михаил Илларионович
Елисеев Даниил Павлович
Воронов Александр Сергеевич

**Расчет механических характеристик конструкций
с использованием программы
конечно-элементного анализа**

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверский пр., 49