МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Институт прикладной математики и механики

Кафедра теоретической механики

Работа допущена к защите

Зав. кафедрой, д.ф.-м.н., проф.

_____ А. М. Кривцов

"__"_____

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание академической степени

МАГИСТРА

Тема: Моделирование динамики графенового резонатора с использованием МКЭ

Направление: 010800 – Механика и математическое моделирование

Выполнил: студент гр. 63604/1 Шаяхметов Р. М.

Руководитель: кандидат физ.-мат. наук Беринский И. Е.

Консультант
по вопросам охраны труда: Монашков В. В.

Санкт-Петербург
2015

Реферат

Работа содержит 39 страниц, 15 рисунков, 6 таблиц.

НАНОМЕХАНИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР, НМР, ГРАФЕН, ГРАФЕНОВАЯ ПЛАСТИНА, МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ, ТОЧЕЧНАЯ МАССА.

В настоящей работе рассматривается объемная модель наномеханического резонатора на основе графена. Выполняется аналитическое решение в рабочей среде Mathcad и производится сравнение с конечно-элементным решением, проделанным в многофункциональном КЭ пакете Ansys Workbench. Анализируется конечно-элементная модель НМР с навешенной точечной массой и вычисляется значение ее собственной частоты, а так же исследуется зависимость от величины точечной массы и расположения ее на НМР.

Список сокращений

КЭМ – Конечно-элементная модель

МЭМС – Микроэлектромеханическая система

МКЭ – Метод конечных элементов

МРСМ – Магнитно-резонансный силовой микроскоп

НМР – Наномеханический резонатор

НЭМС – Наноэлектромеханическая система

ЯМР – Ядерно-магнитный резонанс

Оглавление

Введение 5

1. Физические модели 11

2. Математическая постановка и аналитическое решение 17

2.1 Начальные и граничные условия 17

2.2 Математическая постановка 18

3. Численный эксперимент МКЭ 21

3.1 Вычислительный эксперимент 21

3.2 Сравнение результатов 23

3.3 Учет навешенной массы 24

Выводы 29

Список литературы 30

Приложение А. Таблицы 32

Приложение Б. Инструкция по технике безопасности 35

Введение

Развитие нанотехнологий вновь вызвало интерес к механическим устройствам, которые еще на заре зарождения научного метода применялись в фундаментальных физических экспериментах. В качестве примеров можно упомянуть крутильный маятник, с помощью которого Кулон в 1785 г. Установил закон взаимодействия электрических зарядов, носящий его имя, а также механическое устройство Кавендиша, позволившее Кавендишу в 1789 г. Измерить силу гравитационного напряжения между двумя свинцовыми шарами.

Сегодня микро- и наноэлектромеханиечкие системы широко применяются в фундаментальных исследованиях. Однако их пороговая чувствительность, согласно [1], по измеряемым силе и массе по сравнению с таковой вышеупомянутых механических устройств является беспрецедентно высокой: по силе – на уровне нескольких цептоньютонов (1 цН = 10^{-21}) и по массе – на уровне нескольких цептограммов (1 цг = 10^{-21}). С помощью этих миниатюрных датчиков можно исследовать процессы на атомарном уровне: измерять силы между индивидуальными биомолекулами, исследовать магнитное поле индивидуальных ядерных спинов, измерять массы отдельных молекул и атомов и т.д.

Создание новых твердотельных структур с размерами от нескольких сотен до нескольких единиц нанометров открывает новую область научных и технологических исследований. Механические и электронные наноструктуры и нанорезонаторы на основе полупроводниковых и металлических материалов, представляют собой основу для будущих интегрированных наноэлектронных, наноэлектромеханических и фотонных сетей, для создания сверхчувствительных датчиков, приборов для квантовой обработки информации и других устройств с очень широкой областью применения: от сверхбыстрой и надежной связи до биомедицины. Для реализации этих идей необходимо, прежде всего, изучить свойства механических нанообъектов и

научиться, контролируемым образом, манипулировать ими. Для того чтобы достичь этого, необходимо разработать такую систему измерений и контроля, которая позволяла бы преобразовывать изменение положения нанообъектов в электрические сигналы и наоборот. Системы, содержащие электронные и механические компоненты, которые обычно состоят из электронного модуля и набора механоэлектрических нанодатчиков и/или электромеханических преобразователей (актуаторов), получили название наноэлектромеханических систем (НЭМС).

В области создания НЭМС в настоящее время достигнут существенный прогресс. Входящие в их структуру наномеханические резонаторы, размеры которых в плане, как правило, находятся в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен нанометров, являются уникальными по характеристикам: их фундаментальные частоты лежат в полосе от нескольких мегагерц до нескольких десятков гигагерц, механическая добротность составляет несколько десятков тысяч, активная масса порядка нескольких фемтограммов (10^{-15} г), поглощаемая мощность порядка нескольких аттоватт (10^{-17} Вт) [2]. В настоящее время по некоторым параметрам достигнуты следующие пороговые чувствительности НЭМС: по перемещению – 2×10^{-25} м Гц$^{-1/2}$ [3]; по массе – (10^{-18} – 10^{-19}) г Гц$^{-1/2}$ [4, 5]; по силе – 10^{-16} Н Гц$^{-1/2}$ [5]; по электрическому заряду – 10^{-1} е Гц$^{-1/2}$ ($e \approx 1.6 \times 10^{-19}$ Кл – заряд электрона) [7]; по пространственному разрешению – менее 100 нм [8].

Как следует из приведенных выше данных, уникальные свойства НЭМС позволяют создать сверхчувствительные измерительные приборы в таких областях, как квантовая метрология, сканирующая силовая микроскопия, ядерный магнитный резонанс (ЯМР) и др. Кроме того, из ведущихся сейчас разработок в этой области следует, что возможные применения НЭМС включают в себя также ряд методик по определению электронной структуры отдельных молекул и управлению их перемещением, в частности, для анализа атомной структуры наноматериалов и биомолекул.

Эти свойства вызвали поток идей и предложений интересных экспериментов и применений НЭМС в разнообразных областях: от поиска гравитационных волн до манипулирования структурой биомолекул. Но вместе с тем изучение НЭМС порождает ряд фундаментальных вопросов, на которые до сих пор нет исчерпывающих ответов. К таким вопросам относятся проблемы наномасштабной технологии (воспроизводимость, контроль объемных и поверхностный свойств), создание измерительных систем, позволяющих исследовать механику нанообъектов, характеризовать их свойства практически на атомном уровне. С теоретической точки зрения важен анализ применимости континуального подхода для расчета механических характеристик резонатора (для определения того, насколько механическое поведение нанообъектов определяется их молекулярной и атомной структурой). Отсюда видно, что исследования НЭМС проходят на переднем крае физических и инженерных наук, затрагивая одновременно несколько направлений в каждой из них.

На рисунке 1 приведена типичная блок-схема НЭМС. Основным элементов НЭМС является наномеханический резонатор (НМР), возбуждаемый электрическими сигналами через входной преобразователь, который преобразует электрическую энергию в энергию механических колебаний резонатора (на его основной гармонике или субгармониках). Одновременно на НМР через отдельный преобразователь подается контролируемый сигнал, который связан с изучаемым объектом. Этот сигнал может содержать информацию об измеряемом параметре (например, о смещении объекта или его магнитном моменте). Результирующий сигнал механических колебаний НМР, несущий в информацию об измеряемой величине, на выходе вновь преобразует в электрический сигнал, который после надлежащего усилия поступает в регистрирующее устройство.

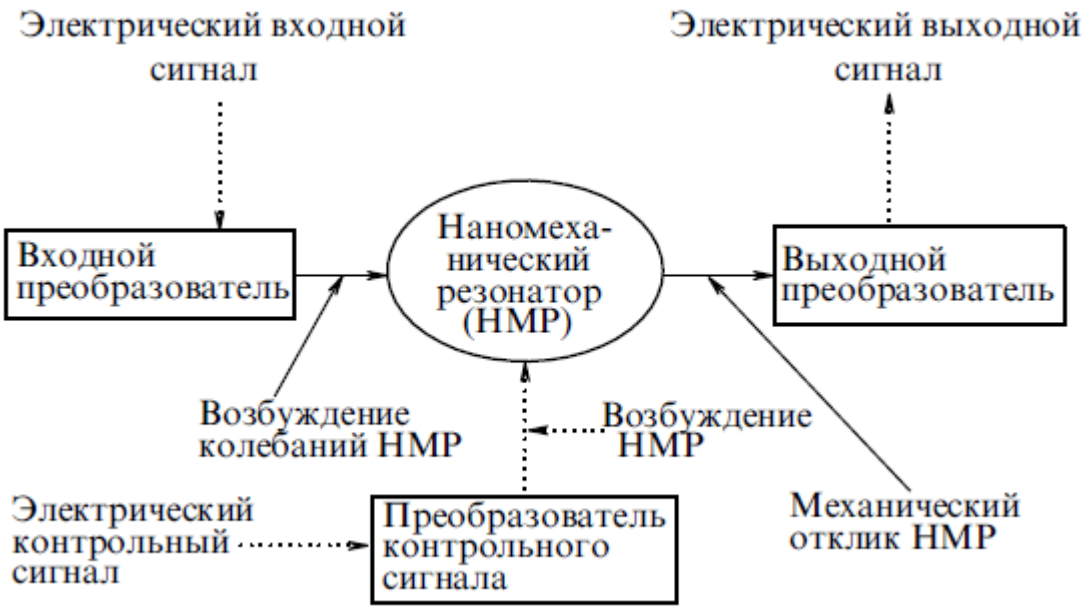

Рис. 1 – Блок-схема наноэлектромеханической системы.

Необходимо отметить, что большинство разработок в этой области пока находится на уровне экспериментальных исследований и еще не вышло за пределы исследовательских лабораторий. В лучшем случае можно говорить о разработке прототипов соответствующих приборов. Одним из таких приборов является магнитнорезонансный силовой микроскоп (МРСМ), который позволяет получить пространственное разрешение на уровне нескольких десятков нанометров (что примерно в 100 раз лучше пространственного разрешения традиционного ЯМР-спектрометра) и имеет пороговую чувствительность по магнитному моменту порядка 1000 ядерных спинов [8]

Необходимость выбора графена

В соответствии с [17], Графен – монослой кристаллической решетки графита – уже давно вызывает повышенный интерес в научном сообществе. Прежде всего, это связано с его необычной электронной структурой. В большинстве исследований графен рассматривают как двумерный материал с гексагональной решеткой и почти идеальным расположением атомов. Вообще говоря, экспериментально полученный монослой графена [20]

не является абсолютно плоским. Экспериментально обнаружено, что в равновесном состоянии он обладает незначительными деформациями в поперечном направлении [19]. Однако, как правило, в механических моделях графена данный факт не учитывается, что позволяет рассматривать его как двумерную структуру.

Механические свойства графена представляют отдельный интерес по нескольким причинам. Во-первых, углеродные нанотрубки, которые находят все большее применение в технике и медицине, представляют собой не что иное, как графеновые слои, свернутые тем или иным способом. Нанторубкам свойственно редкое сочетание линейных размеров, удельного веса, деформационных и прочностных характеристик. Во-вторых, весьма перспективным представляется создание композитных материалов на основе графена. Кроме того, существует еще ряд возможностей для применения механических свойств графена. Таким образом, изучение этих свойств является важной и актуальной задачей.

Эксперименты, проводимые в данной диссертации, выполняются средствами конечно-элементного программного пакета. Прежде всего это связано с минимальными экономическими и временными затратами численного эксперимента в сравнении с физическим.

Одним из наиболее популярных программных пакетов в среде инженеров-расчетчиков в настоящее время является конечно-элементный комплекс ANSYS Workbench.

ANSYS Workbench – это профессиональный конечно-элементный расчетный комплекс, позволяющий решать задачи прочности, нахождению собственных частот, теплообмена, электромагнетизма, гидрогазодинамики многие другие. Учитывая широкий спектр возможностей КЭ комплекса ANSYS Workbench , все экспериментальные расчеты будут выполнены в его среде.

Все аналитические расчеты в настоящей диссертации выполнялись при помощи системы компьютерной алгебры из класса систем автоматизированного проектирования, ориентированного на подготовку интерактивных документов с вычислениями и визуальными сопровождением MATHCAD 14.0.

Цели работы:

1) Провести модальный анализ модели графена методом конечных элементов и сравнить с аналитическим решением.
2) Учесть массу навешенной частицы.
3) Исследовать зависимость собственной частоты от положения навешенной частицы.
4) Исследовать зависимость собственной частоты НМР от массы навешенной частицы.

1. Физические модели

В последнее время наномеханические резонаторы привлекают особое внимание, поскольку они могут стать более чувствительными и менее энергозатратными детекторами по сравнению с электромеханическими аналогами [2, 9]. Следует также отметить, что добротность механических резонаторов намного превышает добротность электрических (несверхпроводящих) резонаторов.

В большинстве случаев НМР представляет собой кантилевер (балка, закрепленная на одно конце) или мостик (балка, закрепленная на обоих концах).

Впервые радиочастотный механический резонатор нанометровых размеров их монокремния был продемонстрирован в работе [10]. Резонатор длинной в 0.7 мкм, шириной 0.33 микрометра и толщиной в 0.8 мкм, имел основную резонансную частоту 70.7 МГц и добротность $Q = 1.8 \times 10^4$, определенную из подгонки резонансной кривой. Через несколько лет был реализован кремниевый НМР с размерами $2 \times 0.2 \times 0.1$ мкм и частотой 380 МГц [11]. Однако добротность всех кремниевых НМР, исследованных в работе [11], оказались существенно ниже ($Q \approx 10^3$), чем было продемонстрировано ранее [10]. Авторы работы [11] отмечают, что, хотя точная причина такого разброса добротностей не ясна, качество поверхности НМР играет важную роль. В частности, в [11] показано, что при уменьшении отношения поверхностей к объему (для образцов, изготовленных в одном технологическом цикле) добротность возрастает. Несколько лет назад был преодолен «психологический» частотный барьер в 1 ГГц для НМР на основе полупроводниковых материалов: был продемонстрирован резонатор на основе карбида кремния с размерами $1.1 \times 0.12 \times 0.075$ мкм, частотой 1.029 ГГц и $Q \approx 10^4$ [12].

Исследовались так же и другие материалы для НМР: нитрид кремния (Si_xN_y) [13] (частота ≈ 100 МГц, размеры ≈ 4 × 0.5 × 0.2 мкм, $Q \approx 10^3$), нанокристаллический алмаз (NCD) [14] (частота ≈ 10 МГц, размеры ≈ 1 × 0.2 × 0.05 мкм, $Q \approx 10^3$; позднее в работе [15] при низких температурах были получены добротности $Q \approx 10^4$).

В данной диссертации рассматривается модель твердого трехмерного тела НМР на основе графена в виде мостика с длиной *L*, шириной *w* и толщиной *t*. Схематичное изображение наномеханического резонатора представлено на рисунке 1.1

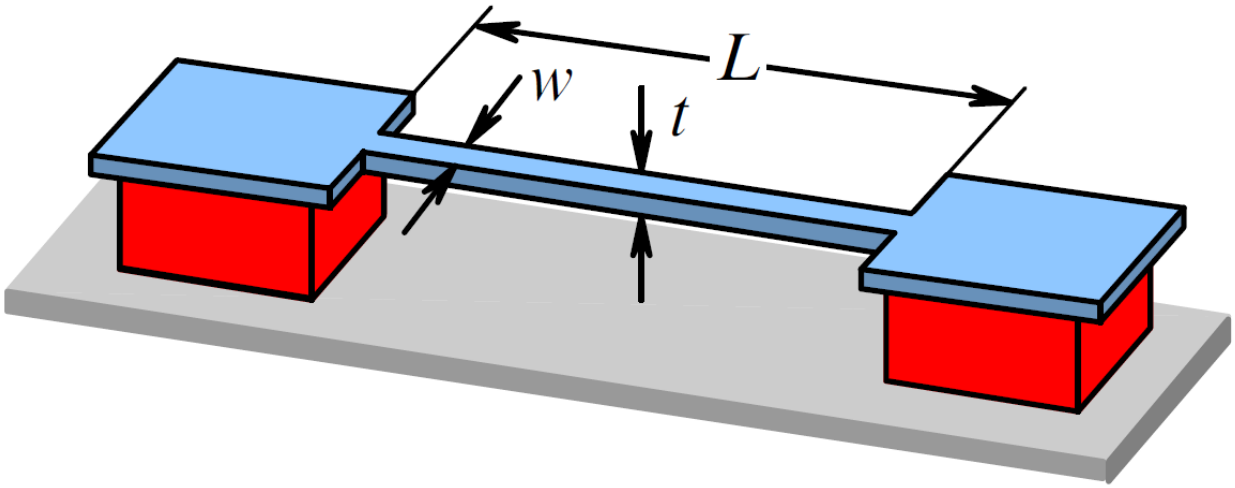

Рис. 1.1 – Схематичное изображение НМР.

На рисунке 1.2 представлен фотоснимок, взятый из работы [16], на котором изображение наномеханического резонатора, наблюдаемого в электронный микроскоп.

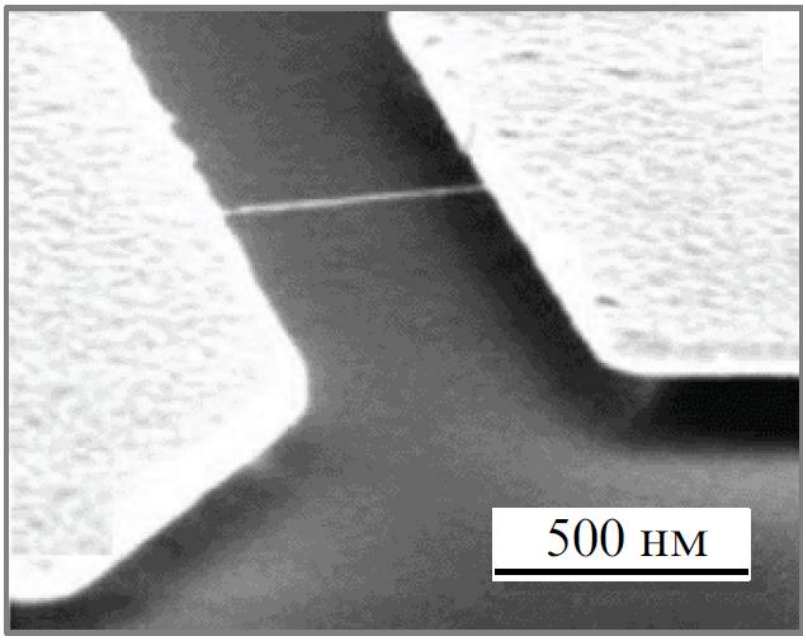

Рис. 1.2 – Электронный микрограф наномеханического резонатора

В ходе работы была предпринята попытка рассмотреть модель графенового НМР в виде мембраны с поверхностным натяжением, и пружинно-стержневая модель (рис. 1.3), соответствующая реальной геометрии листа графена. Но в виду сложности технической реализации мембраны в КЭ комплексе Ansys Workbench и множества степеней свободы у пружинно-стержневой модели НМР, которые создают трудности при модальном анализе, такие модели далее не рассматривались.

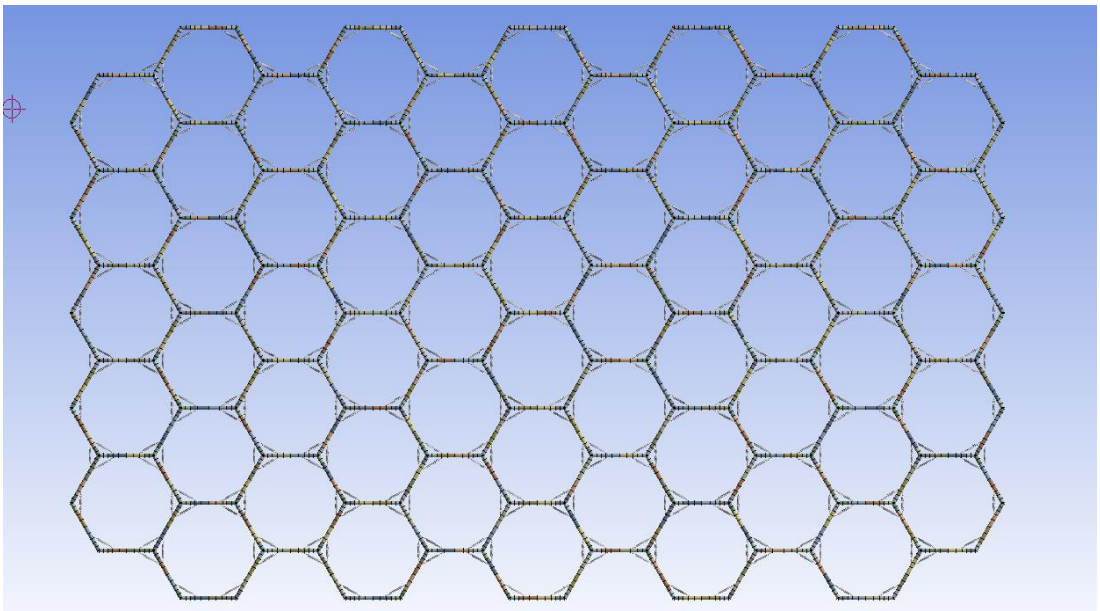

Рис. 1.3 – Пружинно-стержневая модель НМР на основе графена.

На рисунке 1.4 представлена твердотельная объемная модель наномеханического резонатора на основе графена с параметрами соответствующими натурной величине НМР:

V = 340 нм^3 – объем пластины графена

S = 2075 нм^2 – суммарная площадь поверхности пластины графена

m = 7.6·10^{-22} кг, или 0.76 аг (аттограм) – масса пластины графена

ρ = 2.234 гр/см^3 – плотность графена. Вычисление плотности производится в разделе 2 пункт 2.2

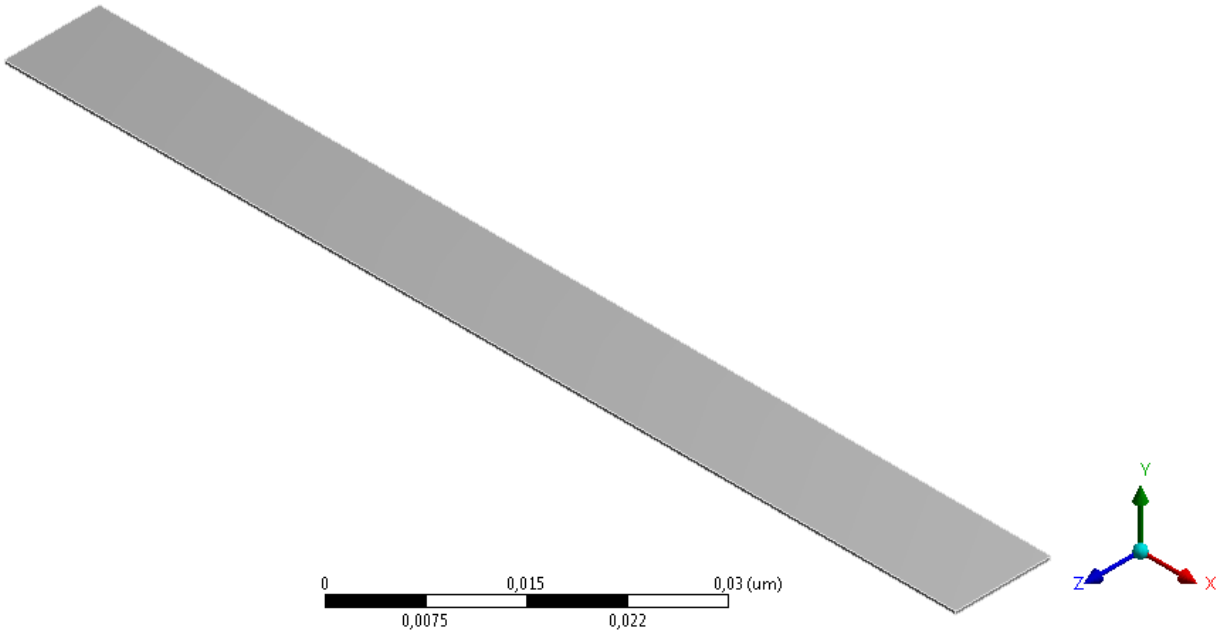

Рис. 1.4 – Твердотельная модель наномеханического резонатора на основе графена.

На рисунке 1.5 представлены первые 10 мод изгибных колебаний пластины графена НМР. Все они получены при помощи универсального программного комплекса Ansys Workbench 14.5.7.

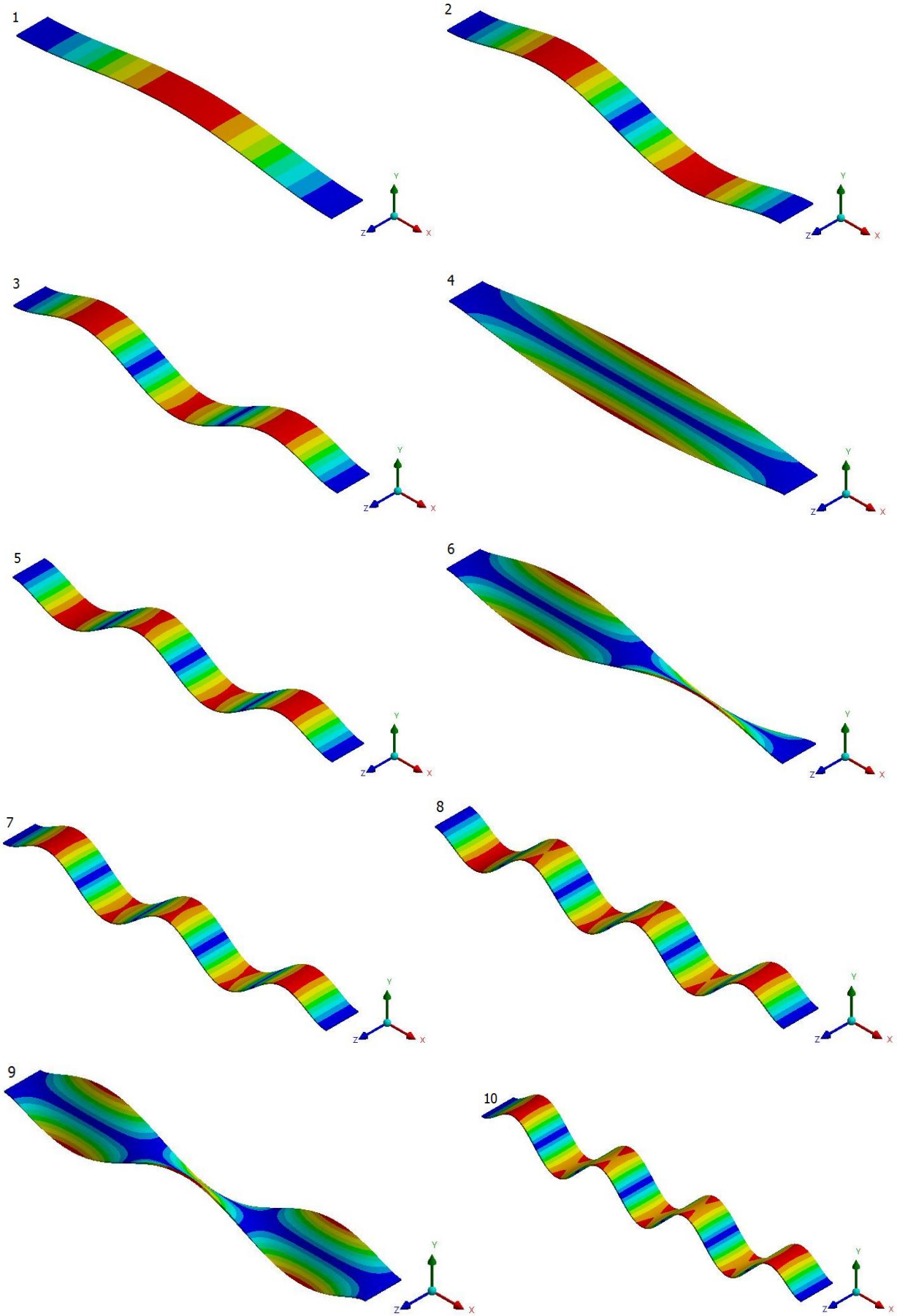

Рис. 1.5 – Вид мод изгибных колебаний НМР на основе графена.

Были проведены исследования различных моделей НМР, среди них модель твердого трехмерного тела, которая показала наилучшую сходимость с аналитикой и оказалась наиболее построй в техническом исполнении. Поэтому решено было оставить эту модель в качестве основной.

2. Математическая постановка и аналитическое решение

2.1 Начальные и граничные условия

Написать граничные условия – это значит перевести на язык математики постановку задачи, описываемую обычным способом. Для того, чтобы написать граничные условия достаточно определить размеры тела и математически записать все что происходит на его поверхности. Граничные условия в напряжениях можно записать, если известны (заданы) нагрузки на этой границе.

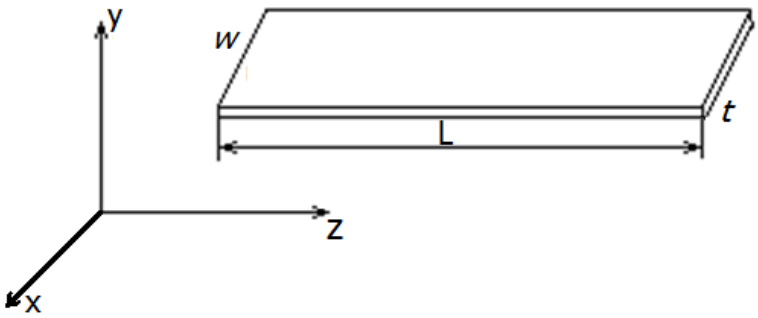

Рис. 2.1.1 – Расчетная модель НМР

Согласно данным, полученным для монокристаллического графита [18], для графена должно выполняться $t = 0.34$ нм – объемная толщина графена.

$L = 100$ нм – длина графеновой пластины НМР

$w = 10$ нм – ширина графеновой пластины НМР

Граничные условия при $z = 0$ и $z = L$:

$U(0) = U(L) = 0$ - перемещения на краях пластины равны нулю

$\frac{dU}{dz}(0) = \frac{dU}{dz}(L) = 0$ - наклоны на торцах пластины равны нулю

Граничные условия свободной поверхности:

$$\sigma_n = \tau_n = 0$$

-здесь σ_n , τ_n – нормальная и касательная составляющие компоненты вектора напряжения.

2.2 Математическая постановка

Упругие деформации твердых тел описываются теорией Бернулли – Эйлера. Рассмотрим исследуемую модель – пластина, закрепленную на торцах, длиной L, поперечным сечением A, изготовленный из материала с плотностью ρ с модулем Юнга E. Направим ось z вдоль основной оси мостика. Смещение мостика $U(z,t)$ от положения равновесия в отсутствие внешней силы описывается уравнение:

$$\rho A \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}(z,t) + EI_y \frac{\partial^4 U}{\partial z^4}(z,t) = 0, \tag{2.1}$$

где I_y – геометрический момент инерции относительно оси y. Пологая, что временная зависимость смещения имеет гармонический характер, $U(z,t) = U(z)\exp(-i\omega t)$, должна удовлетворять уравнению:

$$\frac{\partial^4 U}{\partial z^4}(z) = \frac{\rho A}{EI_y}\,\omega^2 U(z) \tag{2.2}$$

Общее решение для смещения мостика имеет вид:

$$U(z,t) = a\cos(\beta z) + b\sin(\beta z) + c\cosh(\beta z) + d\sinh(\beta z), \tag{2.3}$$

где $\beta = (\rho A/EI_y)^{1/4}\omega^{1/2}$. Решение (2.3) должно удовлетворять заданным ГУ. Из этих граничных условий следует, что a = -c и b = -d и параметр β принимает только дискретные значения, удовлетворяющие соотношению:

$$\cos\beta_n L \cosh\beta_n L - 1 = 0 \tag{2.4}$$

Решение уравнение (2.4), согласно [1], которые находятся численно, следующие: $\beta_n L = 0;\ 4.73;\ 7.853;\ 10.996;\ 14.137;\ldots$ Отбрасывая тривиальное решение $\beta_n L = 0$, получаем выражение для смещения:

$$U_n = a_n\,[\cos(\beta_n z) - \cosh(\beta_n z)] + b_n[\sin(\beta_n z) - \sinh(\beta_n z)], \tag{2.5}$$

где для первых нескольких мод отношение амплитуд a_n/b_n находится из граничных условий: $a_n/b_n = 1.018;\ 0.99;\ 1.000;\ldots$ Значение $U_n(z)$ удовлетворяют условию нормировки:

$$\int_0^L U_n(z)\,U_m(z)dz = L^3\delta_{mn} \tag{2.6}$$

Условие нормальности (2.6) дает $a_n = L$, при этом b_n находятся из отношений, приведенных выше.

Частоты соответствующих мод определяются выражением:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{EI_y}{\rho A}\beta_n^2} \tag{2.7}$$

В настоящей работе измеряют основную изгибную моду колебаний мостика, поскольку она дает наибольший сигнал. Для основной моды β_1 = 4.73/L, поэтому ее резонансная частота определяется следующим образом:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi}\frac{(4.73)^2}{L^2}\sqrt{\frac{EI_y}{\rho A}}, \tag{2.8}$$

для резонатора с прямоугольным сечением $A = w{\cdot}t = 3.4$ *нм*^{2}, где w и t – соответственно ширина и объемная толщина (в направлении колебаний) полоски резонатора, осевой момент инерции $I_y = w{\cdot}t^3/12 = 0.033$ *нм*^{4}, модуль Юнга E, согласно [17], для объемной трехмерной пластины графена равен $1{\cdot}10^6$ МПа.

Для вычислений необходимо определить объемную плотность графена НМР. Плотность определяется с учетом реальной толщины пластины графена, используемой в данной диссертации.

Объемная плотность графена определяется, в соответствии с [17], следующим образом:

$$\rho = \frac{m}{t{\cdot}S}, \tag{2.9}$$

где S – площадь, которая приходится на 1 атом углерода в графеновой мембране, $m = 1.99{\cdot}10^{-26}$ кг – масса атома углерода,

Площадь, приходящаяся на 1 атом углерода в графеновой мембране, определяется следующим образом:

$$S = 3\frac{\sqrt{3}}{4}\cdot a^2 = 0.026 \text{ нм}^2, \tag{2.10}$$

где a – расстояние между соседними атомами графена.

Согласно данным, полученным для монокристаллического графита [18], для графена должно выполняться $a = 0.142$ нм.

Запишем (2.9) с учетом (2.10), получим объемную плотность графена:

$$\rho = 2.234 \ \frac{\text{гр}}{\text{см}^3} \tag{2.11}$$

Подставим выведенные значения (2.10) и (2.11) в (2.8), и получим приближенное значение основной изгибной моды колебания пластины графена в НМР:

$$f_1 = 739.42 \ \text{МГц} \tag{2.12}$$

В результате расчетов была получена первая собственная частота колебаний пластины, соответствующая модели пластины графена.

В следующем параграфе проведено сравнение аналитического расчета с расчетом выполненным МКЭ.

3. Численный эксперимент МКЭ

3.1 Вычислительный эксперимент

При использовании численных расчетов для моделирования физических процессов необходимо учитывать влияние большого числа параметров расчетов на его результаты. К таким параметрам относятся тип сетки, число элементов расчетной области, соответствие этих элементов параметрам качества и т.д.

На рисунке 3.1 представлена конечно-элементная модель графенового наномеханического резонатора, состоящая из 4000 элементов, 29 тысяч узлов и толщиной в 3 элемента. Представлен вид сверху. КЭ сетка построена из линейных гексагональных элементов. Качество элемента (element quality) составляет 92%.

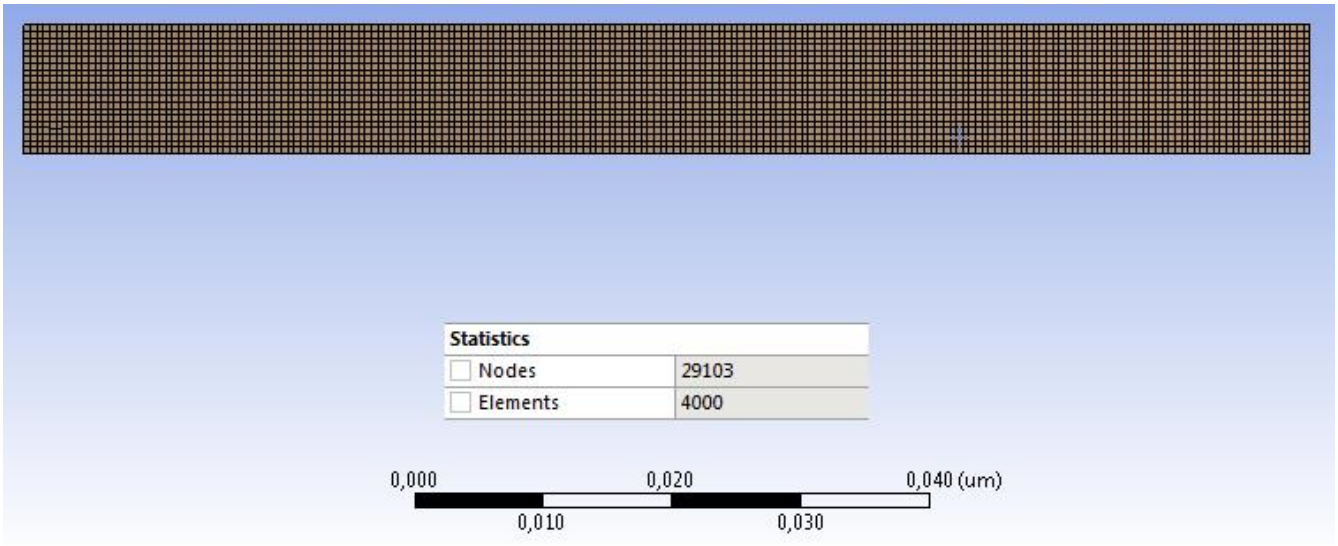

Рис. 3.1.1 – Конечно-элементная модель НМР

В связи с необходимостью достоверности решения МКЭ, требуется провести анализ сеточной сходимости и добиться сходимости итогового результата.

График сеточной сходимости продемонстрирован на рисунке 3.2. Табличные значения, используемые при построении графика *см. Приложение А, табл. 2.*

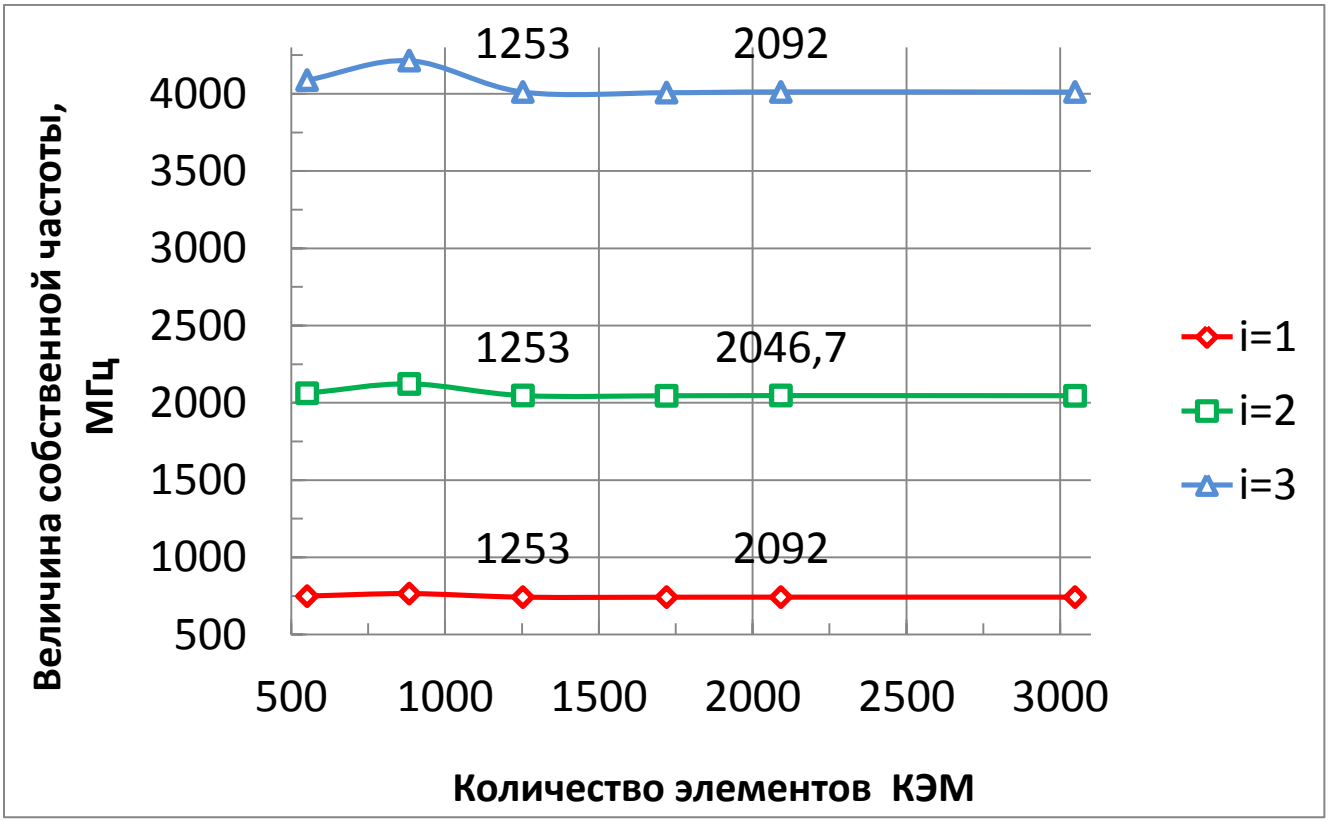

Рис. 3.1.2 – Оценка сеточной сходимости

Для наглядности был произведен расчет для трех мод изгибных колебаний. Как видно на графике, линейная сходимость обеспечивается при 1253-х элементах.

На рисунке 3.3 показан результат численного решения методом конечных элементов (МКЭ) в рабочей среде Ansys workbench. Определена первая мода изгибных колебаний наномеханического резонатора и ее значение. А так же в качестве дополнительных справочных сведений на рисунке изображено значение второй собственной частоты и цветная спектральная шкала прогиба графеновой пластины.

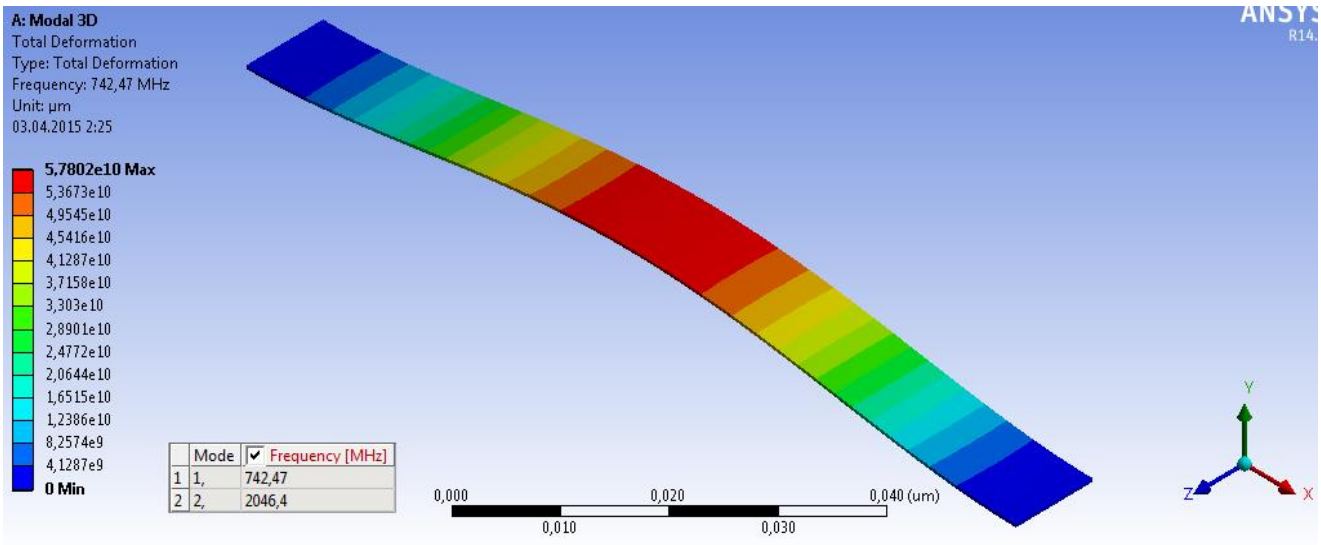

Рис. 3.1.3 – Результат решения МКЭ.

Первая собственная частота, полученная методом конечных элементов, равна:

$$f_1 = 742.47 \text{ МГц} \tag{3.1}$$

3.2 Сравнение результатов

Требуется сравнить значение первой собственной частоты полученное аналитическим решением (2.12) и численным решением методом конечных элементов (3.1), определить относительную погрешность.

Погрешность определяется по формуле:

$$k = \frac{|k_{\text{аналитическое}} - k_{\text{численное}}|}{k_{\text{аналитическое}}} * 100\% \tag{3.2}$$

Подставляем (2.12) и (3.1) в (3.2), получаем:

$$\text{k} = \frac{739.42 - 742.47}{739.42} * 100\% = 0.4\% \tag{3.3}$$

Исходя из полученной погрешности, можно утверждать, что КЭМ рабочая и ее результаты принимаются за достоверные.

3.3 Учет навешенной массы

Идея данной работы заключается в том, чтобы при помощи НМР можно было измерить массу микроскопических объектов, таких как, например, вес молекулы. Соотношение размеров молекулы к пластине наномеханического резонатора составляет примерно 1:100, этим обусловливается выбор модели – точечной массы (см. рисунок 3.3.1). Вес навешенной точечной массы принят 10% от веса пластины графенового наномеханического резонатора

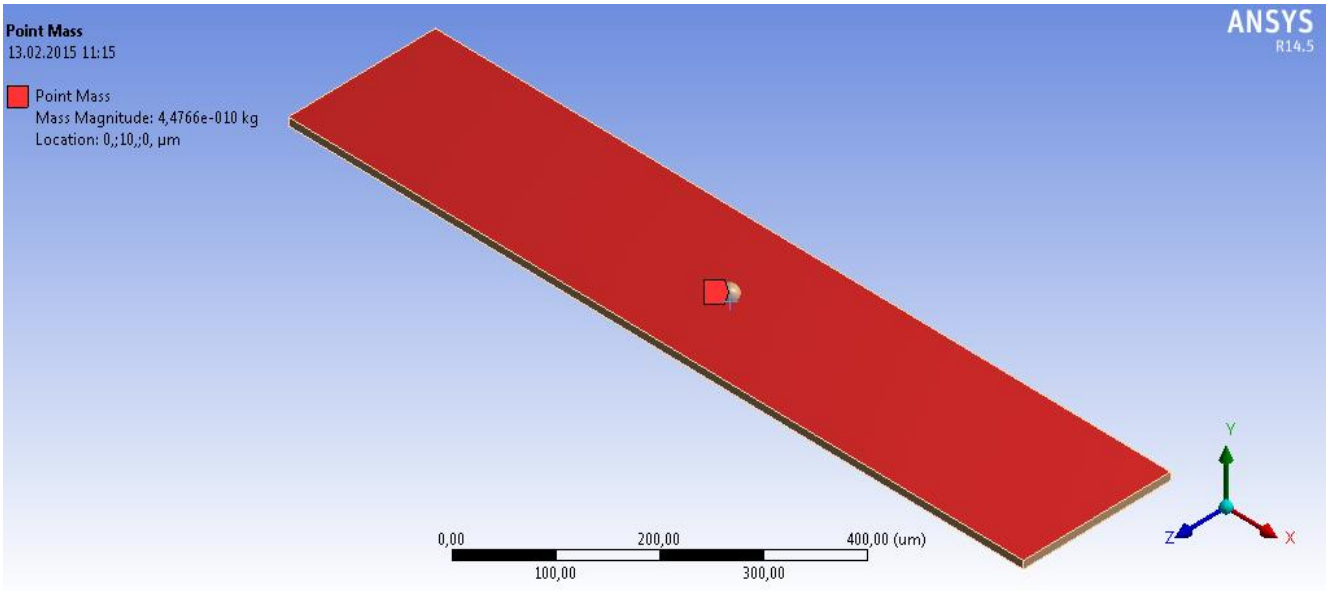

Рис. 3.3.1 – Модель графенового НМР с навешенной массой

По результатам расчета, значение основной моды изгибных колебаний НМР с навешенной массой равно 663.09 МГц. Изменения по сравнению с моделью НМР без точечной массы составляет 10.7%.

Был проведен ряд экспериментов, в результате которых была получена графическая зависимость изменения собственной частоты от расположения навешенной массы на пластине графена. 20 вычислений с расположением точечной массы от края заделки до центра пластины по оси z с шагом 2.5 нм и 10 вычислений с расположением точечной массы от края свободно границы до центра пластины по оси x с шагом 0.5 нм. Вес навешенной точечной массы принят равный 10% от веса пластины графена НМР. Соответствующие графики приведены ниже, рисунок 3.3.3 и 3.3.4

Схема расположения точечной массы изображена на рисунке 3.3.3

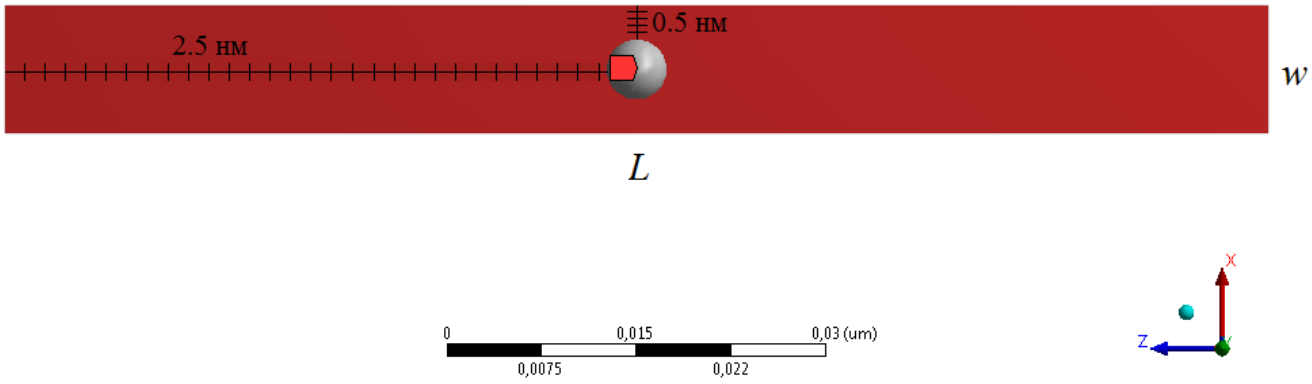

Рис. 3.3.2 – Схема расположений навешенной массы на пластину графена НМР

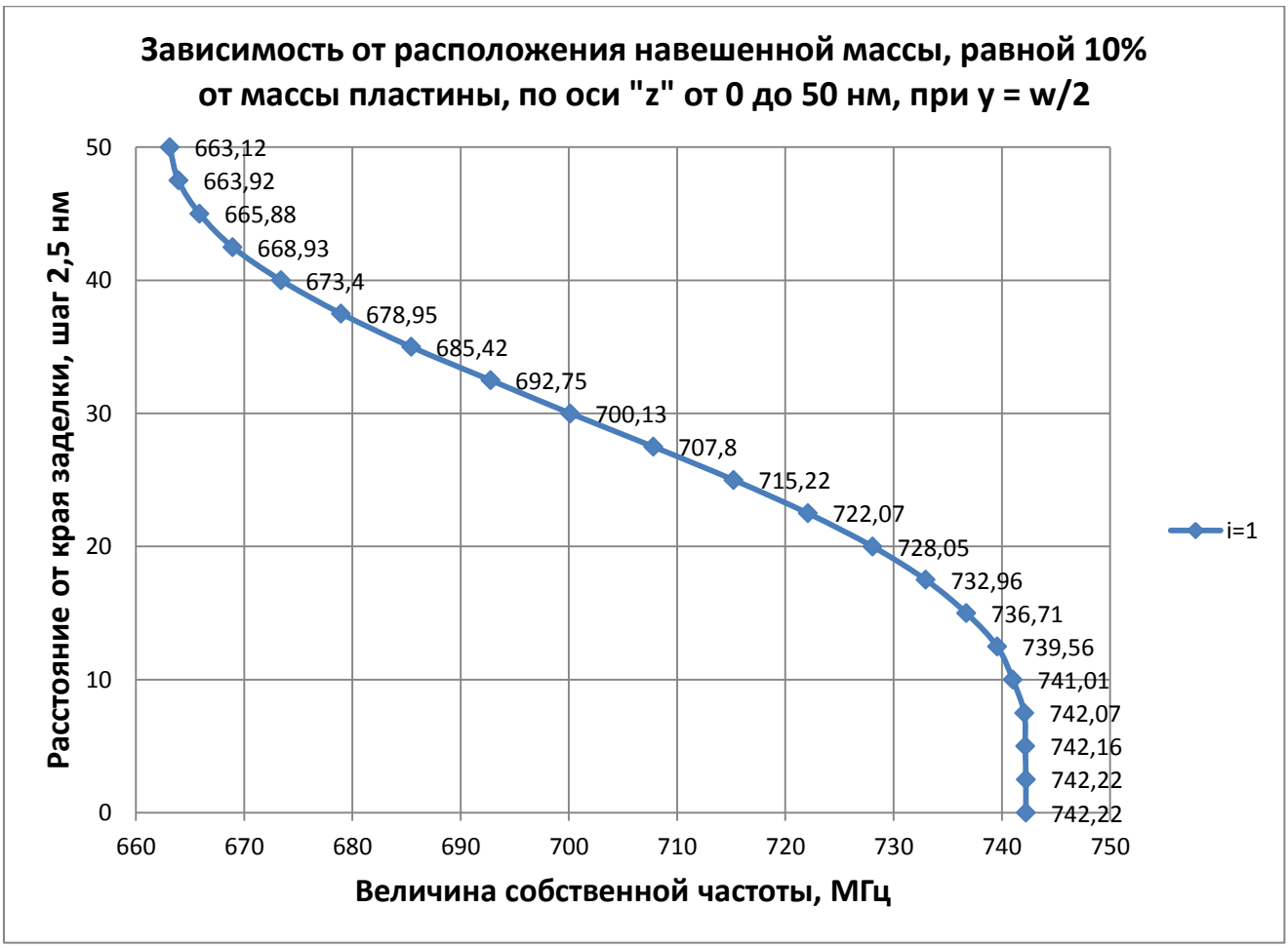

Рис. 3.3.3 – График зависимости собственной частоты НМР

Данный график обосновывает выбор центральной точки и области вокруг нее в качестве основной зоны, куда будет навешана частица. То есть это показывает, что в пределах 10 нм от центральной точки влияние не существенно. Поэтому частица, которая попадает в центр пластины НМР, будет вызывать наибольшее изменение резонансной частоты. Табличные значения, используемые при построении графика *см. Приложение А, табл. 4.*

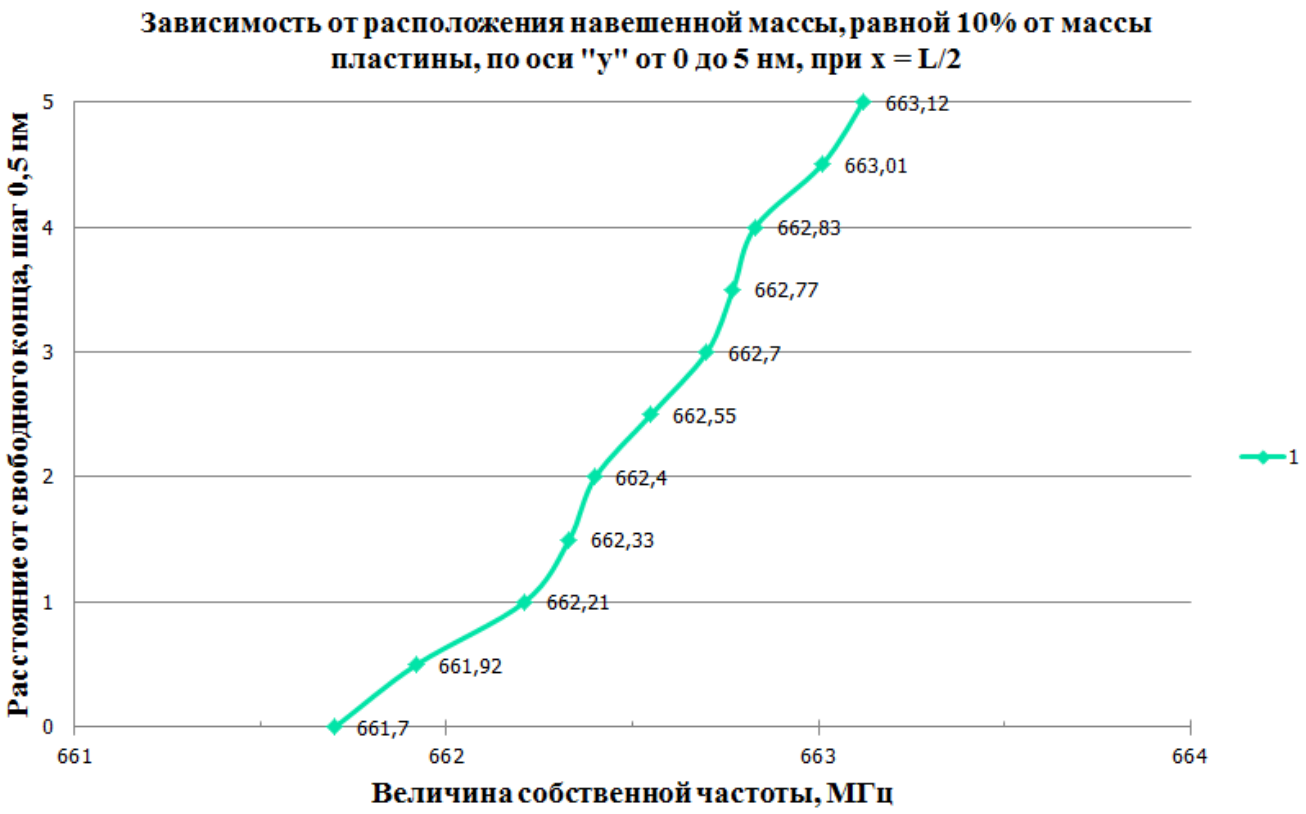

Рис. 3.3.4 – График зависимости собственной частоты НМР

Данные график подтверждает, что изменение собственной частоты в зависимости от расположения навешенной массы вдоль поперечной оси пластины незначительно, и разница между расположением точечной массы в центре и в близь края пластины при $z = L/2$ составляет менее 2 МГц. Табличные значения, используемые при построении графика *см. Приложение А, табл. 5*.

На рисунке 3.3.5 представлен график зависимости собственной частоты наномеханического резонатора от процентного соотношения величины навешенной массы к массе пластины графена. Точечная масса расположена по центру НМР. Табличные значения, используемые при построении графика *см. Приложение А, табл. 3*.

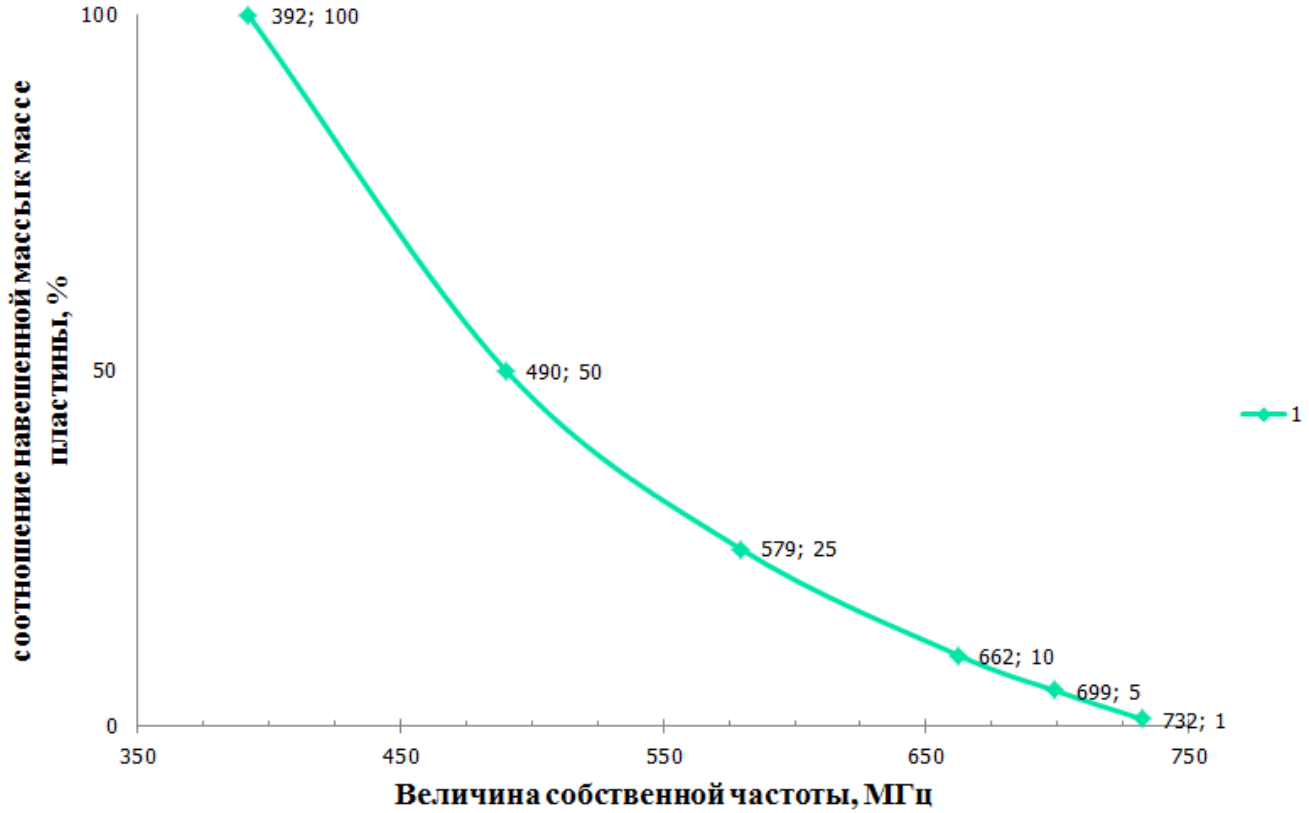

Рис. 3.3.5 – График зависимости собственной частоты НМР от величины навешенной массы

Чем больше вес навешенной точечной массы, тем меньше величина частот собственных колебаний НМР.

Выводы

В ходе проделанной диссертации была рассмотрена объемная модель наномеханического резонатора на основе графена. Выполнено аналитическое решение в рабочей среде Mathcad и произведено сравнение с конечно-элементным решением, проделанным в многофункциональном КЭ пакете Ansys Workbench. Погрешность полученных результатов составила 0.4%.

Были получены зависимости изменений значений собственной частоты от величины точечной навешенной массы, расположенной по центру пластины графенового НМР. А так же представлены результаты зависимости изменения значения собственной частоты от расположения навешенной точечной массы по площади пластины графена.

Если известна собственная частота пластины графена с навешенной массой и без нее, а так же известно, что точечная масса навешана ровно по центру, то проанализировав, можно рассчитать величину навешенной массы.

Список литературы

[1] - Гринберг Я. С., Пашкин Ю. А., Ильичев Е. В. Наномеханические резонаторы //Успехи физических наук. – 2012. – Т. 182. – №. 4. – С. 407-436.

[2] - Ekinci K. L., Roukes M. L. Nanoelectromechanical systems //Review of scientific instruments. – 2005. – Т. 76. – №. 6. – С. 061101.

[3] - Knobel R. G., Cleland A. N. Nanometre-scale displacement sensing using a single electron transistor //Nature. – 2003. – Т. 424. – №. 6946. – С. 291-293.

[4] - Ekinci K. L., Huang X. M. H., Roukes M. L. Ultrasensitive nanoelectromechanical mass detection //Applied Physics Letters. – 2004. – Т. 84. – №. 22. – С. 4469-4471.

[5] - Ilic B. et al. Attogram detection using nanoelectromechanical oscillators //Journal of Applied Physics. – 2004. – Т. 95. – №. 7. – С. 3694-3703.

[6] - Sidles J. A. et al. Magnetic resonance force microscopy //Reviews of Modern Physics. – 1995. – Т. 67. – №. 1. – С. 249.

[7] - Cleland A. N., Roukes M. L. A nanometre-scale mechanical electrometer //Nature. – 1998. – Т. 392. – №. 6672. – С. 160-162.

[8] - Mamin H. J. et al. Nuclear magnetic resonance imaging with 90-nm resolution //Nature Nanotechnology. – 2007. – Т. 2. – №. 5. – С. 301-306.

[9] - Yang Y. T. et al. Monocrystalline silicon carbide nanoelectromechanical systems //Applied Physics Letters. – 2001. – Т. 78. – №. 2. – С. 162-164.

[10] - Cleland A. N., Roukes M. L. Fabrication of high frequency nanometer scale mechanical resonators from bulk Si crystals //Applied Physics Letters. – 1996. – Т. 69. – №. 18. – С. 2653-2655.

[11] - Carr D. W. et al. Measurement of mechanical resonance and losses in nanometer scale silicon wires //Applied Physics Letters. – 1999. – Т. 75. – №. 7. – С. 920-922.

[12] - Huang X. M. H. et al. Nanoelectromechanical systems: Nanodevice motion at microwave frequencies //Nature. – 2003. – Т. 421. – №. 6922. – С. 496-496.

[13] - Sekaric L. et al. Nanomechanical resonant structures in nanocrystalline diamond //Applied Physics Letters. – 2002. – Т. 81. – №. 23. – С. 4455-4457.

[14] - Sekaric L. et al. Nanomechanical resonant structures in nanocrystalline diamond //Applied Physics Letters. – 2002. – Т. 81. – №. 23. – С. 4455-4457.

[15] - Hutchinson A. B. et al. Dissipation in nanocrystalline-diamond nanomechanical resonators //Applied Physics Letters. – 2004. – Т. 84. – №. 6. – С. 972-974.

[16] - Garcia-Sanchez D. et al. Mechanical detection of carbon nanotube resonator vibrations //Physical review letters. – 2007. – Т. 99. – №. 8. – С. 085501.

[17] - Теоретическая механика. Упругие и тепловые свойства идеальных кристаллов: учеб. пособие /И. Е. Беринский [и др.]; под ред. А. М. Кривцова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 144 с.

[18] - Blakslee O. L. et al. Elastic constants of compression-annealed pyrolytic graphite //Journal of Applied Physics. – 1970. – Т. 41. – №. 8. – С. 3373-3382..

[19] - Meyer J. C. et al. The structure of suspended graphene sheets //Nature. – 2007. – Т. 446. – №. 7131. – С. 60-63.

[20] - Novoselov K. S. A. et al. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene //nature. – 2005. – Т. 438. – №. 7065. – С. 197-200.

Приложение А. Таблицы

Таблица 1 – Обезразмеривание НМР

Размер пластины, нм	Значение собственной частоты, МГц
100 × 10 × 0.34	742.22
1000 ×100 × 3.4	74.222
10000 × 1000 × 34	7.422
10000 × 10000 × 340	0.7422

Таблица 2 – Оценка сеточной сходимости по первым трем собственным частотам

Количество элементов КЭ сетки	i=1	i=2	i=3
551	749.1	2062.0	4087.4
884	765.1	2122.5	4213.9
1253	742.07	2046.7	4011.1
1720	741.72	2045.5	4007.0
2092	742.22	2046.7	4012.4
3048	742.19	2046.0	4011.1

Таблица 3 – Зависимость от величины точечной массы, расположенной по центру пластины

Величина навешенной массы, %	Значение собственной частоты, МГц
100	391.83
50	490.65
25	579.32
10	662.25
5	698.66
1	732.35

Таблица 4 – Зависимость от расположения точечной массы, m_1 = 0.1m, по оси “x” от 0 до 50 нм, y = 5 нм

Расстояние от края заделки, шаг 2.5 нм	Значение собственной частоты, МГц
0	742.22
2.5	742.22
5	742.16
7.5	742.07
10	741.01
12.5	739.56
15	736.71
17.5	732.96
20	728.05
22.5	722.07
25	715.22
27.5	707.8
30	700.13
32.5	692.75
35	685.42
37.5	678.95
40	673.4
42.5	668.93
45	665.88
47.5	663.92
50	663.12

Таблица 5 – Зависимость от расположения точечной массы, m_1 = 0.1m, по оси “y” от 0 до 5 нм, x = 50 нм

Расстояние от края заделки, шаг 0.5 нм	Значение собственной частоты, МГц
0	661.7
0.5	661.92
1	662.33
1.5	662.21
2	662.38
2.5	662.55
3	662.75
3.5	662.77
4	662.83
4.5	663.01
5	663.12

Таблица 6 – зависимость значения собственной частоты НМР от условий закреплений в Ansys workbench, без навешенной массы

Мода колебаний	Fixed	Displacement
1	742.2	742.2
2	2046.7	2046.7
3	4012.4	4012.4

Приложение Б. Инструкция по технике безопасности

Общие требования безопасности

Настоящая инструкция распространяется на персонал, эксплуатирующий средства вычислительной техники и периферийное оборудование. Инструкция содержит общие указания по безопасному применению электрооборудования в учреждении. Требования настоящей инструкции являются обязательными, отступления от нее не допускаются.

1. Рабочее место оборудовано устройствами, которые питаются напряжением 220 В и частотой 50 Гц. К работе допускаются лица не моложе 18 лет, пригодные по состоянию здоровья и квалификации к выполнению указанных работ и прошедшие инструктаж по техники безопасности (ТБ). Инструктаж проводится заведующим отделом.
2. После инструктажа инженер расписывается в регистрационном журнале о том, что он прошел инструктаж и обязуется выполнять правила безопасности.
3. Не прошедшие инструктаж сотрудники к работе не допускаются.
4. Невыполнение требований настоящей инструкции является нарушением трудовой дисциплины, и виновные несут ответственность в соответствии с действующим законодательством и системой управления охраны труда.

Требования безопасности перед началом работы

Перед началом работы следует убедиться в исправности электропроводки, выключателей, штепсельных розеток, при помощи которых оборудование включается в сеть, наличии заземления компьютера, его работоспособности.

Требования безопасности во время работы

Для снижения или предотвращения влияния опасных и вредных факторов необходимо соблюдать санитарные правила и нормы:

1. Во избежание повреждения изоляции проводов и возникновения коротких замыканий, не разрешается: вешать что-либо на провода, закрашивать и белить шнуры и провода, закладывать провода и шнуры за газовые и водопроводные трубы, за батареи отопительной системы, выдергивать штепсельную вилку из розетки за шнур, усилие должно быть приложено к корпусу вилки.

2. Для исключения поражения электрическим током запрещается: часто включать и выключать компьютер без необходимости, прикасаться к экрану и к тыльной стороне блоков компьютера, работать на средствах вычислительной техники и периферийном оборудовании мокрыми руками, работать на средствах вычислительной техники и периферийном оборудовании, имеющих нарушения целостности корпуса, нарушения изоляции проводов, неисправную индикацию включения питания, с признаками электрического напряжения на корпусе, класть на средства вычислительной техники и периферийном оборудовании посторонние предметы.

3. Запрещается под напряжением очищать от пыли и загрязнения электрооборудование.

4. Запрещается проверять работоспособность электрооборудования в неприспособленных для эксплуатации помещениях с токопроводящими полами, сырых, не позволяющих заземлить доступные металлические части.

5. Недопустимо под напряжением проводить ремонт средств вычислительной техники и периферийного оборудования. Ремонт электроаппаратуры производится только специалистами-техниками с соблюдением необходимых технических требований.

6. Во избежание поражения электрическим током, при пользовании электроприборами нельзя касаться одновременно каких-либо трубопроводов, батарей отопления, металлических конструкций , соединенных с землей.

7. При пользовании электроэнергии в сырых помещениях соблюдать особую осторожность.

Требования безопасности в аварийных ситуациях

1. При обнаружении неисправности немедленно обесточить электрооборудование, оповестить администрацию. Продолжение работы возможно только после устранения неисправности.

2. При обнаружении оборвавшегося провода необходимо немедленно сообщить об этом администрации, принять меры по исключению контакта с ним людей. Прикосновение к проводу опасно для жизни.

3. Во всех случаях поражения человека электрическим током немедленно вызывают врача. До прибытия врача нужно, не теряя времени, приступить к оказанию первой помощи пострадавшему.

4. Необходимо немедленно начать производить искусственное дыхание, наиболее эффективным из которых является метод "рот в рот" или "рот в нос", а также наружный массаж сердца.

5. Искусственное дыхание пораженному электрическим током производится вплоть до прибытия врача.

6. На рабочем месте запрещается иметь огнеопасные вещества. В помещениях запрещается:

а) зажигать огонь;

б) включать электрооборудование, если в помещении пахнет газом;

в) курить;

г) сушить что-либо на отопительных приборах;

д) закрывать вентиляционные отверстия в электроаппаратуре

Источниками воспламенения являются:

а) искра при разряде статического электричества

б) искры от электрооборудования

в) искры от удара и трения

г) открытое пламя

7. При возникновении пожароопасной ситуации или пожара персонал должен немедленно принять необходимые меры для его ликвидации, одновременно оповестить о пожаре администрацию.

8. Помещения с электрооборудованием должны быть оснащены огнетушителями типа ОУ-2 или ОУБ-3.

Требования безопасности по окончании работы

1. После окончания работы необходимо обесточить все средства вычислительной техники и периферийное оборудование в соответствии с инструкциями по эксплуатации. В случае непрерывного производственного процесса необходимо оставить включенными только необходимое оборудование.

2. Навести порядок на рабочем месте.

3. Сотрудник, уходящий последним, должен отключить общий рубильник, выключить свет, ключ от лаборатории сдать вахтеру.

Оказание первой помощи

При поражении электрическим током пострадавший в большинстве случаев не может сам освободиться от воздействия тока из-за непроизвольного сжатия мышц, тяжелой механической травмы или потери сознания. Поэтому необходимо, прежде всего, освободить пострадавшего от действия тока. После освобождения пострадавшего от действия тока необходимо приступить к оказанию первой помощи. Если пострадавший пришел в сознание, его нужно уложить на сухую подстилку и накрыть сухой одеждой. Вызвать врача. Нельзя разрешать ему двигаться, т.к. отрицательное

действие тока может проявиться не сразу; если пострадавший без сознания, но у него устойчивое дыхание и пульс, то его необходимо удобно уложить, обеспечить приток свежего воздуха, постараться привести в сознание (брызнуть в лицо водой, поднести нашатырный спирт) и ждать врача.

Признаками наступления клинической смерти являются: отсутствие дыхания, отсутствие пульса на сонных и бедренных артериях, отсутствие реакции зрачков на свет, серый цвет кожи.

Мероприятия по оживлению проводят в следующем порядке:

1. восстанавливают проходимость дыхательных путей;
2. проводят искусственное дыхание методом “рот в рот” или “рот в нос”;
3. делают непрямой массаж сердца.

Оказывать помощь нужно до прибытия врача.