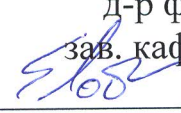


Министерство образования и науки Российской Федерации

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

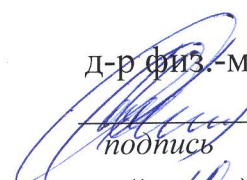
Механико-математический факультет
Кафедра теоретической механики

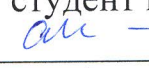
ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК
Руководитель ООП
д-р физ.-мат. наук,
зав. кафедрой ФиВМ
 Лобода Е.Л.
« 10 » июня 2016 г.

Киселева Ольга Сергеевна

ТЕОРИЯ ИНЕРЦИОННОГО ДАТЧИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание степени магистра механики
по направлению подготовки
010403-Механика и математическое моделирование

Руководитель ВКР
д-р физ.-мат. наук, профессор
 Бубенчиков А.М.
подпись
« 10 » июня 2016 г.

Автор работы
студент группы № _____
 — Киселева О.С.
подпись

Томск – 2016

Аннотация

В современном мире развитие нефтегазовой отрасли, связанное с постоянно растущим спросом на энергоносители, требует привлечения современных методов оценки и моделирования различных явлений, связанных с добычей и эксплуатацией нефтегазового оборудования. Вместе с тем, накладываются требования уменьшения стоимости разработки нефти и газа.

Работа содержит 5 глав. В первой главе приведены принципы и преимущества кориолисового расходомера перед другими методами и способами измерения. Во второй главе дано численное решение задачи распространения силовых линий стационарного магнита и влияние на них магнитного поля Земли. В третьей главе описано теоретическое Эйлера описание движения рамки расходомера. В четвертой главе решена задача данной работы, то есть найдено определяющее уравнение крутильных колебаний и рассмотрены два случая – однородной среды и пробкового режима. В пятой главе показаны результаты расчетов.

В ходе выполнения работы полученная механическая модель инерционного датчика для измерения плотности газожидкостной среды, так же как и найдено уравнение для крутильных колебаний, аналитическое и численное его решение.

Ключевые слова: нефтегазожидкостная смесь, инерционный датчик плотности, рамка расходомера, электромагниты, крутильные колебания.

Работа содержит 49 страниц, 17 рисунков, 1 приложение и список литературы из 12 наименований.

Оглавление

Введение.....	4
1. Кориолисов расходомер	7
1.1. Принцип работы кориолисова расходомера.....	7
1.2. Преимущества кориолисова расходомера	14
2. Магнитное поле около стационарного магнита	15
2.1. Численное решение задачи расчета силовых линий стационарного магнита	17
3. Эйлерово описание движения рамки расходомера.....	21
4. Момент инерции рамки относительно оси Ox	27
4.1. Действие кориолисовых сил	28
4.2 Определяющее уравнение крутильных колебаний	31
4.3 Движение однородной среды с трубками расходомера	31
4.4 Пробковый режим движения среды в трубках расходомера	34
5. Результаты расчетов.....	37
Заключение	39
Литература	40
Приложение	42

Введение

В 2013 году американская фирма Emerson заключила контракт с Томским Государственным Университетом на расчет действия массового расходомера Micro Motion. Проблема заключалась в том, что по их расчетам этот прибор мог показывать отрицательную плотность некой водо-нефтяной эмульсии.

Транспортная фирма «Emerson», США, занимающаяся доставкой нефтегазожидкостного сырья потребителю, разработала инерционный датчик измерения плотности среды. Принцип работы датчика основан на действии сил Кориолиса, отклоняющих вибрирующую трубку с движущейся в ней газожидкостной смесью. Прибор запатентован и успешно прошел испытания, а также стадию практического применения. Однако в отдельных случаях датчик показывает отрицательную плотность. Несмотря на то, что принцип работы датчика использует классический эффект проявления инерционных сил, к настоящему времени не было построено механической модели и отвечающей ей математической теории. Желание восполнить этот пробел, а главное, разобраться с причинами аномального поведения в работе прибора, побудило нас создать элементарную теорию инерционного датчика.

Реальный датчик состоит из двух одинаковых металлических трубок, в которых, как и в основной трубе, движется газожидкостная смесь. В центральной части этой системы между трубками установлены два электромагнита, которые приводят трубки в колебательное движение вокруг оси, параллельной оси трубопровода. В результате действия сил Кориолиса каждый из периферийных участков трубчатого ответвления (рамки) получает более значимые отклонения, нежели их центральные части. Эти отклонения, зависящие от плотности и скорости движения смеси в трубках, регистрируются электрической системой, в основе работы которой лежит закон электромагнитной индукции Фарадея. Поэтому механические колебания однозначным образом определяют соответствующие

электрические комбинации гармоник, расшифровка которых и позволяет найти плотность газожидкостной смеси.

В данной работе будет построена механическая модель инерционного датчика для измерения плотности газожидкостной среды. На основе теоремы о моменте количества движения для относительного движения около подвижной оси, проходящей через центр масс системы, будет получено определяющее уравнение для крутильных колебаний рамки расходомера, а так же найдены аналитическое и численное решения полученного уравнения, на базе которого оценивается влияние плотности смеси на величину амплитуды крутильных колебаний рамки.

Для упрощения ситуации мы использовали одну трубку и жесткую подставку, между которыми установили электромагниты. Кроме этого, скругленную рамку заменили кусочно-линейными участками и сделали резиновые крепления рамки с основным каналом. Но сделанные упрощения не являются принципиальными и без труда могут быть устранены при дальнейших обобщениях математической модели

Расходомеры разделяются по принципу работы и бывают следующих видов:

- перепада давления
- электромагнитные
- вихревые
- турбинные
- камерные (PD)
- ультразвуковые
- ротаметры
- термомассовые.
- кориолисовые

Нас интересуют кориолисовы расходомеры.

Кориолисовые расходомеры предназначены для прямого измерения массового расхода, плотности, температуры, вычисления объемного расхода жидкостей, газов и взвесей. Все измерения выполняются в реальном времени. Какого либо дополнительного оборудования для измерений не требуется.

1. Кориолисов расходомер

1.1. Принцип работы кориолисова расходомера.

Кориолисовый расходомер состоит из сенсора и преобразователя. Сенсор напрямую измеряет расход, плотность среды и температуру сенсорных трубок. Преобразователь конвертирует полученную с сенсора информацию в стандартные выходные сигналы.

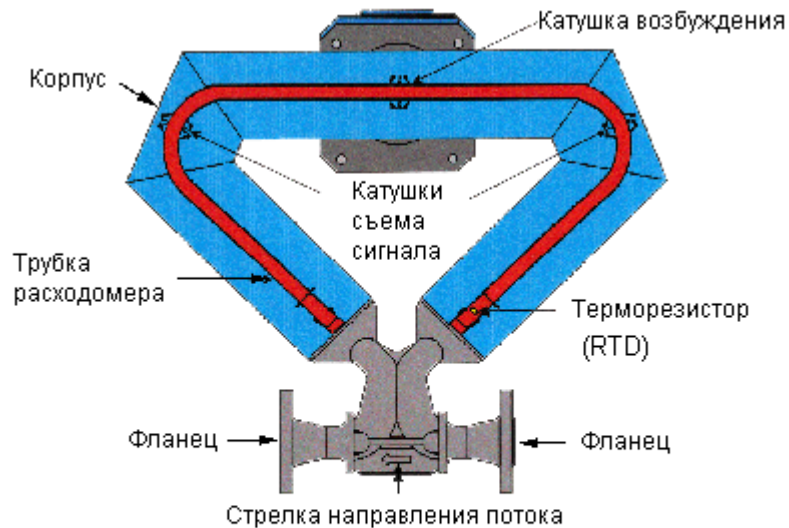


Рисунок 1 - Сенсор кориолисова расходомера с преобразователем
в виде катушек съема и возбуждения.

Измеряемая среда, поступающая в сенсор, разделяется на равные половины, протекающие через каждую из сенсорных трубок. Движение задающей катушки приводит к тому, что трубки колеблются вверх вниз в противоположном направлении друг к другу.

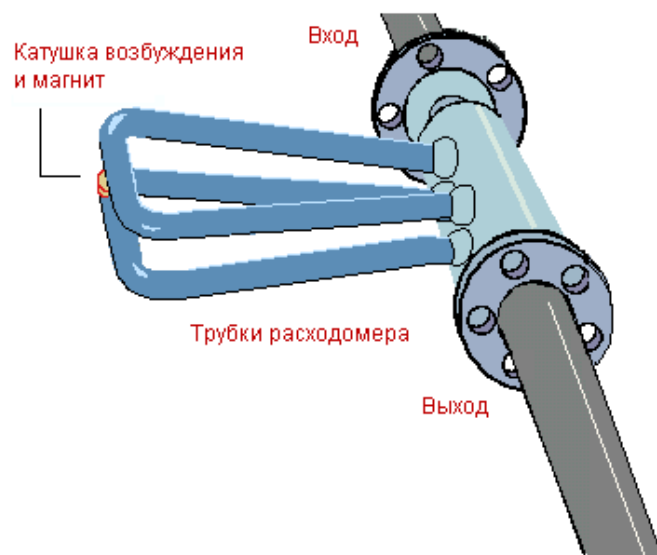


Рисунок 2 - Две рамки сенсора кориолисова расходомера

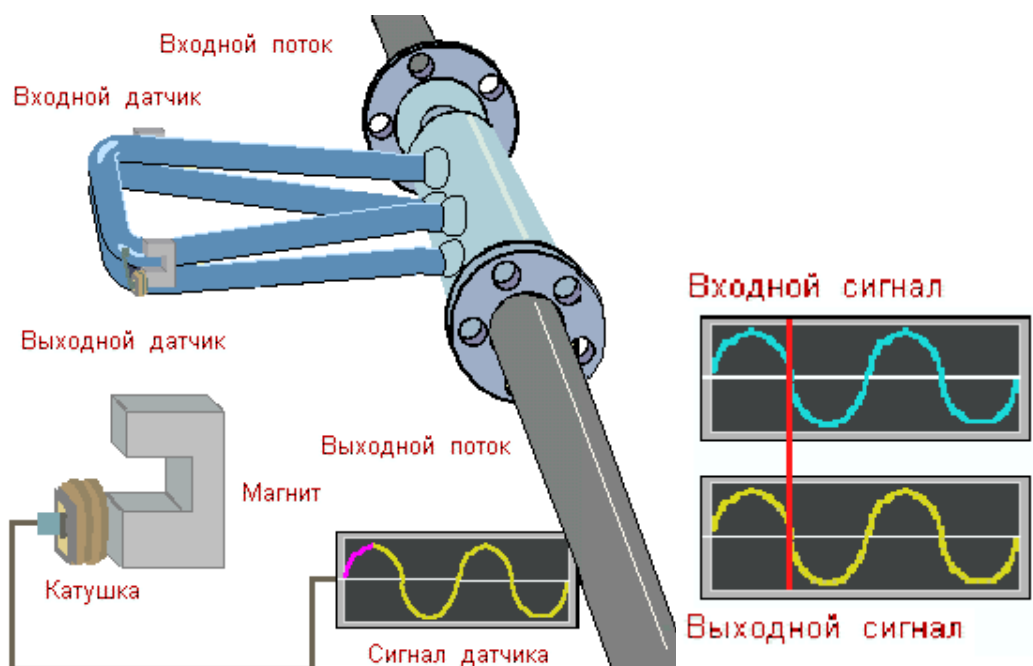


Рисунок 3 - Сенсор и принципиальная схема работы преобразователя.

Сборки магнитов и катушек соленоидов, называемые детекторами, установлены на сенсорных трубках. Катушки смонтированы на одной трубке, магниты на другой. Каждая катушка движется внутри однородного магнитного поля постоянного магнита. Сгенерированное напряжение от каждой катушки детектора имеет форму синусоидальной волны. Эти сигналы представляют собой движение одной трубки относительно другой.

Когда расход отсутствует, синусоидальные сигналы, поступающие с детекторов, находятся в одной фазе.

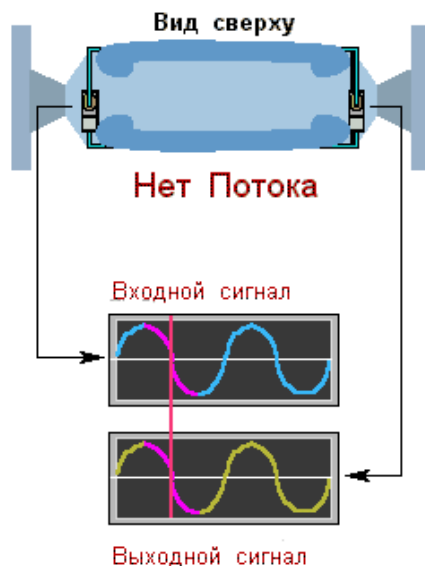


Рисунок 4 - Положение рамок сенсора, обеспечивающее синхронные электрические сигналы.

При движении измеряемой среды через сенсор проявляется физическое явление, известное как эффект Кориолиса. Поступательное движение среды в колеблющейся сенсорной трубке приводит к возникновению кориолисового ускорения, которое, в свою очередь, приводит к появлению кориолисовой силы. Эта сила направлена против движения трубки, приданного ей задающей катушкой, т.е. когда трубка движется вверх во время половины ее собственного цикла, то для жидкости, поступающей внутрь, сила Кориолиса направлена вниз. Как только жидкость проходит изгиб трубки, направление силы меняется на противоположное. Таким образом, во входной половине трубки сила, действующая со стороны жидкости, препятствует смещению трубки, а в выходной способствует. Это приводит к изгибу трубки.

Когда во второй фазе вибрационного цикла трубка движется вниз, направление изгиба меняется на противоположное.

Сила Кориолиса и, следовательно, величина изгиба сенсорной трубки прямо пропорциональны массовому расходу жидкости. Детекторы измеряют фазовый сдвиг при движении противоположных сторон сенсорной трубки.

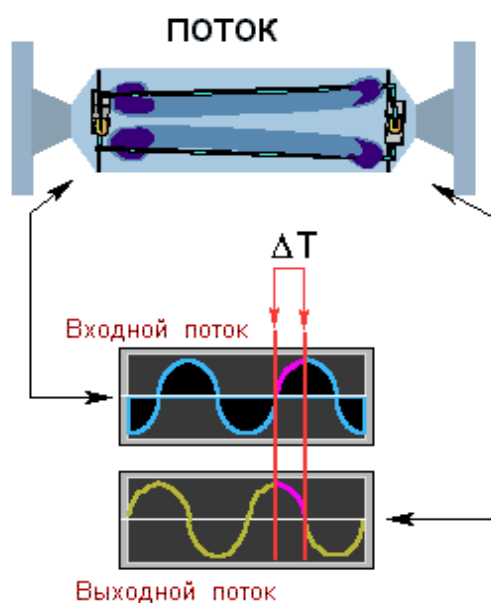


Рисунок 5 - Положение рамок, обеспечивающее фазовый сдвиг входного и выходного сигнала.

В результате изгиба сенсорных трубок на детекторах генерируются сигналы, не совпадающие по фазе, так как сигнал с входного детектора запаздывает по отношению к сигналу с выходного детектора.

Разница во времени между сигналами (ΔT) измеряется в микросекундах и прямо пропорциональна массовому расходу. Чем больше ΔT , тем больше массовый расход. Зависимость частоты колебаний трубок сенсора от плотности продукта.

Измерение плотности

Соотношение между массой и собственной частотой колебаний сенсорной трубки это основной закон измерения плотности в кориолисовых расходомерах.

В рабочем режиме задающая катушка питается от преобразователя, при этом сенсорные трубки колеблются с их собственной частотой. Как только масса измеряемой среды увеличивается, собственная частота колебаний трубок уменьшается; соответственно, при уменьшении массы измеряемой среды, собственная частота колебаний трубок увеличивается.

Частота колебаний трубок зависит от их геометрии, материала, конструкции и массы. Масса состоит из двух частей: массы самих трубок и массы измеряемой среды в трубках. Для конкретного типоразмера сенсора масса трубок постоянна. Поскольку масса измеряемой среды в трубках равна произведению плотности среды и внутреннего объема, а объем трубок является также постоянным для конкретного типоразмера, то частота колебаний трубок может быть привязана к плотности среды и определена путем измерения периода колебаний.

Частота колебаний измеряется выходным детектором в циклах в секунду (Гц). Период колебаний, как известно, обратно пропорционален частоте. Измерить время цикла легче, чем считать количество циклов, поэтому преобразователи вычисляют плотность измеряемой жидкости, используя период колебаний трубок в микросекундах. Плотность прямо пропорциональна периоду колебаний сенсорных трубок.

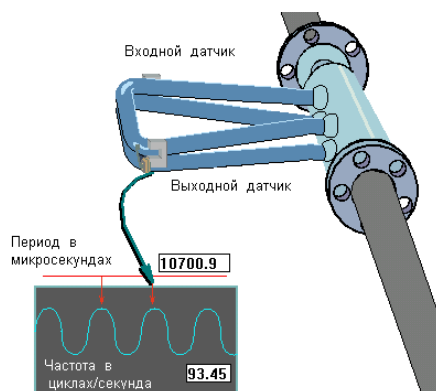


Рисунок 6 - К определению плотности инерционным измерителем

Меньше плотность – выше частота колебаний трубок сенсора

Больше плотность – ниже частота колебаний трубок сенсора

1.2. Преимущества кориолисова расходомера

- 1) Многопараметрические измерения
 - Массовый расход
 - Объемный расход
 - Плотность
 - Температура
- 2) Вычисление объемного расхода не требует дополнительного измерения давления и температуры
- 3) Состав газа/эмульсии не влияет на точность измерения
- 4) Высокая точность и повторяемость (до $\pm 0.1\%$)

Прямое измерение массового расхода обеспечивает большую точность.

- 5) Простота монтажа
 - Отсутствие прямых участков
- 6) Низкая стоимость эксплуатации

Заводская калибровка прибора по воде верна и для газа

Так же к достоинствам данного расходомера можно отнести то, что он не требует дополнительных настроек при установке, он не подвержен влияниям внешних условий таких как экстремальные погодные условия

2. Магнитное поле около стационарного магнита

Поскольку поле от стационарного магнита – это элемент в теории, определяющей работу инерционного измерителя плотности водо-нефтяной эмульсии, необходимо рассчитать распространение поля этого магнита.

Условие отсутствия магнитных зарядов в любой точке рассматриваемого объема выглядит следующим образом:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (1)$$

Здесь $\vec{B}$ – вектор магнитной индукции. Для любой среды, включая непроводящую. Справедлив закон Ампера:

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} \quad (2)$$

где $\vec{j}$ – вектор плотности тока, μ_0 – магнитная проницаемость среды. Так как в воздушном пространстве около стационарного магнита токи отсутствуют, то из (1) получаем

$$\operatorname{rot} \vec{B} = 0 \quad (3)$$

В общем случае вектор $\vec{B} = (B_x, B_y, B_z)$ имеет три компоненты. Однако по соображениям простоты рассмотрим плоскую задачу, для которой $\vec{B} = (B_x, B_y)$. Тогда условия (2) и (3) можно переписать в виде:

$$\frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial B_x}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

Если ввести в рассмотрение функцию тока: $B_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}, B_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$, то условие (4) удовлетворится автоматически, а вместо (5) получим

$$\nabla^2 \psi = 0 \quad (6)$$

где $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ – оператор Лапласа.

Осталось только поставить граничные условия для ψ на контуре магнита и на удалении l от него и решить уравнение (6). Мы поступим несколько иначе и рассмотрим одну из половин области интегрирования. Это можно сделать, поскольку задача для ψ является антисимметричной.

2.1. Численное решение задачи расчета силовых линий стационарного магнита

Пусть поперечный размер магнита будет $2b$, а его длина – $2a$. Рассекаем магнит по его оси и строим для одной из половиной области интегрирования решение задачи.

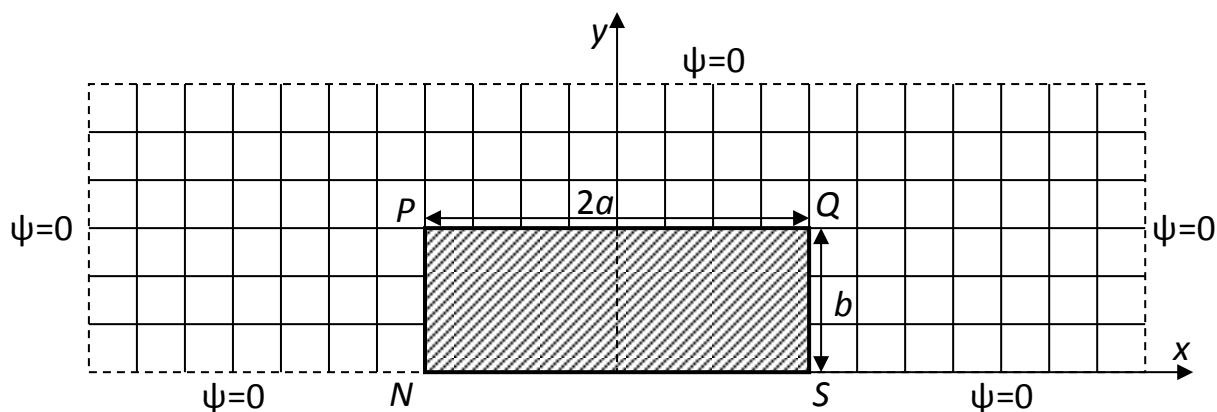


Рисунок 7 - Половина области интегрирования покрыта сеткой

На границах, показанных пунктиром, на области интегрирования ставим условие:

$$\psi = 0; \quad (7)$$

$$\text{На } NP: \psi = yB_0; \quad (8)$$

$$\text{На } PQ: \psi = bB_0; \quad (9)$$

$$\text{На } QS: \psi = yB_0; \quad (10)$$

Разностная аппроксимация уравнения (6) имеет вид:

$$\frac{\Psi_{i+1,j} - 2\Psi_{i,j} + \Psi_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{\Psi_{i,j-1} - 2\Psi_{i,j} + \Psi_{i,j+1}}{\Delta y^2} = 0, \quad (11)$$

Из (11) выражаем $\psi_{i,j}$ и получаем рекуррентную формулу для перерасчета значений функции тока во внутренних точках области интегрирования:

$$\Psi_{i,j} = \frac{\frac{\Psi_{i+1,j} + \Psi_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{\Psi_{i,j-1} + \Psi_{i,j+1}}{\Delta y^2}}{\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{2}{\Delta y^2}} \quad (12)$$

Для решения будем использовать метод Гаусса-Зейделя.

По теоретической части была составлена программа на языке программирования Pascal, магнитная индукция стационарного магнита $B_y = 10^{-5}$ Тл

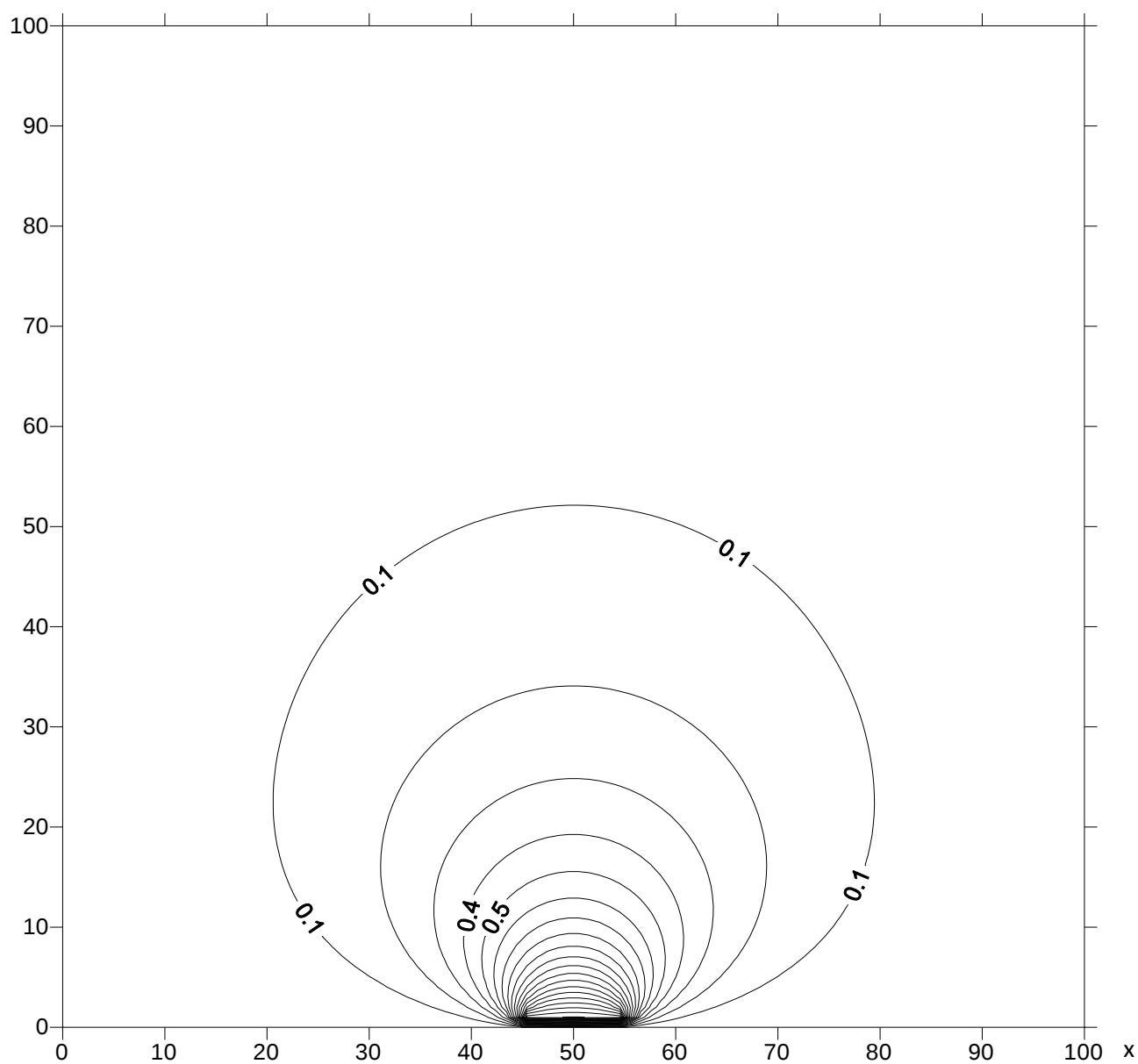


Рисунок 8 - Силовые линии плоского прямоугольного магнита.

Так же было проведено исследование, влияет ли на стационарный магнит магнитное поле Земли ($5 \cdot 10^{-5} \text{Тл}$):

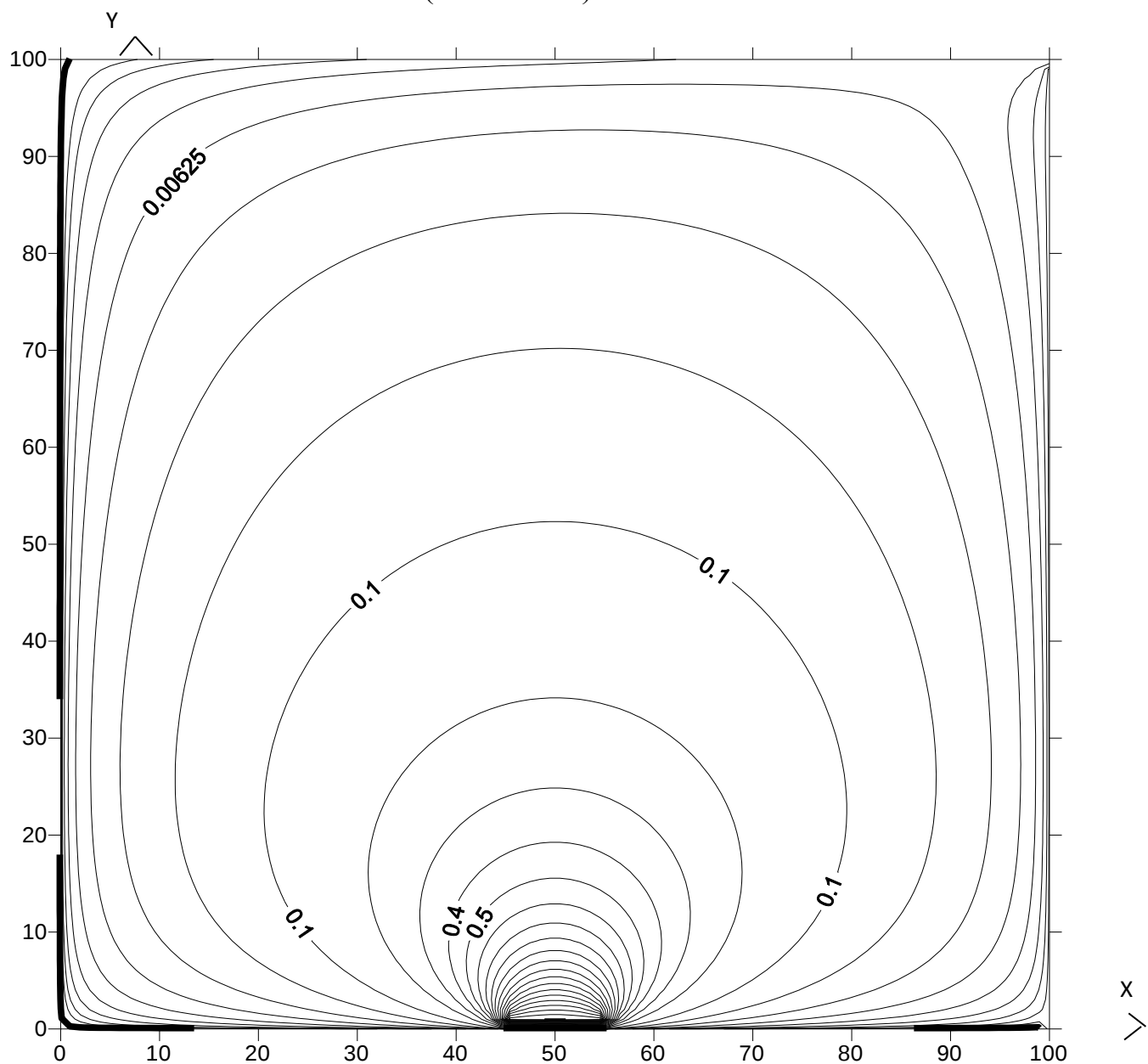


Рисунок 9 - Силовые линии стационарного прямоугольного магнита, рассчитанные с учетом влияния магнитного поля Земли

Как можно понять из сравнения 2х графиков, магнитное поле Земли практически никак не влияет на распределение силовых линий у полюсов магнита.

3. Эйлераво описание движения рамки расходомера

Следующий шаг после расчета распределения силовых линий магнита — это описание движения рамки расходомера.

Для того, чтобы определить движение рамки расходомера, будем использовать подход Эйлера, хорошо известный в классической механике, то есть будем опираться на теорему о моменте количества движения, записанную в главных осях инерции тела для центра масс, и соотношения, определяющие проекции угловой скорости тела через углы Эйлера и их производные, называемые кинематическими соотношениями Эйлера.

Самый общий вид кинематических уравнений Эйлера следующий вид:

$$\begin{cases} p = \dot{\psi} \sin \theta \sin \varphi + \dot{\theta} \cos \varphi \\ q = \dot{\psi} \sin \theta \cos \varphi - \dot{\theta} \sin \varphi \\ r = \dot{\psi} \cos \theta + \dot{\varphi} \end{cases} \quad (13)$$

Здесь p, q, r — проекции вектора угловой скорости тела на оси подвижной системы координат $Oxyz$; φ — угол собственного вращения; ψ — угол прецессии; θ — угол нутации (в соответствии с рисунком 10).

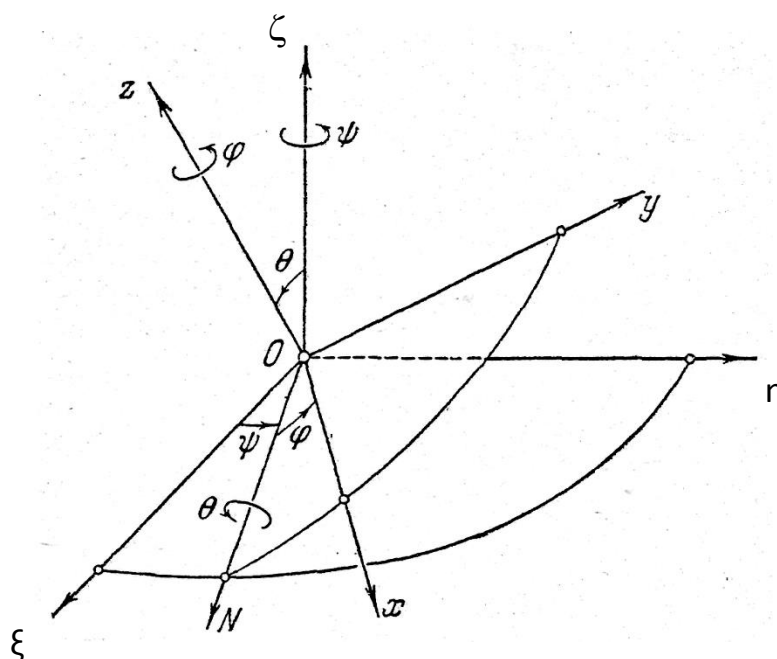


Рисунок 10 - Взаимное расположение подвижной и неподвижной систем отсчета, определяемое углами Эйлера

Динамические уравнения Эйлера в рассматриваемом случае будут иметь вид:

$$\begin{cases} A \frac{dp}{dt} + (C - B)qr = M_x^{(e)} - M_x^c \\ B \frac{dq}{dt} + (A - C)pr = M_y^{(e)} - M_y^c \\ C \frac{dr}{dt} + (B - A)pq = M_z^{(e)} - M_z^c \end{cases} \quad (14)$$

Пусть l_1 – длина левой и правой стойки рамки, l_2 – длина плеча рамки, α_0 – угол наклона стойки, a – средняя линия трапеции рамки. Пусть также ось Oz проходит через точки крепления рамки, ось Ox перпендикулярна этой оси и лежит также в плоскости рамки и одновременно является осью ее симметрии. Тогда момент инерции рамки вместе с находящейся в ней смесью жидкостей (вода и нефть) и газов (природный газ и воздух) относительно оси Ox определяется соотношением

$$A = \frac{m_2 l_2^2}{12} + 2m_1 a^2 + s \int_0^{l_1} (a + l \cos \alpha)^2 \rho_{cm} dl + s \int_{-l_2/2}^{l_2/2} l^2 \rho_{cm} dl \quad (15)$$

где m_1 – масса стойки (без среды), m_2 – масса плеча рамки, s – площадь поперечного сечения трубок рамки, ρ_{cm} – измеряемая плотность смеси.

Момент инерции рамки относительно оси Oy будет

$$B = 2m_1 \left(\frac{l_1^2}{3} + b^2 \right) + s \int_0^{l_1} \rho_{cm} (l^2 + b^2) dl + m_2 \left(\frac{l_1^2}{12} + l_1^2 \sin^2 \alpha \right) + s \int_0^{l_2} \rho_{cm} (l^2 + l_1^2 \sin^2 \alpha) dl \quad (16)$$

Наконец, момент инерции рамки относительно оси Oz будет

$$C = l_1^2 \sin^2 \alpha \left(\frac{2m_1}{3} + m_2 + \frac{2s}{l_1^2} \int_0^{l_1} l^2 \rho_{cm} dl + s \int_0^{l_1} \rho_{cm} dl \right) \quad (17)$$

Здесь b – меньшее из оснований трапеции рамки, другие обозначения прежние.

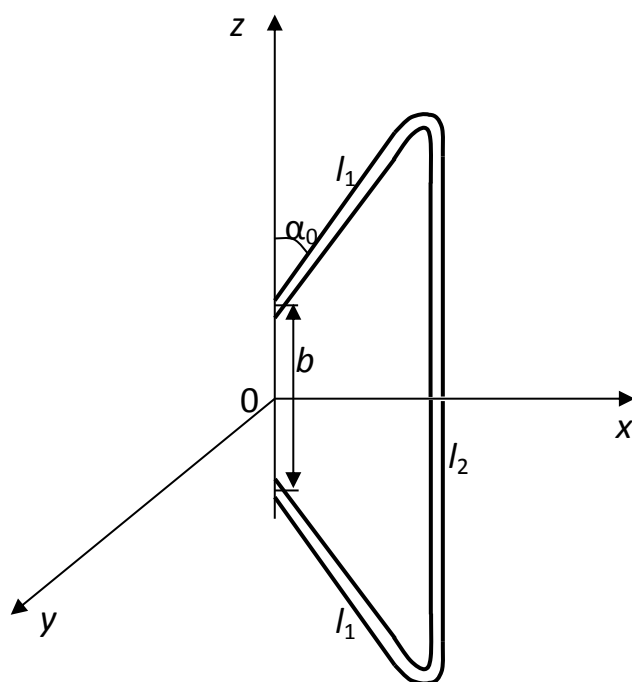


Рисунок 11 - Расположение рамки относительно подвижной системы отсчета

Теперь определим проекции момента внешних сил, стоящие в правой части (14). Момент, генерируемый силами Кориолиса:

$$M_x^{(e)} + M_x^c = -2sr\nu \int_0^L \rho_{\text{см}}(l) \cos \alpha(l) dl \quad (18)$$

Здесь L – полная длина рамки, l – координата, отсчитываемая по оси рамки,

ν – скорость смеси. По способу крепления рамки из рис. 8 видим, что

$$M_y^{(e)} = 0 \quad (19)$$

Момент, генерируемый действием электромагнитов, и вклад упругих сил определяется следующим образом

$$M_z^{(e)} + M_z^c = h\varphi(F_{\text{эм}} - ch) \quad (20)$$

где $h = l_1 \sin \alpha$, c – коэффициент жесткости эластичного материала, $F_{\text{эм}} = a \sin \omega t$.

Напомним, что мы изучаем лишь поворот рамки около своего центра масс. Это удобно сделать, введя в рассмотрение две системы координат: одну $0\xi\eta\zeta$, оси которой не меняют своей ориентации в пространстве, другую $0xyz$, жестко связанную с телом и имеющую начало также в центре масс. В данный момент времени каждая из осей подвижной системы составляет определенный угол с тремя осями неподвижной системы отсчета. Таким образом, имеется девять величин, называемых направляющими косинусами, фиксирующих положение подвижных осей относительно неподвижных.

Как известно из аналитической геометрии, декартовы координаты точек в обеих системах связаны равенствами:

$$\begin{aligned} x &= \alpha_1 \xi + \beta_1 \eta + \gamma_1 \zeta \\ y &= \alpha_2 \xi + \beta_2 \eta + \gamma_2 \zeta \end{aligned} \quad (21)$$

$$z = \alpha_3 \xi + \beta_3 \eta + \gamma_3 \zeta$$

Если для определения положения твердого тела в пространстве мы будем использовать углы Эйлера φ, ψ, θ (в соответствии с рисунком 11), то значение упомянутых выше косинусов углов будут следующими:

$$\alpha_1 = \cos \psi \cos \varphi - \sin \psi \sin \varphi \cos \theta, \alpha_2 = -\cos \psi \sin \varphi - \sin \psi \cos \varphi \cos \theta, \alpha_3 = \cos \varphi \sin \theta,$$

$$\beta_1 = \sin \psi \cos \varphi + \cos \psi \sin \varphi \cos \theta, \beta_2 = -\sin \psi \sin \varphi + \cos \psi \cos \varphi \cos \theta, \beta_3 = \sin \theta \sin \varphi,$$

$$\gamma_1 = \sin \varphi \sin \theta, \gamma_2 = \cos \varphi \sin \theta, \gamma_3 = \cos \theta \quad (22)$$

С учетом (18) – (20) уравнения Эйлера (14) можно переписать следующим образом:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{B - C}{A} qr - 2sr \nu \int_0^L \rho_{\text{см}}(l) \cos \alpha(l) dl - M_x^c \quad (23)$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{C - A}{B} pr - M_y^c \quad (24)$$

$$\frac{dr}{dt} = \frac{A - B}{C} pr + h\varphi(a \sin \omega t - ch) \quad (25)$$

Заметим, что для интегрирования уравнений (23) – (25) совместно с (13), необходимо задать следующие начальные данные:

$$\varphi(0) = \varphi_0, \psi(0) = \psi_0, \theta(0) = \theta_0 \quad (26)$$

$$p(0) = p_0, q(0) = q_0, r(0) = r_0 \quad (27)$$

Здесь $\varphi_0, \psi_0, \theta_0, p_0, q_0, r_0$ – некоторые константы.

Интегрируя уравнения (23) – (25) численно совместно с соотношениями (15) – (20), найдем $p = p(t)$, $q = q(t)$, $r = r(t)$, а также $\varphi = \varphi(t)$, $\psi = \psi(t)$, $\theta = \theta(t)$.

4. Момент инерции рамки относительно оси Ox

Для удобства подсчета момента инерции разобьем рамку, в соответствии с рисунком 12, на 5 фрагментов: 2 наклонных, 2 горизонтальных и вертикальный, но рассматривать будем три участка, остальные добавляются по симметрии. Соответственно длины этих участков будут l_1, l_2, l_3 , а массы трубок вместе со средой, в них находящейся, будут m_1, m_2, m_3 . Вертикальный фрагмент имеет момент инерции

$$A_3 = \frac{m_3 l_3^2}{12}, \quad (28)$$

каждый из горизонтальных

$$A_2 = m_2 l_2^2. \quad (29)$$

Моменты инерции наклонных фрагментов можно определить интегрированием по координате, отсчитываемой вдоль оси трубки ξ :

$$A_1 = \int_0^{l_1} z^2 dm = \tilde{\rho} \tilde{s} \int_0^{l_1} z^2 d\xi = \tilde{\rho} \tilde{s} \int_0^{l_1} (b + \xi \cos \alpha)^2 d\xi = \tilde{\rho} \tilde{s} \left(b^2 l_1 + b l_1^2 \cos \alpha + \frac{l_1^3}{3} \cos^2 \alpha \right) = m_1 \left(b^2 + b l_1 \cos \alpha + \frac{l_1^2}{3} \cos^2 \alpha \right) \quad (30)$$

Здесь $\tilde{\rho} \tilde{s} = \rho_0 s_0 + \rho s$ – масса единицы длины трубки и среды, в ней находящейся, ρ_0 – плотность материала трубки, s_0 – площадь сечения металлической части трубки, ρ – плотность газожидкостной среды, s – площадь открытого сечения, $\tilde{\rho} \tilde{s} l_1 = m_1$ – масса трубки, заполненной газожидкостной смесью, длиной l_1 .

Тогда момент инерции рамки, содержащей смесь, будет

$$A = 2A_1 + 2A_2 + A_3 = 2m_1 \left(b^2 + b l_1 \cos \alpha + \frac{l_1^2}{3} \cos^2 \alpha \right) + 2m_2 l_2^2 + \frac{m_3 l_3^2}{12} \quad (31)$$

4.1. Действие кориолисовых сил

Пусть масса среды на каждом из выделенных участков будет $m_i = \rho s l_i$. Пусть также $\bar{v}_i, (i = \overline{1,3})$ – скорость течения среды в трубках на каждом из определяющих участков рамки, а $\bar{\omega}$ – угловая скорость вращения рамки относительно оси Oz . Тогда инерционная сила Кориолиса, действующая на каждом из участков, будет

$$\bar{F}_i^C = -2m'_i \bar{\omega} \times \bar{v}_i. \quad (32)$$

В настоящей работе мы рассматриваем крутильные колебания рамки вокруг оси Ox . При этом сама рамка во все время движения находится в плоскости xOz . Поскольку вектор $\bar{\omega}$ направлен по оси Oz , а все скорости $\bar{v}_i$ лежат в плоскости xOz , то силы $\bar{F}_i^C$ будут направлены по оси Oy . Следовательно, моменты этих сил будут направлены по оси Ox . Величина каждого из моментов кориолисовых сил определится как

$$\beta_i F_i^C, (i = 1, 2).$$

Здесь β_i – плечо силы. Причем, как следует из рис. 12,

$$\beta_1 = b + \frac{l_1 \cos \alpha}{2}, \beta_2 = b + l_1 \cos \alpha. \quad (33)$$

В то же время абсолютные значения кориолисовых сил от отдельных участков рамки будут следующими:

$$F_1^C = 2\rho s l_1 \omega v \sin \alpha, F_2^C = 2\rho s l_2 \omega v, F_3^C = 0. \quad (34)$$

Поскольку рамка является симметричной относительно оси Ox , то участков действия сил Кориолиса не два, а четыре. Поэтому суммарная величина моментов от этих сил будет

$$M_x^C = 2(\beta_1 F_1 + \beta_2 F_2). \quad (35)$$

В результате действия электромагнитов, закрепленных на стойке и на рамке, ось Ox , жестко связанная с рамкой, колеблется относительно неподвижной стойки. Нас будут интересовать крутильные колебания около оси Ox , вызванные действием сил Кориолиса. Поскольку описание проводится в рамках модели абсолютно твердого тела, то рамка должна оставаться плоской во все время движения. Чтобы она оставалась таковой

при крутильных колебаниях, точки крепления рамки E и F в процессе движения должны немного смещаться. Это смещение будет тем меньше, чем более сближены эти точки. Поэтому места крепления рамки должны быть выполнены из эластичного материала, например резины. В результате имеем, что ось Oz проходит через подвижные точки крепления E и F , ось Ox – через центр масс рамки и перпендикуляр к Oz , а ось Oy дополняет их до правой тройки. Тогда уравнение крутильных колебаний рамки можно записать на основе теоремы о моменте количества движения для относительного движения около подвижной оси Ox , которая является главной центральной осью инерции рамки [36]:

$$A \frac{dp}{dt} = M_x^{(e)} - M_x^c. \quad (36)$$

Причем в качестве момента внешних сил необходимо взять момент сопротивления, пропорциональный угловой скорости p , и момент упругих сил, пропорциональный углу поворота рамки:

$$M_x^{(e)} = -fp - c\varphi. \quad (37)$$

Таким образом, окончательно система уравнений, определяющих положение рамки при ее поворотах около оси Ox будет

$$A \frac{dp}{dt} = -fp - c\varphi - 4\rho s \omega v (\beta_1 l_1 \sin \alpha + \beta_2 l_2), \quad (38)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = p. \quad (39)$$

Здесь p – угловая скорость вращения рамки относительно оси Ox . Причем угловую скорость колебаний рамки относительно оси Oz будем определять гармоническим законом, получающемся в результате действия переменного тока на катушку электромагнита

$$\omega = a \cos kt. \quad (40)$$

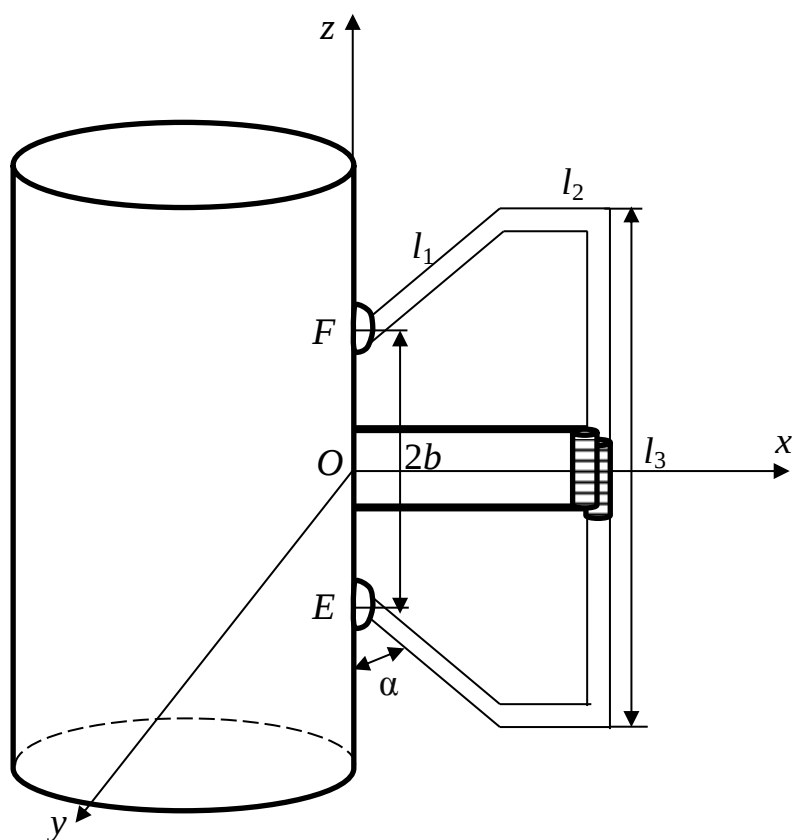


Рисунок 12 - Рамка расходомера, прикрепленная к трубе
с нефтегазожидкостной смесью

4.2 Определяющее уравнение крутильных колебаний

Систему (38), (39) запишем в виде одного уравнения

$$A\ddot{\varphi} + f\dot{\varphi} + c\varphi = -N \cos kt, \quad (41)$$

где $N = 4\rho s a v(\beta_1 l_1 \sin \alpha + \beta_2 l_2)$.

Разделим (41) на A , тогда вместо последнего уравнения можно записать:

$$\ddot{\varphi} + 2\beta\dot{\varphi} + n^2\varphi = -N_1 \cos kt. \quad (42)$$

Здесь введены обозначения:

$$\beta = \frac{1}{2} \frac{f}{A}, n^2 = \frac{c}{A}, N_1 = \frac{N}{A}. \quad (43)$$

4.3 Движение однородной среды с трубками расходомера

В случае движения однородной среды ($\rho = \text{const}$) в трубках расходомера можно получить аналитическое решение уравнения (42). Общее решение этого уравнения есть общее решение соответствующего однородного уравнения, сложенное с частным решением неоднородного. Решение же однородного уравнения будем искать в виде:

$$\varphi = \exp(\alpha t). \quad (44)$$

Подставляя это распределение в однородную часть (42) и приравнявая ее к нулю, получим характеристическое уравнение для нахождения α :

$$\alpha^2 + 2\beta\alpha + n^2 = 0, \quad (45)$$

которое имеет два корня:

$$\alpha_{1,2} = -\beta \pm \sqrt{\beta^2 - n^2}. \quad (46)$$

Датчик плотности, работающий в режиме колебаний рамки не должен терять много механической энергии во время своей работы. Другими словами, назначение прибора предполагает малые величины трения в нем. В этой связи нас будут интересовать только случаи $\beta < n$. Ограничиваясь только этим режимом, мы можем записать общее решение однородного уравнения в виде:

$$\varphi = B \exp(-\beta t) \sin(n_1 t + \varepsilon), \quad (47)$$

где B и ε – пока произвольные постоянные, $n_1 = \sqrt{\beta^2 - n^2}$.

Частное решение неоднородного уравнения определяется по виду его правой части, следовательно, оно должно быть линейной комбинацией двух гармонических волн, имеющих частоту k :

$$\varphi = C \cos kt + D \sin kt, \quad (48)$$

откуда получаем

$$\dot{\varphi} = -Ck \sin kt + Dk \cos kt,$$

$$\ddot{\varphi} = -Ck^2 \cos kt - Dk^2 \sin kt.$$

Подставляя эти распределения в (42) и приравнявая коэффициенты при $\sin kt$ и $\cos kt$ к нулю, найдем

$$C = -\frac{(n^2 - k^2)N_1}{4b^2k^2 + (n^2 - k^2)^2}, \quad D = -\frac{2bkN_1}{4b^2k^2 + (n^2 - k^2)^2}. \quad (49)$$

Таким образом, общее решение (42) есть

$$\varphi = B \exp(-\beta t) \sin(n_1 t + \varepsilon) + C \cos kt + D \sin kt. \quad (50)$$

Это решение состоит из собственного колебания (первое слагаемое) и вынужденного колебания (второе и третье слагаемые). Интересным с теоретической точки зрения и очень близким к практической ситуации является случай нулевого трения в системе, при котором $\beta = 0$, тогда для φ получаем распределение:

$$\varphi = B \sin(nt + \varepsilon) - \frac{N_1}{n^2 - k^2} \cos kt. \quad (51)$$

Здесь при стремлении частоты вынужденного колебания k к частоте собственного колебания n возможен неограниченный рост амплитуды вынужденного колебания.

Естественно, что до момента подачи тока на электромагниты рамка находилась в покое, т.е. при $t = 0$ $\dot{\varphi} = 0$. Реализуя это условие из (51), найдем, что $\varepsilon = \frac{\pi}{2}$, тогда

$$\varphi = B \cos nt - \frac{N_1}{n^2 - k^2} \cos kt. \quad (52)$$

В то же время нет никаких оснований считать рамку смещенной в начальный момент времени так, что при $t = 0$ $\varphi = 0$. Это условие, в свою очередь, позволяет определить вторую произвольную постоянную $B = \frac{N_1}{n^2 - k^2}$.

Тогда окончательно для угла поворота рамки около оси Ox найдем:

$$\varphi = \frac{N_1}{n^2 - k^2} (\cos nt - \cos kt). \quad (53)$$

Формула (53) позволяет выявить зависимость характера колебаний от геометрических характеристик рамки и найти амплитуду колебаний в зависимости от этих же параметров, а также от значений плотности смеси и от скорости ее подачи через трубки. Разлагая косинусы в (53) в ряд Тейлора и деля результат на $n^2 - k^2$, получим, что конечное выражение не будет содержать особенности в знаменателе при $k \rightarrow n$. Однако с течением времени амплитуда колебаний все равно будет неограниченно расти.

Резонансные явления, столь важные с теоретической точки зрения, в практических ситуациях являются нежелательными. Поэтому расходомер должен быть спроектирован так, чтобы ни при каких обстоятельствах не выполнялось условие $n = k$. Это легко обеспечить за счет выбора частоты колебаний электрического тока, подаваемого на катушки электромагнитов. Если же все-таки преобразователь частоты отсутствует, то имеются широкие возможности за счет выбора толщины стенок трубки, от которых зависит жесткость рамки s по отношению к поворотам около оси Ox .

4.4 Пробковый режим движения среды в трубках расходомера

Известно, что в узких трубках под действием капиллярных сил газожидкостная среда способна переходить к поршневому (пробковому) режиму движения. В дальнейшем, не вдаваясь в детали проблемы перехода от пузырькового к поршневому режиму, оценим лишь вклад уже существующего пробкового режима в работу инерционного датчика измерения плотности рассматриваемого типа. Причем для простоты примем, что размер газовых и жидких пробок является одинаковым.

Расположение пробок, чередующихся в пространстве и со временем на участке l_2 для нескольких соотношений l_p и l_2 показан на рис. 13-15.

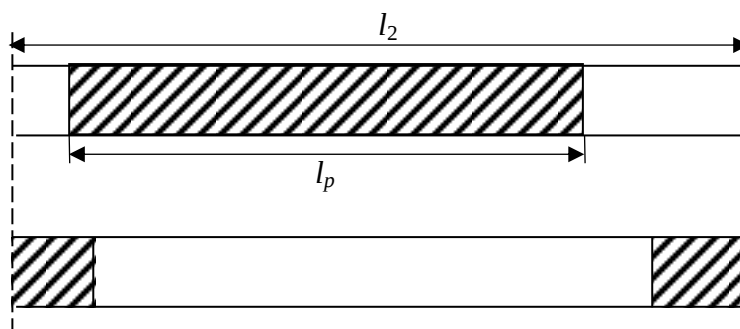


Рисунок 13 - На участке l_2 укладывается одна целая пробка

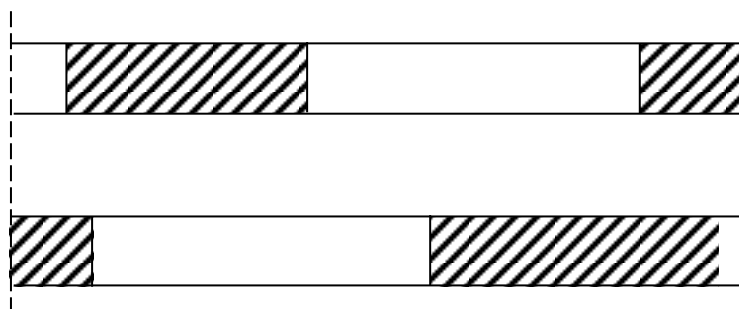


Рисунок 14 - Случай, когда на рассматриваемом участке располагаются две целые пробки различных фаз

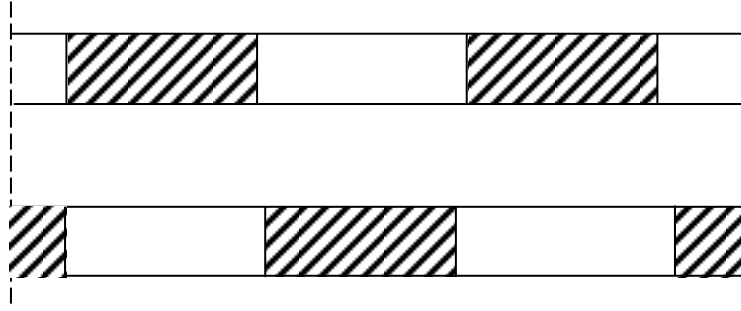


Рисунок 15 - На участке l_2 укладываются одна пробка одной из фаз и две другие – альтернативной фазы

Введем в рассмотрение две целые величины, определяемые как целые части от деления соответствующих длин на l_p :

$$z_2 = [l_2/l_p], z = [vt/l_p]. \quad (54)$$

Первая характеризует количество зон чередующейся фазы на участке l_2 , вторая – количество таких зон на участке пути $s = vt$, пройденном газожидкостной средой по бесконечно длинной трубке.

Тогда доля объема конкретной фазы в трубке длиной l_2 будет при нечетном z_2

$$\delta^+ = \frac{z_2+1}{2} \frac{l_p}{l_2}, \quad (55)$$

при четном z_2

$$\delta^+ = \frac{z_2}{2} \frac{l_p}{l_2}. \quad (56)$$

При этом во всех случаях

$$\delta^- = 1 - \delta^+. \quad (57)$$

Чередование полостей, занятых газом и жидкостью, может быть учтено по следующим формулам для локальной плотности:

$$\rho^+ = \frac{1+(-1)^z}{2} \rho_f + \frac{1-(-1)^z}{2} \rho_g, \quad (58)$$

$$\rho^- = \frac{1-(-1)^z}{2} \rho_f + \frac{1+(-1)^z}{2} \rho_g, \quad (59)$$

из которых следует, что при четном z локальные значения плотностей на входе и выходе из определяющего участка будут $\rho^+ = \rho_f$ и $\rho^- = \rho_g$, а при нечетном – наоборот.

Тогда окончательно средняя на участке l_2 плотность среды определится по формуле

$$\rho = \rho^+ \delta^+ + \rho^- \delta^-.$$

В случае, когда плотность в трубках расходомера является переменной во времени величиной, мы не можем получить аналитическое решение. Поэтому в дальнейшем решение уравнения (42) строится с использованием технологии Рунге-Кутты стандартного четвертого порядка точности.

5. Результаты расчетов

Вычисления проведены для случая $l_1 = 0,15$ м, $l_2 = 0,05$ м, $l_3 = 0,25$ м, $d = 0,01$ м, $\alpha = \pi/4$, $v = 10$ м/с, $a = \pi/20$, $s_0/s = 1/4$, $n = 5$ с⁻¹, $k = 50$ с⁻¹.

На рис. 16 аналитическим решением (53) определены два распределения: одно показано серой кривой, это случай плотности $\rho = 500$ кг/м³; второе – пунктир – $\rho = 100$ кг/м³. Третья кривая, показанная черной сплошной линией, есть пробковый режим с одинаковыми длинами газовых и жидких пробок, равными 0,05 м. В этом случае газожидкостная смесь не является однородной, и локальная плотность при движении среды меняется скачком от значения плотности жидкости $\rho_f = 999$ кг/м³ до значения плотности газа $\rho_g = 1$ кг/м³, и наоборот. При этом, однако, средняя во времени плотность составляет величину $\rho = 500$ кг/м³. Как видно из рисунка, получившееся распределение уже не имеет формы биения, поскольку в процесс крутильных колебаний рамки включилась третья частота, определенная движением пробок. Напомним, что биения отвечают режиму колебаний с двумя близкими частотами при равных амплитудах обоих колебаний.

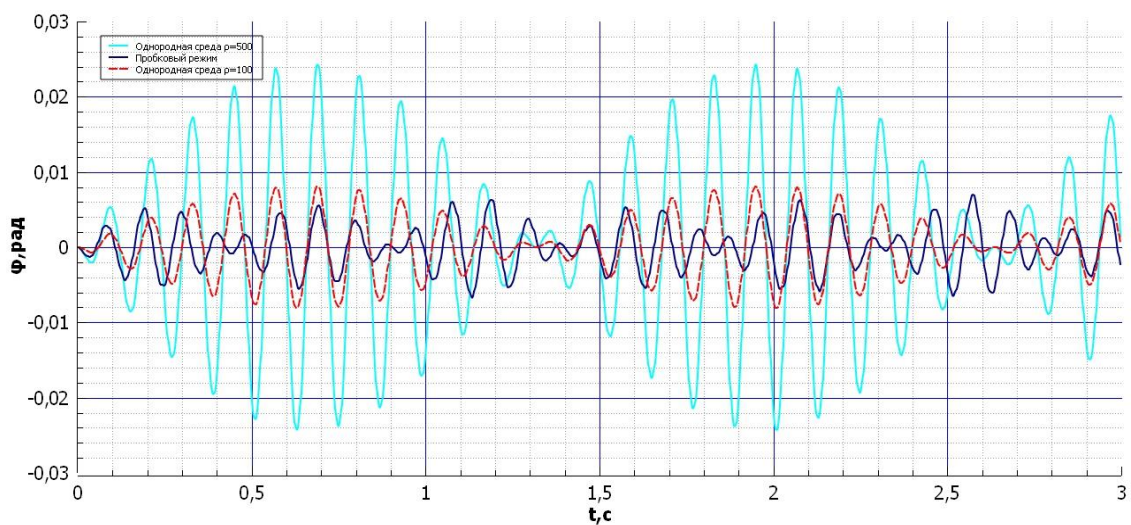


Рисунок 16 - Изменение угла крутильных колебаний со временем

Но самое примечательное в расчете варианта пробкового режима в том, что максимальная амплитуда колебаний стала меньше, чем в случае движения однородной среды с величиной плотности $\rho = 100 \text{ кг/м}^3$ (пунктир). Резкое снижение амплитуды колебаний в пробковом режиме является первой из причин, определяющих отрицательные показания плотности применяемым датчиком.

Второй причиной аномальных показаний давления является несоответствие нелинейного характера изменения амплитуды биений (сплошная линия на рис. 17) линейной шкале для ее определения (пунктирная прямая). Если двигаться по пунктирной кривой с равным шагом по амплитуде, то в области малых амплитуд мы быстро придем к отрицательной плотности.

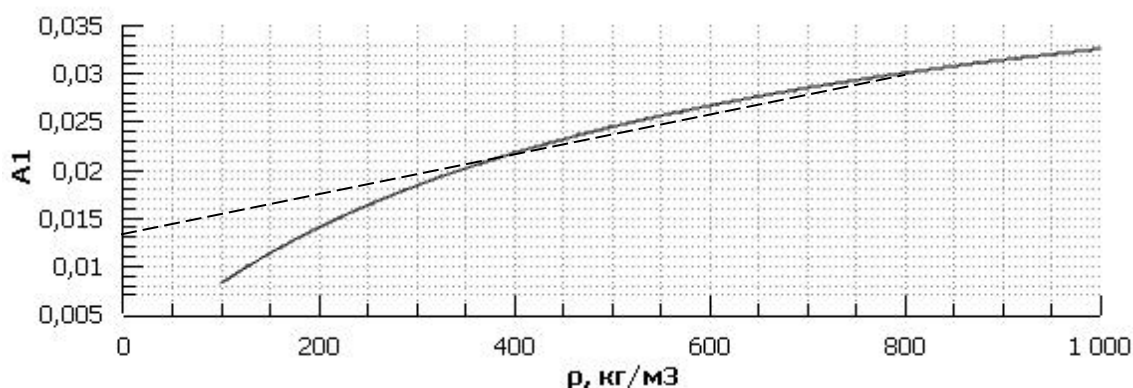


Рисунок 17 - Зависимость амплитуды биений от плотности смеси

На рис. 17 показана зависимость коэффициента $A_1 = \frac{N_1}{n^2 - k^2}$ от плотности нефтегазожидкостной смеси ρ . Как видим, характер представленной зависимости является нелинейным. При этом шкала для определения плотности по максимальной амплитуде является линейной.

Заключение

В бакалаврской работе был проведен анализ литературы и наработки ученых промышленной группы Метран по данной теме. Так же, в ходе численного решения была разработана эффективная вычислительная технология, позволяющая определять распределение силовых линий в окрестности прямоугольных магнитов как в плоском, так и пространственном случаях. Расчетами установлено, что магнитное поле Земли не сказывается на характере распределения силовых линий у полюсов магнита.

В данной работе были уточнены результаты расчетов магнитного поля в плоском случае. Так же было исследовано движение рамки кориолисового расходомера, поставлена задача движения рамки. Было найдено аналитическое решение получившегося уравнения для крутильных колебаний, на базе которого оценивается влияние плотности смеси на величину амплитуды крутильных колебаний.

Реальный датчик измерения плотности имеет две спаренные рамки, которые имеют скругленные углы. Кроме того, в местах скрепления с трубой не резиновые соединения, а сварные швы. Однако для устранения этих различий не требуется существенной модификации описанной здесь математической модели. Усовершенствования будут касаться подсчета момента инерции на скругленных участках и введения в рассмотрение недеформируемых частей рамок.

Литература

1. Лойцянский Л.Г. Курс теоретической механики / Л.Г. Лойцянский, А.И. Лурье. – М. : Изд-во ТТЛ, 1955. – 520 с.
2. Томилов Е.Д. Теоретическая механика : в 2 ч. / Е.Д. Томилов. – Томск : Изд-во ТГУ, 1966. – Ч. 1. – 304 с.; 1970. – Ч. 2. – 317 с.
3. Тананаев А.В. Течения в каналах МГД-устройств. – М. : Атомиздат, 1979. – 368 с.
4. Массовые кориолисовые расходомеры и плотномеры Micro Motion: [Электронный ресурс]: <http://www.metro.ru/> (дата обращения: 26.05.2014).
5. Khudobina J., Bubenchikov A., Bubenchikov M., Matvienko O., Libin E. Numerical Simulation of Oil Pool Boundary Evolution // Advanced Materials in Technology and Construction (AMTC-2015) : AIP Conf. Proc. 1698, 060006 (2016). Doi 10.1063/1.4937861
6. Bubenchikov A.M., Bubenchikov M.A., Potekaev A.I., Libin E.E., Khudobina Yu.P. Condensed-state physics the potential field of carbon bodies as a basis for sorption properties of barrier gas systems // Russian Physics Journal. 2015. Vol. 58, № 7. P. 882–888.
7. Bubenchikov A., Bubenchikov M., Matvienko O., Shcherbakov N. The mathematical model of the chevron-arch gearing transmitter // Advanced Materials in Technology and Construction (AMTC-2015) : AIP Conf. Proc. 1698, 060005 (2016). Doi 10.1063/1.4937860.
8. Bubenchikov A., Bubenchikov M., Matvienko O., Tarasov E., Usenko O. Simple energy barrier for component mixture of natural gases // // Advanced Materials in Technology and Construction (AMTC-2015) : AIP Conf. Proc. 1698, 060007 (2016). Doi 10.1063/1.4937862.
9. Bubenchikov M.A., Bubenchikov A.M., Usenko O.V., Ukolov A.V. Permeability of ultra-thin amorphous carbon films // EPJ Web of Conferences. 110, 01078 (2016). Doi 10.1051/epjconf/201611001077.

10. Bubenchikov M.A., Bubenchikov A.M., Usenko O.V., Tsyrenova V.B. Ability of fullerene to accumulate hydrogen // EPJ Web of Conferences. 110, 01077 (2016). Doi 10.1051/epjconf/201611001077.
11. Bubenchikov M.A., Potekaev A.I., Bubenchikov A.M., Usenko O.V., Malozemov A.V., Tarasov E.A. The interaction potential of an open nanotube and its permeability: molecular dynamics simulation // EPJ Web of Conferences. 110, 01061 (2016). Doi 10.1051/epjconf/201611001061.
12. Bubenchikov M.A., Bubenchikov A.M., Usenko O.V., Poteryaeva V.A., Jambaa S. Separation of gases using ultra-thin porous layers of monodisperse nanoparticles // EPJ Web of Conferences. 110, 01014 (2016). Doi 10.1051/epjconf/201611001014.

Приложение

```
program n2;

implicit none

real b,s,s0,m1,m2,m3,A0,c,beta1,beta2,N1,n, pi, L1, L2, L3, alpha, d, amp,
h

real fiA(1001), t(1001), fi(1001), w(1001), ncm(1001)

real w1, fi1, w2, fi2, w3, fi3, w4, fi4

real wb1, fib1, wb2, fib2, wb3, fib3, wb4, fib4

real t1, t2, t3, t4

real dl1, dl2

real rog, rof, ro, ro1, ro2

integer i, np, ro0, v, k, nc

pi=3.14

L1=0.0

L2=0.05

L3=0.25

alpha=pi/4

d=0.01

amp=pi/20

k=50 !Частота эл. маг. колебаний

v=5
```

$$rog = 1.0$$

$$rof = 1000.0$$

$$ro=500$$

$$ro0=2000$$

$$np=1000$$

$$h=3.0/np \text{ !шаг по времени}$$

$$b=L3/2.0-L1*\cos(\alpha)$$

$$s=\pi*d*d/4.0$$

$$s0=s/4.0$$

$$\beta_1=b+((L1*\cos(\alpha))/2.0)$$

$$\beta_2=b+((L1*\cos(\alpha)))$$

$$m1=(ro0*s0+ro*s)*L1$$

$$m2=(ro0*s0+ro*s)*L2$$

$$m3=(ro0*s0+ro*s)*L3$$

$$A0=2.0*m1*(b*b+b*L1*\cos(\alpha)+((L1*L1)/3.0)*(\cos(\alpha)*\cos(\alpha)))+2.0*m2*L2*L2+(m3*L3*L3)/12.0$$

$$c=1.2*A0*k*k$$

$$n=\sqrt{c/A0}$$

$$N1=(4.0*ro*amp*v*s*(\beta_1*L1*\sin(\alpha)+\beta_2*L2))/A0;$$

!начальные условия для численного решения

$$w(1) = 0.0$$

$$fi(1) = 0.0$$

$$t(1) = 0.0$$

do i=1,np

$$t(i)=i*h$$

$$fiA(i)=(N1/(n*n-k*k))*(\cos(n*t(i))-\cos(k*t(i)))$$

end do

do i=1,np

$$t1 = t(i)$$

$$nc = v*t1/L2$$

$$ro1 = rof*(1.0 + (-1.0)**nc)/2.0 + rog*(1.0 - (-1.0)**nc)/2.0$$

$$ro2 = rof*(1.0 - (-1.0)**nc)/2.0 + rog*(1.0 + (-1.0)**nc)/2.0$$

$$dl1 = (v*t1 - nc*L2)/L2$$

$$dl2 = 1 - dl1$$

$$ro = ro1*dl1 + ro2*dl2$$

$$m1=(ro0*s0+ro*s)*L1$$

$$m2=(ro0*s0+ro*s)*L2$$

$$m3=(ro0*s0+ro*s)*L3$$

$$A0=2.0*m1*(b*b+b*L1*cos(alpha)+((L1*L1)/3.0)*(cos(alpha)*cos(alpha)))+2.0*m2*L2*L2+(m3*L3*L3)/12.0$$

$$N1=(4.0*ro*amp*v*s*(beta1*L1*sin(alpha)+beta2*L2))/A0;$$

$$w1 = w(i)$$

$$fi1 = fi(i)$$

$$wb1 = -(c/A0)*fi1-N1*cos(k*t1)$$

$$fib1 = w1$$

$$t2 = t1 + h/2.0$$

$$nc = v*t2/L2$$

$$ro1 = rof*(1.0 + (-1.0)**nc)/2.0 + rog*(1.0 - (-1.0)**nc)/2.0$$

$$ro2 = rof*(1.0 - (-1.0)**nc)/2.0 + rog*(1.0 + (-1.0)**nc)/2.0$$

$$dl1 = (v*t2 - nc*L2)/L2$$

$$dl2 = 1 - dl1$$

$$ro = ro1*dl1 + ro2*dl2$$

$$m1=(ro0*s0+ro*s)*L1$$

$$m2=(ro0*s0+ro*s)*L2$$

$$m3=(ro0*s0+ro*s)*L3$$

$$A0=2.0*m1*(b*b+b*L1*cos(alpha)+((L1*L1)/3.0)*(cos(alpha)*cos(alpha)))+2.0*m2*L2*L2+(m3*L3*L3)/12.0$$

$$N1=(4.0*ro*amp*v*s*(beta1*L1*sin(alpha)+beta2*L2))/A0;$$

$$w2 = w1+wb1*h/2.0$$

$$fi2 = fi1+fib1*h/2.0$$

$$wb2 = -(c/A0)*fi2-N1*cos(k*t2)$$

$$fib2 = w2$$

$$t3 = t1 + h/2.0$$

$$nc = v*t3/L2$$

$$ro1 = rof*(1.0 + (-1.0)**nc)/2.0 + rog*(1.0 - (-1.0)**nc)/2.0$$

$$ro2 = rof*(1.0 - (-1.0)**nc)/2.0 + rog*(1.0 + (-1.0)**nc)/2.0$$

$$dl1 = (v*t3 - nc*L2)/L2$$

$$dl2 = 1 - dl1$$

$$ro = ro1*dl1 + ro2*dl2$$

$$m1=(ro0*s0+ro*s)*L1$$

$$m2=(ro0*s0+ro*s)*L2$$

$$m3=(ro0*s0+ro*s)*L3$$

$$A0=2.0*m1*(b*b+b*L1*cos(alpha)+((L1*L1)/3.0)*(cos(alpha)*cos(alpha)))+2.0*m2*L2*L2+(m3*L3*L3)/12.0$$

$$N1=(4.0*ro*amp*v*s*(beta1*L1*sin(alpha)+beta2*L2))/A0;$$

$$w3 = w1+wb2*h/2.0$$

$$fi3 = fi1+fib2*h/2.0$$

$$wb3 = -(c/A0)*fi3-N1*cos(k*t3)$$

$$fib3 = w3$$

$$t4 = t1 + h$$

$$nc = v*t4/L2$$

$$ro1 = rof*(1.0 + (-1.0)**nc)/2.0 + rog*(1.0 - (-1.0)**nc)/2.0$$

$$ro2 = rof*(1.0 - (-1.0)**nc)/2.0 + rog*(1.0 + (-1.0)**nc)/2.0$$

$$dl1 = (v*t4 - nc*L2)/L2$$

$$dl2 = 1 - dl1$$

$$ro = ro1*dl1 + ro2*dl2$$

$$m1=(ro0*s0+ro*s)*L1$$

$$m2=(ro0*s0+ro*s)*L2$$

$$m3=(ro0*s0+ro*s)*L3$$

$$A0=2.0*m1*(b*b+b*L1*cos(alpha)+((L1*L1)/3.0)*(cos(alpha)*cos(alpha)))+2.0*m2*L2*L2+(m3*L3*L3)/12.0$$

$$N1=(4.0*ro*amp*v*s*(beta1*L1*sin(alpha)+beta2*L2))/A0;$$

$$w4 = w1+wb3*h$$

$$fi4 = fi1+fib3*h$$

$$wb4 = -(c/A0)*fi4-N1*cos(k*t4)$$

$$fib4 = w4$$

$$ncm(i) = ro$$

$$w(i+1) = w(i) + (wb1+2.0*wb2+2.0*wb3+wb4)*h/6.0$$

$$fi(i+1) = fi(i) + (fib1+2.0*fib2+2.0*fib3+fib4)*h/6.0$$

end do

open(1, file = 'FiA.txt')

do i = 1,np

write(1,*) fiA(i)

end do

open(1, file = 'Fi.txt')

```
do i = 1,np

    write(1,*) fi(i)

end do


open(1, file = 'W.txt')

do i = 1,np

    write(1,*) w(i)

end do


open(1, file = 't.txt')

do i = 1,np

    write(1,*) t(i)

end do


open(1, file = 'ncm.txt')

do i = 1,np

    write(1,*) ncm(i)

end do

end program
```



Введите текст:

...или загрузите файл:

Файл не выбран...

Выбрать файл...

Укажите год публикации:

2016 ▼

Выберите коллекции

Все

Рефераты

Авторефераты

Иностранные конференции

Википедия

Российские конференции

Иностранные журналы

Российские журналы

Энциклопедии

Англоязычная википедия

Анализировать

Обработан файл:

Диплом магистратура.docx.

Год публикации: 2016.

Оценка оригинальности документа - 96.61%

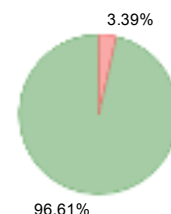
Процент условно корректных заимствований - 0.0%

Процент некорректных заимствований - 3.39%

Просмотр заимствований в документе

Время выполнения: 25 с.

Документы из базы



Источники заимствования

В списке литературы

Источники
Заимствования

1. ОБ ИДЕАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЯХ НАНОТРУБОК В ЕСТЕСТВЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ (<http://cyberleninka.ru/article/n/ob-idealnyh-kolebaniyah-nanotrubok-v-estestvennom-magnitnom-pole>)

Авторы: БУБЕНЧИКОВ МИХАИЛ АЛЕКСЕЕВИЧ.

Год публикации: 2010. Тип публикации: статья научного журнала.

<http://cyberleninka.ru/article/n/ob-idealnyh-kolebaniyah-nanotrubok-v-estestvennom-magnitnom-pole> (<http://cyberleninka.ru/article/n/ob-idealnyh-kolebaniyah-nanotrubok-v-estestvennom-magnitnom-pole>)
[Показать заимствования \(6\)](#)

2.85%

2. Реферат: Рекомендации по установке 24 Вывод 26 (<http://www.bestreferat.ru/files/15/bestreferat-401015.docx>)

Год публикации: 2015. Тип публикации: реферат.

<http://www.bestreferat.ru/files/15/bestreferat-401015.docx>
<http://www.bestreferat.ru/files/15/bestreferat-401015.docx>
[Показать заимствования \(2\)](#)

0.54%

[Значимые оригинальные фрагменты](#)[Библиографические ссылки](#)[Искать в Интернете](#)

Дополнительно

