

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

Аэрокосмический факультет
Кафедра «Техническая механика»
Направление 15.04.03 «Прикладная механика»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, к.ф.-м.н.

_____ (А.В. Жестков)
_____ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____ С.Б.Сапожников
_____ 2017 г.

Разработка упрощенной динамической модели измерительной части кориолисового
расходомера с учетом воздействия однородной текущей среды

наименование темы

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)
ЮУрГУ–15.04.03.2017.009 ПЗ ВКР

Руководитель проекта, к.т.н., доцент

_____ (П.А. Тараненко)
_____ 2017 г.

Автор проекта

студент группы П-235
_____ (Д. В. Телегин)
_____ 2017 г.

Нормоконтролёр, к.т.н., доцент

_____ (Ю.Н. Ребяков)
_____ 2017 г.

Челябинск 2017

Содержание

1. Введение.....	4
2. Обзор литературы.....	6
3. Разработка расчетной и экспериментальной модели расходомера	23
3.1 Аналитический расчет колебаний трубы с протекающей по ней жидкостью.....	23
3.1.1 Использование конечноэлементной модели для определения собственных форм и собственных частот системы.....	31
3.1.2 Решение задачи о колебаниях деформируемой трубы с текущей жидкостью в нестационарной постановке.....	40
3.2 Анализ динамики расходомера с помощью экспериментальных передаточных функций.....	46
3.2.1 Получение отклика системы с помощью обратного преобразования Лапласа	60
4. Выводы.....	63
Список литературы	65

<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>

ЮУрГУ – 15.04.03.2017.009 ПЗ ВКР

Лист

3

1. Введение

Основной особенностью работы кориолисового расходомера (схема конструкции изображена на рисунке 1) является возбуждение в трубках изгибных колебаний по первой собственной форме. Рабочая частота совпадает с одной из собственных частот колебаний трубок (первая изгибная форма колебаний трубок из плоскости xu), что позволяет минимизировать значение возбуждающего усилия.

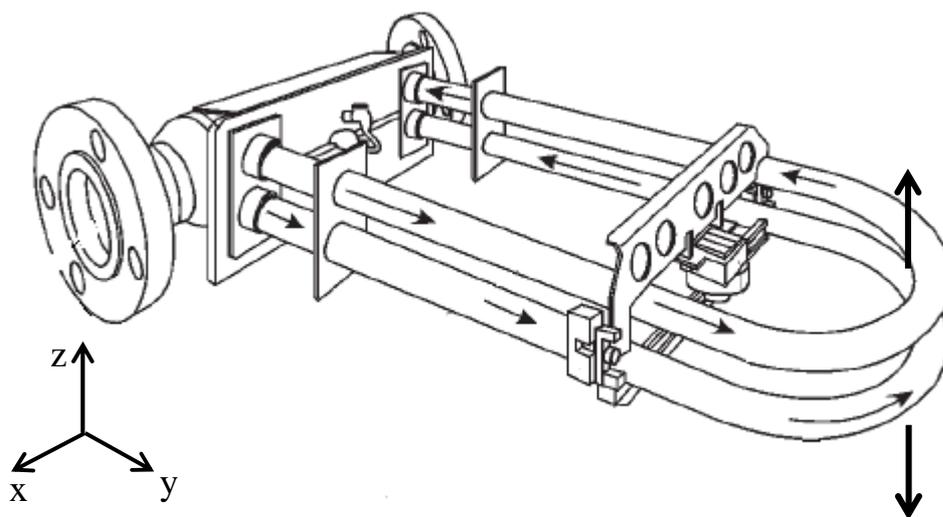


Рисунок 1 – Схема конструкции кориолисового расходомера

Форма колебаний трубок на рабочей частоте является симметричной. При изгибных колебаниях в трубке с текущей по ней жидкостью возникают кориолисовы силы инерции, которые возбуждают кососимметричную форму колебаний. Появление дополнительной системы сил проявляется в возникновении фазового сдвига, который можно обнаружить путем непрерывного измерения колебаний в двух точках конструкции. Величина массового расхода жидкости или газа, протекающего через измерительные трубки расходомера, пропорциональна значению разности фаз между двумя измерительными точками. Принцип работы кориолисового расходомера изображен на рисунке 2.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 15.04.03.2017.009 ПЗ ВКР

Лист

4

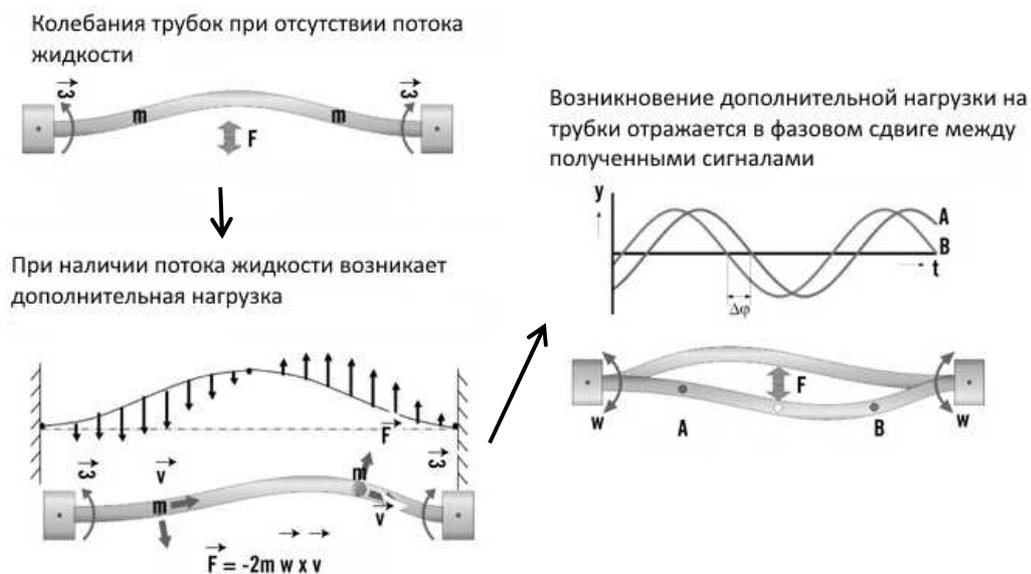


Рисунок 2 – Принцип работы кориолисового расходомера

Для возбуждения колебаний и измерения расхода в расходомере используют постоянные магниты и катушки, попарно установленные на противоположных трубках. Определение расхода производится по изменению ЭДС в измерительных катушках.

В реальных условиях эксплуатации кориолисовых расходомеров существует множество факторов, влияющих на точность измерения расхода, таких как, например, несимметричность геометрии измерительных трубок, несимметричность положения измерительных катушек, тип закрепления расходомера на трубопроводе и т.п.

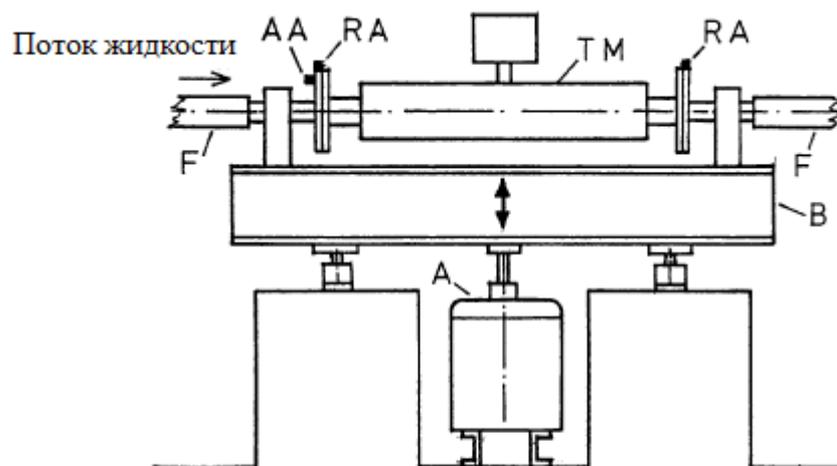
Таким образом, необходимо оценить влияние разных форм колебаний, проявляющихся на рабочей частоте, и разработать рекомендации по усовершенствованию имеющейся конструкции расходомера.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

2. Обзор литературы

Ввиду восприимчивости кориолисовых расходомеров к внешним колебаниям были проведены исследования влияния внешних колебаний на точность измерения в работе [1]. Для этого были проведены эксперименты на кориолисовых расходомерах восьми моделей.

Схема эксперимента следующая (рисунок 3): изучаемый расходомер устанавливался на жесткое основание в вертикальном или горизонтальном направлениях. Далее к расходомеру присоединялись гибкие трубы. На каждый фланец расходомера устанавливался акселерометр, направленный в сторону действия колебаний привода основания, и один расходомер был установлен на фланец в направлении оси труб. В ходе эксперимента на основании возбуждались колебания и замерялись виброускорения на установленных акселерометрах.



**А: Привод, В: Балка, АА: Осевой акселерометр,
РА: Радиальный акселерометр, F: Гибкая труба,
ТМ: Изучаемый расходомер**

Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 15.04.03.2017.009 ПЗ ВКР

Лист

6

В статье [11] описываются различные вопросы, связанные с обеспечением работы кориолисовых расходомеров при протекании двухфазного потока. При измерении расхода двухфазного потока (особенно в случае смеси жидкости с газом) расходомеры испытывают ряд проблем, таких как, например, проявление значительных погрешностей измерения и снижение амплитуды колебаний измерительных трубок.

Решение этих проблем заключается в следующем:

1. Выбор геометрии измерительных трубок. Они могут быть прямыми, что позволяет сделать расходомер компактным и снижает потери давления потока, но рабочая частота таких расходомеров высока, а амплитуда колебаний низкая, что дает БОльшие погрешности измерения. Или трубки могут быть изогнутыми, что дает меньшую погрешность измерения ввиду увеличенной частоты колебаний.

2. Использовать одну измерительную трубку или две. Разделение потока может отрицательно сказаться на конструкции расходомера, т.к. в местах разделения потока может возникнуть кавитация.

3. Добавление в конструкцию расходомера дополнительного привода, что дает увеличение амплитуды колебаний трубок.

Также в статье рассматриваются вопросы работы расходомера при его наполнении и опорожнении.

В работе [12] рассматривается система измерения массового расхода трехфазного потока (нефть-газ-вода), состоящая из кориолисового расходомера и датчика обводненности (рисунок 4).

					<i>ЮУрГУ – 15.04.03.2017.009 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		9

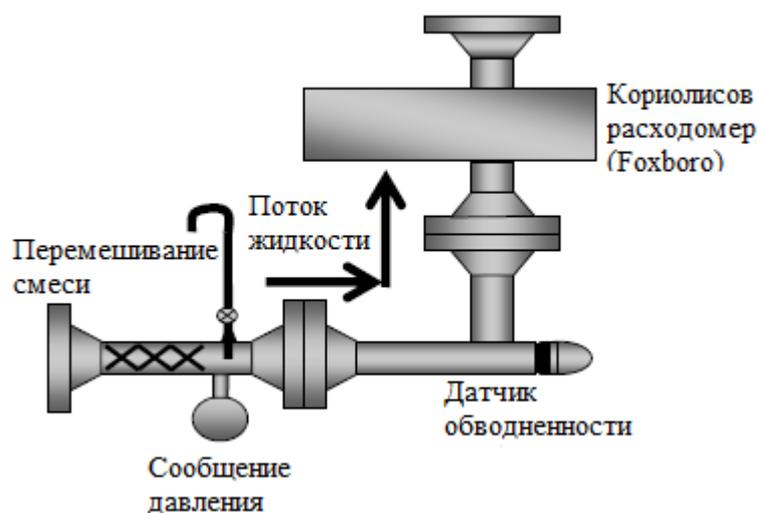


Рисунок 4 – Схема измерительной системы

При измерении двухфазных потоков (например, состоящих из воды и газа) данных, получаемых от кориолисовых расходомеров, достаточно для точного определения массового расхода жидкости при условии использования моделей коррекции погрешностей измерения. При наличии третьей фазы в потоке, данных только от одного расходомера не хватает, поэтому дополнительно устанавливается датчик обводненности. В свою очередь, датчик предоставляет дополнительные данные с некоторой долей погрешности, которая зависит от количества газа в жидкости. Поэтому для такой системы необходим новый алгоритм коррекции данных измерений, например, использование двух нейронных сетей, которые используют свою модель погрешностей и взаимодействуют между собой (рисунок 5).

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 15.04.03.2017.009 ПЗ ВКР

Лист

10

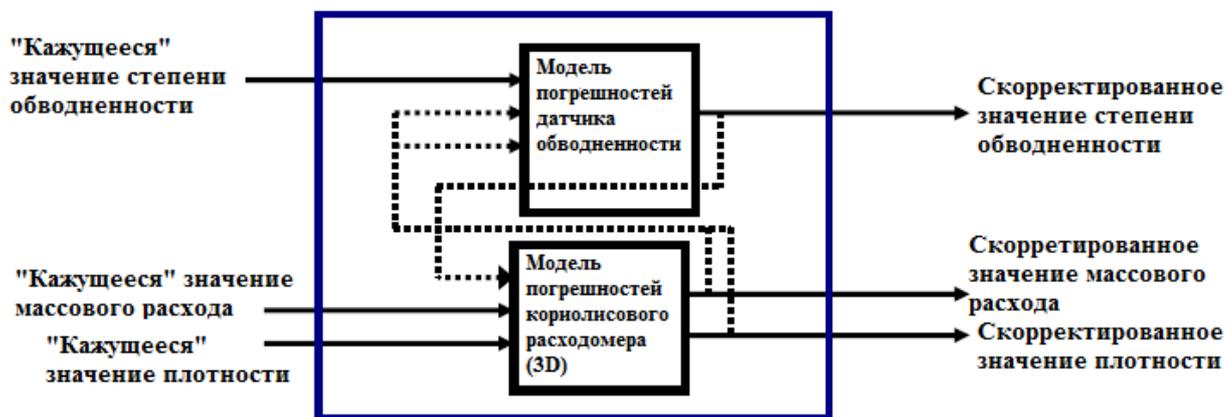


Рисунок 5 – Схема коррекции измеренных данных

В [13] были обсуждены вопросы о численном анализе кориолисовых расходомеров методом конечноэлементного моделирования, а также сравнили результаты анализа с результатами экспериментов. Было отмечено, что при моделировании важно учесть условия осевого растяжения.

В статье [14] был использован пакет конечноэлементного моделирования с возможностью учета взаимодействия между жидкостью и конструкцией для оценки особенностей поведения кориолисового расходомера в форме прямой трубы с зажатыми концами. Результаты расчетов хорошо совпали с экспериментальными данными. Однако, автор заметил, что процедуры расчета пока еще несовершенны.

Метод конечноэлементного моделирования был также использован в [15] для интегрирования уравнений движения при передаче движения жидкости балкой Тимошенко. Были получены матрицы масс жесткостей и демпфирования и смоделированы кориолисовы расходомеры с тремя изогнутыми трубками. Полученные результаты хорошо совпали с экспериментальными данными, а также показали, что конечноэлементный метод позволяет довольно точно моделировать работу кориолисовых расходомеров.

Изм.	Лист	№докум.	Подпись	Дата

измерения расхода с использованием сепараторов (разность измеренных результатов порой доходила до 8,7%).

В работе [21] описаны некоторые эффекты, влияющие на точность измерения расхода кориолисовым расходомером (ориентация расходомера в пространстве (рисунки 6 и 7), геометрия измерительных трубок, свойства жидкости и др.).

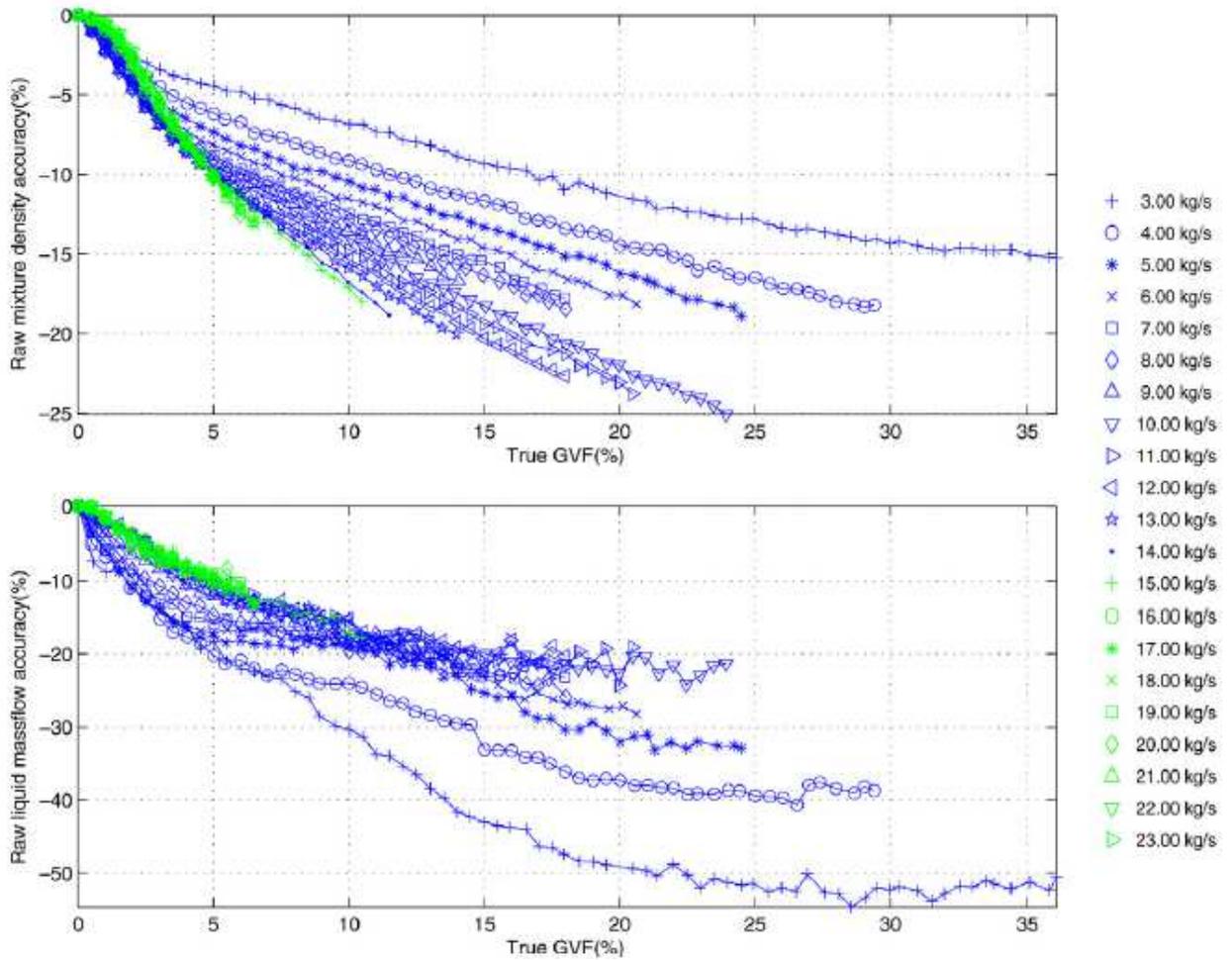


Рисунок 6 – Точность измерения расходомера при его вертикальном расположении

Изм.	Лист	№докум.	Подпись	Дата

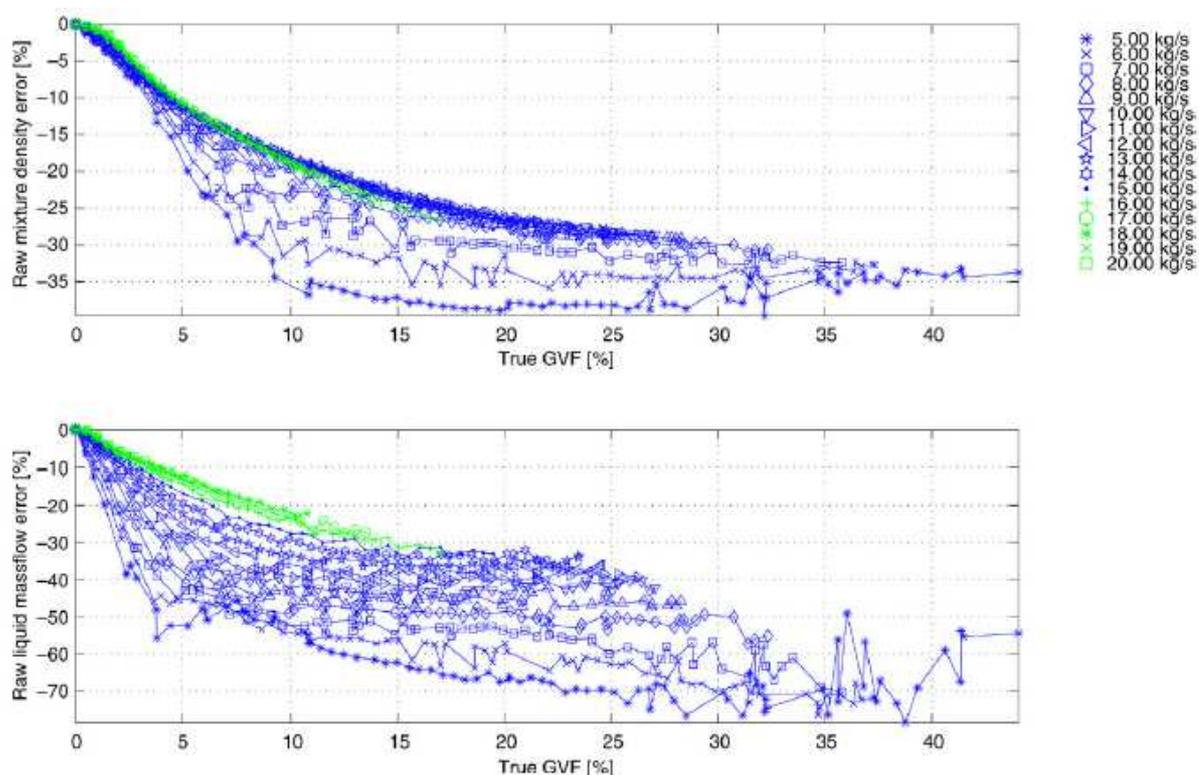


Рисунок 7 – Точность измерения расходомера при его горизонтальном расположении

Основная цель работы – разработка модели погрешностей применительно для измерения расхода тяжелой нефти. Для этого были проведены тесты в Национальной Инженерной Лаборатории в Великобритании.

Следующим этапом после разработки модели были полевые испытания системы измерения нефти в Венесуэле.

В статье [22] представлена аэроупругая модель кориолисового расходомера, с помощью которой можно оценивать влияние наличия газа в потоке на работу кориолисового расходомера. Данная модель создана с допущениями: газ должен быть хорошо перемешан в жидкости, содержание которого должно быть не более 10%. Также модель включает эффекты влияния сжимаемости и негомогенности. Такая модель может быть

Изм.	Лист	№докум.	Подпись	Дата

применена для вязких жидкостей, таких как, например, тяжелая нефть, цемент, суспензия целлюлозы.

Результаты расчетов показали, что при увеличении параметра сниженной частоты (которая определяется отношением произведения первой собственной частоты изгибных колебаний трубок расходомера к скорости звука на диаметр трубки к скорости звука жидкости) увеличиваются ошибки измерения расхода и плотности.

Изучается колебательное движение частиц и пузырьков в трубе в статье [23]. Исследования проводились на трубе, содержащей жидкость с пузырьком. Труба устанавливалась вертикально на вибростенд и подвергалась колебаниям в горизонтальной плоскости (рисунок 8).

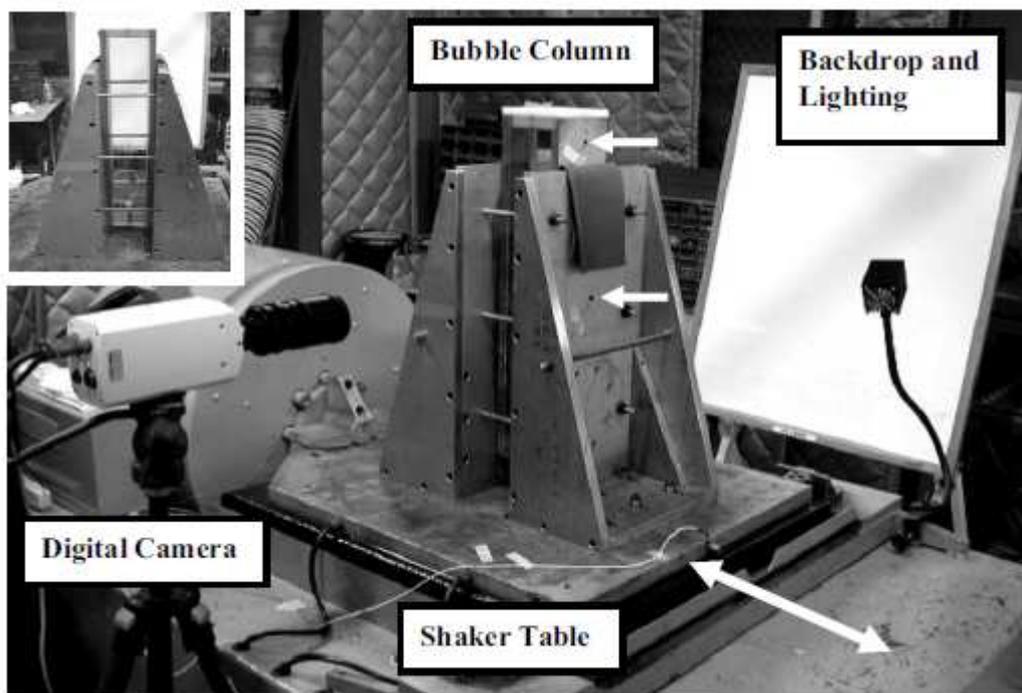


Рисунок 8 – Фотография экспериментальной установки

Результаты эксперимента сравнивались с аналитическим расчетом и в целом оказались идентичны (средняя погрешность – 1%, максимальная – 6%). Результаты эксперимента в дальнейшем могут быть применены для анализа протекания многофазных потоков в кориолисовых расходомеров.

Изм.	Лист	№докум.	Подпись	Дата

В статье [24] рассматривается пример использования кориолисового расходомера для измерения расхода топлива при бункеровке морских судов. Кориолисовый расходомер входит в специальный комплекс, устанавливаемый на бункеровщик и легко демонтируемый для калибровки (рисунок 9).



Рисунок 9 – Измерительная система, установленная на борту бункеровщика

Сначала на расходомере проводились тесты по измерению расхода разных видов топлива (тяжелое и легкое) с содержанием воздуха и без него. Результаты для измерения массового расхода однофазного потока имели погрешность 0,15% для диапазона расхода от 40 до 140 кг/с. Для измерения двухфазного потока в диапазоне содержания газ от 1% до 30% погрешности измерения не превысили 3%.

Изм.	Лист	№докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 15.04.03.2017.009 ПЗ ВКР

Лист

16

Далее комплекс был установлен на борт бункеровщика и испытывался в условиях реальной эксплуатации.

В [25] представлена система для измерения массового расхода многофазных потоков, имеющую в своем составе кориолисовый расходомер (рисунок 10). Для дополнительного уточнения данных измерения в системе установлен датчик обводненности. Также приведены экспериментальные данные об ошибках измерения плотности и массового расхода при различных степенях обводненности (рисунки 11 и 12).

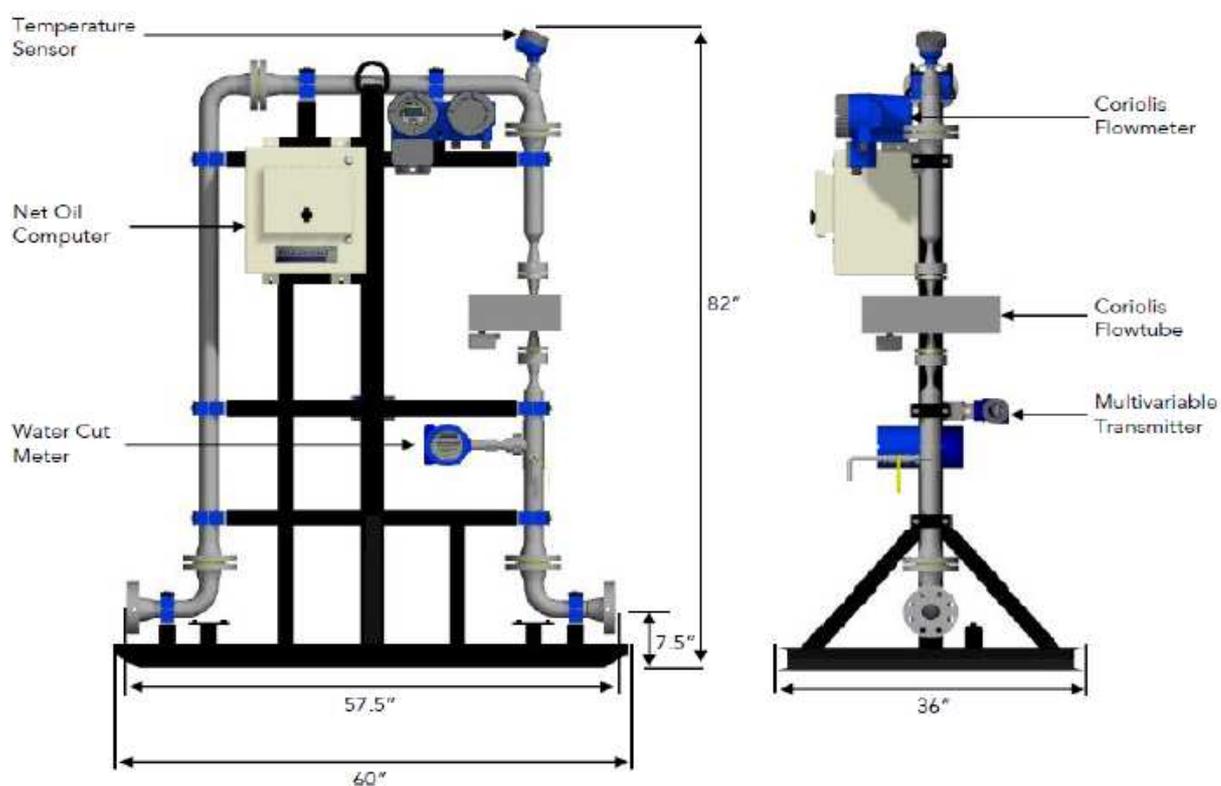


Рисунок 10 – Измерительная система

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

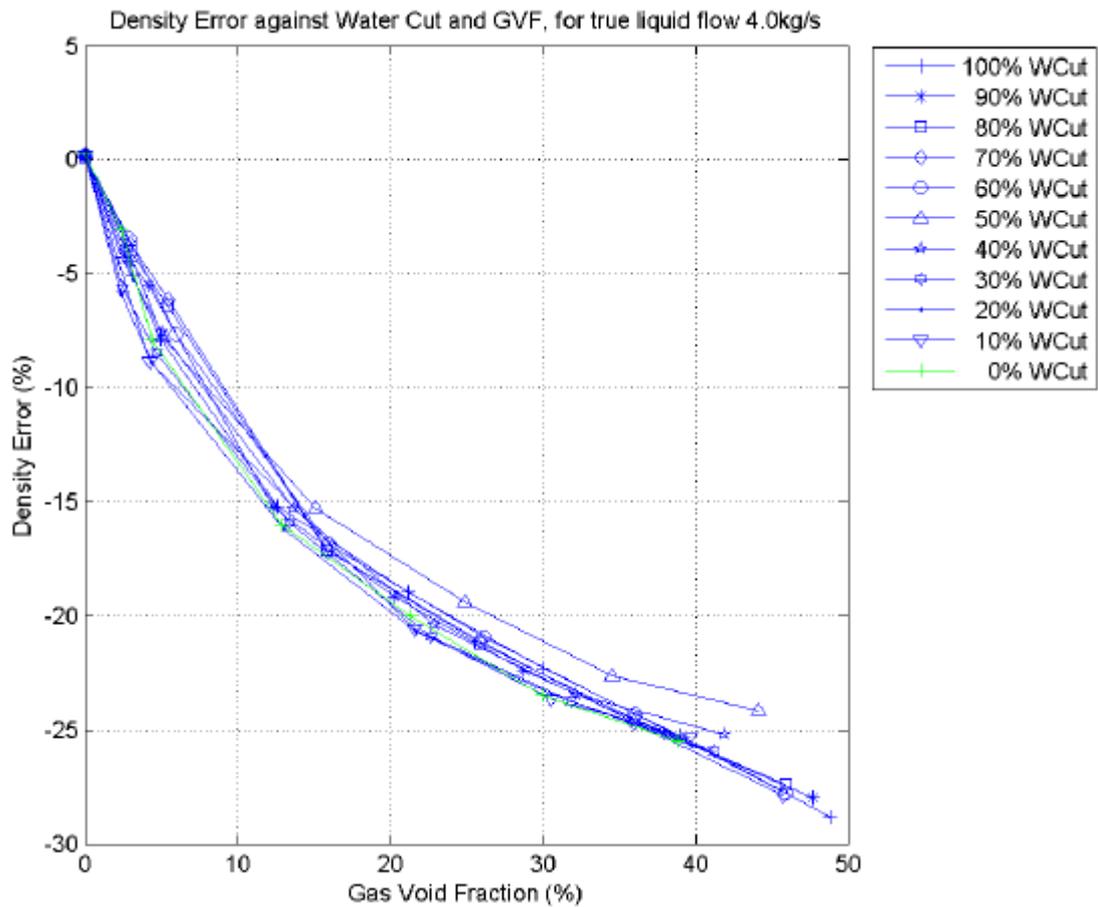


Рисунок 11 – Зависимость погрешности измерения плотности от содержания газа и степени обводненности

Изм.	Лист	№докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 15.04.03.2017.009 ПЗ ВКР

Лист

18

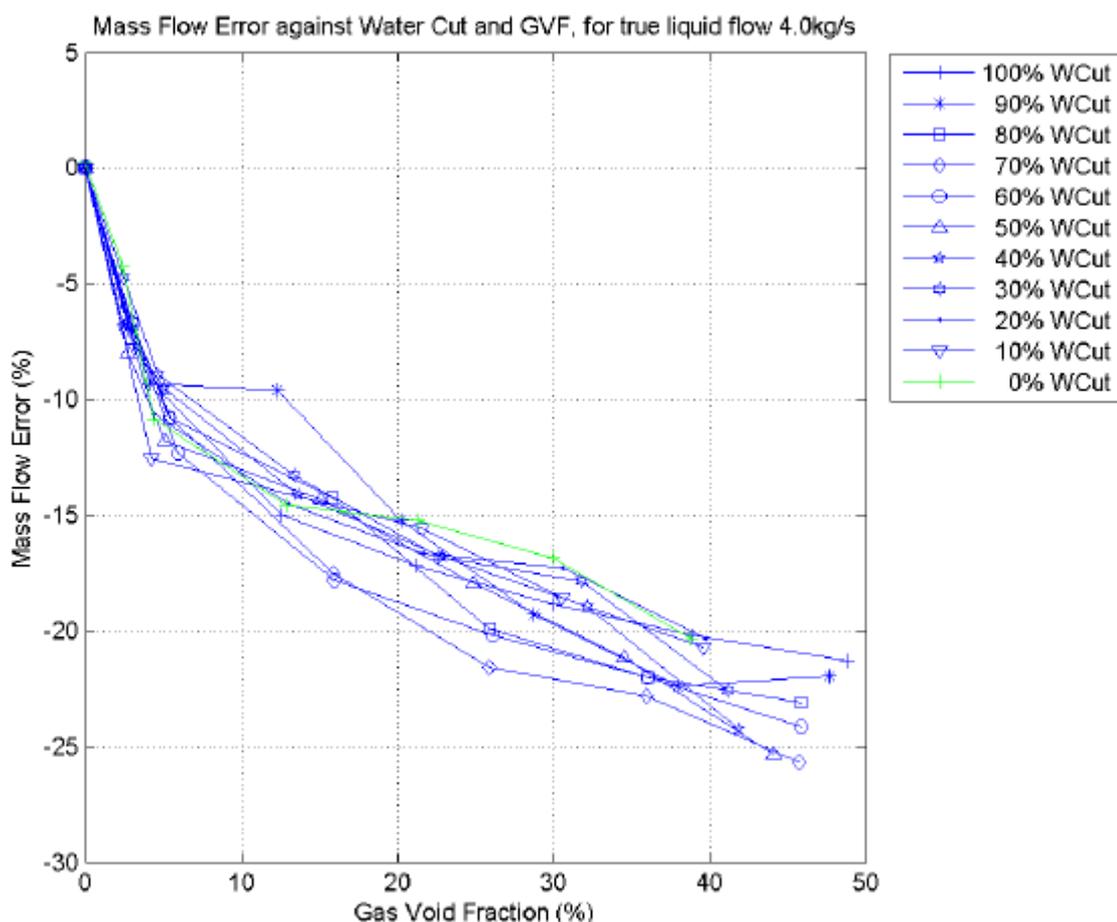


Рисунок 12 – Зависимость погрешности измерения массового расхода от содержания газа и степени обводненности

Представленная система прошла серию испытаний в лаборатории TUV NEL (в целом было проведено 75 тестов) на определение погрешностей измерения. Значения погрешностей, полученных в данных испытаниях не превысили допустимых пределов, установленных в соответствии с ГОСТ 8.165. Также были проведены полевые испытания в России.

В работе [26] описываются способы определения ошибок измерения кориолисового расходомера при условии протекания многофазных потоков (в данном случае нефти) в реальном времени. Необходимость таких замеров заключается в том, что зачастую при добыче нефти процентное содержание составляющих в потоке меняется со временем.

Изм.	Лист	№докум.	Подпись	Дата

Один из вариантов – схема SEVA (Sensor Validation), позволяющую управлять «поведением» системы с возможностью самодиагностики. Другой вариант – использование моделирования по методу Монте-Карло.

В статье [27] описывается технология измерения расхода трехфазного потока с применением расходомера Кориолиса, входящего в измерительный комплекс МЕРА МР (рисунок 10), которая может заменить старые способы замера расхода с использованием сепараторов.

Измерительная система состоит из кориолисового расходомера, датчика обводненности, датчика температуры и вычислительного комплекса. Определение расхода проводится путем измерения «кажущихся» значений параметров потока различными датчиками и их дальнейшей корректировки с использованием различных алгоритмов.

В [28] описываются различные факторы, оказывающие влияние на точность измерения кориолисовых расходомеров, такие как пузырьковый эффект (следствие разности поперечных ускорений жидкости и пузырьков газа в потоке), эффект резонатора (появление стоячей волны вследствие «захвата» пузырьками газа определенного объема жидкости) и затухание (возникновение дополнительного усилия, возникающего при трении между пузырьками газа и жидкостью). Также обсуждаются результаты испытаний расходомера Promass 83F производства компании Endress+Hauser.

Статья [29] описывает основные источники погрешностей измерения, возникающих в кориолисовых расходомерах при работе в условиях протекания многофазных потоков, и способы их устранения.

Первый источник погрешностей – влияние разности плотностей газа (или твердых частиц) и жидкости, проявляющееся в разделении потока и смещении центра масс трубки (рисунок 13). При таком воздействии расходомер дает заниженную оценку плотности смеси и массового расхода. Также в статье приводится объяснение этого явления и примеры его

проявления. Снижение влияния этого эффекта можно добиться уменьшением размера пузырьков газа в жидкости и гомогенизацией потока.

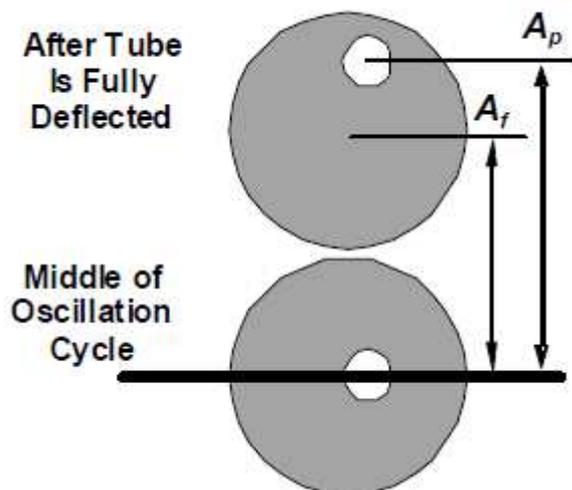


Рисунок 13 – Различия в амплитудах перемещений жидкости и газа

Второй источник погрешностей – появление звуковой волны при низкой скорости звука у смеси, протекающей по трубкам расходомера, приводящее к дополнительным поперечным колебаниям трубок на рабочей частоте. Влияние звуковой волны можно полностью снизить путем использования расходомера с низкой рабочей частотой.

В [30] решается задача о сохранении собственных частот изгибных колебаний трубок расходомера с целью их удержания в безопасном диапазоне. Для этого было исследовано влияние скорости потока, его давления и плотности жидкости на собственные частоты системы. Было определено что увеличение всех трех параметров приводит к уменьшению значений собственных частот, а увеличение лишь скорости потока приводит к их увеличению. В ходе решения задачи о сохранении собственных частот был получен алгоритм определения упругие колебания закреплений трубок.

В статье [31] было получено выражение преобразования массового расхода в величину разности фаз, которая позволяет оценить диапазон

Изм.	Лист	№докум.	Подпись	Дата

3. Разработка расчетной и экспериментальной модели расходомера

3.1 Аналитический расчет колебаний трубы с протекающей по ней жидкостью

В настоящий момент для анализа работы кориолисового расходомера требуется проведение связанных расчетов движения деформируемого трубопровода с учетом протекающей внутри него жидкости, либо применения сложных аналитических выкладок. Однако такие расчеты требуют большого количества вычислительных ресурсов и времени. Однако существуют подходы, являющиеся относительно простыми.

Одним из таких подходов является модификация уравнения движения балки с распределенной массой.

В статьях [32] и [33] приведены примеры решения задачи о колебаниях прямой трубы с протекающей по ней жидкостью как балки с распределенной массой. Влияние протекающего потока в данной задаче учитывается путем добавления в уравнение движения балки (1) определенных слагаемых, связанных с силой инерции присоединенной массы жидкости ($m \cdot \frac{d^2 y(z)}{dt^2}$), кориолисовыми силами инерции ($2 \cdot m \cdot v \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{dy(z)}{dz} \right)$) и центробежными силами инерции ($m \cdot v^2 \cdot \frac{d^2 y(z)}{dz^2}$):

$$(M+m) \cdot \frac{d^2 y(z)}{dt^2} + 2 \cdot m \cdot v \cdot \frac{d}{dt} \frac{dy(z)}{dz} + m \cdot v^2 \cdot \frac{d^2 y(z)}{dz^2} + E \cdot J \cdot \frac{d^4 y(z)}{dz^4} = f(z), \quad (1)$$

где M – погонная масса трубопровода, m – погонная масса жидкости, $y(z)$ – поперечное перемещение балки, v – скорость движения потока жидкости, E – модуль упругости материала трубопровода, J – момент инерции сечения трубопровода, $f(z)$ –воздействующие на балку нагрузки.

Решение данной задачи представляется в виде суперпозиции собственных форм (2):

						Лист
						23
Изм.	Лист	№докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ – 15.04.03.2017.009 ПЗ ВКР	

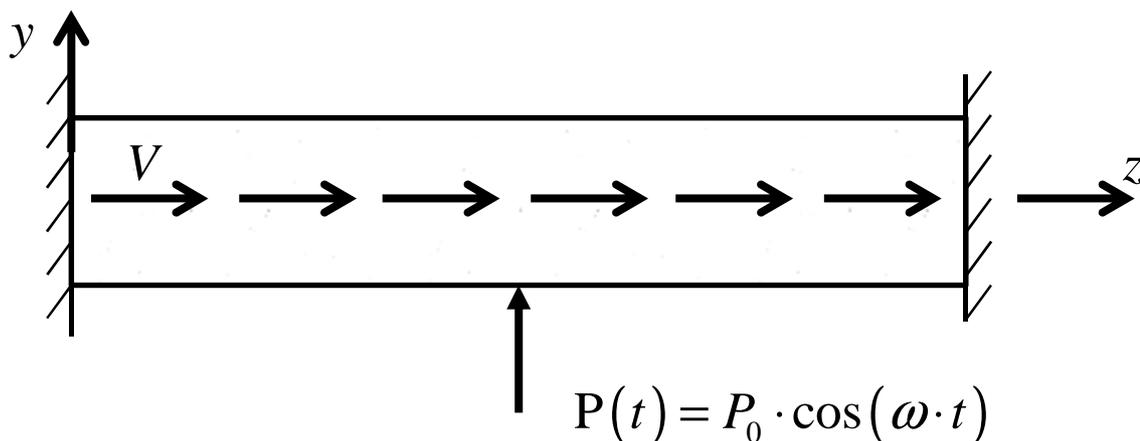


Рисунок 14 – Расчетная схема примера

Корни частотного уравнения можно определить аналитически следующим образом [35] (5):

$$\lambda_k = \frac{2 \cdot k + 1}{2} \cdot \pi. \quad (5)$$

Собственные частоты системы с стоячей жидкостью определяются следующим образом (6):

$$p_k = (\lambda_k)^2 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{(M + m) \cdot L^4}}, \quad (6)$$

где M – погонная масса трубы, m – погонная масса жидкости, J – момент инерции сечения трубы.

Собственные частоты системы приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Собственные частоты трубы со стоячей жидкостью

№ частоты	Значение, Гц
1	61,8
2	170
3	334
4	552
5	824
6	1152

7	1534
8	1970
9	2461

Функции собственных форм перемещений представляем в следующем виде (7):

$$u_k(z) = K_4(\lambda_k) \cdot K_3\left(\lambda_k \cdot \frac{z}{L}\right) - K_3(\lambda_k) \cdot K_4\left(\lambda_k \cdot \frac{z}{L}\right), \quad (7)$$

где $K_3\left(\lambda_k \cdot \frac{z}{L}\right)$, $K_4\left(\lambda_k \cdot \frac{z}{L}\right)$ – функции Крылова, определяются следующим образом (8):

$$K_3(z) = \frac{1}{2} \cdot (\cosh(z) - \cos(z)),$$

$$K_4(z) = \frac{1}{2} \cdot (\sinh(z) - \sin(z)). \quad (8)$$

Собственные формы перемещений системы, а также их первая и вторая производные приведены на рисунках 15-17.

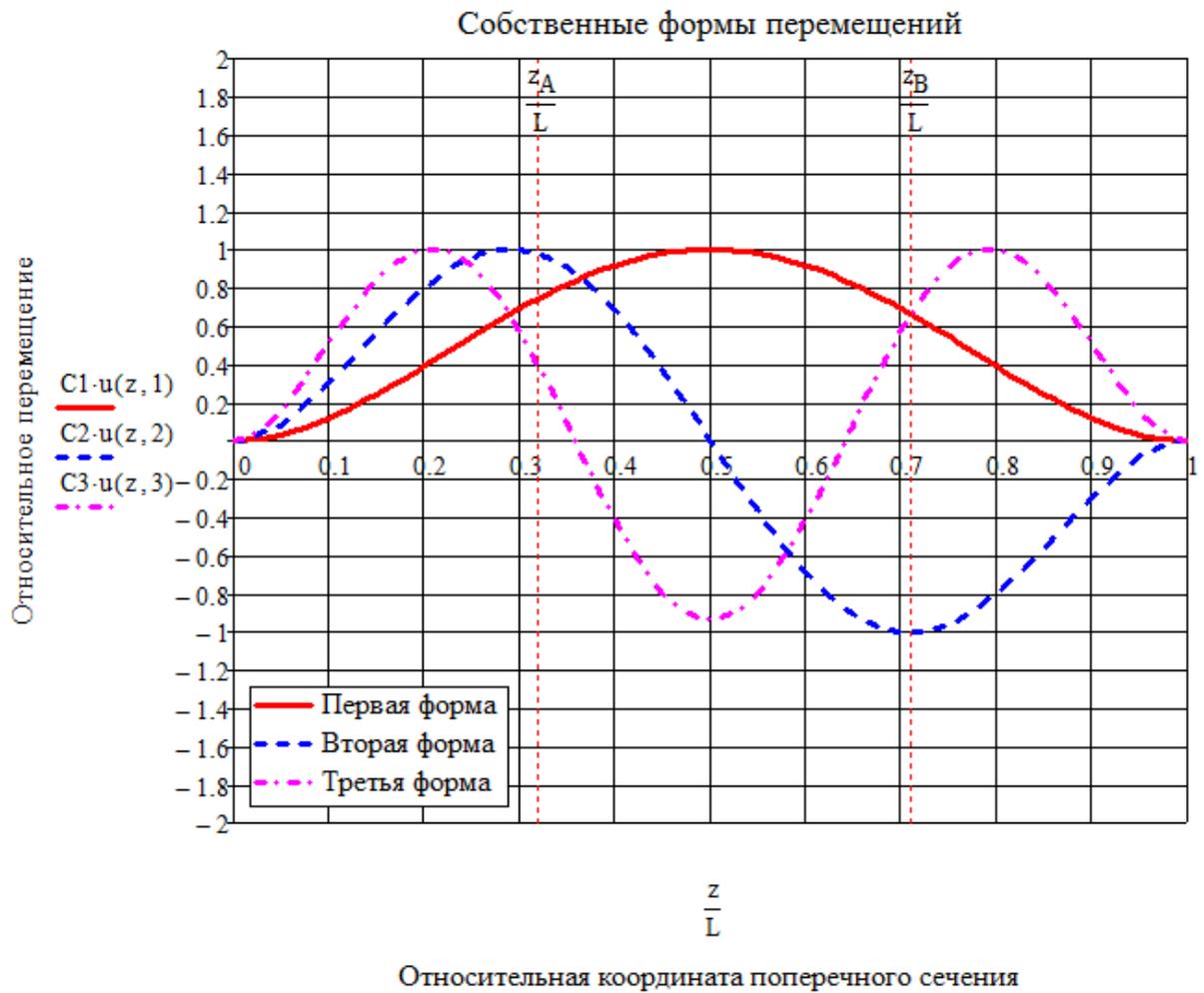


Рисунок 15 – Собственные формы перемещений системы

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

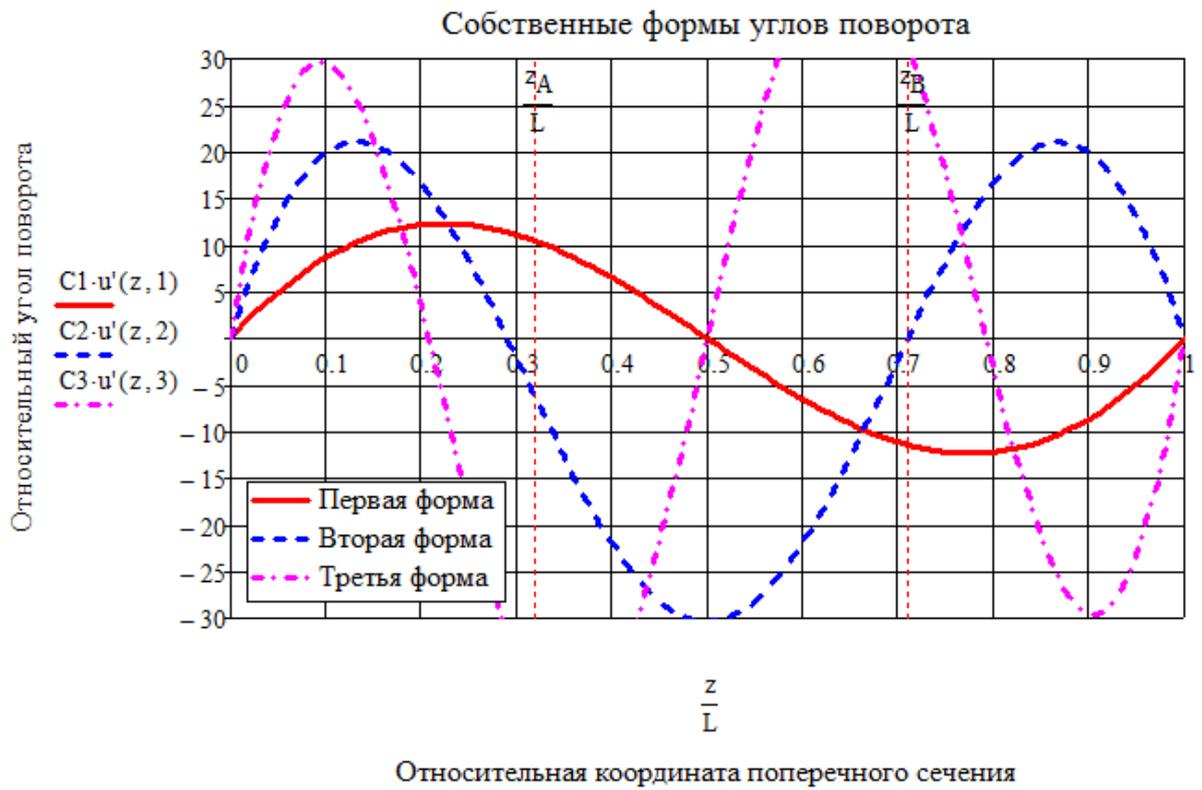


Рисунок 16 – Первые производные собственных форм перемещений

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 15.04.03.2017.009 ПЗ ВКР

Лист

28

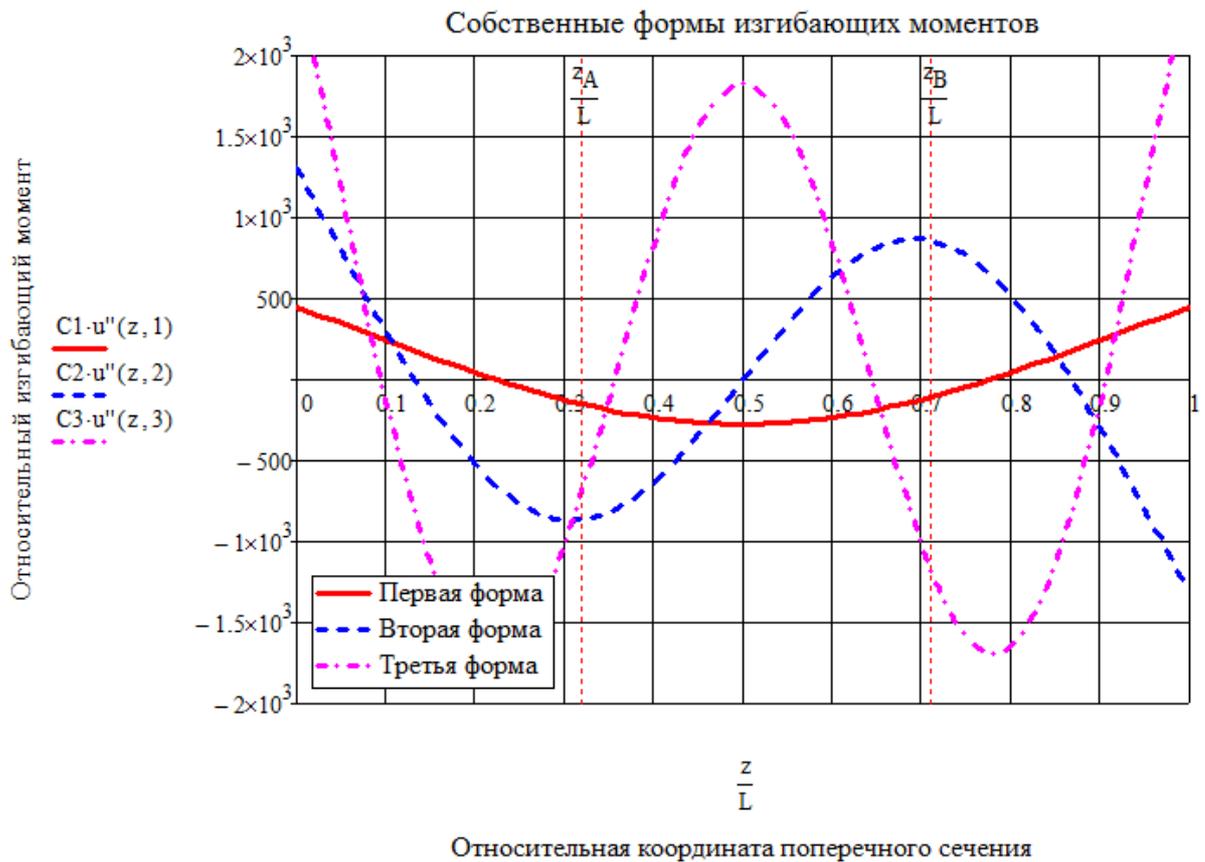


Рисунок 17 – Вторые производные собственных форм перемещений

Теперь, когда известны собственные формы перемещений трубы, можно определить весовые коэффициенты. Значения матриц весовых коэффициентов равны:

$$D1 = \begin{pmatrix} 2,84 \cdot 10^{-13} & 1,55 \cdot 10^4 \\ -1,55 \cdot 10^4 & 8,87 \cdot 10^{-9} \end{pmatrix},$$

$$D2 = \begin{pmatrix} -2,55 \cdot 10^3 & -4,93 \\ -4,93 & -4,76 \cdot 10^6 \end{pmatrix},$$

$$K = \begin{pmatrix} 207 \\ 1,03 \cdot 10^5 \end{pmatrix}.$$

Имея значения весовых коэффициентов, можно определить значения коэффициентов разложения A_j . Значения коэффициентов разложения для

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

колебаний балки на первой собственной частоте при возбуждении в середине пролета приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения коэффициентов разложения A_j

№ коэффициента	Значение коэффициента
1	$-0,327+i \cdot 1 \cdot 10^{-7}$
2	$9,046 \cdot 10^{-12}-i \cdot 4,787 \cdot 10^{-5}$

Перемещение двух сечений трубы во времени для массового расхода воды 1,5 т/час приведено на рисунке 18.



Рисунок 18 – Перемещение двух сечений трубы во времени

На рисунке видно, что перемещения двух сечений трубы, расположенных симметрично, немного различается по фазе. Для данного расхода разность фаз колебаний составило 26,7 мкс.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

Как видно из примера, при использовании данного подхода не понадобилось большого количества вычислительных ресурсов и задача решалась целиком только с помощью пакета Mathcad.

3.1.1 Использование конечноэлементной модели для определения собственных форм и собственных частот системы

Однако в случаях сложной геометрии расходомера уравнение движения балки уже распространяется на три оси, а его решение требует учета большого количества условий совместности колебаний точек. Для таких случаев можно получить значения собственных частот и собственных форм системы с помощью метода конечных элементов.

Рассмотрим снова пример прямой трубы с протекающей по ней жидкостью, но теперь значения собственных частот и собственных форм получим с помощью КЭ модели.

Конечноэлементная модель трубы создана с помощью балочных элементов. Она представлена на рисунке 19.



Рисунок 19 – Конечноэлементная модель трубы

Для данной модели необходимо правильно учесть массу добавленной жидкости. Сделать это можно путем замены плотности материала трубы на эквивалентную плотность (9):

$$\rho_{\text{экв}} = \frac{\rho_{\text{тр}} \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot (d_n^2 - d_{\text{вн}}^2) \right) + \rho_{\text{ж}} \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot d_{\text{вн}}^2 \right)}{\frac{\pi}{4} \cdot (d_n^2 - d_{\text{вн}}^2)} \quad (9)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Графики собственных форм перемещений, углов поворота и вторых производных форм перемещений приведены на рисунках 20-22.

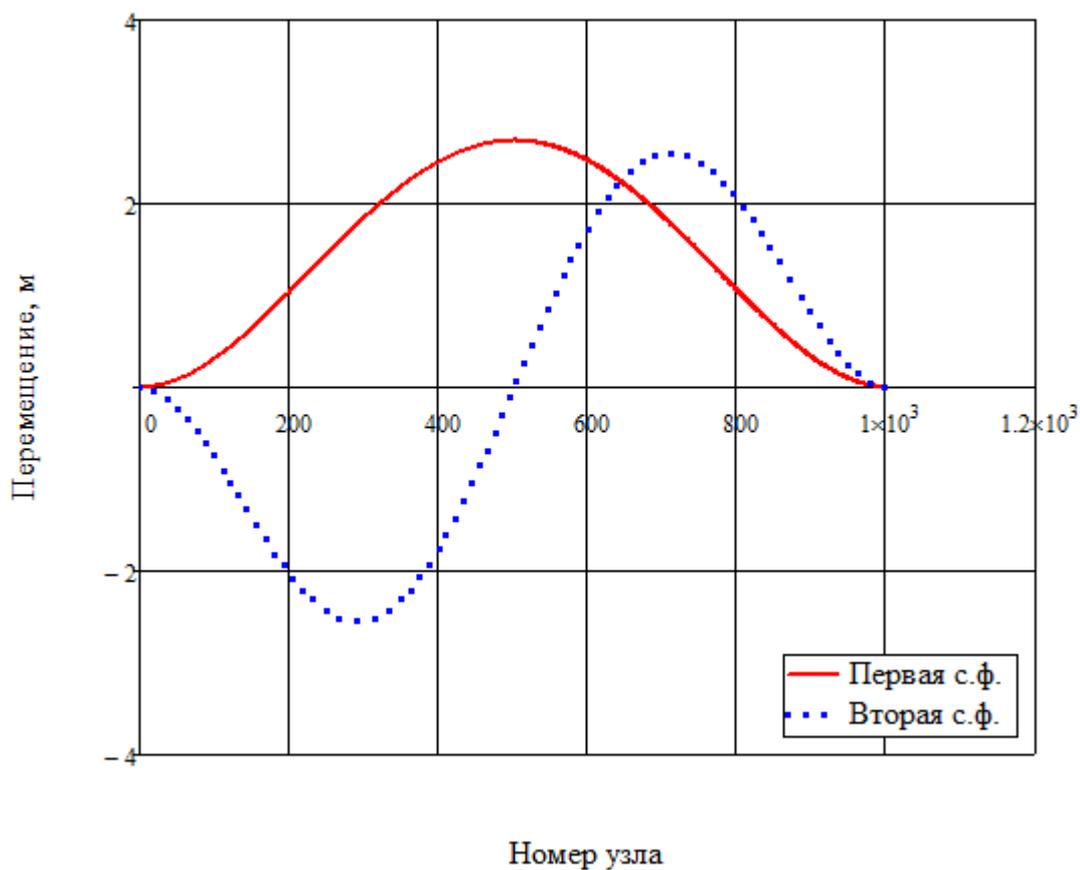


Рисунок 20 – Собственные формы перемещений КЭ модели

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

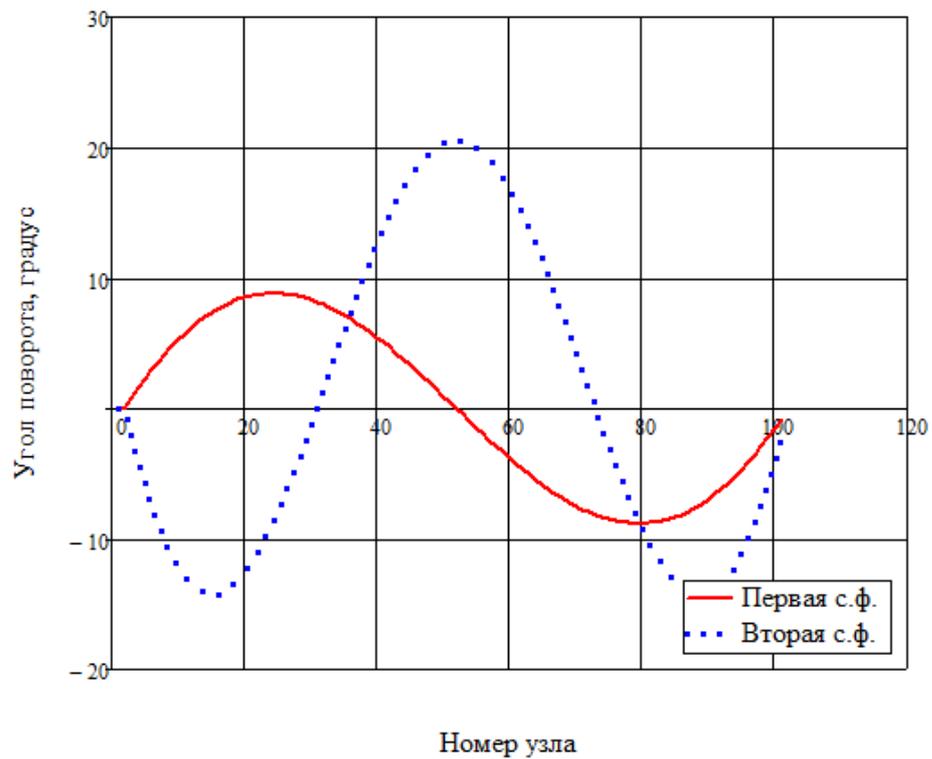


Рисунок 21 – Собственные формы углов поворота КЭ модели

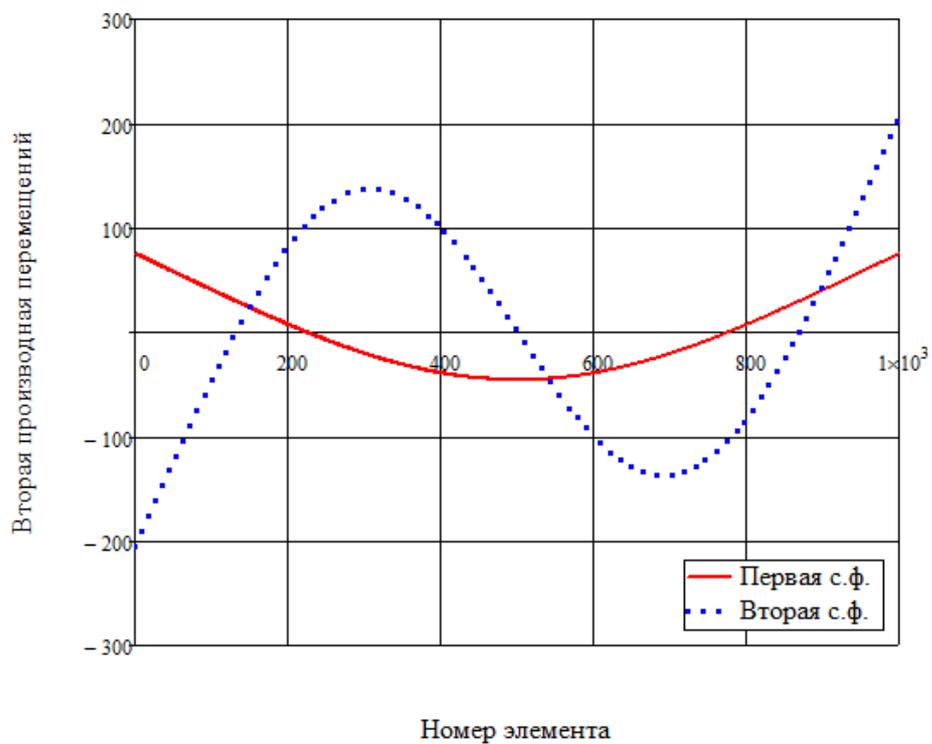


Рисунок 22 – Вторые производные форм перемещений КЭ модели

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Значения матриц весовых коэффициентов следующие:

$$D1 = \begin{pmatrix} 5,85 \cdot 10^{-5} & -9,52 \\ 9,52 & 3,35 \cdot 10^{-6} \end{pmatrix},$$

$$D2 = \begin{pmatrix} -34,9 & 0,521 \\ -0,518 & -130 \end{pmatrix},$$

$$K = \begin{pmatrix} 2,86 \\ 2,86 \end{pmatrix}.$$

Значения коэффициентов разложения для КЭ модели приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения коэффициентов разложения A_j для КЭ модели

№ коэффициента	Значение коэффициента
1	$-3,097 + i \cdot 2,556 \cdot 10^{-4}$
2	$2,820 \cdot 10^{-12} - i \cdot 9,667 \cdot 10^{-3}$

Перемещение двух сечений трубы во времени приведено на рисунке 23.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 15.04.03.2017.009 ПЗ ВКР

Лист

34

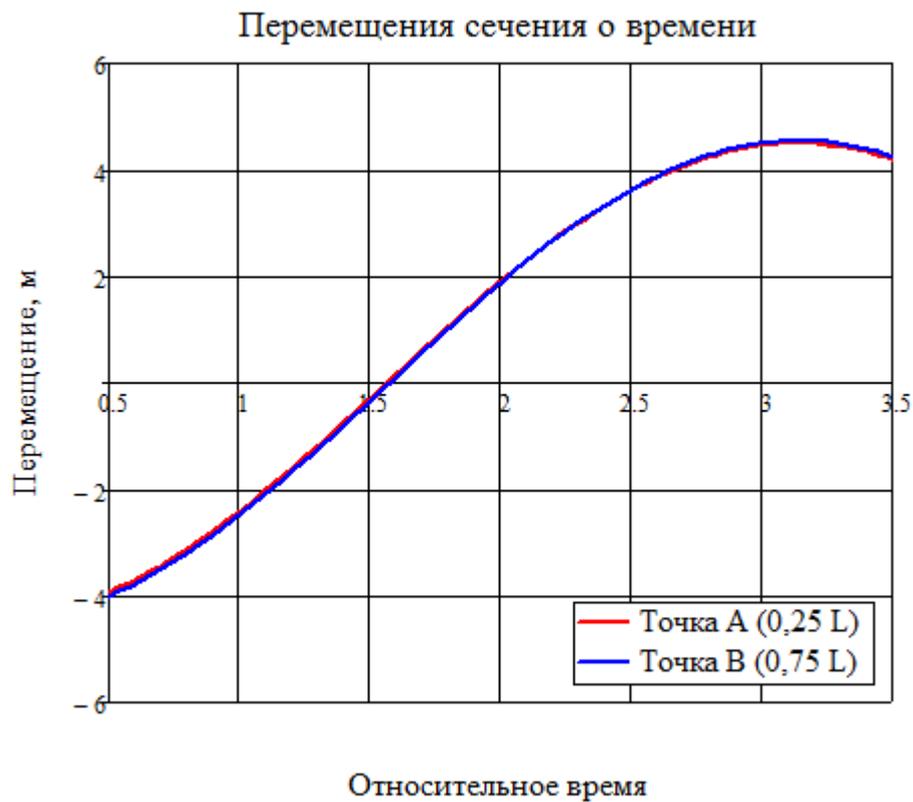


Рисунок 23 – Перемещение двух сечений трубы во времени для КЭ модели

При массовом расходе 1,5 т/час разность фаз составила 26,9 мкс. Различие результатов, полученных аналитическим методом и с помощью КЭ модели, не превысило 5%.

Рассмотрим более сложный пример с балочной КЭ моделью реального расходомера. КЭ модель расходомера представлена на рисунке 24.

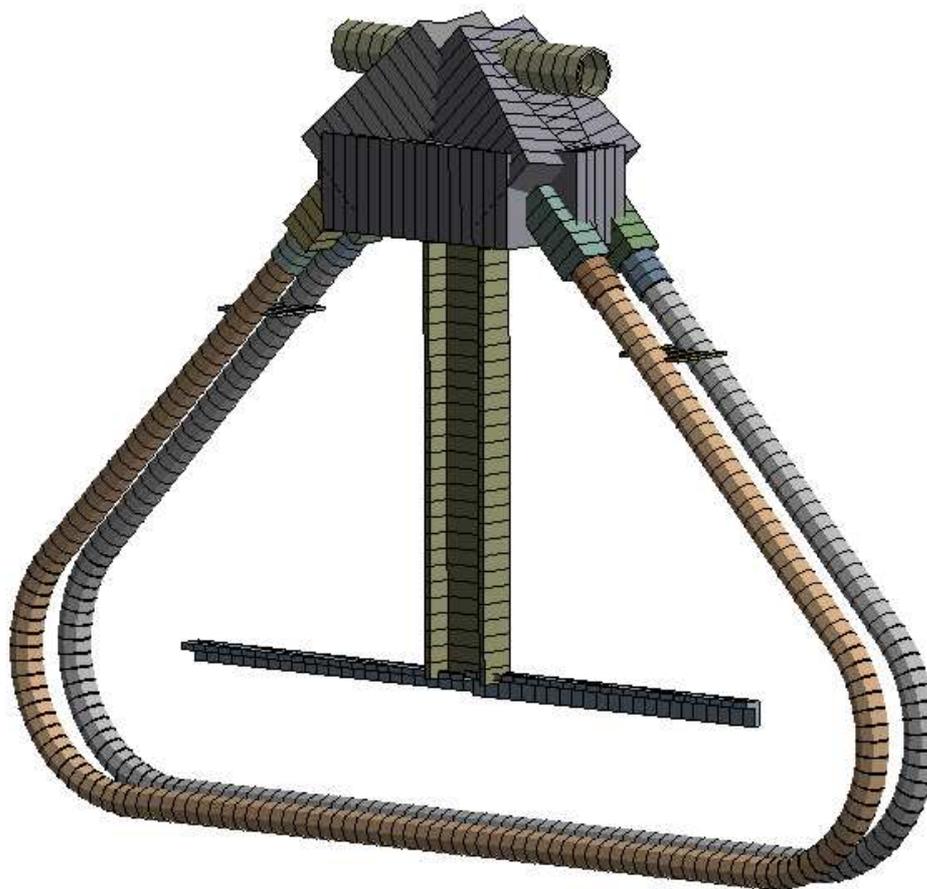


Рисунок 24 – Балочная КЭ модель расходомера

Собственные частоты системы приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Значения собственных частот КЭ модели расходомера

№ частоты	Значение частоты, Гц
1	95,2
2	127
3	143
4	166
5	177
6	188
7	216

8	242
9	249
10	276
11	326
12	373

Формы перемещений для собственных частот №1 и №5 приведены на рисунках 25 и 26

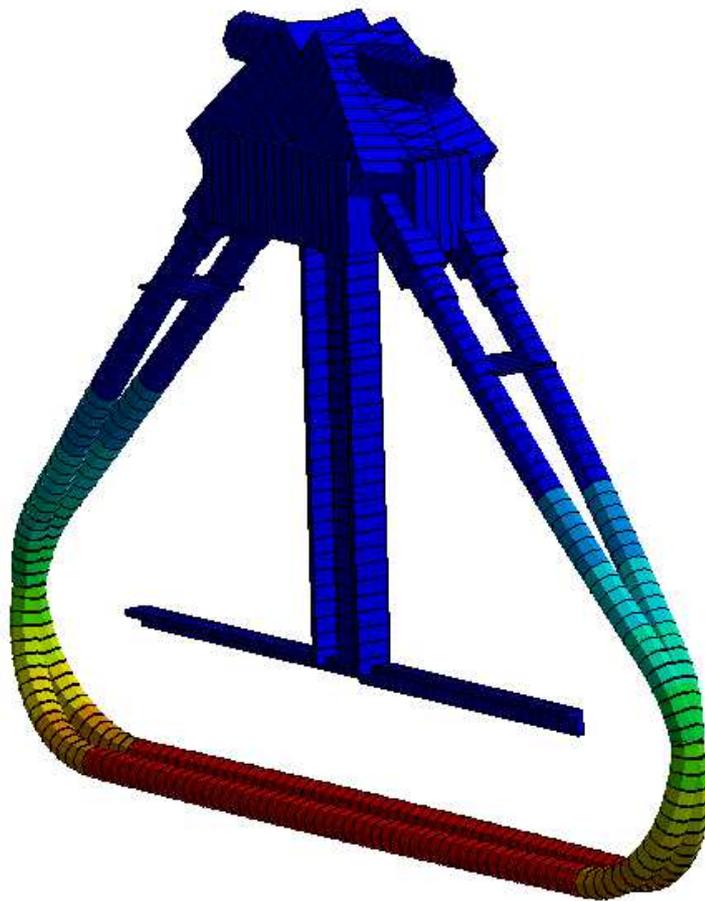


Рисунок 25 – Первая собственная форма перемещений расходомера

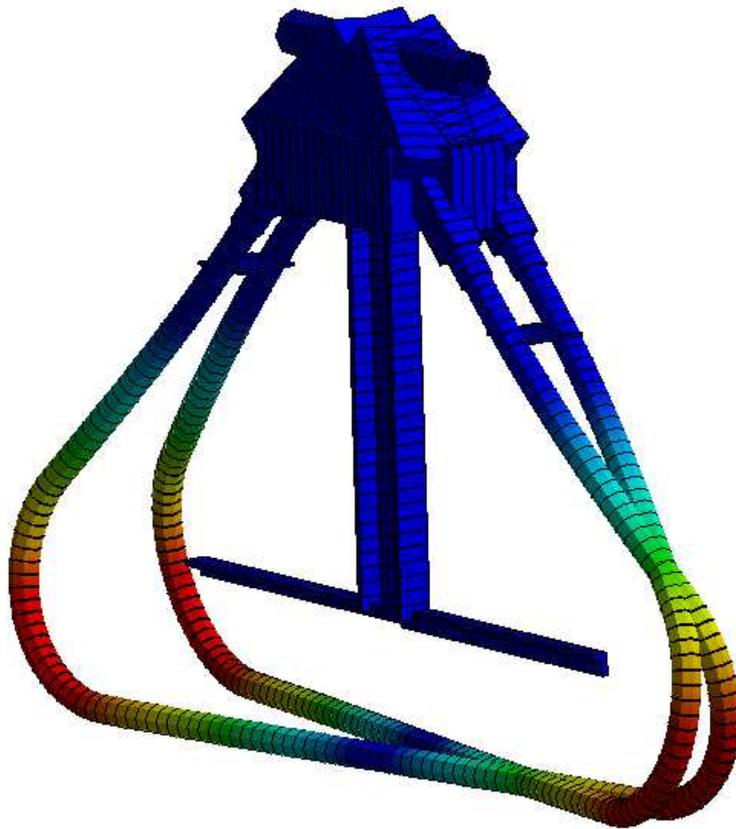


Рисунок 26 – Пятая собственная форма перемещений расходомера

Значения матриц весовых коэффициентов для данного примера следующие:

$$D1 = \begin{pmatrix} -13,7 & 1,63 \cdot 10^{-4} \\ 2,68 \cdot 10^{-4} & -11,2 \end{pmatrix},$$

$$D2 = \begin{pmatrix} 2,04 & -3,14 \cdot 10^{-4} \\ -1,92 \cdot 10^{-4} & 13,8 \end{pmatrix},$$

$$K = \begin{pmatrix} 1,64 \\ 1,69 \end{pmatrix}.$$

Значения коэффициентов разложения приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Значения коэффициентов разложения A_j для КЭ модели

№ коэффициента	Значение коэффициента
1	$1,34 \cdot 10^{-5}$
2	$3,03 \cdot 10^{-11} + i \cdot 1,78 \cdot 10^{-12}$

Колебания двух сечений трубы расходомера для массового расхода 1 т/час представлены на рисунке 27.

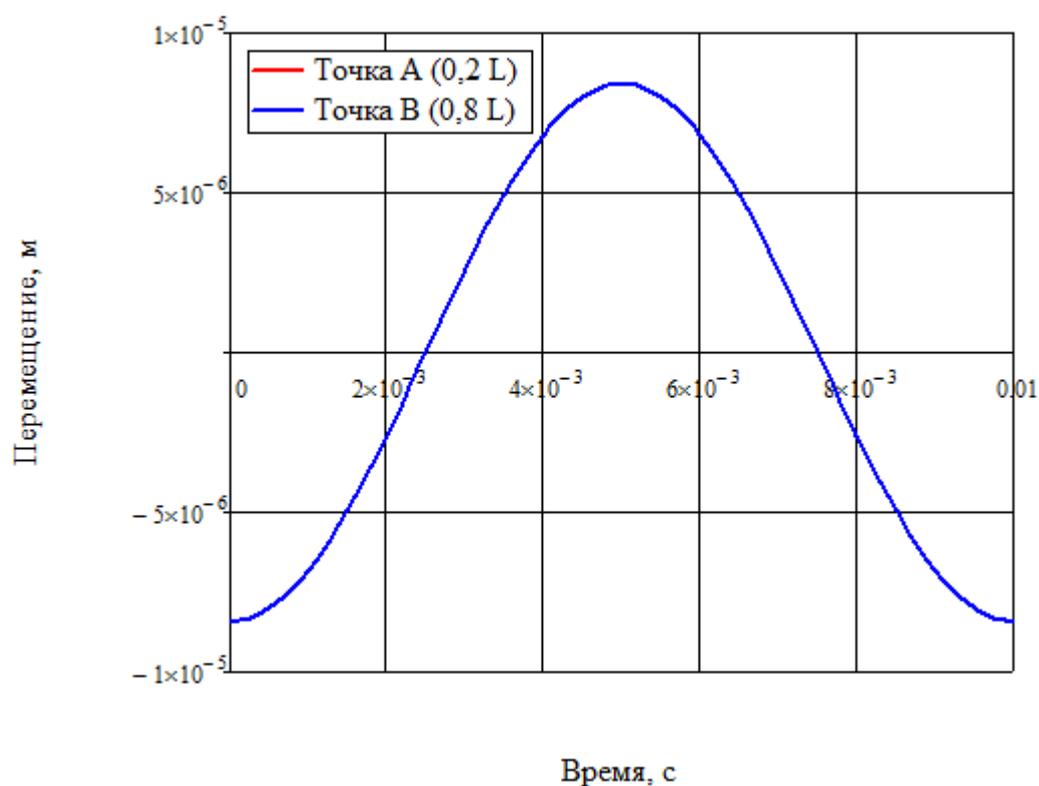


Рисунок 27 – Колебания двух симметрично расположенных сечений трубы расходомера

Зависимость разности фаз от величины массового расхода приведена на рисунке 28.

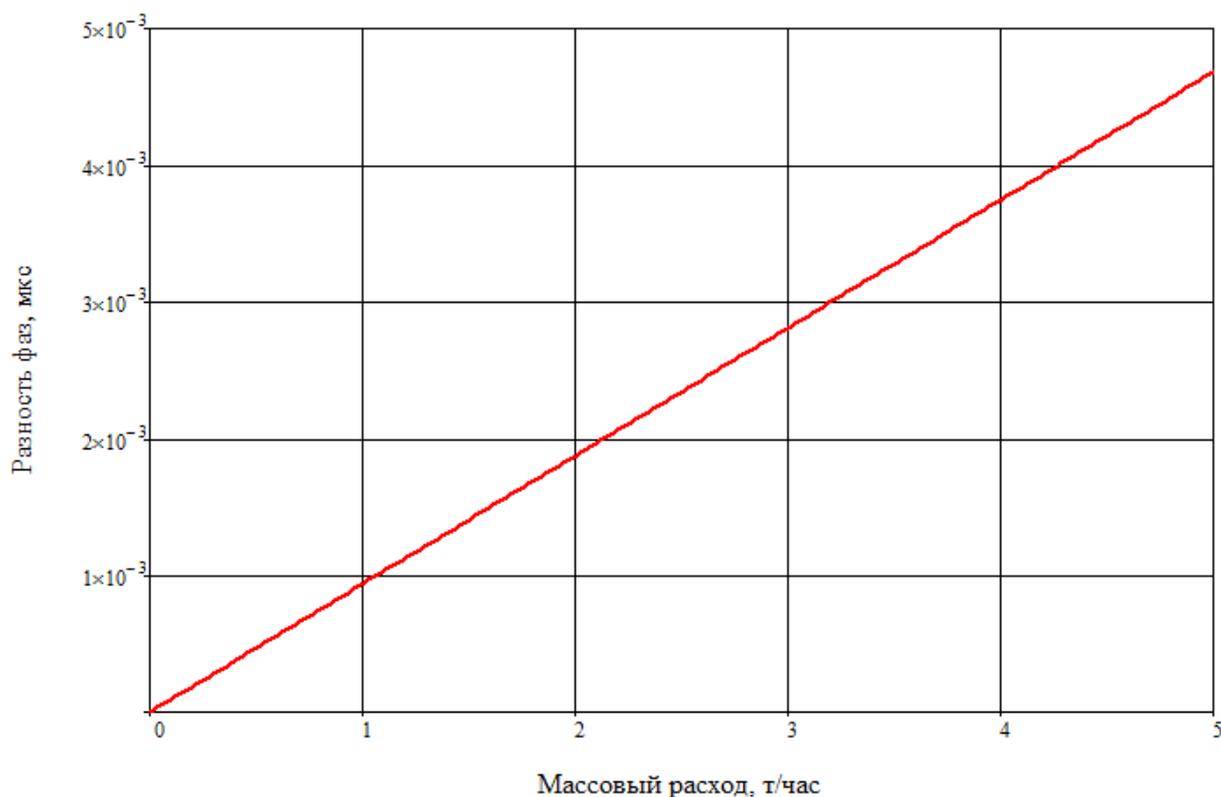


Рисунок 28 – Значение разности фаз колебаний в зависимости от величины массового расхода

Различие результатов расчета и эксперимента в данном случае превысило допустимую норму, однако анализ данного явления будет проводиться в будущем.

3.1.2 Решение задачи о колебаниях деформируемой трубы с текущей жидкостью в нестационарной постановке

Дальнейшим развитием данного подхода является решение задачи в нестационарной постановке. Решение уравнения движения балки с распределенной массой представляется в следующем виде (10):

$$y(z, t) = \sum_{i=1}^n q_i(t) \cdot u_i(z), \quad (10)$$

где $q_i(t)$ – коэффициенты разложения, $u_i(z)$ – функции собственных форм перемещений.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

Если подставить данное решение в уравнение движения, получим следующее (11):

$$(M+m) \cdot \left(\sum_{i=1}^n \ddot{q}_i(t) \cdot u_i(z) \right) + 2 \cdot m \cdot v \cdot \left(\sum_{i=1}^n \dot{q}_i(t) \cdot \theta_i(z) \right) + m \cdot v^2 \cdot \left(\sum_{i=1}^n q_i(t) \cdot u_i''(z) \right) + E \cdot J \cdot \left(\sum_{i=1}^n q_i(t) \cdot u_i^{(IV)}(z) \right) = f(z, t), \quad (11)$$

где $\theta_i(z)$ – формы углов поворота сечений балки, $u_i^{(IV)}$ – четвертые производные собственных форм перемещения балки.

Выражение (11) можно упростить, если домножить на функции собственных форм перемещений и полученный результат проинтегрировать. Тогда можно воспользоваться теми же выражениями (4), что и в случае стационарной постановки задачи, добавив к нему еще одно (12):

$$D3_{n,m} = \int_0^L u_n^{(IV)}(z) \cdot u_m(z) dz. \quad (12)$$

Система дифференциальных уравнений будет иметь следующий вид (13)

:

$$(M+m) \cdot \ddot{q}_i(t) \cdot K_i + 2 \cdot m \cdot v \cdot \left(\sum_{j=1}^n D1_{i,j} \cdot \dot{q}_j(t) \right) + m \cdot v^2 \cdot \left(\sum_{j=1}^n D2_{i,j} \cdot q_j(t) \right) + E \cdot J \cdot \left(\sum_{j=1}^n D3_{i,j} \cdot q_j(t) \right) = F(t). \quad (13)$$

Полученную систему дифференциальных уравнений (13) разрешаем относительно старших производных и решаем методами численного интегрирования (например методом Рунге-Кутты четвертого порядка). Результат интегрирования системы приведен рисунке 29.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

декремента равно 0,003. Виброграмма затухающих колебаний с огибающей представлены на рисунке 30.

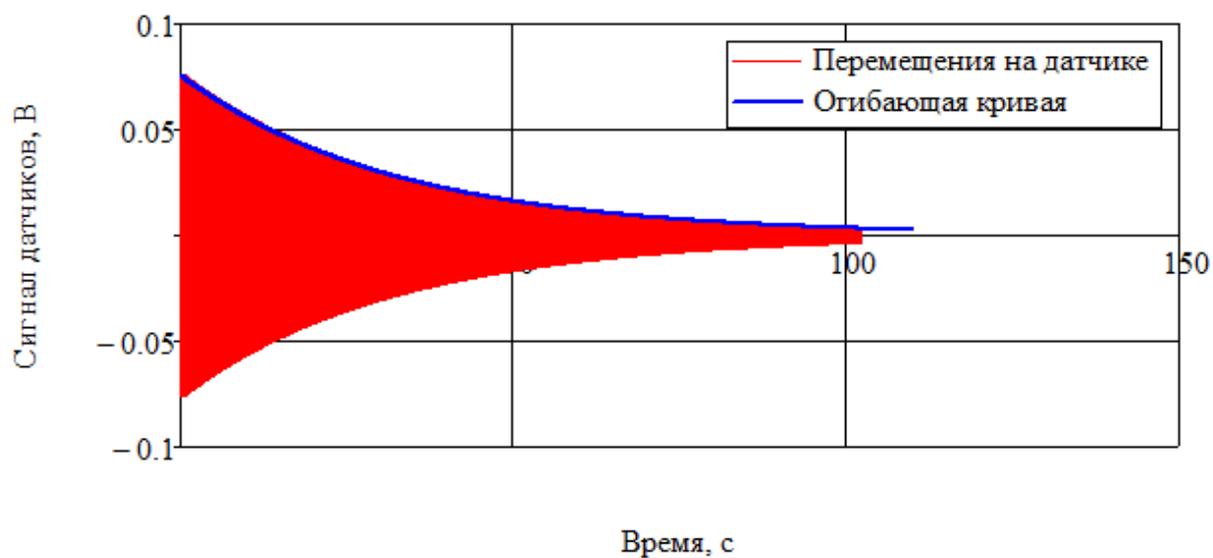


Рисунок 30 – Оценка декремента затухания колебаний

Результаты интегрирования уравнений для системы с трением в материале приведены на рисунке 31.

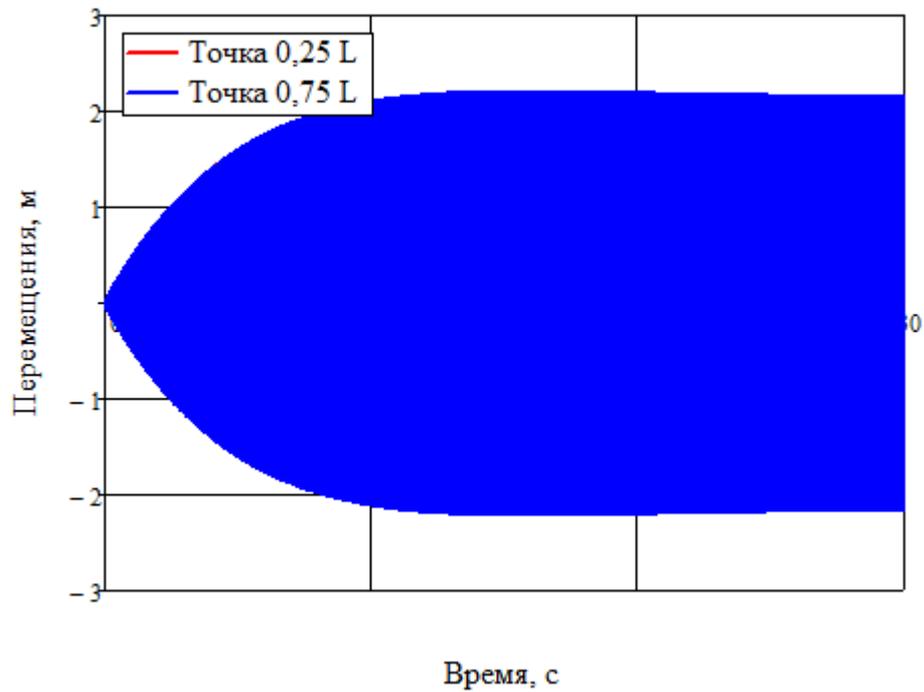


Рисунок 31 – Перемещение двух сечений трубы с трением в материале во времени при нестационарной постановке задачи

Как видно на рисунке 31, спустя некоторое время система выходит на стационарный резонансный режим. На рисунке 32 показано, как колебания двух симметрично расположенных сечений трубы различаются по фазе.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 15.04.03.2017.009 ПЗ ВКР

Лист

44

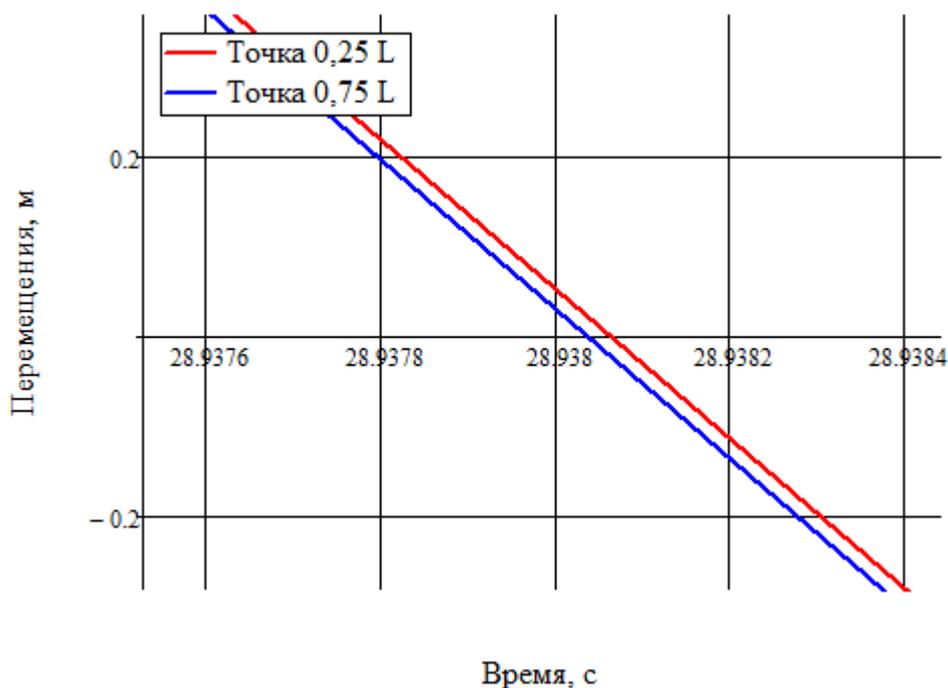


Рисунок 32 – Смещение колебаний двух сечений по фазе

Различие значений разности фаз для задачи в стационарной и нестационарной постановках не превышает 1%. Распространение метода расчета колебаний трубы с текущей по ней жидкостью на нестационарный режим позволяет испытывать алгоритмы управления и обработки сигнала. В целом, такой метод расчета позволяет проводить анализ динамики расходомеров только на ранних стадиях проектирования, так как в нем не учитываются реальные несовершенства конструкции (таких, как несимметричность геометрии трубок, распределения массы в них, несимметричность положения датчиков и привода).

Учесть несовершенства конструкции можно с помощью метода, основанного на экспериментальном получении передаточных функций точек конструкции.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

3.2 Анализ динамики расходомера с помощью экспериментальных передаточных функций

Определение влияния внешних факторов (например несовершенств конструкции) на работу расходомеров и модернизацию их конструкции можно с помощью метода, основывающегося на использовании передаточных функции, которые получены экспериментальным путем.

Само понятие передаточной функции разнится в зависимости от источника. В западной литературе ([36],[37]) передаточные функции получают несколькими способами. Один из них – использование дифференциальных уравнений движения системы. Запишем их в матричной форме (16):

$$[M] \cdot \{\ddot{x}\} + [K] \cdot \{\dot{x}\} + [C] \cdot \{x\} = \{F(\omega)\}, \quad (16)$$

где: $[M]$ – матрица инерции системы, $[K]$ – матрица демпфирования, $[C]$ – матрица жесткостей, $\{x\}$ – вектор обобщенных координат, $\{F(\omega)\}$ – вектор обобщенных сил.

Далее заменяем операцию дифференцирования на переменную p и преобразуем систему (17):

$$([M] \cdot p^2 + [K] \cdot p + [C]) \cdot \{X(p)\} = \{F(p)\}. \quad (17)$$

Преобразуем уравнение :

$$[Z(p)] \cdot \{X(p)\} = \{F(p)\}, \quad (18)$$

где $[Z(p)]$ – матрица динамической жесткости системы.

Альтернативный способ получения передаточных функций системы выглядит следующим образом (для случая отсутствия демпфирования) (19):

$$[H(i \cdot \omega)] = \sum_{r=1}^N \frac{\{\psi\}_r \cdot \{\psi\}_r^T}{\mu_{r,r} \cdot (p_r^2 - \omega^2)}, \quad (19)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

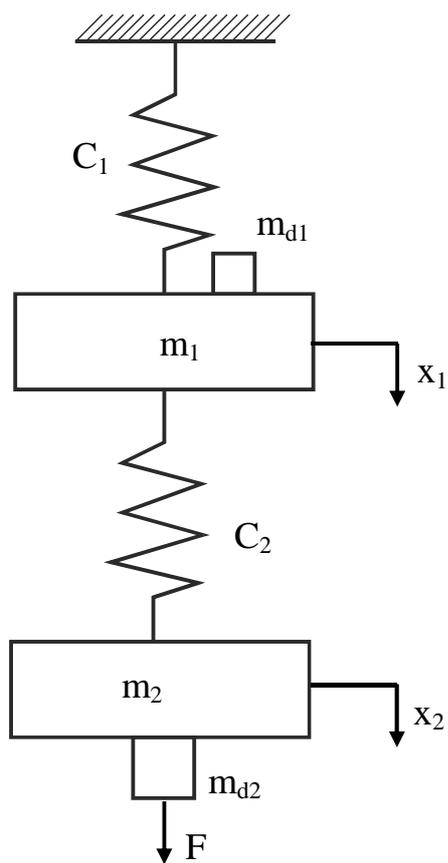


Рисунок 33 – Расчетная схема эксперимента

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 15.04.03.2017.009 ПЗ ВКР

Лист

48

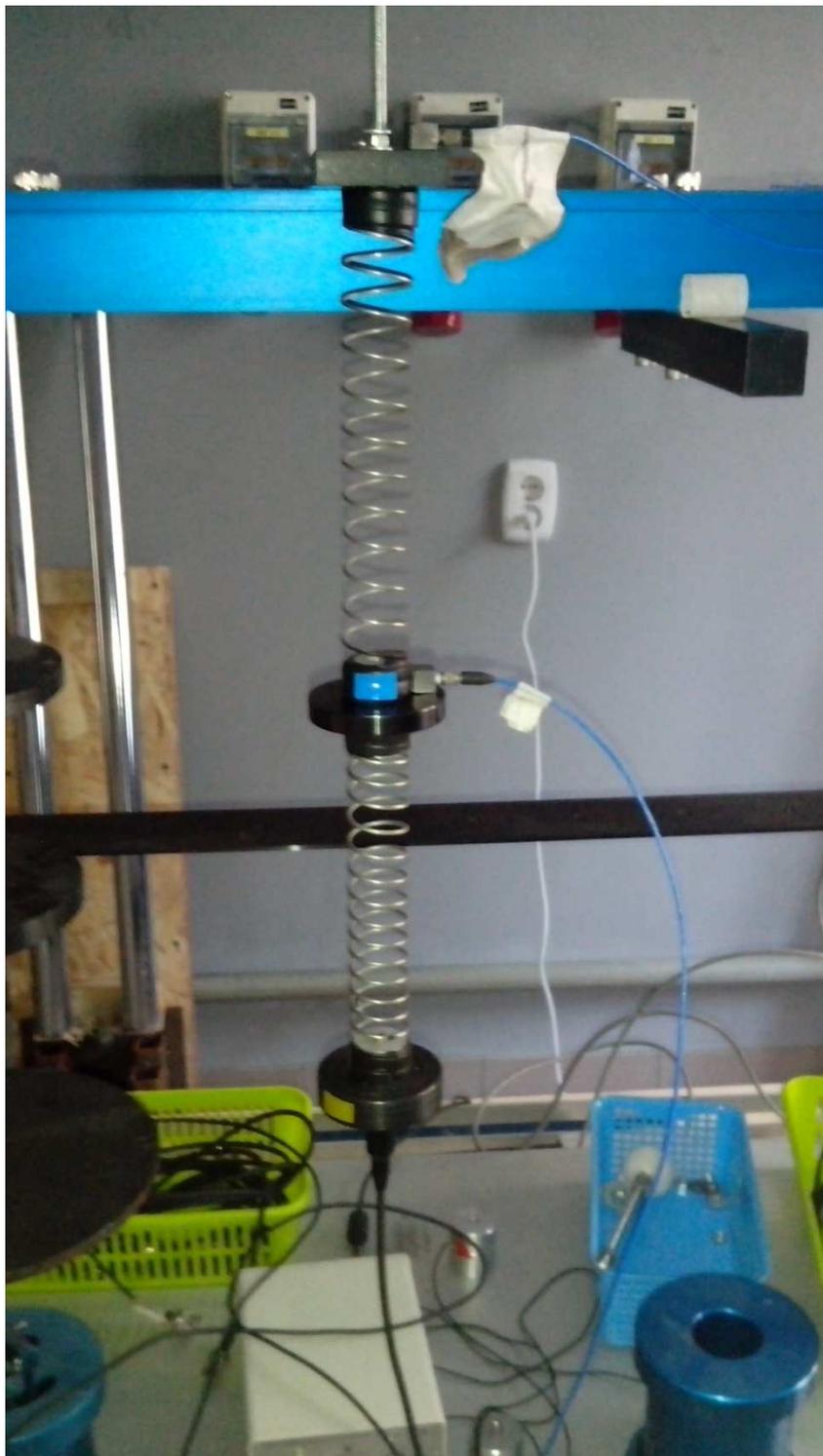


Рисунок 34 – Фотография исследуемой системы

Изм.	Лист	№докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 15.04.03.2017.009 ПЗ ВКР

Лист

49

Таблица 6 – Параметры системы с двумя степенями свободы

Обозначение параметра	Единицы измерения	Наименование параметра	Значение параметра
m_1	кг	Масса верхнего инерционного элемента	0,213
m_{d1}	кг	Масса датчика, установленного на верхнем инерционном элементе	0,030
m_2	кг	Масса нижнего инерционного элемента	0,330
m_{d2}	кг	Масса датчика, установленного на нижнем инерционном элементе	0,030
C_1	Н/м	Жесткость верхней пружины	506
C_2	Н/м	Жесткость нижней пружины	273

В отечественной литературе, например при использовании теории спектрального подрессоривания транспортных машин [38], передаточные функции определяются немного по другому.

Для системы также записываются дифференциальные уравнения движения (21):

$$\begin{cases} (m_1 + m_{d1}) \cdot \ddot{x}_1 + C_1 \cdot x_1 + C_2 \cdot (x_1 - x_2) = F(\omega)_1; \\ (m_2 + m_{d2}) \cdot \ddot{x}_2 - C_2 \cdot (x_1 - x_2) = F(\omega)_2. \end{cases} \quad (21)$$

Операция дифференцирования заменяется переменной p и группируются слагаемые (22):

$$\begin{cases} ((m_1 + m_{d1}) \cdot p^2 + (C_1 + C_2)) \cdot x_1 + C_2 \cdot x_2 = F(\omega)_1; \\ ((m_2 + m_{d2}) \cdot p^2) \cdot x_2 + C_2 \cdot x_1 = F(\omega)_2. \end{cases} \quad (22)$$

Передаточные функции получаются путем разрешения системы уравнений относительно переменных x_1 и x_2 , а переменная p заменяется на произведение $i \cdot \omega$. Сопоставление передаточных функций, полученных разными методами, приведено на рисунках 35 и 36.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

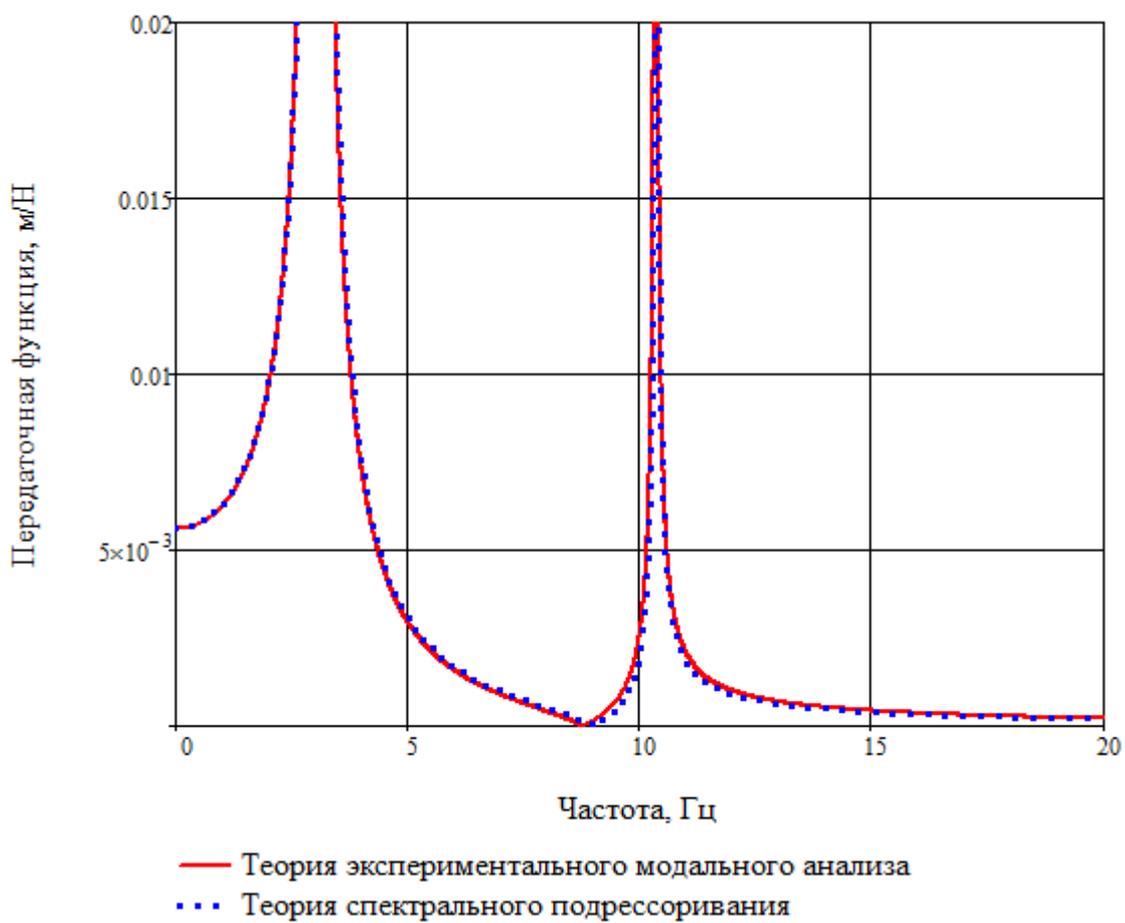


Рисунок 35 – Сопоставление передаточных функций $W_{x_i/F_2}(\omega)$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

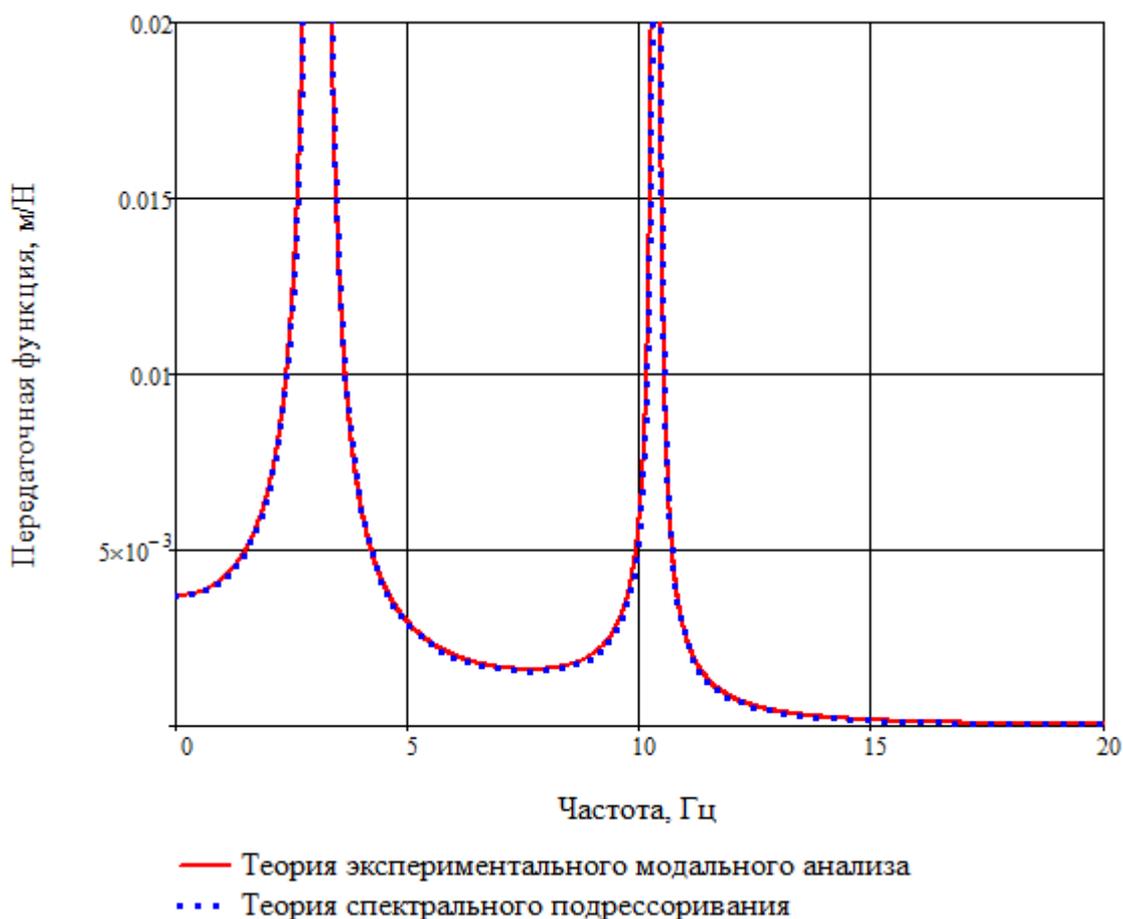


Рисунок 36 – Сопоставление передаточных функций $W_{x_2/F_2}(\omega)$

При использовании теории экспериментального модального анализа, удастся в один прием получить матрицу передаточных функций, тогда как при использовании теории спектрального подрессоривания транспортных машин для получения матрицы передаточных функций приходится последовательно прикладывать возбуждение по соответствующей обобщенной координате. Наиболее важной особенностью теории экспериментального модального анализа оказалось то, что она позволяет раскладывать полученные передаточные функции на слагаемые, соответствующие собственным формам системы (рисунки 37 и 38).

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

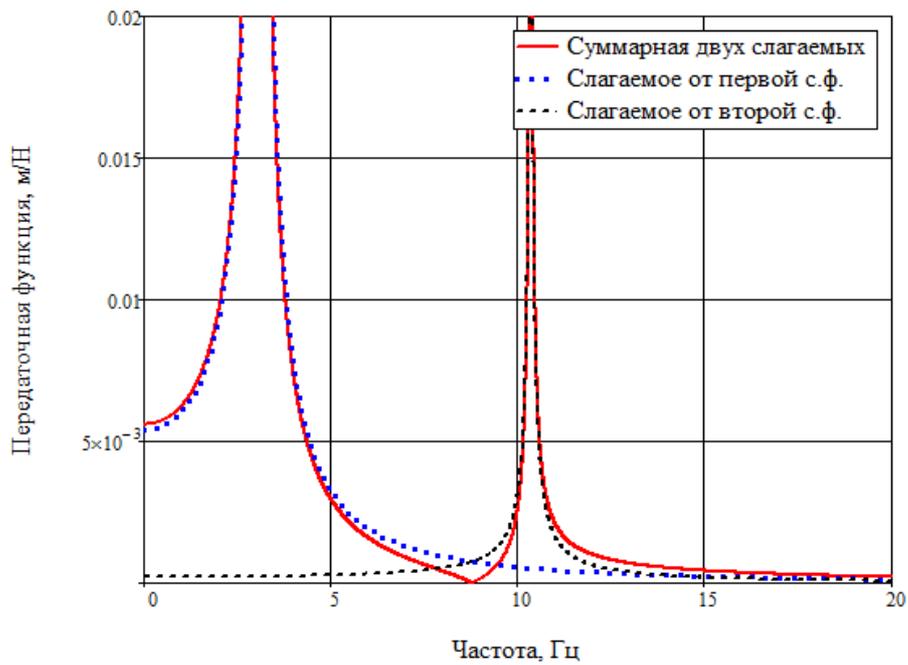


Рисунок 37 – Разложение расчетной передаточной функции $W_{x_1/F_2}(\omega)$ на модальные составляющие

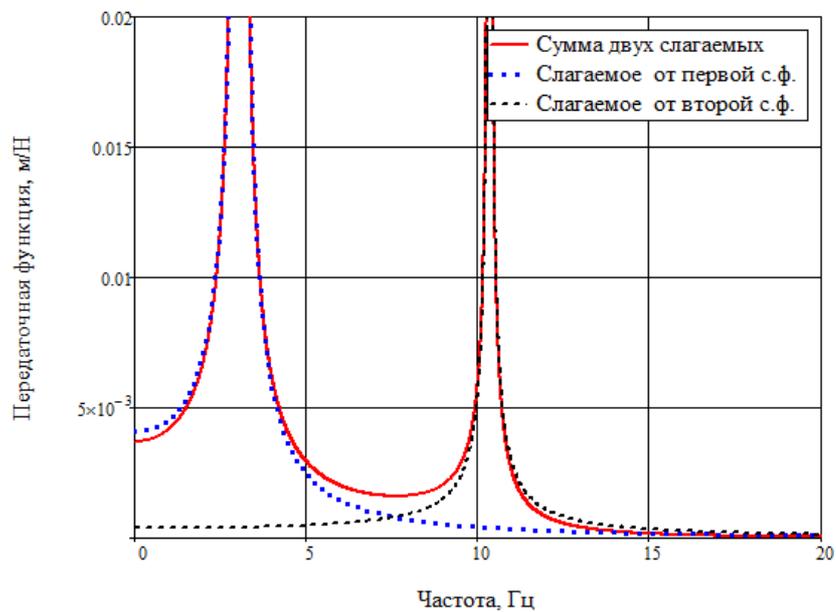


Рисунок 38 – Разложение расчетной передаточной функции $W_{x_2/F_2}(\omega)$ на модальные составляющие

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Таким образом, передаточные функции, полученные с использованием теории экспериментального модального анализа, оказались идентичны с передаточными функциями, полученными с использованием теории спектрального подрессоривания транспортных машин.

Далее было проведено сопоставление результатов расчета с результатами эксперимента. Передаточные функции, полученные разными методами, приведены на рисунках 39 и 40.

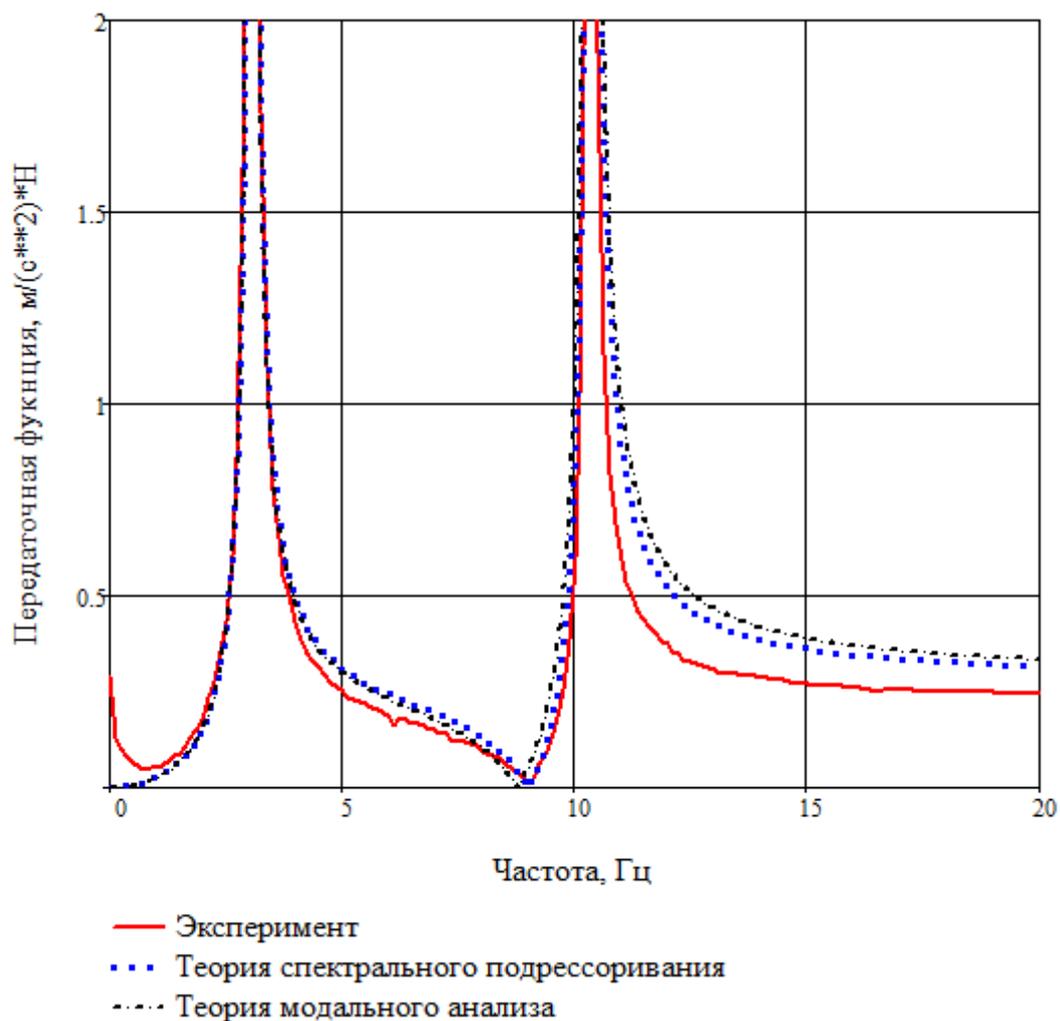


Рисунок 39 – Передаточные функции $W_{x_1/F_2}(\omega)$, полученные экспериментальным и расчетным путем

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

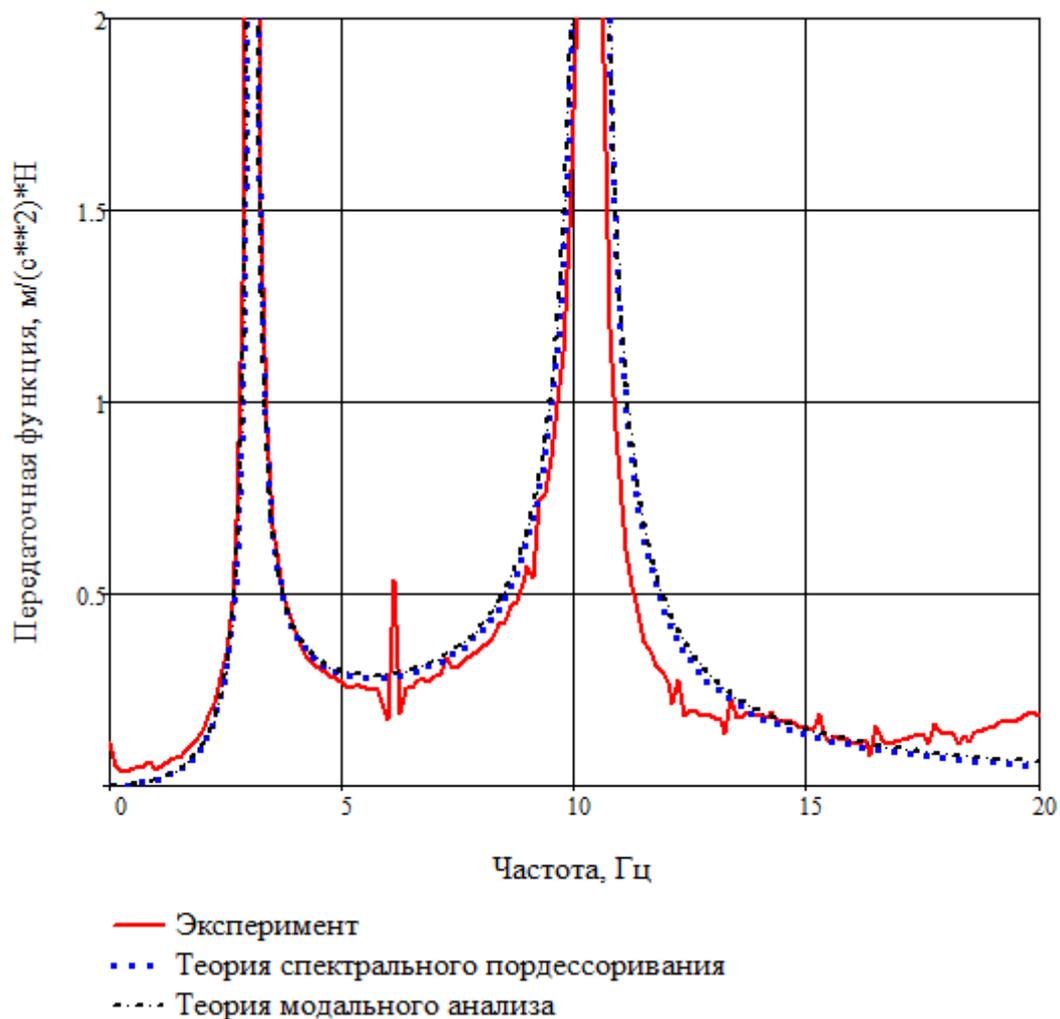


Рисунок 40 – Сравнение передаточных функций $W_{x_2/F_2}(\omega)$, полученные экспериментальным и расчетным путем

Как видно из полученных результатов, расчетные передаточные функции достаточно близки к экспериментальным данным, что говорит о совпадении встроенных в программное обеспечение методик с теорией экспериментального анализа.

Сравнение передаточных функций двух точек реального расходомера, полученных экспериментально и используя выражение (20), а также разложение передаточной функции по собственным формам приведено на рисунках 41-47.

Изм.	Лист	№докум.	Подпись	Дата

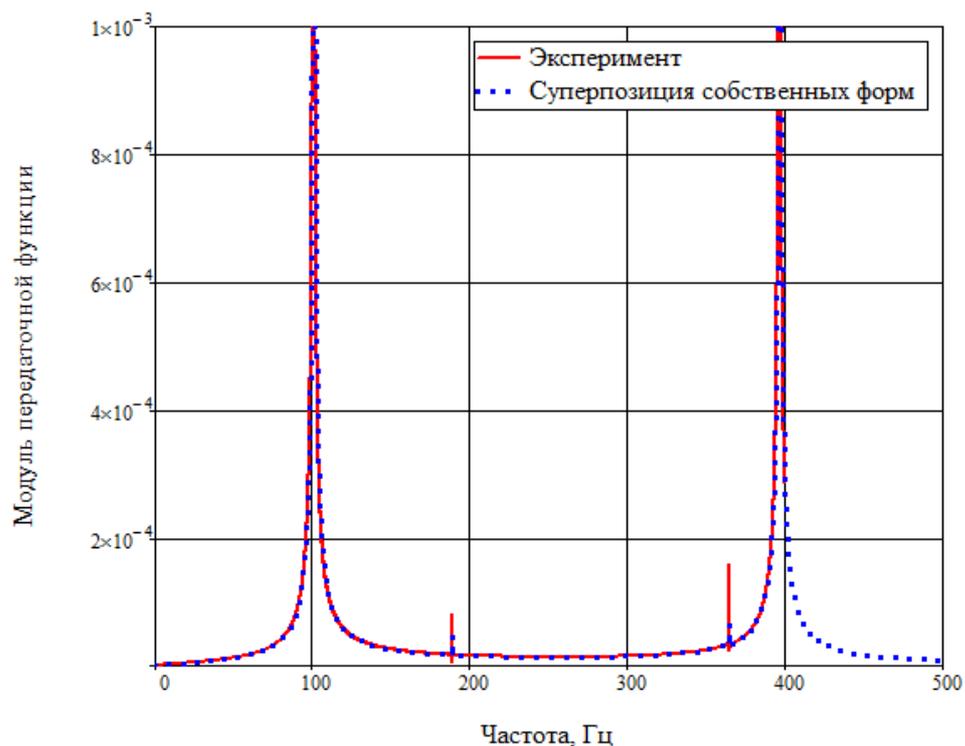


Рисунок 41 – Сравнение передаточных функций расходомера, катушка 1

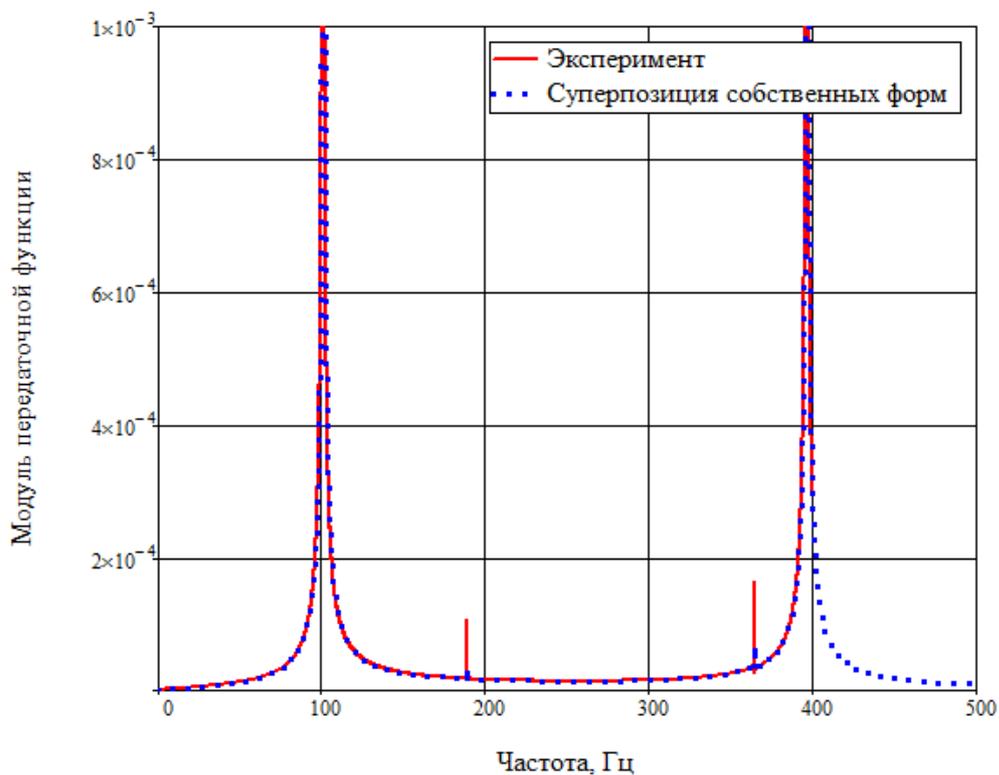


Рисунок 42 – Сравнение передаточных функций расходомера, катушка 2

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

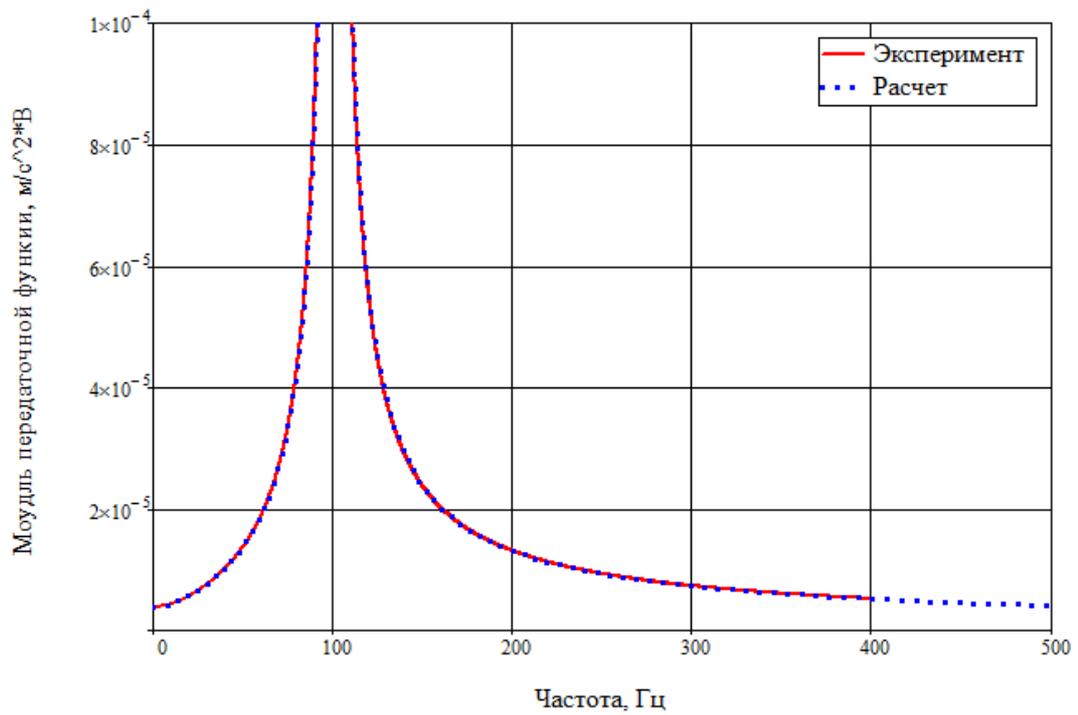


Рисунок 43 – Сравнение передаточных функций расходомера, первая собственная форма

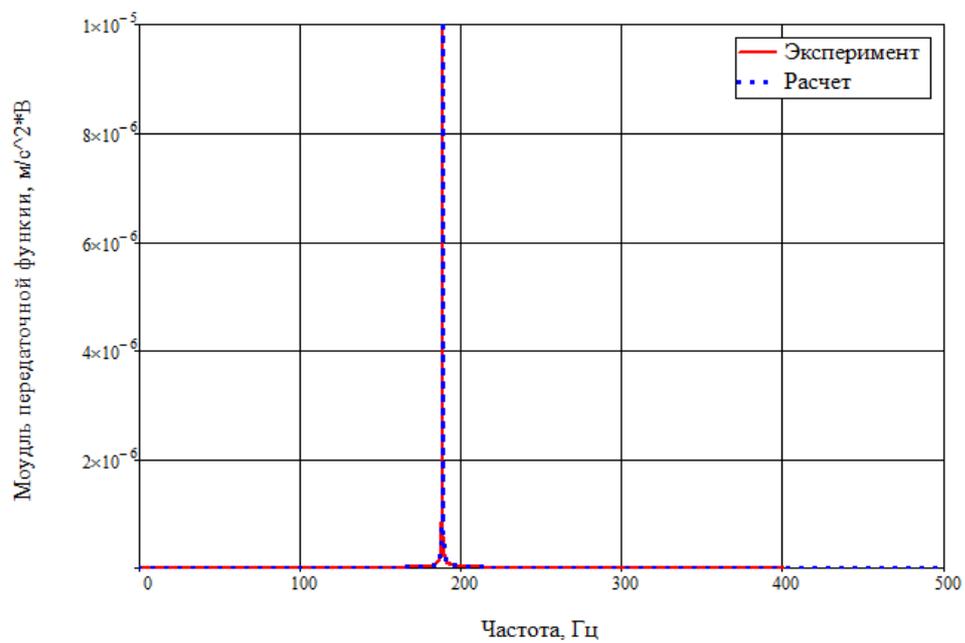


Рисунок 44 – Сравнение передаточных функций расходомера, вторая собственная форма

Изм.	Лист	№докум.	Подпись	Дата

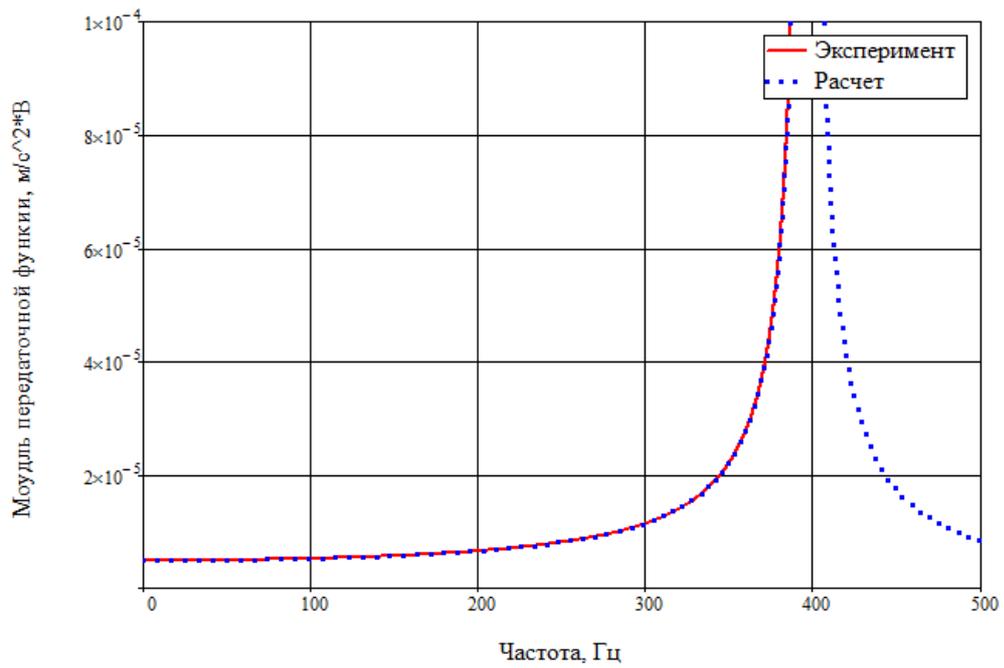


Рисунок 45 – Сравнение передаточных функций расходомера, четвертая собственная форма

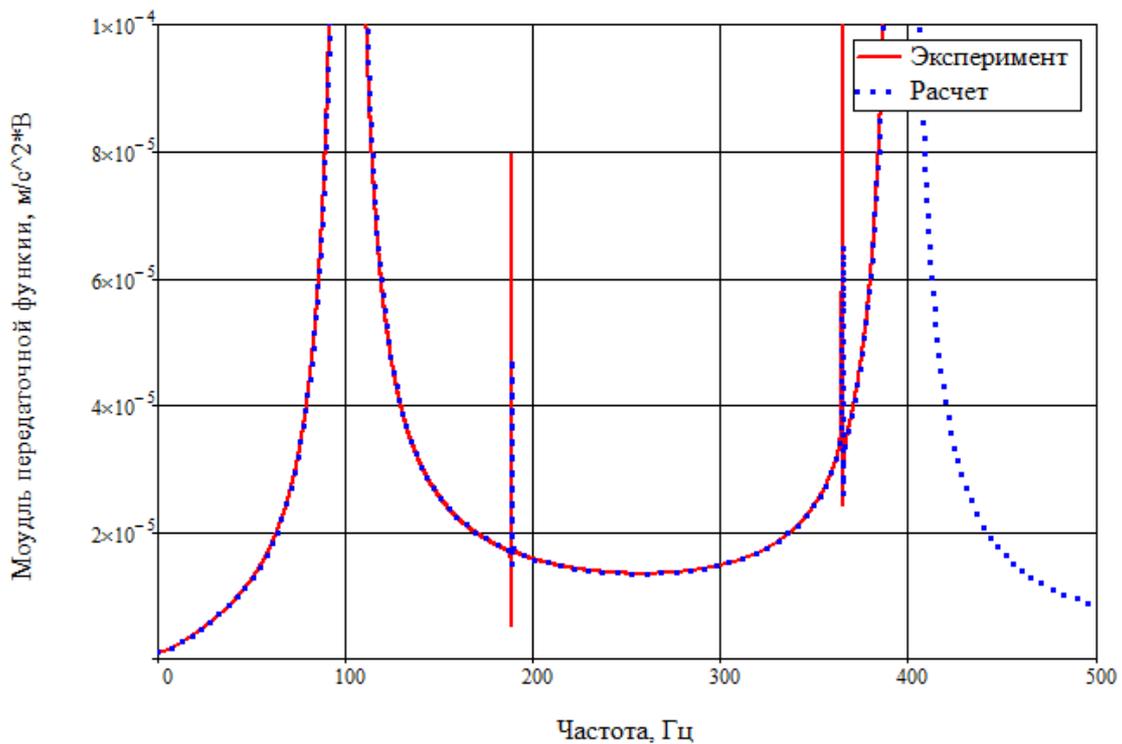


Рисунок 46 – Сравнение передаточных функций расходомера, суперпозиция собственных форм и эксперимент

Изм.	Лист	№докум.	Подпись	Дата

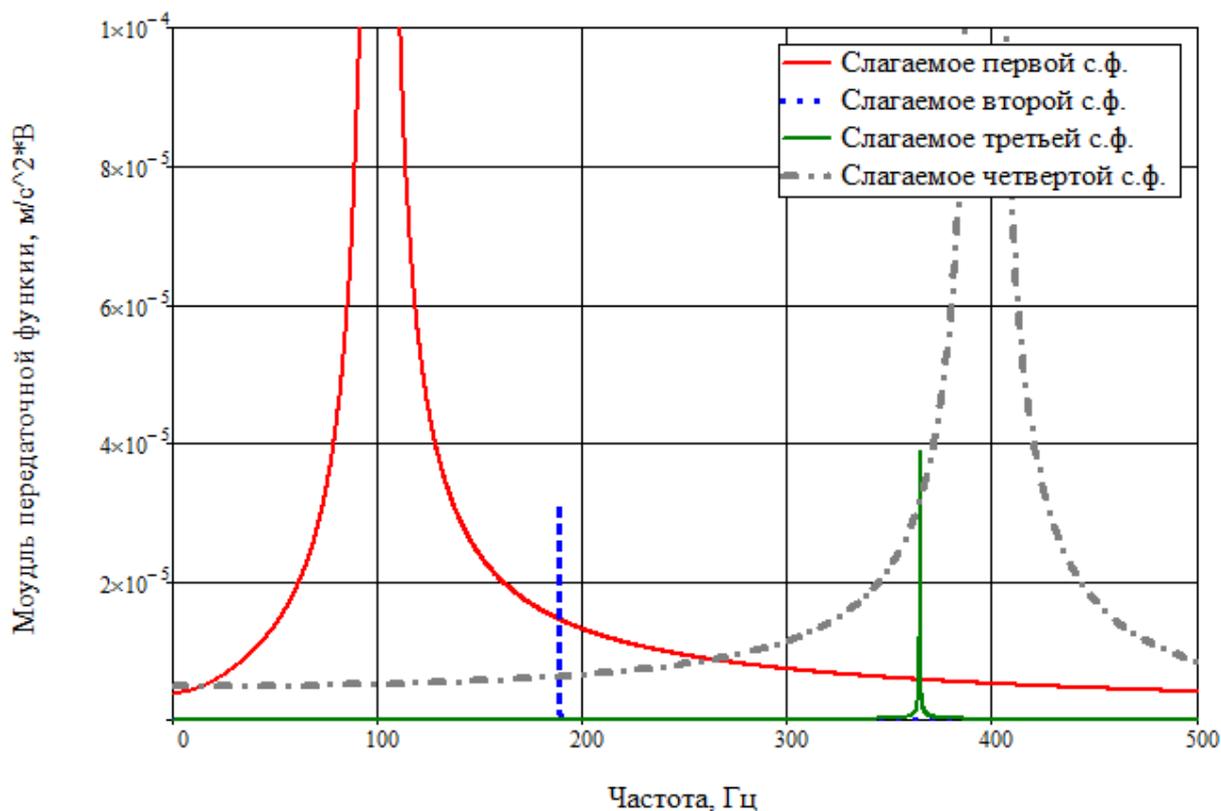


Рисунок 47 – Сравнение передаточных функций расходомера, слагаемые собственных форм

С помощью полученных выше передаточных функций можно получить отклик системы. Рассмотрим сначала простой пример системы с одной степенью свободы.

Передаточная функция для такой системы имеют следующий вид (23):

$$H(\omega) = \frac{1/M}{(i \cdot \omega - \lambda_1) \cdot (i \cdot \omega - \lambda_2)}, \quad (23)$$

где λ_1 и λ_2 – корни системы.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

3.2.1 Получение отклика системы с помощью обратного преобразования Лапласа

Отклик системы можно получить, воспользовавшись определением передаточной функции – это отношение преобразования Лапласа выходного сигнала к преобразованию Лапласа входного сигнала ($H(\omega) = \frac{L(x_2(t))}{L(x_1(t))}$).

Используем преобразование Лапласа на входном сигнале (24):

$$L(10 \cdot \sin(\omega \cdot t)) = \frac{10 \cdot \omega}{\omega^2 + s^2}. \quad (24)$$

Домножим полученный результат на передаточную функцию (23) и сделаем обратно преобразование Лапласа (25):

$$L^{-1} \left(\frac{10 \cdot \omega}{\omega^2 + s^2} \cdot \frac{1/M}{(s - \lambda_1) \cdot (s - \lambda_2)} \right) = \frac{10 \cdot \omega \cdot \omega \cdot (\cos(\omega \cdot t) \cdot (\lambda_1^2 - \lambda_2^2) + \omega^3 \cdot (e^{t \cdot \lambda_1} - e^{t \cdot \lambda_2})) + \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot (\lambda_2 - \lambda_1) + \omega \cdot (\lambda_2^2 \cdot e^{t \cdot \lambda_1} - \lambda_1^2 \cdot e^{t \cdot \lambda_2}) + \sin(\omega \cdot t) \cdot (\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot (\lambda_1 - \lambda_2))}{M \cdot (\lambda_1 - \lambda_2) \cdot \omega \cdot (\omega^2 + \lambda_1^2) \cdot (\omega^2 + \lambda_2^2)}. \quad (25)$$

Сравнение результатов, полученных с помощью обратного преобразования Лапласа и численным интегрированием, приведены на рисунке 48.

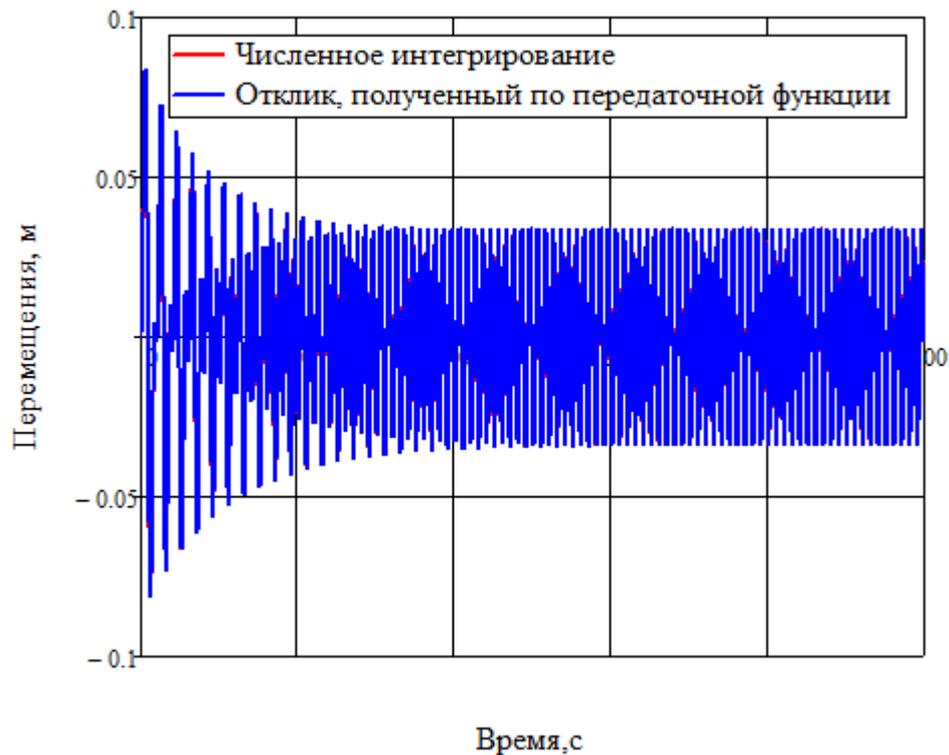


Рисунок 48 – Сравнение результатов расчетов разными методами

Как видно из приведенного выше рисунка, достигнуто полное совпадение результатов расчетов.

Рассмотрим теперь более сложный пример с использованием результатов эксперимента на реальном расходомере.

Передаточная функция имеет следующий вид (26):

$$H(\omega) = \sum_{k=1}^4 \left[\frac{(U_{re}^{(k)} + i \cdot U_{im}^{(k)}) \cdot l_k}{(i \cdot \omega - (\lambda_k^{re} + i \cdot \lambda_k^{im}))} + \frac{(U_{re}^{(k)} - i \cdot U_{im}^{(k)}) \cdot l_k}{(i \cdot \omega - (\lambda_k^{re} - i \cdot \lambda_k^{im}))} \right], \quad (26)$$

где U_{re} и U_{im} – матрицы собственных форм точек системы.

Сравнение результатов эксперимента с результатами обратного преобразования Лапласа приведено на рисунке 49.

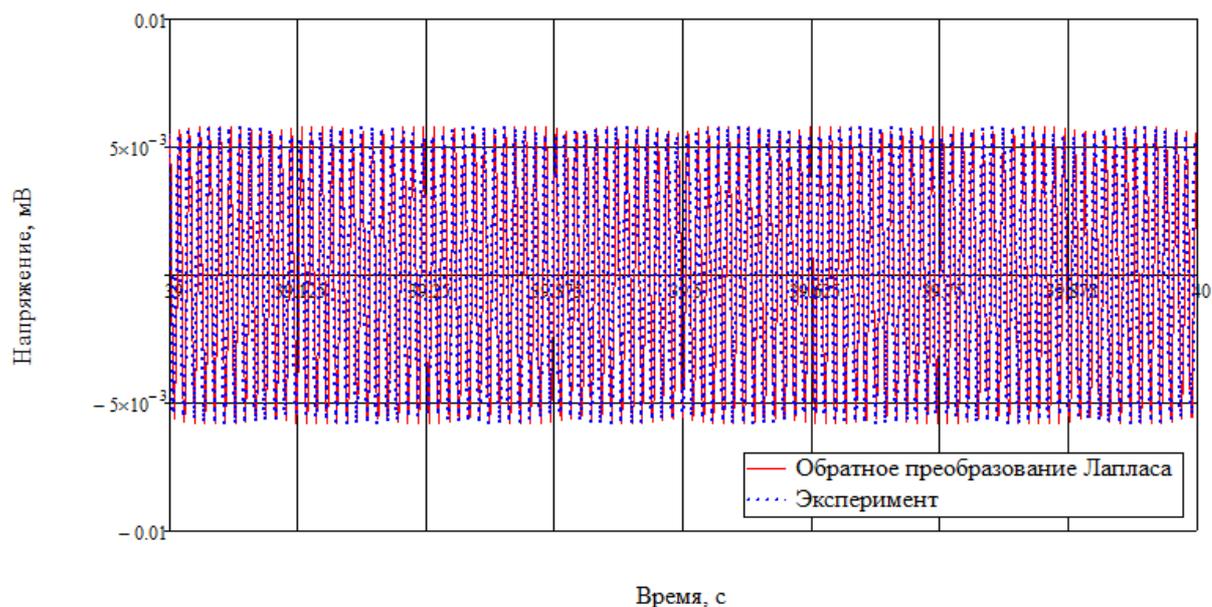


Рисунок 49 – Сравнение результатов эксперимента с результатами расчета с помощью обратного преобразования Лапласа

По частоте и фазе колебаний было достигнуто полное совпадение результатов. Однако результаты не совпали по амплитуде в 1,3 раза. Такое несоответствие результатов может быть объяснено различием понятий о передаточной функции в программном пакете, с помощью которого проводился эксперимент.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 15.04.03.2017.009 ПЗ ВКР

Лист

62

6. Разработанная модель кориолисового расходомера на основе экспериментальных передаточных функций может быть использована для построения гибридной модели, где к конечноэлементным моделям внешнего трубопровода присоединяется модель расходомера в виде экспериментальных передаточных функций (аналогично методу динамических податливостей). Такая гибридная модель поможет предсказать собственные частоты системы расходомер – трубопровод до его установки на месте эксплуатации.

7. Разработанная модель кориолисового расходомера в виде передаточных функций впервые позволяет выполнять анализ вклада в форму вынужденных колебаний собственных форм, определенных экспериментально для любой модели расходомера.

					<i>ЮУрГУ – 15.04.03.2017.009 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		64

Список литературы

1. Clark C. The influence upon Coriolis mass flow meters of external vibrations at selected frequencies / C. Clark, R. Cheesewright // Flow Meas. Instrum. – 2003. – Т. 14 – № 1–2– 33–42с.
2. Van De Ridder L. et al. Quantification of the influence of external vibrations on the measurement error of a Coriolis mass-flow meter //Flow measurement and instrumentation. – 2014. – Т. 40. – С. 39-49.
3. Van De Ridder L. B. et al. Vibration Isolation by an Actively Compliantly Mounted Sensor Applied to a Coriolis Mass-Flow Meter //Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 2016. – Т. 138. – №. 3. – С. 031005.
4. Zheng D. et al. Theoretical analysis and experimental study of Coriolis mass flow sensor sensitivity //Journal of Fluids and Structures. – 2016. – Т. 65. – С. 295-312.
5. Modeling, design, fabrication and characterization of a micro Coriolis mass flow sensor. / J. Haneveld [et al.] // J. Micromech. Microeng. 2010. Vol. 20.
6. Thomsen J. J., Dahl J. Analytical predictions for vibration phase shifts along fluid-conveying pipes due to Coriolis forces and imperfections //Journal of Sound and Vibration. – 2010. – Т. 329. – №. 15. – С. 3065-3081.
7. Enz S. Effect of asymmetric actuator and detector position on Coriolis flowmeter and measured phase shift //Flow Measurement and Instrumentation. – 2010. – Т. 21. – №. 4. – С. 497-503.
8. Enz S., Thomsen J. J., Neumeier S. Experimental investigation of zero phase shift effects for Coriolis flowmeters due to pipe imperfections //Flow Measurement and Instrumentation. – 2011. – Т. 22. – №. 1. – С. 1-9.
9. Coupled finite-volume/finite-element modelling of the straight-tube Coriolis flowmeter. / G. Bobovnik [et al.] // J. Fluid Struct. 2005. Vol. 20. P. 785–800.
10. An improved three-dimensional coupled fluid–structure model for Coriolis flowmeters. / N. Mole [et al.] // J. Fluid Struct. 2008. Vol. 24. P. 559–575.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 15.04.03.2017.009 ПЗ ВКР

Лист

65

11. Henry M. How a Coriolis mass flow meter can operate in two-phase (gas/liquid) flow / M. Henry, M. Duta, M. Tombs, H. Yeung, W. Mattar // Tech. Pap. ISA – 2004. – Т. 454– № October– 17–30с.

12. Tombs M.S. Three-phase flow measurement technique using a Coriolis flow meter and a water cut probe / M. S. Tombs, M. P. Henry – 2005. – № October 2016.

13. Hulbert G.M., Darnell I., Brereton G.J. Numerical and experimental analysis of Coriolis mass flowmeters // AIAA Tech. Paper, AIAA-95-1384-CP. 1995.

14. Keita N.M. Ab initio simulation of Coriolis mass flowmeter // 10th International Conf. on Flow Meas. FLOMEKO, Salvador, Brazil. 2000.

15. Stack C.P., Garnett R.B., Pawlas G.E. A Finite Element for the vibration analysis of a fluid-conveying Timoshenko beam // 34th AIAA/ASME Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, La Jolla, CA, Pt. 1993. Vol. 4. P. 2120–2129.

16. Wang T., Baker R.C. Manufacturing variation of the measuring tube in a Coriolis flowmeter // Comput. Control Eng. J. 2003. Vol. 14. P. 38–39.

17. Wang T., Baker R.C., Hussain Y. An advanced numerical model for single straight tube Coriolis flowmeters // J. Fluid Eng. Trans. ASME. 2006. Vol. 128. № 6. P. 1346–1350.

18. Wang S., Clark C., Cheesewright R. Virtual Coriolis flow meter: a tool for simulation and design // Proc. Inst. Mech. Eng. Part C: J. Mech. Eng. Sci. 2006. Vol. 220. № 6. P. 817–835.

19. Cheesewright R. Uncertainties associated with finite element modelling of Coriolis mass flow meters / R. Cheesewright, S. Shaw // Flow Meas. Instrum. – 2006. – Т. 17 – № 6– 335–347с.

20. Henry M.P. Two phase (gas / liquid) flow metering of viscous oil using a Coriolis mass flow meter : a case study / M. P. Henry, M. S. Tombs – 2006. – № August 2016.

30. Сафина Г. Ф. Сохранение частот колебаний трубы с жидкостью //Сибирский журнал индустриальной математики. – 2012. – Т. 15. – №. 3. – С. 124-134.

31. Пархоменко Г. Г. Исследование моментов сил, действующих на вибрационный преобразователь массового расхода //Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 1. – №. 1.

32. Kutin J., Bajsić I. An analytical estimation of the Coriolis meter's characteristics based on modal superposition //Flow Measurement and Instrumentation. – 2002. – Т. 12. – №. 5. – С. 345-351.

33. Миронов М. А., Пятаков П. А., Андреев А. А. Вынужденные изгибные колебания трубы с потоком жидкости //Акустический журнал. – 2010. – Т. 56. – №. 5. – С. 684-692.

34. Samer G., Fan S. C. Modeling of Coriolis mass flow meter of a general plane-shape pipe //Flow Measurement and Instrumentation. – 2010. – Т. 21. – №. 1. – С. 40-47.

35. Бидерман В. Л. Теория механических колебаний. – 1980.

36. Хейлен, В. Модальный анализ: теория и испытания/ Вард Хейлен, Стефан Ламменс, Пол Сас. – М.: Новатест, 2010. – 319 с.

37. Дэссинг О. Испытание конструкций. Часть 2. Анализ мод колебаний и моделирование //Брюль и Къер. – 1989

38. Силаев А. А. Спектральная теория подрессоривания транспортных машин. – 1972.

					<i>ЮУрГУ – 15.04.03.2017.009 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		68