

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)

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

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, д.ф.-м.н.

_____ В.П.Бескачко
_____ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____ С.Б.Сапожников
_____ 2017 г.

Разработка методики численного решения связанной упруго-гидродинамической задачи о
вынужденных колебаниях кориолисового расходомера с текущей двухфазной средой

наименование темы

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)
ЮУрГУ–15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР

Руководитель проекта, к.т.н., доцент

_____ (П.А. Тараненко)
_____ 2017 г.

Автор проекта

студент группы _____ П-235
_____ (М.Д. Шилин)
_____ 2017 г.

Нормоконтролёр, к.т.н., доцент

_____ (Ю.Н. Ребяков)
_____ 2017 г.

Реферат

Расчетно-пояснительная записка к выпускной квалификационной работе «Разработка методики численного решения связанной упруго-гидродинамической задачи о вынужденных колебаниях кориолисова расходомера с текущей двухфазной средой» объемом 99 листов содержит 44 листа текста, 52 рисунка, 8 таблиц.

Библиографическое описание включает 53 наименования.

КОРИОЛИСОВ РАСХОДОМЕР, ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ, МНОГОФАЗНОЕ ТЕЧЕНИЕ, ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ГИДРОДИНАМИКА, СВЯЗАННЫЙ МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНЫЙ РАСЧЕТ.

В рамках выпускной квалификационной работы с использованием пакетного комплекса ANSYS разработана методика численного решения связанной упруго-гидродинамической задачи о вынужденных колебаниях прямой трубы с текущей однофазной средой.

С использованием пакета ANSYS разработана методика численного решения связанной упруго-гидродинамической задачи о вынужденных колебаниях кориолисового расходомера с текущей однофазной средой. Проведено сопоставление результатов расчета с экспериментом.

Изучены теоретические и практические аспекты расчета течения двухфазной среды. Выполнена серия гидродинамических расчетов течения по недеформируемой трубе жидкости с одиночным пузырем и группой пузырей.

Усовершенствована методика связанной упруго-гидродинамической задачи о вынужденных колебаниях кориолисового расходомера с текущей двухфазной средой в случае равномерного распределения газовой фазы по объему.

					<i>15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Шилин М.Д.</i>			<i>Разработка методики численного решения связанной упруго-гидродинамической задачи о вынужденных колебаниях кориолисового расходомера с текущей двухфазной средой</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Пров.</i>		<i>Тараненко П.А.</i>					5	99
<i>Н.контр.</i>		<i>Ребяков Ю.Н.</i>				<i>ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (НИУ)</i>		
<i>Утв.</i>		<i>Сапожников С.Б.</i>						

Оглавление

Введение.....	9
1 Состояние вопроса и обзор существующих работ	11
1.1 Принцип работы кориолисовых расходомеров.....	11
1.2 Наиболее распространенные типы кориолисовых расходомеров.....	14
1.3 Механизмы влияния дисперсной фазы на механический отклик кориолисова расходомера	16
1.4 «Однофазная» интерпретация причин потери точности кориолисовых расходомеров в многофазных потоках	24
1.5 «Двухфазная» интерпретация причин потери точности кориолисовых расходомеров в многофазных потоках	26
1.5.1 «Пузырьковый» эффект.....	26
1.5.2 Эффект резонатора.....	27
1.5.3 Эффект неоднородного распределения пузырьков	29
1.6 Результаты испытаний кориолисовых расходомеров в условиях многофазного потока	32
1.7 Подходы к математическому моделированию кориолисова расходомера	36
1.8 Описание подходов к имитационному моделированию гидродинамических течений в проточной части кориолисовых расходомеров	40
2 Решение связанной упруго-гидродинамической задачи на примере прямолинейного деформируемого трубопровода	46
2.1 Постановка проблемы и расчетная схема	46
2.2 Применение программного пакета ANSYS и алгоритма Fluid Structure Interaction при моделировании кориолисова расходомера.....	47

2.3	Применение CFD пакета ANSYS Fluent для вычисления гидродинамических задач	50
2.4	Сходимость решения для CFD задач.....	51
2.4.1	Сходимость по среднеквадратическим невязкам	51
2.4.1	Сходимость по дисбалансу	52
2.4.1	Сходимость по интегральным величинам.....	53
2.5	Реализация связанного упруго-гидродинамического расчета.....	54
2.5.1	Алгоритм связанного упруго-гидродинамического расчета.....	54
2.5.2	Реализация расчета в программном комплексе ANSYS	55
2.6	Сравнение результатов.....	62
2.7	Выводы	64
3	Решение связанной упруго-гидродинамической задачи для кориолисова расходомера ЭЛМЕТРО-Фломак ДУ15 с текущей однофазной средой	65
3.1	Расчетная схема	65
3.2	Эксперименты на проливочном стенде кориолисова расходомера ЭЛМЕТРО-Фломак ДУ15.....	69
3.3	Сравнение результатов имитационного моделирования с экспериментальными значениями.....	69
3.4	Выводы	71
4	Решение связанной задачи упруго-гидродинамической задачи о течении двухфазной среды в трубопроводе на примере кориолисова расходомера ЭЛМЕТРО-Фломак ДУ15.....	72
4.1	Течение двухфазной среды жидкость-газ в трубопроводе	72
4.2	Возможности CFD пакета ANSYS Fluent для моделирование многофазного потока	74
4.2.1	Модель Volume-of-Fluid	75

4.2.2	Модель Mixture.....	77
4.2.3	Модель Eulerian.....	77
4.3	Решение гидродинамической задачи о течении двухфазной среды в пакете ANSYS Fluent	78
4.3.1	Постановка гидродинамической задачи о течении двухфазной среды	78
4.3.2	Задача о течении одиночного пузыря в измерительной трубке.	79
4.3.3	Задача о течении с подачей 10% газа на входе.....	82
4.4	Решение связанной упруго-гидродинамической задачи о течении двухфазной среды с помощью программного комплекса ANSYS	84
4.5	Выводы	91
	Заключение	92
	Библиографический список	95

Введение

Кориолисовый расходомер является одним из самых востребованных приборов в сфере коммерческого учета потребления жидких и газообразных материалов, что в первую очередь, связано с высокой точностью их работы и возможностью измерения как объёмного, так и массового расхода. Максимальная относительная погрешность измерения массового расхода не более 0,1%. Это означает, что при проливке через расходомер 50 литров воды погрешность измерения составит 5 мл.

Однако эти качества кориолисового расходомера в полной мере проявляются лишь при работе с однородной (однофазной) средой. Появление в измеряемой среде возмущающей компоненты, в частности газа в жидкой среде, приводит резкому росту погрешности измерения, вплоть до выхода прибора из строя.

Это существенно ограничивает возможности использования прибора в таких ключевых применениях, как измерение газового конденсата, сжиженных склонных к вскипанию технологических газов. Особую актуальность такая задача приобрела в связи с необходимостью измерять поток нефтегазовой смеси, непосредственно добываемой из нефтяных скважин.

В данный момент применяются дорогостоящие сепарационные установки, разделяющие нефть, воду и газ, после чего непосредственно и происходит измерение массового расхода. Для корректной работы прибора необходим высококачественный уровень сепарации т.к. примеру, при добыче вязкой нефти отделение газа от нефти может не произойти, что приводит к выносу попутного газа через линию жидкостного отвода, а при наличии газа жидкостной счётчик в жидкостной линии даёт ошибочные данные, и ошибка эта может достигать 200%.

Усовершенствование конструкции кориолисова расходомера поможет снизить качество сепарации и тем самым понизить её стоимость.

									Лист
									9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР				

Заставить кориолисов расходомер измерять любую многофазную среду вряд ли представляется возможным. К примеру, если газосодержание в протекающей среде мало и реализуется равномерный пузырьковый режим, то расходомер может работать без проблем. Но если содержание газа велико (или вязкость слишком низкая), то жидкость будет «отслаиваться», а колебания измерительных трубок начнут затухать.

В рамках выполнения ФЦП по разработке отечественного массового кориолисового расходомера для нефтегазовой промышленности с функцией измерения расхода многофазных потоков, планируется создать прибор, позволяющий выполнять измерения со следующими пределами допускаемой основной относительной погрешностью:

- 0,2% при отсутствии возмущающей компоненты в потоке;
- 0,5% при содержании объемной доли газа в 0,5%;
- 1,0% при содержании объемной доли газа в 1,5%;
- 2,5% при содержании объемной доли газа в 5%.

Как показал обзор существующих работ по данной тематике, построение удовлетворительной количественной модели прохождения двухфазного потока через кориолисов расходомер – актуальная и до сих пор нерешенная задача. Таким образом, созданная в ходе выполнения выпускной квалификационной работы модель может дать представления, об эффектах, происходящих при протекании двухфазной среды, действующих со стороны жидкости и газа силах и «физике» протекающих в измерительных трубках процессов.

1 Состояние вопроса и обзор существующих работ

1.1 Принцип работы кориолисовых расходомеров

Кориолисовый расходомер состоит из датчика расхода и электронного преобразователя. Датчик преобразует расход и плотность среды, а также температуру сенсорных трубок в электрические сигналы. Электронный преобразователь конвертирует полученную от датчика информацию в цифровой сигнал и в стандартные выходные сигналы.

Поток жидкости в датчике проходит через пару симметричных изогнутых измерительных трубок, колеблющихся с определенной частотой. Форма колебаний одной из этих трубок показана на рисунке 1.1. Трубка приводится в движение электромагнитной катушкой, расположенной в центре изгиба трубки.

Измеряемой среде, проходящей через трубку, придается вертикальная составляющая движения вибрирующей трубки. При движении вверх во время первой половины цикла колебания (рисунок 1.2) жидкость, втекающая в трубку, создает сопротивление движению вверх, давя на трубку вниз. Поглотив вертикальный импульс при движении вокруг изгиба трубки, жидкость, вытекающая из трубки, сопротивляется уменьшению вертикальной составляющей движения, толкая трубку вверх. Это приводит к закручиванию трубки (рисунок 1.3). Когда трубка движется вниз во время второй половины цикла колебания, она закручивается в противоположную сторону. Это закручивание называется эффектом Кориолиса.

Исходя из второго закона Ньютона, угол закручивания трубки датчика прямо пропорционален количеству жидкости, проходящей через трубку в единицу времени. Электромагнитные катушки-детекторы, расположенные с каждой стороны трубки, снимают сигнал, соответствующий колебаниям трубки. Массовый расход определяется путем измерения временной задержки между сигналами детекторов. При отсутствии потока закручивания трубы не происходит, и между сигналами детекторов нет временной разности.

									Лист
									11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР				

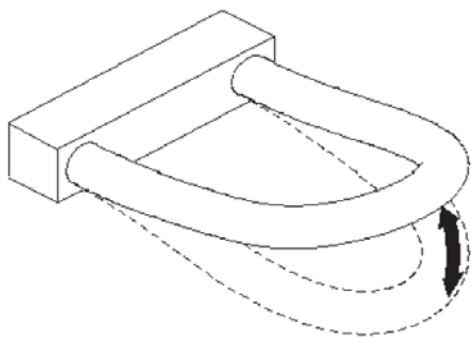


Рисунок 1.1 – Колебания трубки датчика

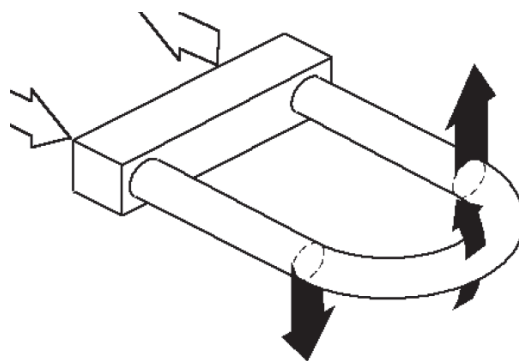


Рисунок 1.2 – Силы, действующие на трубку при движении вверх

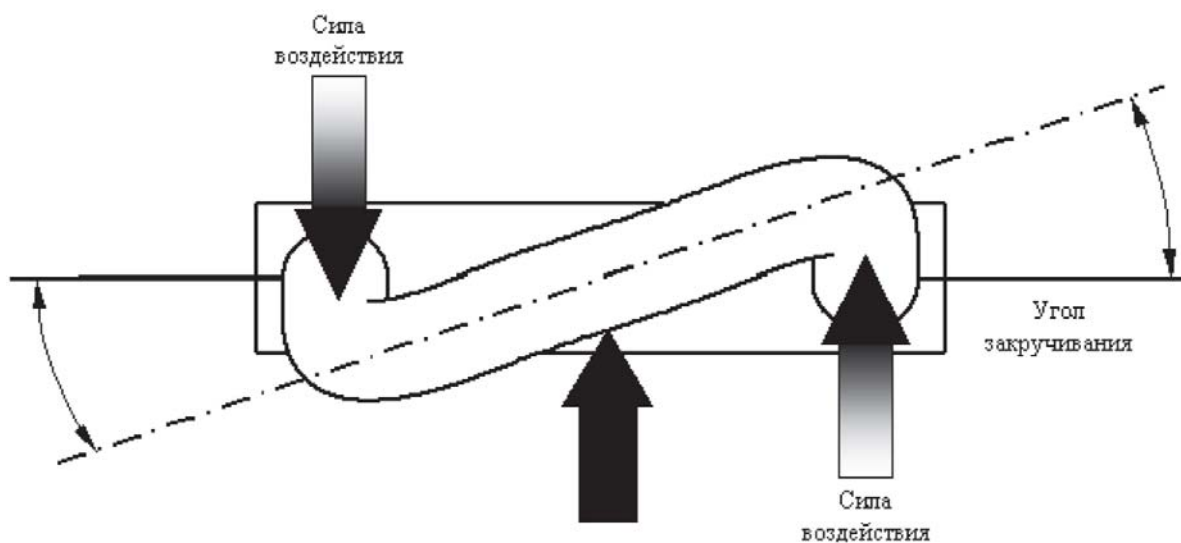


Рисунок 1.3 – Трубка датчика и пара сил, приводящая ее к закручиванию

При наличии потока труба закручивается, при этом возникает разность по времени в поступлении двух сигналов по скорости. Эта разница во времени прямо пропорциональна массовому расходу.

Собственная частота колебаний сенсорных 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.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата
------	------	----------	--------	------

15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР

Лист

12

В [1] анализируются перспективы перехода пользователей расходомеров от классического типа, под которыми подразумеваются расходомеры, основанные на измерении дифференциального давления, к расходомерам, основанным на новых технологиях. Под новыми технологиями в [1] подразумевают технологии, имеющие четыре общих признака:

- они были разработаны после 1950 года;
- они включают последние технологические достижения;
- они находятся в центре внимания разработчиков новых продуктов;
- они позволяют достичь более высоких показателей, чем с помощью традиционных технологий расходомерии.

Таким образом, кориолисовы расходомеры попадают в перечень устройств, основанных на новых технологиях.

В качестве основных причин перехода на новые технологии называются:

- точность (погрешность менее 0,5%);
- надежность;
- низкие расходы на обслуживание.

Объем используемых расходомеров, в зависимости от принципа действия [1] приведен на рис. 1.4.

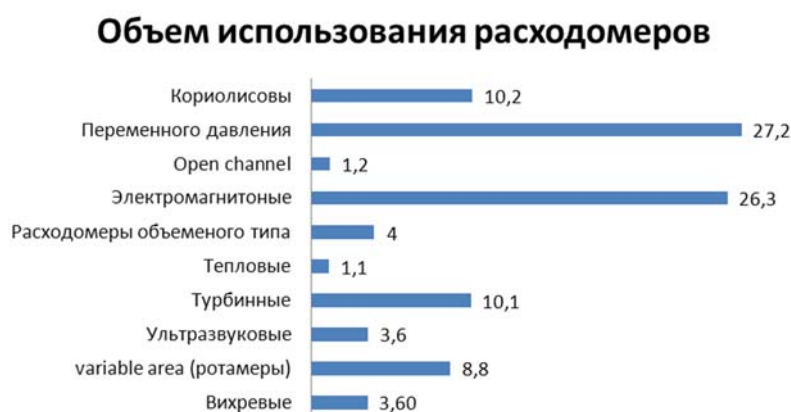


Рисунок 1.4 – Объем используемых расходомеров, в зависимости от принципа действия

1.2 Наиболее распространенные типы кориолисовых расходомеров

Основными производителями кориолисовых расходомеров являются следующие компании:

- MicroMotion;
- Yokogawa;
- Endress+Hauser;
- Siemens;
- Foxboro/Invensys/SchneiderElectric;
- Krohne.

Конструкция кориолисового расходомера может иметь различные вариации исходя из предъявляемых требований к точности и пропускной способности, а также стоимости и сложности изготовления.

В основной номенклатуре выпускаемых изделий указанных выше производителей присутствуют следующие типы кориолисовых расходомеров:

а) Прямоточный (рисунок 1.5):

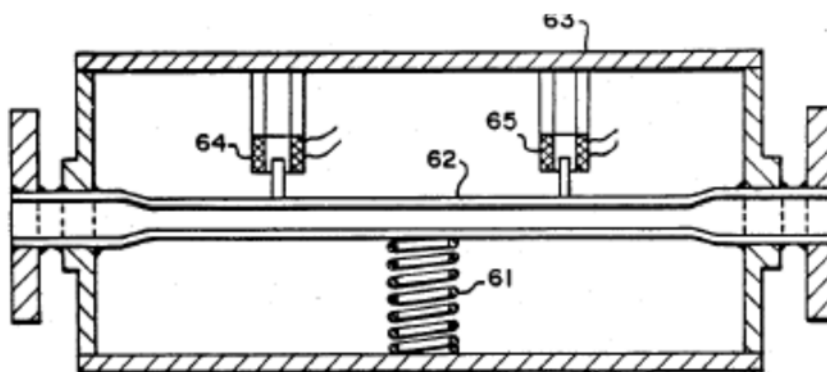


Рисунок 1.5 – Прямоточный кориолисовый расходомер
(US patent 4831885 [2])

Особенности: высокая частота собственных колебаний ($>1\text{кГц}$).

Преимущества: высокая пропускная способность. Минимальное сопротивление потоку.

Недостатки:

– Относительно малая точность измерения даже при больших потоках.

– Очень малая добротность колебательной системы, что требует значительно высоких затрат энергии на поддержание колебаний.

б) С большим радиусом изгиба (рисунок 1.6):

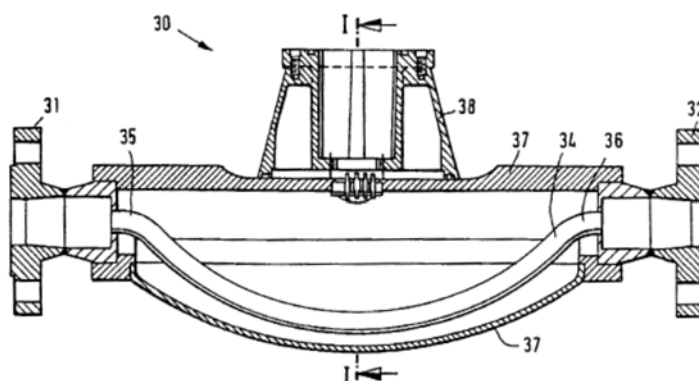


Рисунок 1.6 – Кориолисовый расходомер с большим радиусом изгиба
(US patent 5796011 [3])

Особенности: частота собственных колебаний (300-600 Гц).

Преимущества: высокая пропускная способность.

Недостатки:

- Относительно малая точность измерения даже при малых потоках.
- Низкая добротность колебательной системы, что требует дополнительных затрат энергии на поддержание колебаний.

в) U-образные (рисунок 1.7):

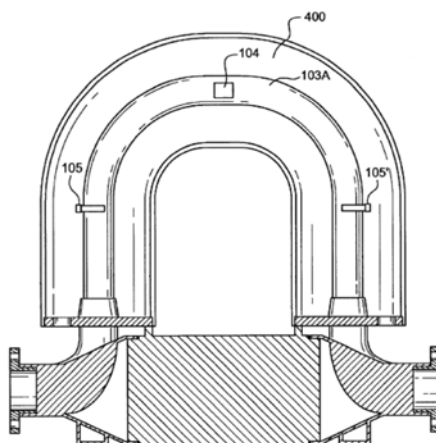


Рисунок 1.7 – U-образный кориолисовый расходомер (US patent 6286373 [4])

Особенности: частота собственных колебаний (100-300 Гц).

Преимущества:

- Высокая точность измерений.

– Высокая добротность колебаний.

Недостатки: сложность изготовления.

д) В виде треугольника (рисунок 1.8):

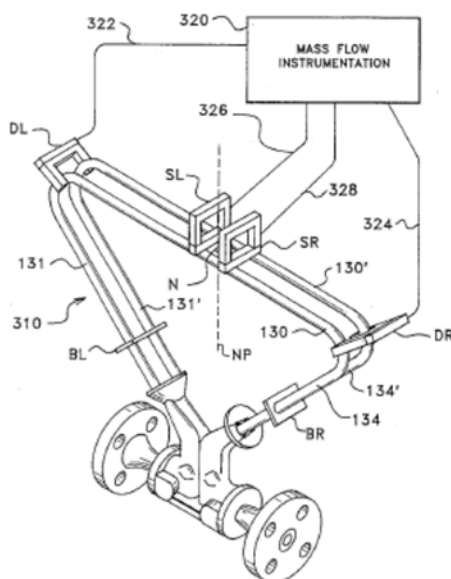


Рисунок 1.8 – Кориолисовый расходомер в виде треугольника
(US patent 5497666 [5])

Особенности: частота собственных колебаний (40-150 Гц).

Преимущества:

– Высокая точность измерений.

– Высокая добротность колебаний.

Недостатки: сложность изготовления.

1.3 Механизмы влияния дисперсной фазы на механический отклик кориолисова расходомера

Массовые кориолисовы расходомеры (МКР) способны измерять массовые расходы и плотности однородных жидкостей и газов с очень высокой точностью (до 0,05% по расходу и до 0,0002 г/см³ по плотности). МКР имеют внутреннее преимущество по сравнению с объемными расходомерами при измерениях количества чистой жидкости и в потоках жидкость-газ, так как массовый расход смеси в этом случае близок к массовому потоку одной только жидкости. Однако, эти преимущества непосредственно не реализуются по причине быстрой потери точности измерений уже при небольших объемных содержаниях газа (5-10%).

Принцип действия МКР основан на наблюдениях за движениями чувствительного элемента – изогнутого участка трубопровода, подвергнутого вынужденным колебаниям в направлении, перпендикулярном потоку. В присутствии движущейся среды такие колебания приводят к возникновению распределенных вдоль трубы осциллирующих сил инерции (кориолисовых сил) с суммарным моментом, возбуждающим изгибные колебания чувствительного элемента (измерительной трубы). Непосредственно измеряемой величиной является обычно сдвиг по фазе между колебаниями краев измерительной трубы

$$\Delta\Phi = 2\pi(\Delta\tau / T_C), \quad (1.1)$$

где T_C – период изгибных (кориолисовых) колебаний измерительной трубы; $\Delta\tau$ – запаздывание по времени между фазами колебаний ее краев, чаще всего – отрезок времени между прохождениями краями плоскости механического равновесия.

Если предположить, что частицы текучей среды (флюида) испытывают в процессе измерений те же поперечные смещения, что и стенки трубы, тогда наблюдаемый сдвиг (1.1) удастся однозначно связать с массовым расходом флюида. Это предположение вполне оправдывается, если жидкость однородна, несжимаема и целиком заполняет объем трубы, то есть, если изучается однофазный поток несжимаемой жидкости. При наличии нескольких фаз или компонентов разной плотности это предположение несправедливо и приводит к ошибкам, уровень которых намного превосходит таковой для однородных текучих сред и неприемлем для многих приложений МКР.

По-видимому, вопрос о корректных способах измерения массовых расходов и плотности транспортируемой многофазной текучей среды с помощью МКР возник вместе с появлением самих МКР, а интерес к его решению поддерживался и поддерживается до сих пор успехами применения этого вида расходомеров в однофазном случае. Разные стороны этого

вопроса изучались во множестве исследований. Они позволили к настоящему времени существенно продвинуться на главных направлениях его решения:

а) понимание физических механизмов воздействия многофазного потока на чувствительные элементы расходомера;

б) создание работоспособных аналитических и численных моделей этого взаимодействия, позволяющих правильно интерпретировать опытные данные;

в) разработка конструкции МКР, обеспечивающей необходимую чувствительность прибора по отношению к эффектам многофазности потока;

г) аппаратное и программное обеспечение процесса измерений.

Уменьшение уровня ошибок МКР, вызванных многофазностью потока, возможно в результате дальнейшего прогресса в указанных выше направлениях.

В последние годы ведущие производители МКР (например, Micro Motion) установили высокий приоритет исследованиям по повышению точности измерений параметров многофазных потоков. Были разработаны экспериментальные установки для изучения влияния газа на работу МКР различных конструкций и получены огромные объемы данных, большая часть которых не имеет особого смысла до тех пор, пока не изучены физические механизмы, вызывающие ошибки измерений. Благодаря осмыслению опытных данных были внесены изменения в электронные системы управления расходомером, позволившие оперативно обрабатывать переходные явления, вызванные, например, прохождением через измерительную трубу крупных пузырей газа при возбуждении снарядного режима течения.

Хотя эти исследования и позволили значительно улучшить характеристики МКР, однако стало ясно, что существенная часть ошибки обусловлена эффектом расщепления фаз, и что, «к сожалению, никакие конструктивные изменения не могут отменить законы Ньютона» [6,7].

									Лист
									18
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР				

Стала ясна необходимость лучше понять физические причины падения точности МКР.

Из тех свойств, которые отличают одну фазу от другой, наиболее существенными для работы МКР являются свойства, влияющие на механические движения флюида в целом и составляющих его компонентов. К ним относится, прежде всего, плотность, а также реологические свойства (вязкость, упругость и пластичность). Важными являются также свойства, зависящие от природы всех сосуществующих фаз – межфазные натяжения, определяющие форму, размеры и расположение частиц дисперсных фаз, термодинамические условия их существования.

Поскольку работа МКР основана на использовании явления инерции, наиболее важным свойством, определяющим отклик прибора на движение флюида, является его плотность. Если флюид состоит только из одной текучей фазы, тогда плотность является величиной хорошо определенной: однородно распределенной по всему объему флюида, не зависящей от выбора контрольного объема, по массе которого судят о плотности в месте расположения этого объема, и от состояния движения флюида. Для многофазных потоков эти свойства уже не имеют места, за исключением редких случаев, когда плотности фаз, составляющих флюид, близки. Если же они заметно различаются, такой флюид не может в земных условиях (в поле тяжести) находиться в однородном состоянии, ни в состоянии покоя, ни в состоянии движения. В состоянии покоя будет происходить пространственное разделение фаз, в результате которого более плотная фаза окажется внизу сосуда. В состоянии движения к гравитационному механизму разделения фаз добавляется также и инерционный: частицы более плотной фазы труднее изменяют состояние своего движения в тех местах, где поток движется с ускорением и поэтому концентрируются вблизи или на поверхностях, ограничивающих поток в этих местах. Эти процессы инерционного разделения фаз давно и широко используются в технике. Заметим, однако, что при движении флюида может происходить и

										Лист
										19
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР					

противоположный процесс – перемешивание компонентов и гомогенизация потока, возникающий вследствие того, например, что одна из фаз течет в турбулентном режиме. Таким образом, в движущихся неоднородных потоках процесс разделения фаз может как усиливаться, так и ослабляться в зависимости от характера потока и свойств частиц, составляющих отдельные фазы.

Если флюид – однородная и несжимаемая жидкость, целиком заполняющая измерительную трубу, тогда центр масс (ЦМ) в каждом ее поперечном сечении остается неподвижным относительно стенок трубы во все время движения. Если помимо жидкости (непрерывной фазы) в потоке присутствует вторая фаза, дисперсная или нет, тогда предыдущее утверждение оказывается неверным, и теория, связывающая наблюдаемые параметры движения чувствительного элемента МКР с потоками фаз, нуждается в коррекции или пересмотре.

Если дисперсная фаза более плотная по сравнению с непрерывной, тогда при ускоренном движении трубы частицы этой фазы имеют меньшее ускорение и ЦМ смещается в направлении, противоположном ускорению. Наоборот, менее плотные частицы дисперсной фазы приобретают большее ускорение и смещаются в направлении ускорения. Этот механизм смещения ЦМ называют «расцеплением фаз». Смещение центра масс смеси в поперечном сечении трубы при ее ускоренном движении показано на рисунке 1.9. Эффекты расцепления фаз тем более существенны, чем больше разница их плотностей, как, например, в потоках жидкость-газ, газ-твердое тело.

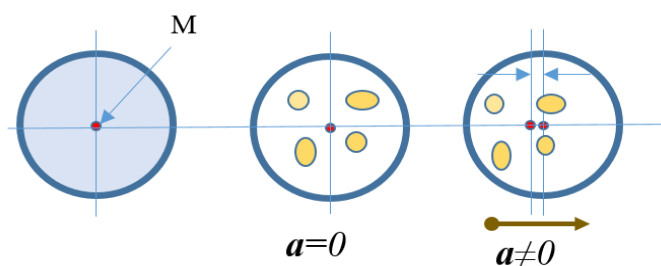


Рисунок 1.9 – Смещение центра масс смеси в поперечном сечении трубы при ее ускоренном движении

С математической точки зрения задача о движении сферических тел, погруженных в осциллирующую жидкость, не является простой, и много усилий было потрачено на разработку надежных численных методов ее решения даже в простейших случаях течений Стокса. Такой подход малопригоден для инженерных целей, особенно если движение сферы нужно отслеживать в режиме реального времени и без использования суперкомпьютера. Один из работоспособных вариантов решения этой проблемы был предложен в [6,7].

Помимо эффектов расщепления фаз в МКР может наблюдаться снижение точности от акустических эффектов, проявляющихся, когда скорость звука в измеряемой жидкости мала или частота колебаний расходомера велика. Скорость звука в жидкости больше, чем в газе, но самые низкие скорости наблюдаются в смесях этих двух фаз. Добавление даже небольшого количества газа в жидкость приводит к резкому снижению скорости звука в смеси, ниже, чем в любой из фаз.

Скорость звука в смеси c_m определяется как [8]

$$c_m = \sqrt{\frac{B_m}{\rho_m}}, \quad (1.2)$$

где B_m – объемный модуль упругости смеси, а ρ_m – ее плотность.

Небольшое количество газа резко увеличивает сжимаемость смеси, уменьшая B_m , в то время как плотность ρ_m смеси остается близкой к плотности жидкости. Сжимаемость смеси аналогична жесткости составной пружины, состоящей из нескольких пружин, соединенных последовательно; каждой пружине отвечает сжимаемость данного компонента или фазы жидкости. Высокая сжимаемость газовой фазы аналогична мягкой пружине, и сжимаемость полученной смеси будет высока. Распространено заблуждение по поводу того, почему скорость звука в смесях падает. Часто считают, что волны давления сталкиваются с фазовыми границами и замедляются. На самом деле, уменьшение скорости звука происходит целиком из-за того, что сжимаемость резко возрастает при появлении всего

только нескольких пузырьков, в то время как плотность смеси остается высокой.

Колебания трубки расходомера возбуждают звуковые волны, колебания частиц в которых происходит в поперечном направлении на частоте возбуждения прибора. Когда скорость звука во флюиде высока, как в однофазной жидкости, первая акустическая мода для поперечных звуковых волн поперек круглого трубопровода имеет гораздо более высокую частоту, чем частота привода. Однако, когда скорость звука падает из-за добавления к жидкости газа, частота акустической моды также падает. Когда частота акустической моды и частота привода близки, возникают ошибки измерений из-за нерезонансного возбуждения акустической моды модой привода. В целом, моды колебаний структуры или жидкости, близкие по частоте к частоте привода, приводят к ошибкам измерений МРМ. Для низкочастотных МКР и типичных давлений процесса акустические эффекты, присутствующие в многофазных потоках, обычно пренебрежимо малы по отношению к заданной точности прибора. Однако для высокочастотных МКР, работающих при низких давлениях с пузырьковыми жидкостями, скорость звука может оказаться достаточно низкой, чтобы вызвать существенные ошибки измерений из-за взаимодействия между приводом и вибрационными модами жидкости.

Более физическим объяснением звуковых эффектов в МКР является то, что жидкость в трубе сжимается вблизи стенки при каждом колебании, если сжимаемость смеси достаточно высока. Таким образом, звуковые эффекты аналогичны эффектам развязки фаз в том смысле, что фактически ошибка вызывается перемещением положения ЦМ. Разница заключается в том, что звуковые эффекты приводят к движению более плотной фазы в направлении ускорения трубки, в то время как при расцеплении фаз более плотная фаза движется в направлении, противоположном ускорению трубки. По этой причине оказывается, что акустические ошибки положительны, а ошибки расцепления фаз отрицательны. Это подтверждается в

										Лист
										23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР					

работах [9] и [10], в которых количественно оцениваются ошибки массового расхода и плотности из-за звуковых эффектов. Два упомянутых исследования используют различные методы для определения ошибок, но для условий, типичных для МКР, результаты эквивалентны.

1.4 «Однофазная» интерпретация причин потери точности кориолисовых расходомеров в многофазных потоках

Даже при измерениях однофазных потоков МКР достигают высокой точности только при выполнении определенных условий, касающихся конструкции прибора, характеристик потока и качества системы управления прибором. Известно, например, что МКР уязвимы для периодических пульсаций потока, неидеальности детекторов, к расположению актуаторов (привода), несовершенству профилей скорости, несовершенству свойств материалов, колебаниям внешней температуры. В многофазном случае, очевидно, все эти источники погрешностей остаются, и к ним добавляются новые. Представляется, что действие некоторых из новых источников можно качественно понять, обратившись к истолкованию действия старых. Имеются в виду следующие параллели в причинах снижения точности МКР при измерениях в одно- и двухфазных потоках.

В многофазном случае, особенно для смесей газ-жидкость, поток характеризуется неоднородным распределением плотности, пространственные и временные масштабы которого могут сильно изменяться в зависимости от режима течения. Исключая режимы с полным разделением фаз на две объемные непрерывные фазы (слоистый и кольцевой потоки), в остальных случаях, когда одна из фаз дискретна, распределение плотности является существенно случайной функцией пространственных координат и времени. При малом газосодержании и пузырьковом режиме течения пространственный масштаб флуктуаций плотности также мал, по сравнению, например, со снарядным или пробковым режимом, где газовый пузырь может занимать значительную часть или даже все сечение трубы и вытягиваться вдоль нее на расстояния порядка диаметра. Ясно, что с точки зрения методики однофазных

									Лист
									24
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР				

МКР такие потоки должны рассматриваться как пульсирующие со случайным распределением импульсов по величине и во времени. В литературе известно исследование реакции МКР на пульсирующий поток, но в случае, когда пульсации являются периодическими, более того – гармоническими [11, 12]. Тем не менее, полезно рассмотреть влияние пульсаций потока на показания МКР даже в этом случае, чтобы иметь представление о возможных механизмах этого влияния. Кроме того, присутствие флуктуаций плотности во флюиде в механическом отношении аналогично флуктуациям распределения массы на трубе, то есть, несовершенству конструкции чувствительного элемента прибора. Разница только в том, что последние флуктуации – статические, а не динамические, как в потоке. Эта разница может оказаться и не такой существенной, все дело во временных масштабах: времени жизни флуктуации плотности по отношению к периоду рабочих колебаний МКР. Если существуют пузыри или их скопления, способные удержаться около какой-либо неоднородности в трубе (например, колена) несколько периодов колебаний, их влияние можно попытаться оценить по той же схеме, что и влияние дополнительной массы, присоединенной (скорее – отсоединенной) к этому месту на трубе.

Изложенные выше соображения показывают, что при обсуждении работоспособности МКР в многофазных потоках полезно обратиться к некоторым аспектам работы МКР в однофазных потоках. обстоятельный обзор и анализ причин потери точности однофазными МКР представлен в работе [13]. Четыре фактора, влияющих на точность, прецизионность и надежность МКР, понимание механизмов действия которых полезно и в многофазном случае это:

- а) пульсации потока;
- б) асимметричность расположения привода и детекторов положения;
- в) несовершенство профиля скорости жидкости;
- г) структурные неоднородности конструкции.

1.5 «Двухфазная» интерпретация причин потери точности кориолисовых расходомеров в многофазных потоках

1.5.1 «Пузырьковый» эффект

При прохождении через кориолисовый расходомер жидкости, содержащей свободный газ, амплитуда колебаний пузырьков газа больше амплитуды колебаний измерительных трубок прибора. В результате этого эффекта возникает дополнительная погрешность расходомера, которую можно оценить по формуле

$$E = -2 \cdot \alpha / (1 - \alpha) \quad (1.3)$$

где α – объемное содержание свободного газа в жидкости, $0 < \alpha < 1$.

Таким образом, данный эффект приводит к возникновению отрицательной систематической погрешности кориолисова расходомера. Формула (1.3) получена без учета размеров пузырьков, вязкости жидкости и частоты колебаний трубок расходомера; учет влияния этих параметров выполнен в [14].

В горизонтальных трубах распределение фаз по сечению зависит от соотношения сил инерции и Архимеда, определяемого критерием Фруда

$$Fr = W / g \cdot d, \quad (1.4)$$

где W – характерный масштаб скорости; g – ускорение свободного падения, характеризующие действие внешней силы; d – характерный размер области, в которой рассматривается течение.

При малых значениях скорости потока может произойти расслоение двухфазного потока на жидкую и паровую фазы. На расслоение потока также оказывает влияние и диаметр трубы – чем больше диаметр трубы, тем легче возникает расслоение.

Область применения теории пузырькового эффекта ограничена, поскольку существенное влияние на поведение свободного газа в жидкости оказывает режим двухфазного потока в измерительной трубке. При горизонтальной установке расходомера получить такой режим на практике

практически нереально. Такой режим потока может быть получен только при *вертикальной* установке прибора, имеющего прямые или слабо изогнутые измерительные трубки.

Режимы течения двухфазного потока в горизонтальных каналах изображены на рисунке 1.10.

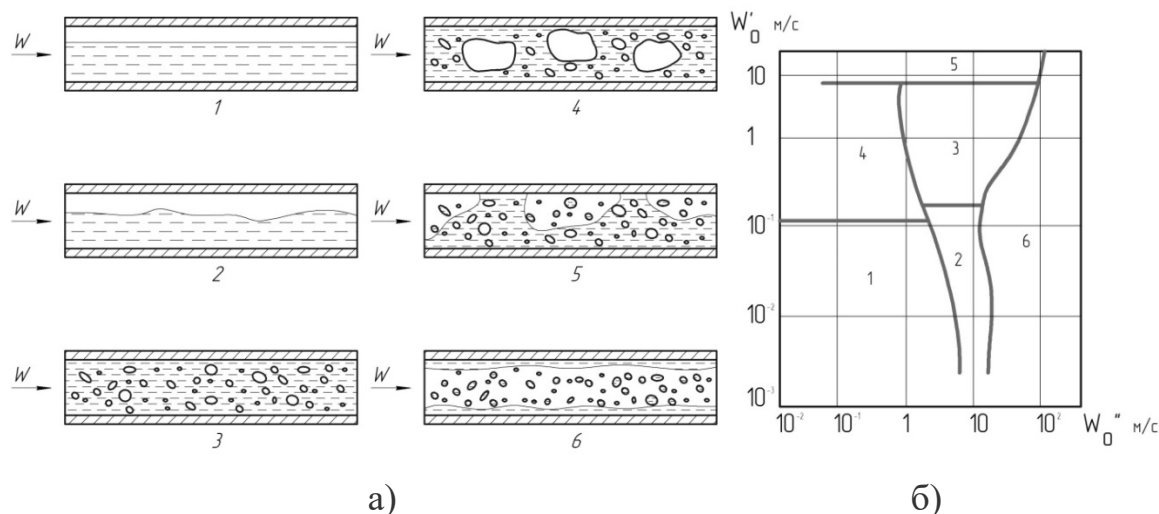


Рисунок 1.10 – Режимы течения двухфазного потока в горизонтальных каналах: а) режимы двухфазного потока б) диаграмма режимов горизонтальных двухфазных потоков

1.5.2 Эффект резонатора

При прохождении через кориолисовый расходомер жидкости, содержащей пузырьки свободного газа, в измерительных трубках прибора наряду с пузырьковым эффектом возникает так называемый эффект резонатора. Суть этого эффекта заключается в том, что пузырьки, распределенные в жидкости, как бы «захватывают» объем жидкости, действуя на него как пружина (рисунок 1.11). Благодаря этому в поперечном сечении измерительных трубок массового расходомера может возникнуть стоячая волна, резонансная частота которой определяется как

$$f_0 = c \cdot \lambda_1 / (2 \cdot \pi \cdot R_0), \quad (1.5)$$

где c – скорость звука в жидкости, по объему которой распределены пузырьки газа, $\lambda_1=1,842$ – числовой коэффициент, R_0 – внутренний радиус измерительной трубки.

Принцип эффекта резонатора изображен на рисунке 1.11.

Дополнительную погрешность, возникающую вследствие эффекта резонатора, можно оценить по формуле

$$E_{рез} = 2 \cdot \left[\left(0,163 + 0,837 \cdot \frac{1}{1 - f_d^2 / f_0^2} \right) - 1 \right], \quad (1.6)$$

где f_d – частота колебаний измерительной трубки расходомера.

Дополнительная погрешность из-за эффекта резонатора также зависит от содержания свободного газа в жидкости α , а также от давления процесса.

Действительно, согласно [14] резонансная частота f_0 из (1.6) прямо пропорциональна скорости звука c в среде, которая в свою очередь зависит от содержания свободного газа и давления процесса.

Частота акустического резонанса, как правило, больше частоты возбуждения измерительных трубок, поэтому согласно (1.6) дополнительная погрешность вследствие эффекта резонатора больше нуля и при достаточно высокой частоте возбуждения измерительных трубок может частично или полностью скомпенсировать погрешность из-за пузырькового эффекта.

Зависимость скорости звука в двухфазной среде от содержания свободного газа и давления процесса изображена на рисунке 1.12.

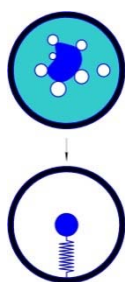


Рисунок 1.11 – Эффект резонатора УМЗ

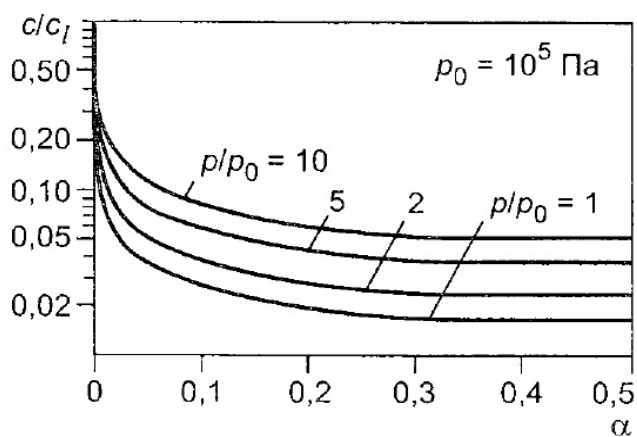


Рисунок 1.12 – Зависимость скорости звука в двухфазной среде от содержания свободного газа и давления процесса

Приведенные выше предположения справедливы только для идеальных условий, когда пузырьки свободного газа равномерно

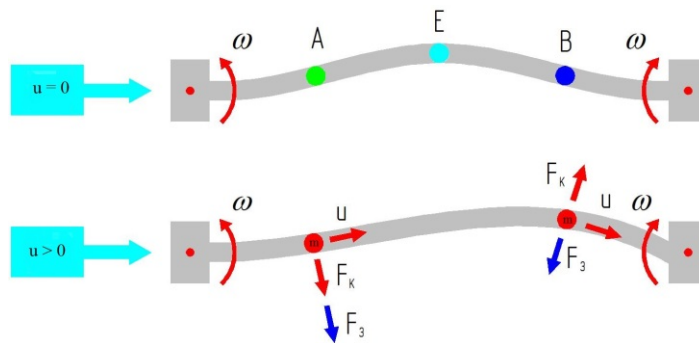


Рисунок 1.12 – Эффект затухания колебаний

Степень однородности распределения пузырьков зависит от формы измерительных трубок. Например, при горизонтальной установке массомера с U-образными трубками добиться равномерного распределения пузырьков вообще невозможно из-за силы Архимеда, которая на входе в трубку препятствует, а на выходе из нее, наоборот, способствует движению пузырьков (см. рисунок 1.13). Таким образом, на входе в трубку создается повышенная плотность распределения пузырьков, а на выходе из нее – пониженная. Эксперименты показали, что на самом деле, в отличие от расходомера со слабоизогнутыми трубками, добиться однородного распределения пузырьков в U-образных измерительных трубках не представляется возможным даже при вертикальной установке прибора. В связи с этим, если говорить об однородности распределения пузырьков газа вдоль трубки расходомер с прямыми трубками является оптимальным. Однако прямотрубные массовые расходомеры характеризуются слишком высокой частотой возбуждения, что может привести к доминированию эффекта резонатора над пузырьковым эффектом.

Течение пузырьков свободного газа в горизонтально установленном расходомере с U-образной измерительной трубкой изображено на рисунке 1.13.

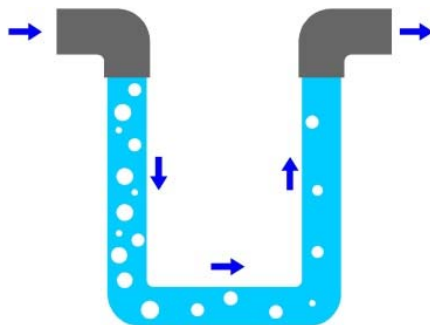


Рисунок 1.13 – Пузырьки свободного газа в горизонтально установленном расходомере с U-образной измерительной трубкой

В статье [15] приведены 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 1.14). 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.

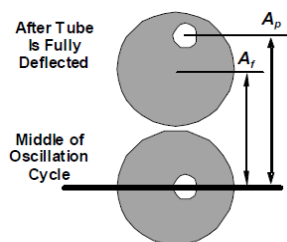


Рисунок 1.14 – Различия в амплитудах перемещений жидкости и газа

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.

Вопросы, связанные с обеспечением работы кориолисовых расходомеров при протекании двухфазного потока, обсуждаются и в

статье [16]. 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.

1.6 Результаты испытаний кориолисовых расходомеров в условиях многофазного потока

В работе [17] описаны некоторые эффекты, влияющие на точность измерения расхода кориолисовым расходомером (ориентация расходомера в пространстве (рисунки 1.15 и 1.16), геометрия измерительных трубок, свойства жидкости и др.).

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.

					<i>15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		32

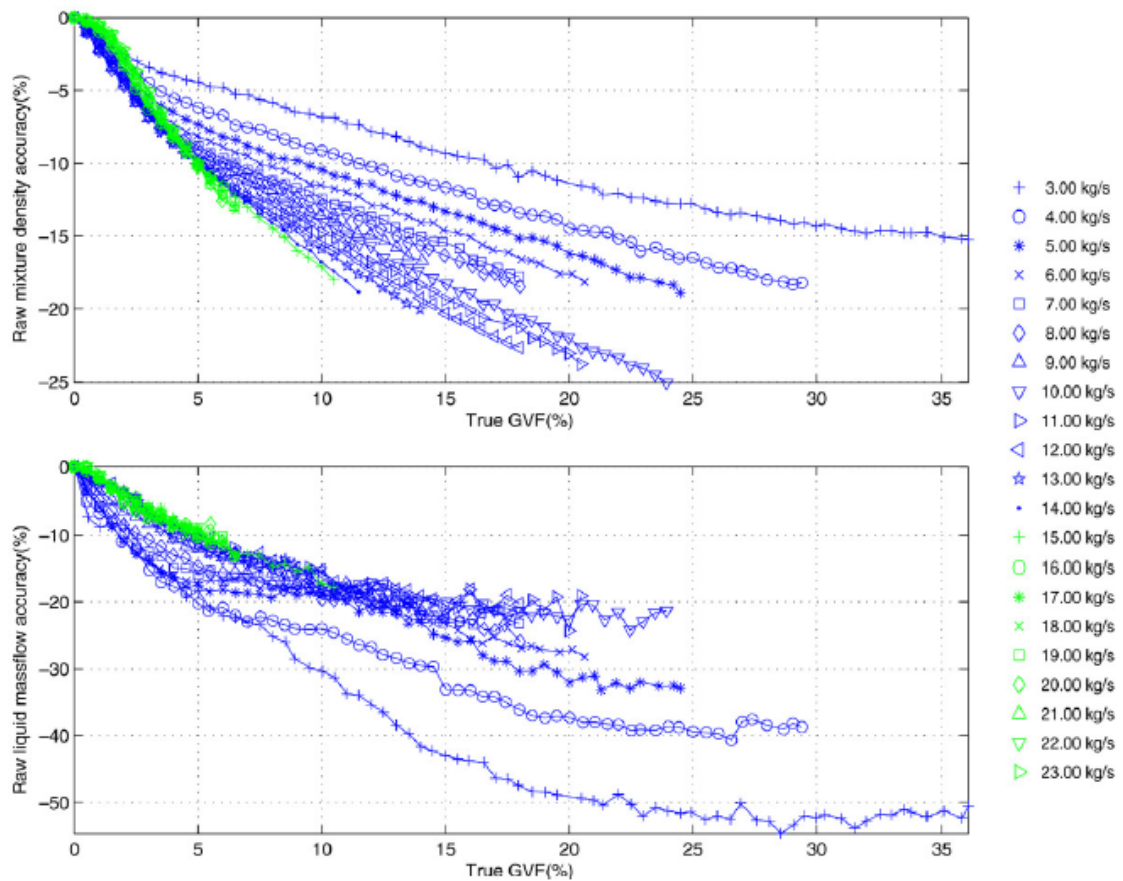


Рисунок 1.15 – Точность измерения расходомера при его вертикальном расположении

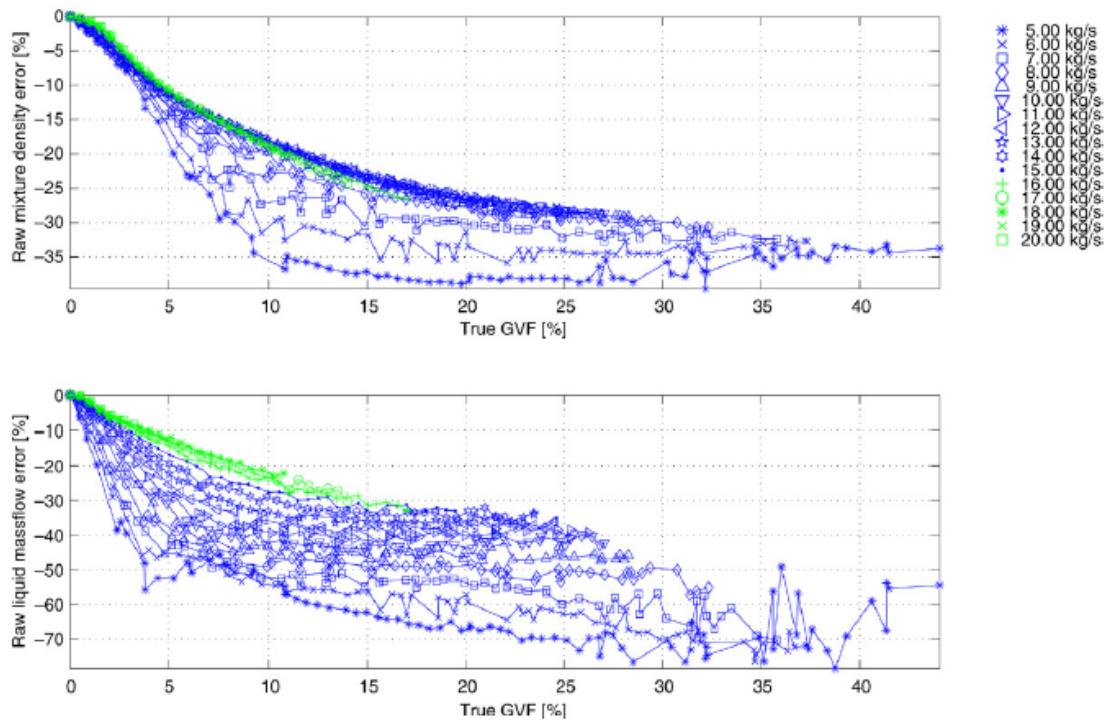


Рисунок 1.16 – Точность измерения расходомера при его горизонтальном расположении

В [18] представлена система для измерения массового расхода многофазных потоков, имеющую в своем составе кориолисовый расходомер. Для дополнительного уточнения данных измерения в системе установлен датчик обводненности. Приведены экспериментальные данные об ошибках измерения плотности и массового расхода при различных степенях обводненности (рисунки 1.17 и 1.18).

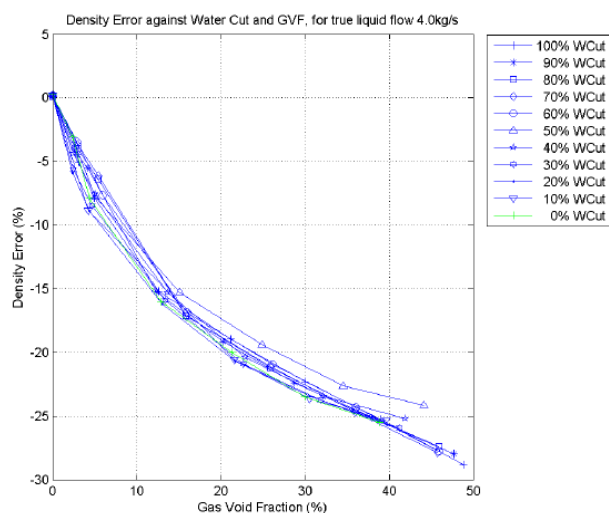


Рисунок 1.17 – Зависимость погрешности измерения плотности от содержания газа и степени обводненности

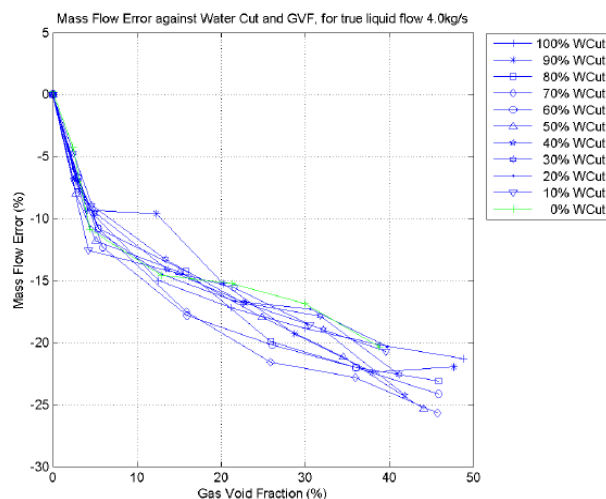


Рисунок 1.18 – Зависимость погрешности измерения массового расхода от содержания газа и степени обводненности

В работе [19] 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. Один из предлагаемых вариантов – схема SEVA (Sensor Validation), позволяющую управлять «поведением» системы с возможностью самодиагностики. Другой вариант – использование моделирования по методу Монте-Карло.

В [20] описывается методика коррекции измеренных кориолисовым расходомером данных в условиях протекания двухфазного потока. Методика

была протестирована на одной из моделей кориолисовых расходомеров в Национальной Инженерной Лаборатории в Англии с использованием масла Primol с учетом эффектов, проявляющихся в условиях эксплуатации расходомеров на нефтяных скважинах (например, периодическое ускорение потока из-за пробкового режима течения жидкости). Результаты тестов для пробкового режима течения показали, что погрешности измерения для массового расхода не превышают 5% (2,0% для расхода 3,25 кг/с и 3,6% для расхода 2,0 кг/с). Также были проведены полевые испытания в Венесуэле по измерению массового расхода нефти (имеющей вязкость до 10000 сСт), показавшие, что кориолисовы расходомеры гораздо эффективнее стандартной методики измерения расхода с использованием сепараторов (разность измеренных результатов порой доходила до 8,7%).

В работе [21] приводят результаты полевых испытаний измерительной системы на трехфазном потоке. Измерительная система состоит из МКР, датчика обводнения, датчика температур и датчика входного давления. Полевые испытания проводили на нефтяных скважинах с целью получения оценок темпа добычи нефти, воды и расхода газа в режиме реального времени. Период обновления составлял от одной секунды и более.

В работе [22] авторы описывают устройство и способ для калибровки МКР для углекислого газа при высоком давлении. Погрешность измерения калиброванного в данном исследовании МКР оценивается как 0,11%. Авторы утверждают, что это указывает на то, что МКР имеет большой потенциал для измерения CO₂. Кроме того, результаты свидетельствуют о том, что согласованная неопределенность 2% может быть значительно снижена до 0,2% или менее в случае жидкой фазы. Конструкция использованного в исследовании МКР – V-образные спаренные трубки большего диаметра. Кроме того, исследование показало, что измерения массового расхода, изученные в работе, практически не зависят от температуры и давления в исследованном диапазоне.

									Лист
									35
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР				

Таким образом, на рынке представлено большое количество кориолисовых расходомеров различного конструктивного исполнения. Все эти расходомеры изначально проектировались для измерения однофазных сред (жидкость или газ). Поэтому возникает большая сложность при использовании этих расходомеров при измерении многофазных сред. Таким образом для каждой конструкции расходомера картина в определенной степени уникальна. Погрешность измерения расхода многофазной жидкости зависит от конструкции и типа монтажа расходомера в измерительную магистраль.

При использовании расходомеров с двумя измерительными трубками необходимо устанавливать на входе в датчик стабилизатор потока, который должен обеспечивать примерно равномерное распределение пузырьков свободного газа.

Так как для измерения многофазной жидкости используются расходомеры, предназначенные для измерения однофазных жидкостей, то возникает проблема с передачей энергии от привода к измерительной трубке. На расходомерах с большими размерами измерительных труб становится проблематично обеспечивать постоянство амплитуды. Это приводит к отказу работы расходомера.

Исходя из приведенных выше исследований, проведенных на стандартных расходомерах, видно, что при содержании пузырьков свободного газа в жидкости до 5% можно получать ошибку порядка 5%.

Поэтому для обеспечения стабильности расхода нельзя допускать высокого газосодержания в жидкости. Перед датчиком расхода необходимо устанавливать сепаратор, который должен обеспечивать достаточно постоянный объем газа на входе в расходомер.

1.7 Подходы к математическому моделированию кориолисова расходомера

В статье [23] разработана балочная конечноэлементная модель U-образной трубки кориолисового расходомера с учетом текущей жидкости.

									Лист
									36
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР				

Трубка моделируется как балка Тимошенко. Модель расходомера аналогична модели, представленной в [24], тем не менее, она включает в себя осевое напряжение. Важность учета осевого напряжения подтверждается экспериментальными исследованиями.

Выполнена экспериментальная проверка модели. На рисунке 1.19 приведены расчетная и экспериментальная зависимости основной частоты колебаний трубки от скорости массового потока. На графике ось абсцисс нормируется относительно максимального массового расхода расходомера, ось ординат нормирована на основную собственную частоту при отсутствии потока. Показанная кривая получена с использованием значения демпфирования 0,12%. Интересно отметить асимметрию в прямом и обратном потоке; этот эффект обусловлен методом возбуждения обратной связи и системой демпфирования. Если пренебречь эффектом осевого натяжения, это приведет к ошибке в определении нормированной частоты в третьем знаке после запятой.

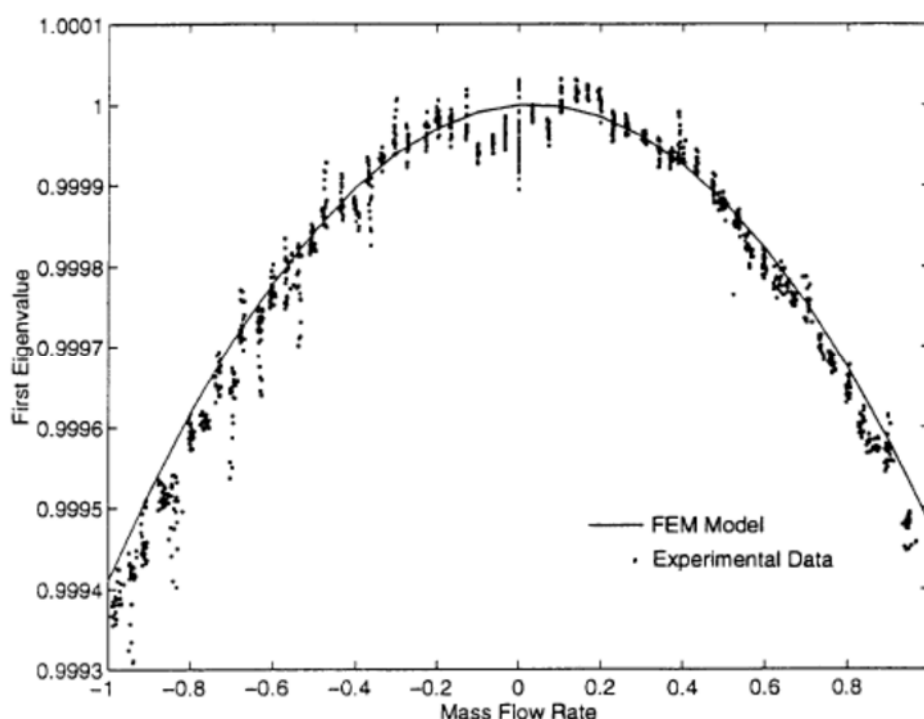


Рисунок 1.19 – Зависимость основной частоты колебаний трубки от скорости потока

Статья [25] посвящена исследованию собственных частот колебаний трубок с учетом текущей жидкости внутри трубок с помощью метода матрицы динамической жесткости (DSM dynamic stiffness matrix method).

По сравнению с методом конечных элементов, метод динамической матрицы жесткости (DSM), который используется в этой работе, считается точным [26]. Это происходит потому, что он основан на точной функции формы, полученной из точного решения дифференциальных уравнений. Метод DSM обладает более высокой точностью и требует меньших затрат времени по сравнению с методом конечных элементов, точность которого снижается с уменьшением количества используемых элементов. Метод DSM позволяет легко задавать геометрию трубки, с помощью ввода нескольких чисел, определяющих длину прямых элементов, углов и радиусов кривизны изогнутых элементов.

Предположения и ограничения:

– трубка кориолисового расходомера образована прямыми и изогнутыми сегментами с одинаковыми углами наклона в точках соединения. Сегменты расположены в одной плоскости;

– все секции трубки рассматриваются как балки Эйлера – Бернулли (эффектами инерции при вращении и поперечном сдвиге можно пренебречь).

– конструкционным демпфированием и затуханием из-за наличия жидкости пренебрегается;

– эффекты профиля скорости, вязкости и сжимаемости жидкости не рассматриваются;

– жидкость имеет постоянную скорость. Динамический отклик в связи с изменением скорости потока не рассматривается.

В методе DSM трубки разделяют на структурные элементы. Используя комбинации прямых и изогнутых трубок можно описать геометрию трубок различных расходомеров. Например, U-образная трубка разделена на две прямые трубки и одну изогнутую трубку с четырьмя узлами. На рисунке 1.20

показано разделение на структурные элементы U-образных, дельта-образных, S-образных трубок.

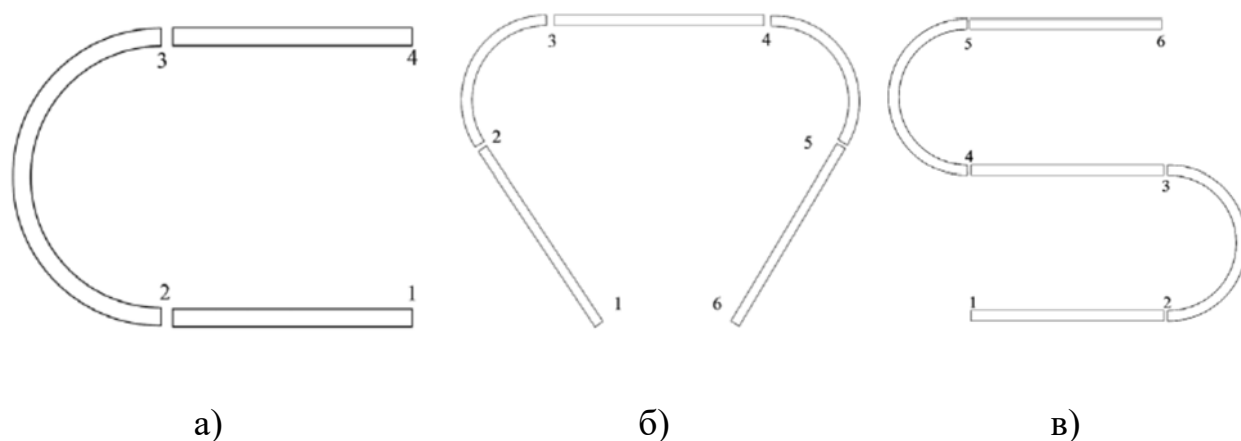


Рисунок 1.20 – Элементы и узлы трубки U-образных (а), дельта-образных (б), S-образных (в)

Элементы матрицы динамической жесткости структурного элемента выводятся на основе дифференциального уравнения движения при его свободных колебаниях. Благодаря точной постановке решения, узлы требуются только в точках соединения стержней, в случае изменения свойств материала или свойств поперечного сечения, а также в точках приложения внешних сил. Динамические матрицы жесткости всех элементов собираются в одну матрицу аналогично методу конечных элементов.

В статье [25] выведены уравнения для матриц жесткости отдельных элементов прямой трубки и изогнутой трубки (кольцевые элементы), приведены расчеты собственных частот U-образных, дельта-образных и S-образных трубок и получено сравнение с результатами опубликованных данных других авторов.

В работе [27] рассматривается проблема неточности результатов конечноэлементного моделирования конструкций кориолисовых расходомеров. Как обнаружилось в результате численных экспериментов на примере прямотрубного расходомера, такие неточности и ошибки были связаны с ошибками округления внутренних алгоритмов.

1.8 Описание подходов к имитационному моделированию гидродинамических течений в проточной части кориолисовых расходомеров

Наибольшую сложность при создании динамической модели расходомера Кориолиса представляет учет влияния потока среды внутри трубы на ее динамическое поведение.

Начиная с 50-х годов прошлого века, эта проблема подверглась интенсивным исследованиям. Главная их цель состояла в изучении влияния потока среды внутри трубы на собственные частоты колебаний и на потерю устойчивости [28, 29, 30, 31]. Позднее рассматривались изогнутые трубы. В [32] выведены уравнения движения (см. также [33]) и исследовано влияние потока на резонансные частоты отрезка трубы постоянной кривизны с защемленными и опертыми концами.

Развитие подходов к аналитическому и числовому моделированию для датчиков расхода жидкости во временном интервале примерно в двадцать лет до наших дней отражено в работе [34]. Поскольку оригинал статьи написан на английском языке, полагаем целесообразным привести на русском языке большую цитату из этой работы, иллюстрирующую современное состояние вопросов моделирования датчиков Кориолиса:

«Используемый в расходомере Кориолиса принцип измерения полагается на взаимодействие между жидкостью и конструкцией. Для теоретического описания взаимодействия жидкости и конструкции (Fluid – Structure Interaction, FSI) имеется большое количество специальных публикаций, но большинство из них не связаны с задачей измерения потока.

Païdoussis [35,36] представил и систематизировал различные фундаментальные теории в двух томах его книги под названием Fluid - structure Interactions: Slender Structures and Axial Flow (Взаимодействие жидкости и конструкции: Тонкостенные конструкции и Осевой поток). Он отметил, что фактически вся исследовательская работа по динамике передающих жидкость труб была ориентирована скорее на описательный

характер, чем на управление процессом взаимодействия. Тем не менее, его основная работа, появившаяся в начале 1990-х инициировала некоторые решения, в числе которых оказались расходомеры Кориолиса. В его книге могут быть найдены уравнения и их решения как для балочных, так и оболочечных форм колебаний при взаимодействии жидкости и конструкции в расходомерах Кориолиса.

Ненр [37] описал взаимодействие совершающей колебания трубы со стационарным потоком протекающей в ней жидкости, являющееся причиной возникновения массовой силы в жидкости. Эта массовая сила вызывает вторичную вибрацию в жидкости и на ее границе. Используя принцип взаимности, Ненр [37] предложил метод вектора веса (a weight vector method), который может использоваться для изучения полей распределения скоростей. Вектор веса зависит от двух вибрационных полей, возникающих в стационарном потоке жидкости. Чтобы получить поле распределения скоростей, поле векторов скоростей жидкости умножается на вектор веса и интегрируется по всему объему жидкости. Формируется совместное решение с вибрацией колеблющегося тела и граничными условиями. Были изучены два простых случая (таких как поток в U-образной трубе), и автор высказал предположение, что возможно распространение решения к другим более практическим конфигурациям.

При описании расходомера Кориолиса предоставляется целесообразным использование сложных компьютерных моделей, которые детализировано учитывают особенности поведения текущей жидкости, ее сжимаемости, однородности и других особенностей.

Hulbert и др. [23] обсудили вопросы числового анализа расходомеров Кориолиса методом конечных элементов и сравнили результаты расчетов с экспериментом. Они отметили, важность учета условия осевого растяжения.

Keita [38] использовал многоцелевой пакет конечно-элементного анализа с возможностью учета взаимодействием жидкости и конструкции (алгоритм Fluid-Structure Interaction, FSI), чтобы получить особенности

поведения расходомера Кориолиса в форме прямой трубы с зажатыми концами. Его результаты хорошо соответствовали предыдущим экспериментальным и теоретическим значениям. Однако, в статье высказано предположение, что процедуры расчета пока еще нельзя рассматривать как совершенные.

Cunningham и Hensley [39] использовали для расчета расходомера Кориолиса IMAT и Matlab.

Новые инструменты, разрабатываемые производителями, использовали эти и другие методы, чтобы обеспечить достаточную способность удовлетворять все более и более строгим конструктивным требованиям и дополнительному анализу.

С тех пор как Stack и др. [24] использовали метод конечных элементов для интегрирования уравнений движения для передачи жидкости балкой Тимошенко, применение численных методов к образцовым датчикам потока стало важным средством разработки. Stack и др. [24], получили и показали три матрицы: масс, жесткостей и демпфирования в формулировке метода конечного элемента. Чтобы решить проблему составного собственного значения на основе полученных глобальных матриц использовался код пакета прикладных программ MSC/NASTRAN общего назначения. Были смоделированы расходомеры Кориолиса с тремя изогнутыми трубками и аналитические результаты метода конечных элементов оказались в хорошем соответствии с экспериментальными данными. Результаты показали, что современный метод конечных элементов может обеспечить довольно точное моделирование для расходомеров Кориолиса.

Belhadj и др. [40] далее развивали метод конечных элементов, используя ANSYS, чтобы моделировать пульсирующие потоки на геометрически различных трубках датчика Кориолиса (прямых и изогнутых). На основании подтвержденных результатов они пришли к заключению, что в сигнале присутствовали компоненты биений между частотой пульсации и частотой возбуждения.

Wang и Baker [41] используя модель конечного элемента (FE) трубок расходомера, занялись исследованиями влияния особенностей изготовления на показания расходомера. Wang и др. [42] сообщил о продвинутой и расширенной числовой модели единственной прямой трубы расходомера Кориолиса, ориентированной на решение практических вопросов. Предсказания модели хорошо согласовывались с данными из произведенных измерений. Оптимизация этих моделей должна также выявлять производственные факторы, имеющие отношение к точности изготовления, поскольку они, вероятно, будут иметь влияние на окончательную работу инструмента. В сочетании с новыми исследованиями это должно привести к методам производства, которые обеспечивают все более и более высококачественный конечный продукт.

Vobovnik и др. [43] первоначально использовал CFD (вычислительная гидрогазодинамика) код, чтобы моделировать прямолинейную проточную трубку Кориолисового расходомера. Отклонение трубы определялось в времени пошагово, и момент, созданный жидкими силами, использовался, чтобы оценить чувствительность. Авторы указали, что отклонение потоковой трубки в этом подходе не вычислялось. Было определено искажение скоростного профиля, и было высказано предложение, что вибрация трубы имела более сильное влияние на скоростной профиль для более низких чисел Рейнольдса. Для полностью развитых потоков под низкими числами Рейнольдса чувствительность потока была меньше, чем в более высоких числах Рейнольдса. Использование CFD анализа получило продолжение последующей работой [44], в которой исследовался профиль скоростей течения в датчиках расхода, использующих оболочечные формы колебаний. Было установлено значительное уменьшение чувствительности для низких чисел Рейнольдса.

Samer и Fan [25] утверждают, что метод матриц динамических жесткостей применительно к моделированию Кориолисового расходомера позволяет достигать более высокой точности меньшим числом элементов,

чем метод конечных элементов. Они предположили, что демпфирование и граничные условия рассмотрят в будущей работе. Они также предположили, что их метод может использоваться, чтобы оптимизировать дизайн датчика потока (например, выбор точки возбуждения и расположения датчиков движения).

Эти теоретические модели основаны на одном принципе непосредственного взаимодействия жидкости и конструкции, где для оценки взаимодействия не используется повторяющаяся двухсторонняя процедура. Эти модели были очень полезны в понимании основных принципов работы Кориолисовых датчиков измерения потока и в работе над улучшением инструментов. Однако все еще есть разрыв между прямыми моделями сцепления и взаимодействием жидкости и конструкции в условиях практической эксплуатации расходомеров Кориолиса. Типичный пример - то, что движение трубы влияет на поля скоростей жидкости, но и измененное поле скоростей жидкости в свою очередь также нарушает движение трубы. Этому двухстороннему взаимодействию была бы нужна повторяющаяся модель сцепления, которая недавно появилась в публикациях.

Признав ограничение их более ранней работы [43, 44], Bobovnik и др. [45] разработал повторяющийся метод сцепления, чтобы моделировать прямую трубу с текущей жидкостью. В этом методе они использовали программный код метода конечных объемов (Comet) для жидкостной области и пакет прикладных программ конечного элемента (Abaqus) для структурной области в пошаговой процедуре сцепления. Собственные частоты и изменения фазы были оценены по виброграммам скоростей затухающих колебаний в местах установки сенсоров используя метод обработки сигнала (дискретное преобразование Фурье). Были выполнены сравнения с предыдущими моделями (модель балки связанная с одномерной моделью потока и модель оболочки Flügge вместе с потенциальной моделью потока). Авторы делают вывод о том, что предположения моделирования,

используемые в таком пошаговом методе сцепления, позволяют сделать расчеты значительно более достоверными.

Mole и др. [46] описал улучшенный повторяющийся метод сцепления, который был сначала описан Bobovnik и др. [45]. Этот улучшенный метод может моделировать вынужденные колебания, которые показали лучшее соответствие истинной эксплуатации расходомеров Кориолиса. В отличие от их предыдущей работы, где использовался режим свободных затухающих колебаний, измеряемые параметры были получены на основании анализа установившегося режима вынужденных колебаний. Этот метод был применен, чтобы изучить влияние числа Рейнольдса на поток в прямой трубе, и результаты были сопоставлены с существующей теорией вектора веса [46]. Было продемонстрировано качественное соответствие.

Kumar и др. [48] провели числовые моделирования, используя пошаговое сцепление для fluid-structure interaction. Цель состояла в том, чтобы изучить эффект чисел Рейнольдса, в особенности низкие числа Рейнольдса для жидкостей высокой вязкости. В качестве примера выполнено моделирование для двойной изогнутой трубки. Результат моделирования сравнился с результатами эксперимента. Сравнение показало качественное совпадение для Re от 1,000 до 100,000».

Перечисленные особенности моделирования расходомера Кориолиса дают основания считать технологию численных расчетов с использованием алгоритма FSI одним из наиболее эффективных на сегодняшний день инструментов совершенствования этого наукоемкого объекта.

2 Решение связанной упруго-гидродинамической задачи на примере прямолинейного деформируемого трубопровода

2.1 Постановка проблемы и расчетная схема

Перед тем как приступить непосредственно к моделированию связанной задачи, необходимо разработать методику расчета, изучить механизмы связи механической и гидродинамической частей и верифицировать созданную модель.

Была рассмотрена статья [49], в которой приведено аналитическое решение задачи о вынужденных колебаниях прямолинейного трубопровода с текущим по нему потоком жидкости. Полученные авторами теоретические результаты были сопоставлены с экспериментом и показано совпадение с большой точностью.

Данное решение и расчетная схема (рисунок 2.1), предложенное в нем было взято в качестве примера для верификации. Рассматривается прямая жесткозакрепленная труба, нагруженная вынуждающей силой, действующей по гармоническому закону

$$P(t) = P_0 \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad (2.1)$$

где F_0 – амплитуда вынуждающей силы, ω – частота возбуждения, близкая или равная резонансной.

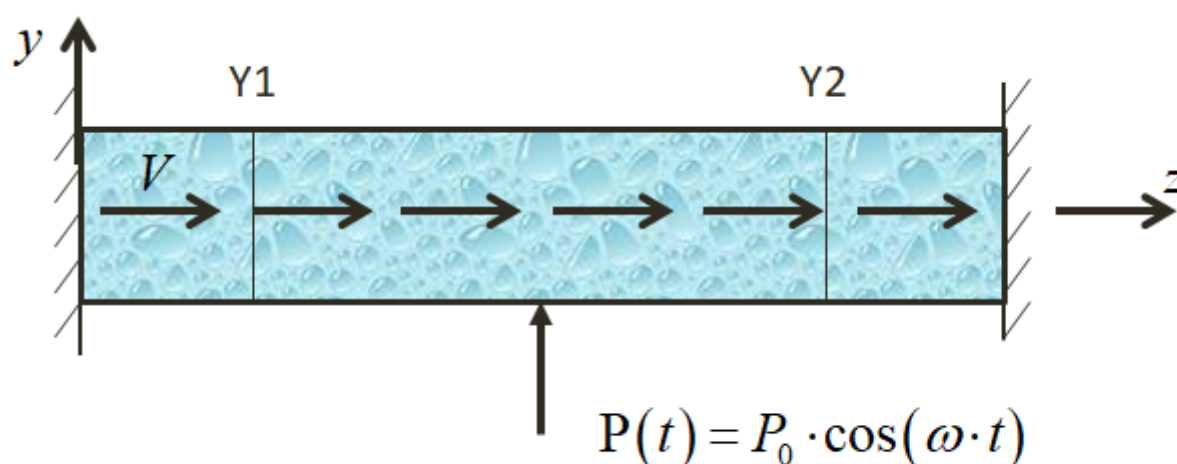


Рисунок 2.1 – Расчетная схема прямолинейного трубопровода

Через трубу протекает несжимаемая жидкость с значением осевой скорости V .

В точках $Y1$ и $Y2$ установлены датчики перемещений, регистрирующие разность фаз (аналог индукционных датчиков, используемых в реальной конструкции). Датчики расположены симметрично относительно середины трубы.

Одно из главных допущений расчетной схемы – собственные частоты данной конструкции определяются как для трубы со стоячей в ней жидкостью. В реальности, при течении жидкости собственные частоты будут отличаться от частот при отсутствии течения, но это отличие мало и не выводит частоту возбуждения из околорезонансной зоны.

2.2 Применение программного пакета ANSYS и алгоритма Fluid Structure Interaction при моделировании кориолисова расходомера.

Современным подходом к имитационному моделированию кориолисова расходомера является использования метода конечных элементов (МКЭ). Одним из лидеров на современном рынке программных продуктов конечно-элементного анализа является программный комплекс ANSYS, включающий в себя множество интегрированных подсистем, которые, как утверждают разработчики [50], позволяют исследовать сложное физическое поведение расходомеров и учесть следующие факторы:

- рабочую жидкость и изменчивость ее свойств;
- ожидаемый диапазон скорости потока жидкости;
- электрические средства управления и диапазон их применения;
- кинематику и динамику трубки в условиях взаимодействия с протекающей жидкостью;
- системный отклик на электрический вход (частота, амплитуда, и т.д.).

Влияние потока жидкости на твердое тело может быть смоделировано путем сочетания программных встроенных программных комплексов, а именно пакетов вычислительной гидродинамики(CFD), таких как ANSYS

Fluent или CFX, и модуль решение задач механики ANSYS Structural. В основе связанного моделирования упруго-гидродинамической задачи лежит алгоритм Fluid Structure Interaction (FSI).

Решение с применением алгоритма FSI состоит из выполнения анализа конструкции под действием некоей системы сил, привлекаемой из соответствующего или предыдущего гидродинамического анализа. В свою очередь результаты механического анализа могут использоваться в жидкостном. Взаимодействие между двумя исследованиями происходит, как правило, на границах взаимодействия жидкость-конструкция. Именно в этой области результаты одного расчета передаются в другой. Существует две разновидности данного метода взаимодействия: односторонний и двухсторонний.

В одностороннем FSI алгоритме результаты CFD расчета передаются в механический анализ и прикладываются как нагрузка к механической модели (например, давление жидкости на стенку сосуда) и решается исключительно задача механики.

При использовании двухстороннего FSI алгоритма подразумевается моделирование двух различных взаимодействующих между собой процессов. Жидкость производит нагрузку на твердую конструкцию, тогда как твердая структура воздействует обратно на жидкость посредством усилий и отклонений. Алгоритм следующий: результаты CFD расчета передаются в механический анализ, откуда, в свою очередь, передаются смещения, изменяющие форму проточной части. Решатель ANSYS Mechanical действует как ведущий процесс, с которым соединяется CFD-решающее-устройство. Как только связь установлена, решатели синхронизируются (рисунок 2.2). Итеративный процесс повторяется до достижения определенного критерия сходимости всех компонентов связанного расчета или до достижения максимального числа повторений.

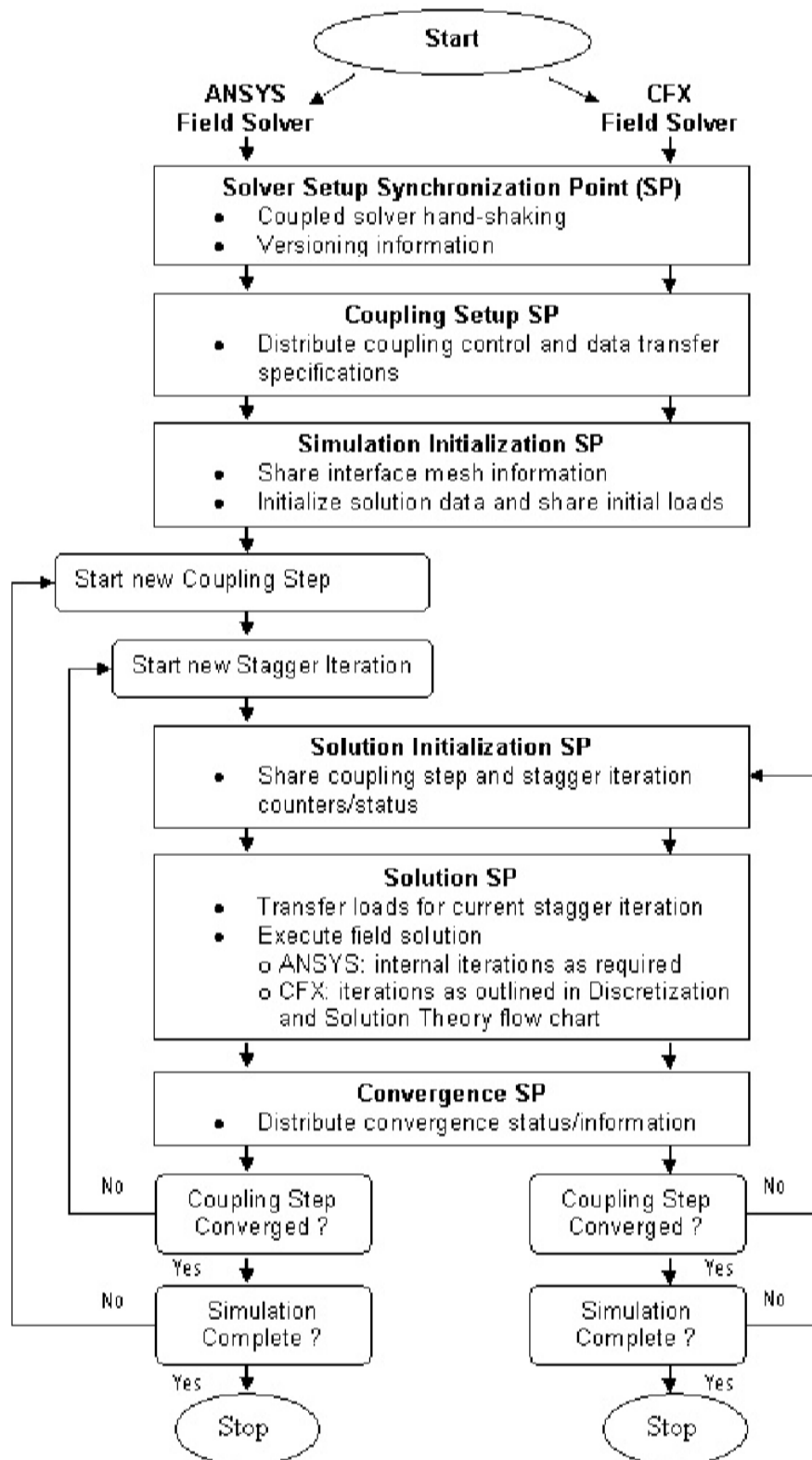


Рисунок 2.2 – Последовательность пунктов синхронизации при двухстороннем FSI алгоритме

2.3 Применение CFD пакета ANSYS Fluent для вычисления гидродинамических задач

ANSYS Fluent является одним из наиболее комплексных программных CFD продуктов, позволяющим решать широкий спектр задач. Решающий модуль построен на методе контрольных объемов, дающем высокую точность расчетов, и предлагает несколько дискретизационных схем интегрирования уравнений гидродинамики.

В технике в основном преобладает турбулентное течение жидкости, поэтому немаловажную роль играет моделирование турбулентности. Программное обеспечение ANSYS Fluent предлагает широкий спектр моделей турбулентности для эффективного и точного расчета:

- однопараметрическая модель Spalart-Allmaras;
- двухпараметрические модели k - ϵ , RNG k - ϵ , Realizable k - ϵ ;
- двухпараметрические k - ω , SST k - ω ;
- модели Рейнольдсовых напряжений: RSM, k - ω RSM;
- модель V2F;
- модели крупных вихрей LES;
- модели неприсоединенного вихря DES

Пакет ANSYS Fluent является лидером в технологии моделирования многофазных течений. Его возможности позволяют точно смоделировать и получить представление о процессах, происходящих при многофазном течении. Огромное разнообразие моделей позволяет выявить взаимодействие между несколькими фазами потока: жидкостями, газами, дисперсными частицами:

- модель Volume-of-fluid;
- модель Discrete phase (DPM);
- модель Mixture;
- модель Eulerian

Подробно эти модели будут рассмотрены в разделе 4.2

Возможность динамического построения сеток в ANSYS FLUENT обеспечивает решение сложных задач, в том числе движение цилиндров в двигателях внутреннего сгорания, движение золотника в клапане и т.д. ANSYS FLUENT предлагает несколько различных схем восстановления сеток: размножение, выравнивание и перестройка. Эти схемы могут быть использованы для различных подвижных деталей в пределах одного моделирования при необходимости. По ключевым узлам сетки существует возможность увеличения автоматически или вручную в процессе решения в соответствии с последовательностью предварительно сгенерированных сеток. Для этого требуется только начальная сетка и задания граничных условий.

2.4 Сходимость решения для CFD задач

Задача о течении жидкости носит нелинейный характер и только при введении определенных ограничительных условий может быть аналитически решено уравнение Навье-Стокса. В результате, для решения CFD задач используется итеративный метод и встает вопрос: что является критерием сходимости решения?

В статье [51] описано 3 основных критерия, по которым можно судить о наличии сходимости задачи и её окончательном решении.

2.4.1 Сходимость по среднеквадратическим невязкам

Среднеквадратические невязки являются одними из фундаментальных мер сходимости итеративного решения т.к. оценивают непосредственно количественную ошибку в решении системы уравнений. При численном решении величина невязок никогда не будет равна нулю, однако чем они ниже, тем точнее решение. Количественно, уровень сходимости по невязкам можно оценить следующим образом:

– уровень невязок порядка от 10^{-3} до 10^{-4} является слабым и при нем можно говорить о качественном сходстве полученного решения с действительностью;

– уровень невязок порядка 10^{-5} считается хорошо сходящимся и приемлем в инженерной практики так как для сложных задач редко получается достичь более высокого уровня.

– уровень невязок порядка 10^{-6} считается наиболее точным.

На рисунке 2.3 показано распределение температуры по печатной плате при различных уровнях невязок. Как видно, качественно распределение температуры совпадает, но пиковое значение между уровнем 10^{-4} и 10^{-6} отличается на 8°C . В тоже время, между уровнями 10^{-5} и 10^{-6} различие составляет всего $0,7^{\circ}\text{C}$, что в некоторых случаях несущественно и не стоит дополнительных вычислительных затрат.

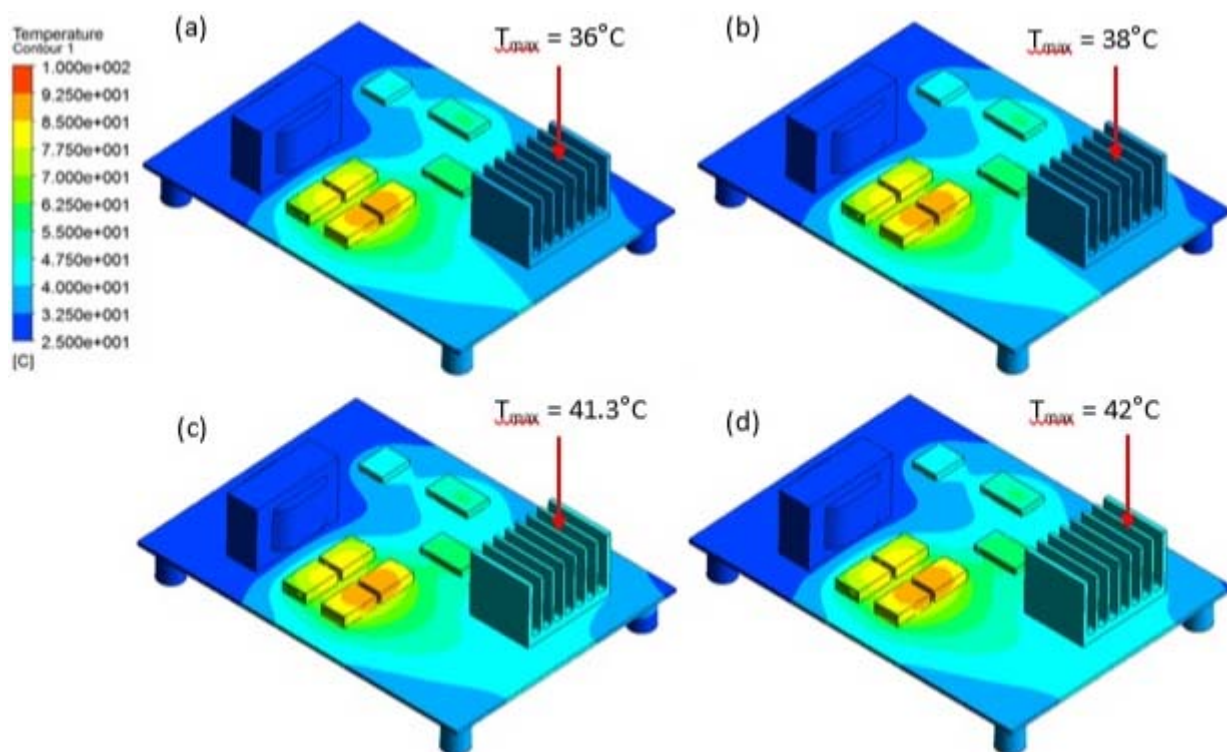


Рисунок 2.3 – Распределение температуры при уровнях невязок:

а) 10^{-4} ; б) $5 \cdot 10^{-5}$; в) 10^{-5} ; г) 10^{-6} .

2.4.1 Сходимость по дисбалансу

В задаче вычислительной гидромеханики решаются не только уравнения неразрывности и движения, но и уравнения сохранения (массы, импульса, энергии). Для того, чтобы утверждать об окончательном решении задачи, необходимо, чтобы законы сохранения выполнялись.

При численном решении, дисбаланс никогда не будет равным нулю. Однако если его величины достаточно малы, то можно утверждать, что законы сохранения выполняются.

На рисунке 2.4 показано как изменяется дисбаланс массы (выполнение закона сохранения массы) при нестационарном расчете. Можно видеть, что в начале временного шага имеется определенное значение дисбаланса, которое с последующими итерациями стремится к нулю, а, следовательно, выполняется закон сохранения.

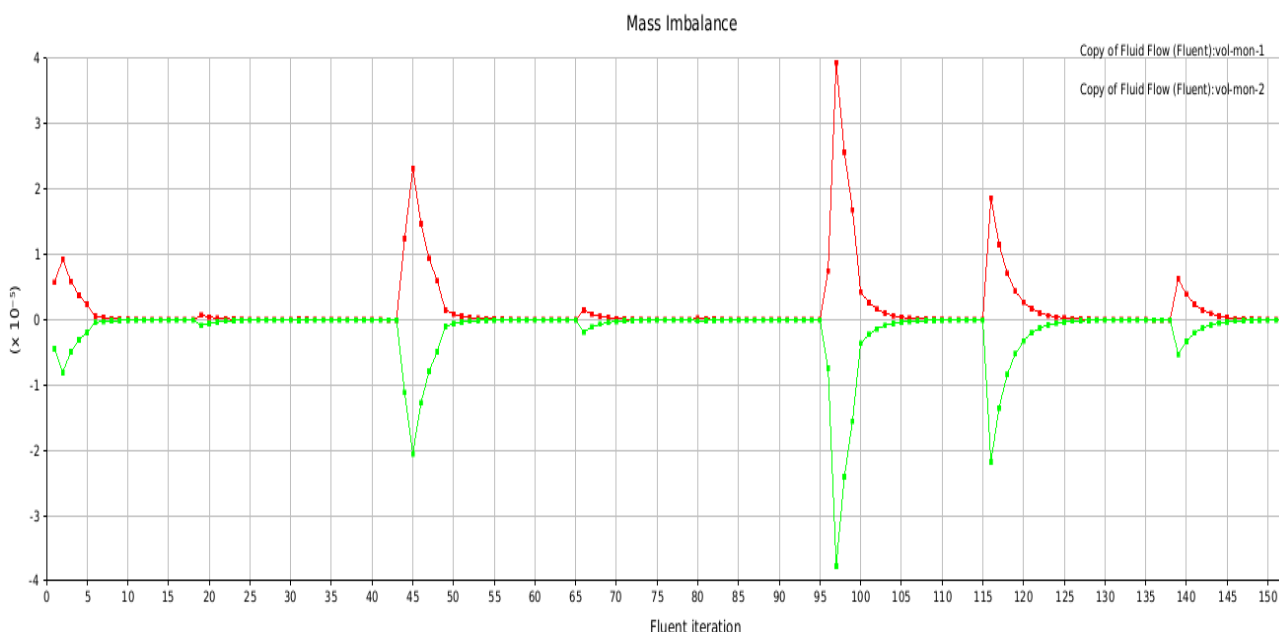


Рисунок 2.4 – График изменения дисбаланса массы при нестационарном расчете

2.4.1 Сходимость по интегральным величинам

При стационарном расчете поле решения не должно изменяться от итерации к итерации. Наблюдение за такими интегральными величинами как сила, сопротивление, массовый расход, средняя температура может сказать о том, что сходимость выполняется. Например, для печатной платы, приведенной на рисунке 2.3, можно утверждать о хорошей сходимости, когда максимальная температура радиатора и одного из чипов выходит на асимптоту (рисунок 2.5).

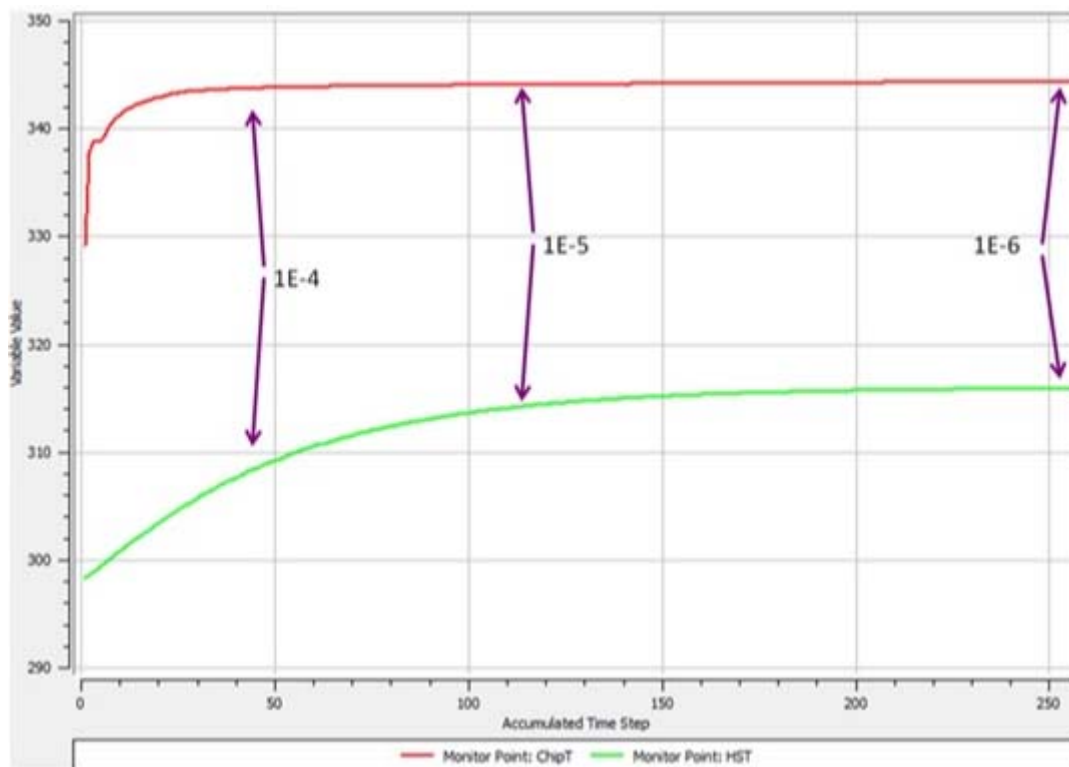


Рисунок 2.5 – Значение интегральных величин при различных уровнях невязок

2.5 Реализация связанного упруго-гидродинамического расчета

2.5.1 Алгоритм связанного упруго-гидродинамического расчета

После того, как изучены основные возможности используемых программных комплексов и определены критерии, по которым можно судить о сходимости задач можно приступить непосредственно к созданию методики расчета.

Принципиально, алгоритм связанного упруго-гидродинамического расчета выглядит следующим образом:

- 1) В расчете механики твердого тела к трубопроводу прикладывается гармоническая сила с частотой равной или находящейся в окрестности резонанса;
- 2) Полученные смещения передаются в CFD анализ, изменяется геометрия проточной части и производится жидкостный расчет.

оболочечных элементов и показана на рисунке 2.6

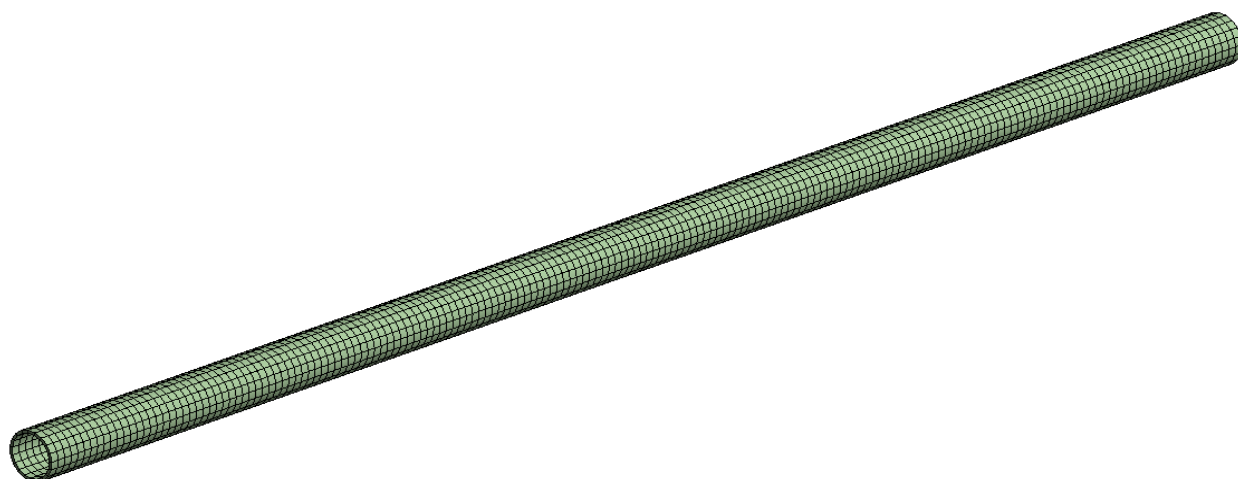


Рисунок 2.6 – Сетка конечных элементов в механическом анализе трубопровода

В соответствии с расчетной схемой, приведенной на рисунке 2.1, к центральному сечению трубопровода приложена вынуждающая гармоническая сила, а в узлах элементов, находящихся в точках Y1 и Y2, установлены датчики, измеряющие перемещение этих точек в направлении действия вынуждающей силы. Труба жестко закреплена по концам, а к внутренней поверхности трубы, где твердое тело контактирует с жидкостью, приложена специальная нагрузка Fluid-Solid Interface, через которую будет передаваться действие жидкости на твердотельную часть. На рисунке 2.7 показано древо проекта в блоке Transient Structural.

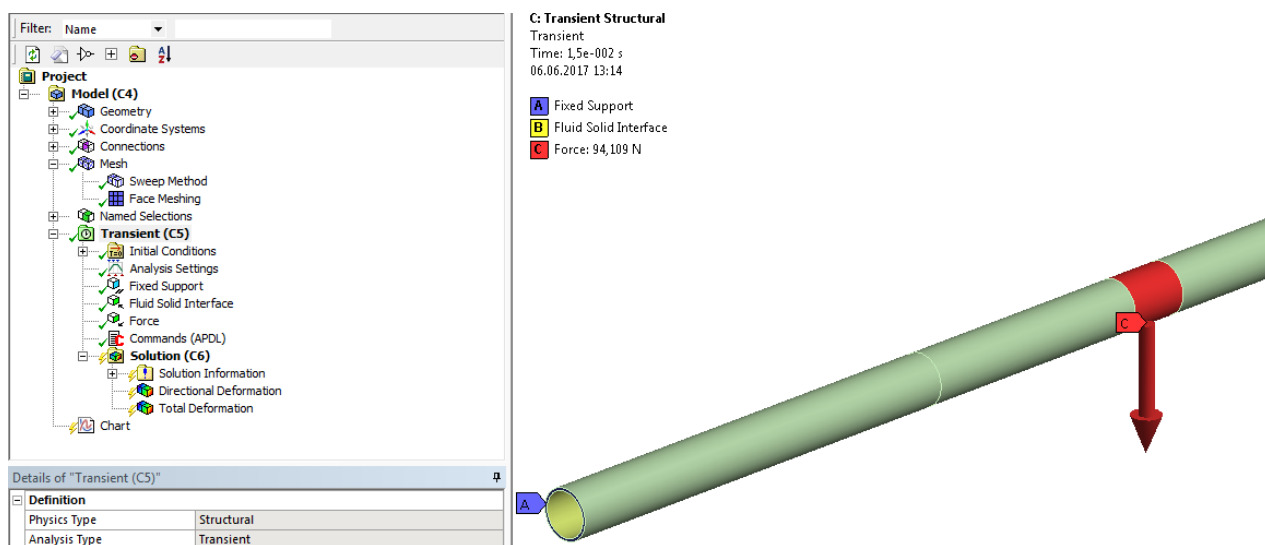


Рисунок 2.7 – Древо проекта и визуализация нагрузок

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР

Лист

56

Следующим шагом идет создание гидродинамического расчета в среде ANSYS Fluent. Логически сам расчет разбит на две части – начальное приближение в псевдо-стационарной постановке и нестационарный расчет, который решается непосредственно в связанной задаче совместно с механической частью.

Наиболее важным местом в CFD расчетах является сетка конечных элементов. Из-за высокой нелинейности поставленных задач и реализации определенных явлений (например, вихри в потоке) разбиение на конечные элементы должно быть как можно мельче и точнее. Также, необходимым является создание «пограничного» слоя из конечных элементов в месте соприкосновения жидкости со «стенкой», моделирующей границу жидкость-твердое тело. Это требуется для адекватного описания эффектов вязкости жидкости вблизи «стенки». Разбиение на конечные элементы для проточной части трубопровода представлено на рисунке 2.8.

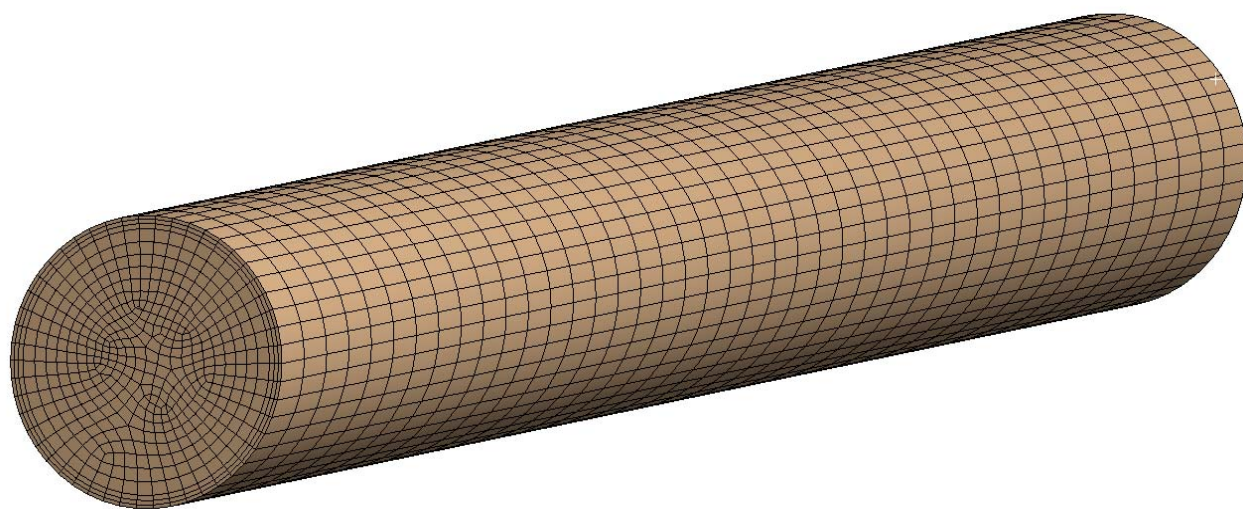


Рисунок 2.8 – Сетка конечных элементов для проточной части трубопровода

В программном пакете ANSYS Fluent существует возможность моделирования течения, как с учетом вязкости, так и без её учета. Профиль осевой скорости в зависимости от наличия/отсутствия вязкости показан на рисунке 2.9. Для сравнения с аналитическим решением будет проведено два расчета: при невязком течении жидкости и вязком турбулентном, как наиболее часто встречаемого в технике.

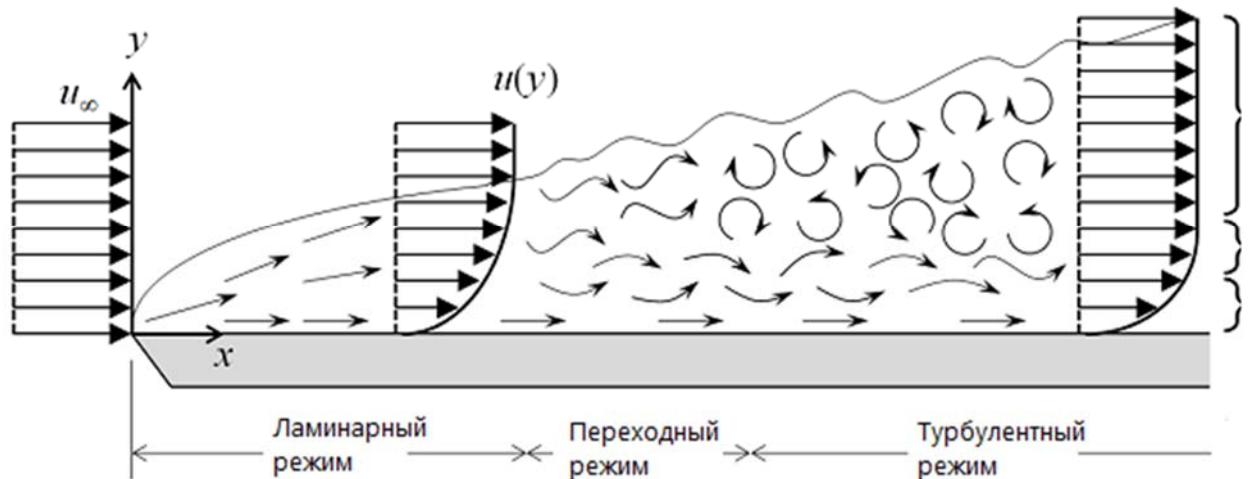


Рисунок 2.9. – Распределение профиля скорости при различном типе течения

Как было написано ранее в разделе 2.3, в ANSYS Fluent представлен довольно большой выбор моделей турбулентности. В данной задаче было решено использовать двухпараметрическую модель SST k- ω , как наиболее универсальную. SST-модель представляет собой комбинацию k- ϵ , и k- ω моделей турбулентности: для расчета течения в свободном потоке используются уравнения k- ϵ модели, а в области вблизи стенок — уравнения k- ω модели. Данная модель дает наиболее точные результаты при расчете течений вблизи твердых стенок и хорошо согласуется с экспериментальными данными.

При задании граничных условий для турбулентного режима течения необходимо определение параметров, характеризующих это самое течение. Например, интенсивности турбулентности, степени вязкости, кинетической турбулентной энергии, специальной величины ω или ϵ и т.д. Для данного расчета решено определить интенсивность турбулентности и такой параметр как Turbulence Length Scale (рисунок 2.10)

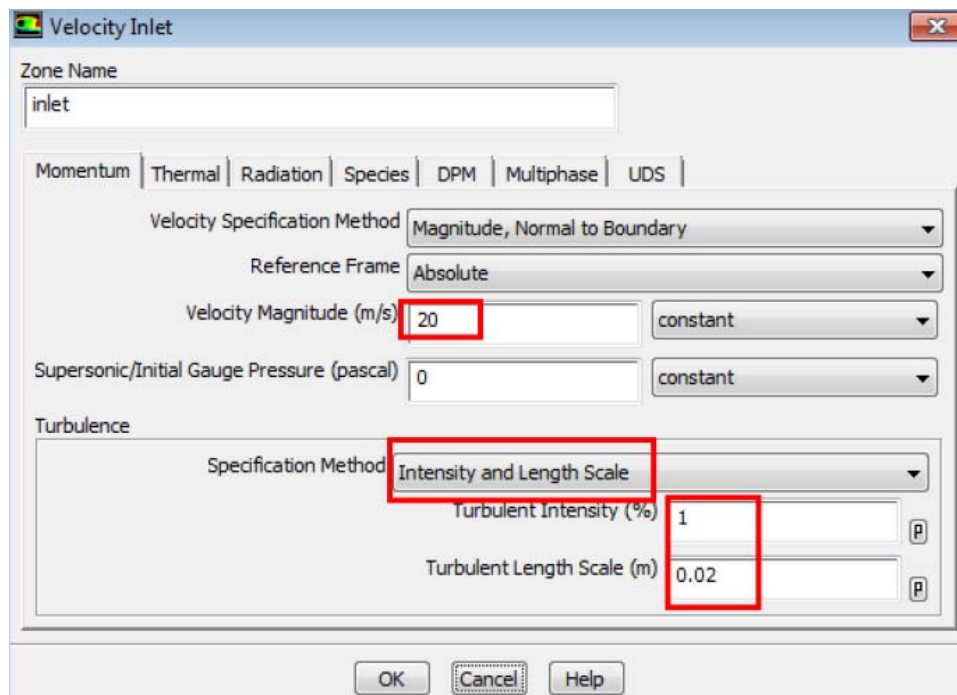


Рисунок 2.10 – Таблица задания граничного условия типа Velocity Inlet

Интенсивность турбулентности представляет собой отношение среднеквадратичной скорости турбулентных флуктуаций к средней скорости потока. Для развитого потока внутри трубы интенсивность турбулентности рассчитывается по формуле [52]

$$I = 0,16 \cdot Re^{-\left(\frac{1}{8}\right)}, \quad (2.2)$$

где Re – число Рейнольдса.

Параметр Turbulence Length Scale это физическая величина, описывающая размер больших энергетических вихрей в турбулентном потоке. Для развитого потока внутри трубы Turbulence Length Scale определяется как 7% от гидравлического диаметра[52]

$$l_t = 0,007 \cdot d_h, \quad (2.3)$$

где d_h – гидравлический диаметр.

Для круглой трубы гидравлический диаметр равен диаметру проточной части.

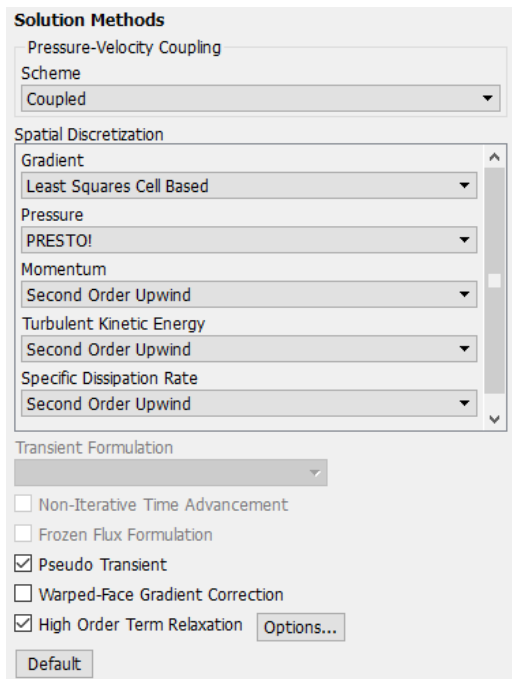
Следующим шагом идет задание граничных условий модели для разрешения используемых уравнений. Существует 3 основных типа граничных условий: условие на входе в проточную часть, условие на выходе

и «стенка», моделирующая границу проточной части. В первых двух типах условиях используются такие параметры как массовый расход, скорость потока, давление и т.д. Для решения данной задачи на входным граничным условием будет являться скорость потока (рисунок 2.10), а на выходе задается нулевое давление.

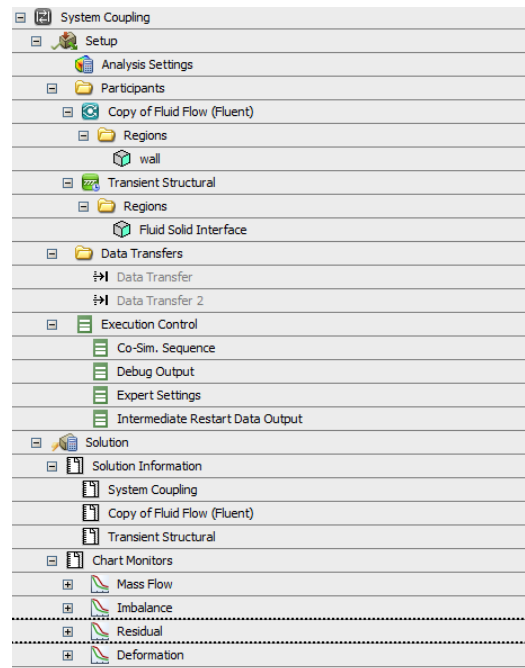
Начальное приближение для жидкостной части связанного расчета выполняется в псевдо-стационарной постановке с помощью метода решения Coupled для Pressure-Velocity Coupling. Этот метод наиболее предпочтителен и эффективен для однофазных стационарных задач. Окно задания методов решения показано на рисунке 2.11

После того как решено начальное приближение, создается блок нестационарного расчета. Для учета воздействия механической части расчета на поток включается опция «Динамическая сетка». Это позволит проточной части воспринимать перемещения, полученные от механической задачи, и деформироваться. Все остальные параметры (граничные условия, схемы дискретизации) остаются теми же.

Последним шагом следует создание блока, связующего механическую и гидродинамическую часть. В данном блоке задается временной шаг, общее время расчета, определяется взаимодействие между частями и критерий сходимости по невязкам для синхронизации.



а)



б)

Рисунок 2.11 – Окно Solution Method (а) и блок System coupling (б)

Схема готового проекта в программном комплексе ANSYS Workbench приведена на рисунке 2.12.

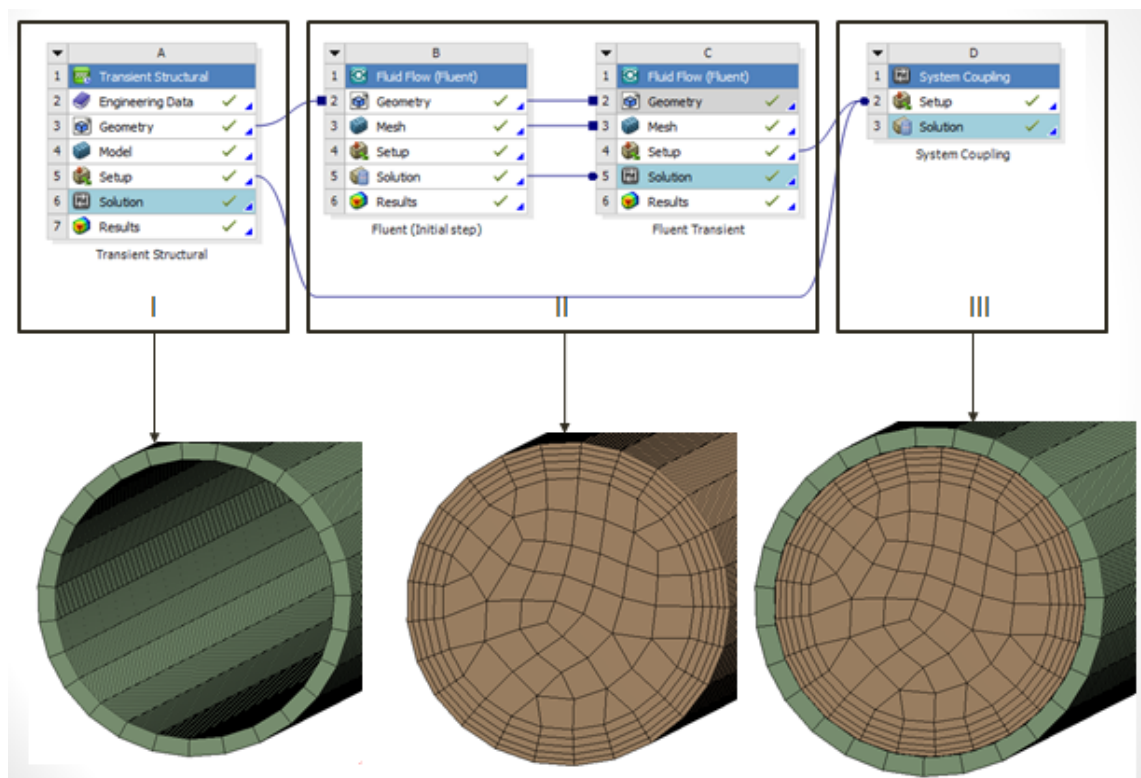


Рисунок 2.12 – Схема проекта в пакете ANSYS Workbench

I) Механическая часть; II) Гидродинамическая часть;

III) Блок совместного расчета и реализации FSI алгоритма.

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

15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР

В результате при выполнении расчета определяется перемещение датчиков в точках Y1 и Y2 во времени (рисунок 2.13). Полученная разность фаз имеет порядок 10^{-6} , что близко к порядкам, наблюдаемым в реальных расходомерах.

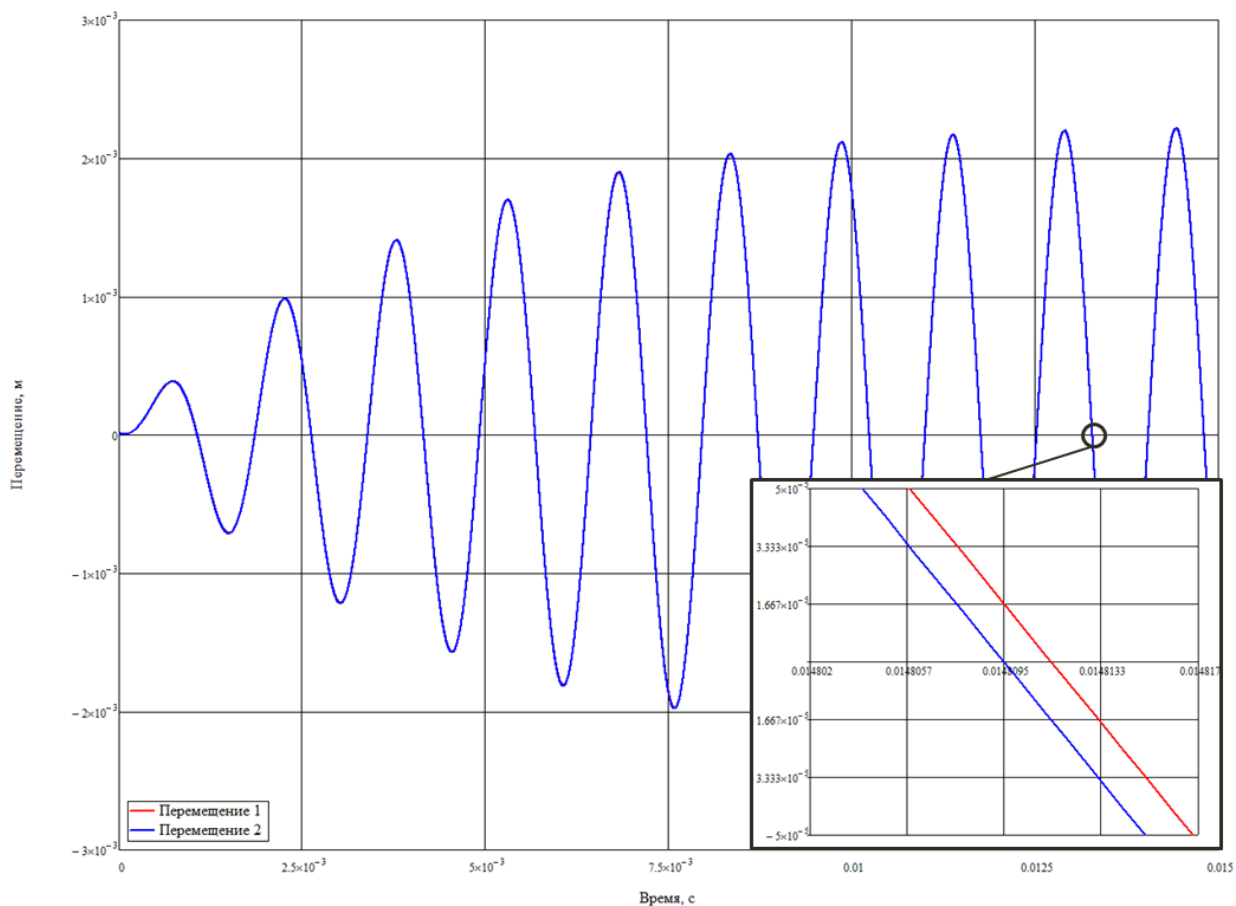


Рисунок 2.13 – Полученные перемещения датчиков и разность фаз

2.6 Сравнение результатов

Серия расчетов связанной упруго-гидродинамической задачи при разных скоростях течения жидкости проводилась для жесткозаделанной трубы со следующими геометрическими параметрами (рисунок 2.14):

- Длина трубопровода $l=258$ мм;
- Диаметр проточной части $d_h=8$ мм;
- Толщина трубы трубопровода $h=1$ мм;
- Точки расположения датчиков Y1 и Y2 равноудалены от середины трубы на расстояние $l_y=98$ мм.

Полученные значения при невязком и вязком течении, а также результаты аналитического расчета занесены в таблицу 2.1. Относительная погрешность разности фаз, полученной с помощью метода конечных элементов, отнесенной к разности фаз полученной при помощи аналитического решения приведена в таблице 2.2

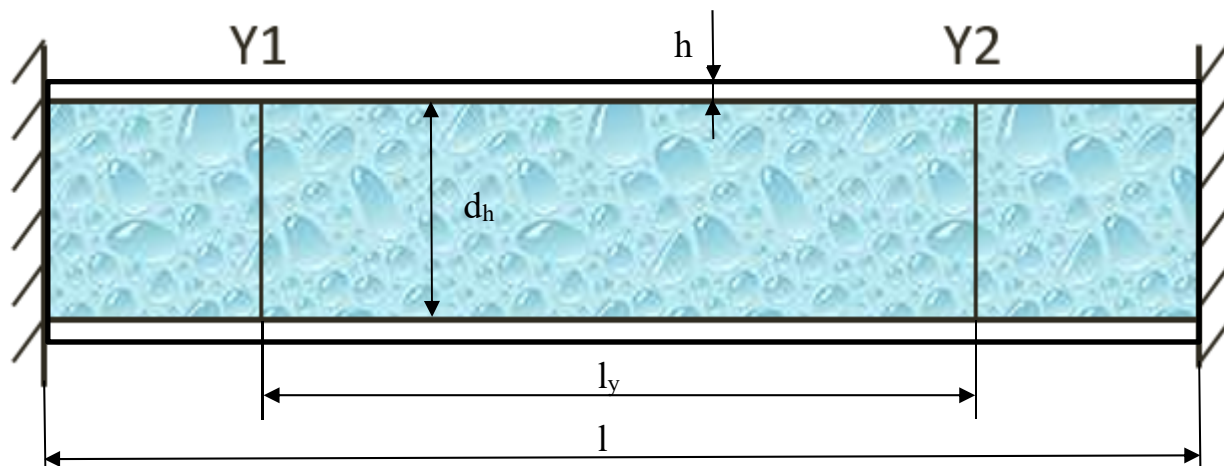


Рисунок 2.14- Геометрические параметры расчетной схемы

Таблица 2.1 – Значения разности фаз в прямом деформируемом трубопроводе при разных скоростях потока

Скорость потока, м/с	Разность фаз, мкс		
	Аналитическое решение	Невязкое течение	Вязкое течение
2,79	0,528	0,527	0,541
5,57	1,054	1,085	1,093
11,16	2,112	2,159	2,161
16,76	3,172	3,229	3,183

Таблица 2.2. – Относительная погрешность разности фаз

Скорость потока, м/с	Отличие численного решения от аналитического невязкого, %	
	Невязкое течение	Вязкое течение
2,79	0,2	-2,5
5,57	-3,0	-3,7
11,16	-2,2	-1,0
16,76	-1,8	-0,4

Анализируя полученные результаты, видно, что в случае невязкого течения максимальная относительная погрешность не превышает 3%, что показывает хорошее совпадение численного решения с аналитическим. При учете вязкости жидкости максимальная относительная погрешность больше и составляет 3,7%. Такое отличие по сравнению с невязким потоком объясняется тем, что в аналитическом решении также не рассматриваются эффекты вязкости, а сама жидкость представляет собой добавленную массу. Тем не менее, вне зависимости от учета вязкости, численное решение показывает приемлемую точность и относительная погрешность разности фаз не превышает 5%.

2.7 Выводы

В разделе 2 рассмотрено решение задачи о вынужденных колебаниях прямолинейного деформируемого трубопровода с текущей по нему жидкостью. Изучены программные комплексы, позволяющие моделировать задачи вычислительной гидродинамики и алгоритм решения связанной упруго-гидродинамической задачи Fluid Structure Interaction. Разработана методика решения связанной задачи в программном комплексе ANSYS Workbench. Проведены расчеты при разных скоростях потока с учетом и без учета эффектов вязкости жидкости. Полученные результаты проанализированы и проведено сравнение с аналитическим решением.

Численное решение показывает хорошее совпадение с аналитическим в обоих случаях расчетов. Максимальная относительная погрешность не превышает 3,7% в случае вязкого турбулентного течения.

В дальнейшем, при переходе непосредственно к расчету реального Кориолисова расходомера, решено учитывать эффекты вязкости жидкости. Кроме того, в силу ограничений, используемых в моделях многофазного течения в пакете ANSYS Fluent, учет вязкости обязателен (подробнее об ограничениях многофазных моделей будет рассказано в разделе 4.2).

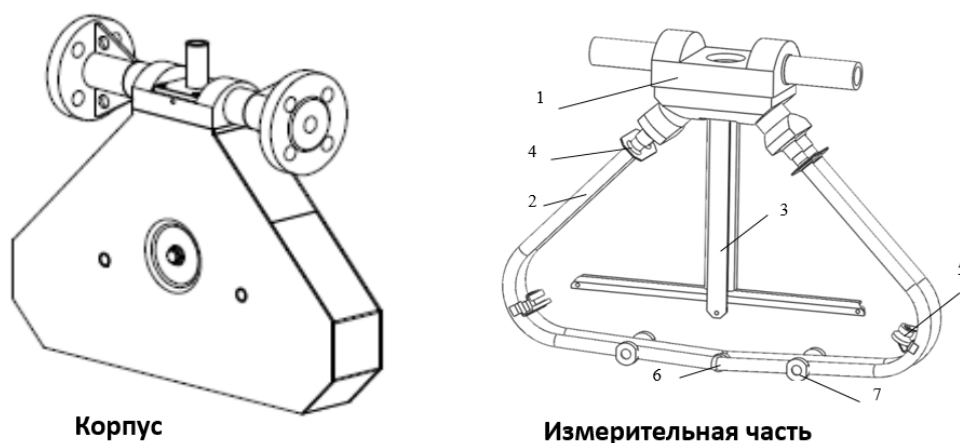
										Лист
										64
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	<i>15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР</i>					

3 Решение связанной упруго-гидродинамической задачи для кориолисова расходомера ЭЛМЕТРО-Фломак ДУ15 с текущей однофазной средой

3.1 Расчетная схема

После создания и верификации методики связанного упруго-гидродинамического расчета на прямолинейном трубопроводе, можно приступать к реализации данной методики для реально-существующего Кориолисова расходомера и сравнения полученных результатов с экспериментальными.

В качестве примера для исследования был выбран Кориолисов расходомер ЭЛМЕТРО-Фломак ДУ15 (рисунок 3.1). Параметры расходомера приведены в таблице 3.1



1 – основание; 2 – трубки;
3 – направляющая токосъемников; 4 – переключка;
5 – измерительные катушки; 6 – задающая катушка; 7 – грузы

Рисунок 3.1 – Кориолисов расходомер ЭЛМЕТРО-Фломак ДУ15

Таблица 3.1 – Метрологические характеристики Кориолисова расходомера ЭЛМЕТРО-Фломак ДУ15

Номинальный массовый расход жидкости, т/ч	Максимальный массовый расход жидкости, т/ч	Коэффициент k_g^*	Стабильность нуля(Z), \pm т/ч
3	4,5	80	0,00030
*коэффициент для расчета диапазона расхода газа			

Так как нас интересует только разность фаз, получаемая при решении упруго-гидродинамической задачи, то решено в качестве расчетной схемы использовать только одну трубку Кориолисова расходомера с датчиками перемещений, установленными в местах крепления измерительных катушек реального расходомера. Геометрические параметры трубки приведены на рисунке 3.2.

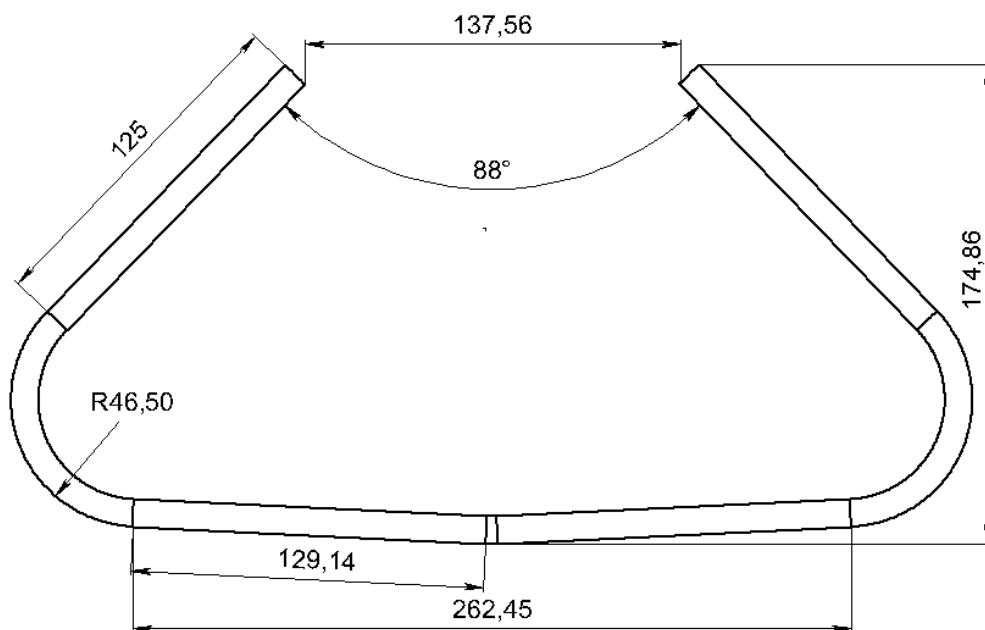


Рисунок 3.2 – Геометрические размеры трубки расходомера

Из-за того, что экспериментальные данные, полученные на проливочном стенде для расходомера Фломак ДУ15, имеются только для трех различных скоростей потока (см. раздел 3.2), то задача решалась только для них. При данных скоростях потока (таблица 3.2) наблюдается установившееся турбулентное течение, поэтому было решено использовать модель турбулентности SST k- ω . Параметры турбулентного потока определены по формулам 2.2 и 2.3 и приведены в таблице 3.2. Для более точного описания поведения потока была измельчена сетка конечных элементов как в окрестности стенок (пристеночный слой), так и в центре (рисунок 3.3).

Таблица 3.2 – Исходные данные для потока однофазной жидкости.

Массовый расход, кг/ч	Скорость потока*, м/с	Интенсивность турбулентности, %	Turbulence Length Scale, м
312	0,865	5,3	5,6·10 ⁻⁴
1004	2,775	4,6	
1960	5,411	4,2	
*Для каждой трубки кориолисова расходомера			

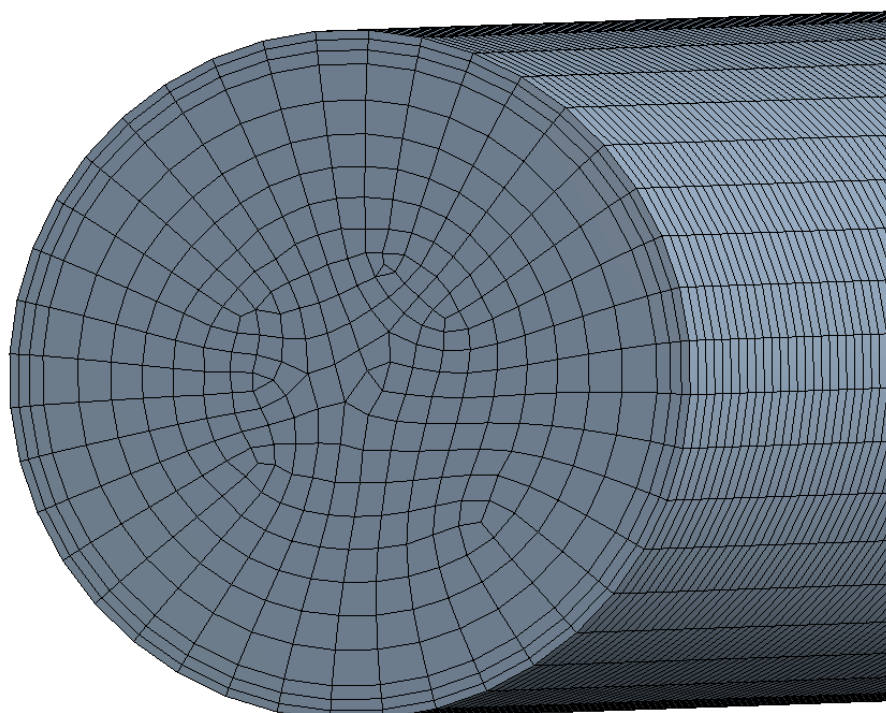


Рисунок 3.3 – Сетка конечных элементов для проточной части

Шаг по времени был выбран 0,00035 секунды, общее время расчета (когда колебания трубки выходят на установившийся режим) – 0,2 секунды. Сравнение реального времени расчета в зависимости от трудоемкости задачи представлено в таблице 3.3.

Полученные значения перемещения во времени были импортированы в программное обеспечение MathCAD и аппроксимированы с помощью встроенных функций. Значения разности фаз были получены на пересечении функции в конечный момент времени с нулем также при помощи функций,

встроенных в программное обеспечение MathCAD. График функции перемещения датчиков во времени показан на рисунке 3.4.

Таблица 3.3 – Сравнение трудоемкости связанного упруго-гидродинамического расчета.

	Прямой трубопровод	Изогнутый трубопровод расходомера ДУ15
Количество КЭ (твердотельные/жидк.)	3458 / 67452	10400 / 164388
Шаг по времени	0,0001	0,00035
Количество шагов по времени	200	572
Реальное время расчета	~3-5 часов	~16-19 часов

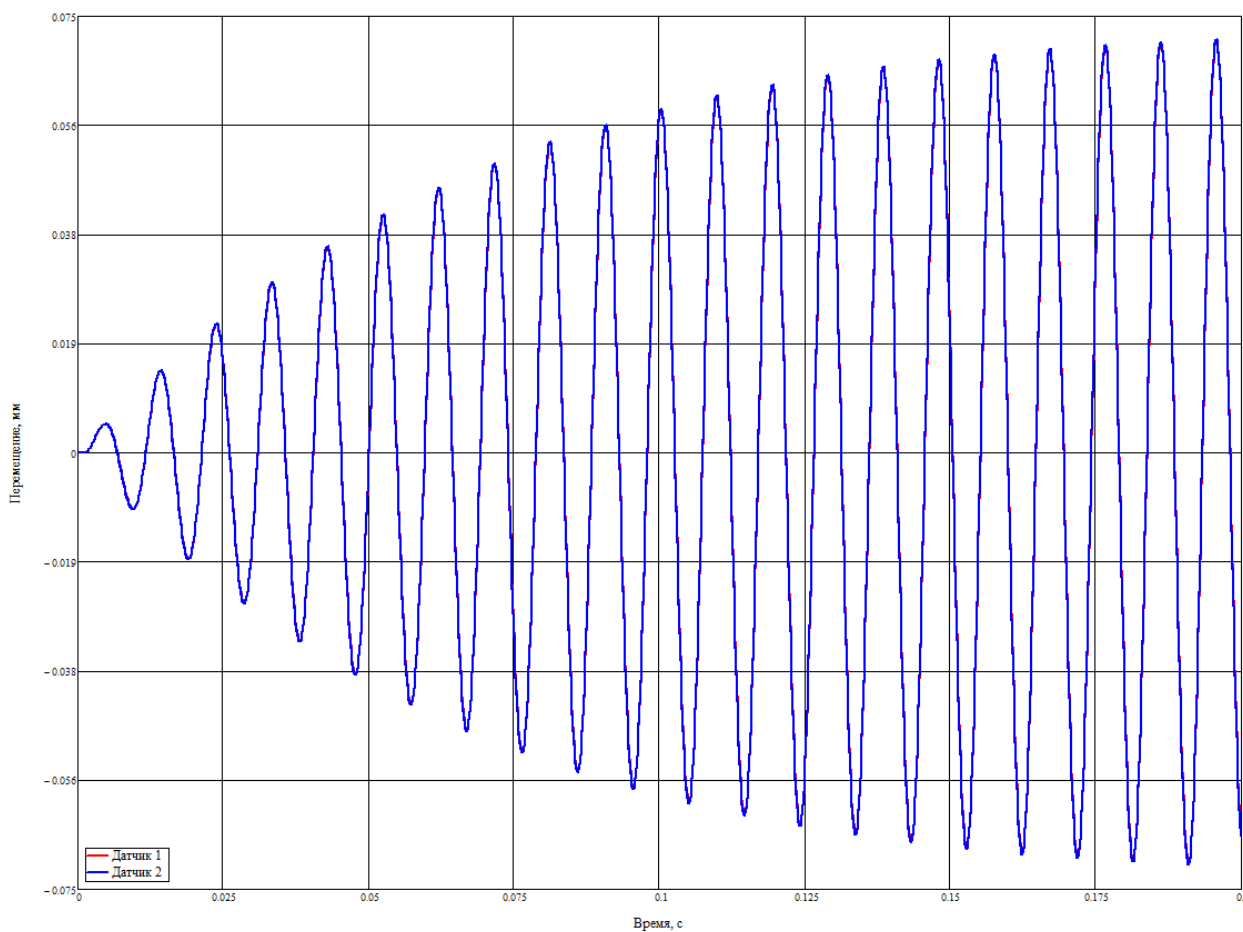


Рисунок 3.4 – Функция перемещения во времени в пакете MathCAD

3.2 Эксперименты на проливочном стенде кориолисова расходомера ЭЛМЕТРО-Фломак ДУ15

Цель эксперимента – запись сигнала возбуждения и сигнала отклика с измерительных катушек расходомера при разных параметрах потока воды (пустой расходомер; расходомер, заполненный водой без потока; поток воды с различной скоростью; поток воды с различной скоростью воды и разным содержанием воздуха).

Опытная модель расходомера ДУ15 закреплена на проливочном стенде. Расходомер вывешен на веревке и подсоединен к гибким шлангам. Проливочный стенд позволяет изменять скорость течения воды, давление воды, добавлять определенное количество воздуха в поток.

Во время эксперимента измерялось напряжение с трех катушек и сила тока с катушки возбуждения. Одновременно записывалась информация, измеренная с помощью штатной электроники: температура, давление, плотность, расход, частота, разность фаз.

Из многообразия проведенных экспериментальных случаев для сопоставления с упруго-гидродинамическим расчетом, смоделированным в пакете ANSYS, нам необходимо три:

- Возбуждение колебаний с помощью электроники запись сигнала возбуждения. По расходомеру течет вода со скоростью 1960 кг/ч;
- Возбуждение колебаний с помощью электроники запись сигнала возбуждения. По расходомеру течет вода со скоростью 1004 кг/ч;
- Возбуждение колебаний с помощью электроники запись сигнала возбуждения. По расходомеру течет вода со скоростью 312 кг/ч;

3.3 Сравнение результатов имитационного моделирования с экспериментальными значениями

Значения разности фаз, полученные при помощи численного моделирования и эксперимента, приведены в таблице 3.4. Относительная погрешность разности фаз, полученной с помощью численного моделирования, приведена в таблице 3.5.

									Лист
									69
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР				

Таблица 3.4 – Значения разность фаз, полученной численно и экспериментально, при разных скоростях потока.

Массовый расход, кг/ч	Разность фаз, мкс	
	Экспериментальное значение	Численное значение
312	4,58	5,85
1004	14,63	18,61
1960	28,66	36,17

Таблица 3.5 – Относительная погрешность разности фаз

Массовый расход, кг/ч	Отличие численного решения от экспериментального, %
312	-27,8
1004	-27,1
1960	-26,2

Анализируя полученные результаты, видно, что максимальная относительная погрешность численного решения не превышает 29,9%. Такая погрешность относительного эксперимента может объясняться следующими факторами:

- Расположение датчиков перемещения на твердотельной сетке конечных элементов задается вручную и существует смещение относительно реального месторасположения.

- Частота вынуждающей силы (первая собственная частота в плоскости возбуждения) в эксперименте составляет 90,2 Гц, а при численном решении 105,02. Данное отличие частот связано с тем, что в эксперименте рассматривается цельный расходомер, а при численном решении только одна трубка и отсутствуют добавленные массы. Также в эксперименте замеряется собственная частота с текущей, а не стоячей жидкостью (раздел 2.1). Кроме

того, в реальной конструкции существует ряд несовершенств и отличий, от трехмерной модели, которые также влияют на значения собственных частот.

– из предыдущего пункта следует, что частота вынуждающей силы находится не в точке резонанса, а в его окрестности. Из-за малого демпфирования это также может вносить погрешности в расчет разности фаз.

Несмотря на большую относительную погрешность разности фаз, по абсолютным величинам порядок численного решения совпадает с экспериментом. Кроме того, максимальная относительная погрешность отношения разностей фаз друг к другу не превышает 1,25%.

3.4 Выводы

В разделе 3 рассмотрено решение задачи о вынужденных колебаниях изогнутого трубопровода (на примере трубки Кориолисова расходомера Фломак ДУ15) с текущей по нему однофазной средой. Применена разработанная в разделе 2 методика численного решения и полученные результаты сравнены с экспериментальными данными.

Несмотря на то, что погрешность разности фаз, полученной в численном расчете, относительно наблюдаемой в эксперименте, составляет ~27%, по абсолютным величинам порядок результатов совпадает. Кроме того, максимальная относительная погрешность отношения разностей фаз друг к другу не превышает 1,25%, что говорит о том, что зависимости массового расхода, наблюдаемые в численном расчете совпадают с действующими в реальном расходомере.

Полученные результаты говорят о том, что численное решение находится в удовлетворительном согласии с экспериментом, следовательно, описанная в разделе 2 методика связанного упруго-гидродинамического численного расчета обладает достаточной достоверностью с реальностью.

					<i>15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		71

4 Решение связанной задачи упруго-гидродинамической задачи о течении двухфазной среды в трубопроводе на примере кориолисова расходомера ЭЛМЕТРО-Фломак ДУ15

4.1 Течение двухфазной среды жидкость-газ в трубопроводе

Существует множество разновидностей течения, реализующихся при наличии в потоке такой возмущающей компоненты, как газ. На рисунке 4.1 представлено распределение жидкости и газа в трубопроводе. С изменением скорости потока и содержания жидкости/газа распределение второй фазы может меняться значительно.

Поток с каким содержанием газа может быть точно измерен при помощи кориолисова расходомера – наиболее значимый в настоящее время вопрос. Множество параметров, таких как распределение газа, рабочее давление, вязкость влияют на способность к измерению.

Заставить кориолисов расходомер измерять любую многофазную среду вряд ли представляется возможным. К примеру, если газосодержание в протекающей среде мало и реализуется равномерный пузырьковый режим, то расходомер может работать без проблем. Но если содержание газа велико

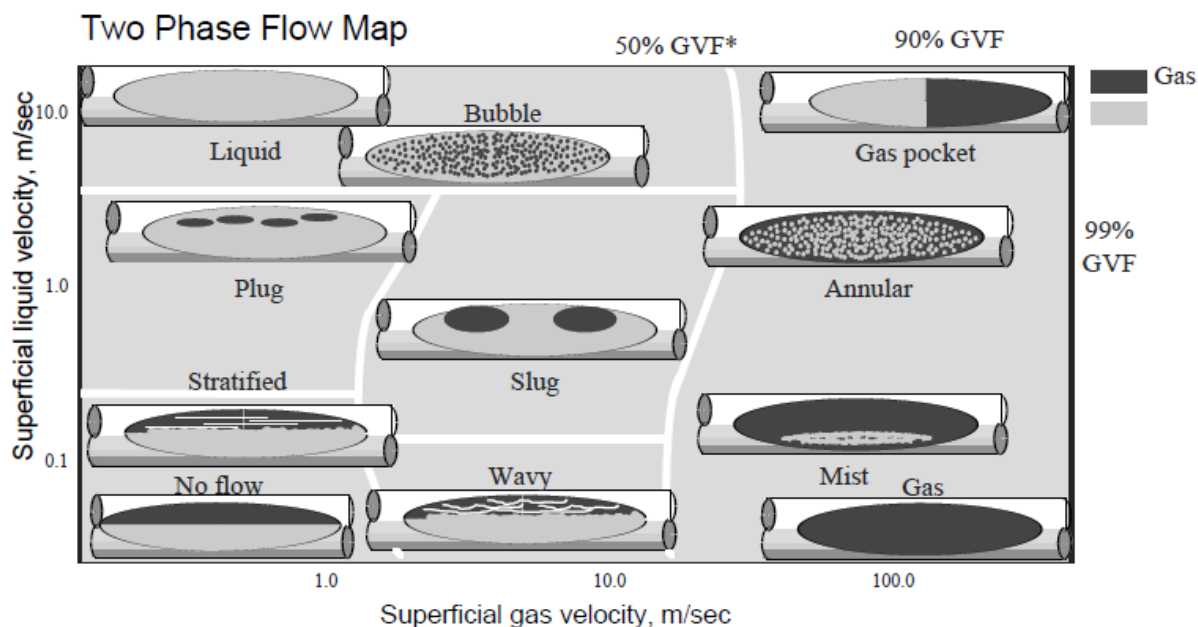


Рисунок 4.1 – Типы течения в трубопроводе в зависимости от поверхностных скоростей жидкости и газа

(или вязкость слишком низкая), то жидкость будет «отслаиваться», а колебания измерительных трубок начнут затухать. В качестве примера можно провести аналогию с баскетбольным мячом: если мяч полностью заполнен воздухом или водой, то при падении на поверхность произойдет отскок от неё. Но если мяч будет поровну заполнен каждой из фаз, то при ударе о поверхность произойдет рассеяние энергии и отскока не будет.

Наиболее часто встречаемый двухфазный режим – сляговый, при котором поперечное сечение трубы поочередно заполнено жидкостью и газом. Пустоты в жидкости сильно снижают точность измерения из-за вышеупомянутого затухания колебаний трубок. Если образование «слягов» носит постоянный характер, то невозможно будет использовать расходомер для измерения.

Следующие характеры течения – слоистый и волновой. При наличии больших областей пустот, низкие скорости жидкости и газа могут вызывать расслоение потока на две отдельные части и образование волн. В обоих случаях, измерение расхода не представляется возможным без специальных сепараторов.

При пузырьковом режиме течения газовая составляющая равномерно распределена и в зависимости от объемной доли, вязкости и конструкции расходомера поток может быть достаточно точно измерен. Эксперименты, проводимые в Национальной Инженерной Лаборатории (Великобритания) в 1993 году показали возможность работы кориолисова расходомера при содержании примерно 5% газа. Однако значительная часть расходомеров в ходе эксперимента показывало недопустимую погрешность и выходили из строя.

При проведении лабораторных испытаний массового расходомера «ЭЛМЕТРО-Фломак» с диаметром условного прохода 50мм на рабочей среде, имитирующей остаточное газосодержание сырой нефти после сепаратора, при повышении объемной доли газа свыше 3,9% до 10,5%,

										Лист
										73
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР					

относительная погрешность измерения существенно увеличивалась от 2,3% до 37,5%.

Во многих работах ранее проводилась попытка объяснить, за счет каких эффектов происходит потеря точности измерения (см. раздел 1.5). Однако, удовлетворительной количественной модели кориолисова расходомера с текущей по нему двух фазной средой, которая бы давала четкий ответ о процессах и силах, действующих на прибор, на сегодняшний день не существует [53].

4.2 Возможности CFD пакета ANSYS Fluent для моделирование многофазного потока

Программный комплекс ANSYS Fluent является одним из передовых инструментов в сфере моделирования многофазных течений, включающий в себя модели, позволяющие реализовать следующие типы многофазных течений:

- Смесь жидкости/газа;
- Смесь газа/твердых частиц;
- Смесь жидкости/твердых частиц;
- Поток двух несмешивающихся жидкостей.

Распределение моделей многофазного течения в зависимости от их назначения представлено на рисунке 4.2.

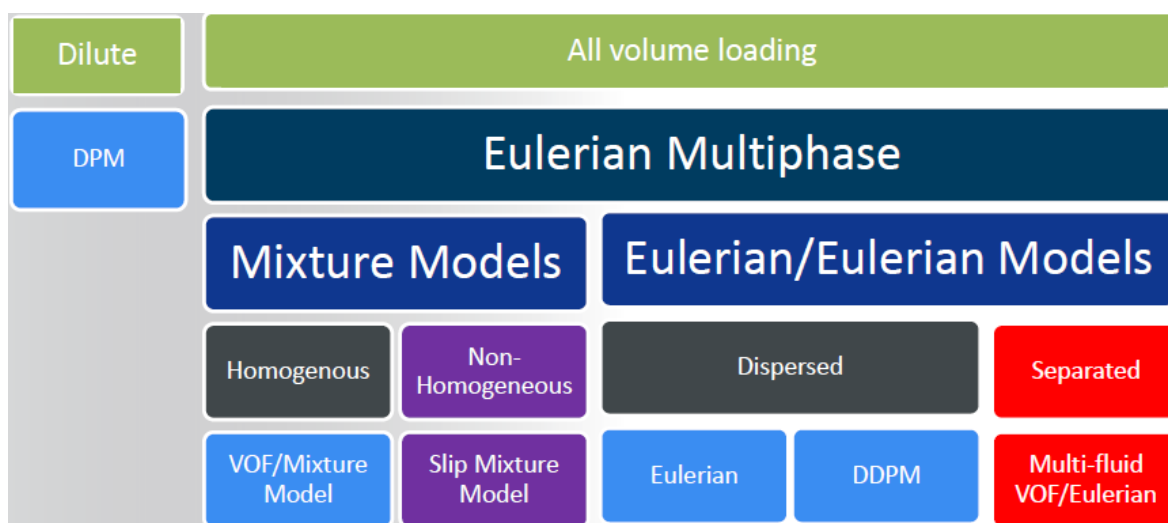


Рисунок 4.2 – Подходы к моделированию многофазного течения в пакете ANSYS Fluent

Для пузырькового и капельного потоков, где фазы перемешались или дисперсная фаза превышает 10% использует модель Mixture или Eulerian. Кроме того эти две модели могут использоваться для гомогенных и гранульных потоков.

Для слоистых и слоистых потоков следует использовать модель Volume of Fluid (VOF).

Делая выбор между моделью Eulerian или Mixture, следует придерживаться следующих положений:

если вторая фаза сконцентрирована только в определенной области, то следует использовать модель Eulerian (и наоборот если дисперсная фаза занимает весь объем, то следует выбирать модель mixture);

Если межфазные законы сопротивления применимы к решаемой задаче, то следует выбирать модель Eulerian.

Модель Mixture следует использовать, когда требуется решить упрощенную задачу с применением малых вычислительных мощностей.

4.2.1 Модель Volume-of-Fluid

Подход VOF позволяет смоделировать две и более несмешивающихся фазы, решая единый набор уравнений движения и отслеживая объемную долю каждой фазы во всей проточной части. Одно из основных применений данного подхода – моделирование слоистого/слоистого течения.

На данную модель прикладываются следующие ограничения:

Необходимость использования решателей на основе давления

Все контрольные объемы должны быть заполнены либо одной фазой, либо их комбинацией. Не допускаются области пустот, где отсутствуют обе фазы.

Только одна фаза может быть определена как сжимаемый газ.

VOF не применима, если размер поверхности взаимодействия меньше чем одна ячейка сетки (рисунок 4.3)

									Лист
									75
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР				

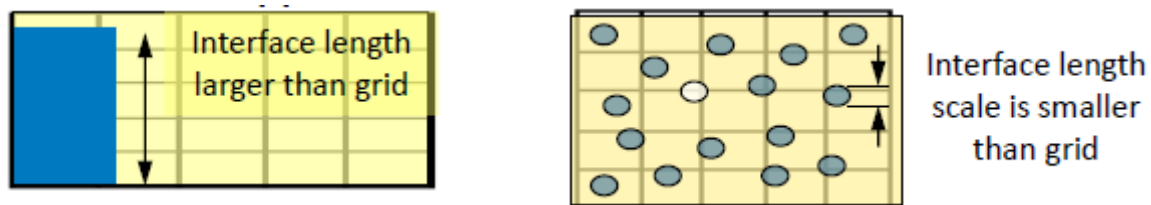
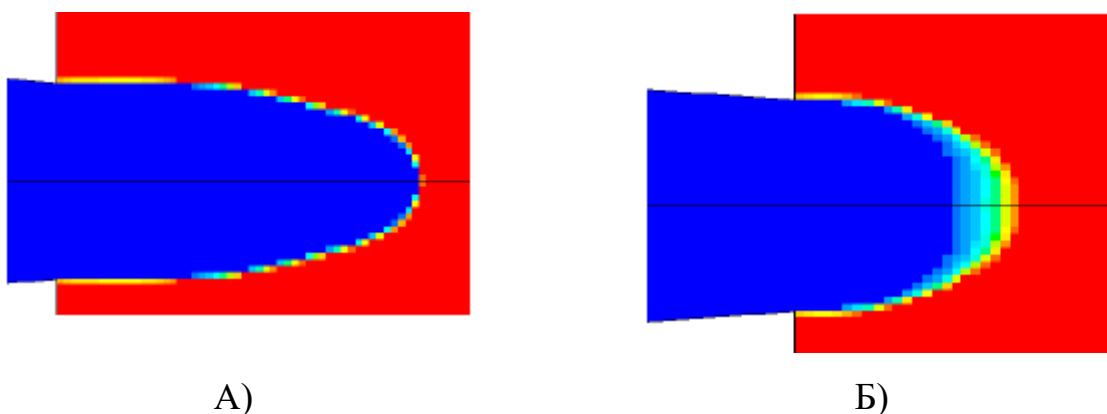


Рисунок 4.3 – Ограничение модели VOF на размер элемента сетки

Подход VOF в основном используется для решения задач в нестационарной постановке. Применение стационарного подхода имеет смысл только тогда, когда решение не зависит от начальных условий и есть четкие граничные условия на входе для каждой из фаз.

Для решения уравнения объемной доли можно применять одну или двух схем интегрирования: явную и неявную. Явную схему следует использовать, когда при моделировании потока важно поверхностное натяжение и точная граница раздела. Однако сходимость при данной схеме сильно зависит от качества сетки. Неявная схема интегрирования же не требует вычисления числа Куранта т.к. использует только итеративный решатель и может применяться при плохом качестве сетки и больших шагах по времени. Но взамен граница раздела двух сред не четкая и имеет численное перемешивание (рисунок 4.4)



А)

Б)

Рисунок 4.4 – Граница раздела двух фаз

а) Явная схема интегрирования б) Неявная схема интегрирования

4.2.2 Модель Mixture

Данный подход представляет собой упрощенную модель многофазного течения. Он может использоваться в том случае, когда фазы потока движутся с разными скоростями, но находятся в локальном равновесии. Также данная модель может использоваться для гомогенных многофазовых потоков с сильной связью, а также для вычисления вязкости не-Ньютоновских жидкостей.

При применении данной модели решается уравнение движения, неразрывности, энергии, а также уравнения объемной доли для второй фазы.

Модель Mixture является хорошей заменой полноценному подходу Eulerian в некотором ряде случаев. Например, когда вторая фаза полностью распределена по всему объему или когда неизвестны межфазные законы.

На данную модель прикладываются следующие ограничения:

Необходимость использования решателей на основе давления

Только одна фаза может быть определена как сжимаемый газ.

Невязкий тип течения не применим к данной модели.

4.2.3 Модель Eulerian

Модель многофазного течения Eulerian позволяет реализовать случай течения отдельных, но всё еще взаимодействующих фаз. Данные фазы могут быть жидкими, твердыми и газообразными. Количество фаз при применении данного подхода ограничено только вычислительными возможностями. Для комплексных многофазных задач точное решение может быть ограничено сходимостью.

При применении данной модели уравнение движения и неразрывности решается отдельно для каждой фазы. Кроме того доступны межфазные коэффициенты сопротивления, подходящие для разных типов многофазных течений.

Все ограничения прошлой модели (раздел 4.2.2) действуют и на данную.

									Лист
									77
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР				

Кроме того, в данном подходе есть возможность переключиться на Multi-Fluid VOF, который представляет собой связь моделей VOF и Eulerian. Это позволяет использовать дискретизационные схемы подхода VOF для объемной доли, убирая ограничения, наложенные вследствие решения единого уравнения движения.

4.3 Решение гидродинамической задачи о течении двухфазной среды в пакете ANSYS Fluent

4.3.1 Постановка гидродинамической задачи о течении двухфазной среды

При появлении в расчетной модели второй фазы существенно возрастает трудоемкость задачи. В зависимости от применяемой модели многофазного течения, схемы интегрирования, методов решения, размеров возмущающей компоненты повышается требования к размерности сетки. Кроме того, в общем случае, многофазное течение всегда нестационарный процесс и требует значительных затрат времени по сравнению с однофазной постановкой.

Перед тем, как приступить к решению связанной упруго-гидродинамической задачи в двухфазной постановке, решено реализовать два расчетных случая:

течение одиночного большого пузыря по измерительной трубке;

поток с объемным газосодержанием 10%, подаваемым на входе в измерительную трубку.

При моделировании первого расчетного случая решено использовать подход VOF. Во втором же случае целесообразно будет использовать подход Eulerian с включенной функцией Multi-Fluid VOF т.к. при объемной доле газа, равной 10% при определенных условия (в зависимости от скорости каждой из фаз, искривленности трубки) может происходить смена режима потока с пузырькового на снарядный или сляговый.

									Лист
									78
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР				

Кроме того, ввиду того, что нет экспериментов и/или аналитических моделей, которые могут достоверно подтвердить правильность проводимого гидродинамического расчета, то принимается, что критерием достоверности выступает сходимость по невязкам, дисбалансам и наблюдаемым интегральным величинам, а сам режим течения является одним из возможных реализуемых.

4.3.2 Задача о течении одиночного пузыря в измерительной трубке

Как было сказано ранее в разделе 4.3.1, для моделирования данного расчетного случая будет использоваться модель VOF. Постановка задачи следующая: по измерительной трубке кориолисова расходомера в качестве основной фазы течет вода, после чего в течение короткого промежутка времени подается вторая фаза, которая представляет собой воздух, с объемной долей 100% и дальше производятся наблюдения за поведением полученной воздушной пробки.

Исходные данные приняты следующие:

расчетная схема – измерительная трубка кориолисова расходомера ЭЛМЕТРО-Фломак ДУ15 (рисунок 3.2);

скорость потока равна 2,775 м/с;

используемая модель турбулентности SST $k-\omega$; параметры турбулентного потока определены по формулам (2.2) и (2.3);

шаг по времени принят равным 0,0003 с; общее количество шагов по времени равно 630.

Для увеличения качества расчета и снижения численной ошибки на границе раздела фаз количество элементов сетки конечных объемов было увеличено с 164388 до 464736 (примерно в 2,8 раза). Кроме того, был увеличен пограничный слой для лучшего описания модели турбулентности.

Граница раздела между фазами принята острой (жидкости не перемешиваются, и граница определена как четкая). Также включена опция

Interfacial Anti-Diffusion, которая также увеличивает четкость границы раздела.

Для того, чтобы уменьшить количество шагов по времени и использовать большой шаг по времени решено использовать неявную схему интегрирования. Для решения уравнения объемной доли выбран метод Compressive как более точный (однако, менее стабильный по сравнению с HRIC). На рисунке 4.5 показано отличие численной ошибки на границе раздела в зависимости от схемы интегрирования и метода решения уравнения объемной доли.

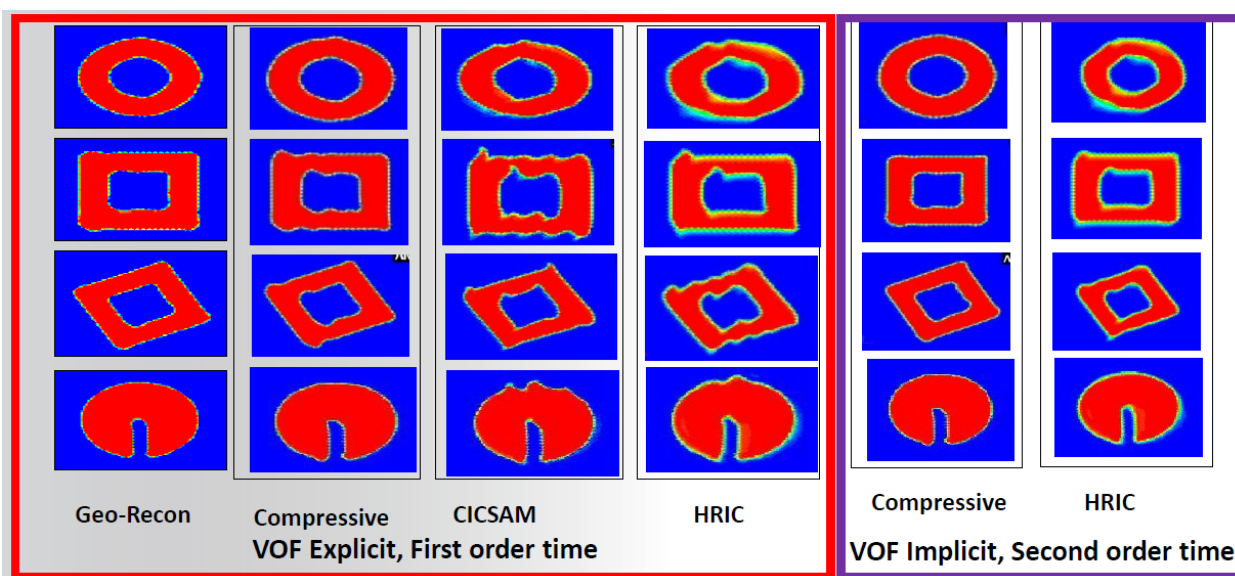


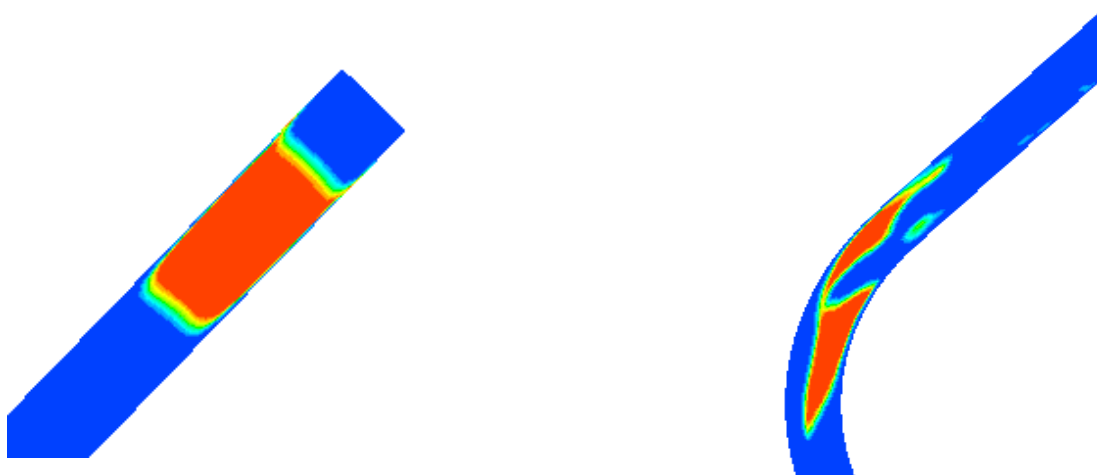
Рисунок 4.5 – Сравнение методов решения уравнения объемной доли

Уровень сходимости по невязкам принят $5 \cdot 10^{-5}$. При данном уровне сходимости решение носит больше качественный характер, чем точный, однако опытным путем определено, что наблюдаемая величина (массовый расход) выходит на асимптоту и совпадает как на входе, так и на выходе.

Сходимость по дисбалансу массы выполняется на уровне $\pm 5 \cdot 10^{-13}$, что говорит о соблюдении закона сохранения массы.

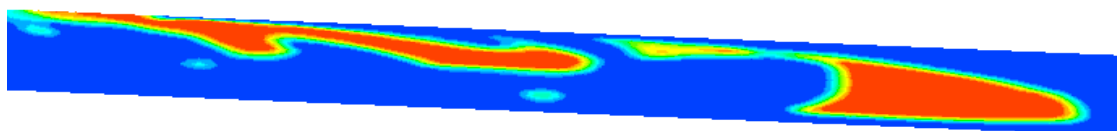
Время на решение одного шага по времени составило примерно 4 минуты. Полное время расчета составило примерно 42 часа.

На рисунке 4.6 приведена раскадровка движения одиночного пузыря по трубке кориолисова расходомера.

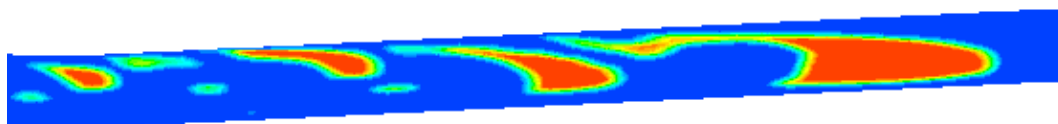


А) Начальный момент времени

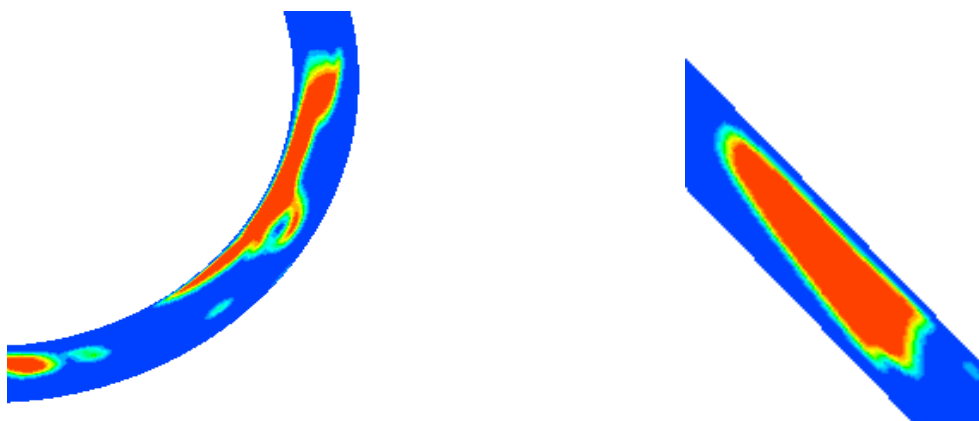
Б) Разделение пузыря



В) Разделение пузыря в горизонтальном участке расходомера



Г) Разделение пузыря в горизонтальном участке расходомера



Д) Слияние пузыря

Е) Конечный момент времени

Рисунок 4.6 – Раскадровка движения одиночного пузыря (красный цвет – 100% содержание воздуха, синий цвет – 100% содержания воды)

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР

Как видно из рисунка 4.6 численная ошибка границы раздела все-таки присутствует. Это может объясняться большим шагом по времени, недостаточным качеством сетки или схемой интегрирования.

Анализируя рисунок 4.6, можно прийти к выводу, что по мере продвижения пузыря по измерительной трубке несколько раз происходит слияние и разделение пузыря. При переходе с вертикального на горизонтальный участок происходит разделения пузыря на несколько частей. В дальнейшем это разделение продолжается вплоть до подхода ко второму переходу на вертикальную часть, где происходит слияние большинства отдельных частей и в дальнейшем пузырь движется как одно целое.

Данный расчет интересен тем, что в нем возможно сравнить силы, действующие на измерительную трубку в сечении, содержащем возмущающую компоненту, с сечением где присутствует только жидкость.

4.3.3 Задача о течении с подачей 10% газа на входе.

Данная задача будет решаться с применением подхода Eulerian и включенной опцией Multi-Fluid VOF. Постановка задачи следующая: на входе в измерительную трубку подается смесь из жидкости и пузырьков воздуха диаметром 0,5 мм с объемной долей 10%.

Исходные данные приняты следующие:

расчетная схема – измерительная трубка кориолисова расходомера ЭЛМЕТРО-Фломак ДУ15 (рисунок 3.2);

массовый расход первой фазы равен 0,279 кг/с; массовый расход второй фазы $3 \cdot 10^{-5}$ кг/с

используемая модель турбулентности SST k- ω ; параметры турбулентного потока определены по формулам (2.2) и (2.3);

шаг по времени принят равным 0,0005 с; общее количество шагов по времени равно 530.

Граница раздела также как и в разделе 4.3.2 принята острой. В отличие от предыдущей задачи, используется явная схема интегрирования. Для решения уравнения объемной доли выбран метод Compressive.

Уровень сходимости по невязкам принят 10^{-4} . При данном уровне сходимости решение носит только качественный характер. Выбор данного уровня сходимости обусловлен тем, что выбрана явная схема интегрирования, выбранный шаг по времени вносит сильную неустойчивость в ход сходимости, а также же из-за недостаточной измельченной сетки конечных объемов (в данной задаче использовалась размерность сетки, соответствующей однофазному потоку).

Уровень сходимости по дисбалансу массы составляет 10^{-8} , что в качестве общей сходимости задачи по сравнению с приведенной в разделе 4.3.2.

Массовый расход в пределах одного шага по времени выходил на асимптоту, однако из-за специфичности реализуемого в ходе решения типа многофазного течения разнится от шага к шагу.

На рисунке 4.7 приведена картина распределения объемной доли воздуха в конечный момент времени.

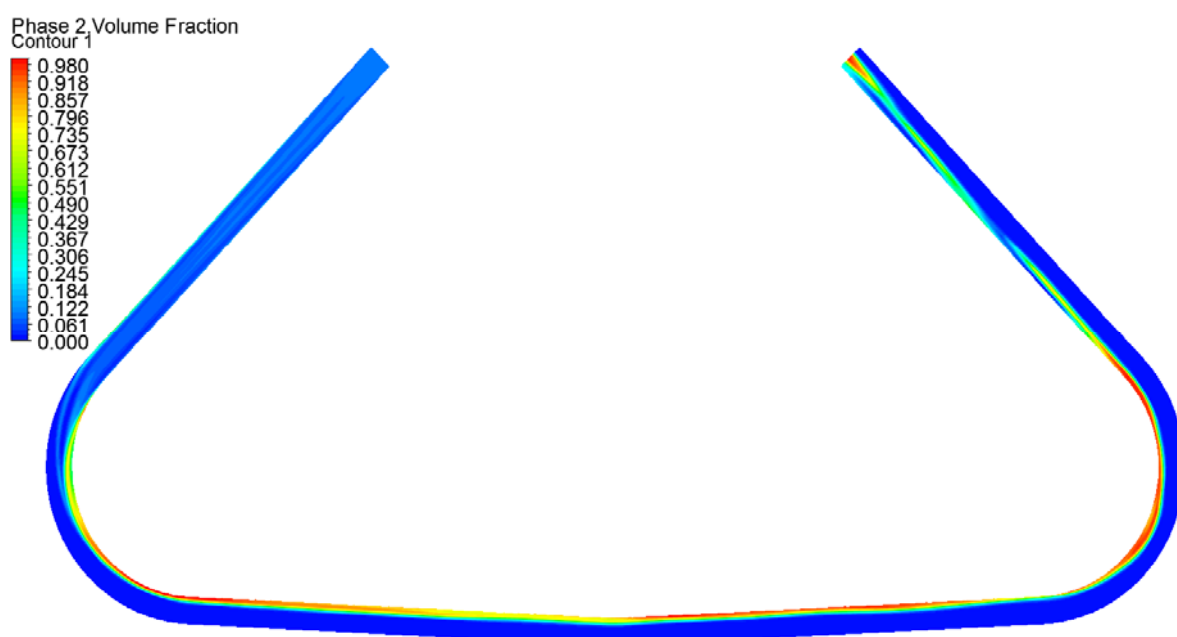


Рисунок 4.7 – Распределение объемной доли воздуха в сечении измерительной трубки

Анализируя полученные результаты, видно, что по мере течения смеси жидкость/газ по трубопроводу изменяется режим течения. Если в начале на вертикальном участке реализовался пузырьковый режим, то по мере перехода на горизонтальный участок режим течения меняется на переходный к слаговому. Большинство пузырей концентрируются в верхней части трубки, а в некоторых местах слипаются и образуют слагги.

Данный расчет интересен тем, что позволяет оценить влияние размерности сетки конечных объемов и схемы интегрирования на ход сходимости, а также дает представление об особенностях моделирования пузырькового течения.

4.4 Решение связанной упруго-гидродинамической задачи о течении двухфазной среды с помощью программного комплекса ANSYS

После того, как были изучены подходы, используемые в программном комплексе ANSYS Fluent для моделирования многофазных потоков, и реализованы гидродинамические задачи, рассмотренные в разделах 4.3.1 и 4.3.2, было решено приступить к реализации связанной упруго-гидродинамической задачи.

Данная задача оказалась очень трудоемкой и решить её напрямую путем переключения «галочек» оказалось невозможным. Задача гидродинамики о течении двухфазной среды является комплексной и требующей учет многих факторов, а в связанной постановке сложность задачи значительно усиливается.

Эксперименты, проводимые на проливочном стенде для расходомера ЭЛМЕТРО-Фломак ДУ15 и описанные в разделе 3.2 включали в себя кроме однофазных опытов еще следующие двухфазные:

– Возбуждение колебаний с помощью электроники запись сигнала возбуждения. По расходомеру течет вода со скоростью 1960 кг/ч. Объемная доля воздуха 1,5%, 2,75%, 5,1%, 10%;

– Возбуждение колебаний с помощью электроники запись сигнала возбуждения. По расходомеру течет вода со скоростью 1004 кг/ч. Объемная доля воздуха 1,5%, 2,75%, 5,1%, 10%;

– Возбуждение колебаний с помощью электроники запись сигнала возбуждения. По расходомеру течет вода со скоростью 312 кг/ч. Объемная доля воздуха 10%.

В связи с этим первой попыткой реализации связанного расчета было моделирование одного из данных опытов на примере задачи, решенной в пункте 4.3.2. Алгоритм расчета был идентичен тому, что используется при однофазном потоке (т.е. начальное приближение решалось в квазистационарной постановке). Настройки решателя и коэффициенты релаксации были также идентичны. Использовалась модель турбулентности SST k- ω .

Общее время расчета возросло с 19 до 60 часов (значение получено экстраполяцией из-за того, что не один из расчетов в серии не завершился до конца). Расчеты были проведены для разных скоростей потока и объема газосодержания. В каждом из расчетов наблюдалась примерно одинаковая картина – первые шаги по времени идут с достаточно хорошим уровнем сходимости механической, жидкостной и синхронизирующей частей, после чего с каждым шагом уровень сходимости по невязкам жидкостной части падает вплоть до 10^{-1} (рисунок 4.8), что говорит о недопустимой вычислительной ошибке. Наблюдая за сходимостью по дисбалансам также видно, что на некоторых шагах по времени дисбаланс массы не стремится к нулю, что говорит о нарушении закона сохранения (рисунок 4.9). Анализируя перемещение во времени датчиков (рисунок 4.10), измеряющих разность фаз, видно, что амплитуды колебания каждого из датчиков отличается, а их разность фаз становится заметна визуально.

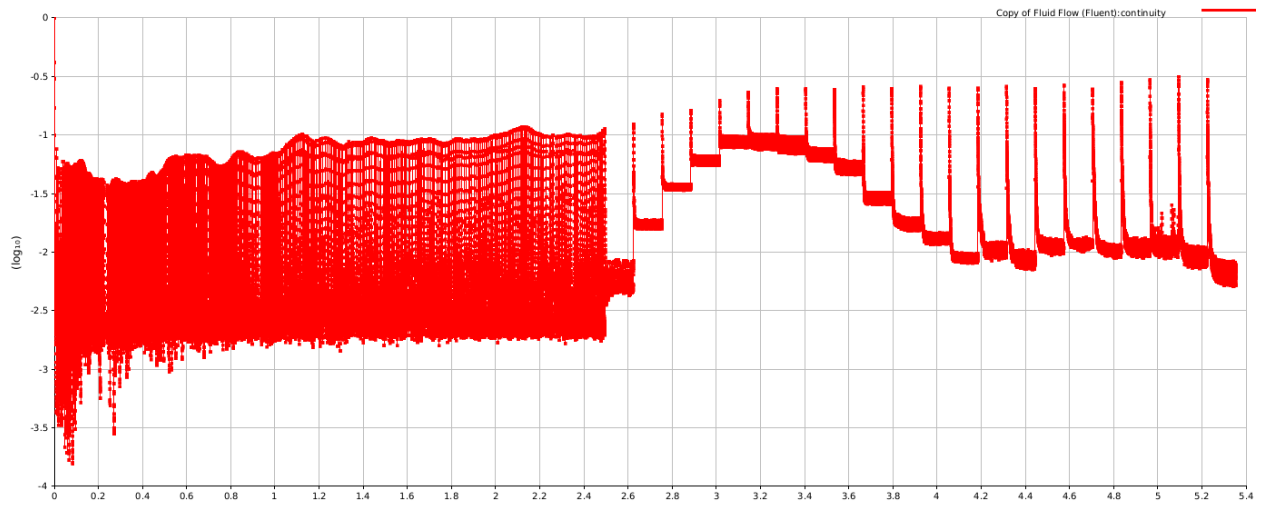


Рисунок 4.8 – Падение сходимости по среднеквадратичным невязкам

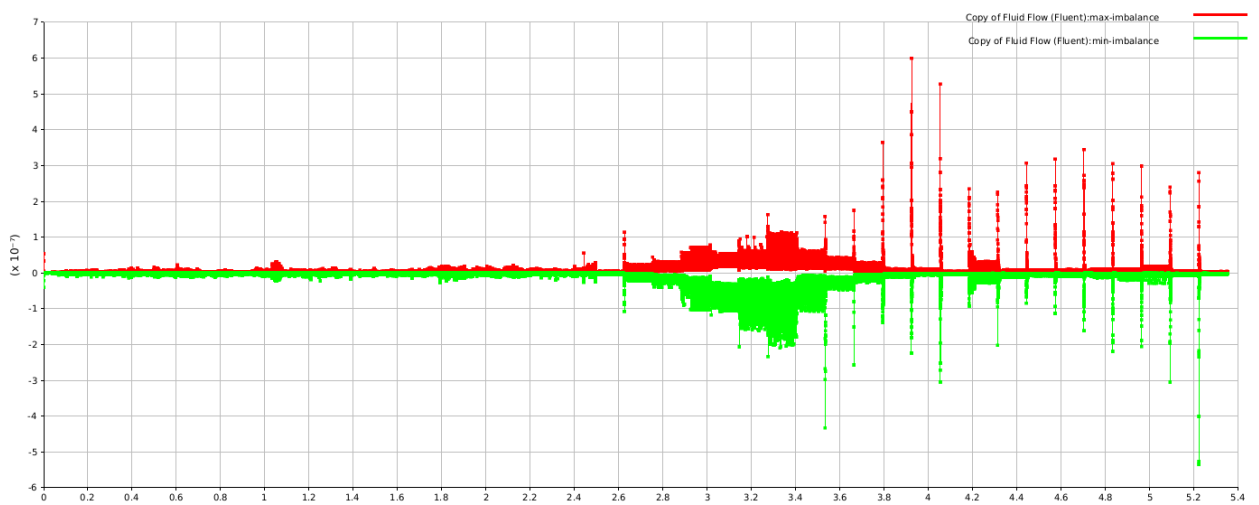


Рисунок 4.9 – Нарушение закона сохранения массы
(расхождение с ростом итераций)

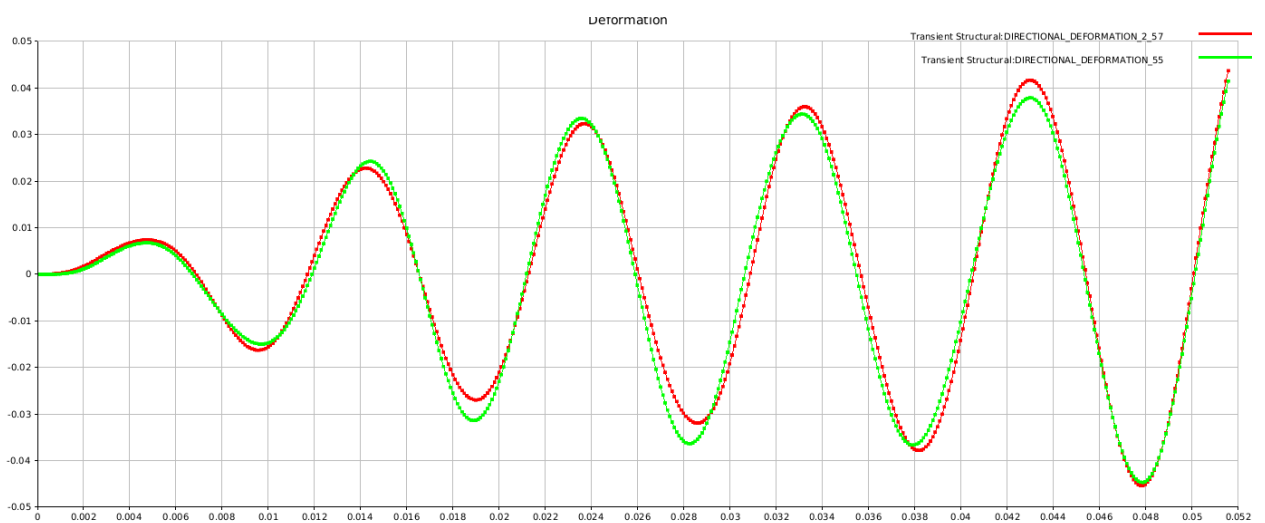


Рисунок 4.10 – Различие амплитуд и разности фаз перемещений датчиков во времени

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР

Следующим шагом в моделировании связанной задачи был отказ от моделирования пузырькового потока в пользу решения задачи, описанной в разделе 4.3.2 – исследование влияния крупного пузыря на вынужденные колебания.

В методике расчета было сделано два принципиальных изменения. Первое – начальное приближение рассчитывалось как переходный процесс (ранее как квазистационарный). Это было необходимо, чтобы поместить воздушный пузырь в определенной части проточной части, отдаленной от граничного условия входа. Второе принципиальное изменение – это переход с решателя Coupled на PISO. Было выяснено, что алгоритм Coupled достаточно эффективен только для однофазных потоков. Алгоритм PISO же больше рекомендован для переходных процессов с большими шагами по времени. Кроме того, в нем есть опции, повышающие сходимость при сильно искривленной сетке.

При выполнении начального приближения уровень сходимости по невязкам до требуемой величины $5 \cdot 10^{-5}$ достигался стабильно без осцилляций. Сходимость по дисбалансам и интегральным величинам также была стабильна и удовлетворительна.

Но при решении связанной задачи возникла такая проблема, как расхождение контрольных величин в решателе, а именно расхождение по давлению и вязкости турбулентности. От 3х до 10 шагов сопряженного решения (в зависимости от шага по времени) выполнялись, после чего появлялось расхождение и расчет останавливался. Кроме того, было замечено, что измельчение шага по времени вело к тому, что расчет останавливался из-за сильного искривления элементов механической части.

В результате было принято решение вернуться к пузырьковому течению с учетом полученных ранее результатов.

Вначале был сильно измельчен пограничный слой (если раньше было 7 кольцевых элементов с плавным увеличением размера, то стало 12 элементов, первый из которых имеет толщину порядка 0,05 мм с

										Лист
										87
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР					

фиксированным увеличением в 1,3 раза). Начальное приближение выполнялось в нестационарной постановке, как и в случае с течением одиночного пузыря.

Модель турбулентности была изменена с SST k- ω на k- ϵ . Главное отличие новой модели в том, что она менее требовательная по сравнению с SST k- ω , в которой в свободном потоке используются уравнения стандартной k- ϵ модели, а вблизи стенок уравнения k- ω . Взаимодействие с турбулентностью было определено для каждой фазы (первоначально взаимодействие определялось только для смеси). Это замедлит выполнение расчета, но более корректно опишет взаимодействие фаз.

При помощи анизотропной формулировке закона сопротивления, а также выбора диаметра пузырька в 2 мм удалось добиться равномерного распределения газообразной фазы по всему объему (рисунок 4.11).

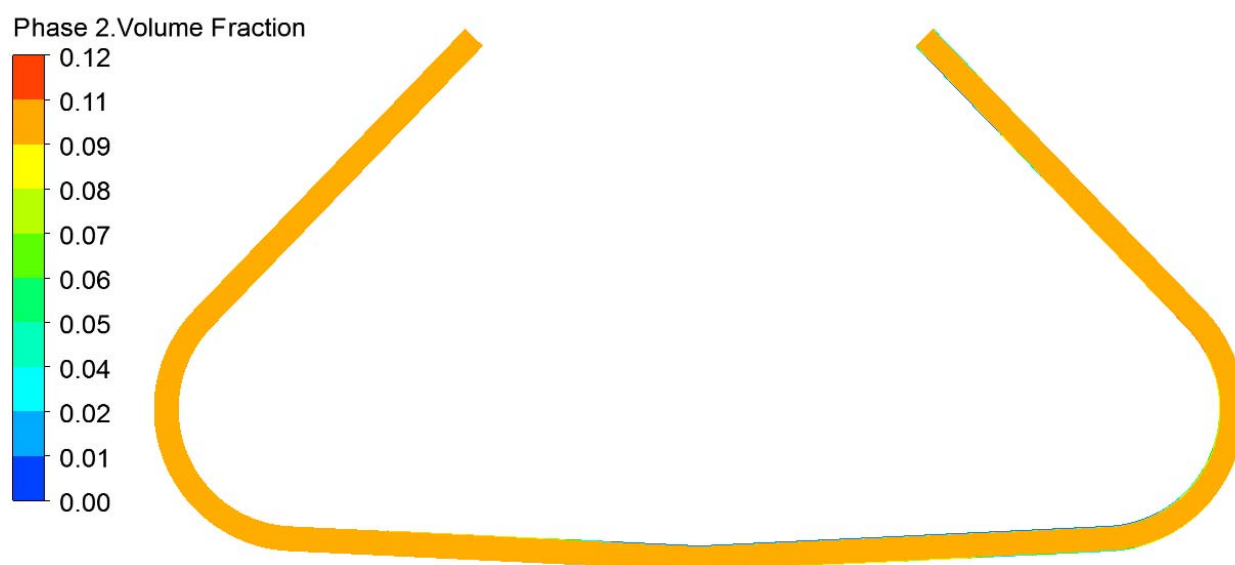


Рисунок 4.11 – Распределение объемной доли газа в сечении трубки

Коэффициенты релаксации решателя были подобраны опытным путем таким образом, чтобы обеспечить максимально стабильную сходимость до достижения требуемой величины.

В отличие от предыдущих попыток, в данном расчете поведение сходимости в связанном расчете по среднеквадратичным невязкам, дисбалансу массы и массовому расходу стабильно и удовлетворительная сходимость на требуемом уровне сохраняется в течение всего времени

расчета. Массовый дисбаланс был на уровне 10^{-7} только на первых итерациях, после чего стабильно находился на уровне 10^{-11} (рисунок 4.12) и с каждым новым шагом по мере роста итераций стремился к нулю (что говорит о корректном соблюдении закона сохранения). Сходимость уравнения объемной доли по мере роста итераций улучшалась (рисунок 4.13).

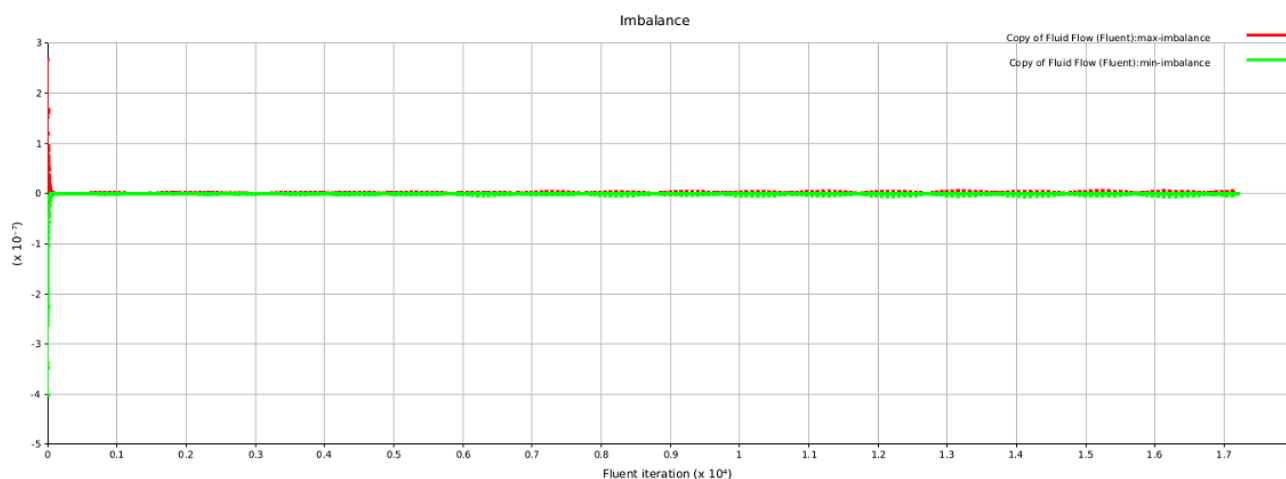


Рисунок 4.12 – Сходимость дисбаланса массы

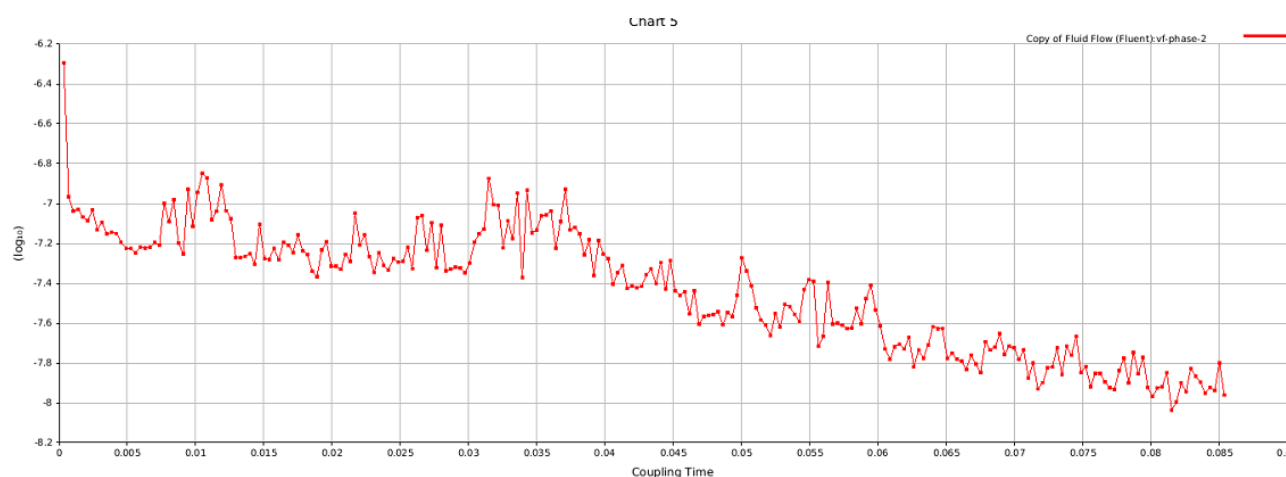


Рисунок 4.13 – Поведение сходимости объемной доли с ростом итераций

Единственным проблемным местом при выполнении данного расчета является слабая сходимость синхронизации обоих расчетов. Максимальный уровень, который достигался - $5 \cdot 10^{-4}$, однако само поведение сходимости с ростом итераций также было циклично и стабильно, что говорит о качественной синхронизации решателей обеих частей. В качестве объяснения причины этого явления предполагается, что с измельчением сетки конечных объемов жидкостной части для улучшения сходимости

необходимо также измельчать и твердотельную сетку конечных элементов и, возможно, перейти от оболочечных к solid элементам.

Полученное решение сравнивалось с аналогичным расчетом для случая однофазного течения на отрезке времени от 0 до 0,114с. Решение производилось в обоих случаях на одинаковой сетке конечных объемов. Задача об однофазном течении по деформируемому трубопроводу выполнялась примерно 48 часов. В тоже время, решение данной задачи в многофазной постановке в общем заняло 84 часа (24 часа для нахождения начального приближения в нестационарной постановке и 60 часов непосредственно на связанный расчет). На рисунке 4.14 приведено сравнение перемещения во времени левых датчиков, измеряющих разность фаз.

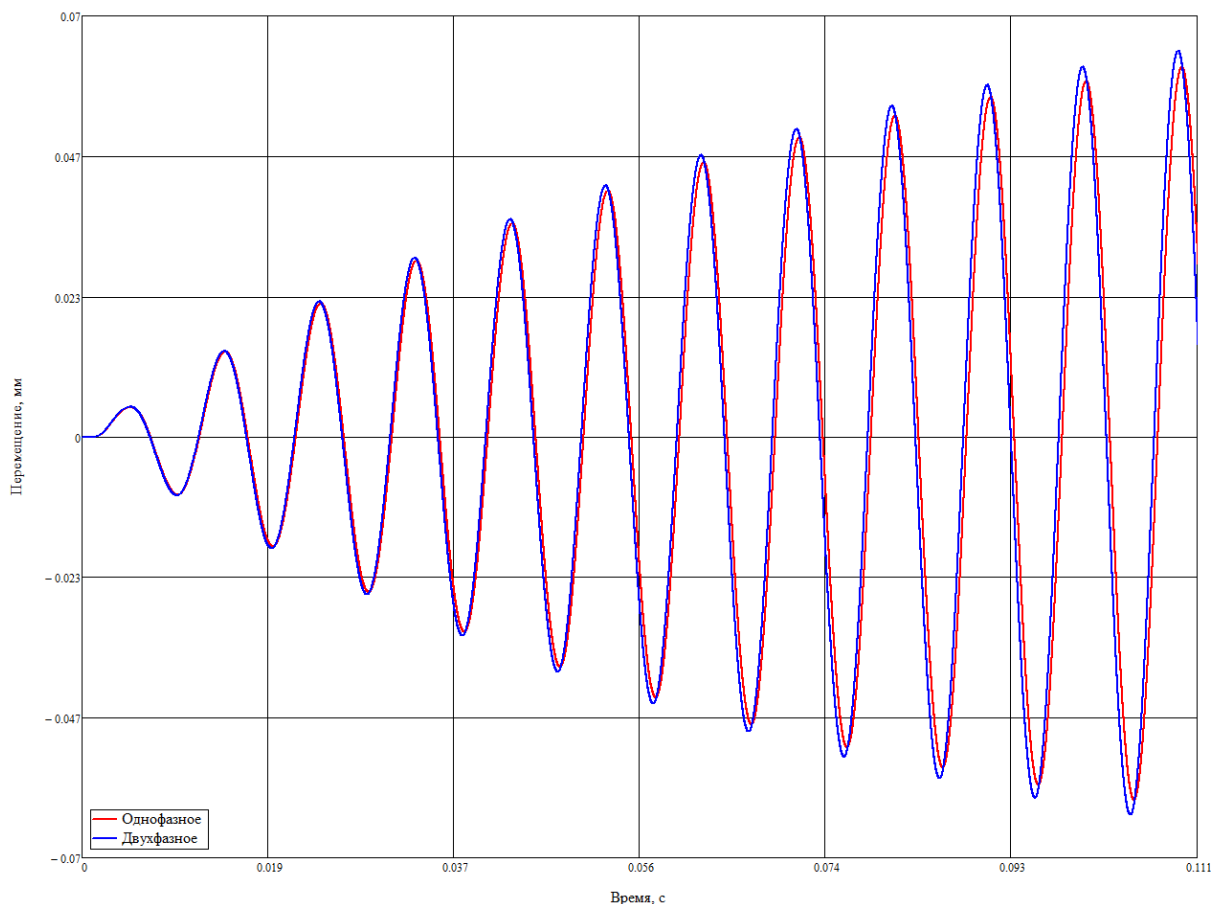


Рисунок 4.14 – Перемещение во времени левых датчиков на измерительной трубке при отсутствии и наличии второй фазы

Как видно, происходит заметный сдвиг по фазе колебаний. Кроме того, при двухфазной постановке также возросли амплитуды колебаний. Это

объясняется возможно тем, что при равномерном распределения пузырьков по всей проточной части общая плотность потока меньше.

В таблице 4.1 приведено сравнение разности фаз в случае однофазной и двухфазной постановки, а также к аналогичному экспериментальному случаю при содержании 10% газовой фазы (описание эксперимента приведено в начале раздела).

Таблица 4.2 – Разность фаз в случае однофазного и двухфазного течения

Массовый расход жидкости, кг/ч	Разность фаз, мкс		
	Однофазная постановка	Двухфазная постановка	Экспериментальное значение(однофазное/двухфазное)
1960	35,74	37,99	28,66/23,62

Анализируя поведение разности фаз, полученной в численном решении, можно сделать вывод, что оно корректное т.к. в используемой постановке задачи к постоянному массовому расходу жидкости в 1960 кг/ч прибавляется еще массовый расход газа, а, следовательно, разность фаз должна возрасти.

4.5 Выводы

В разделе 4 рассмотрено как решение задачи гидродинамики о течении двухфазной среды, так и связанной упруго-гидродинамической задачи о вынужденных колебаниях кориолисова расходомера.

Разработанная ранее методика расчета при однофазном течении была усовершенствована для расчета двухфазного потока, с допущением, что возмущающая компонента равномерно распределена по всему объему проточной части. Сравнение результатов расчетов в зависимости от постановки показало корректное поведение разности фаз при наличии возмущающей компоненты в потоке.

Данная методика является хорошим начальным приближением к удовлетворительной количественной модели с учетом неравномерности распределения второй фазы по объему.

Заключение

В рамках выпускной квалификационной работы разработана методика численного решения связанной упруго-гидродинамической задачи о вынужденных колебаниях кориолисового расходомера с текущей одно- и двухфазной средой.

1. Разработанная методика решения связанной упруго-гидродинамической задачи о вынужденных колебаниях деформируемой измерительной трубки кориолисового расходомера в условиях течения по ней однофазной среды верифицирована аналитическим расчетом на примере установившихся вынужденных колебаний балочной модели прямолинейного деформируемого трубопровода с текущей средой. В случае невязкого течения отличие между разностями фаз колебаний двух точек, найденными на трехмерной конечноэлементной-конечнообъемной модели и на балочной модели составляет 3%. При учете эффектов вязкости в районе стенок конечноэлементной-конечнообъемной модели максимальное изменение разность фаз относительно невязкого решения составило 2,5%.

2. Выполнено сравнение результатов численного расчета методом конечных элементов кориолисового расходомера ЭЛМЕТРО-Фломак ДУ15 в условиях течения однофазной среды с экспериментальными данными, полученными на проливочном стенде для трех различных массовых расходов. В результате сравнения установлено:

– в среднем отличие по абсолютным значениям разностей фаз между расчетом и экспериментом составляет около 27%;

– относительное изменение разностей фаз при одинаковом изменении расхода в расчетной модели и в эксперименте не превышает 1,25%.

3. С целью освоения теоретических и практических принципов реализации многофазных потоков, заложенных в используемом программном комплексе ANSYS Fluent, проведена серия гидродинамических расчетов течения пузырей воздуха в жидкостной среде на недеформируемом трубопроводе. С целью обеспечения требуемой сходимости решения задачи

									Лист
									92
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата					

15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР

гидродинамики в двухфазной постановке определены необходимые параметры модели и решателя. В частности, количество элементов сетки конечных объемов для исследуемой проточной части кориолисова расходомера ДУ15 должно превышать 450000 тысяч и быть как можно более структурированной для уровня сходимости не менее 10^{-4} , при используемом шаге по времени от 0,0001 до 0,0005с наилучший уровень сходимости показала неявная схема интегрирования с схемой дискретизации Compressive. Для лучшей разрешенности турбулентного потока, а также взаимодействию газовой фазы с стенками, число элементов пограничного слоя было увеличено до 7 с плавным переходом между слоями.

4. Разработан алгоритм решения задачи о течении двухфазного потока (пузырьки воздуха в воде) по недеформируемому криволинейному трубопроводу для двух вариантов течения (одиночном пузыре, имитирующем воздушную пробку и пузырькового режима с объемной долей газа в 10%). Установлено, что при движении одиночного пузыря по трубопроводу происходит его разделение и в местах изменения геометрии трубки, а для во втором варианте режим течения меняется с пузырькового на снарядный при переходе с вертикального участка трубопровода на горизонтальный.

5. Разработанная выше методика решения связанной упруго-гидродинамической задачи об установившихся вынужденных колебаниях деформируемой трубки кориолисового расходомера усовершенствована на случай течения двухфазной среды. Опытным путем определены параметры решателя, обеспечивающие стабильность и удовлетворительную сходимость решения. Таким образом, для нестационарной двухфазной задачи наиболее подходит решатель PISO со следующими коэффициентами релаксации:

- коэффициент по давлению 0,8;
- коэффициент уравнения импульса 0,2;
- коэффициенты уравнений кинетической энергии турбулентности и скорости её диссипации 0,5;

Остальные коэффициенты релаксации оставлены по умолчанию. Кроме того благодаря переходу с модели турбулентности SST k- ω на k- ϵ , что ускорило и стабилизировало поведение сходимости, но взамен менее точно описывает поведение эффекты турбулентности вблизи стенок.

Установлена существенная зависимость сходимости двухфазной задачи от индивидуальной постановки и выбранных параметров решателя. Так, при использовании коэффициентов релаксации по умолчанию сходимость может иметь ступенчатый характер и осциллировать, а при числе Куранта (в случае использования явной схемы интегрирования) больше 1 существенно замедляться и также колебаться в определенных пределах.

6. С учетом используемых допущений, созданная методика является хорошим начальным приближением к созданию удовлетворительной количественной модели двухфазного течения по деформируемому криволинейному трубопроводу. Предварительные расчеты показали, что при объемной доле газа в потоке, равной 10%, разность фаз в момент времени 0,1с отличается на 5% от полученной в однофазной постановке.

									Лист
									94
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	<i>15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР</i>				

Библиографический список

1 Yoder J. Go New-Tech or Stick with DP meters //Differential pressure flow users face the dilemma, Flow Control Magazine. – 2001. – Т. 9. – С. 1-6.

2 Dahlin E. B. Acoustic wave supressor for Coriolis flow meter: пат. 4831885 США. – 1989.

3 Keita M., Bitto E. Coriolis-type mass flow sensor: пат. 5796011 США. – 1998.

4 Lister E. D. et al. Coriolis flowmeter having an explosion proof housing: пат. 6286373 США. – 2001.

5 Patten A. T., Stack C. P., Levien A. K. Increased sensitivity coriolis effect flowmeter using nodal-proximate sensors: пат. 5497666 США. – 1996.

6 Weinstein J. A. The motion of bubbles and particles in oscillating liquids with applications to multiphase flow in coriolis meters. PhD thesis. University of Colorado, 2008.

7 Weinstein J. A., Kassoy D. R., Bell M. J. Experimental study of oscillatory motion of particles and bubbles with applications to Coriolis flow meters // Physics of Fluids. 2008. Vol. 20. № 10. P. 103–106.

8 Małeckı I. Physical Foundations of Technical Acoustics //Oxford—London (PWN Warszawa 1969) s. 1969. Vol. 5. P. 649-660.

9 Hemp J., Kutin J. Theory of errors in Coriolis flowmeter readings due to compressibility of the fluid being metered //Flow Measurement and Instrumentation. 2006. Vol. 17. № 6. P. 359-369.

10 Gysling D.L., Banach T. Accurate Liquid Phase Density Measurement of Aerated Liquids using Speed of Sound Augmented Coriolis Meters // BIO Rev. A-ISA EXPO. 2004. P. 1–10.

11 Koudal O. et al. High frequency Coriolis meter performance under pulsating flow conditions // Proceedings FLOMEKO. – 1998. – Т. 1998. – С. 239-42.

12 Chen S. Dynamic stability of tube conveying fluid //Journal of Engineering Mechanics. – 1971.

									Лист
									95
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР				

13 Paidoussis M. P., Issid N. T. Dynamic stability of pipes conveying fluid //Journal of sound and vibration. – 1974. – Vol. 33. – № 3. – P. 267-294

14 Entrained air, particles and wet gas – myths and truth in Coriolis flow measurement / H. Zhu [et al.] // TUV NEL Americas Workshop, Houston, 2011

15 Weinstein J. Multiphase flow in Coriolis mass flow meters—error sources and best practices //28th Int. North Sea Measurement Workshop. – 2010.

16 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.

17 Henry M. et al. Two-phase flow metering of heavy oil using a Coriolis mass flow meter: A case study // Flow Meas. Instrum. 2006.

18 Henry M.P. Coriolis-based three-phase flow metering for upstream oil and gas / M. P. Henry, M. S. Tombs – 2012. – № October 2016.

19 Henry M.P. Towards assessing online uncertainty for three-phase flow metering in the oil and gas industry / M. P. Henry, M. S. Tombs, F. B. Zhou // J. Sensors Sens. Syst. – 2014. – Т. 3 – № 1– 97–103с.

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.

21 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.

22 Lin C. W. et al. Apparatus and method for calibrating a Coriolis mass flow meter for carbon dioxide at pressure and temperature conditions represented to CCS pipeline operations //Applied Energy. – 2016. – Т. 165. – С. 759-764.

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

24 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.

25 Samer G., Fan S. Modeling of Coriolis mass flow meter of a general plane-shape pipe // Flow Meas. Instrum. 2010. Vol. 21. P. 40–47.

26 Banerjee J. R. Dynamic stiffness formulation for structural elements: a general approach // Computers & structures. – 1997. – Т. 63. – №. 1. – С. 101-103.

27 Cheesewright R., Shaw S. Uncertainties associated with finite element modelling of Coriolis mass flow meters // Flow Meas. Instrum. 2006. Vol. 17. P. 335–347.

28 Колесников К.С., Самойлов Е.А., Рыбак С.А. Динамика топливных систем ЖРД. М.: Машиностроение, 1975. 170 с.

29 Housner G.W. Bending vibrations of a pipeline containing flowing fluid // J. App. Mech. Trans. ASME, 1952. Vol. 74. P. 205-208.

30 Gregory R.W., Paidoussis M.P. Unstable Oscillations of Tubular Cantilevers Conveying Fluid-I. Theory // Proceeding of Royal Society, Series a. 1966. Vol. 293. P. 512-527.

31 Paidoussis M.P., Issid J.P. Dynamics stability of pipes conveying fluid // J. Sound Vib. 1974. Vol. 33. № 3. P. 267-294.

32 Chen Sh.Sh. Vibration and stability of a uniformly curved tube conveying fluid // J. Acoust. Soc. Amer. 1972. Vol. 51. № 1. P. 223-232.

33 Доценко П.Д. Об уравнениях малых колебаний криволинейного трубопровода // Механика твердого тела, 1974. № 5. С. 104-111.

34 Wang T., Baker R. Coriolis flowmeters: a review of developments over the past 20 years, and an assessment of the state of the art and likely future directions // Flow Meas. Instrum. 2014. Vol. 40. P. 99–123.

35 Paidoussis M.P. Fluid-structure Interactions: Slender Structures and Axial Flow // London: Academic Press, 1998. Vol. 1.

36 Païdoussis M.P. Fluid-structure Interactions: Slender Structures and Axial Flow // London: Elsevier Academic Press, 2004. Vol. 2.

37 Hemp J. The weight vector theory of Coriolis mass flowmeters // Flow Measurement and Instrumentation. – 1994. – Т. 5. – №. 4. – С. 247-253.

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

39 Cunningham T.J., Hensley D.P. Using IMAT and MATLAB for Coriolis flowmeter design // 19th Modal Analysis Conference (IMAC-XIX), Kissimmee, USA. 2001. Vol. 4359. P. 165-171.

40 Belhadj A., Cheesewright R., Clark C. The simulation of Coriolis meter response to pulsating flow using a general purpose FE code // J. Fluid Struct. 2000. Vol. 14. P. 613–634.

41 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.

42 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.

43 Bobovnik G., Kutin J., Bajsić I. The effect of flow conditions on the sensitivity of the Coriolis flowmeter // Flow Meas. Instrum. 2004. Vol. 15. P. 69–76.

44 Bobovnik G., Kutin J., Bajsić I. Estimation of velocity profile effects in the shell-type Coriolis flowmeter using CFD simulations // Flow Meas. Instrum. 2005. Vol. 16. P. 365–373.

45 Bobovnik G. et al. Coupled finite-volume/finite-element modelling of the straight-tube Coriolis flowmeter // Journal of fluids and structures. – 2005. – Т. 20. – №. 6. – С. 785-800.

46 Mole N. et al. An improved three-dimensional coupled fluid–structure model for Coriolis flowmeters // Journal of Fluids and Structures. – 2008. – Т. 24. – №. 4. – С. 559-575.

47 Kutin J. et al. Velocity profile effects in Coriolis mass flowmeters: Recent findings and open questions //Flow Measurement and Instrumentation. – 2006. – Т. 17. – №. 6. – С. 349-358.

48 Kumar V., Anklin M., Schwenter B. Fluid-Structure Interaction (FSI) Simulations on the Sensitivity of Coriolis FlowMeter Under Low Reynolds Number Flows //15th Flow Measurement Conference FLOMEKO, Taipei Taiwan, 2010.

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

50 Virtual Prototyping of a Coriolis Effect Mass Flow Meter [Электронный ресурс] URL: <http://www.ansys.com/Other/virtual-prototypes/virtual-prototyping-of-a-coriolis-effect-mass-flow-meter>.

51 Three Criteria for Assessing CFD Convergence/ Kuron M. // [Электронный ресурс] URL: <http://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/9296/3-Criteria-for-Assessing-CFD-Convergence.aspx>

52 Fluent A. 14.0: Theory guide, ansys //Inc., Canonsburg, PA. – 2011.

53 Пушнов А. В. Измерение расхода двухфазного потока кориолисовым расходомером //Измерительная техника. – 2013. – №. 4. – С. 45-48.

					<i>15.04.03.2017.012 ПЗ ВКР</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		99