



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени Н.Э. БАУМАНА

Кафедра «Аэрокосмические системы»

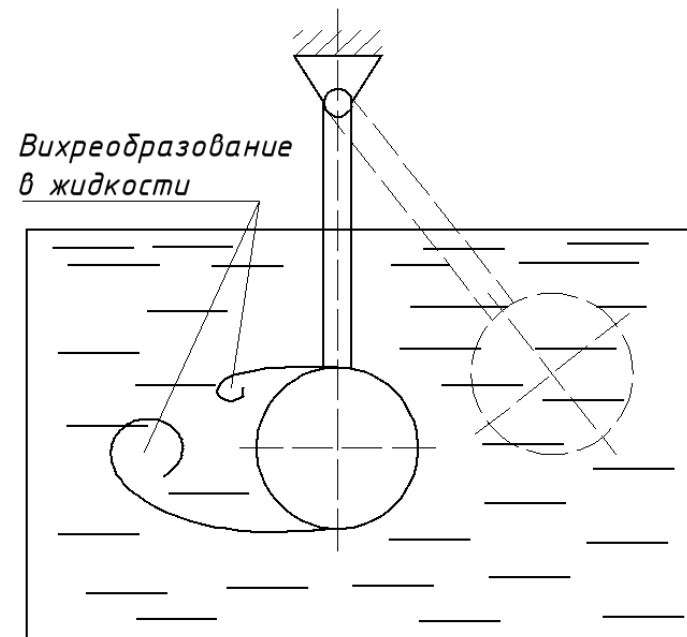
*Применение OpenFOAM для
моделирования колебаний
маятника в несжимаемой среде*

Коцур. О.С.
Щеглов Г.А.

6 декабря 2013

Задача о свободных колебаниях маятника в покоящейся несжимаемой среде

- Задача о свободных колебаниях маятника является простейшим примером сопряженной задачи гидроупругости.
- Движения маятника сопровождаются интенсивным вихреобразованием, которое вносит вклад в демпфирование колебаний.
- В Лозаннском Политехническом Университете (EPFL) проведен ряд экспериментов и получен ценный экспериментальный материал по исследованию колебаний маятника с помощью технологии PIV.
- Такая задача может служить хорошим тестом для верификации различных численных методов, применяемых при решении задач FSI



Вычислительные методы гидроупругости

- I. **Эйлерова формулировка** (сеточные методы на базе МКО)
 - Методы с деформируемой сеткой (ALE)
 - Методы с недеформируемыми сетками
 - Метод погруженных границ (IBM)
 - Метод погруженных доменов (CHIMERA, скользящие сетки)
- II. **Лагранжева формулировка** (бессеточные методы)
 - Метод сглаженных частиц (SPH)
 - Методы вихревых элементов (МВД, МДВ, МВЭ)
- III. **Комбинированные методы**
 - Метод решеток Больцмана
 - Метод вихрей в ячейке

«Подчеркнутые» методы могут быть реализованы с помощью программного пакета OpenFOAM

Алгоритм решения FSI-задачи на базе деформируемой сетки

Блок жидкого домена

- Решение уравнений гидродинамики методом контрольных объемов (МКО)
- Вычисление поля сил со стороны жидкости на тело в потоке



Блок твердого домена

- Решение уравнений движения упругого тела под действием поверхностных сил от жидкости
- Вычисление поля перемещения граничной поверхности тела



Блок деформирования сетки

Решение уравнений перемещения сетки (уравнение Лапласа)



Решатель логически делится на три блока, которые решают свою подсистему уравнений. Каждый шаг интегрирования последовательно вычисляются три блока, затем решатель переходит к следующему шагу.

Среди минусов такого подхода: необходимость решения уравнений деформирования сетки (что для сложной трехмерной геометрии **может привести к большим временным затратам!**)

Принцип деформирования сетки

Деформация сетки реализуется посредством решения уравнения Лапласа

$$\square (g \square \square u) = 0 \quad \text{где}$$

u – скорость перемещения вершин сетки

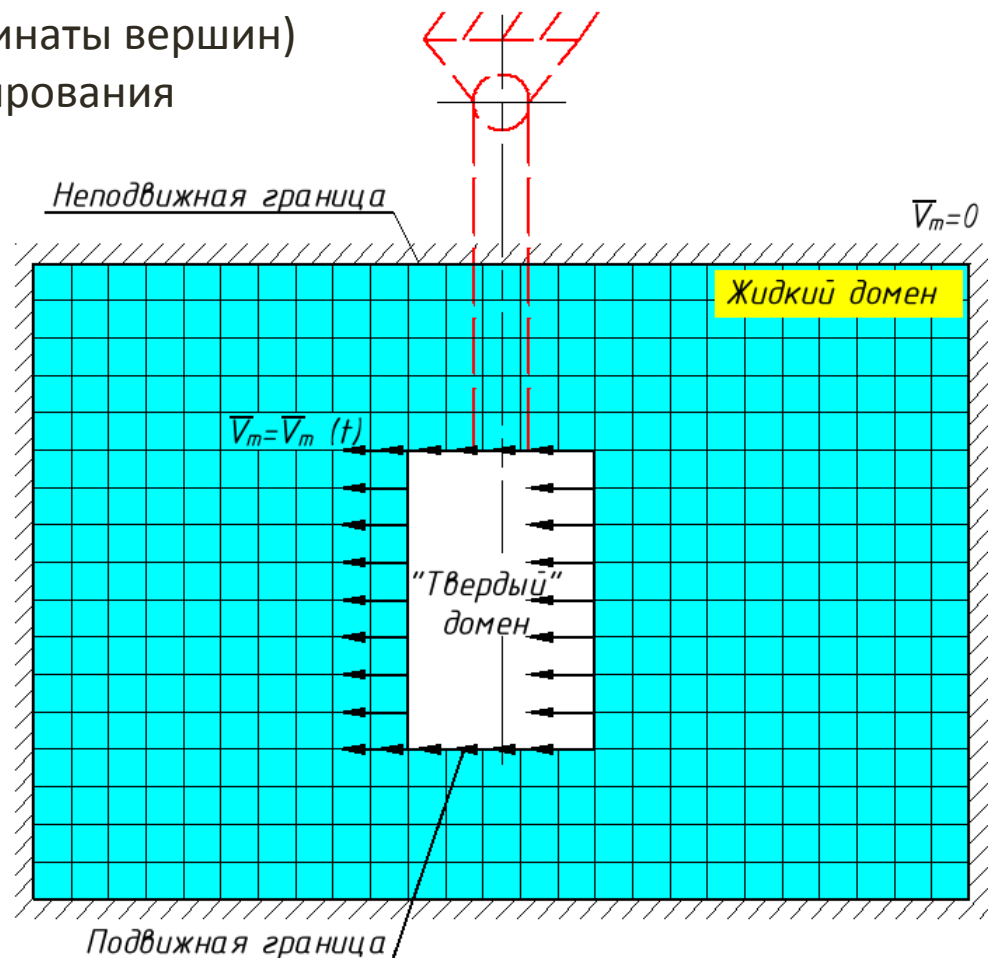
$$u = \frac{x - x_0}{\Delta t}$$

x_0, x – начальное и конечное положение сетки
(координаты вершин)

Δt – шаг интегрирования

Для полной постановки задачи необходимо задать граничные условия на границах сетки для решения уравнения Лапласа.

ГУ представляют собой поле перемещений граничных поверхностей сетки за один шаг интегрирования Δt



Ограничения, накладываемые стандартными средствами OpenFOAM для решения задач FSI?

- В OpenFOAM реализованы несколько решателей на подвижных сетках, таких как *pimpleDyMFoam*, *interDyMFoam* и др.
- Возможности решения задач FSI с помощью этих решателей **ограничены** применением **абсолютно твердых тел** с наложенными на них упругими связями.
- Для решения задач FSI в общем случае **упругого тела** в потоке необходимо создание собственных решателей, в которых вводить блок уравнений динамики упругого тела.
- При моделировании колебаний маятника было использовано два подхода:
 - использование стандартного решателя *pimpleDyMFoam*
 - использование специально разработанного решателя *pendulumFsiFoam*

Особенности решателя *pendulumFsiFoam*

- Хотя маятник можно смоделировать с помощью *pimpleDyMFoam* (используя стандартный тип ГУ *sixDoFRigidBodyDisplacement*), разработанный оригинальный решатель обладает следующими особенностями:

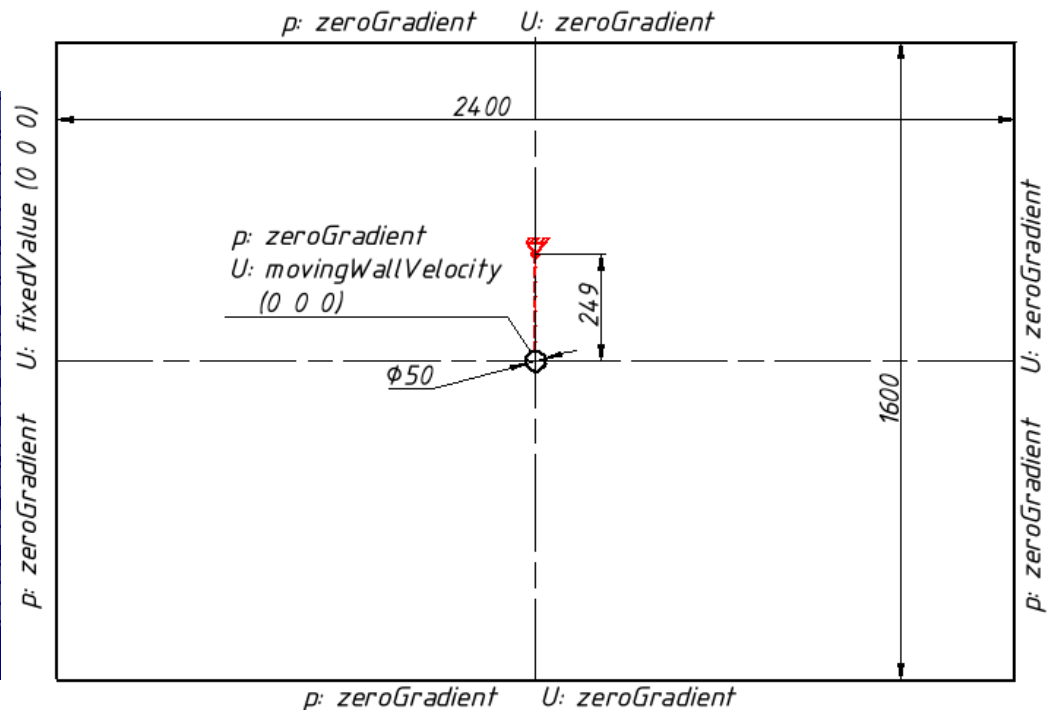
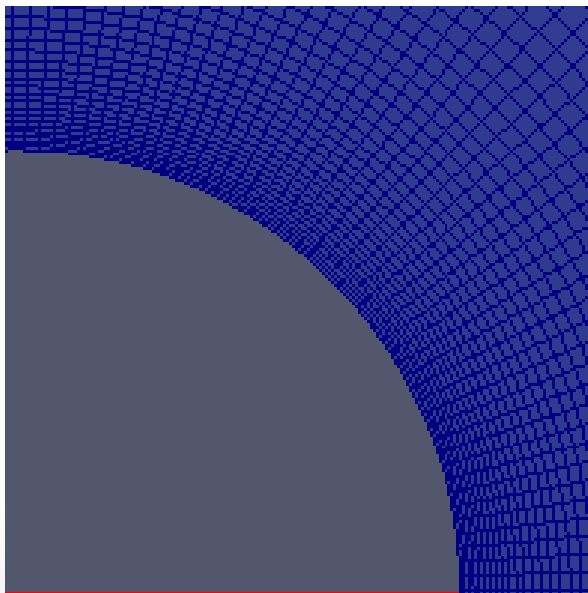
- В «блоке твердого домена» используется аналитическое решение уравнения колебания маятника с одной степенью свободы

$$\ddot{\varphi} + \omega^2 \varphi = F(t, \varphi)$$

- На каждом шаге вычисляется момент поверхностных сил $F(t, \varphi)$, действующих на маятник со стороны жидкости.
- Для перемещения подвижной границы маятника используется специально разработанный тип граничного условия *fsiValue*, позволяющий перемещать каждую вершину подвижной границы по отдельности, независимо от других.
- Решатель разработан с позиции **универсальности**. При определенных модификациях он может быть использован для решения задачи FSI наиболее общей постановки с произвольной деформацией подвижных границ жидкого домена.

Постановка задачи и допущения

- Цилиндр $\varnothing 50$ мм отклоняется на 20° от положения равновесия и отпускается. Колебания совершаются в воздухе.
- Все механические характеристики маятника совпадают с параметрами экспериментальной установки. Частота колебаний 0.8 Гц.
- Постановка задачи – **двухмерная**.
- Сетка: 19200 элементов

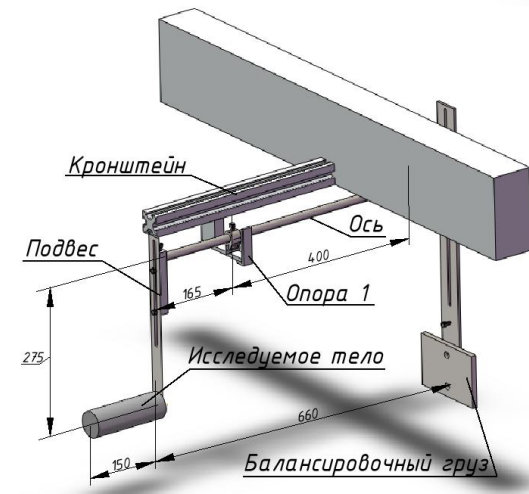
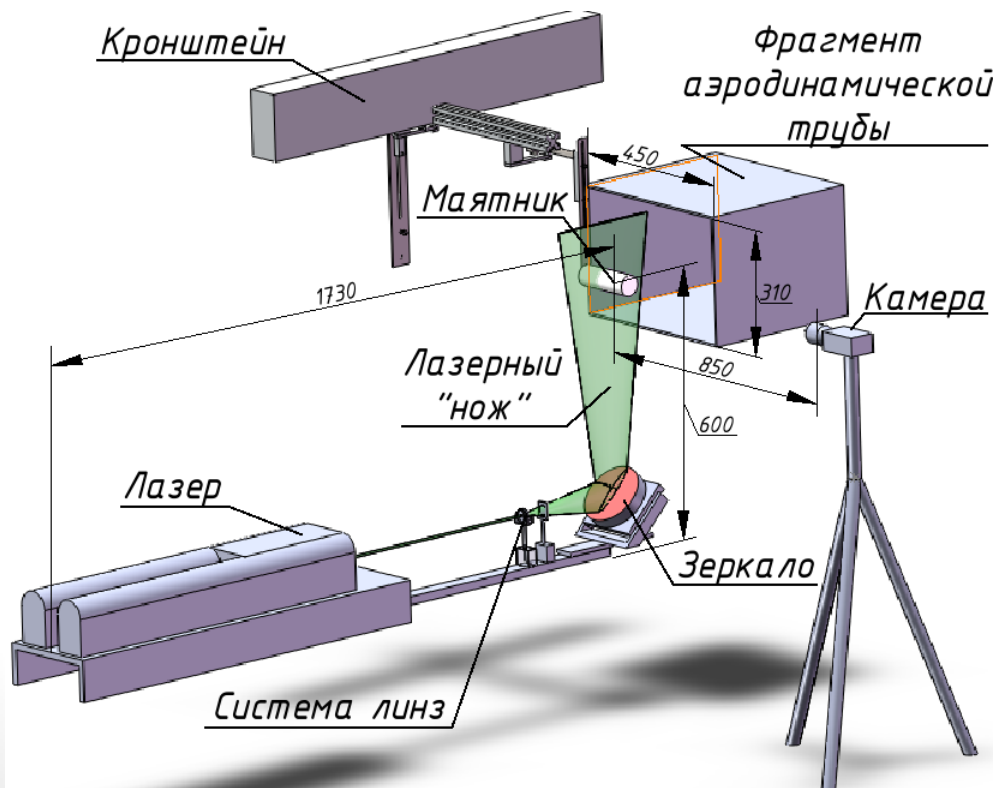


Моделирование (9 секунд)



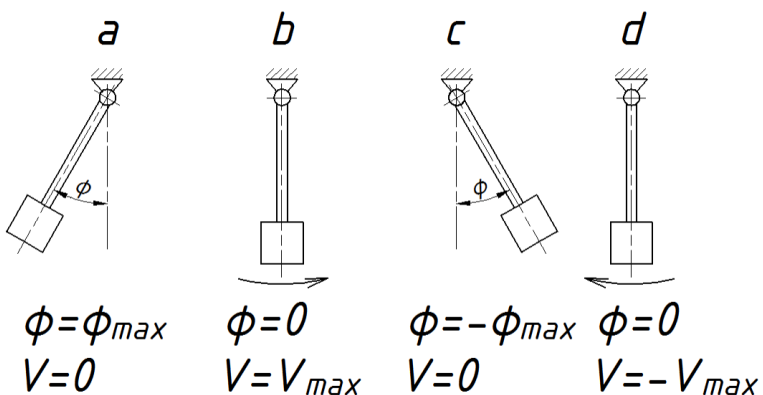
Экспериментальная работа

- В Лозаннской Федеральной Политехнической Школе (EPFL), Швейцария, был проведен ряд экспериментов с помощью технологии PIV.
- **Цель работ:** исследование параметров завихренных течений жидкости вокруг маятника, совершающего свободные колебания.

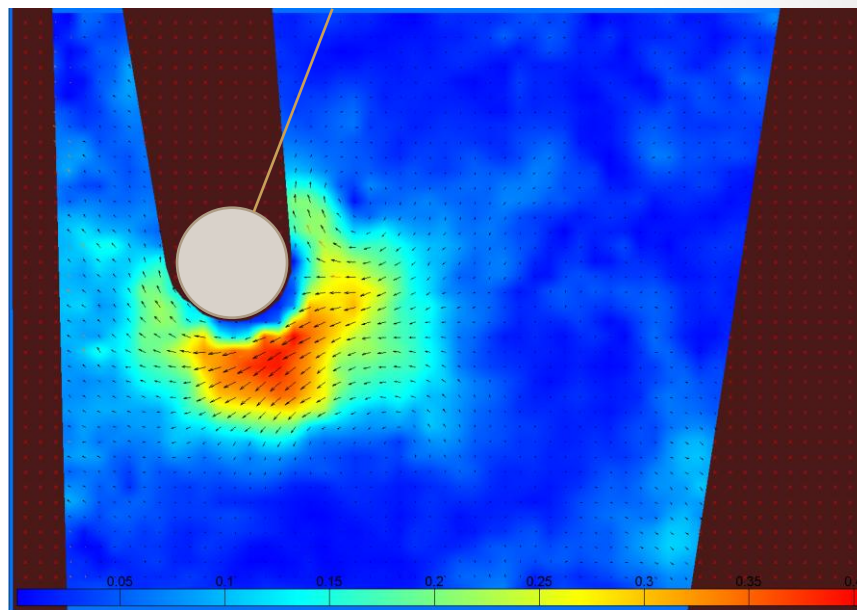


Качественный анализ результатов расчета и эксперимента

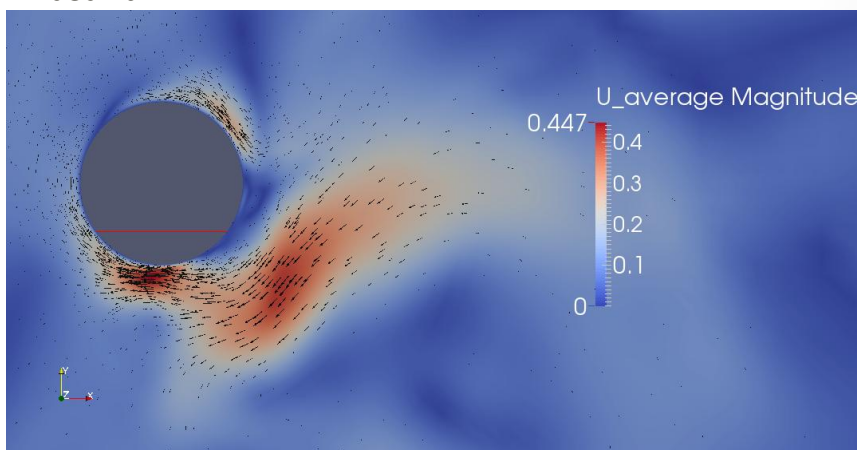
- Для удобства представления результатов, один период колебаний маятника можно условно разделить на 4 основные фазы:



- Поскольку фазы “a” и “c”, а так же “b” и “d” симметричны, будут показаны результаты только в фазах “a” и “d”
- Результаты осредняются по 10 периодам в фазе “a” и по 5 периодам в фазе “d”.



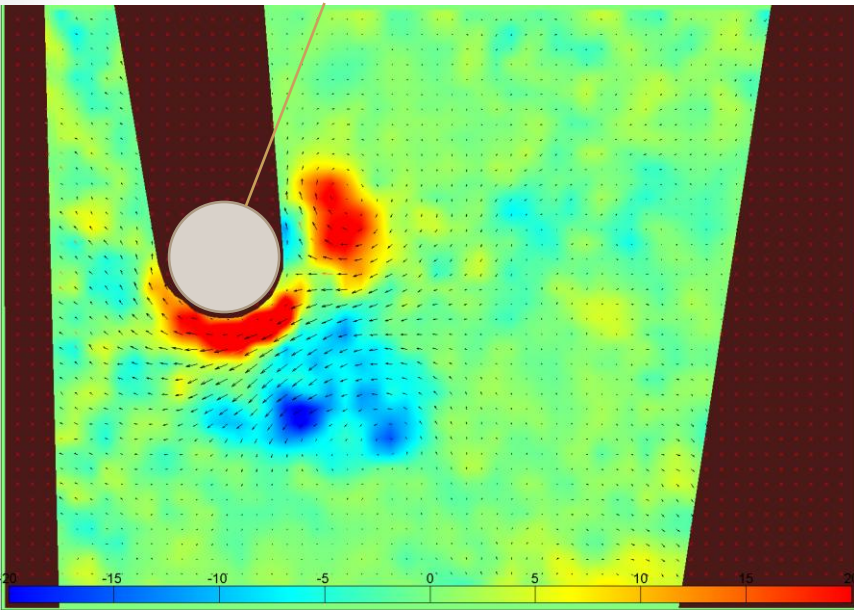
Поле модуля скорости течения вокруг цилиндра. PIV. Фаза “a”



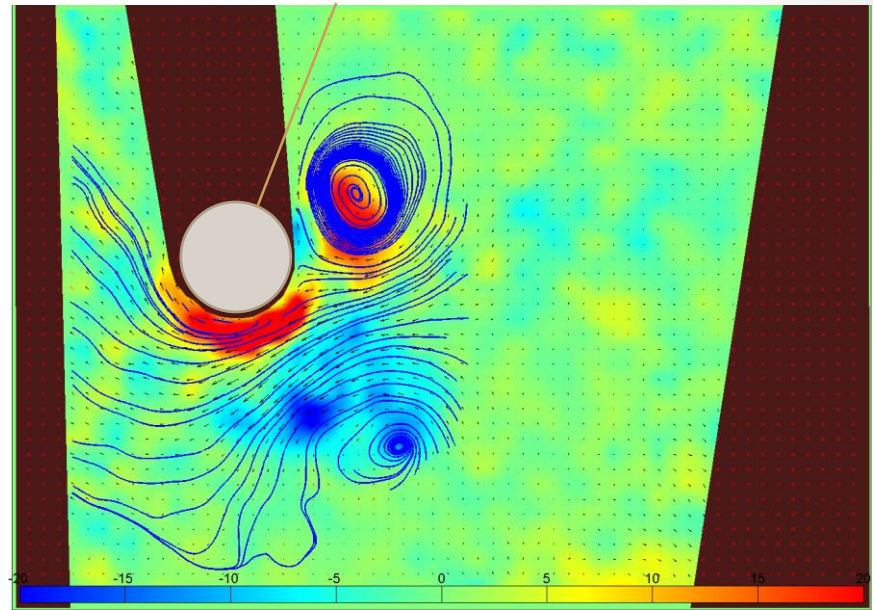
Поле модуля скорости течения вокруг цилиндра. OpenFOAM. Фаза “a”

Колебания в воздухе. Фаза "d".

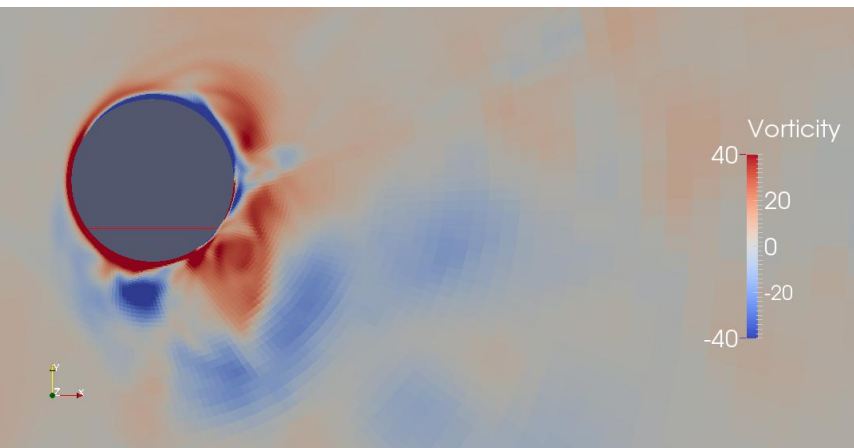
Осреднение по 10 периодам



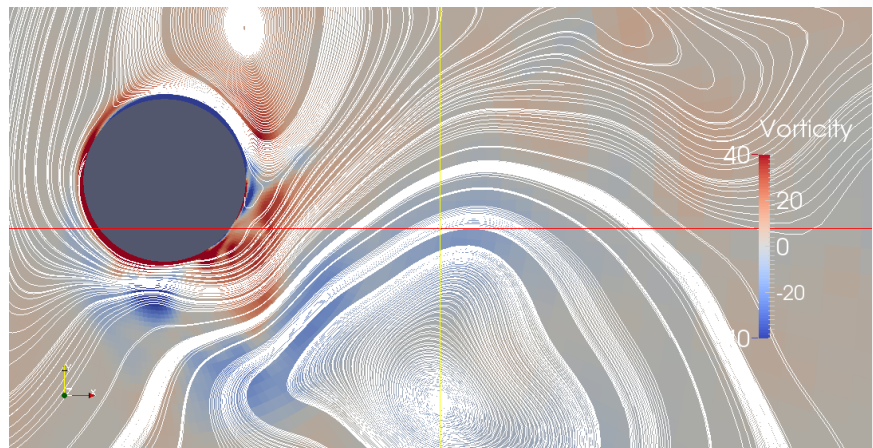
Поле завихренности вокруг цилиндра. PIV. Фаза "a"



Линии тока вокруг цилиндра. PIV. Фаза "a"



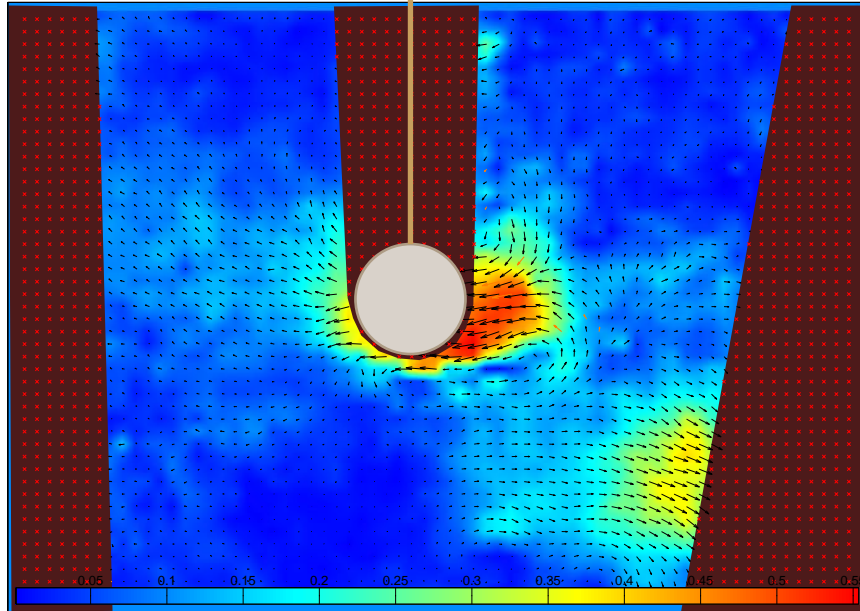
Поле завихренности вокруг цилиндра. OpenFOAM
Фаза "a"



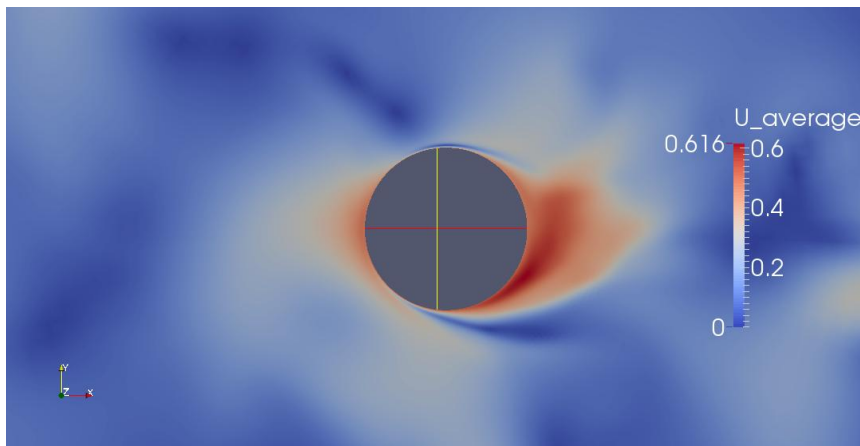
Линии тока вокруг цилиндра. OpenFOAM
Фаза "a"

Колебания в воздухе. Фаза "d".

Осреднение по 5 периодам



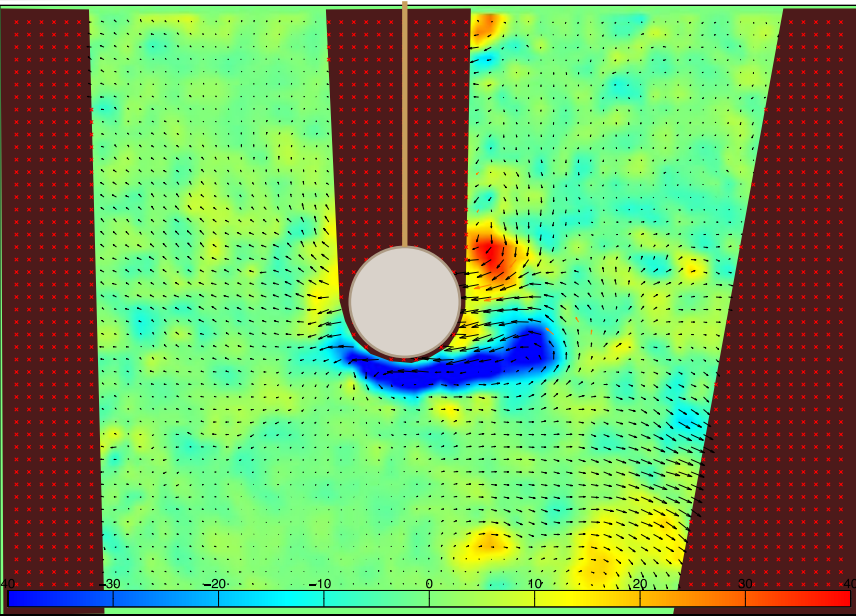
Поле модуля скорости течения вокруг цилиндра. PIV. Фаза "d"



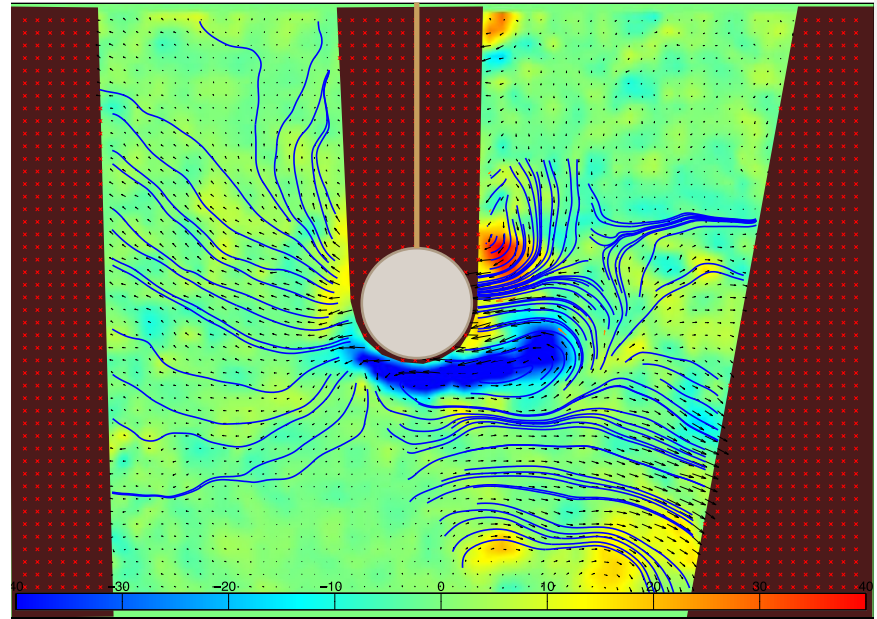
Поле модуля скорости течения вокруг цилиндра. OpenFOAM. Фаза "d"

Колебания в воздухе. Фаза "d".

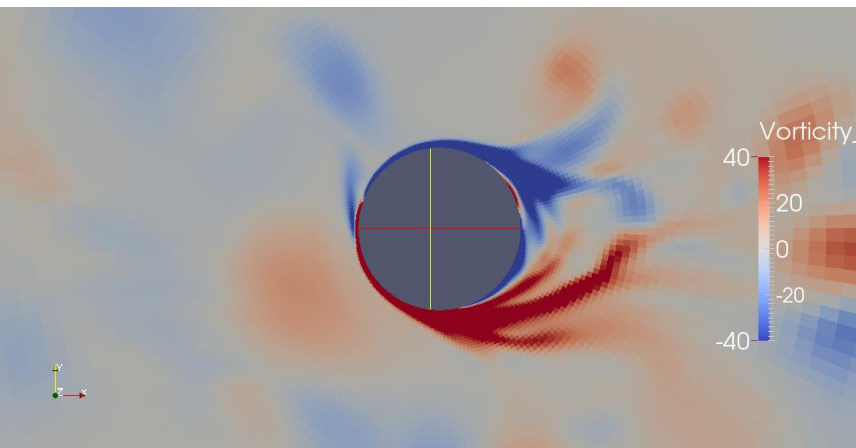
Осреднение по 5 периодам



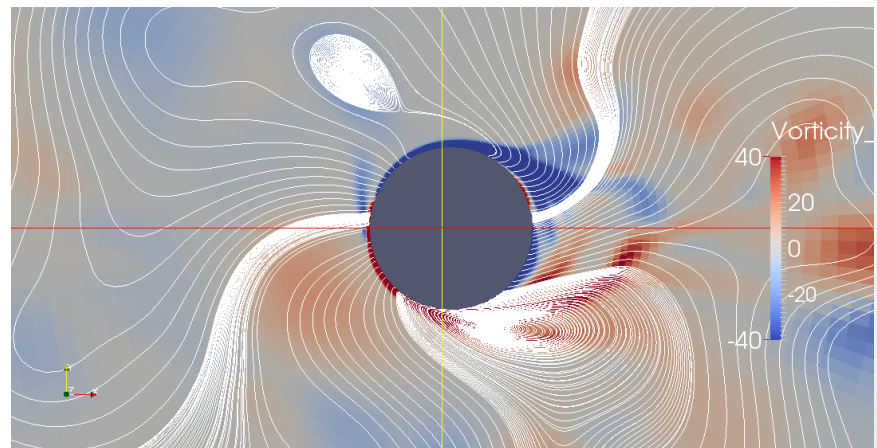
Поле завихренности вокруг цилиндра. PIV. Фаза "d"



Линии тока вокруг цилиндра. PIV. Фаза "d"

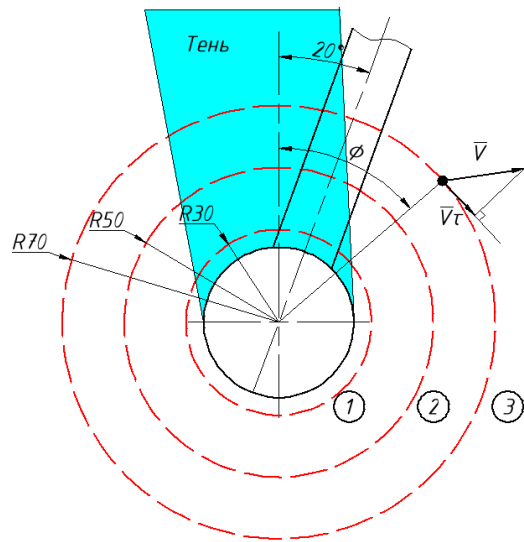


Поле завихренности вокруг цилиндра. OpenFOAM
Фаза "d"

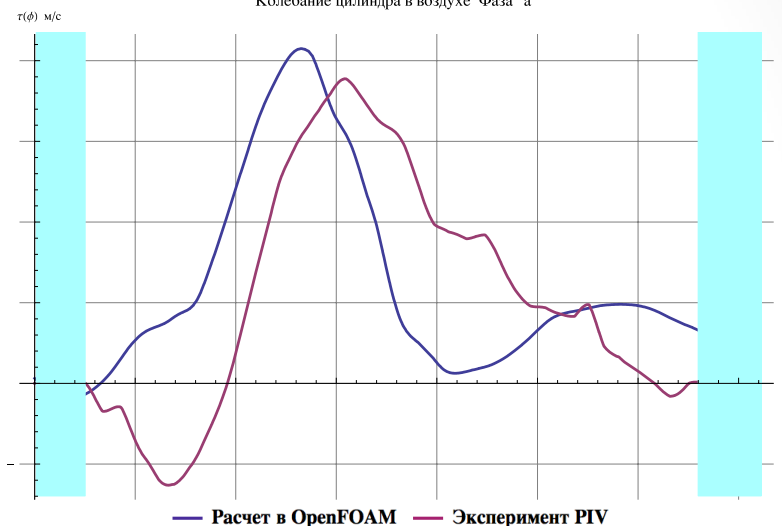


Линии тока вокруг цилиндра. OpenFOAM
Фаза "d"

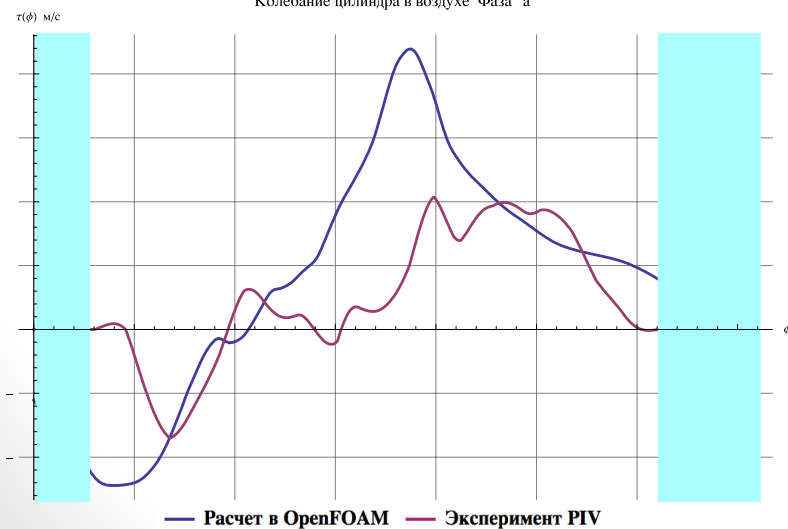
Количественный анализ результатов расчета и эксперимента. Фаза "a"



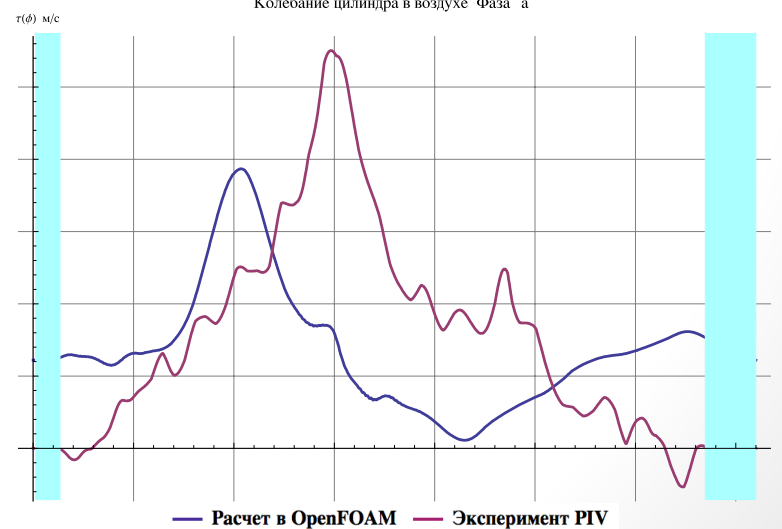
Тангенциальная составляющая скорости вдоль окружности
Колебание цилиндра в воздухе Фаза a



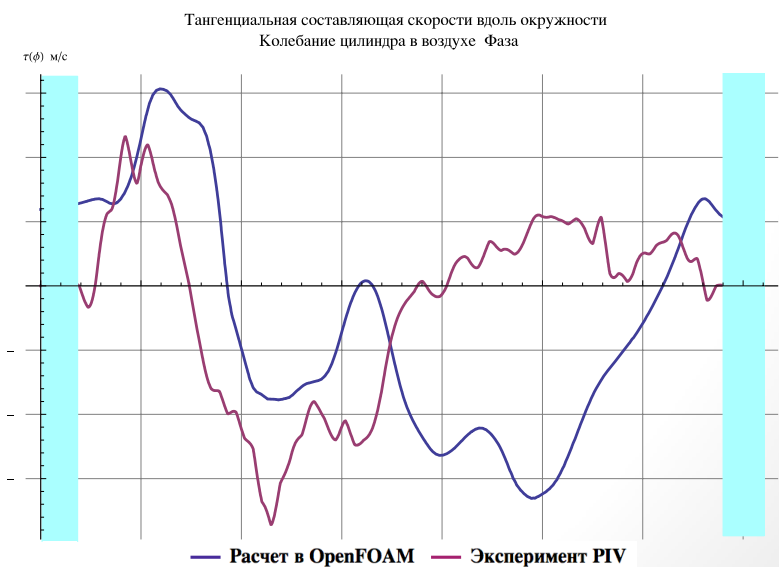
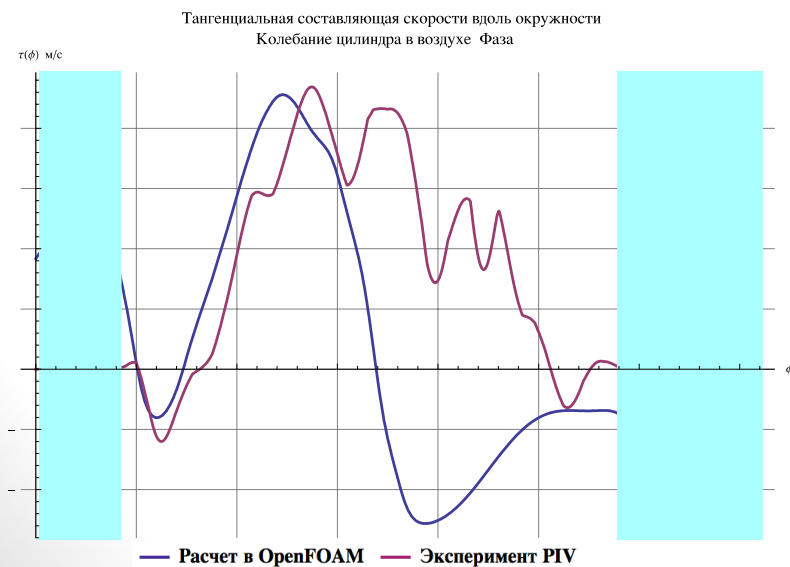
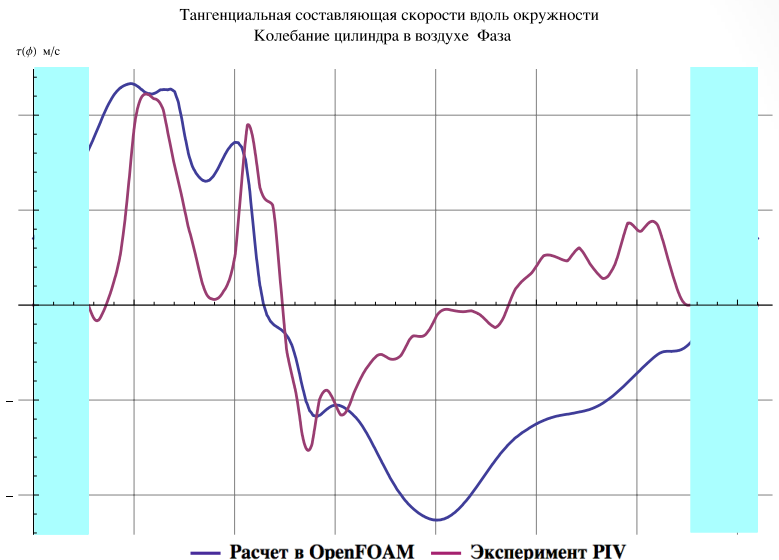
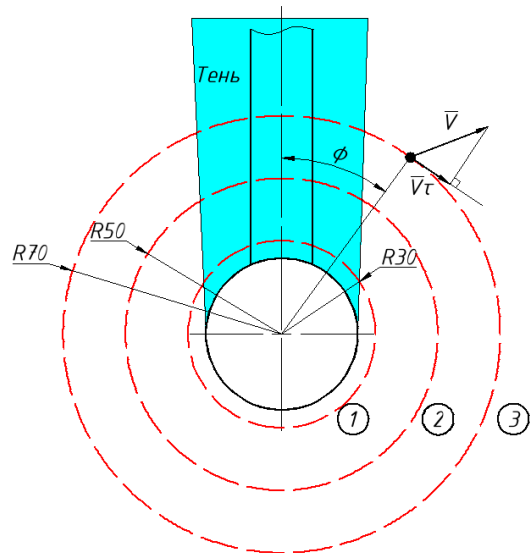
Тангенциальная составляющая скорости вдоль окружности
Колебание цилиндра в воздухе Фаза a



Тангенциальная составляющая скорости вдоль окружности
Колебание цилиндра в воздухе Фаза a

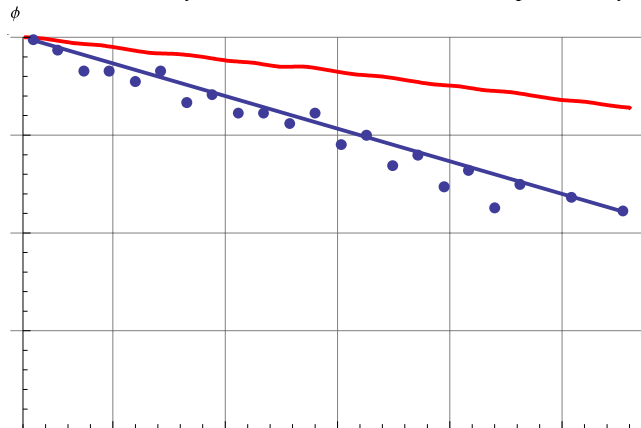


Количественный анализ результатов расчета и эксперимента. Фаза "d"



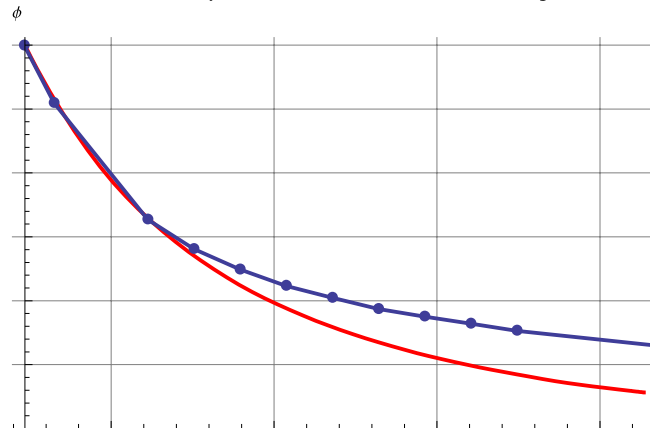
Графики изменения амплитуд колебаний маятника в воздухе и в воде

Изменение амплитуды колебаний маятника с цилиндром в воздухе



— Эксперимент PIV — Расчет в OpenFOAM

Изменение амплитуды колебаний маятника с цилиндром в воде



— Эксперимент PIV — Расчет в OpenFOAM

В реальности демпфирование колебаний в воздухе происходит сильнее, чем в расчете. Это связано с трением в опорах, которое полностью исключить не удастся.

При моделировании задачи с помощью сеточного метода колебания маятника в воде затухают сильнее, чем в реальности. Это связано:

- с высокой «схемной вязкостью», которая присуща сеточным методам
- с особенностями трехмерного обтекания

Особенности реализации расчета

- Не удалось организовать параллельный расчет в разрабатываемом решателе. Расчет велся на одном ядре.
- Для правильного моделирования пограничного слоя на цилиндре и мест схода вихрей необходимо вести расчет на подробных мелких сетках. При этом необходимо сильно уменьшать шаг интегрирования.
- Решение обладает низкой вычислительной устойчивостью на начальном этапе интегрирования. Это связано с подвижностью сетки. Проблему решает сильное уменьшение шага интегрирования ($C_0 = 0.0001$). При тех же условиях на фиксированной сетке проблема исчезает.
- Моделирование колебаний маятника в среде с высокой вязкостью (в воде) на очень мелких сетках разваливается при любом шаге. Расчет велся на той же сетке, что и для колебаний в воздухе.

Выводы и дальнейшая работа

- Проведенный анализ показывает, что, поскольку воздух обладает малой плотностью и вязкостью, картина течений вокруг маятника в различных периодах сильно различается, сохраняя при этом общую структуру. За счет этого проводится осреднение по 10 и 5 периодам для фаз “ α ” и “ d ” соответственно.
- Сравнение результатов расчета и эксперимента, говорит о качественной схожести картин обтекания. Однако, в то же время, наблюдаются области, где результаты значительно расходятся.
- Выявлен феномен схемной вязкости, вносимой в динамическую систему.
- Необходимо проведение дополнительных расчетов на различных сетках, исследовать влияние и величину вязкости, вносимой численной схемой сеточного метода
- Планируется продолжение исследовательской работы по сравнению и анализу результатов расчета и эксперимента колебания маятника в воде.
- Планируется доработка решателя *pendulumFsiFoam* для возможности осуществления параллельных расчетов.
- Выполнение моделирования задачи в трехмерной постановке и анализ результатов.

Спасибо за внимание!