Механический спирально-фазовый преобразователь
Часть II

Фазированное управление вихревыми потоками. Математический формализм, безразмерные параметры и фальсифицируемые гипотезы.

Хаустов Владимир Игоревич

ORCID: 0009-0007-3657-2309

Лаборатория геометрической волновой инженерии https://vihrihaosa.ru/

Лицензия: CC BY 4.0

DOI: 10.5281/zenodo.20365882

Дата публикации: 24 мая 2026 года

Научно-технический перевод с английского языка.

Редакция, адаптированная для русскоязычного инженера-исследователя.

Оригинал: Khaustov. V. Mechanical Spiral-Phased Transducer (MSPT). Part II: Phased Control of Vortical Flows. Mathematical formalism, dimensionless parameters, and falsifiable hypotheses. https://doi.org/10.5281/zenodo.20365882

Аннотация

Область рассмотрения. Опираясь на кинематическую схему, изложенную в Части I, настоящая Часть II разрабатывает классическую гидродинамическую формулировку для механического спирально-фазового преобразователя (МСФП; MSPT) — системы «ротор–апертуры статора», в которой пространственная фаза струйных отверстий перемещается по азимуту ротора, создавая контролируемое бегущее граничное условие на жидкости. Препринт носит чисто теоретический и методологический характер; экспериментальных данных не приводится. Его цель — сформулировать строгие фальсифицируемые гипотезы и протоколы количественных измерений, пригодные для будущих экспериментальных и численных исследований.

Три фальсифицируемые гипотезы. Препринт формулирует три независимые проверяемые гипотезы с явными критериями отклонения. H1 относится к вынужденному конвективному резонансу: проверяется, выделяет ли наложенное бегущее граничное условие когерентные вихревые волновые пакеты на частоте форсирования сверх того, что создаётся неподвижными импульсно-струйными матрицами при эквивалентном подводе энергии. H2 касается статистики циркуляции: проверяется, становится ли плотность распределения выборок вихревой циркуляции статистически мультимодальной по сравнению с логнормальной и гамма-стохастической базовыми моделями, характерными для невынужденных или случайно вынужденных течений; предложенная модель почти равноотстоящих пиков явно заявлена как рабочая гипотеза, а не доказанный закон. H3 рассматривает когерентное модальное доминирование: с использованием ортогонального разложения (POD), спектрального POD и динамического разложения мод (DMD) проверяется, демонстрируют ли вынужденные конфигурации малый набор энергетически доминирующих мод по сравнению с согласованными контрольными случаями.

Значимость. Предлагая фальсифицируемые гипотезы и протоколы измерений для устройства управления течением с бегущим граничным условием, препринт создаёт основу для эмпирического исследования систем класса МСФП. Потенциальные применения, подлежащие экспериментальной проверке, включают интенсификацию смешивания в промышленных процессах, управляемое вихреобразование в силовых установках и формирование акустических колебаний в подводных и авиационных системах.

Ключевые слова: активное управление потоком; импульсно-струйная решётка; струйный осциллятор; сметающая струя; бегущее граничное условие; механический спирально-фазовый преобразователь (МСФП); спирально-фазовое форсирование; вынужденный конвективный резонанс; статистика вихревой циркуляции; ортогональное разложение (POD); динамическое разложение мод (DMD); фальсифицируемые гипотезы.

Оглавление

Аннотация 2

1. Введение 4

1.1. Предпосылки и мотивация 4
1.2. Связь с Частью I и научный статус 4
1.3. Структура работы 4
2. Математическая формулировка и безразмерные параметры 5

2.1. Геометрическая конфигурация и каноническая координата 5
2.2. Каноническое граничное условие МСФП 5
2.3. Частоты, время открытия и условие неперекрытия 6
2.4. Безразмерные величины, ограничивающие величины и метрики отклика 7
2.5. Постановка задачи 9
3. Теоретические основы 9

3.1. Циркуляция одиночного апертурного импульса и её масштаб 9
3.2. Бегущее форсирование, конвективный резонанс и захват 10
3.3. Предполагаемый мультимодальный спектр циркуляции 10
3.4. Аналогия с фазированной антенной решёткой и её пределы 11
3.5. Когерентность как выходная величина и трёхмерные ограничения 11
4. Фальсифицируемые гипотезы 12

4.1. H1 — вынужденный конвективный резонанс (полоса захвата) 12
4.2. H2 — статистика мультимодальной циркуляции 12
4.3. H3 — когерентное модальное доминирование 13
4.4. Теоретические границы опровержения 13
5. Протокол валидации 14

5.1. Рабочая область эксперимента и геометрическая реализуемость 14
5.2. Методы измерений 14
5.3. Последовательность обработки данных 14
5.4. Необходимые контрольные случаи 15
5.5. Оценка неопределённости и статистические правила 15
6. Обсуждение: область применимости, ограничения и позиционирование 15

6.1. Что утверждает предлагаемая схема 15
6.2. На что схема не претендует 15
6.3. Связь с предшествующими работами и позиционирование актуаторов МСФП 16
6.4. Ограничения настоящей работы 16
6.5. Потенциальные области применения 16
7. Вывод 17

Приложение А. Уравнения в инженерной форме и контроль размерностей 17

Замечания к размерностям 18

Список литературы 18

1. Введение

1.1. Предпосылки и мотивация

Когерентные вихревые структуры в сдвиговых течениях, импульсных струях, вихревых кольцах и вынужденных сдвиговых слоях являются центральными объектами механики жидкости и активного управления потоком. Периодическое форсирование способно выбирать частоты и когерентные структуры, однако механизм этого выбора существенно зависит от того, ведёт ли себя течение как глобальный осциллятор, как конвективно неустойчивая струя или как локально форсированный волновой пакет.

Рассматриваемая здесь концепция МСФП (Части I - https://doi.org/10.5281/zenodo.20237780) вводит распределённую архитектуру механического воздействия. Конфигурация поворотной диафрагмы и неподвижного затвора создаёт заданную последовательность чередования открытых и закрытых состояний диафрагмы. Картина движения является граничным условием: она не является материальным объектом и не предполагает переноса массы, энергии или информации с фазовой скоростью.

Таким образом, научная задача Части II формулируется конкретно: способно ли такое бегущее граничное условие вызывать вынужденный конвективный резонанс, измеримую фазовую когерентность и выбор режима в вихревых течениях — и как это проверить, не смешивая эффект с обычными импульсными струями, акустическими резонансами, вибрацией ротора или статистическими артефактами.

1.2. Связь с Частью I и научный статус

Часть I установила кинематическую конструкцию. Настоящая Часть II намеренно не является экспериментальным доказательством. Она определяет управляющие граничные условия, оценки размерностей, метрики отклика, статистические тесты, контрольные случаи и границы отклонения.

Работа остаётся строго классической. Она не вводит постоянную, подобную планковской, квантовую нелокальность, нарушение законов сохранения или генерацию энергии. Такие термины, как «выбор режима», «мультимодальный спектр» и «фазовая синхронизация», используются в обычном смысле нелинейной классической динамики и управления потоком.

1.3. Структура работы

Раздел 2 излагает математическую формулировку и безразмерные величины. Раздел 3 объясняет теоретические основы. В разделе 4 изложены фальсифицируемые гипотезы. В разделе 5 приведены методы валидации и статистические правила. В разделе 6 рассматриваются ограничения и позиционирование относительно существующих актуаторов. Раздел 7 содержит выводы. В Приложении А собраны уравнения в инженерной форме с единицами СИ.

2. Математическая формулировка и безразмерные параметры

2.1. Геометрическая конфигурация и каноническая координата

Рассматривается ротор радиуса R, несущий отверстия диаметром d, распределённые по спиральной траектории. Частота вращения ротора — f_rot. Статор (затвор) находится в открытом или закрытом состоянии. Координата ξ является координатой длины дуги вдоль траектории активации, а не декартовой координатой.

Для общей спирали r(θ) точное выражение для элемента длины дуги имеет вид

$$d\xi/d\theta = [r(\theta)^2 + (dr/d\theta)^2]^{(1/2)}.$$

Иными словами, один радиан поворота перемещает точку активации по спирали на величину локального элемента длины дуги. Поэтому локальная скорость перемещения фазы равна

$$v_\xi(\theta) = (d\xi/d\theta)\cdot\Omega, \quad \text{где } \Omega = 2\pi\cdot f_{rot}.$$

Для одновитковой траектории длиной L_spiral средняя скорость перемещения составляет L_spiral·f_rot. Если N событий на оборот равномерно разнесены на расстояние s по длине дуги, то L_spiral ≈ s·N и средняя скорость приближённо равна s·N·f_rot. Это приближение, а не замена точной формулы длины дуги спирали.

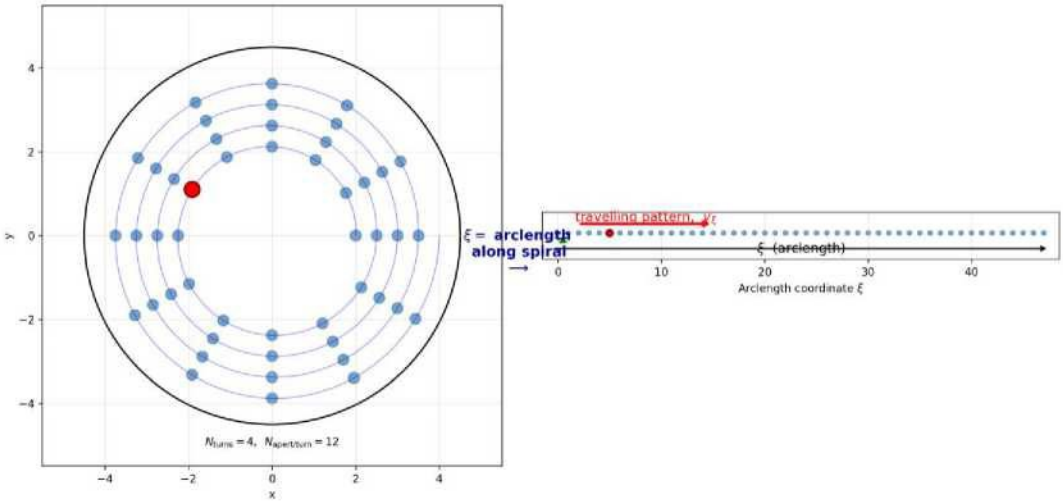


Рисунок 1. Приведение физического спирально-апертурного устройства к канонической задаче граничных условий. Только схематическая иллюстрация.

2.2. Каноническое граничное условие МСФП

Пусть b(ξ, t) — функция открытия апертуры. В идеальном двоичном случае b = 0 для закрытой и b = 1 для открытой апертуры. В реальном устройстве частичное перекрытие отверстий и кромок затвора делает b непрерывной величиной между 0 и 1:

$$b(\xi, t) = B(\xi - v_\xi\cdot t), \quad 0 \le b \le 1.$$

Иными словами, профиль открытия B перемещается по спиральной координате со скоростью v_ξ. Нормальная скорость струи, наложенная на апертуру, равна

$$u_n(\xi, t) = U_j \cdot b(\xi, t).$$

Первая оценка скорости струи:

$$U_j = C_d \cdot (2 \cdot \Delta p/\rho)^{(1/2)}.$$

То есть скорость струи равна коэффициенту расхода, умноженному на корень квадратный из удвоенного перепада давления, делённого на плотность. Коэффициент C_d является калибровочной величиной; для отверстий типичный диапазон составляет приблизительно 0,6–0,85, однако он должен измеряться для конкретной апертуры и геометрии затвора.

Компактной несжимаемой моделью является система уравнений Навье–Стокса с указанным граничным условием:

$$div(u) = 0, \quad \rho \cdot Du/Dt = -\nabla p + \mu \cdot \nabla^2 u + f_ext.$$

То есть масса сохраняется, а ускорение жидкости уравновешивается силами давления, вязкой диффузией и внешними массовыми силами. Эти уравнения приведены для воспроизводимости; работа не претендует на замкнутое аналитическое решение.

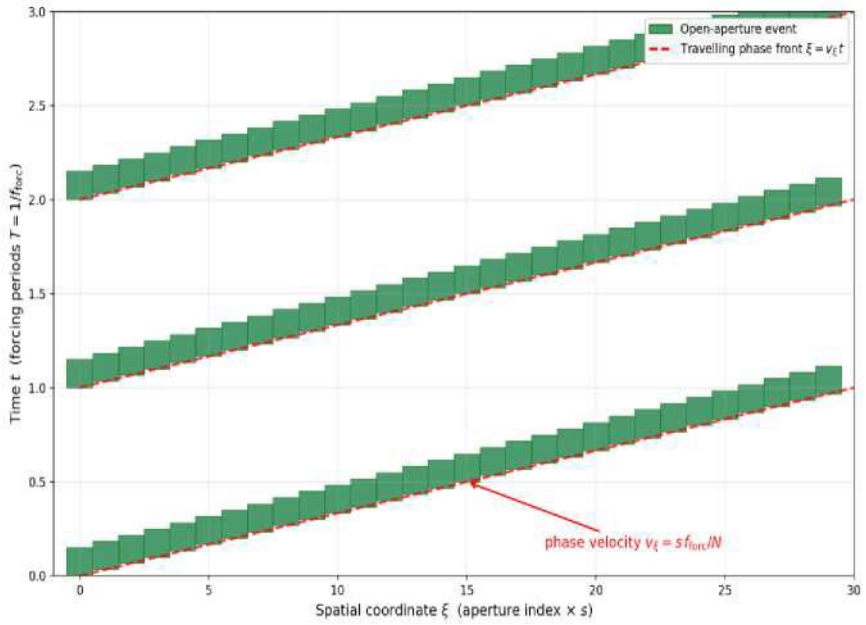


Рисунок 2. Пространственно-временное представление перемещающегося граничного условия b (ξ, t). Только схематическая иллюстрация; никакие экспериментальные или числовые данные не показаны.

2.3. Частоты, время открытия и условие неперекрытия

Три частоты должны указываться раздельно. f_rot — частота механического вращения ротора. f_local — частота локального открытия, которую испытывает одно отверстие или одно фиксированное положение отверстия. f_event — суммарная частота событий вдоль апертурной последовательности; часто это N·f_rot, когда за оборот происходит N активаций.

Число Струхаля, относящееся к одиночной пульсирующей струе, должно вычисляться по f_local. Глобальная частота событий может доминировать в спектрах датчика, принимающего множество апертурных событий; необходимо указывать обе величины.

$$St_f = f_local \cdot d / U_j, \quad F = U_j \cdot \Delta t_open / d.$$

Иными словами, St_f сопоставляет частоту локального открытия со временем конвекции струи на одном диаметре апертуры, а F сопоставляет длину порции жидкости, выброшенной за одно открытие, с диаметром отверстия.

Локальная скважность равна Δt_open·f_local, что соответствует произведению F·St_f. Для двоичного неперекрывающегося локального цикла это значение не должно превышать 1. Для глобальной последовательной картины условие $\Delta t_open \cdot f_event \leq 1$ является полезной проверкой отсутствия перекрытия в случае, когда в каждый момент должна быть активна только одна апертура. Если несколько отверстий перекрываются по построению, b(ξ, t) следует рассматривать как непрерывную функцию перекрытия, а массовый расход — калибровать.

2.4. Безразмерные величины, ограничивающие величины и метрики отклика

Формулировка разделяет то, что контролирует экспериментатор, и то, что возвращает течение. Это позволяет не рассматривать когерентность как задаваемый параметр до её измерения.

Таблица 1. Классификация величин: входные (проектные), калибровочные, ограничивающие и выходные (измеряемые).

Класс	**Величина**	**Определение в инженерных терминах**	**Типичная роль**
Входная (проектная)	Re_j	скорость струи × диаметр отверстия ÷ кинематическая вязкость	число Рейнольдса диафрагмы
Входная (проектная)	St_f	частота локального открытия × диаметр апертуры ÷ скорость струи	локальное число Струхаля форсирования
Входная (проектная)	F	скорость струи × время открытия отверстия ÷ диаметр отверстия	число формирования (formation number)
Входная (проектная)	s/d	расстояние между отверстиями ÷ диаметр отверстий	параметр упаковки и взаимодействия; диапазон интереса 2–10
Входная (проектная)	П_ξ	скорость перемещения фазы ÷ скорость струи	отношение скорости бега фазы (специфично для МСФП)
Калибровочная	C_d	фактическая скорость струи ÷ идеальная скорость по Бернулли	коэффициент расхода отверстия (затвора)

Ограничивающая	Ma	скорость струи ÷ скорость звука	проверка сжимаемости
Ограничивающая	σ_c	располагаемый запас статического давления ÷ динамическое давление	проверка кавитации в жидкостях
Выходная (измеряемая)	когерентность	кросс-спектральная корреляция между датчиками или плоскостями	измеряемая метрика фазовой когерентности
Выходная (измеряемая)	доля энергии POD	энергия в выбранных модах POD ÷ суммарная энергия разрешённых флуктуаций	метрика модальной концентрации энергии

Для воды число Маха обычно мало, однако кавитация всё же может иметь значение. Число кавитации

$$\sigma_c = (p_{static} - p_v)/(0{,}5 \cdot \rho \cdot U_j^2).$$

Иными словами, риск кавитации возрастает, когда местный запас давления над давлением насыщенного пара становится малым по сравнению с динамическим давлением струи. Такая проверка необходима вблизи острых кромок отверстий и при высоком перепаде давления.

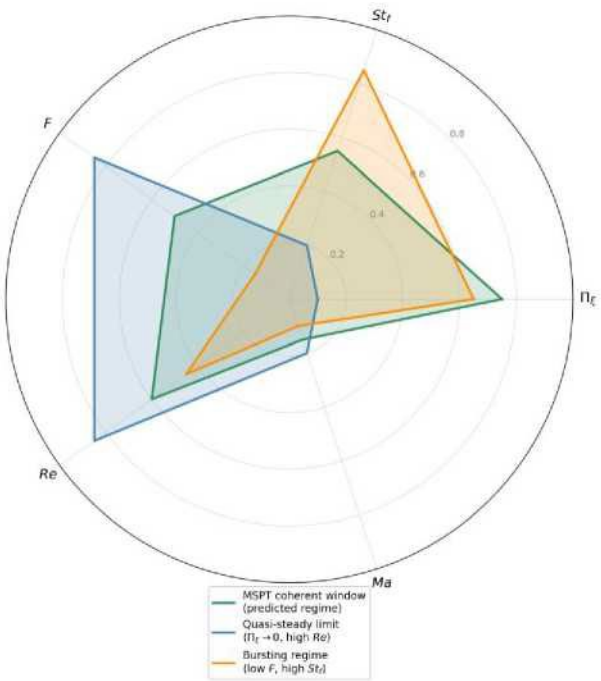


Рисунок 3. Карта-схема входных (проектных) величин, ограничивающих величин и измеряемых метрик отклика. Радарная диаграмма носит организационный, а не количественный характер.

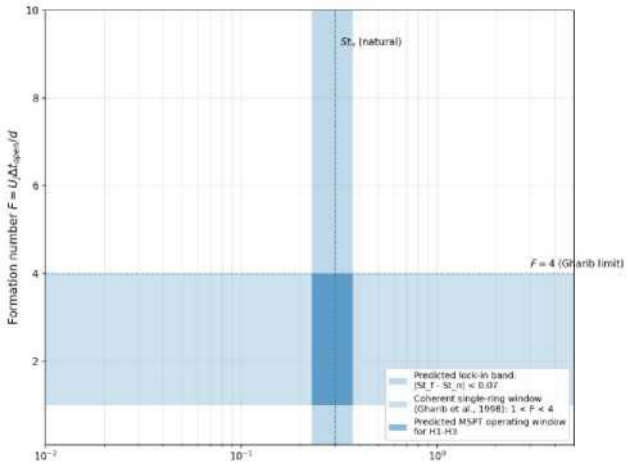


Рисунок 4. Карта поиска режимов в плоскости (St_f, F); St_f = f_local·d/U_j. Заштрихованная область является гипотезой для планирования эксперимента, а не измеренной рабочей границей.

2.5. Постановка задачи

При заданном b(ξ, t), рабочей среде, геометрии апертур и входных (проектных) величинах определяется, переходит ли выходное течение от некогерентного распределённого ансамбля импульсных струй к вынужденному когерентному волновому пакету. Требуемыми наблюдаемыми величинами являются спектры давления и завихрённости, статистика циркуляции, когерентность, моды POD/DMD и сопоставление с контролем.

3. Теоретические основы

3.1. Циркуляция одиночного апертурного импульса и её масштаб

В течение одного интервала открытия апертура ведёт себя приблизительно как импульсно запущенная (пульсирующая) струя. Простейшая оценка по модели «пробки» (slug):

$$\Gamma_slug = 0{,}5 \cdot U_j^2 \cdot \Delta t_open.$$

Иными словами, оценка «пробки» означает, что циркуляция импульса составляет примерно половину квадрата скорости струи, умноженную на время открытия. Эквивалентно, поскольку F = U_j·Δt_open/d и Γ_scale = U_j·d, та же оценка записывается как Γ_slug = 0,5·F·Γ_scale.

Это соотношение не универсально. Более корректная экспериментальная модель:

$$\Gamma_pulse = C_\Gamma \cdot U_j^2 \cdot \Delta t_open = C_eff \cdot U_j \cdot d.$$

Коэффициент зависит от геометрии кромки отверстия, профиля скорости, истории давления, коэффициента расхода, числа Рейнольдса и функции открытия. Оценка «пробки» наиболее содержательна примерно при $1 \le F \le 4$. При $F < 1$ в вихре может преобладать закатка кромки; при $F \gtrsim 4$ ведущее кольцо отрывается, а ведомая струя переносит дополнительную циркуляцию. Поэтому в H2 следует использовать калиброванный эффективный масштаб Γ_eff, а не точные целые числа, кратные U_j·d.

3.2. Бегущее форсирование, конвективный резонанс и захват

Классическая синхронизация в следах за плохообтекаемыми телами (bluff body) часто описывается как глобальная. Воздействие МСФП отличается тем, что накладывает бегущее пространственно-временное граничное условие на струи, которые могут быть конвективно неустойчивыми. Поэтому в настоящей работе H1 следует рассматривать как вынужденный конвективный резонанс или выбор бегущего волнового пакета, а не как гарантированную глобальную синхронизацию осциллятора.

Естественное (собственное) число Струхаля St_n является эмпирической калибровочной целью. Широкий диапазон поиска около 0,2–0,6 разумен для восприимчивости круглой струи, однако импульсно запускаемые струи и отверстия конечной толщины могут смещать его. Протокол проверки должен сканировать St_f, а не принимать одно универсальное значение.

Гидродинамический и акустический отклики также должны разделяться. При высокой частоте событий акустические длины волн могут оказаться сопоставимы с размерами устройства, создавая стоячие волны или резонансы типа резонатора Гельмгольца. Истинно гидродинамический отклик должен соответствовать конвекции со скоростью порядка U_j и признакам завихрённости (PIV), а не только пикам давления.

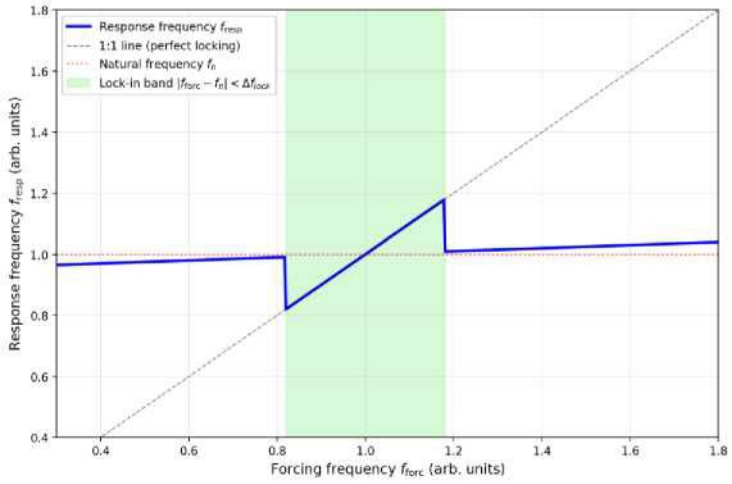


Рисунок 5. Схематическая реакция захвата: по оси абсцисс — частота форсирования, по оси ординат — частота отклика. Зелёная полоса иллюстрирует только H1 и не является измеренными данными.

3.3. Предполагаемый мультимодальный спектр циркуляции

H2 — наиболее сильное и наиболее уязвимое предсказание. Предлагаемый механизм не является буквальным квантованием. Рабочая идея состоит в том, что картина фазы бега может благоприятствовать когерентным пакетам, сформированным почти целым числом эффективных импульсов, событий образования вихревых пар или циклов слияния до декорреляции. Такой отбор пакетов может давать предпочтительные интервалы циркуляции, однако положения и ширины пиков должны быть измерены.

Нулевая гипотеза не является равномерным распределением. Она состоит в том, что циркуляция в стохастическом пульсирующем ансамбле следует широкому унимодальному распределению —

гамма- или логнормальному, — возможно, с кластеризацией, обусловленной обычной турбулентностью. H2 принимается только в том случае, если мультимодальная модель превосходит эти базовые модели и та же структура пиков отсутствует в контроле.

$$\Gamma_{peak,n} \approx n \cdot \Gamma_{eff} \quad \textit{(с конечной шириной и возможным систематическим сдвигом).}$$

Здесь n — только метка наблюдаемых пиков. Γ_eff — экспериментально калиброванный эффективный масштаб импульса. Точные целочисленные уровни, не зависящие от F, Re_j и геометрии, не заявляются.

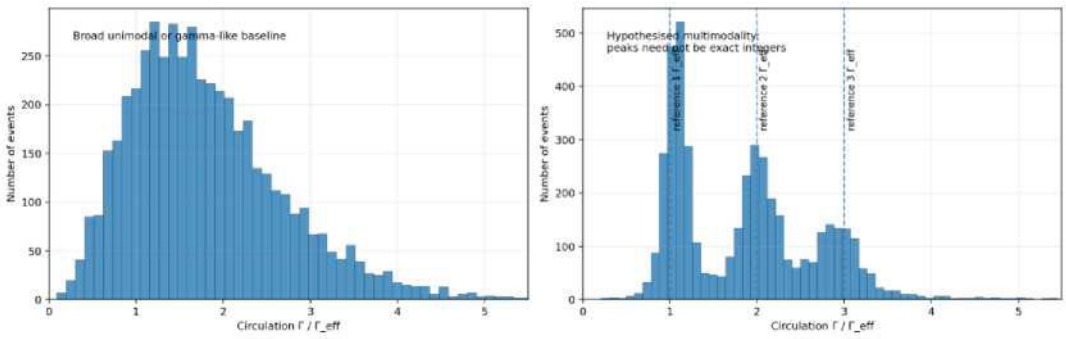


Рисунок 6. Гистограммы циркуляции. Правая панель намеренно показывает слегка сдвинутые пики, чтобы подчеркнуть, что H2 не утверждает точных целочисленных уровней.

3.4. Аналогия с фазированной антенной решёткой и её пределы

Наложенная фазовая прогрессия формально аналогична фазовой прогрессии в фазированной антенной решётке. Аналогия полезна при проектировании размещения датчиков и при поиске направленной когерентности, но не является доказательством формирования луча. Акустические фазированные решётки работают на гармонических сигналах малой амплитуды, тогда как струи МСФП являются широкополосными, вихревыми и нелинейными. Поэтому направленность должна измеряться, а не выводиться из геометрии.

3.5. Когерентность как выходная величина и трёхмерные ограничения

Длина когерентности не должна вычисляться только по времени вязкой диффузии. Небезопасная оценка $\Lambda_{coh} \approx Re_j \cdot d$ снимается. Конкурирующие механизмы — рост неустойчивости Кельвина–Гельмгольца, взаимная индукция вихрей, вихревое сопряжение, азимутальная неустойчивость, взаимодействие со стенками, турбулентность и акустическая связь — обычно снижают когерентность задолго до того, как это сделает чисто вязкая диффузия.

Рабочие ожидания для ближней зоны скромны: когерентность может сохраняться на протяжении примерно от одного до десяти диаметров апертуры, если измерения не покажут иного. Гипотезы H1–H3 следует проверять сначала в ближней зоне, например при $z \leq 10d$, прежде чем распространять выводы вниз по потоку. Для оценки азимутальных мод и трёхмерного разрушения структуры необходимы стерео-PIV, томографический PIV или многоплоскостные измерения.

4. Фальсифицируемые гипотезы

Приведённые ниже гипотезы являются правилами принятия решений. Положительный результат должен превышать контрольные показатели и погрешность измерений. Визуально привлекательная картина сама по себе подтверждением не является.

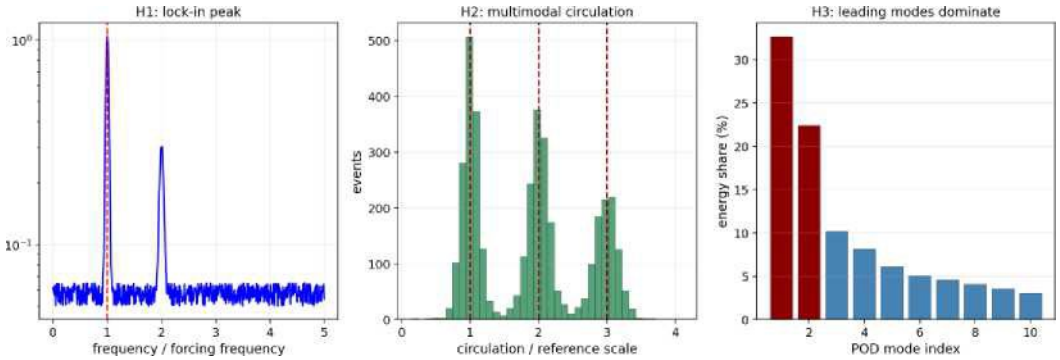


Рисунок 7. Визуальная сводка гипотез H1–H3. SNR — отношение сигнал/шум. Все панели схематичны и требуют контролируемой проверки.

4.1. H1 — вынужденный конвективный резонанс (полоса захвата)

Утверждение. По крайней мере для одного экспериментально достижимого подмножества Re_j, St_f, F, s/d и П_ξ поле давления или завихрённости ниже по потоку содержит статистически значимую составляющую на соответствующей частоте форсирования и её гармоники на конечном интервале St_f.

Приёмка, уровень 1. Спектральный пик должен превышать оценённый по методу Уэлча локальный минимальный уровень широкополосного шума не менее чем на три стандартных отклонения, воспроизводиться в независимых прогонах и отсутствовать в контроле. Практическим инженерным ориентиром является отношение сигнал/шум 10 дБ, то есть мощность сигнала в десять раз выше мощности шума в полосе сравнения.

Приёмка, уровень 2. Полноценная валидация должна демонстрировать эффект в трёх или более различных рабочих точках или при непрерывном сканировании параметров, а не только в одной изолированной настройке.

Отклонение. H1 отклоняется в проверяемой области, если спектры остаются широкополосными, если наблюдаемые пики согласуются с акустическим или структурным резонансом, а не с вихревым откликом, либо если предполагаемая полоса захвата меньше неопределённости измерения.

4.2. H2 — статистика мультимодальной циркуляции

Утверждение. Внутри области, где H1 даёт положительный результат, выборки вихревой циркуляции образуют статистически устойчивое мультимодальное распределение по сравнению с логнормальной и гамма-стохастической базовыми моделями и всеми контролями.

Приёмка. Следует использовать метод идентификации вихрей, соответствующий измерению: критерии Г1/Г2 для двумерного PIV и критерии Q или λ_2 только для объёмных полей. Мультимодальная модель должна превосходить нулевые модели по критериям AIC/BIC или по отношению правдоподобия; необходимо приводить бутстрэп-доверительные интервалы и

непараметрический тест на мультимодальность, например тест «провала» (dip test) Хартигана. Для валидации уровня 1 требуется примерно 1000 независимых вихревых событий; полноценная проверка — около 10 000 событий. Менее примерно 100 событий недостаточно, чтобы отличить мультимодальность от выборочного шума.

Зона неопределённости. Пики, зависящие от ширины бина, полосы пропускания ядерной оценки плотности (KDE), порога идентификации вихря или размера окна, неубедительны. Неубедительны также расхождения положений пиков в пределах примерно 20–30 %, если они не объяснены калиброванной моделью Γ_eff.

Отклонение. H2 отклоняется, если распределения унимодальны, если наилучшая мультимодальная аппроксимация статистически не превосходит стохастические базовые модели, если сопоставимые пики появляются в контролях со случайной фазой или в стационарных контролях, либо если расстояние между пиками отличается более чем примерно на 30 % от калиброванной рабочей модели без физического объяснения.

4.3. H3 — когерентное модальное доминирование

Утверждение. Внутри области, где H1 даёт положительный результат, анализ POD, спектральный POD и DMD показывает более сильное фазово-когерентное модальное содержание на частоте форсирования, чем в контролях.

Приёмка. Первые две моды POD могут использоваться как начальный ориентир, но решающим критерием не является универсальный порог 50 %. Временные коэффициенты POD, спектральные моды POD или оконные моды DMD должны показывать содержание на частоте форсирования, статистически превышающее минимальный уровень шума и уровень контролей. Низкочастотный дрейф должен быть устранён, например фильтрацией верхних частот примерно на половине частоты форсирования, когда это необходимо.

Отклонение. H3 отклоняется, если в ведущих модах преобладают дрейф среднего течения, вибрация ротора, артефакты датчика или низкочастотная нестационарность, либо если когерентные моды не отличаются от контролей в пределах неопределённости.

4.4. Теоретические границы опровержения

Сама теория, а не только отдельные гипотезы, должна быть пересмотрена, если контролируемые эксперименты в пределах возможной рабочей области показывают одновременно всё нижеперечисленное: отсутствие когерентности давления или завихрённости на частоте форсирования сверх уровня контролей; отсутствие различия между бегущей и случайной фазой при равном усреднённом по времени потоке импульса; отсутствие устойчивой мультимодальности циркуляции в любой области с положительным H1; отсутствие селекции мод POD/DMD после удаления акустических и механических артефактов. В этом случае МСФП остаётся кинематической архитектурой граничных условий, но не должен заявляться как эффективный способ управления когерентными вихревыми структурами.

5. Протокол валидации

5.1. Рабочая область эксперимента и геометрическая реализуемость

Прежде чем оценивать гидравлические и механические требования, прототип должен удовлетворять условию геометрической реализуемости: расстояние между отверстиями обычно должно лежать в пределах примерно от 2d до 10d. Ниже примерно 2d отверстия и перемычки между ними могут оказаться технологически невыполнимыми или гидравлически несвязанными; выше примерно 10d отверстия начинают вести себя как изолированные излучатели и эффекты решётки ослабевают.

Для каждого прототипа должны указываться R, d, N, L_spiral, локальное s/d, ширина окна статора, толщина ротора, форма кромки отверстия, чистота обработки поверхности, допуски, калиброванное значение C_d и метод определения Δt_{open}.

5.2. Методы измерений

PIV. Прямое PIV с временным разрешением применимо только тогда, когда реализуемы требуемые частота кадров и поле зрения. Для более высокой частоты событий следует использовать многоплоскостное или стробоскопическое PIV с фазовой автоподстройкой, синхронизированное с фазой бегущей волны через относительную временную задержку, равную пространственному фазовому сдвигу, делённому на v_ξ. Строб с фиксированной задержкой может не совпадать с картиной движения и не должен применяться без соответствующей коррекции.

Зондирование давления и акустики. В воздушных экспериментах могут использоваться микрофоны или датчики давления. Эксперименты с водой требуют гидрофонов или совместимых с водой датчиков давления. Полоса пропускания датчика должна превышать максимальную оцениваемую составляющую с достаточным запасом, обычно не менее чем в пять раз. Проверки акустического резонанса должны сопоставлять фазовую скорость давления, характеристики завихрённости и акустические масштабы длины устройства.

Опорная фаза ротора. Для отделения артефактов, связанных с порядком вращения ротора, от отклика жидкости и для фазового осреднения необходим энкодер. Если предполагается высокочастотное тестирование, ему должны предшествовать расчёты CFD или низкочастотное масштабирование.

5.3. Последовательность обработки данных

Анализ H1: вычисление спектров мощности по Уэлчу, взаимных спектров и доверительных интервалов; указание длины окна, перекрытия, спектрального разрешения, числа степеней свободы и полосы сравнения.

Анализ H2: идентификация вихрей, вычисление циркуляции с учётом неопределённости пространственного разрешения, проверка логнормальной и гамма-модели нулевого распределения, сообщение критериев независимости событий.

Анализ H3: тройное разложение Хуссейна–Рейнольдса в форме, разрешённой по фазе:

$$u = \langle u \rangle + \tilde{u} + u', \quad \textit{(средняя составляющая + фазово-когерентная составляющая + остаточная турбулентность).}$$

Затем применяются POD, спектральный POD и DMD, чтобы отделить фазово-когерентный отклик на частоте форсирования от среднего дрейфа и остаточной турбулентности.

5.4. Необходимые контрольные случаи

- C1. Стационарная базовая линия: эквивалентный стационарный массовый расход или перепад давления без картины бега фазы.
- C2. Форсирование со случайной фазой: та же средняя скважность, та же средняя локальная частота открытия и то же минимальное расстояние, но псевдослучайные или пуассоновские моменты активации.
- C3. Одноапертурное форсирование: одна апертура на той же локальной частоте, проверка обычного импульсно-реактивного отклика.
- C4. Внеполосное форсирование: St_f вне прогнозируемой области вынужденного резонанса.
- C5. Сопоставление при равном усреднённом по времени потоке импульса или равном среднеквадратичном перепаде давления: это заменяет простое сравнение при равном расходе, поскольку случаи с бегущей, случайной и стационарной фазой могут иметь различные мгновенные профили импульса при одинаковом среднем расходе.

5.5. Оценка неопределённости и статистические правила

Каждое приёмочное испытание должно включать оценку неопределённости. Для циркуляции это неопределённость векторов PIV, пространственное разрешение, выбор границ вихря и перенос неопределённости U_j, d и Δt_open. Для спектров — оконная обработка, осреднение, полоса пропускания и доверительные границы. Для безразмерных групп все калиброванные величины должны приводиться с погрешностями.

Для H2 разбиение на интервалы (биннинг) не должно определять заключение. Анализ должен включать ядерную оценку плотности, бутстрэп-доверительные интервалы, сравнение моделей по AIC/BIC или отношению правдоподобия, тест «провала» Хартигана или его эквивалент и явное указание числа независимых вихревых событий. Для H1 и H3 величина эффекта относительно контролей так же важна, как и значения p.

6. Обсуждение: область применимости, ограничения и позиционирование

6.1. Что утверждает предлагаемая схема

МСФП определяет механически наложенное бегущее граничное условие для распределённого импульсно-струйного воздействия. Проверяемое утверждение состоит в том, способно ли это воздействие вызывать вынужденный конвективный резонанс, измеримую когерентность, статистику мультимодальной циркуляции и селекцию мод по сравнению с контролями.

6.2. На что схема не претендует

Схема работает в рамках строго классической механики жидкости. Вся терминология, включая «выбор режима», «фазовую когерентность», «фазовую синхронизацию (захват)» и «мультимодальный спектр», относится к нелинейной классической динамике в стандартном

смысле литературы по активному управлению потоком. Бегущее граничное условие не переносит массу, импульс, энергию или информацию с фазовой скоростью; это кинематическая картина, обусловленная геометрией пары «ротор–статор». Энергетический баланс подчиняется стандартной термодинамике: мощность насоса и ротора подводится к устройству и распределяется между кинетической энергией струи, акустическим излучением, вибрацией конструкции и вязкостной диссипацией. Любые тепловые эффекты, наблюдаемые в будущих прототипах, должны анализироваться средствами обычной термодинамики и выходят за рамки настоящей работы. Не заявляется универсальный закон точной целочисленной циркуляции, не зависящий от F, Re_j, геометрии и калибровки; H2 — калиброванная гипотеза мультимодальности с конечной шириной пика и возможным систематическим сдвигом.

6.3. Связь с предшествующими работами и позиционирование актуаторов МСФП

Активное управление потоком включает синтетические струи, импульсный вдув и отсос, плазменные актуаторы, механические клапаны, распределённые струйные матрицы, струйные осцилляторы и сметающие (свипирующие) струи. Ближайшими концептуальными аналогами МСФП являются струйные осцилляторы и сметающие струи, поскольку они также накладывают изменяющуюся во времени пространственную структуру на струйное воздействие.

Различие состоит в источнике фазовой прогрессии. Струйные осцилляторы и сметающие струи используют внутренние контуры обратной связи или гидродинамическую неустойчивость, поэтому частота колебаний определяется геометрией устройства и состоянием течения. МСФП задаёт фазу бега извне, через кинематику пары «ротор–статор», разделяя f_rot, f_local, f_event и v_ξ как отдельно указываемые величины. Именно это является основной причиной рассматривать МСФП как самостоятельную экспериментальную архитектуру, а не как доказательство превосходящей эффективности.

Частота событий в десятки килогерц может быть кинематически реализуема, но автоматически не попадает в окно гидродинамического резонанса. Очень высокие частоты событий могут вместо этого возбуждать акустические или структурные резонансы и должны рассматриваться отдельно от вихревого захвата.

6.4. Ограничения настоящей работы

- Экспериментальные результаты и результаты CFD не представлены.
- Истинная полоса резонанса неизвестна.
- Требуется калибровка эффективного масштаба импульса Γ_eff.
- В отдельных режимах могут преобладать сжимаемость, кавитация, акустическая связь, вибрация ротора и трёхмерная неустойчивость.
- Утверждения о работе на различных рабочих средах требуют проверки для каждой среды.

6.5. Потенциальные области применения

Если гипотезы H1–H3 подтвердятся, двумя наиболее прямыми направлениями применения являются управление пограничным слоем и отрывом, а также интенсификация теплопередачи или смешивания. Более широкие применения, такие как направленное акустическое излучение

или модификация вихревых течений в гидравлических машинах, должны оставаться вторичными гипотезами до выполнения отдельных исследований эффективности и масштабирования.

7. Вывод

Часть II обеспечивает строгую, классическую, фальсифицируемую схему описания отклика течения в системе МСФП. В ней введены компактные формальные уравнения вместе с объяснениями в инженерных терминах, точно определена спиральная фазовая скорость, разделены локальные и глобальные частоты, включены условия неперекрытия, когерентность рассматривается как выходная величина, а требования точной целочисленной циркуляции заменены калиброванной гипотезой мультимодальности.

Приложение А. Уравнения в инженерной форме и контроль размерностей

Приложение сохраняет формулы читаемыми для инженеров, не являющихся специалистами по МСС, сохраняя при этом достаточно строгие обозначения для научного воспроизведения.

Таблица А1. Уравнения в инженерной форме: смысл и размерность в СИ.

Символ / соотношение	**Смысл в инженерных терминах**	**Единицы СИ / результат**
$d\xi/d\theta = [r^2 + (dr/d\theta)^2]^{(1/2)}$	элемент длины дуги на один радиан по спирали	м/рад
$v_\xi = (d\xi/d\theta)\cdot\Omega$	скорость перемещения фазы по спирали	м/с
$b(\xi, t)$	степень открытия апертуры: от 0 (закрыто) до 1 (открыто)	безразмерная
$u_n = U_j\cdot b$	нормальная скорость струи, наложенная на апертуру	м/с
$U_j = C_d\cdot(2\Delta p/\rho)^{(1/2)}$	первая оценка скорости струи при малых потерях	м/с
$Re_j = U_j\cdot d/\nu$	число Рейнольдса диафрагмы (струи)	безразмерное
$St_f = f_{local}\cdot d/U_j$	локальное число Струхаля форсирования	безразмерное
$F = U_j\cdot\Delta t_{open}/d$	число формирования (formation number)	безразмерное
$П_\xi = v_\xi/U_j$	отношение скорости бега фазы к скорости струи	безразмерное
$\Gamma_{scale} = U_j\cdot d$	базовый масштаб циркуляции для построения графиков	м²/с
$\Gamma_{pulse} = C_\Gamma\cdot U_j^2\cdot\Delta t_{open}$	калиброванная модель импульсной циркуляции	м²/с
$\sigma_c = (p_{static} -$	запас до кавитации в жидкостях	безразмерное

p_v)/(0,5ρU_j²)		
доля энергии POD = Σ первых собственных значений / суммарная энергия разрешённых флуктуаций	концентрация модальной энергии; усечение должно охватывать около 99 % энергии флуктуаций	безразмерное

Замечания к размерностям

Проверка по единицам СИ: [dξ/dθ] = м/рад; [v_ξ] = м/с; b и u_n/U_j безразмерны; [Re_j], [St_f], [F], [Π_ξ], [σ_c] безразмерны; [Γ_scale] = м²/с; [Γ_pulse] = м²/с. Все безразмерные группы инвариантны относительно масштабирования геометрии при сохранении подобия по Re и St.

Список литературы

[1] Bearman, P. W. (1984). Vortex shedding from oscillating bluff bodies. Annual Review of Fluid Mechanics, 16, 195–222.

[2] Cattafesta, L. N., Sheplak, M. (2011). Actuators for active flow control. Annual Review of Fluid Mechanics, 43, 247–272.

[3] Cohen, J., Wygnanski, I. (1987). The evolution of instabilities in the axisymmetric jet. Part 1. The linear growth of disturbances near the nozzle. Journal of Fluid Mechanics, 176, 191–219.

[4] Crow, S. C., Champagne, F. H. (1971). Orderly structure in jet turbulence. Journal of Fluid Mechanics, 48, 547–591.

[5] Didden, N. (1979). On the formation of vortex rings: rolling-up and production of circulation. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik (ZAMP), 30, 101–116.

[6] Gharib, M., Rambod, E., Shariff, K. (1998). A universal time scale for vortex ring formation. Journal of Fluid Mechanics, 360, 121–140.

[7] Glezer, A., Amitay, M. (2002). Synthetic jets. Annual Review of Fluid Mechanics, 34, 503–529.

[8] Graftieaux, L., Michard, M., Grosjean, N. (2001). Combining PIV, POD and vortex identification algorithms for the study of unsteady turbulent swirling flows. Measurement Science and Technology, 12, 1422–1429.

[9] Hartigan, J. A., Hartigan, P. M. (1985). The dip test of unimodality. The Annals of Statistics, 13 (1), 70–84.

[10] Ho, C.-M., Huerre, P. (1984). Perturbed free shear layers. Annual Review of Fluid Mechanics, 16, 365–422.

[11] Huerre, P., Monkewitz, P. A. (1990). Local and global instabilities in spatially developing flows. Annual Review of Fluid Mechanics, 22, 473–537.

[12] Hunt, J. C. R., Wray, A. A., Moin, P. (1988). Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows. CTR Report CTR-S88.

[13] Hussain, A. K. M. F., Reynolds, W. C. (1970). The mechanics of an organized wave in turbulent shear flow. Journal of Fluid Mechanics, 41 (2), 241–258.

[14] Jeong, J., Hussain, F. (1995). On the identification of a vortex. Journal of Fluid Mechanics, 285, 69–94.

[15] Хаустов, В. И. (2026). Механический спирально-фазовый преобразователь. Часть I: Геометрический принцип детерминированного управления бегущими граничными условиями, спиральной фокусировки и вихревых потоков. DOI: 10.5281/zenodo.20237780.

[16] Krueger, P. S., Gharib, M. (2003). The significance of vortex ring formation to the impulse and thrust of a starting jet. Physics of Fluids, 15 (5), 1271–1281.

[17] Lumley, J. L. (1967). The structure of inhomogeneous turbulent flows. В сб.: Atmospheric Turbulence and Radio Wave Propagation, eds. A. M. Yaglom, V. I. Tatarsky. M.: Наука, 166–178.

[18] Moreau, E. (2007). Airflow control by non-thermal plasma actuators. Journal of Physics D: Applied Physics, 40 (3), 605–636.

[19] Pikovsky, A., Rosenblum, M., Kurths, J. (2001). Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Sciences. Cambridge University Press.

[20] Popper, K. (1959). The Logic of Scientific Discovery. Hutchinson.

[21] Raghu, S. (2013). Fluidic oscillators for flow control. Experiments in Fluids, 54, 1455.

[22] Saffman, P. G. (1992). Vortex Dynamics. Cambridge University Press.

[23] Schmid, P. J. (2010). Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data. Journal of Fluid Mechanics, 656, 5–28.

[24] Shusser, M., Gharib, M. (2000). Energy and velocity of a forming vortex ring. Physics of Fluids, 12 (3), 618–621.

[25] Sirovich, L. (1987). Turbulence and the dynamics of coherent structures. Quarterly of Applied Mathematics, 45, 561–590.

[26] Welch, P. D. (1967). The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, 15 (2), 70–73.

[27] Williamson, C. H. K. (1996). Vortex dynamics in the cylinder wake. Annual Review of Fluid Mechanics, 28, 477–539.

[28] Williamson, C. H. K., Roshko, A. (1988). Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder. Journal of Fluids and Structures, 2, 355–381.

[29] Woszidlo, R., Wygnanski, I. (2011). Parameters governing separation control with sweeping jet actuators. AIAA Paper 2011-3172.

[30] Wygnanski, I. J., Petersen, R. A. (1987). Coherent motion in excited free shear flows. AIAA Journal, 25 (2), 201–213.