Формирование вихревого тороида встречным противотоком движущихся по орбите закрученных течений

Предварительное экспериментальное и размерное исследование

Хаустов Владимир Игоревич

ORCID: 0009-0007-3657-2309

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

Лицензия: CC BY 4.0

DOI: 10.5281/zenodo.20416410

Дата публикации: 28 мая 2026 года

Научно-технический перевод с английского языка.

Редакция, адаптированная для русскоязычного инженера-исследователя.

Оригинал: Khaustov. V. Open-Air Vortex-Toroid Formation by Counter-Flow Arrest of Orbitally Moving Swirled Jets: A Preliminary Experimental and Dimensional Study. https://doi.org/10.5281/zenodo.20416410

Аннотация

Предлагается предварительное экспериментальное и размерное исследование формирования вихревого тороида в открытой атмосфере путём остановки противотоком орбитально движущихся закрученных струй. Течение создаётся специальным устройством S-образного типа, в котором два диаметрально противоположных выхода, каждый из которых испускает закрученную струю, вращаются вокруг вертикальной оси с частотой 800–1200 об/мин в открытой атмосфере. Визуализация дымом показывает локализованную устойчивую организацию трассера в кольцевой области вокруг ротора; шесть термопар регистрируют локальные понижения температуры на 0,3–0,8 К относительно окружающей среды.

Предложены и количественно оценены четыре рабочих условия: (i) баланс противотока $\Lambda = U_j/U_c = O(1)$ (с U_c, определяемой геометрией S-образного блока), при котором осевая составляющая закрученной струи локально задерживается орбитальным движением её источника; (ii) временное перекрытие $K = \tau_d \cdot f_{pass} > 1$, гарантирующее, что следующий орбитальный проход повторно возбуждает тот же азимутальный сектор до распада вихря; (iii) условие симметрии импульса $P_{net} \approx 0$, устраняющее результирующий поступательный дрейф конструкции; (iv) ненулевой подвод углового момента $dL_z/dt \neq 0$, поддерживающий циркуляцию от вязких потерь. Для документированного эталонного режима ($n \approx 1000$ об/мин, $D_S = 0{,}30$ м, два выхода) четыре условия выполняются одновременно: $\Lambda \approx 1{,}40$; $K \approx 3{,}3–6{,}7$; $P_{net} \approx 0$ по построению; $dL_z/dt \approx 8{,}6 \cdot 10^{-3}$ Н·м.

Обнаружено, что локальный шаг спирали сжимается до $p \approx 1$ мм, что отличает данную структуру от классических импульсных вихревых колец (где число формирования $L/D \approx 4$). Шкалы давления, кинетической мощности и адиабатической температуры получены и согласуются между собой в пределах 15–25 %.

Визуализация дымом показывает локализованную устойчивую организацию трассера в кольцевой области вокруг ротора; шесть термопар, расположенных вблизи оси вращения и в кольцевой области, регистрируют локальные температурные отклонения приблизительно −1 К вблизи оси и +2 К в кольцевой области относительно эталонной температуры окружающей среды около 21 °C. Для последующей проверки указана программа из девяти позиций (PIV, картирование давления, калибровка массового расхода, тепловизионная съёмка, проверка параметров, контрольная геометрия, CFD и замыкание энергетического баланса). Вклад препринта состоит в построении самосогласованной размерной и операционной основы для формирования вихревых тороидов в открытой атмосфере путём остановки противотока орбитально движущихся закрученных струй в качестве проверяемой гипотезы.

Ключевые слова: формирование вихревого тороида; вихревые структуры в открытой атмосфере; остановка противотока; орбитально движущиеся закрученные струи; закрученная струя; число формирования вихревого кольца; подвод углового момента; размерный анализ; устройство S-образного типа; предварительное экспериментальное исследование.

Оглавление

Аннотация 2
Сокращения 4
1. Введение 5
2. Физический принцип 6
2.1. Остановка закрученной струи противотоком 6
2.2. Замыкание орбиты и временное перекрытие 7
2.3. Симметрия импульса 7
3. Экспериментальный материал 8
3.1. Конфигурация A: базовый противоток без закрутки 8
3.2. Конфигурация B: закрученная струя в линейном противотоке 8
3.3. Конфигурация C: орбитальный S-образный блок в открытой атмосфере 9
4. Математический и размерный анализ 10
4.1. Рабочее окно из условия баланса противотока 10
4.2. Расход, эффективный диаметр и число Рейнольдса 12
4.3. Модель видимости с временным перекрытием 12
4.4. Динамическое давление, тепловая шкала, тяга и мощность 13
4.5. Отличие от классического числа формирования вихревого кольца 14
4.6. Оценка спирального сжатия и тороидального объёма 14
5. Наблюдения и шесть подпроцессов 16
5.1. Тороидальная организация при визуализации дымом 16
5.2. Точечные тепловые данные и скорректированная интерпретация 16
5.3. Шесть связанных подпроцессов 17
6. Новизна, классификация и научный вклад 18
7. Программа верификации 19
8. Ограничения 21
9. Выводы 21
Список литературы 22

Сокращения

Таблица 1. Номенклатура и символы, используемые в препринте.

Символ	Смысл	Единицы
U_j	осевая скорость закрученной струи на выходе	м/с
U_c	скорость противотока (источника) относительно окружающей среды; в S-образном блоке — орбитальная скорость на выходе	м/с
Λ = U_j/U_c	коэффициент баланса противотока, используемый в статье	—
D_S	диаметр S-образного блока	м
R = D_S/2	радиус орбиты одного выхода	м
n	механическая частота вращения	об/мин
f_pass	частота повторных проходов источника через фиксированный азимут	Гц
Δt_pass	время между последовательными проходами источника	с
τ_d	время видимой стойкости локального дымового следа	с
K = τ_d/Δt_pass	параметр временного перекрытия	—
Q_total, Q_s	суммарный расход компрессора и расход одного источника	м³/с
D_eff	эффективный диаметр выхода, определяемый из Q_s и U_j	м
S	число крутки (порядок величины U_φ/U_j)	—
P_net	результирующий линейный импульс, вносимый двумя источниками	Н
dL_z/dt	скорость подвода углового момента относительно центральной оси	Н·м
ΔT	температура относительно температуры окружающей среды (местного эталона)	К или °C

Соглашение об обозначениях. В работе используется стандартная система обозначений: U_j — осевая скорость струи на выходе, U_c — скорость противотока (скорость источника относительно окружающей среды), U_φ — азимутальная составляющая скорости закрученной струи. Коэффициент баланса Λ = U_j/U_c применяется единообразно по всему тексту.

1. Введение

Тороидальные вихревые структуры встречаются в вихревых кольцах, вихревых струях, ограниченных зонах рециркуляции, всплывающих шлейфах, при вихревом разрушении (vortex breakdown) и в течениях синтетических струй. Классические вихревые кольца обычно создаются импульсным выбросом конечной порции жидкости через отверстие и затем удаляются от генератора.

Замкнутые вихревые устройства могут поддерживать тороидальную рециркуляцию, но локализация в них обеспечивается стенками или камерами. Рассматриваемый здесь метод ставит другой вопрос: может ли движущийся источник закрученной струи использовать остановку противотоком и орбитальное повторение для поддержания локализованной тороидальной структуры трассера в открытом воздухе.

Физическая основа метода исходит из наблюдения, что противоток способен изменить осевое направление закрученной струи, не обязательно изменяя её закрутку. При линейном движении это даёт локальное сворачивание (roll-up) или спиральное сжатие; в системе с орбитальным движением источника тот же процесс может периодически повторяться и геометрически замыкаться вокруг центральной оси.

Рабочая гипотеза состоит в том, что вихретороидообразная структура в открытой атмосфере может быть сформирована при одновременном выполнении четырёх условий: $\Lambda = U_j/U_c = O(1)$; временное перекрытие $K > 1$; приблизительное взаимное обнуление чистого линейного импульса $P_{net} \approx 0$; ненулевой подвод углового момента $dL_z/dt \neq 0$. В физическом смысле струя не просто вдувается в окружающую среду: её осевому проникновению противодействует противоток, а азимутальная составляющая скорости остаётся доступной для создания вращательного сворачивания. S-образный блок повторяет это локальное сворачивание по замкнутой орбите.

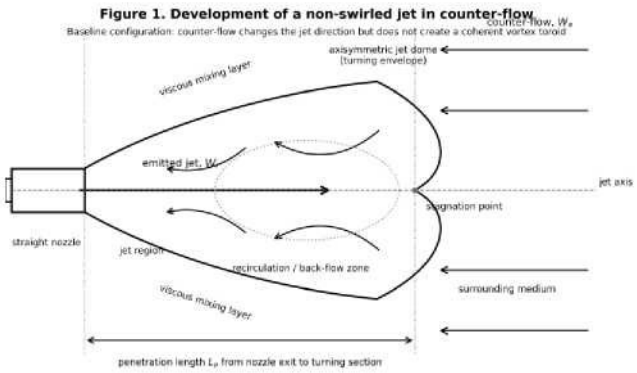


Рисунок 1. Базовая незакрученная струя в противотоке. Противоток разворачивает струю и создаёт область застоя и обратного течения, однако такая базовая конфигурация сама по себе не формирует когерентный вихревой тороид.

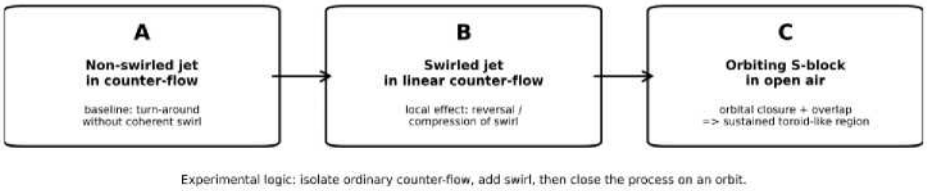


Рисунок 2. Логика эксперимента: обычный противоток → закрученный противоток → замыкание процесса на орбите в S-образном блоке.

Научный вклад статьи состоит в формулировании проверяемой рабочей картины, а не в завершённом доказательстве нового гидродинамического класса. В статье приводятся экспериментальная последовательность, размерные оценки, скорректированная интерпретация данных точечной температуры и программа проверки. Количественные условия $\Lambda = O(1)$, $K > 1$, $P_{net} \approx 0$ и $dL_z/dt \neq 0$ используются как рабочие критерии для последующих измерений методом PIV, измерений давления и теплового поля.

2. Физический принцип

2.1. Остановка закрученной струи противотоком

Используемые ниже обозначения: U_j — осевая скорость струи на выходе, U_c — скорость противотока (скорость источника относительно окружающей среды). Коэффициент баланса противотока равен

$$\Lambda = U_j / U_c. \quad (1)$$

Когда Λ значительно больше единицы, преобладает проникновение струи, и испускаемая закрученная струя уходит от источника прежде, чем может произойти локальное закрытие структуры. Когда Λ значительно меньше единицы, преобладает противоток и уносит выпущенную жидкость назад в виде следа. Экспериментально интересен режим $\Lambda = O(1)$, в котором осевое проникновение уменьшается, а азимутальная составляющая скорости может сохранять организованность. В этом режиме видимый след может проходить четыре стадии: осевое замедление, накопление закрученной жидкости вблизи источника, сворачивание спирального следа и образование кольцевой (тороидальной) оболочки следа.

Этот механизм отличается от обычного отклонения струи в сносящем потоке. В незакрученной струе противоток может создать купол застоя и область обратного течения, но он не сохраняет вращающуюся спиральную топологию. В закрученной струе осевая и азимутальная составляющие реагируют по-разному: осевое движение может быть замедлено, остановлено или повёрнуто назад противотоком, тогда как азимутальное движение может сохранить управляемость. Поэтому ожидается, что образующийся след сжимается в спираль, а не просто складывается в незакрученную оболочку струи.

В системе координат источника процесс читается проще. Окружающая среда приближается к выходу со скоростью порядка U_c, а струя выходит из сопла с осевой скоростью U_j и азимутальной скоростью U_φ. Когда U_j и U_c имеют одинаковый порядок, головная часть струи теряет длину осевого проникновения. Вихревая составляющая при этом обеспечивает локальную

циркуляцию трассера, и видимая структура может скатываться в кольцевую форму прежде, чем рассеяться турбулентным перемешиванием. Это локальный процесс, который S-образный блок повторяет по замкнутой орбите.

2.2. Замыкание орбиты и временное перекрытие

Линейный эксперимент с противотоком может показать локальное обращение направления и сворачивание, но источник при этом удаляется, и свёрнутая структура не удерживается в одной пространственной точке. Орбитальный S-образный блок замыкает процесс по круговой траектории. Каждый выход периодически возвращается в один и тот же азимутальный сектор, поэтому локальный процесс остановки противотоком повторяется раньше, чем предыдущий дымовой след полностью рассеется. Так орбитальная конфигурация превращает локальный переходный процесс в устойчивый кольцевой процесс форсирования.

Результирующая физическая последовательность: (i) закрученная струя испускается из движущегося источника; (ii) движение источника создаёт эффективный противоток в системе координат источника; (iii) осевая часть струи замедляется или поворачивается назад; (iv) вращательная составляющая даёт локальное сворачивание; (v) следующий проход второго выхода повторно входит в тот же азимутальный сектор до полного рассеяния предыдущего следа. Таким образом, S-образный блок превращает локальное противодействие противотока в периодически возобновляемое кольцевое воздействие.

Важно, что орбитальное движение не должно по величине компенсировать скорость струи: оно должно лишь вывести источник в диапазон скоростей, при котором осевой след уже не уходит из зоны локального взаимодействия. После этого повторение с двумя источниками определяет, остаются ли видимые следы разделёнными или сливаются в непрерывную кольцевую область.

$$f_pass = 2n/60, \quad \Delta t_pass = 1/f_pass. \quad (2)$$

Параметр временного перекрытия

$$K = \tau_d/\Delta t_pass = \tau_d \cdot f_pass. \quad (3)$$

При $K < 1$ последовательные различимые дымовые следы остаются разделёнными. При $K > 1$ следующий проход источника происходит раньше, чем предыдущий след полностью рассеялся, и может возникнуть квазинепрерывное кольцевое форсирование.

2.3. Симметрия импульса

В S-образном блоке используются два диаметрально противоположных тангенциальных источника. В идеальном симметричном случае векторы тяги в главном порядке компенсируются, а вклады углового момента относительно центральной оси могут складываться. При $r_1 = R \cdot e_x$, $r_2 = -R \cdot e_x$, $v_1 = -V \cdot e_y$, $v_2 = V \cdot e_y$:

$$P_net \propto v_1 + v_2 = 0, \quad (4)$$

$$L_z,net \propto r_1 \times v_1 + r_2 \times v_2 = -2RV \cdot e_z \neq 0. \quad (5)$$

Таким образом, та же двухточечная симметрия, которая подавляет поступательный дрейф, может сохранять конечный угловой момент. Это векторное свойство является центральным для пространственной локализации в открытой атмосфере. Если бы две тангенциальные струи не компенсировали свои линейные импульсы, структура уносилась бы как дрейфующий след. Если бы их вклады в угловой момент взаимно уничтожались, конфигурация работала бы

преимущественно как смеситель. Полезным является асимметричный режим: $P_{net} \approx 0$ при $dL_z/dt \neq 0$.

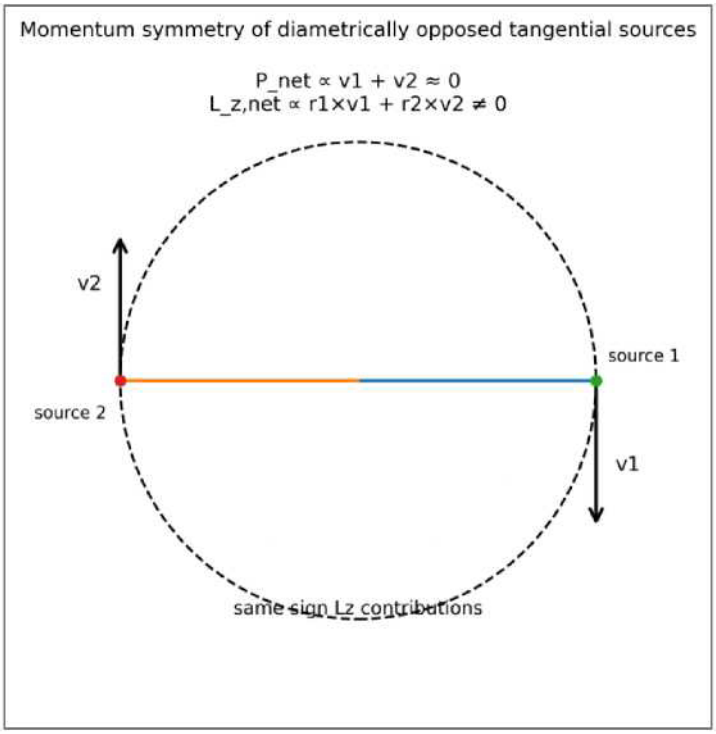


Рисунок 3. Векторное доказательство симметрии импульса: тангенциальные тяги взаимно компенсируются в линейном импульсе, тогда как их моменты относительно центральной оси складываются.

3. Экспериментальный материал

3.1. Конфигурация A: базовый противоток без закрутки

Незакрученная базовая конфигурация отделяет обычное обращение противотоком от обращения с сохранением закрутки. Незакрученная струя, входящая в противоток, отклоняется, образует область застоя и может создавать обратное течение или рециркуляцию за газодинамическим куполом. Однако, поскольку выпускаемая среда не имеет наложенной азимутальной скорости, развёрнутая структура лишена устойчивой управляемости и не даёт механизма для когерентного тороидального сворачивания. Этот базовый уровень служит контролем: он показывает, что одного противотока для предлагаемого метода недостаточно.

3.2. Конфигурация B: закрученная струя в линейном противотоке

В испытаниях закрученной струёй трубка с ленточной закручивающей вставкой перемещалась в воде, при этом воздух или вода выпускались через сопло. На снимках видны воздушные кольца, сливающиеся кольцевые структуры и спиральный след. Ключевое физическое наблюдение: противоток может изменить осевое направление видимой закрученной структуры, при этом направление вращения остаётся различимым. В предлагаемой интерпретации противоток

сжимает осевой шаг спиральной траектории; когда осевое проникновение становится сравнимым с противотоком, последовательные витки спирали могут сливаться в кольцевой вихрь.

Водные испытания не подтверждают формирование тороида в открытой атмосфере. Их роль уже и фундаментальнее: они выявляют локальное преобразование течения, которое S-образный блок затем повторяет на замкнутой орбите. Они также показывают, почему необходима закручивающая вставка: без закрутки противоток создаёт невращающуюся структуру застоя и обратного течения, а при наличии закрутки развёрнутый след сохраняет управляемость и может образовывать спиральный или кольцевой рисунок.

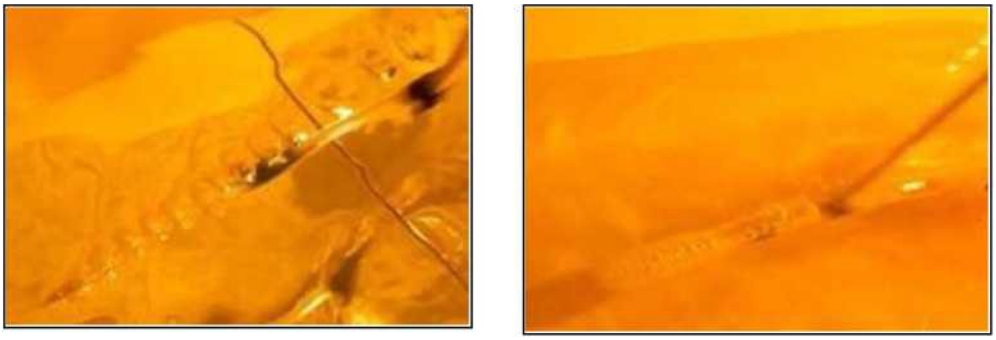


Рисунок 4. Закрученная струя в противотоке (вода): (а) воздушные кольца в воде; (б) слияние в общую спиральную линию вокруг трубки источника.

Конфигурация B подтверждает предварительный локальный механизм, но не может создать устойчивый тороид в открытой атмосфере, поскольку источник не возвращается в ту же пространственную область. Требуется замыкание орбиты.

3.3. Конфигурация C: орбитальный S-образный блок в открытой атмосфере

S-образный блок представляет собой вращающийся источник с двумя закрученными выходными соплами на противоположных концах горизонтального рычага. В первичных записях сообщаются диаметры S-образного блока около 0,30 м и 0,50 м, внутренние диаметры трубок около 0,004 м и 0,007 м в различных конфигурациях, производительность компрессора около 130 л/мин и контрольная рабочая точка около n = 1000 об/мин. В системе координат каждого вращающегося выхода окружающий воздух действует как противоток со скоростью порядка $U_c \approx U_{orb}$. Таким образом, два выхода реализуют тот же процесс локальной остановки противотоком, что и конфигурация B, но многократно и симметрично по замкнутой орбите.

Экспериментальная конструкция, описанная в исходных записях, намеренно проста: S-образный вращающийся блок (трубка), две ленточные закручивающие вставки у концевых проходов, сжатый воздух, подаваемый через вращающееся соединение, и дым, вводимый для визуального контроля. Угол лопасти (ленты) закручивающей вставки составлял около 45°. Выполнены прогоны с диаметрами S-образного блока около 0,30 м и 0,50 м; вариант 0,30 м при 1000 об/мин является основным цифровым эталоном, используемым ниже. Эти данные сохраняются как сообщённая экспериментальная информация, а не как аттестованная метрология.

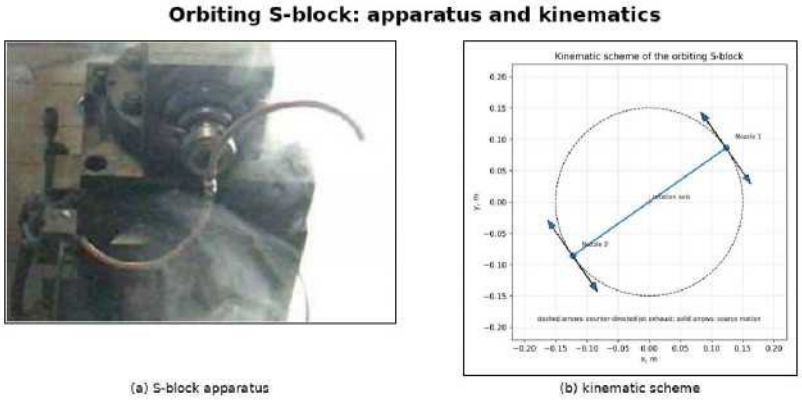


Рисунок 5. Орбитальное устройство S-образного типа: (а) фотография аппарата; (б) кинематическая схема, задающая геометрию расчёта.

Записи дымовой визуализации показывают плотное задымление вблизи вращающегося источника, признаки осевого уноса и локального разрежения, а также заметную для дыма кольцевую (тороидальную) область. Эти фотографии используются как записи организации трассера и положения видимой области течения. Они не рассматриваются как измерение скорости; поле скоростей остаётся задачей для PIV или эквивалентного метода.



Рисунок 6. Записи дымовой визуализации из испытаний S-образного блока: (а) нижняя подача, диффузное задымление; (б) повышенная подача, компактное задымление; (в) осевой унос; (г) тороидальный контур дыма.

4. Математический и размерный анализ

Если не указано иное, все численные оценки в этом разделе являются оценками порядка величины. Независимая калибровка основных входных данных в предварительной кампании не проводилась; по этой причине производные величины (Λ, D_eff, Re, q, dL_z/dt) определены с неопределённостью порядка 15–25 %, а для визуально оценённых величин — иногда и больше.

4.1. Рабочее окно из условия баланса противотока

Для S-образного блока диаметром D_S, вращающегося с частотой n об/мин, масштаб скорости противотока (скорости источника) равен

$$U_c = U_orb = \pi \cdot D_S \cdot n/60. \quad (6)$$

Подстановка в уравнение (1) даёт расчётное выражение

$$\Lambda = 60 \cdot U_j/(\pi \cdot D_S \cdot n). \quad (7)$$

Для заданного целевого Λ требуемая частота вращения составляет

$$n = 60 \cdot U_j/(\pi \cdot D_S \cdot \Lambda). \quad (8)$$

Таблица 2. Рабочие значения, получаемые из Λ = U_j/U_orb при U_j = 22 м/с.

D_S, м	n, об/мин	U_orb, м/с	Λ при U_j = 22 м/с	Интерпретация
0,30	500	7,85	2,80	преобладание струи; вне номинального диапазона
0,30	1000	15,7	1,40	внутри указанного диапазона
0,30	1500	23,6	0,93	у нижней границы
0,40	500	10,5	2,10	вне номинального диапазона
0,40	1000	20,9	1,05	близко к балансу
0,50	500	13,1	1,68	вблизи верхней границы
0,50	1000	26,2	0,84	преобладание противотока

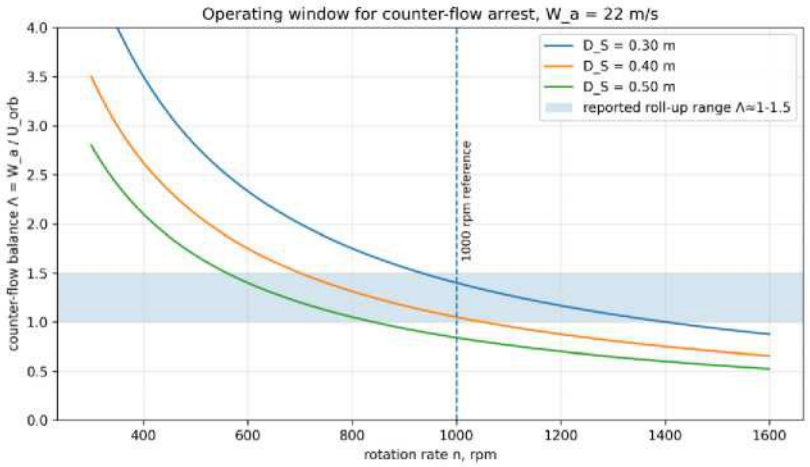


Рисунок 7. Вычисленное рабочее окно для коэффициента баланса противотока как функции скорости вращения и диаметра S-блока.

Для D_S = 0,30 м и U_j = 22 м/с указанный диапазон Λ = 1,0–1,5 соответствует n ≈ 930–1400 об/мин. Поэтому контрольный случай n = 1000 об/мин лежит внутри предварительного рабочего окна. Это правило проектирования полезно тем, что переводит качественную идею остановки противотоком в экспериментально регулируемую рабочую полосу: увеличение n или D_S повышает U_c и смещает систему к преобладанию противотока, тогда как увеличение U_j смещает её к проникновению струи.

Оценка U_c = U_orb предполагает, что окружающая среда неподвижна. На практике вращающийся S-образный блок может частично увлекать окружающий воздух в азимутальном направлении, уменьшая эффективный относительный противоток до U_c,eff = (1 − κ)·U_orb, где κ — коэффициент увлечения (захвата). В предварительной работе этот эффект количественно не определён. Если κ имеет порядок 0,2–0,4, эффективное значение Λ будет систематически больше геометрической оценки; это должно быть измерено на этапе проверки методом PIV.

4.2. Расход, эффективный диаметр и число Рейнольдса

Производительность компрессора, указанная в исходных записях, принимается как суммарная подача на два выхода:

$$Q_{total} = 130\ л/мин = 2{,}17\cdot10^{-3}\ м^3/с, \quad Q_s = Q_{total}/2 = 1{,}08\cdot10^{-3}\ м^3/с. \qquad (9)$$

При U_j ≈ 22 м/с соответствующие эффективная площадь и диаметр одного выхода равны

$$A_{eff} = Q_s/U_j \approx 4{,}9\cdot10^{-5}\ м^2, \quad D_{eff} = (4Q_s/(\pi\cdot U_j))^{(1/2)} \approx 7{,}9\ мм. \qquad (10)$$

Это по порядку величины соответствует сообщённому масштабу внутренней трубки (сопла) около 7–8 мм с учётом потерь, закупорки закручивающей вставки и неопределённости измерений. При $\nu \approx 1{,}5\cdot10^{-5}$ м²/с

$$Re = U_j\cdot D_{eff}/\nu \approx 1{,}2\cdot10^4. \qquad (11)$$

Следовательно, течение не ламинарно; следует ожидать турбулентного или переходного перемешивания.

Таблица 3. Проверка согласованности между расходом, диаметром выходного отверстия и осевой скоростью струи.

Величина	Формула	Оценка	Комментарий
Q_total	задано	$2{,}17\cdot10^{-3}$ м³/с	интерпретируется как суммарный расход компрессора
Q_s	Q_total/2	$1{,}08\cdot10^{-3}$ м³/с	один выход при симметричной подаче
D_eff	(4Q_s/(πU_j))^(1/2)	7,9 мм	соответствует масштабу 7–8 мм
Re	U_j·D_eff/ν	$\sim1{,}2\cdot10^4$	ожидается переходный режим или турбулентность

4.3. Модель видимости с временным перекрытием

Для двух выходов интервал повторения при n = 1000 об/мин составляет Δt_pass = 30/n = 0,030 с. Значение τ_d ≈ 0,10–0,20 с является эмпирической визуальной оценкой стойкости локального дымового следа по имеющимся записям; оно ещё не извлечено покадровым анализом видео. Поэтому оценка K несёт неуверенность не менее чем в два раза, но всё же полезна как предварительная проверка того, могут ли последовательные проходы визуально перекрываться.

$$I(\Delta t_{pass})/I_0 = \exp(-\Delta t_{pass}/\tau_d) = \exp(-1/K). \qquad (12)$$

При K = 3,3–6,7 остаточная интенсивность метки перед следующим проходом составляет около 74–86 %. Это не доказывает замкнутость поля скоростей, но количественно объясняет, почему

дискретные следы от источника могут визуально сливаться в непрерывную кольцевую структуру дыма. Экспоненциальная модель является лишь удобной аппроксимацией видимости; в программе верификации требуется непосредственное извлечение τ_d по видео с временными метками.

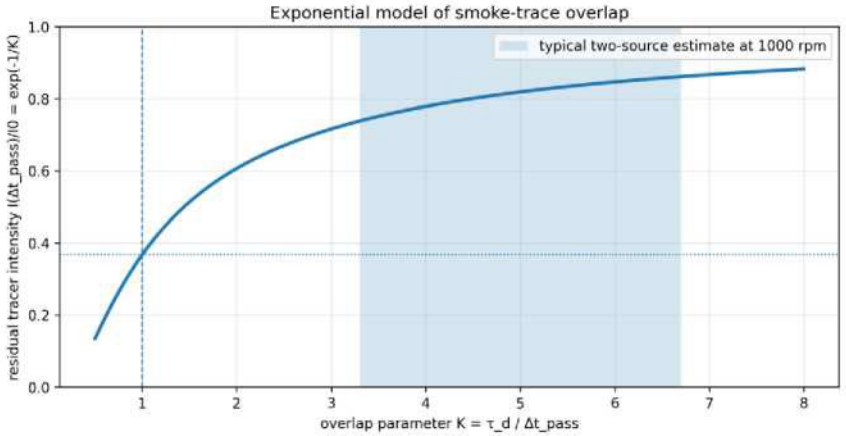


Рисунок 8. Экспоненциальная модель перекрытия дымовых следов. В эталонном режиме большая часть локального сигнала трассера сохраняется до следующего прохода источника.

4.4. Динамическое давление, тепловая шкала, тяга и мощность

Для D_S = 0,30 м и n = 1000 об/мин U_orb = 15,7 м/с. Орбитальный и струйный масштабы динамического давления:

$$q_{orb} = \tfrac{1}{2}\cdot\rho\cdot U_{orb}^2 \approx 0{,}5\cdot 1{,}2\cdot 15{,}7^2 \approx 1{,}5\cdot 10^2\ \text{Па}, \quad (13)$$

$$q_j = \tfrac{1}{2}\cdot\rho\cdot U_j^2 \approx 0{,}5\cdot 1{,}2\cdot 22^2 \approx 2{,}9\cdot 10^2\ \text{Па}. \quad (14)$$

Таким образом, характерная величина пониженного давления, ожидаемая от течения, имеет порядок 10^2 Па. Соответствующий изоэнтропический масштаб температурного перепада малого давления

$$\Delta T_{ad} \approx T\cdot[(\gamma-1)/\gamma]\cdot(\Delta p/p_0) \approx 0{,}1\text{–}0{,}3\ \text{K при}\ \Delta p \approx 150\text{–}300\ \text{Па}. \quad (15)$$

Это меньше точечных тепловых индикаторов порядка одного градуса, поэтому одного адиабатического изменения давления недостаточно. Унос, смешивание, локальная рециркуляция, температура подаваемого воздуха и влияние зонда должны измеряться непосредственно.

Приближённая тяга одного выхода и масштаб подвода углового момента для случая D_S = 0,30 м:

$$F_s \approx \rho\cdot Q_s\cdot U_j \approx 0{,}029\ \text{Н}, \quad (16)$$

$$dL_z/dt \approx \rho\cdot Q_{total}\cdot U_j\cdot R \approx 8{,}6\cdot 10^{-3}\ \text{Н·м}. \quad (17)$$

Масштаб кинетической мощности двух струй:

$$dE_{kin}/dt \approx \tfrac{1}{2}\cdot\rho\cdot Q_{total}\cdot U_j^2 \approx 0{,}63\ \text{Вт}. \quad (18)$$

Таблица 4. Масштабы порядка величины, полученные из сообщённых рабочих данных (D_S = 0,30 м).

Масштаб	Выражение	Оценка при D_S = 0,30 м	Смысл
q_orb	½·ρ·U_orb²	~150 Па	масштаб давления, связанный с орбитальным движением
q_j	½·ρ·U_j²	~290 Па	масштаб динамического давления струи
ΔT_ad	T·((γ−1)/γ)·(Δp/p₀)	~0,1–0,3 К	изоэнтропический температурный масштаб малого перепада давления
F_s	ρ·Q_s·U_j	~0,029 Н	масштаб тяги одного выхода
dL_z/dt	ρ·Q_total·U_j·R	~8,6·10⁻³ Н·м	масштаб подвода углового момента
dE_kin/dt	½·ρ·Q_total·U_j²	~0,63 Вт	масштаб кинетической мощности (реактивной тяги)

4.5. Отличие от классического числа формирования вихревого кольца

Классическое импульсное вихревое кольцо обычно обсуждается через конечное отношение хода L/D. S-образный блок не работает с одним конечным ходом. Полезным сравнением является длина пути источника между проходами через фиксированный азимут:

$$L_{pass} = U_{orb}\cdot\Delta t_{pass} = \pi\cdot R. \quad (19)$$

Поэтому для R = 0,15 м и D_eff = 7,9 мм

$$L_{pass}/D_{eff} = \pi\cdot R/D_{eff} \approx 60, \quad (20)$$

что значительно превышает классический масштаб числа формирования L/D ≈ 4. Это подтверждает интерпретацию, что S-образный блок не является обычным импульсным генератором вихревых колец, а представляет собой непрерывную орбитальную систему повторного возбуждения.

4.6. Оценка спирального сжатия и тороидального объёма

Простая кинематическая модель закрученной струи в противотоке связывает шаг спиральной траектории с остаточной осевой скоростью. При U_res = U_j − U_c и S = U_φ/U_j нормированный шаг равен

$$p/(2\pi\cdot r_s) \sim (U_j - U_c)/U_\varphi = (\Lambda - 1)/(S\cdot\Lambda). \quad (21)$$

При приближении Λ к единице осевой шаг стремится к нулю, что соответствует визуальному сжатию спиральной структуры в кольцевой вихрь.

Уравнение (21) является чисто кинематическим масштабным аргументом. При Re порядка 10^4 турбулентная дисперсия спирального следа может конкурировать с геометрическим сжатием шага или преобладать над ним на достаточно большом расстоянии вниз по потоку; эти два механизма должны разделяться экспериментально — извлечением основной гармоники по изображению и измерениями поля скоростей.

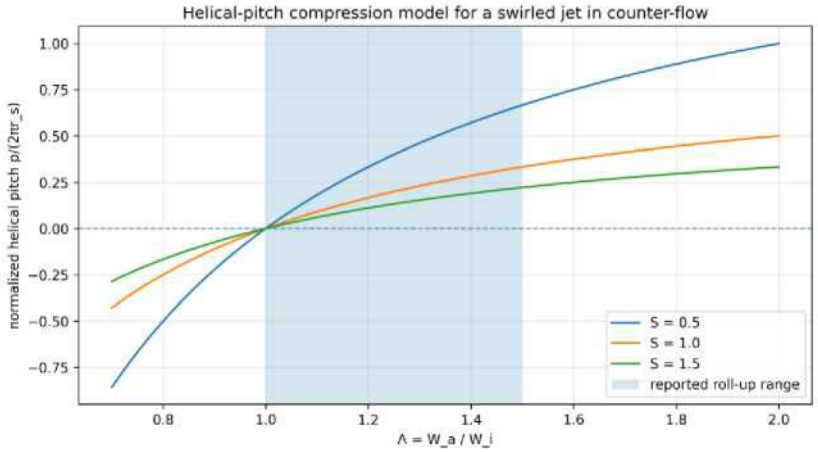


Рисунок 9. Модель спирального сжатия шага. Модель предсказывает уменьшение осевого шага при приближении Λ к единице.

Если организованная дымом область представляется идеальным тором с большим радиусом R_T и малым радиусом a_T,

$$V_T = 2\pi^2 \cdot R_T \cdot a_T^2. \quad (22)$$

Для R_T = 0,15 м и a_T = 0,03 м объём составляет около $2{,}7 \cdot 10^{-3}$ м³. Заключённая в нём масса воздуха около $3{,}2 \cdot 10^{-3}$ кг; нагрев этой массы на 2 К потребовал бы около 6 Дж. Эта величина находится в пределах оценки кинетической мощности струй, хотя и не доказывает, что измеренная точечная температура представляет собой среднюю температуру тороидального объёма.

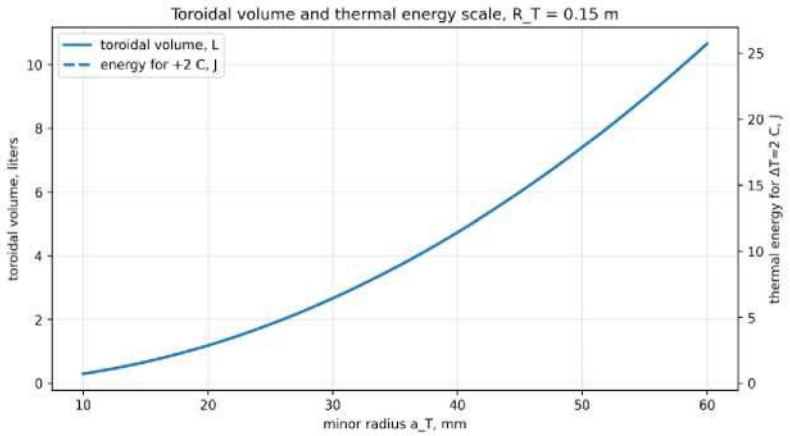


Рисунок 10. Оценка тороидального объёма и тепловой энергии для идеализированной тороидальной области дыма (R_T = 0,15 м).

5. Наблюдения и шесть подпроцессов

5.1. Тороидальная организация при визуализации дымом

Изображения S-образного блока с дымом показывают локализованную кольцевую (тороидальную) область трассера во время работы. Такая организация называется здесь вихретороидообразной, поскольку видимый трассер образует замкнутую кольцевую область вокруг оси вращения и сохраняется, пока ротор работает. Слово «тороид» относится здесь к наблюдаемой геометрии области, организованной дымом, и к предлагаемой топологии рециркуляции, которая должна быть измерена непосредственно на следующем экспериментальном этапе.

Эта последовательность даёт физически конкретную интерпретацию фотографий. Плотный дым у движущихся выходов соответствует прямому истечению струй и перемешиванию в ближней зоне. Дым, втягиваемый в центральную область, интерпретируется как осевой унос, связанный с ядром пониженного давления. Дым, сконцентрированный вблизи орбиты, интерпретируется как кольцевая рециркулирующая или многократно повторно возбуждаемая область трассера. Эти интерпретации остаются предварительными до измерения полей скорости и давления, но они точно указывают, какие будущие измерения должны их проверить.

В предлагаемой интерпретации дым не обозначает единственный струйный след. Он маркирует несколько связанных зон: прямые выходные струи, локальное сворачивание при взаимодействии с противотоком у каждого движущегося источника, направленный внутрь осевой подсос окружающего воздуха и кольцевую область, где повторяющиеся проходы перекрываются. Фотографии наиболее информативны при чтении совместно с кинематическими числами раздела 4, поскольку сами снимки не дают масштаба скорости.

Сравнение различных состояний распределения дыма позволяет предположить, что структура может становиться более компактной и более резко ограниченной при более сильном видимом воздействии. Это подтверждает интерпретацию, согласно которой кольцевая область управляется интенсивностью воздействия, а не является случайной суперпозицией несвязанных дымовых следов. В физических терминах увеличение подачи струи повышает поток импульса и вихревую инжекцию, что должно усиливать баланс между внутренним уносом, радиальным перераспределением и азимутальной циркуляцией.

5.2. Точечные тепловые данные и скорректированная интерпретация

В первичных записях сообщается об атмосферном (неподвижном) воздухе около 21 °C, центральном охлаждении около −1 °C, нагреве тороидальной кольцевой области примерно на +2 °C и локальных зонах с максимальной температурой около 23 °C. В настоящем препринте 23 °C рассматривается как абсолютная местная температура, а не как +23 °C выше температуры окружающей среды. Тепловые наблюдения являются точечными и не устанавливают термодинамического разделения.

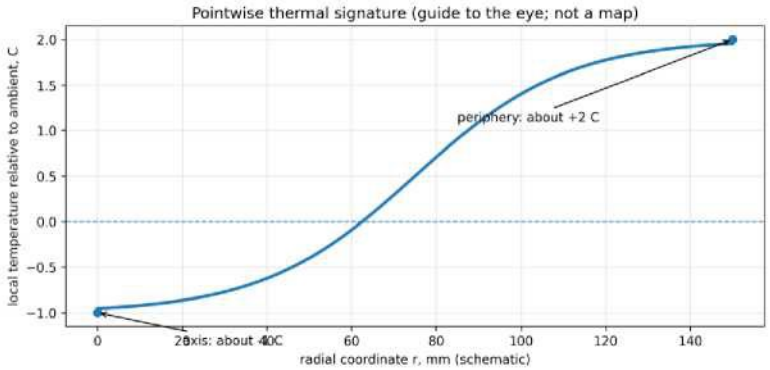


Рисунок 11. Реконструированная точечная тепловая сигнатура. Кривая служит направляющей для глаза и не является разрешённым температурным полем.

5.3. Шесть связанных подпроцессов

Шесть подпроцессов используются как концептуальная декомпозиция наблюдаемого поля течения. Имеющиеся данные по дыму и точечной температуре не позволяют независимо идентифицировать все шесть механизмов. В частности, P1–P2 и P4–P5 могут быть сопряжёнными проявлениями одной и той же основной организации течения. Тем не менее декомпозиция полезна, поскольку разделяет физические роли, подлежащие измерению в программе проверки.

P1 — осевой унос: перенос окружающего воздуха внутрь, к оси вращения и плоскости ротора. P2 — центральная зона пониженного давления: поле давления, которое, как ожидается, вызывает этот унос. P3 — вихревая инжекция с противоположным вращением: механический подвод на двух выходах, обеспечивающий осевой импульс, азимутальный импульс и локальную турбулентность. P4 — тороидальная рециркуляция: предполагаемая крупномасштабная замкнутая или почти замкнутая меридиональная циркуляция вокруг оси вращения. P5 — локальные вихревые воронки: более мелкие концентрированные вращающиеся структуры, встроенные в области уноса и ближней зоны. P6 — глобальный баланс форсирования: совместное условие $P_{net} \approx 0$, $dL_z/dt \neq 0$ и $K > 1$, обеспечивающее локализацию и поддержание структуры в открытой атмосфере.

В такой формулировке вихревой тороид не рассматривается как единый изолированный объект, внезапно созданный одним импульсом. Он рассматривается как поддерживаемое состояние, возникающее в результате одновременного захвата массы, инжекции реактивного импульса, удержания вихря, турбулентного перемешивания и повторного орбитального воздействия. Такая формулировка сохраняет основное физическое требование, сохраняя при этом предварительный статус доказательности.

Таблица 5. Шесть связанных подпроцессов, предлагаемых для наблюдаемого течения; для каждого указано необходимое независимое подтверждение.

Процесс	**Область**	**Наблюдаемое проявление**	**Необходимое подтверждение**
P1 — осевой унос	центральная ось выше/ниже ротора	дым втягивается к оси	PIV или отслеживание дыма

P2 — центральная зона пониженного давления	вертикальная область вблизи оси вращения	признаки разрежения и уноса	измерение перепада давления
P3 — вихревая инжекция противовращения	два движущихся выхода	истечение закрученной струи, сохранение управляемости	азимутальная скорость и число крутки S
P4 — тороидальная рециркуляция	кольцевая область на радиусе ~R	организованный дымом тороидальный контур	меридиональные замкнутые линии тока по PIV
P5 — локальные вихревые воронки	вблизи движущихся закручивателей и области уноса	локальные нагретые зоны до ~23 °C абс.	быстродействующая термометрия и градиенты скорости
P6 — глобальный баланс форсирования	всё течение	малый дрейф и кольцевая локализация	баланс сил, импульса и энергии

6. Новизна, классификация и научный вклад

Предлагаемый метод не представлен как завершённый новый гидродинамический закон. Новизна метода заключается в объединении известных элементов в экспериментальную конфигурацию, не обнаруженную в рассмотренных здесь источниках: остановка закрученной струи противотоком, орбитальное повторение двухвыходным S-образным блоком, приближённая компенсация горизонтального линейного импульса, конечный подвод момента импульса и временное перекрытие последовательных следов.

Сравнение с устоявшимися методами в основном количественное. Импульсный генератор вихревого кольца управляется конечным ходом и масштабом числа формирования $L/D \approx 4$; S-образный блок даёт $L_{pass}/D_{eff} \approx 60$ между двумя последовательными проходами и работает за счёт непрерывного повторного возбуждения, а не одиночного импульса. Замкнутые вихревые устройства локализуют рециркуляцию стенками, тогда как здесь локализация достигается в открытой атмосфере за счёт симметрии импульса и периодического форсирования. Всплывающие шлейфы и синтетические струи имеют общие отдельные признаки, но их движущие механизмы и результирующие структуры различны. Таблица 6 суммирует эти различия, не рассматривая предложенную классификацию как устоявшуюся.

Наиболее близкий концептуальный аналог среди цитируемых работ — концепция захваченного вихревого кольца Тесаржа [10], где стационарная тороидальная рециркуляция поддерживается в полости кольцевой струйной инжекцией. Настоящий способ отличается механизмом локализации: геометрическое удержание стенкой заменяется динамическим орбитальным форсированием и фиксацией симметрии импульса в открытой атмосфере. Это сравнение важно, поскольку отделяет предлагаемый режим-кандидат от конфигураций с захваченным вихрем, поддерживаемых стенкой.

Таблица 6. Консервативная классификация предлагаемого способа относительно известных режимов генерации вихревых тороидов.

Свойство	**Импульсное вихревое кольцо**	**Замкнутая вихревая рециркуляция**	**Всплывающий тороидальный шлейф**	**Настоящий метод-кандидат**
Способ генерации	конечный ход	устойчивая закрутка, ограниченная стенкой	событие тепловыделения	устойчивое орбитальное противоточное форсирование
Локализация	не локализовано; удаляется от генератора	стенками/камерой	поднимается вместе со шлейфом	за счёт $P_{net} \approx 0$ и $K > 1$
Открытая атмосфера	да, но кратковременно	нет	да, но за счёт плавучести/подъёма	да, локализовано при подтверждении
Определяющий критерий	$L/D \approx 4$	геометрия + закрутка	поток плавучести	$\Lambda \approx 1–1{,}5$; $K > 1$; $P_{net} \approx 0$; $dL_z/dt \neq 0$
Текущий статус	установлен	установлен	установлен	предварительный режим-кандидат

7. Программа верификации

Настоящая статья устанавливает концепцию способа и предварительную демонстрацию визуализации дымом. Следующий этап практический: он должен превратить визуальный результат в воспроизводимое измерение. Последовательность измерений приведена в таблице 7. Первый приоритет — не CFD, а прямой эксперимент: PIV или другой метод измерения поля скорости, измерение давления на оси, калиброванное измерение расхода и повторные прогоны в одной и той же рабочей точке.

Часть шагов таблицы 7 требует оборудования, выходящего за рамки данной предварительной установки. Это сделано намеренно. Таблица разделяет измерения, которые можно выполнить с относительно простыми дополнениями (калибровка давления и расхода), и измерения, требующие сотрудничества с лабораторией, оснащённой для PIV, термографии или CFD. Это различие существенно для планирования следующего этапа работы.

Таблица 7. Программа верификации, необходимая для превращения предварительной методики в количественно аттестованную.

Код	**Задача проверки**	**Цель / критерий приемлемости**
M1	PIV с временным разрешением	доказать или опровергнуть замкнутую

	или стерео-PIV в меридиональной плоскости	рециркуляционную топологию; измерить R_T, a_T и Γ_T
M2	прямое измерение давления на оси вращения	проверить прогнозируемое $\Delta p = O(10^2$ Па) и его масштабирование по U_{orb}^2
M3	статистическая воспроизводимость, $N \geq 20$ прогонов	определить вероятность формирования тороида и разброс от прогона к прогону
M4	многоточечная термометрия / инфракрасная термография	построить тепловое поле; разделить смешивание, влияние зонда и локальную диссипацию
M5	шлирен-метод или Шлирен с фоновым ориентиром (BOS)	визуализация градиентов плотности и признаков сжимаемости струи
M6	развёртка параметров по Λ, K, S, D_S, n и расходу	определить пороговые значения формирования и устойчивости
M7	контрольные случаи: без закрутки, один источник, неподвижные источники, обратное вращение	выделить, какие элементы необходимы
M8	аналитическая модель условий $\Lambda \approx 1–1{,}5$ и анализ устойчивости	получить прогностические критерии и проверить устойчивость
M9	URANS/LES CFD и замыкание энергетического баланса	сопоставить измеренные поля скорости, давления и температуры с моделированием и энергетическим балансом

Дорожная карта верификации: от предварительной визуализации дымом к количественной аттестации методики. Позиции M1–M5 задают экспериментальные требования (поле скоростей PIV, осевое давление, повторяемость, тепловая карта, карта режимов); позиции M6–M9 дают прогностическую модель, оценку устойчивости, моделирование и замыкание энергетического баланса.

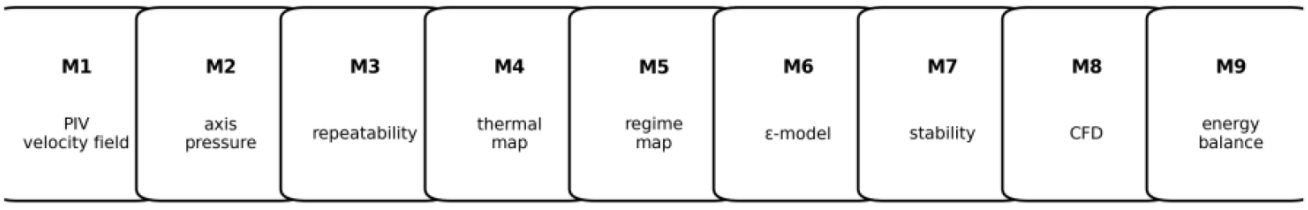


Рисунок 12. План верификации: от качественной визуализации к количественной аттестации метода.

8. Ограничения

- Фотографии фиксируют организацию дыма и видимую устойчивость структуры, но сами по себе не дают векторов скорости.
- Термин «вихревой тороид» остаётся интерпретацией до тех пор, пока PIV или эквивалентный метод не покажет замкнутую меридиональную рециркуляцию и ненулевую циркуляцию.
- Имеются только точечные температурные данные. Они полезны как первый признак осевого охлаждения и периферийного нагрева, но не являются температурным полем и не устанавливают термодинамического разделения.
- Зарегистрированная местная температура около 23 °C используется как абсолютное местное значение, а не как +23 °C выше температуры окружающей среды.
- Расход, эффективная площадь выхода, давление в сопле и число крутки S по-прежнему требуют калибровки.
- Интервал $\Lambda \approx 1{,}0–1{,}5$ является эмпирическим рабочим интервалом из настоящих записей и должен проверяться систематической развёрткой параметров.
- Классификация в качестве кандидата отдельного режима зависит от будущей проверки и независимого воспроизведения.
- Обозначения U_j (осевая скорость струи) и U_c (скорость противотока/источника) используются по всей работе; это соглашение должно сохраняться при сравнениях, чтобы Λ не был инвертирован.
- Увлечение окружающего воздуха вращающимся S-образным блоком не измерялось, поэтому эффективный противоток может отличаться от геометрического значения U_orb.
- Время стойкости τ_d оценивалось визуально по записям дыма. В следующей версии оно должно извлекаться по разрешённой во времени интенсивности изображения.
- Декомпозиция P1–P6 является рабочим описанием течения. Имеющиеся данные пока не доказывают, что все шесть подпроцессов независимо разделимы.

Замечание о самом слабом звене. Среди использованных выше величин наибольшую индивидуальную неопределённость несёт время стойкости τ_d. Оно оценено на глаз по записям дыма, полученным при нелабораторном освещении, и это, безусловно, самый слабый входной параметр всего расчёта. В следующей кампании планируется извлекать τ_d непосредственно по видео с временными метками с помощью простого порога интенсивности в фиксированной области изображения; до выполнения этого измерения значение K следует читать как величину порядка двух, а не как калиброванное число.

9. Выводы

Из экспериментального материала и размерных расчётов следует предварительный вывод: орбитальный S-образный блок можно интерпретировать как устройство, которое повторяет и замыкает локальную остановку закрученных струй противотоком.

Четыре центральных математических условия метода: $\Lambda = U_j/U_c = O(1)$, $K = \tau_d/\Delta t_{pass} > 1$, $P_{net} \approx 0$ и $dL_z/dt \neq 0$. В совокупности эти условия отличают S-образный блок от классического генератора вихревых колец с конечным ходом. S-образный блок точнее описывается как устройство непрерывного орбитального повторного возбуждения, в котором локальная остановка противотоком повторяется по замкнутой траектории.

Размерные расчёты показывают внутреннюю согласованность между указанным расходом компрессора, эффективным диаметром выхода и осевой скоростью. Они дают Re порядка 10^4, динамическое давление порядка 10^2 Па, угловой момент порядка 10^{-2} Н·м и масштаб кинетической мощности (реактивной тяги) порядка 1 Вт.

Способ следует описывать как предварительный метод-кандидат для формирования вихревого тороида в открытой атмосфере путём остановки противотоком и орбитального поддержания закрученных струй. Полное научное обоснование требует программы проверки M1–M9, в особенности PIV, измерений давления, термического картирования, калибровки массового расхода, картирования режимов и независимой воспроизводимости.

Список литературы

[1] P. G. Saffman. Vortex Dynamics. Cambridge University Press, Cambridge, 1992.

[2] H. J. Lugt. Vortex Flow in Nature and Technology. Wiley, New York, 1983.

[3] T. T. Lim, T. B. Nickels. Vortex rings. В сб.: Fluid Vortices, ed. S. I. Green. Kluwer, Dordrecht, 1995, pp. 95–153.

[4] K. Shariff, A. Leonard. Vortex rings. Annual Review of Fluid Mechanics, 24, 235–279 (1992).

[5] A. K. Gupta, D. G. Lilley, N. Syred. Swirl Flows. Abacus Press, Tunbridge Wells, 1984.

[6] G. K. Batchelor. An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge University Press, Cambridge, 1967.

[7] A. Glezer. The formation of vortex rings. Physics of Fluids, 31, 3532–3542 (1988).

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

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

[10] V. Tesař. Trapped vortex rings: a review and an open problem of hydrodynamics. Sensors and Actuators A, 183, 137–144 (2012).

[11] N. Syred. A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems. Progress in Energy and Combustion Science, 32, 93–161 (2006).

[12] O. Lucca-Negro, T. O'Doherty. Vortex breakdown: a review. Progress in Energy and Combustion Science, 27, 431–481 (2001).

[13] K. Mahesh. The interaction of jets with crossflow. Annual Review of Fluid Mechanics, 45, 379–407 (2013).

[14] S. B. Pope. Turbulent Flows. Cambridge University Press, Cambridge, 2000.

[15] S. Eiamsa-ard, P. Promvonge. Review of Ranque–Hilsch effects in vortex tubes. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12, 1822–1842 (2008).