Механический спирально-фазовый преобразователь
Часть I

Геометрический принцип детерминированного управления бегущими граничными условиями, спиральной фокусировки и вихревых потоков

Хаустов Владимир Игоревич

ORCID: 0009-0007-3657-2309

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

Лицензия: CC BY 4.0

DOI: 10.5281/zenodo.20237780

Дата публикации: 16 мая 2026 года

Научно-технический перевод с английского языка.

Редакция, адаптированная для русскоязычного инженера-исследователя.

Оригинал: Khaustov. V. Mechanical Spiral-Phased Transducer (MSPT). Part I: A Geometric Principle for Deterministic Control of Travelling Boundary Conditions, Wave Forcing and Vortical Flows. https://doi.org/10.5281/zenodo.20237780

Аннотация

Препринт представляет механический спирально-фазовый преобразователь (МСФП; MSPT) — предлагаемый класс механических устройств для детерминированного программирования бегущих граничных условий в жидкостях и газах. Принцип основан на геометрической суперпозиции двух периодических семейств поверхностей: спиральной (для диска) или винтовой (для цилиндра) последовательности апертур на одном движущемся элементе и семейства наклонных затворов конечной ширины на втором, относительно движущемся элементе. Их мгновенные совпадения образуют движущийся набор открытых отверстий. Этот набор накладывает на рабочее тело подвижное граничное условие: местное открытие, перепад давления, впрыск массы, возмущение плотности, акустическую фокусировку или источник завихрённости — в зависимости от окружающей камеры и режима работы.

Центральный научный результат — кинематика: скорость движения картины совпадений не ограничена величиной, равной скорости поверхности материала ротора. Это фазовая скорость, определяемая геометрией, шагом и частотой вращения. Поэтому в работе различаются три скорости, которые нельзя смешивать: скорость материала вращающейся поверхности, спроецированная радиальная или осевая скорость развёртки и полная фазовая скорость по координате последовательности апертур (спирали или винтовой линии). Это различие вводится явно, чтобы исключить распространённое, но неверное толкование, будто быстрая фазовая картина подразумевает сверхсветовой, сверхзвуковой (суперакустический) или непричинный перенос вещества либо энергии.

Статья содержит геометрию, кинематику в замкнутой форме, уточнённые соотношения масштабирования, численные проверки согласованности, волновые и вихревые режимы и программу проверки. Области применения представлены как фальсифицируемые гипотезы, а не как продемонстрированные характеристики. Предлагаемый потенциал включает детерминированный вихревой впрыск, широкополосное сквозное акустическое воздействие, контролируемые кавитационные исследования, внешне вынужденные моды типа Ранке–Хильша, сонохимию, интенсификацию смешивания, исследование инициирования горения и предварительную подготовку плазмы или ударных волн. Заявленная новизна состоит не в нарушении устоявшейся физики, а в механической реализации геометрического фазового программирования в апертурной системе с протоком массы.

Ключевые слова: механическая фазированная решётка; спиральная апертура; вращающийся затвор; бегущие граничные условия; фазовая скорость; вихревое управление; сквозное акустическое воздействие; геометрия Ранке–Хильша; кавитация; сонохимия.

Оглавление

Аннотация 2
1. Введение 4
1.1. Мотивация 4
1.2. Что нового 4
1.3. Область применения препринта 5
2. Определения и пояснения для научного рецензирования 5
2.1. Картина движения является граничным условием, а не материальным объектом 5
2.2. Отсутствие притязаний на перенос энергии со скоростью фазовой картины 5
2.3. Три скорости должны быть разделены 5
2.4. Экспериментальный статус 6
3. Сопутствующие работы и концептуальное позиционирование 6
3.1. Роторно-импульсные устройства и механические сирены 6
3.2. Электронно-управляемые фазированные решётки 6
3.3. Самоорганизующиеся волновые, детонационные и вихревые трубы 6
3.4. Кинематические прецеденты 6
4. Геометрический принцип и вывод кинематики 7
4.1. Общая геометрия 7
4.2. Масштаб времени 7
4.3. Спроецированная скорость и скорость по криволинейной координате 7
4.4. Частоты следования 7
5. Дисковая конфигурация (МСФП-D) 8
5.1. Геометрия прототипа 8
5.2. Кинематика диска 9
5.3. Масштабирование 10
6. Цилиндрическая конфигурация (МСФП-C) 11
6.1. Геометрия прототипа 11
6.2. Цилиндрическая кинематика 12
6.3. Масштабирование 13
7. Численная проверка согласованности 14
8. Волновые режимы, режимы течения и завихрённости, обеспечиваемые геометрией 15
8.1. Состояния радиально перемещающихся апертур в МСФП-D 15
8.2. Состояния осевого перемещения в МСФП-C 15
8.3. Спиральная фокусировка 15
8.4. Конфигурации со встречным распространением и картиной биений 15
9. Гипотезы применения и технологический потенциал 16
9.1. Детерминированное управление вихрями и закруткой 16
9.2. Впрыск в режиме Ранке–Хильша 16
9.3. Широкополосное сквозное акустическое воздействие 16
9.4. Исследования кавитации и водоподготовки 17
9.5. Проточная сонохимия 17
9.6. Интенсификация смешивания 17
9.7. Исследование инициирования горения и детонации 17
9.8. Предварительная подготовка плазмы и ударных волн 17
10. Программа экспериментальной валидации 18
11. Обсуждение 19
11.1. Почему принцип физически непротиворечив 19
11.2. От чего зависит практический верхний предел 19
11.3. Почему концепция важна для вихревых течений 19
11.4. Ограничения настоящей работы 19
12. Выводы 20
Литература 20

1. Введение

1.1. Мотивация

Многие технологии требуют управляемого энергетического воздействия на рабочую среду: акустического возбуждения, вихреобразования, смешивания, кавитации, инициирования детонации, управления потоком и организации цилиндрических вихревых процессов. Существующие устройства обычно обеспечивают либо высокую энергию без детерминированного управления фазой, либо точное управление фазой без значительного массового расхода. Механические вращающиеся импульсные устройства способны пропускать массу, но их фазовая геометрия, как правило, проста. Электронные фазированные решётки позволяют программировать фазу, но не являются проточными апертурными системами. Самоорганизующиеся вихревые и детонационные системы генерируют высокоэнергетические структуры, однако фазовая картина в них выбирается нелинейной динамикой, а не задаётся прямым внешним проектированием.

МСФП устраняет этот разрыв, кодируя фазу непосредственно в геометрию. Поверхности не просто периодически открываются и закрываются — они создают пространственно распределённую воспроизводимую последовательность совпадений апертур. В жидкостном или газовом устройстве эти совпадения действуют как бегущие граничные условия. Именно поэтому предлагаемый механизм относится не только к генерации волн, но и к управлению состояниями вихревого и закрученного течения.

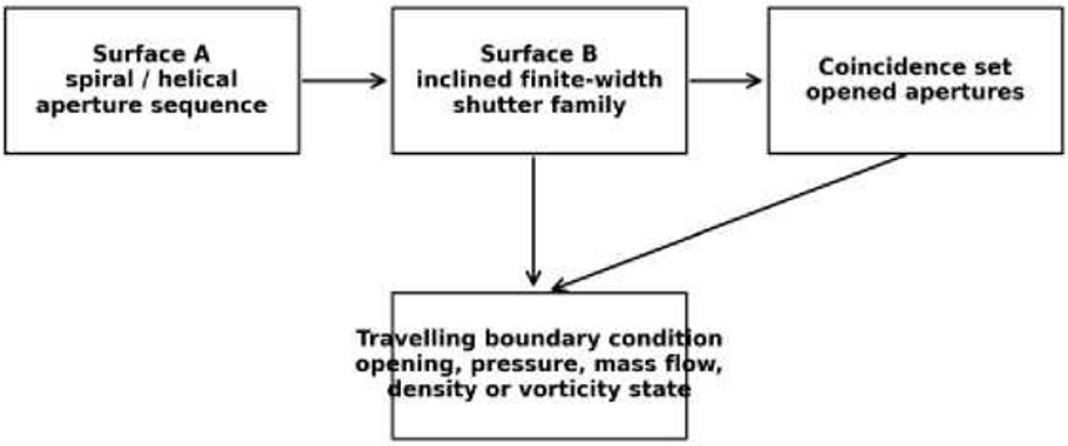


Рисунок 1. Принцип МСФП. Изображение движущихся отверстий является запрограммированным состоянием граничных условий, а не движущимся материальным телом.

1.2. Что нового

- Фазовая картина программируется геометрически — взаимным расположением семейства спиральных (винтовых) диафрагм и семейства наклонных затворов.
- Картина может перемещаться по радиальной, осевой, спиральной или винтовой координате быстрее, чем поверхность материала вращающихся деталей.

- Одна и та же конструкция может использоваться как импульсный проточный клапан, механический фазированный источник, вихревой инжектор либо проточная акустическая форсирующая ступень.
- Конструкция разделяет три величины, обычно жёстко связанные в механических излучателях: массовый расход, частоту повторения и скорость движущейся фазы.
- Концепция совместима с обычной механикой, поскольку быстрая величина является фазовой картиной граничных условий, а не скоростью переноса вещества или энергии.

1.3. Область применения препринта

Препринт устанавливает геометрию и кинематику. Он не утверждает, что предложенные применения уже экспериментально продемонстрированы. В нём приводятся уточнённые уравнения, числовые значения в масштабе прототипа, следствия для проектирования и программа экспериментальной проверки. Поэтому разделы о применениях записаны как гипотезы и измеримые цели.

2. Определения и пояснения для научного рецензирования

Поскольку принцип МСФП способен порождать высокие кажущиеся скорости движения картины отверстий, вероятны несколько концептуальных недоразумений. Приведённые ниже разъяснения являются частью теории, а не постфактум-оговорками.

2.1. Картина движения является граничным условием, а не материальным объектом

Набор совпадений не переносит твёрдую частицу от одной апертуры к следующей. Каждая апертура открывается локально, когда это допускает геометрия. Движущийся объект — это состояние границы: открыто или закрыто, с локальным откликом давления и расхода. В акустике, оптике и физике волн это фазовая картина. Фазовые картины могут двигаться быстрее материальных элементов, не нарушая причинности.

2.2. Отсутствие притязаний на перенос энергии со скоростью фазовой картины

Локальный массовый расход через отверстие определяется локальной разностью давлений, площадью отверстия, коэффициентом расхода, свойствами жидкости и временем воздействия. Фазовая скорость последовательности размыканий сама по себе не определяет поток энергии. Энергия и импульс переносятся средой в соответствии с динамикой жидкости и акустикой; МСФП задаёт только закон пространственно-временного воздействия.

2.3. Три скорости должны быть разделены

$$v_m = 2\pi R \cdot f, \quad (1)$$

$$v_\xi = (\xi_2 - \xi_1)/\Delta t, \quad (2)$$

$$v_c = L_c/\Delta t, \quad (3)$$

Здесь v_m — поверхностная скорость материала, v_ξ — спроецированная скорость развёртки вдоль радиальной или осевой расчётной координаты, v_c — фазовая скорость вдоль полной

координаты последовательности апертур. Только v_m является скоростью частиц материала; две другие — скорости заданного состояния.

2.4. Экспериментальный статус

Детерминированная геометрия и кинематические расчёты установлены в настоящем препринте. Здесь не установлены уровень акустического выхода, амплитуда давления, интенсивность кавитации, химический выход, характеристики горения, устойчивость вихря и температурное разделение — для них требуются экспериментальные прототипы. Тем самым статья избегает представления технологических гипотез в качестве проверенных результатов.

3. Сопутствующие работы и концептуальное позиционирование

3.1. Роторно-импульсные устройства и механические сирены

Вращающиеся диски с отверстиями, механические сирены и роторно-импульсные устройства создают периодические прерывания потока. Они могут быть мощными и механически простыми, но их фазовые диаграммы, как правило, имеют угловую, повторяющуюся структуру. МСФП отличается тем, что использует спиральную или винтовую координату апертуры в качестве расчётной траектории фазы. Поэтому открытое множество является не просто периодическим по углу — это состояние перемещающейся координаты.

3.2. Электронно-управляемые фазированные решётки

Электронные фазированные решётки обеспечивают превосходное управление фазой, диаграммой и фокусировкой. Однако отдельные элементы обычно не работают как высокорасходные отверстия. МСФП можно интерпретировать как механическую фазированную апертурную решётку, в которой фазовые задержки «вписаны» в геометрию механически, а не накладываются электронной синхронизацией.

3.3. Самоорганизующиеся волновые, детонационные и вихревые трубы

Вращающаяся детонация, неустойчивость закрутки и вихревые трубы Ранке–Хильша показывают, что цилиндрические камеры способны поддерживать энергоёмкие движущиеся или вихревые состояния. В таких системах фазовая структура в значительной степени выбирается самостоятельно, нелинейной динамикой. МСФП-С позиционируется как внешняя форсирующая геометрия, способная накладывать заданные осевые и азимутальные граничные условия на цилиндрический объём.

3.4. Кинематические прецеденты

Эффект бегущего луча (эффект «прожектора»), движущиеся интерференционные картины и фазовая скорость волны показывают, что кажущаяся картина может двигаться быстрее физических носителей, которые её создают. МСФП относится к этому кинематическому классу, но реализует его механическими отверстиями и граничными условиями с протоком массы. Его новизна носит инженерно-геометрический характер и не является противоречием устоявшейся физике.

4. Геометрический принцип и вывод кинематики

4.1. Общая геометрия

Пусть поверхность A несёт отверстия, индексируемые координатой s вдоль кривой, а поверхность B несёт N_s наклонных заслонок. Центры апертур расположены по спирали или винтовой линии. Каждый затвор изменяет свою угловую координату на один шаг диафрагмы, когда охватывает поперечный интервал координат. Тогда относительный угол поворота θ определяет, какие центры апертур попадают в полосы затворов.

$$\Delta\varphi = 2\pi/N_s, \quad (4)$$

$$\varphi_sh(\xi; k, \theta) = k\cdot\Delta\varphi + \theta - \Delta\varphi\cdot(\xi - \xi_1)/(\xi_2 - \xi_1), \quad (5)$$

$$\varphi_a(s) = \varphi_sh(\xi_a(s); k, \theta) \bmod \Delta\varphi. \quad (6)$$

Здесь ξ — поперечная координата: для диска ξ = r (радиус), для цилиндра ξ = z (осевая координата). Уравнение (5) является простейшей линейной схемой; более сложные функции способны формировать чирпированные, ускоренные или неоднородные фазовые комбинации.

4.2. Масштаб времени

$$\omega = 2\pi f, \quad (7)$$

$$\Delta t = \Delta\varphi/\omega = 1/(N_s\cdot f). \quad (8)$$

Δt — время одного шага относительного поворота. За этот интервал состояние совпадения пересекает заданный интервал координат.

4.3. Спроецированная скорость и скорость по криволинейной координате

$$v_\xi = (\xi_2 - \xi_1)/\Delta t = (\xi_2 - \xi_1)\cdot N_s\cdot f, \quad (9)$$

$$v_c = L_c/\Delta t = L_c\cdot N_s\cdot f. \quad (10)$$

Спроецированная скорость v_ξ описывает радиальное или осевое перемещение структуры. Скорость по криволинейной координате v_c описывает движение по всей последовательности апертур. В диске эти величины сильно различаются, поскольку длина дуги спирали намного больше ширины радиального кольцевого зазора. В цилиндре осевая скорость особенно важна, поскольку именно она наблюдается одномерным рабочим объёмом.

4.4. Частоты следования

$$f_macro = N_s\cdot f, \quad (11)$$

$$f_event = N_turns\cdot N_s\cdot f. \quad (12)$$

f_macro — частота повторения развёрток. f_event — число идеализированных событий, когда каждый виток (слой) вносит вклад в субсобытие. Фактический спектр в рабочей среде зависит также от диаметра диафрагмы, ширины затвора, конечного времени экспозиции, импеданса потока и акустической нагрузки.

5. Дисковая конфигурация (МСФП-D)

5.1. Геометрия прототипа

Дисковая конфигурация состоит из диска A со спиральной последовательностью апертур Архимеда и диска B с наклонными заслонками конечной ширины. В рассматриваемом прототипе используется диск диаметром 150 мм, активное кольцо радиусом от 55 до 70 мм, четыре витка спирали, тридцать отверстий на виток, диаметр отверстия 4 мм, тридцать затворов и ширина затвора 4 мм. Угол наклона затвора выбран так, чтобы его угловая координата изменялась на один шаг в пределах радиального интервала.

Таблица 1. Параметры прототипа МСФП-D.

Параметр	**Символ**	**Значение**
Диаметр диска	D	150 мм
Внутренний активный радиус	R1	55 мм
Внешний активный радиус	R2	70 мм
Активная радиальная ширина	R2 − R1	15 мм
Количество витков	N_turns	4
Отверстий на виток	N_pt	30
Всего отверстий	N	120
Диаметр отверстия	d	4 мм
Количество затворов	N_s	30
Ширина затвора	w	4 мм
Угловой шаг	Δφ	12°
Базовая частота вращения	f	50 об/с

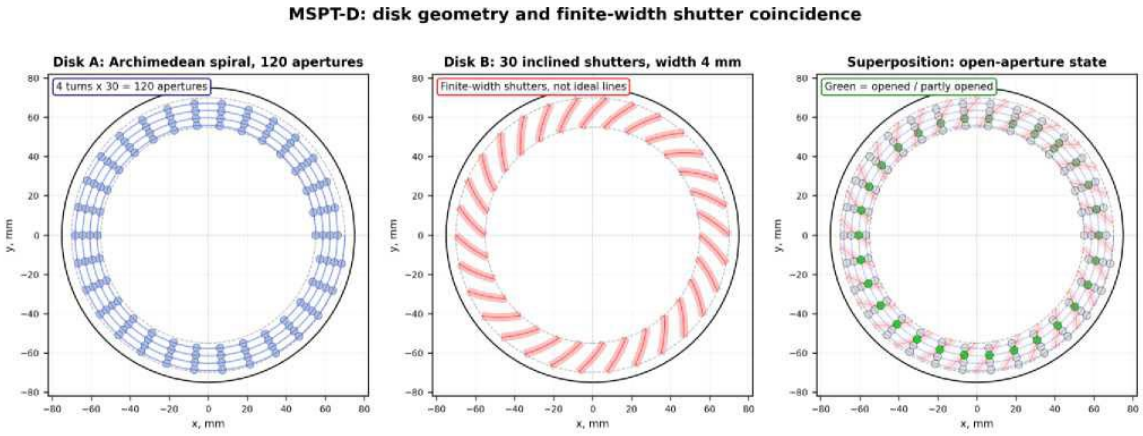


Рисунок 2. Геометрия МСФП-D: диск со спиральной апертурой (120 отверстий), наклонный диск затворов конечной ширины (30 затворов, 4 мм) и их наложение, образующее состояние открытых апертур.

5.2. Кинематика диска

$$\Delta t = 1/(30 \cdot 50) = 6{,}667 \cdot 10^{-4}\ с = 666{,}7\ мкс, \quad (13)$$

$$v_m = 2\pi \cdot 0{,}070 \cdot 50 = 21{,}99\ м/с, \quad (14)$$

$$v_r = 0{,}015/(6{,}667 \cdot 10^{-4}) = 22{,}50\ м/с, \quad (15)$$

$$L_{spiral} = 1{,}5709\ м, \quad v_{spiral} = 2356\ м/с. \quad (16)$$

Эти значения намеренно приведены раздельно. Кромка диска движется со скоростью около 22 м/с. Радиальная проекция волны раскрытия движется со скоростью около 22,5 м/с через активный кольцевой зазор шириной 15 мм. Существенно большее значение — около 2,36 км/с — представляет собой скорость фазовой картины вдоль полной развёрнутой последовательности спиральных апертур; его нельзя интерпретировать как радиальное движение фронта материала.

Таблица 2. Уточнённые базовые кинематические величины МСФП-D при 50 об/с.

Метрика	**Значение**	**Смысл**
Краевая скорость материала	21,99 м/с	скорость материала диска на R2
Время одного шага	666,7 мкс	время относительного шага 12°
Спроецированная радиальная развёртка	22,50 м/с	движение по активному кольцевому зазору
Фазовая скорость по координате спирали	2356 м/с	движение по развёрнутой последовательности из 120 апертур
Частота повторения развёрток	1500 Гц	одна развёртка на шаг в секунду
Идеальная частота событий	6000 Гц	число событий за четыре оборота в секунду
Геометрическая площадь	377,0 мм²	верхняя оценка до учёта потерь на

отверстий (30 отверстий)		дросселирование

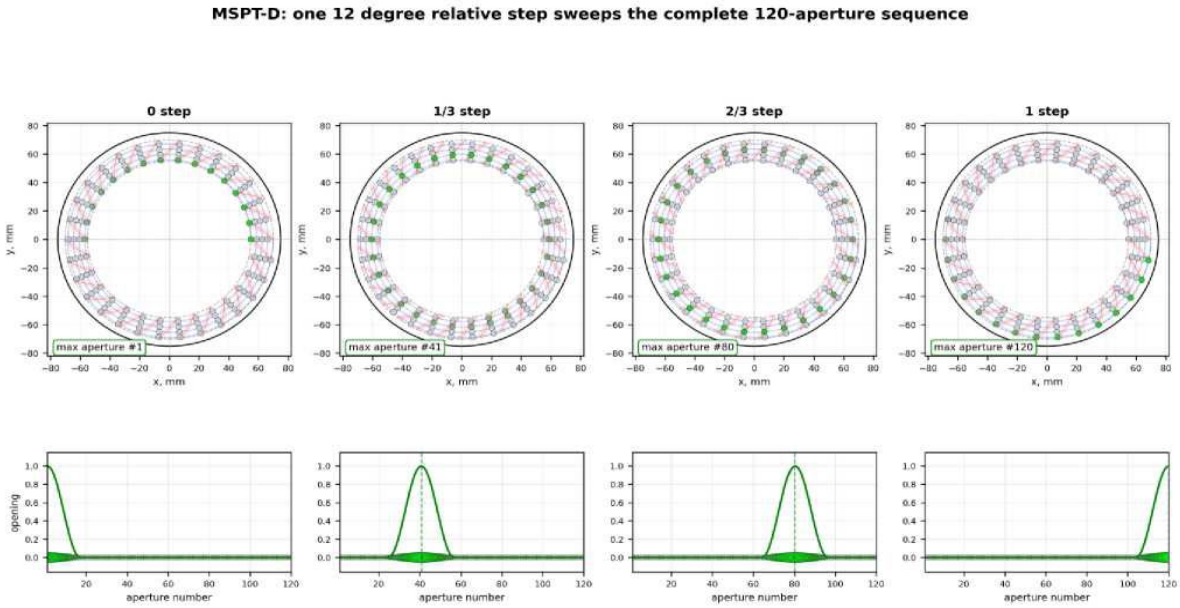


Рисунок 3. Состояние перемещения диска и линейная развёртка последовательности апертур. Зелёная огибающая представляет структуру фазового раскрытия.

5.3. Масштабирование

Таблица 3. Масштабирование МСФП-D. Число Маха относится только к фазовой картине вдоль координаты спирали, а не к скорости материала ротора.

f, об/с	**v_m (кромка), м/с**	**v_r (радиальная), м/с**	**v_spiral, м/с**	**M (по v_spiral), воздух**
50	22,0	22,5	2356	6,93
100	44,0	45,0	4713	13,86
200	88,0	90,0	9425	27,72
500	219,9	225,0	23 563	69,30
1000	439,8	450,0	47 126	138,61

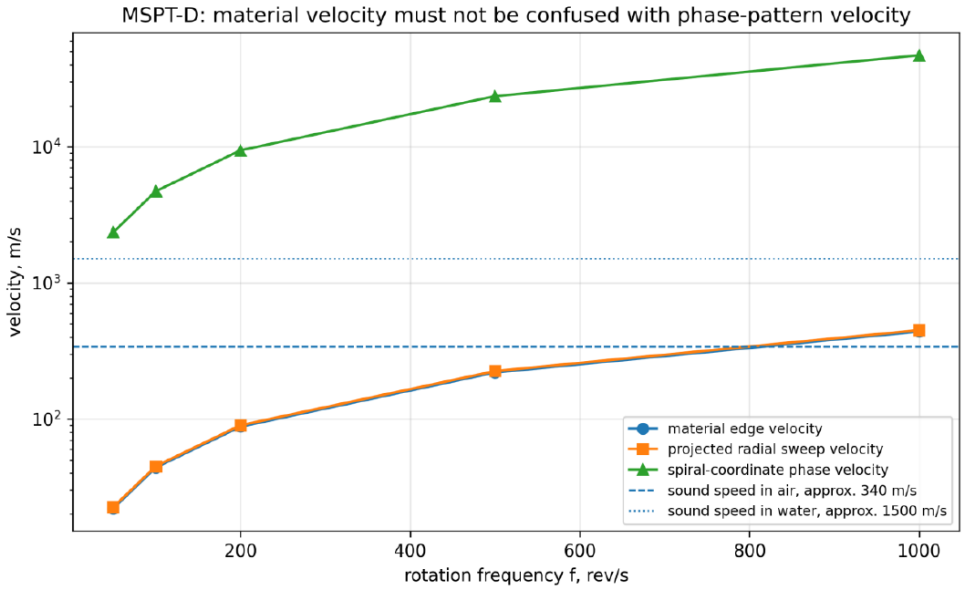


Рисунок 4. Масштабирование МСФП-D. График явно разделяет скорость материала, спроецированную радиальную развёртку и фазовую скорость по координате спирали; для сравнения показаны скорости звука в воздухе (около 340 м/с) и в воде (около 1500 м/с).

6. Цилиндрическая конфигурация (МСФП-С)

6.1. Геометрия прототипа

Цилиндрическая конфигурация заменяет плоскую спираль винтовой последовательностью апертур. Внутренний цилиндр A несёт 240 отверстий вдоль восьмивитковой винтовой линии. Внешний цилиндр B несёт тридцать наклонных в осевом направлении заслонок. Наклон выбран так, что каждый затвор изменяет азимут на один шаг по всей длине цилиндра 200 мм. Это делает расчётной движущейся координатой осевую, что непосредственно связано с цилиндрическими рабочими объёмами и геометрией вихревой трубы.

Таблица 4. Параметры прототипа МСФП-С.

Параметр	Символ	Значение
Радиус внутреннего цилиндра	R_a	50 мм
Радиус внешнего цилиндра	R_b	52 мм
Рабочий зазор	δ	2 мм
Длина цилиндра	L	200 мм
Винтовые витки	N_turns	8
Отверстий на виток	N_pt	30
Всего отверстий	N	240

Осевой шаг на виток	p_z	25 мм
Диаметр отверстия	d	4 мм
Количество заслонок	N_s	30
Базовая частота вращения	f	50 об/с

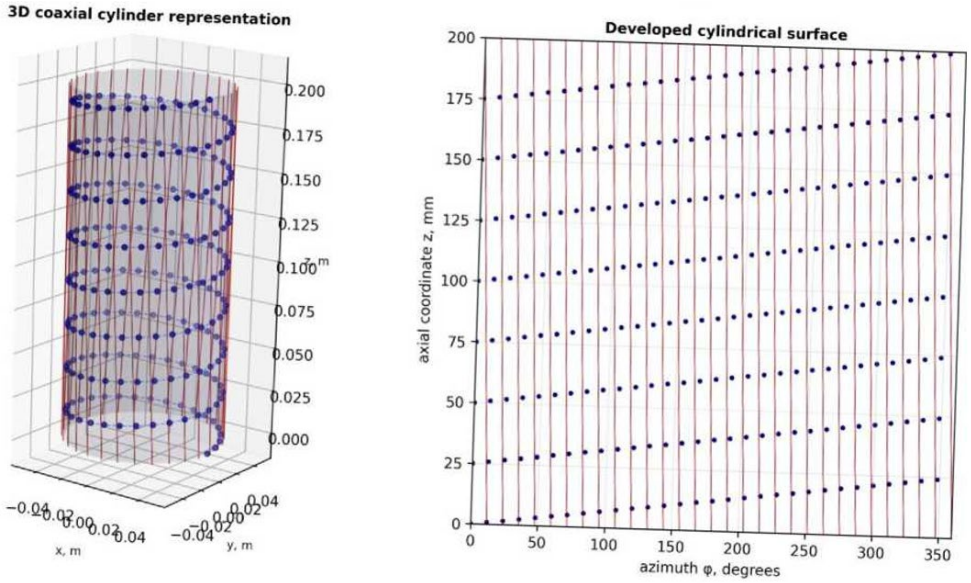


Рисунок 5. Геометрия МСФП-С: трёхмерное коаксиальное представление и развёрнутая цилиндрическая поверхность (осевая координата z и азимут φ).

6.2. Цилиндрическая кинематика

$$\Delta t = 1/(30 \cdot 50) = 666{,}7 \text{ мкс}, \quad (17)$$

$$v_m = 2\pi \cdot 0{,}050 \cdot 50 = 15{,}71 \text{ м/с}, \quad (18)$$

$$v_z = 0{,}200/(6{,}667 \cdot 10^{-4}) = 300 \text{ м/с}, \quad (19)$$

$$L_h = 2{,}5212 \text{ м}, \quad v_h = 3782 \text{ м/с}. \quad (20)$$

Цилиндрическая конфигурация обеспечивает большее усиление спроецированной развёртки, чем диск, поскольку осевая длина может возрастать независимо от радиуса. При 50 об/с спроецированная осевая скорость в 19,1 раза превышает поверхностную скорость материала 15,71 м/с, а фазовая скорость по координате винтовой линии — в 241 раз.

Таблица 5. Базовые кинематические величины МСФП-С при 50 об/с.

Метрика	Значение	Смысл
Поверхностная скорость материала	15,71 м/с	скорость на внутреннем радиусе цилиндра
Время одного шага	666,7 мкс	время относительного шага 12°

Спроецированная осевая развёртка	300 м/с	движение по длине цилиндра
Фазовая скорость по координате винтовой линии	3782 м/с	движение по развёрнутой винтовой траектории
Осевое усиление	19,1×	отношение v_z/v_m
Усиление по координате винтовой линии	241×	отношение v_h/v_m
Частота повторения развёрток	1500 Гц	одношаговые развёртки в секунду
Идеальная частота событий	12 000 Гц	число событий за восемь оборотов в секунду

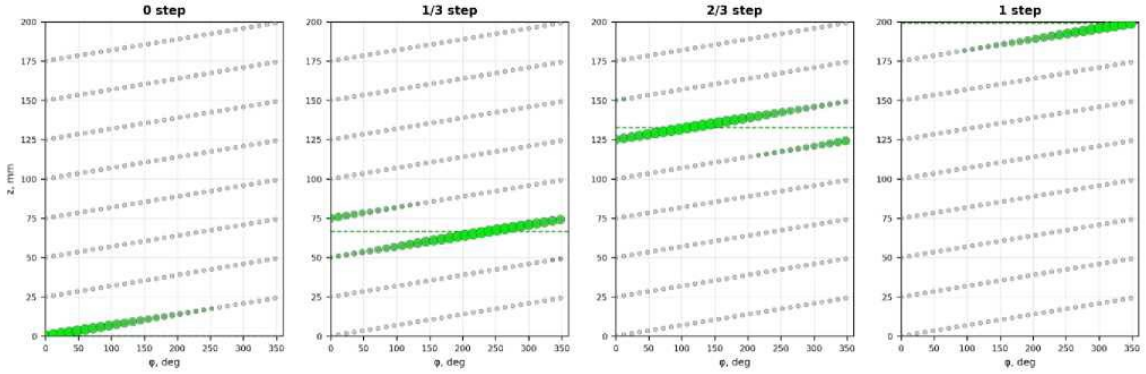


Рисунок 6. Развёртка по развитой поверхности, показывающая осевое перемещение картины отверстий за один шаг.

6.3. Масштабирование

Таблица 6. Масштабирование МСФП-С. Числа Маха относятся к спроецированной осевой фазовой скорости, а не к поверхностной скорости материала.

f, об/с	v_m (поверхность), м/с	v_z (осевая), м/с	v_h (винтовая), м/с	M (по v_z), воздух	M (по v_z), вода
50	15,7	300	3782	0,88	0,20
100	31,4	600	7564	1,76	0,40
200	62,8	1200	15 127	3,53	0,80
500	157,1	3000	37 818	8,82	2,00
1000	314,2	6000	75 637	17,65	4,00

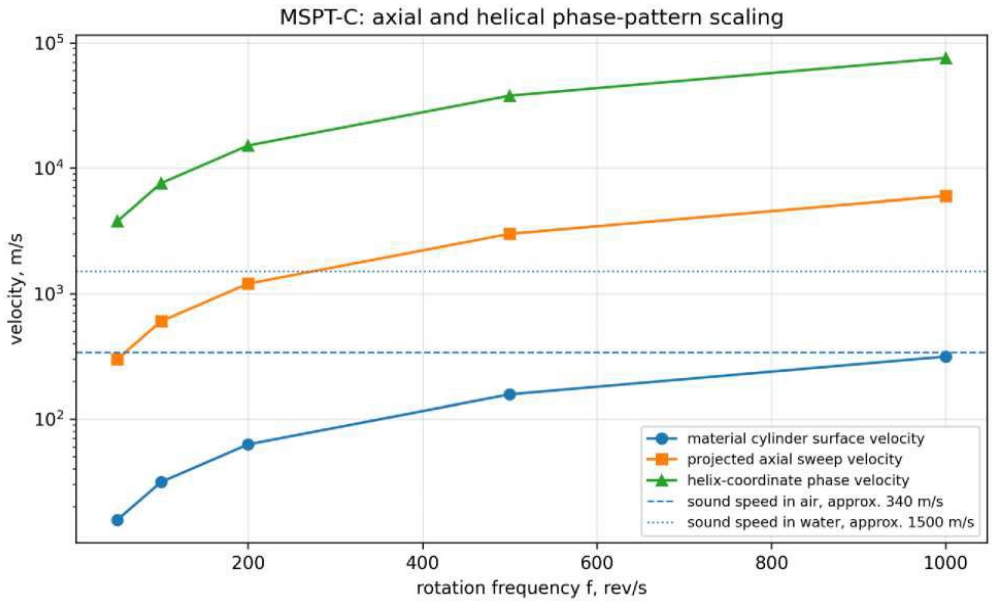


Рисунок 7. Масштабирование МСФП-С. Скорость осевой фазовой картины достигает масштаба скорости звука в воздухе примерно при 57 об/с и в воде — примерно при 250 об/с для указанной геометрии длиной 200 мм.

7. Численная проверка согласованности

Геометрическая численная реконструкция использовалась для проверки того, что положения апертур, наклон затворов и последовательность открывания при движении соответствуют аналитическим уравнениям. Проверка строит дисковые и цилиндрические семейства поверхностей по заданным параметрам, вычисляет совпадение как функцию относительного угла и определяет спроецированные и криволинейные скорости результирующего набора открытых апертур. Гидродинамическая или термодинамическая модель в эту проверку не включена; её назначение — подтвердить геометрию и кинематику.

Таблица 7. Проверка кинематики. Совпадение ожидаемо, поскольку расчёт является геометрическим, а не эмпирическим.

Конфигурация	**Аналитический результат**	**Геометрическая реконструкция**	**Согласование**
Спроецированная радиальная развёртка МСФП-D	22,50 м/с	22,50 м/с	в пределах численной точности
Фазовая скорость по координате спирали МСФП-D	2356 м/с	2356 м/с	в пределах численной точности
Спроецированная осевая развёртка МСФП-С	300 м/с	300 м/с	в пределах численной точности
Фазовая скорость по координате	3782 м/с	3782 м/с	в пределах

винтовой линии МСФП-С			численной точности

Данный раздел не следует принимать за экспериментальную проверку. Он подтверждает отсутствие геометрических несоответствий в заявленных уравнениях. Физические характеристики должны измеряться на работающих прототипах.

8. Волновые режимы, режимы течения и завихрённости, обеспечиваемые геометрией

8.1. Состояния радиально перемещающихся апертур в МСФП-D

Дисковую конфигурацию можно настроить так, чтобы спроецированная картина отверстий перемещалась внутрь или наружу через активный кольцевой зазор. Работа в направлении внутрь может использоваться как сходящееся импульсное граничное условие, наружу — как расходящееся. Скорость радиального хода определяется шириной кольца и должна использоваться в формулировке о радиальной фокусировке. Фазовая скорость по координате спирали описывает упорядочение по всей последовательности апертур и может быть значима для фазовой синхронизации и широкополосного возбуждения.

8.2. Состояния осевого перемещения в МСФП-С

Цилиндрическая конфигурация является более прямым генератором граничных условий продольного перемещения. Осевая скорость развёртки регулируется длиной цилиндра, числом шаговых позиций и частотой вращения. Это даёт управляемый способ задания закона осевой фазы в рабочем объёме.

8.3. Спиральная фокусировка

Поскольку последовательность апертур является винтовой (спиральной), множество открытых апертур может накладывать спиральное граничное условие. Направление спиральности выбирается направлением винтовой линии и относительным направлением вращения. Такое воздействие способно вносить угловой момент и закрутку в рабочее тело, не полагаясь только на тангенциальные входные сопла или направляющие лопатки. Это основная причина, по которой МСФП-С представляет интерес для управления вихревыми течениями.

8.4. Конфигурации со встречным распространением и картиной биений

Две ступени МСФП-С могут быть расположены так, чтобы накладывать встречно распространяющиеся осевые картины, создавая стоячие или квазистоячие зоны воздействия. Несколько семейств затворов с разными законами шага способны создавать огибающие биений. Эти расширения следуют из той же геометрии и не являются отдельными механизмами.

Таблица 8. Таксономия продуктивных режимов форсирования МСФП.

Режим	**Основная конфигурация**	**Управляемая координата**	**Возможный физический отклик**

Радиальный ход внутрь	МСФП-D	r уменьшается	сходящееся импульсное форсирование
Радиальный ход наружу	МСФП-D	r увеличивается	расходящееся широкополосное возбуждение
Осевой ход	МСФП-С	z	продольное акустическое и нагнетательное воздействие
Винтовое киральное состояние	МСФП-С	z и φ	завихрённость и вихревой режим впрыска
Стоячее воздействие	две ступени МСФП-С	огибающая по z	управление узлом и пучностью
Огибающая биений	многовитковые затворы	медленная огибающая	модулированный расход или акустическое воздействие

9. Гипотезы применения и технологический потенциал

Приведённые ниже применения предлагаются как экспериментальные гипотезы. Они не заявлены как продемонстрированные характеристики. Их ценность в том, что каждое может быть проверено количественно — измерением давления, расхода, акустического поля, поля завихрённости, химического выхода, интенсивности кавитации или характеристик горения.

9.1. Детерминированное управление вихрями и закруткой

Гипотеза H1. Винтовая ступень МСФП-С способна накладывать фазово-когерентное киральное воздействие вдоль цилиндрического объёма и тем самым создавать управляемую закрутку с заданной осевой фазой. Это может стать новым экспериментальным инструментом для изучения разрушения вихря (vortex breakdown), стабилизации вихрей, когерентных структур и переходных процессов в ограниченных течениях.

9.2. Впрыск в режиме Ранке–Хильша

Гипотеза H2. При размещении на входе вихревой трубчатой камеры МСФП-С способен навязывать осевые и азимутальные моды извне, а не полагаться только на самоорганизацию. Следовательно, устройство может обеспечивать управляемое возбуждение выбранных цилиндрических мод и систематическое изучение механизмов температурного разделения.

9.3. Широкополосное сквозное акустическое воздействие

Гипотеза H3. МСФП-С может работать как высокорасходный механический источник с фазированной апертурой в воздухе или в воде. В отличие от закрытого акустического преобразователя, он способен сочетать массообмен с детерминированным фазовым форсированием. Акустическая амплитуда и полоса пропускания должны измеряться экспериментально и не могут быть получены только из кинематики.

9.4. Исследования кавитации и водоподготовки

Гипотеза H4. МСФП-D и МСФП-C способны создавать воспроизводимые импульсные условия давления, пригодные для исследований кавитации, обработки накипи, эмульгирования или экспериментов по водоподготовке. Расчёт с поправками для дисковой конфигурации показывает, что спроецированная радиальная скорость развёртки и фазовая скорость по координате спирали различаются; поэтому утверждения о кавитации должны опираться на измеренное давление и локальные условия течения, а не только на фазовую скорость.

9.5. Проточная сонохимия

Гипотеза H5. Цилиндрическая ступень МСФП способна обрабатывать реагирующий поток высокочастотными пространственно запрограммированными возмущениями давления, непрерывно обновляя среду через отверстия. Это может уменьшить застойные зоны, характерные для реакторов со стоячей волной. Проверка требует химического выхода и калориметрического сопоставления с известными ультразвуковыми реакторами.

9.6. Интенсификация смешивания

Гипотеза H6. Форсирование бегущей апертуры способно вносить когерентные возмущения в заданных пространственных и временных масштабах, потенциально сокращая время смешивания в реакторах. Проверка проста: сравнить время смешивания, перепад давления и подводимую энергию с пассивными смесителями и роторно-импульсными устройствами.

9.7. Исследование инициирования горения и детонации

Гипотеза H7. Достаточно длинный МСФП-C с подходящими шагом и частотой вращения способен накладывать последовательность воспламенения или сброса давления, осевая фазовая скорость которой приближается к выбранным масштабам волны горения. Это не означает, что детонация создаётся одной только кинематикой: означает, что синхронизация граничных условий может быть согласована с режимом реагирующего течения и проверена экспериментально.

9.8. Предварительная подготовка плазмы и ударных волн

Гипотеза H8. В газах сходящееся или продольное импульсное воздействие может способствовать образованию предварительно ионизированной плазмы либо ударной предподготовке. Это остаётся предположительной, но проверяемой областью, требующей оптической диагностики, измерения давления и устройства с контролем безопасности.

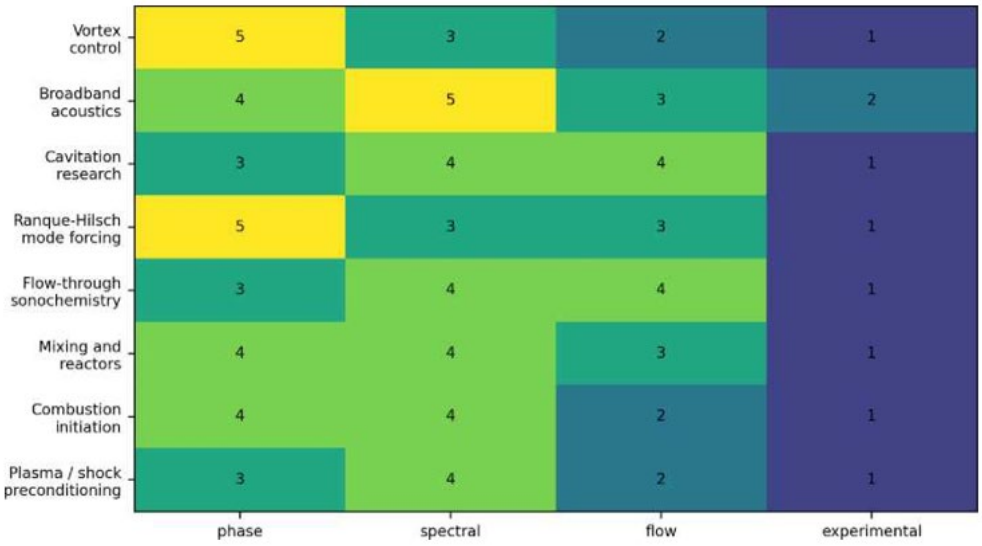


Рисунок 8. Качественная карта потенциала применения (управляемость, широта, пропускная способность, готовность). Низкие оценки экспериментальной готовности отражают то, что физическая проверка ещё не выполнена.

10. Программа экспериментальной валидации

Рецензент вправе спросить, что должно быть продемонстрировано, прежде чем будут приняты наиболее сильные технологические утверждения. Рекомендуемая программа проверки является последовательной: сухая кинематика → гидродинамический стенд → волновое поле → поле завихрённости → прикладные испытания.

Рисунок 9. Путь проверки от геометрии к физическим характеристикам.

- Сухой кинематический тест: высокоскоростная оптическая или энкодерная проверка того, что последовательность открытых апертур следует предсказанному фазовому закону (геометрия ротора, последовательность открывания, высокоскоростная видеосъёмка).
- Стендовое испытание: измерение коэффициентов расхода, перепада давления, утечек и эффектов конечного времени экспозиции для реалистичных зазоров и допусков.
- Картирование акустического и гидродинамического поля: микрофон, гидрофон, датчик давления, шлирен-измерения, PIV или LDV в зависимости от среды (карты фаз крофонов/гидрофонов).
- Диагностика завихрённости: фазоразрешённая реконструкция поля скорости в цилиндрических камерах (карты мод по PIV/LDV).
- Специфические для применения испытания: кавитационный выход, сонохимический выход, время смешивания, температурное разделение, характеристики горения или инициирование плазмы.

Только после этих этапов следует количественно заявлять об эффективности, превосходстве над существующими устройствами или промышленной применимости.

11. Обсуждение

11.1. Почему принцип физически непротиворечив

Принцип МСФП согласуется с классической механикой, акустикой и принципом причинности, поскольку быстрый объект является фазовой картиной. Локальные отверстия открываются вследствие локальной геометрии. Ни одна апертура не передаёт информацию следующей апертуре с фазовой скоростью. Среда локально реагирует на каждое событие открытия, а возникающие волны, импульсы или вихри распространяются в соответствии с определяющими уравнениями среды.

11.2. От чего зависит практический верхний предел

Практический предел является не фундаментальным пределом причинности, а инженерным ограничением: прочность ротора, вибрация, устойчивость подшипников, контроль зазора, утечки, нагрев, производственный допуск, время экспозиции отверстия и дросселирование жидкости. Полезная оценка допуска:

$$\delta t \approx \varepsilon / v_c, \quad (21)$$

где ε — эффективная геометрическая ошибка по координате массива. Для v_c около 1 км/с и ε = 10 мкм временная неопределённость составляет около 10 нс. Это показывает, что высокие фазовые скорости принципиально возможны, но предъявляют жёсткие требования к изготовлению и метрологии.

11.3. Почему концепция важна для вихревых течений

Классическое вихреобразование использует тангенциальный впрыск, вихревые лопатки, вращающиеся стенки или самоорганизующиеся неустойчивости. МСФП-С добавляет ещё один вариант: скользящее спиральное граничное условие с заданным фазовым законом. Он способен навязывать как осевую, так и азимутальную структуру, что делает его потенциальным инструментом детерминированных вихревых исследований. Это наиболее важное концептуальное расширение за пределы обычных поворотных клапанов.

11.4. Ограничения настоящей работы

- Препринт геометрический и кинематический; это не исследование CFD, акустических или термодинамических характеристик.
- Амплитуда генерируемых волн давления не выводится только из фазовой скорости.
- Потери течения, утечки, кавитационные пороги, дросселирование и турбулентность здесь не моделируются.
- Все утверждения о применении сформулированы как гипотезы, требующие экспериментальной проверки.

- Сопоставление с предшествующим уровнем техники носит концептуальный характер; патентный и инженерный анализ новизны потребовал бы отдельного поиска.

12. Выводы

Препринт формулирует механический спирально-фазовый преобразователь как геометрический метод механического программирования бегущих граничных условий в жидкостях и газах. Предлагаемое устройство сочетает последовательность спиральных или винтовых апертур с семейством наклонных затворов. Результирующее множество совпадений ведёт себя как движущееся открытое состояние, фазовая скорость которого определяется геометрией и частотой вращения.

Основной научный вклад — явное разделение скорости материала, спроецированной скорости развёртки и полной фазовой скорости по криволинейной координате. Это решает концептуальную проблему, которая иначе возникает, когда картина отверстий кажется движущейся значительно быстрее поверхности ротора. Высокоскоростная картина не является материальным объектом и не предполагает непричинного переноса материи или энергии.

Для дискового прототипа уточнённые базовые значения при 50 об/с составляют: краевая скорость материала 21,99 м/с, спроецированная радиальная скорость развёртки 22,50 м/с и фазовая скорость по координате спирали около 2,36 км/с. Для цилиндрического прототипа базовые значения составляют: поверхностная скорость материала 15,71 м/с, спроецированная осевая скорость развёртки 300 м/с и фазовая скорость по координате винтовой линии около 3,78 км/с. Поэтому цилиндрическая конфигурация особенно важна для управляемого продольного форсирования и вихревого впрыска.

Технологический потенциал широк, но должен быть подтверждён экспериментально. Наиболее значимым краткосрочным научным результатом МСФП, вероятно, станет контролируемый лабораторный источник бегущих граничных условий давления, расхода и завихрённости. В случае экспериментального подтверждения принцип может открыть новое направление в механической фазовой инженерии волновых и вихревых процессов.

Литература

[1] Ranque, G. J. (1933). Expériences sur la détente giratoire avec productions simultanées d'un échappement d'air chaud et d'un échappement d'air froid. Journal de Physique et le Radium, 4, 112–114.

[2] Hilsch, R. (1947). The use of expansion of gases in a centrifugal field as a cooling process. Review of Scientific Instruments, 18, 108–113.

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

[4] Suslick, K. S. (1990). Sonochemistry. Science, 247, 1439–1445.

[5] Mason, T. J., Lorimer, J. P. (2002). Applied Sonochemistry: The Uses of Power Ultrasound in Chemistry and Processing. Wiley-VCH.

[6] Wolanski, P. (2013). Detonative propulsion. Proceedings of the Combustion Institute, 34, 125–158.

[7] Lu, F. K., Braun, E. M. (2014). Rotating detonation wave propulsion: experimental challenges, modeling, and engine concepts. Journal of Propulsion and Power, 30, 1125–1142.

[8] Brillouin, L. (1960). Wave Propagation and Group Velocity. Academic Press.

[9] Jackson, J. D. (1999). Classical Electrodynamics, 3rd ed. Wiley.

[10] Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., Sanders, J. V. (2000). Fundamentals of Acoustics, 4th ed. Wiley.

[11] Wilson, O. B. (1988). An Introduction to the Theory and Design of Sonar Transducers. Peninsula Publishing.

[12] Pierce, A. D. (1989). Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications. Acoustical Society of America.