Геометрическая волновая инженерия

Волновые газовые течения

Перспективный класс пассивных газодинамических элементов клапанного типа на основе волнового переключения в псевдогиперболоидах 2-го порядка

Аналитический подход к выбору переходных волновых состояний течения в постоянно открытых камерах

Хаустов Игорь Николаевич[1], Хаустов Владимир Игоревич[2]

[1] Кандидат технических наук (ВАК СССР, 1984 г.)

[2] Независимый исследователь; ORCID: 0009-0007-3657-2309

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

Лицензия: CC BY 4.0

DOI: 10.5281/zenodo.23349206

Научно-технический перевод с английского языка.

Редакция, адаптированная для русскоязычного инженера-исследователя.

Оригинал: Khaustov. I. Khaustov. V. Geometric Wave Engineering of Compressible Gas Flows: A Candidate Class of Valve-Type Passive Gas-Dynamic Elements Based on Wave-Mediated Switching in PHB and ZPHB Chambers. https://doi.org/10.5281/zenodo.23349206

Аннотация

Может ли точная форма неподвижной камеры определять, когда газ входит и выходит через два постоянно открытых отверстия после единственного импульса давления? Этот вопрос рассматривается в рамках геометрической волновой инженерии (ГВИ) — предлагаемого подхода к исследованию волнового переноса при аналитически заданных границах на основе общепринятых законов сохранения.

Исследуются две родственные конструкции: псевдогиперболоидальные камеры (PHB), собранные из точно заданных меридиональных гиперболических ветвей, и зеркальные псевдогиперболоидальные камеры (ZPHB), построенные посредством предписанных отражений этих ветвей. Расчёты сжимаемого газа обнаруживают конечные интервалы одновременного суммарного верхнего впуска и нижнего выпуска без механического перекрытия отверстий. Это переходное газодинамическое состояние, а не доказательство самозаряжающегося цикла двигателя.

При согласованных условиях малые изменения профиля PHB противоположных знаков вызывают существенно различные отклики. В исследованном семействе возмущений ZPHB, напротив, состояние одновременного впуска и выпуска сохраняется, а время его возникновения изменяется. В сравнении OpenFOAM на трёх сетках при открытых граничных условиях на отверстиях PHB имеет большую фильтрованную интенсивность смешанного состояния, чем согласованный биконус, однако величина различия зависит от сетки.

Отдельное сравнение OpenFOAM явно разрешает окружающий газ. Во всех трёх геометриях — PHB, ZPHB и согласованном биконусе — вновь наблюдаются одновременные впуск и выпуск, но порядок величин интенсивности меняется. В этой постановке верхний приток не равнозначен доказанной заправке газом, первоначально находившимся в верхней внешней области.

Результаты подтверждают вычислительную возможность настраивать аналитической геометрией момент появления, продолжительность и интенсивность переходного газового переноса. Они не устанавливают универсального превосходства PHB, исключительно фокального механизма или экспериментальной эффективности устройства.

Ключевые слова: геометрическая волновая инженерия (ГВИ); аналитически определённые псевдогиперболоиды; PHB; зеркальные ZPHB; пассивные газодинамические элементы; переходное переключение потоков через два отверстия; геометрически зависимые состояния течения; знаково-чувствительный отклик; численное моделирование сжимаемого газа; струйное управление.

Содержание

Аннотация 2
1 Введение: геометрическая идея и научный вклад 5
1.1 Геометрическая волновая инженерия 5
1.2 Построения PHB и ZPHB 6
1.3 Связь с известными пассивными клапанами 7
1.4 Определение класса и научная область утверждения 7
1.5 Основная гипотеза и научный вклад работы 8
2 Аналитическая псевдогиперболоидальная геометрия 8
2.1 Геометрия PHB 8
2.2 Геометрия ZPHB 10
2.3 Условие общего фокуса и допустимая область параметров ZPHB 12
2.4 Горизонтальный и вертикальный типы PHB/ZPHB 13
2.5 Отверстия и усечение рабочей камеры 13
2.6 Кривизна и точное меридиональное свойство отражения 16
2.7 Параметры вычисляемой камеры и её геометрического родителя 17
3 Сжимаемая газовая динамика как нелинейная волново-потоковая система 17
3.1 Начальное состояние, возбуждение и безразмерные переменные 18
3.2 Механизм связи геометрии и физики 19
3.3 Подробный принцип работы переходного пассивного элемента 20
3.4 Геометрическая фокальная структура и газодинамика 21
3.5 Редуцированный геометрический волновой индикатор для ветви PHB 22
4 Численная постановка и верификация 22
4.1 Собственный согласованный с границей решатель HLLC: дискретизация и шаг по времени 23
4.2 Постановка OpenFOAM shockFluid 24
4.3 Сохранение состояния покоя и осесимметрический источник 24
4.4 Открытые границы и атмосферный резервуар 24
4.5 Балансы массы и энергии 25
4.6 Проверки численной корректности 25
4.7 Постановка OpenFOAM с явно разрешённой внешней газовой областью 26
5 Операционное определение переходного переключения 27
5.1 Устойчивое событие переключения 27
5.2 Смешанный двухпортовый режим 28
5.3 Интегральные метрики направленности 28
6 Семейство геометрий и причинные контроли 30
6.1 Что именно уравнивается в каждом контроле 31
6.2 Уровни причинного утверждения 32
6.3 Контроли с одинаковыми отверстиями и приближённо согласованными объёмами 32
6.4 Сеточное поведение точной ZPHB и близких профилей 33
7 Основное переходное переключение PHB 33
7.1 Сеточная устойчивость времени события 34
7.2 Дополнительная серия: смешанные эпизоды и моменты по сохранённым отсчётам 35
7.3 Конечный интервал смешанных знаков 35
7.4 Событийные интервалы и разрешение временных отсчётов 36
7.5 Проверка смешанного состояния PHB в OpenFOAM при одинаковой энергии возбуждения 36
8 PHB и ZPHB как различные геометрически программируемые отклики 37
8.1 Геометрическое преобразование как преобразование оператора 39
8.2 Область интерпретации сравнения PHB–ZPHB 39
8.3 Чувствительность к сетке амплитуде и размеру внешней области 39
8.4 Строгое OpenFOAM-замыкание ZPHB и её контролей 40
9 Сильный знаково-чувствительный конечновременной отклик в окрестности PHB 40
9.1 Первое знаковое причинное семейство: разделение в 42,6 раза при ±0,5% 41
9.2 Повторение на более тонкой сетке и контроль амплитуды источника 43
9.3 Независимое центрированное семейство деформаций 43
9.4 Продолжение высокооткликовой ветви PHB 44
9.5 Интерпретация: знаково-чувствительный переходный отклик при заданном пороговом критерии 44
9.6 Механистические следствия знакового отклика 45
10 Геометрические зависимости и карта отклика 45

10.1 Безразмерные проектные координаты и роль абсолютного масштаба R 45
10.2 Влияние a/R: масштаб отверстия и баланс «наполнение–импульс» 45
10.3 Влияние b/R: скорость гиперболического раскрытия, время и замещение газа 46
10.4 Локальные изменения профиля при согласованных портах и объёме 46
10.5 Связанное пространство геометрия–отклик по α, β и N 47
10.6 Влияние высоты нижнего среза 48
10.7 PHB и ZPHB: локальная чувствительность и робастность 49
10.8 Инженерные правила из завершённой карты геометрии 50
11 Дополнительная численная верификация 50
11.1 Определение импульса 51
11.2 Интерпретация пассивных меток газа 52
11.3 Охват верификации 52
11.4 Завершённая верификация ZPHB с близкими контролями 52
11.5 Завершённое сравнение четырёх геометрий 53
11.6 Согласованная трёхсеточная проверка PHB и биконуса 53
11.7 Контрольные геометрии и время переключения на G4 53
11.8 Объёмное и локальное давление в момент смены режима 54
11.9 Численная верификация и проверка воспроизводимости 54
11.10 Интегральный газообмен и его связь с клапаноподобным режимом 54
11.11 Пространственная структура давления и скорости в процессе переключения 55
11.12 Чувствительность к численному протоколу и причинная интерпретация 56
11.13 OpenFOAM с явной внешней областью: согласованный контроль и интерпретация трассеров 56
12 Интерпретация в рамках геометрической волновой инженерии 58
12.1 Геометрия как индекс семейства динамических операторов 59
12.2 Почему это волновая задача 59
12.3 Междисциплинарный и частотный смысл 59
12.4 Доказанное техническое преимущество: выбор переходного режима, а не универсальное усиление потока 60
13 Связь с известными пассивными средствами управления потоком 60
13.1 Функциональное отличие от диода потока 61
13.2 Отличие от аэродинамического клапана периодического двигателя 61
13.3 Операционный критерий предлагаемого класса 61
13.4 Связь с автоматическим переключением без движущихся частей и струйными осцилляторами 62
13.5 Фокальный закон PHB и границы его наследования газодинамикой 62
13.6 Согласованный двойной конус: что установлено расчётами 63
13.7 От пассивного газодинамического элемента к пульсирующему двигателю 63
13.8 Оптимизация геометрии и статус оптимума 63
14 Инженерные архитектуры и перспективы технологий будущего 64
14.1 Пассивный импульсный пневматический маршрутизатор 64
14.2 Элемент пассивной временной развязки импульса 64
14.3 Геометрически настраиваемый элемент выпуска и впуска 65
14.4 Геометрически закодированные пороговые и переключающие элементы 65
14.5 Концепции для высоких температур, большого числа циклов и труднодоступных сред 65
15 Ограничения и область применимости 65
16 Заключение 66
17 Литература 68

1 Введение: геометрическая идея и научный вклад

Обычный клапан управляет сообщением между газовыми областями посредством подвижного затвора либо за счёт различий сопротивления течению в противоположных направлениях. Более сложный вопрос состоит в том, способна ли сама стенка неподвижной, постоянно открытой камеры участвовать в формировании последовательности режимов после одного возбуждения. В этой работе предлагается аналитически определённое семейство камер и изучается соответствующий вопрос с помощью измеримых историй расходов на отверстиях, а не внешнего сходства с механическим затвором.

Предлагаемый подход называется геометрической волновой инженерией (ГВИ): сначала точно задаётся геометрия, затем без введения особой геометрической силы решаются общепринятые уравнения среды, после чего волновой и газодинамический отклик сравнивается с явно определёнными контрольными формами. В сжимаемом газе волны сжатия и разрежения взаимодействуют с локальной ориентацией стенки и движущейся средой; измеримый результат представляет собой временную последовательность состояний, а не только резонансную частоту или предпочтительное направление стационарного течения.

Исследуются две аналитические конструкции. PHB образована заданной сборкой гиперболических меридиональных ветвей, а ZPHB — отражением этих ветвей до выбора оси вращения. Геометрия здесь не служит иллюстрацией обычного сопла: она определяет весь профиль камеры и, после установленного нижнего среза, оба постоянно открытых отверстия. Научный вопрос состоит в возможности воспроизводимо выбирать время переключения, интенсивность смешанного режима и переносимую массу посредством управляемых геометрических семейств.

Содержание расчётного утверждения намеренно конкретно. Выявлены временное изменение направления суммарного расхода через верхнее отверстие и интервалы одновременного верхнего впуска и нижнего выпуска. Такое состояние не объявляется исключительным свойством PHB и само по себе не является автономным двигателем. Предмет специального исследования — чувствительность этих конечновременных состояний к точному аналитическому профилю и отличающийся отклик зеркальной конструкции.

1.1 Геометрическая волновая инженерия

Геометрическая волновая инженерия (ГВИ) используется здесь как название предлагаемого подхода, основанного на первичном выборе геометрии, а не как самостоятельная система законов газовой динамики. Основная проверяемая гипотеза проста: если граница задана воспроизводимой аналитической конструкцией, её влияние на развитие волн и перенос можно систематически исследовать посредством известных уравнений соответствующей среды. Поэтому исследование должно связывать точно определённую форму, определённое возбуждение и измеримые характеристики поля или потока. Здесь подход применяется к движению сжимаемого газа.

Для формального сопоставления обозначим через G границу камеры, через I — начальное состояние и возбуждение, а через Y — измеряемый зависящий от времени отклик. Отображение решения и наблюдения Y=S_G[I] выражает зависимость отклика одновременно от геометрии и воздействия. Эта запись не предполагает линейности, не устанавливает нового физического закона и не гарантирует улучшения характеристик; она позволяет чётко сформулировать контролируемые сравнения геометрий.

Термин «волновая» в ГВИ не означает, что все рассматриваемые системы обязаны быть линейными гармоническими волнами. Существенно, что конечное состояние формируется распространением возмущений и взаимодействием их с аналитической границей. В сжимаемом газе после импульсного повышения давления возникают волны сжатия и разрежения, контактные структуры и перенос на конечном временном интервале импульса. В электромагнитной, акустической или упругой задаче оператор SG будет другим, но логика исследования остается той же: аналитическая геометрия → оператор краевой задачи → организация физического состояния. Поэтому переносимой между областями является методология ГВИ, а не конкретный численный результат этой газодинамической статьи.

В определении различаются три уровня утверждений. Первый — точная геометрия, которую можно установить аналитически. Второй — физический отклик в конкретной модели, требующий расчёта или эксперимента. Третий — инженерные характеристики реального устройства. Статья устанавливает аналитическую основу PHB/ZPHB и численно исследует второй уровень для переходной сжимаемой газодинамики; экспериментальная проверка остаётся следующим этапом.

1.2 Построения PHB и ZPHB

Название «псевдогиперболоидальная конструкция» (PHB) означает поверхность, собранную из заданных гиперболических меридиональных ветвей, с определённой осью вращения, сопряжениями и открытыми отверстиями. Её нельзя отождествлять с обычным цельным однополостным гиперболоидом: полная газовая камера составная и усечённая, а её точное определение дано в разделе 2. Аналитическое описание позволяет воспроизводимо задавать геометрию отверстий, нормали и локальные деформации профиля, а не выбирать форму по внешнему сходству.

Зеркальная псевдогиперболоидальная конструкция (ZPHB) получается из заданных исходных гиперболических сегментов посредством точных геометрических отражений. Полученная поверхность родственна PHB по правилу построения, однако исследованные устройства не обязаны иметь одинаковые объёмы или площади отверстий. Такое математическое родство полезно для структурированного сравнения; само по себе оно не доказывает, что именно фокальные свойства определяют газодинамический механизм переключения.

У ограниченного подсемейства ZPHB внутренние фокальные образы совпадают в исходном меридиональном построении. Это условие связывает геометрические параметры, поэтому их нельзя выбирать независимо. После установленного изменения оси сборки вертикальная реализация имеет два симметричных внутренних осевых фокальных положения и внешние фокальные кольца. В разделе 2 выводится допустимая область параметров и указываются координаты до и после такого изменения реализации.

Названия «горизонтальный» и «вертикальный» определяют способ трёхмерного построения по меридиональной конфигурации. Горизонтальный тип получается вращением исходной конфигурации вокруг линии $\rho=0$. Для вертикального типа меридиональную конфигурацию переориентируют и вращают вокруг установленной оси устройства. Фокус вне оси порождает окружность, а фокус на оси остаётся точкой. Это разные поверхности вращения, а не различные виды одного готового тела. В газодинамических расчётах используется вертикальное построение с верхним и нижним отверстиями на оси устройства.

1.3 Связь с известными пассивными клапанами

Неподвижные каналы давно обеспечивают пассивное управление течением. Диффузорно-сопловые насосы выпрямляют колебательный перенос за счёт различающихся коэффициентов потерь [9]. Клапаны Теслы используют асимметричные ветви, отрыв, рециркуляцию и смешение для получения направленно-зависимого сопротивления, причём их работа существенно зависит от пульсаций и числа Рейнольдса [2,12]. Бесконтактные Коанда-клапаны и струйные осцилляторы также способны переключаться или колебаться без механических приводов за счёт прилипания струи, обратной связи по давлению или внешней нагрузки [10,11]. Аэродинамические клапаны исследовались для подавления обратного потока в импульсно-детонационных устройствах [3,4]. Эти работы показывают, что пассивное геометрическое управление потоком и даже автоматическое струйное переключение сами по себе не являются новыми.

В отличие от газовых диодов со стационарным сопротивлением или клапанов с механическим приводом, здесь изучаются порядок и длительность переходных событий после одного заданного импульса. Исследования диффузорно-сопловых, клапанов Теслы и струйных осцилляторов дают необходимый контекст [2,9,10,11,12], однако данная работа проверяет иную наблюдаемую величину: конечный интервал верхнего впуска одновременно с нижним выпуском и изменение этого интервала при аналитически контролируемых изменениях границы.

1.4 Определение класса и научная область утверждения

Завершённые серии PHB показывают сильную знаковую чувствительность конечновременного выбора состояния при заданных возмущениях. Завершённая знаковая серия ZPHB включает точную геометрию и центрированные варианты ±0,5%, ±1% и ±2% на G2 и G3; в исследованном семействе все варианты на G3 сохраняют разнонаправленное состояние. Это вычислительное сопоставление локальной чувствительности PHB и локального сохранения состояния ZPHB, а не доказательство математической бифуркации или универсального допуска.

Фальсифицируемое следствие гипотезы формулируется через события, а не через визуальное впечатление от поля. Если геометрия действительно организует переходный процесс, то при одинаковом возбуждении должны воспроизводиться порядок смены знаков потоков, продолжительность интервала одновременного верхнего впуска и нижнего выброса, а также систематические сдвиги этих времен при переходе от PHB к ZPHB или к контролируемой деформации. Если же картина исчезает при уточнении сетки либо полностью объясняется только площадью отверстий, такой результат не может считаться подтверждением геометрически заданного механизма.

Класс определяется правилом построения и функцией. Построение использует заданные меридиональные ветви PHB/ZPHB, оси вращения и усечения для формирования неподвижной камеры с двумя отверстиями. Функция представляет собой упорядоченный переходный процесс, включающий выпуск, последующую смену направления верхнего потока и конечный интервал верхнего впуска при нижнем выпуске. Рассчитанный представитель получает численное обоснование, когда эта функция сохраняется при исследованных уточнениях и изменениях возбуждения. Определение семейства не утверждает, что любая допустимая геометрия работает в любом режиме, а обоснование его представителей не требует превосходства над любой другой пассивной камерой.

1.5 Основная гипотеза и научный вклад работы

Гипотеза состоит не в общем влиянии кривизны стенок на газовую динамику — это давно известно, — а в возможности использовать воспроизводимое аналитическое семейство форм для выбора наблюдаемых конечновременных состояний отверстий после одинакового возбуждения. Центральны три вычислительных наблюдения: (i) двухпортовая клапаноподобная последовательность без подвижного затвора; (ii) сильная локальная знаковая чувствительность PHB при заданных деформациях с контролем объёма и отверстий; (iii) сохранение смешанного состояния в испытанном знаковом семействе ZPHB. Геометрические зависимости от a/R, b/R и нижнего среза расширяют результаты до пространства проектирования, а не одной конструкции.

Эти результаты имеют различные уровни подтверждения. Аналитическое построение PHB/ZPHB и фокальные соотношения являются точными в рамках сформулированной меридиональной геометрии. Переключения и газовый перенос установлены вычислительно и зависят от указанных дискретизации и граничных условий. Исключительная фокальная причина газового течения, сошедшийся коэффициент практического выигрыша, допуски для изготовленного изделия и экспериментальная работоспособность не следуют непосредственно из представленных расчётов.

2 Аналитическая псевдогиперболоидальная геометрия

Геометрия задаётся до расчёта и определяет сам объект краевой задачи. Поэтому далее отдельно рассмотрены родительский PHB, зеркальный ZPHB, строгое подсемейство с общим фокусом, правила горизонтального и вертикального трёхмерного построения и инженерное усечение для двухпортового газодинамического элемента. Это разделение показывает границу между точным геометрическим построением и конкретной физической реализацией.

2.1 Геометрия PHB

Пусть (ρ,z) — координаты в меридиональной плоскости, где неотрицательная ρ обозначает расстояние от исходной оси вращения. Знаковые копии используются только для изображения противоположной стороны сечения. Радиально смещённая родительская ветвь имеет вид

$$\rho(z) = R - b\sqrt{(z^2/a^2 - 1)}, \quad a \le |z| \le L.$$

$$L = a\sqrt{(1 + (R/b)^2)}, \quad c = \sqrt{(a^2 + b^2)}.$$

Положительные параметры a и b имеют размерность длины; R — радиальное смещение, L — конечная координата при ρ=0. Вращение этой ветви в виде (ρ cos φ,ρ sin φ,z) даёт радиально смещённую поверхность PHB. Её неявное соотношение содержит $(\sqrt{(X^2+Y^2)}-R)^2$, и при R>0 она является неквадрической поверхностью. Ось вращения входит в это определение. Жёсткий поворот готовой поверхности сохраняет её геометрический тип; выбор другой оси для плоской образующей является другим построением.

Вертикальная газовая камера строится присвоением y=ρ и r=|z| в родительской меридиональной кривой и вращением полученного профиля вокруг оси y. Отражение относительно плоскости y=0 образует вторую осевую ветвь. Геометрическое построение и газодинамический решатель используют одно и то же определение. Обращение родительской зависимости даёт

$$r(y) = a\sqrt{(1 + ((R - |y|)/b)^2)}, \quad -R \le y \le R.$$

Для рабочей вертикальной поверхности введём $s(y)=R-|y|$. Производная на каждой гладкой ветви равна $r'(y)=-a\,s(y)\,\mathrm{sgn}(y)/[b^2\sqrt{(1+(s(y)/b)^2)}]$, $y\neq 0$. В частности, при $y>0$: $r'(y)=-a(R-y)/[b^2\sqrt{(1+((R-y)/b)^2)}]$, а при $y<0$: $r'(y)=+a(R+y)/[b^2\sqrt{(1+((R+y)/b)^2)}]$. При $y=0$ односторонние производные имеют противоположные ненулевые значения ($R>0$): поверхность кусочно-гладкая, без глобальной гладкости C^1 в центральном сопряжении.

Полный вертикальный РНВ имеет концевой радиус a при $y=\pm R$ и максимальный радиус L в центральном стыке. Его гладкие верхний и нижний участки удовлетворяют соответственно уравнениям $r^2/a^2-(y-R)^2/b^2=1$ и $r^2/a^2-(y+R)^2/b^2=1$. Эти локальные уравнения описывают гиперболоидальные участки с различными осевыми центрами. Составная камера РНВ, включающая зеркальный стык и рабочие срезы, не является единой квадрикой. Её название относится ко всему установленному построению. Фактическое нижнее отверстие появляется при рабочем усечении, описанном в разделе 2.5.

Приведённые ниже уравнения явно показывают роль оси вращения. Для радиально смещённой реализации устранение квадратного корня в $\rho=\sqrt{(X^2+Y^2)}$ даёт соотношение четвёртой степени; ограничения исходной ветви необходимо сохранять, поскольку возведение в квадрат может добавлять посторонние ветви. Для верхнего вертикального участка подстановка $r^2=X^2+Z^2$ даёт локальное квадратное уравнение. Эти алгебраические описания дополняют полное определение ветвей и их объединения, а не заменяют его.

$$r^2/a^2 - (y \mp R)^2/b^2 = 1 \quad \text{(верхняя/нижняя гладкие ветви).}$$

На каждой гладкой ветви РНВ производная профиля аналитически следует из родительской гиперболы. Центральная плоскость является зеркальным стыком и требует односторонних производных. Нормали стеночных граней численной сетки определяются из интегралов по заданной границе, а не из ступенчатого представления; каждая криволинейная грань описывается интегральной эффективной нормалью, как указано в разделе 4.2.

Верхняя меридиональная образующая вертикального РНВ имеет фокусы $(y,r)=(R,\pm c)$, а нижняя — $(-R,\pm c)$. При вращении получаются фокальные окружности радиуса c в плоскостях $y=\pm R$. В радиально смещённом построении соответствующие окружности имеют радиус R и осевые координаты $z=\pm c$. Эти множества характеризуют фокальные соотношения меридиональных образующих; из них не следует, что произвольные трёхмерные лучи или траектории газа сходятся к кольцу.

Поле нормалей связывает построение с газодинамикой. Для $X(y,\varphi)=[r\cos\varphi, y, r\sin\varphi]$ выберем $n=(e_r-r'e_\gamma)/\sqrt{(1+r'^2)}$, направленную наружу из газа камеры. Тогда стенка действует на этот газ силой давления $-p\,n\,dA$, где $dA=r\sqrt{(1+r'^2)}\,d\varphi\,dy$. Явная формула осевой силы стенки после интегрирования по азимуту приведена в разделе 3.2. Сила внутреннего газа на стенку имеет противоположный знак; действие наружного газа учитывается отдельно. Таким образом, геометрия изменяет передачу импульса давлением через множитель $r\,r'$ без дополнительной фокальной силы.

$$n = (e_r - r'(y)e_\gamma)/\sqrt{(1+r'(y)^2)}.$$

На рисунке 1 точный РНВ показан в меридиональном и трёхмерном представлениях вместе с намеренно деформированным РНВ и широким контрольным двойным конусом. Рисунок вводит полную вертикальную геометрию до определения рабочего нижнего усечения.

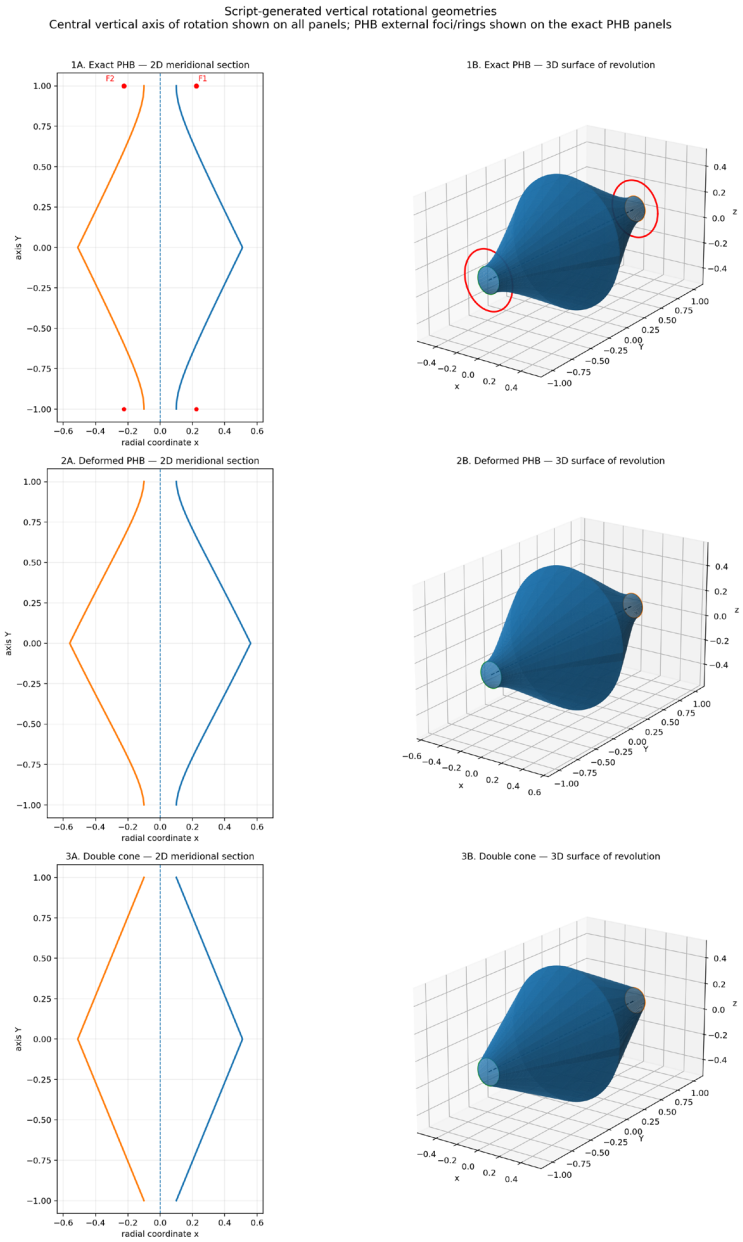

Рисунок 1. Исходный скриптовый лист вертикальных геометрий: верхний ряд показывает точный PHB в 2D и 3D, средний ряд — намеренно деформированный PHB, нижний — широкий контроль в виде двойного конуса. Реконструкция не применялась. Лист сохранён как наглядное продолжение структурного описания раздела 2 и как переход к пространству усечённых газодинамических геометрий.

2.2 Геометрия ZPHB

ZPHB строится отражением конечных меридиональных сегментов PHB до трёхмерной сборки. Для верхней ветви определим $A_+=(R,a)$, $B_+=(0,L)$ и $v=B_+-A_+=(-R,L-a)$. Для точки P родительской ветви её ортогональная проекция Q на прямую через A_+ и B_+ и зеркальный образ M(P) равны

$$Q = A + [(P-A)\cdot v/(v\cdot v)]v; \quad M(P) = 2Q - P, \quad v = B-A.$$

Нижняя ветвь отражается аналогично относительно симметричной хорды. После учета знаковых радиальных копий получаются четыре физических меридиональных сегмента

H1-H4. Поскольку евклидово отражение является изометрией, каждый сегмент остается частью точной классической гиперболы, а его фокусы являются точными образами родительских фокусов. Именно совокупность этих сегментов и их отображенных фокальных пар определяет ZPHB как составной аналитический объект.

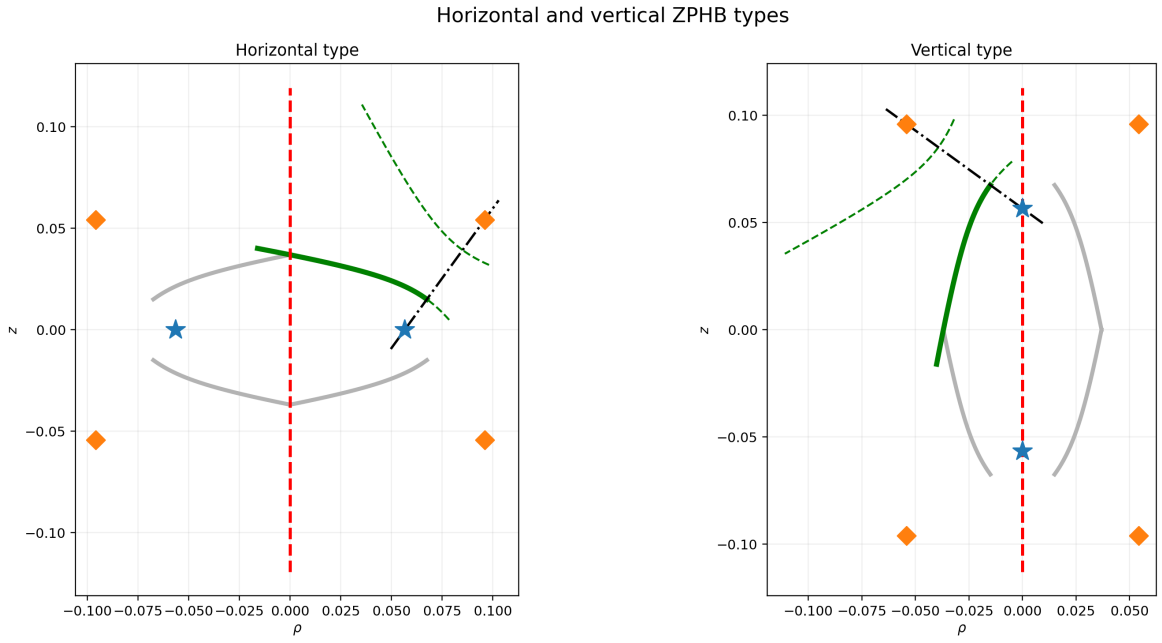

Рисунок 2. Меридиональные построения горизонтального и вертикального ZPHB. Слева — исходная горизонтальная конфигурация. Справа — переориентированная вертикальная конфигурация. Показанные ветви, оси и отображённые внутренние и внешние фокусы определяют два построения до вращения.

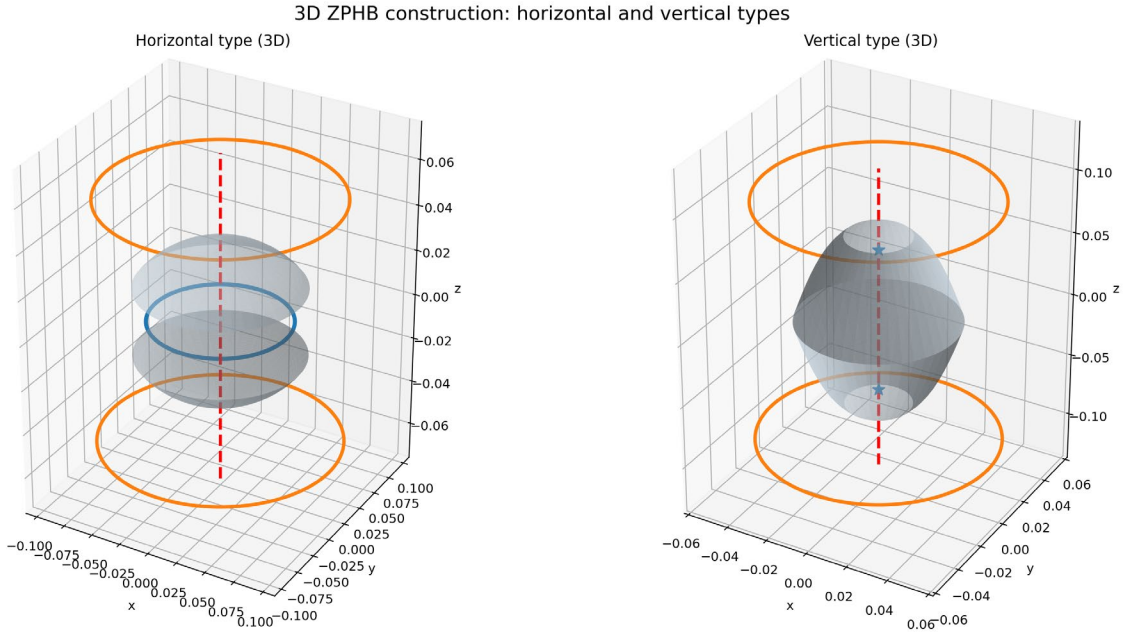

Рисунок 3. Трёхмерные реализации меридиональных конфигураций рисунка 2. В H-ZPHB внеосевой общий внутренний фокус порождает кольцо; в V-ZPHB внутренние фокусы лежат на оси устройства, а внешние внеосевые фокусы порождают окружности. Каждая реализация использует свою заданную ось вращения.

В газовых расчётах используется вертикальная реализация. Она получается преобразованием меридионального построения и последующим выбором установленной оси устройства для вращения. Поэтому рисунки 2 и 3 сравнивают разные правила трёхмерной сборки, а не одно готовое тело, наблюдаемое после пространственного поворота.

Формула отражения применима к произвольным концам хорды A и B, где v=B−A. Одна и та же изометрия применяется к каждому физическому гиперболическому сегменту и соответствующей паре фокусов родительской гиперболы. Так определяются все отражённые ветви и их фокальные образы без независимой подгонки контуров стенки.

Для строгого подсемейства с совпадающими фокусами остаток координаты внутреннего фокуса при напечатанных параметрах a=0,0618084429867, b=0,1340714574314 и R=1 составляет z_in≈1,09 × 10^(-14); относительная невязка равенства $(c−2a)R^2=c(L−a)^2$ составляет приблизительно 5,26 × 10^(-13). Это подтверждает евклидово отражение и условие согласования параметров независимо от газодинамической задачи. Данная величина не характеризует погрешность дискретизации стенки или движение газа к фокусу. Рабочая усечённая камера определяется после полного меридионального построения.

2.3 Условие общего фокуса и допустимая область параметров ZPHB

Условие совпадения фокусов определяет ограниченное подсемейство ZPHB, а не всякое зеркальное построение. Пусть d=L−a. Отражение верхнего родительского фокуса $F_+=(R,c)$ задаёт предполагаемый внутренний фокус. Поскольку $F_+−A_+=(0,c−a)$, отражённая точка находится по формуле отражения относительно прямой, приведённой в разделе 2.2.

Отражённый верхний фокус имеет координаты $F'_+=(R−2R\,d(c−a)/(R^2+d^2),\ 2a−c+2(c−a)d^2/(R^2+d^2))$, где d=L−a. Вторая координата представляет положение внутреннего фокального образа z_in.

Общая формула отражения относительно прямой имеет вид $P' = A + 2[(P−A)\cdot v]v/(v\cdot v) − (P−A)$; для верхней хорды здесь $A=A_+$ и $v=B_+−A_+$.

Отражение второго родительского фокуса F-=(R,-c) дает внешний виртуальный фокус:

$$F'_- = 2A + 2[(F_−−A)\cdot v]v/(v\cdot v) − F_-.$$

Нижний внутренний фокус является зеркальным относительно z=0 образом верхнего. Поэтому два внутренних фокальных образа совпадают тогда и только тогда, когда zin=0. После подстановки выражений для L и c получается ключевое условие общего фокуса:

$z_in = 2a−c + 2(c−a)(L−a)^2/[R^2+(L−a)^2]$.

$z_in=0 \Leftrightarrow (c−2a)R^2 = c(L−a)^2$. Это условие совпадения отражённых меридиональных фокусов, а не условие работы газодинамического клапана.

Точное совпадение фокусов связывает a, b и R. Введём безразмерные параметры k=b/a, $q_c=c/a=\sqrt{(1+k^2)}$, x=R/b. Тогда условие совпадения можно выразить только через k и x.

Введём $\chi=k^2(q_c−2)/q_c$. Поскольку $(L−a)/R=[\sqrt{(1+x^2)}−1]/(kx)$, условие совпадения фокусов эквивалентно равенству $[\sqrt{(1+x^2)}−1]/x=\sqrt{\chi}$.

При $0<\chi<1$ из предыдущего равенства следует $x=2\sqrt{\chi}/(1−\chi)$, то есть $R=2b\sqrt{\chi}/(1−\chi)$. Это конечное положительное решение; при $\chi\leq 0$ действительного положительного решения такого вида нет, а при $\chi\geq 1$ нет конечного положительного решения.

Из $0<\chi<1$ следует допустимая область: $q_c>2$ требует $k>\sqrt{3}$, а $\chi=1$ определяет единственную положительную верхнюю границу $k_{max}\approx 2{,}2707543184$. Следовательно, для строгого симметричного подсемейства с общим фокусом требуется $\sqrt{3}<b/a<k_{max}$. За пределами интервала зеркальные сегменты существуют, но строгому условию совпадения фокусов не удовлетворяют.

При любом $a>0$ и допустимом k остальные параметры фиксированы: $b=ka$, $R=2b\sqrt{\chi}/(1-\chi)$, $L=a\sqrt{[1+(R/b)^2]}$, $c=a\ q_c$. Произвольная тройка (a,b,R) не задаёт ZPHB с общим фокусом. За пределами интервала зеркальные сегменты также можно построить, но внутренние фокальные образы не совпадают.

2.4 Горизонтальный и вертикальный типы PHB/ZPHB

В горизонтальном построении вращение вокруг линии $\rho=0$ превращает внеосевой общий внутренний фокус в кольцо. В вертикальном газодинамическом построении меридиональные координаты переназначаются, а вторая осевая ветвь создаётся отражением. Два внутренних фокальных положения оказываются на оси устройства, тогда как внешние внеосевые образы порождают окружности. Выбор оси построения является частью геометрии; её изменение отличается от поворота уже готовой трёхмерной поверхности.

Газодинамический элемент использует вертикальную архитектуру, поскольку она естественным образом предоставляет верхний и нижний каналы на одной оси. Классификация на горизонтальный и вертикальный типы сохраняется, поскольку ZPHB — аналитическое правило построения нескольких трёхмерных архитектур по одной меридиональной зеркальной геометрии.

2.5 Отверстия и усечение рабочей камеры

Рабочая камера занимает область $y_{cut}\le y\le R$, где $-R\le y_{cut}<0$. Нижний срез усекает нижнюю ветвь. Верхнее отверстие сохраняет радиус a, а нижнее образуется пересечением заданной стенки с плоскостью среза. Рисунки 4–6 связывают полное построение с рабочими отверстиями и показывают, как усечение создаёт неодинаковые отверстия без отдельного профилированного сопла.

Безразмерные параметры $\alpha=a/R$, $\beta=b/R$ и $N=R/|y_{cut}|$ разделяют масштаб и форму. Параметр α задаёт относительный радиус верхнего отверстия, β меняет наклон гиперболических ветвей и связанную с ними фокальную геометрию, а N выбирает нижний срез. Изменение этих параметров одновременно меняет отношение площадей отверстий, объём камеры, нормали стенки и расстояния распространения; поэтому переходный отклик камеры не характеризуется одним отношением площадей.

Смысл усечения состоит в том, чтобы превратить симметричную аналитическую поверхность в двухпортовый переходный элемент, не добавляя отдельного сопла с независимой геометрией. Верхний порт остается терминальным отверстием исходной поверхности. Нижний порт возникает в той точке, где плоскость $y=y_{cut}$ пересекает ту же аналитическую ветвь. Следовательно, его радиус, локальный наклон стенки и положение относительно остальной камеры связаны с a, b, R и y_{cut} одним и тем же законом. Это важно для ГВИ: инженерная функция вводится не произвольным присоединенным каналом, а контролируемым выбором участка исходной аналитической границы.

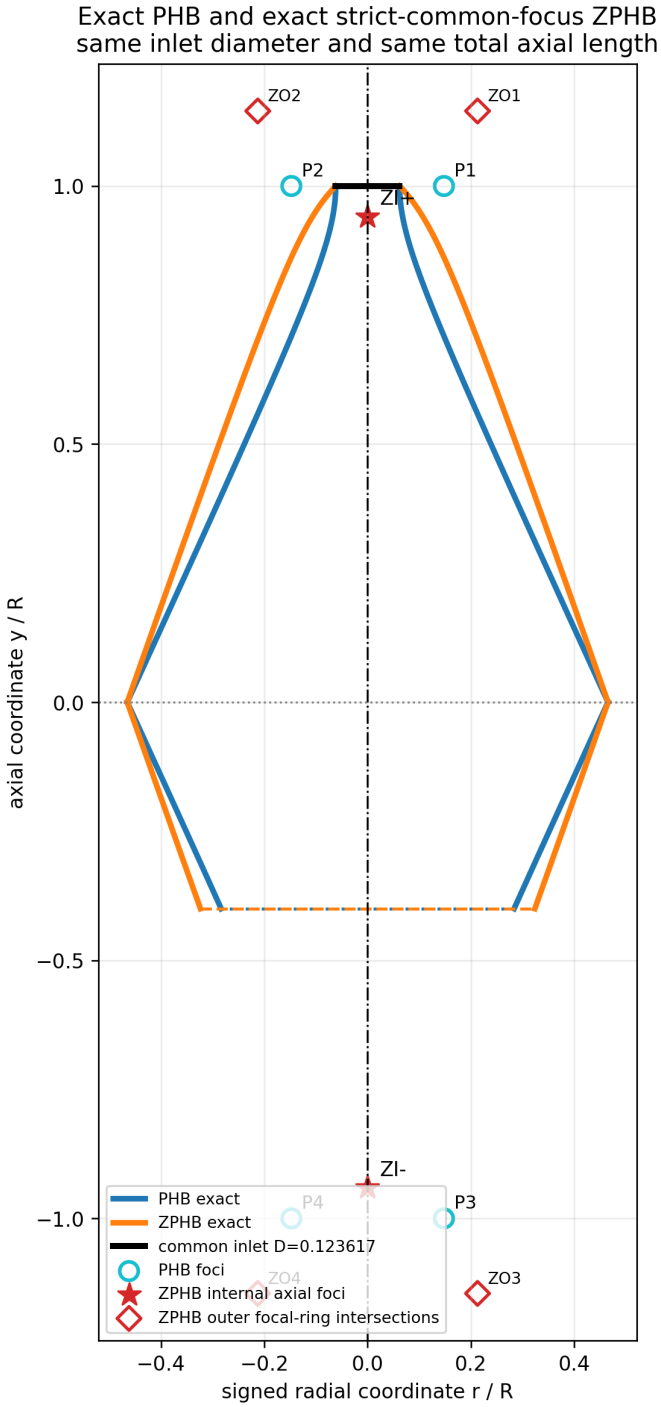

Рисунок 4. Исходное аналитическое построение полного PHB и вертикального ZPHB с общим фокусом, отображёнными фокусами и рабочим нижним срезом. PHB на этом рисунке является геометрическим родителем ZPHB и имеет b=0,1340714574. PHB основного сравнения течений имеет другое значение b=0,1236168860. Рисунок показывает построение, но не тождество параметров производственной расчётной пары.

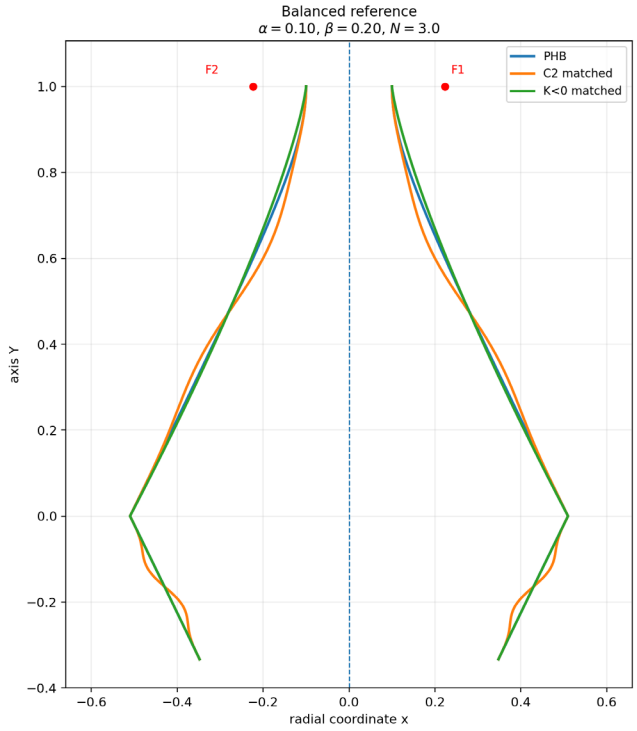

Рисунок 5. Исходная скриптовая сбалансированная геометрия PHB/контролей, показывающая один из рабочих вариантов нижнего среза и двухпортовой камеры.

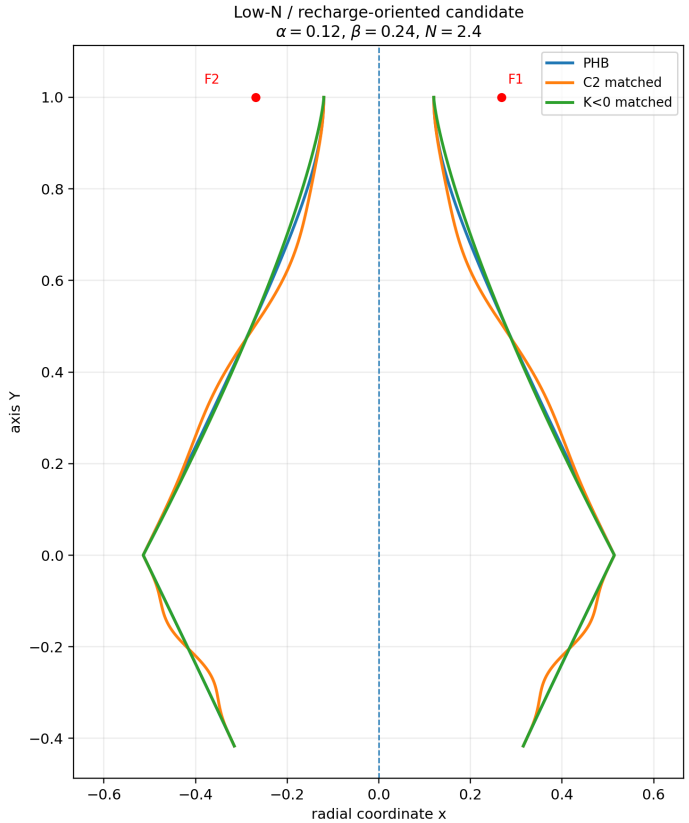

Рисунок 6. Усечённый PHB и контрольные профили с рабочим нижним срезом и асимметрией отверстий. Сохранённое исходное изображение иллюстрирует только геометрию и не представляет количественного результата течения.

2.6 Кривизна и точное меридиональное свойство отражения

Для гладкой ветви вертикального РНВ положим $\kappa=(R-|y|)/b$. Тогда $r''=a/[b^2(1+\kappa^2)^{3/2}]>0$. Гауссова кривизна поверхности вращения $K=-r''/[r(1+r'^2)^2]$ отрицательна на каждой гладкой открытой ветви и зависит от y. В зеркальном стыке y=0 односторонние наклоны различаются, поэтому классическая формула кривизны гладкой поверхности там неприменима.

В смещённой родительской меридиональной плоскости запишем P=(s,z), $s=R-\rho$. Гипербола имеет вид $z^2/a^2-s^2/b^2=1$, а её фокусы — $F\pm=(0,\pm c)$. На верхней ветви $|P-F-|-|P-F+|=2a$. Дифференцирование вдоль касательной означает, что $e--e+$, где $e\pm=(P-F\pm)/|P-F\pm|$, направлен по нормали к кривой. Поскольку $|e\pm|=1$, оператор зеркального отражения переводит e+ в e−. Следовательно, луч, направленный от одного фокуса, отражается в направлении от другого; последний является виртуальным источником в этой направленной формулировке. Отражение всей коники вместе с её фокальной парой сохраняет это тождество. Утверждение относится к меридиональному семейству лучей и не является теоремой для траекторий газа или общих косых лучей. [5]

Для единичной нормали $n=(e--e+)/|e--e+|$ выполняется $2(e+\cdot n)n=e+-e-$. Подстановка в $d_{out}=d_{in}-2(d_{in}\cdot n)n$ доказывает указанное направленное тождество. Таким образом, геометрическая проверка испытывает следствие, аналитически вытекающее из постоянства разности фокальных расстояний.

Прямая меридиональная проверка использует по 5 000 точек каждого профиля при a=b=0,5 и R=2. У РНВ 95-й процентиль углового рассогласования составляет $2{,}2264\times10^{-14}$ градуса, тогда как для гладкого профиля с нарушенным фокальным законом он равен 12,0788 градуса, а для согласованного контроля отрицательной кривизны — 51,5818 градуса. Это проверяет реализацию конического тождества отражения и отличает его от одной лишь гладкости или отрицательной кривизны. Параметры отличаются от параметров клапанной камеры, поэтому эти ошибки являются величинами геометрической верификации, а не показателями газодинамической эффективности.

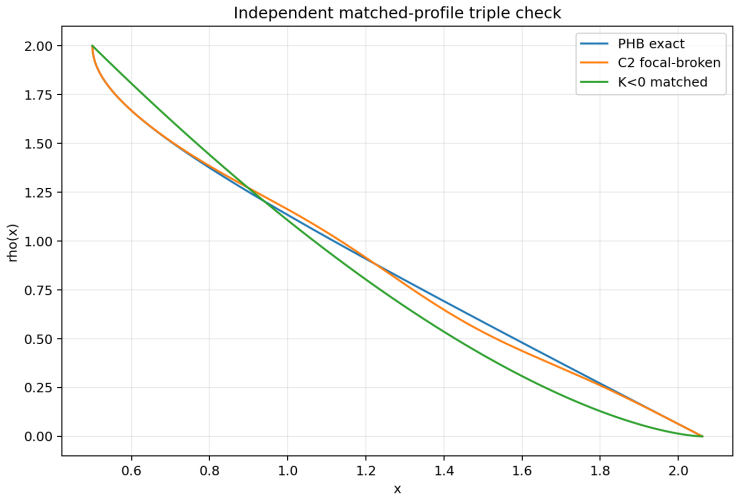

Рисунок 7. Аналитические профили, полученные прямым выполнением исходного геометрического аудита. РНВ, гладкий профиль с нарушенным законом и профиль отрицательной кривизны сравниваются при одинаковых параметрах аудита. Этот рисунок не является производственной геометрией клапана.

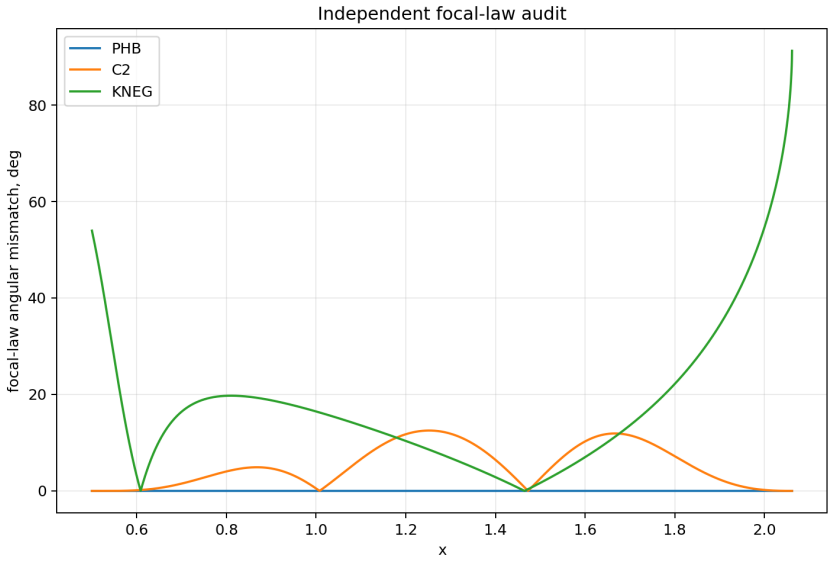

Рисунок 8. Угловые ошибки направленного меридионального фокального закона из исходного аудита. Ошибки PHB на уровне округления подтверждают тождество отражения; ненулевые ошибки контролей показывают, что ни гладкость, ни отрицательная кривизна сами по себе его не гарантируют.

2.7 Параметры вычисляемой камеры и её геометрического родителя

Основной газодинамический PHB использует R=1, a=0,0618084429867, b=0,1236168859734 и ycut=−0,4. ZPHB использует те же a, R и срез, но отражается от родителя с bparent=0,1340714574314. Следовательно, расчётное сравнение не является отражением именно того PHB, который служит контролем, при фиксированных a,b,R. Обе камеры имеют верхнюю площадь 0,0120017749692 и полную длину 1,4. Нижние площади равны соответственно 0,2947451137922 и 0,3288574537881.

Для PHB интегрирование по отдельным ветвям даёт $V=\pi a^2\{R+|ycut|+[2R^3-(R+ycut)^3]/(3b^2)\}=0{,}483852592791$. Представленный профиль ZPHB даёт $V\approx0{,}4870942351$, что согласуется с интегрированными объёмами ячеек. В собственной нормировке HLLC принято $\rho_0=1$, поэтому объёмы численно равны начальным массам в единицах этого решателя. В отдельной нормировке OpenFOAM $\rho_0=1{,}4$, и начальная масса каждой камеры равна $M_0=1{,}4V$; при вычислении массовых характеристик используется соответствующая нормировка. Интегрирование должно учитывать центральный стык: одна квадратура на пересекающем его интервале может смещать геометрическую сводку. Объём ZPHB примерно на 0,670%, а площадь нижнего отверстия на 11,5735% больше, чем у сравниваемого PHB.

Для полной вертикальной ZPHB без усечения при этих параметрах отображённые внутренние осевые фокусы находятся при $y/R\approx\pm0{,}940456$. Рабочий срез $ycut/R=-0{,}4$ исключает нижний фокус из газовой камеры; верхний остаётся внутри. Утверждения о паре внутренних фокусов относятся к полному построению, а не к двум внутренним фокусам, сохраняющимся в усечённом клапане.

3 Сжимаемая газовая динамика как нелинейная волново-потоковая система

Переход от геометрии к физике выполняется без введения специальной геометрической силы. Рабочая среда описывается обычными осесимметричными уравнениями Эйлера, а PHB/ZPHB входит в задачу через форму области, локальные нормали стенки и

расположение открытых портов. Поэтому проверяется не новая механика газа, а способность аналитически организованной границы менять временную траекторию стандартной нелинейной волново-потоковой системы.

Рабочая среда описывается осесимметричными невязкими уравнениями Эйлера для идеального газа. Это одновременно задача течения и нелинейная волновая задача: импульс давления возбуждает волны сжатия и разрежения, могут возникать ударные и контактные структуры, поле давления многократно взаимодействует с криволинейной стенкой, а масса переносится через открытые порты. Поэтому физическим объектом является связанное волново-потоковое состояние, а не набор баллистических частиц.

$$\partial_t\rho + (1/r)\partial_r(r\rho u_r) + \partial_\gamma(\rho u_\gamma) = 0.$$

$$\partial_t(\rho u_r) + (1/r)\partial_r[r(\rho u_r^2+p)] + \partial_\gamma(\rho u_r u_\gamma) = p/r.$$

$$\partial_t(\rho u_\gamma) + (1/r)\partial_r(r\rho u_r u_\gamma) + \partial_\gamma(\rho u_\gamma^2+p) = 0.$$

$$\partial_t E + (1/r)\partial_r[r\, u_r(E+p)] + \partial_\gamma[u_\gamma(E+p)] = 0.$$

Для компактной записи введём вектор консервативных переменных $U=[\rho, \rho ur, \rho uy, E]^T$ и физические потоки Fr и Fy. Тогда осесимметрическая задача записывается как $\partial U/\partial t+(1/r)\partial(rFr)/\partial r+\partial Fy/\partial y=Saxi$. Источник Saxi содержит только стандартные члены цилиндрической системы координат; дополнительный член, зависящий от «фокусов» PHB/ZPHB, в уравнения не вводится. Поэтому гипотеза о роли геометрии проверяется без искусственной силы, навязывающей требуемый отклик.

Полная энергия на единицу объёма равна $E=p/(\gamma-1)+\rho(ur^2+uy^2)/2$. Скорость звука c_s и локальное число Маха M являются производными диагностическими величинами; эволюция определяется законами сохранения массы, двух компонент импульса и энергии. На неподвижной непроницаемой стенке PHB/ZPHB задано условие скольжения $u\cdot nG=0$. Аналитическая геометрия G входит в физическую задачу через положение границы и поле её нормалей nG(s), а не через изменение уравнения состояния или законов сохранения.

$$c_s = \sqrt{(\gamma p/\rho)}, \qquad M = |u|/c_s.$$

В собственных расчётах HLLC оба отверстия являются внутренними газовыми интерфейсами между камерой и явно рассчитанной внешней областью; атмосферное состояние задаётся лишь на удалённых границах. В серии OpenFOAM G2–G4 камера рассчитывается без внешнего резервуара, а отверстия представлены открытыми граничными патчами. В третьей постановке OpenFOAM v1.0.3 внешняя газовая область вновь разрешена явно, и отверстия представляют собой внутренние сечения непрерывной газовой области. Результаты этих трёх постановок нельзя объединять в одну межрешательную последовательность сходимости.

Импульсное возбуждение задаётся локальным увеличением внутренней энергии в камере. Никакая движущаяся поверхность и никакое внешнее временное управление клапаном не вводятся. Если появляется последовательность переключения, она возникает из совместной эволюции волны давления, разрежения, отражений от стены и изменения отношения давлений между камерой и резервуарами.

3.1 Начальное состояние, возбуждение и безразмерные переменные

До возбуждения плотность и давление однородны в камере и внешней области: $\rho=\rho_0$, $p=p_0$, скорость равна нулю. Затем энергия вводится в заданную сферическую область. PR обозначает целевое отношение давления внутри источника к фоновому давлению, а не

среднее отношение давлений всей камеры. Безразмерное время определяется как $\tau=tc_0/R$, где $c_0=(\gamma p_0/\rho_0)^{1/2}$.

В собственном решателе HLLC оба отверстия являются внутренними интерфейсами между камерой и явно рассчитанным внешним газом, а атмосферное состояние задаётся на удалённых границах. В камерной постановке OpenFOAM G2–G4 отверстия представлены открытыми граничными патчами. В отдельной серии OpenFOAM v1.0.3 они вновь являются внутренними сечениями непрерывной расчётной области с внешним газом. Ни в одной из этих постановок момент переключения не предписывается: его определяет рассчитанная эволюция газа при собственных граничных условиях каждой серии.

Безразмеризация вводится не для сокрытия физических масштабов, а для отделения геометрического механизма от конкретного размера лабораторного образца. При выборе R как характерной длины, ρ0 и p0 как опорных атмосферных величин и c0=√(γ p0/ρ0) как характерной скорости вводятся r*=r/R, y*=y/R, u*=u/c0, ρ*=ρ/ρ0, p*=p/p0 и τ=t c0/R. В идеальной невязкой модели это означает, что геометрически подобные камеры с одинаковыми безразмерными параметрами имеют одинаковую безразмерную динамику. В реальном газе эта масштабная подобность будет нарушаться вязкостью, теплообменом и турбулентностью, что специально вынесено в ограничения.

Для собственного согласованного с границей решателя $R=\rho_0=p_0=1$, единица скорости $u_{ref}=\sqrt{(p_0/\rho_0)}$, а $c_0/u_{ref}=\sqrt{\gamma}$. Единица массового расхода равна $\rho_0R^2u_{ref}$, массы — ρ_0R^3, энергии — p_0R^3, импульса — p_0R^3/u_{ref}. Графики расходов и импульсы HLLC используют эти единицы, а их временная ось задаётся безразмерным временем τ. Следовательно, расход, нормированный на $\rho_0c_0R^2$, равен расходу в собственных единицах решателя, делённому на $\sqrt{\gamma}$. Для OpenFOAM используется другая опорная нормировка, описанная отдельно в разделе 4.

Начальное давление всей камеры не равно $PR\cdot p_0$. В основной паре сферический источник радиуса 0,105R занимает примерно один процент объёма камеры. При PR=20 начальное среднее давление камеры составляет приблизительно $1{,}1904p_0$ для PHB и $1{,}1891p_0$ для ZPHB. Локальный вклад энергии возбуждает возмущение; все последующие события в портах являются результатом газовой динамики. Подмена давления источника средним давлением камеры означала бы существенно другую постановку.

Для ячейки Ω_i положим $f_i=|\Omega_i\cap B_s|/V_i$, где B_s — сфера $r^2+y^2\le(0{,}105R)^2$. Начальная энергия $E_i=p_0/(\gamma-1)+[(PR-1)p_0/(\gamma-1)]f_i$ при неизменной плотности и нулевом импульсе. Пересечение источника с ячейкой интегрируется в физических координатах и нормируется на точный объём сферы $V_s=4\pi(0{,}105R)^3/3$. При PR=20 значения $V_s=0{,}00484904826082$ и $\Delta E=0{,}230329792389$ выражены в единицах кода. Согласованным возбуждением основной пары PHB–ZPHB является одинаковая введённая энергия, а не одинаковое среднее давление камеры.

3.2 Механизм связи геометрии и физики

При раннем повышении давления ориентация стенки и неодинаковые отверстия влияют на передачу импульса давлением и распределение выпуска. Неподвижная непроницаемая стенка не совершает работы давления, поскольку $u\cdot n=0$. По мере распространения начального возмущения волны разрежения и отражённые возмущения могут снижать давление и изменять знак одного портового расхода раньше другого. Аналитическая граница меняет расстояния распространения и распределённые силы давления. На языке

ГВИ она формирует отображение решения от одинакового возбуждения к зависящему от геометрии переходному отклику.

Предлагаемая интерпретация состоит в том, что начальный выпуск, последующее расширение и возвращающиеся возмущения изменяют давление и импульс у отверстий в разные моменты. Взаимодействие с криволинейной стенкой и неравные отверстия поэтому могут приводить к развороту одного суммарного расхода раньше другого. Такое объяснение согласуется с сохранёнными интегральными историями, однако пространственные характеристические пути не сохранены; оно не выдаётся за непосредственно наблюдённую реконструкцию путей волн.

Геометрия влияет на переходный режим через три взаимосвязанных механизма. Во-первых, давление передаёт импульс через поле нормалей стенки. При внешней относительно газа нормали n сила стенки на газ равна $dF=-p\ n\ dA$. Для полной поверхности вращения интегрированная по азимуту осевая составляющая равна $F_{\gamma,\text{стенка}\to\text{газ}}=2\pi\int p(y)r(y)r'(y)dy$, где интегрирование ведётся по гладким участкам стенки. Это сила стенки на внутренний газ, а не тяга всего устройства; полный силовой баланс должен учитывать внешнее давление и поток импульса.

Во-вторых, возмущения распространяются на конечные расстояния. Локальная характеристическая скорость равна $u_n\pm c_s$, поэтому изменение геометрии стенки и пути распространения может изменять время прихода к отверстиям. При положительной направленной скорости приближённая оценка времени вдоль допустимого пути Γ равна $t_path\approx\int_\Gamma ds/[u_n(s)+c_s(s)]$; это эвристическая оценка, а не точная реконструкция характеристик нестационарного многомерного течения. Умножение на c_0/R даёт безразмерное время τ_path.

Третий вклад связан с площадями отверстий и конечным объёмом камеры. Мгновенный портовый расход зависит от локальных плотности, нормальной скорости и площади, а эволюция среднего давления — от запаса массы и энергии. Изменение G обычно одновременно меняет нормали, площади срезов, объём и пути распространения. Поэтому наблюдаемое переключение рассматривается как совокупный эффект геометрии; исключительно фокальная интерпретация потребовала бы дополнительных согласованных контролей.

Причинный переход имеет вид G → {nG(s), Atop, Abottom, VG, геометрия путей} → SG → {p,u} → {ṁtop,ṁbottom}. Ни один шаг этой цепочки не требует новой силы или изменения известных законов газодинамики.

3.3 Подробный принцип работы переходного пассивного элемента

Рассматривается один переходный отклик на один импульс. При начальном выпуске среднее давление камеры превышает атмосферное, а локализованное возмущение вызывает течение наружу. Геометрия влияет на обмен импульсом и выпуск через два отверстия, в том числе на раннюю селективность нижнего выпуска и верхнюю утечку.

По мере развития ранних импульсов выпуска верхний суммарный расход может быть малым при продолжающемся нижнем выпуске. Такая совокупность состояний встречается и до прихода основного верхнего выброса к отверстию, и при последующем затухании. Её нельзя автоматически трактовать как герметизацию или непрерывное запирание отверстия либо как непосредственно визуализированный барьер давления.

В согласованной серии OpenFOAM 13 первый устойчивый разворот верхнего потока не равнозначен наступлению смешанного состояния. В момент первого верхнего впуска

нижний поток в проверенных случаях также направлен внутрь. Позднее появляется отдельный эпизод противоположных знаков ($\dot{m}_{top}<0$ при $\dot{m}_{bottom}>0$), когда верхнее отверстие впускает газ, а нижнее одновременно выпускает его. Эти события необходимо различать; они демонстрируют переходную функцию двух постоянно открытых портов без механического затвора.

При поздней релаксации нижний выпуск также затухает; возможны обратное течение или частичное наполнение. Для установления переходной клапанной функции это состояние не обязано обеспечивать полный цикл перезарядки двигателя. Продемонстрированный результат состоит в воспроизводимой последовательности ранних и промежуточных событий, её зависимости от геометрии и сохранении на исследованных сетках.

Стадии классифицируются по интегральным портовым расходам. При раннем выпуске $\dot{m}_{top}>0$ и $\dot{m}_{bottom}>0$. Подмножество малого суммарного верхнего расхода удовлетворяет $|\dot{m}_{top}|\le\varepsilon$ при $\dot{m}_{bottom}>\varepsilon$. За устойчивым верхним разворотом следуют эпизоды противоположных знаков с $\dot{m}_{top}<-\varepsilon$ и $\dot{m}_{bottom}>\varepsilon$. Здесь ε — порог массового расхода, определённый в разделе 5.1. Эти состояния не обязаны образовывать непрерывные последовательные интервалы. Поздняя релаксация включает затухание нижнего выпуска и возможное обратное течение.

Выпуск: $\dot{m}_{top}>0$, $\dot{m}_{bottom}>0$; подмножество малого суммарного верхнего расхода: $|\dot{m}_{top}|\le\varepsilon$, $\dot{m}_{bottom}>\varepsilon$; эпизод противоположных знаков: $\dot{m}_{top}<-\varepsilon$, $\dot{m}_{bottom}>\varepsilon$.

Такая классификация подчёркивает, что «клапанное» действие является состоянием динамической системы, а не положением механического органа. Камера не закрывает верхний порт физически. Смена знака его интегрального расхода, возможный промежуточный двусторонний впуск и позднейший смешанный режим — разные события. Именно конечная длительность зарегистрированного смешанного эпизода отличает его от случайного пересечения нуля.

Таким образом, слово «программируемый» используется здесь в строгом пассивном смысле. В устройстве нет программы во времени. «Программа» закодирована в G: в распределении нормалей, кривизне, длинах путей и апертурах. При одинаковом I разные G переводят систему через разные траектории Y(t). Это и есть конкретная газодинамическая реализация общего операционного принципа ГВИ.

Одного среднего давления в камере недостаточно для определения расходов через отверстия: существенны локальные импульс и давление у каждой апертуры. Поэтому свидетельством временного разделения служат различные истории расходов. Их знаки измерены непосредственно, тогда как внутреннее распределение, которое их формирует, требует сохранённых пространственных полей.

Вклад давления на стенке распределён в пространстве. Для внутреннего газа его осевая проекция содержит множитель $p\ r\ r'$; соответствующая реакция на стенку имеет противоположный знак. Форма также меняет расстояния, на которых возмущения взаимодействуют с отверстиями. Эти совместные эффекты объясняют, почему одного совпадения апертур недостаточно для выделения отдельного геометрического механизма.

3.4 Геометрическая фокальная структура и газодинамика

Меридиональное фокальное тождество ограничивает поле нормалей аналитического родительского построения. Оно задаёт строго определённое семейство для газодинамической проверки, однако исследуемый газ подчиняется динамике Эйлера, а не отображению зеркальных лучей. Близкая деформация меняет это тождество одновременно

с наклоном, кривизной и геометрией путей. Поэтому её отклик проверяет распределённый профиль, но не выделяет фокальность как независимую физическую причину.

Точный фокальный закон организует геометрическое семейство, но не заменяет решение уравнений Эйлера. Газ не является ансамблем независимых зеркальных лучей. Обоснованная причинная цепочка имеет вид: точная геометрия гиперболических ветвей → взаимосвязанные нормали и пути распространения → нелинейная эволюция давления и импульса → измеряемая временная последовательность состояний портов. Чтобы отнести различие именно к условию общего фокуса, необходимо также контролировать объём, площади отверстий и другие взаимосвязанные параметры. При неполном согласовании статья устанавливает зависящий от геометрии эффект PHB/ZPHB, а не теорему об исключительно фокальной причинности.

3.5 Редуцированный геометрический волновой индикатор для ветви PHB

Для гладкой ветви вертикальной PHB $r(y)=a[1+(R-|y|)^2/b^2]^{1/2}$, поэтому площадь поперечного сечения $A(y)=\pi a^2[1+(R-|y|)^2/b^2]$. Вне зеркального сопряжения непосредственно получается точное тождество $2AA''-(A')^2=4\pi^2a^4/b^2>0$. В стандартной одномерной редукции волнового уравнения для канала переменного сечения с заменой $p=\psi/\sqrt{A}$ возникает геометрический член
$Vg=(\sqrt{A})''/\sqrt{A}=[2AA''-(A')^2]/(4A^2)=1/\{b^2[1+((R-|y|)/b)^2]^2\}>0$.

Это тождество аналитически отличает гладкую ветвь PHB от идеального кусочно-линейного биконуса, для которого $\sqrt{A}$ линейна на каждом прямом участке и непрерывная часть Vg там равна нулю. Оно не доказывает, что Vg или фокальность сами по себе вызывают нелинейное клапанное состояние: полное решение Эйлера включает конечную амплитуду волн сжатия и разрежения, градиенты площади, локальное ускорение, ударные структуры и взаимодействие с отверстиями и сопряжениями. Значение тождества — в наличии точного геометрического маркера, который можно сопоставлять с полным нелинейным откликом.

4 Численная постановка и верификация

В доказательную базу входят три конфигурации газовой расчётной области. Во-первых, собственный согласованный решатель HLLC явно рассчитывает газ по обе стороны неподвижной бесконечно тонкой стенки PHB/ZPHB; отверстия являются внутренними интерфейсами камеры с внешним газом. Во-вторых, серия OpenFOAM G2–G4 рассчитывает только клиновидную внутреннюю область камеры с открытыми граничными патчами на обоих отверстиях. В-третьих, серия OpenFOAM v1.0.3 явно включает окружающую газовую область, так что отверстия являются внутренними сечениями непрерывной среды. Во всех случаях аналитическая стенка остаётся непроницаемой, а физические отверстия — открытыми. Численные сравнения должны учитывать разные определения внешней области, источника возбуждения и граничных условий.

Доказательная база получена двумя различными конечно-объёмными реализациями, которые нельзя описывать как единый решатель. Собственный решатель на согласованной сетке использует уравнения Эйлера для сжимаемого газа, межъячеечный поток HLLC, явную схему Эйлера и типичный CFL=0,30. Отдельные расчёты OpenFOAM Foundation 13 shockFluid используют плотностной центрально-противопоточный поток Куганова, ограничители Minmod/MinmodV, сектор 5° и maxCo=0,08. Приведённые далее HLLC-тесты относятся к первому решателю; аудиты сетки, источника и сохранения в OpenFOAM — ко второму. [1,6,13–15]

Нормировка и протокол сравнения зависят от решателя. Для HLLC исходное состояние задаётся $\rho_0=p_0=1$, $c_0=\sqrt{\gamma}$, $R=1$. Для нормированной модели идеального газа OpenFOAM принято $p_0=T_0=c_0=1$ и $\rho_0=\gamma=1{,}4$. Нельзя смешивать два безразмерных масштаба расхода: по площади $\varepsilon^*A=\varepsilon/(\rho_0 c_0 R^2)$ и по начальной массе камеры $\varepsilon^*M=\varepsilon R/(M_0 c_0)$, где $M_0=\rho_0 V_{chamber}$. Если лишь для сравнения принять одинаковый абсолютный порог $\varepsilon=10^{-3}$ и опорный объём PHB $V=0{,}483852592791$, то ε^*A составляет $8{,}4515\times10^{-4}$ (HLLC) или $7{,}1429\times10^{-4}$ (OpenFOAM), а ε^*M — соответственно $1{,}74672\times10^{-3}$ и $1{,}47625\times10^{-3}$. Это перевод между нормировками, а не свидетельство применения единого правила регистрации событий. Исторические времена переключения сохраняют пороги, критерии длительности и разрешение соответствующих решателей. Нормировку источника, реальные сеточные объёмы, площади портов, внешние границы и частоту записи следует проверять отдельно. Для PHB времена примерно 1,62–1,66 (HLLC) и 1,03–1,05 (OpenFOAM), а для ZPHB — 1,59–1,60 и 0,78–0,79 показывают качественное совпадение события, но не количественную межрешательную сходимость. Нужен согласованный контрольный расчёт.

4.1 Собственный согласованный с границей решатель HLLC: дискретизация и шаг по времени

Обозначение сетки nr×nz задаёт число радиальных ячеек внутри камеры, $0\le\eta\le1$, и осевых ячеек между ycut и R; это не полный размер внешней сетки. Стенка является точной гранью $\eta=1$. Осевые разбиения включают ycut, 0 и R, поэтому ни одна ячейка не пересекает зеркальный стык. Внешняя область добавляет 2nr радиальных ячеек от $\eta=1$ до 3 и nr растянутых ячеек от 3 до η_{max}; осевые ячейки над и под портами имеют шаг, близкий к осевому шагу камеры. На оси симметрии $r=0$ площадь радиальной грани равна нулю.

$$d/dt \int_\Omega U\,dV + \Sigma_f \int_{A_f} F(U)\cdot n_f\,dA = \int_\Omega S\,dV.$$

Источниковый член предыдущего консервативного баланса S_axi соответствует обычным геометрическим членам осесимметричной постановки; отдельная объёмная сила, определяемая фокусами PHB, в уравнения не вводится.

На неподвижной стенке отражение нормальной скорости обеспечивает условие непротекания со скольжением. На удалённых внешних границах атмосферное состояние входит в задачу Римана. Физические отверстия являются внутренними границами между ячейками камеры и внешнего газа. Явный шаг ограничен условием $\Delta t=CFL\cdot\min_i[V_i/\Sigma_{f\in\partial\Omega_i}\ A_f(|u_n,f|+c_f)]$, где V_i — положительный объём ячейки, а в сумме используются характерные акустические скорости граней; для производственных расчётов CFL=0,30.

Реализация OpenFOAM shockFluid (отдельный численный метод). Результаты, полученные в OpenFOAM Foundation 13 shockFluid, используют плотностную конечно-объёмную центрально-противопоточную схему с потоком Kurganov, ограничителями Minmod/MinmodV, осесимметричным клиновым сектором 5° и maxCo=0,08. В этих расчётах не применяются поток HLLC и явный шаг с CFL=0,30 собственного решателя. Согласование добавленной энергии проверяется по фактическим объёмам исходных ячеек OpenFOAM; баланс массы и сеточное уточнение анализируются в соответствующих сериях. Абсолютные времена переключения и пороговые значения зависят от нормировки решателя, поэтому совпадение характеризует существование и порядок событий, но не количественно согласованные времена или сошедшуюся величину интенсивности смешанного состояния.

4.2 Постановка OpenFOAM shockFluid

Результаты Foundation 13 shockFluid получены в отдельной сжимаемой постановке на основе центрально-противопоточной схемы с потоком Kurganov, ограничителями Minmod/MinmodV, осесимметричным клином 5° и maxCo=0,08. Это не HLLC и не шаг Forward Euler с CFL=0,30 собственного решателя. Согласование добавленной энергии проверяется по фактическим объёмам исходных ячеек OpenFOAM; для соответствующей серии отдельно приведены балансовые и сеточные проверки. Абсолютные времена событий и пороги зависят от нормировки решателя, поэтому сопоставление относится к существованию и порядку событий, а не к полностью согласованному времени или сошедшейся амплитуде смешанного режима.

4.3 Сохранение состояния покоя и осесимметрический источник

В цилиндрических координатах давление входит и в радиальный поток, и в геометрический источник. При несогласованной дискретизации даже состояние $\rho=\rho_0$, $p=p_0$, $u=0$ может начать самопроизвольно ускоряться. Такой дефект особенно опасен здесь: малое паразитное течение способно имитировать портовый разворот. Сохранение однородного покоя поэтому является необходимым условием достоверности эффекта, а не только общей проверкой качества кода.

В исправленной дискретизации источник радиального импульса определяется из той же согласованной геометрии граней, что и консервативная дивергенция потоков. В проверочных расчётах атмосфера сохраняет $\max|u|/c_0$ порядка 10^{-16} на нескольких геометриях и сетках. Последующий портовый разворот возникает после импульсного возбуждения, а не из-за встроенного численного дрейфа.

Для согласованных ячеек $r=\eta$ $f(y)$ интегральные компоненты внешней радиальной грани равны $Ar=2\pi\eta\int f(y)dy$ и $Ay=-\pi\eta^2[f(y_1)^2-f(y_0)^2]$. Коэффициент осесимметрического радиального источника равен $Gi=Ar,out+Ar,in$. В покое поток давления и pGi точно компенсируются, а замыкание векторных площадей осевых граней компенсирует осевую нагрузку давления. В нелинейном расчёте каждая криволинейная грань представляется одной интегральной эффективной нормалью, поэтому метод остаётся приближением конечного разрешения даже при точном аналитическом профиле.

4.4 Открытые границы и атмосферный резервуар

Кампания OpenFOAM Foundation 13 G2–G4 рассчитывает газ только внутри камеры в виде осесимметричного клина 5°. Оба отверстия заданы граничными расчётными патчами (давление: waveTransmissive; скорость: pressureInletOutletVelocity; температура: inletOutlet); стенка рассматривается как невязкая, с условием скольжения. Это не расчёт явно разрешённых внешних резервуаров: атмосферное состояние задаётся открытыми граничными условиями. В отдельно описанных расчётах собственного решателя HLLC с внешней областью газ снаружи камеры моделируется явно; объединять эти постановки с G2–G4 нельзя. Таким образом, последовательность знаков расходов подтверждена в каждой указанной численной модели, а независимость эффекта от реализации открытой границы требует самостоятельной проверки.

Во внутренних расчётах собственного HLLC-решателя газ моделируется и в камере, и в явно разрешённой внешней области вплоть до удалённых границ, связанных с атмосферным состоянием задачи Римана. В отдельной серии OpenFOAM G2–G4 рассчитывается газ внутри камеры, а её отверстия являются граничными патчами с заданными открытыми граничными условиями; явные внешние резервуары там не

разрешены. Поэтому результаты этих двух постановок нельзя объединять в одну проверку сходимости по внешней области.

4.5 Балансы массы и энергии

Для открытого контрольного объёма сохранение проверяется вместе с накопленными граничными потоками. Невязку массы можно записать как $\varepsilon_M = |M(t) - M(0) + \int_0^t \Sigma j_m dt| / M_{ref}$ при согласованной ориентации потоков; аналогично определяется невязка полной энергии. В завершённых допустимых случаях невязки имеют порядок ошибок округления интегрального баланса, а ограничители положительности не срабатывают. Это не подтверждает всю отсутствующую физику, но исключает крупную численную утечку массы или энергии как объяснение переключения.

4.6 Проверки численной корректности

Таблица 1. Проверки численной корректности собственного согласованного с границей решателя HLLC; они не являются отдельной проверкой решателя OpenFOAM.

Проверка	**Статус**	**Смысл**
Открытая топология / нет кольцевого фланца	Пройдено	Газ по обе стороны тонкой оболочки
Поток HLLC для равных состояний	Пройдено	Согласованность до машинной точности
Однородное состояние покоя, 4 геометрии × 3 сетки	Пройдено	max |u|/c0 ~ 10^-16
Труба Сода	Пройдено	L1 ошибка плотности 0,00751
Перенос контактного разрыва	Пройдено	L1 ошибка плотности 0,01207
Импульс портов относительно атмосферы в покое	Пройдено	Ноль в пределах численной точности
Срабатывания ограничители положительности	0 в завершённых чистых случаях	Без применения ограничителей

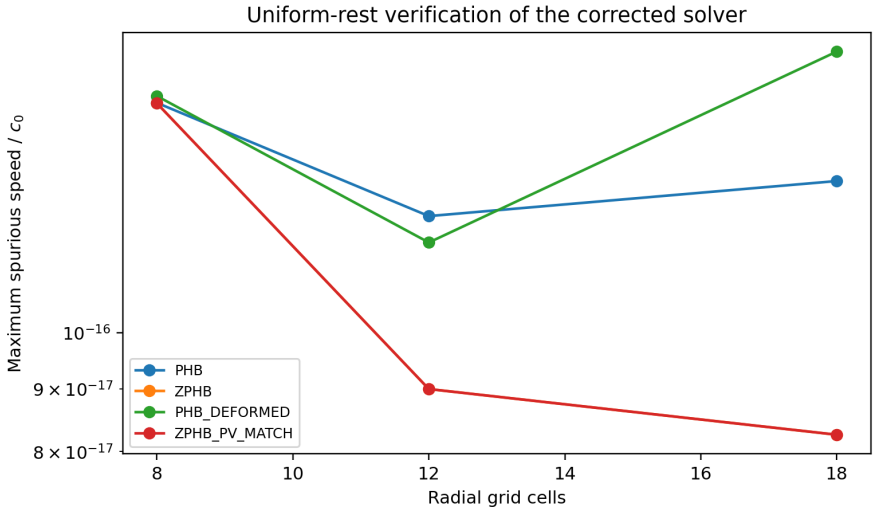

Рисунок 9. Проверка однородного покоя в дополнительной формулировке решателя. Остаточные скорости взяты из результатов её верификации.

Проверки таблицы 1 относятся к разным возможным источникам ложного эффекта. Аудит открытой топологии подтверждает сообщение портов с внешним газом. Проверка HLLC при UL=UR устанавливает согласованность численного потока. Проверка покоя выявляет возможное самоускорение из-за геометрии. Задача Сода проверяет совместное воспроизведение ударной волны, контактного разрыва и веера разрежения, а отдельная задача переноса контакта — движение контактной структуры. Нулевой избыточный импульс портов в покое проверяет вычитание атмосферного вклада. Вместе эти проверки направлены на дефекты, способные создать ложный разворот расхода.

Для равных состояний необходимо FHLLC(U,U)=F(U); для однородного покоя — U(t)=const; для открытой атмосферы без возмущения — интегральный избыточный импульс должен быть нулевым. Тест Сода не является моделью исследуемой камеры, но проверяет базовую способность решателя корректно разделять три стандартных типа гиперболических волн, которые присутствуют и в переходном импульсном процессе.

Эти тесты являются численной верификацией, а не экспериментальной проверкой. Они не заменяют учёт вязкости, теплопроводности, турбулентности, трёхмерных возмущений или конечной толщины стенки. Их прохождение поддерживает вывод о наличии эффекта в проверенной модели Эйлера, но не более сильный вывод о доказанной работоспособности реального устройства.

4.7 Постановка OpenFOAM с явно разрешённой внешней газовой областью

Отдельная завершённая серия OpenFOAM Foundation 13 shockFluid, созданная скриптом PHB_VALVE_IRA_EXTERNAL_GAS_THREE_CASES_V1_0_3.py, использует непрерывную согласованную с геометрией сетку газа, охватывающую камеру и явно рассчитываемые верхнюю, нижнюю и боковую внешние области. В отличие от серии G2–G4 с граничными условиями непосредственно на отверстиях, оба отверстия здесь являются внутренними сечениями сетки, а расходы интегрируются по внутренним граням. Эта постановка отличается и от собственного решателя HLLC с внешней газовой областью: результаты разных решателей нельзя автоматически считать сеточной или граничной сходимостью друг друга.

Три завершённых случая включают точную PHB, точную ZPHB и биконус, согласованный с PHB по объёму камеры, осевой длине и радиусам обоих отверстий. Рассчитывается невязкий идеальный газ (γ=1,4, $p_0=T_0=c_0$=1, ρ_0=1,4) в 5-градусном клине; вся область содержит 13 680 ячеек, в том числе 2352 ячейки камеры, интервал наблюдения $0\le\tau\le4$. Дискретно внесённая энергия импульса одинакова: 0,003199024894 в клине; однако локальные эффективные отношения давления источника различаются (около 19,000, 21,704 и 20,178 для PHB, ZPHB и биконуса). Поэтому сравнение является равноэнергетическим, но не опытом с тождественным локальным максимумом давления. Для всех трёх сеток проверка checkMesh пройдена.

Положительный расход через порт означает истечение из камеры. Нормированные расходы $q^*_j=\dot{m}_j R/(M_{ref} c_0)$ вычисляются при M_{ref}, равной массе камеры в первом сохранённом кадре (τ=0,025). При ε=0,001 принимаются связные смешанные эпизоды с $q^*_{верх}<-\varepsilon$ и $q^*_{низ}>\varepsilon$ и длительностью не менее 0,02. Показатель $J=\int I_{mix}\min(-q^*_{верх},q^*_{низ})d\tau$ интегрируется методом трапеций отдельно внутри каждого принятого эпизода. Эти определения позволяют сравнивать три случая v1.0.3, но не делают автоматически одинаковыми времена событий и ошибки разных исторических решателей.

5 Операционное определение переходного переключения

Поскольку устройство не содержит движущегося затвора, его состояние нельзя определять положением механической детали. Нужна событийная физическая классификация, вычисляемая из сохраняемых величин. Для каждого порта j используется интегральный массовый поток $\dot{m}_j=\int_{A_j}\rho(u\cdot n_j)dA$ с положительным знаком наружу из камеры. Положительный верхний поток означает верхний выброс, отрицательный — верхний впуск; положительный нижний поток означает нижний выброс, отрицательный — обратный приток снизу.

Раздельные расходы наружу и внутрь позволяют отличать одновременные встречные составляющие потока в сечении отверстия от его суммарного знакового расхода. При неотрицательных раздельных расходах суммарные верхний и нижний расходы равны

$$\dot{m}_j(t) = \int_{A_j} \rho(u\cdot n_j)\, dA.$$

Для осесимметричного круглого порта интеграл принимает вид $\dot{m}_j=2\pi\int\rho u_n r\, dr$ по открытому сечению. Это определение зависит от газодинамических расходов, а не от пассивных меток, и применимо независимо от интерпретации этих меток.

$$\dot{m}_j(t) = 2\pi\int_0^{\{r_j\}} \rho u_n\, r\, dr.$$

5.1 Устойчивое событие переключения

Один переход расхода через ноль не определяет регистрируемое событие переключения. В сводках собственного решателя использованы первые три последовательных вычислительных шага, на которых результирующий внешний расход через верхний порт ниже $-\varepsilon$, где $\varepsilon=10^{-3}$ в его единицах ($\rho_0=p_0=R$=1). Безразмерный порог по площади составляет $\varepsilon^*A=\varepsilon/(\rho_0 c_0 R^2)=8{,}4515\times10^{-4}$. Номер шага обозначен k, а $\tau(k)$ — безразмерное время. Такой критерий соответствует разной физической длительности при разных шагах. Повторные проверки сохранённых историй выполнялись по трём последовательным сохранённым отсчётам при указанном пороге (разделы 7.2 и 7.4). Фиксированный временной интервал устойчивости к опубликованным событиям не применялся.

Для стандартизированной новой серии OpenFOAM 13 принят нормированный критерий $q^*_{top}<-\varepsilon$ и $q^*_{bottom}>+\varepsilon$, где основной порог ε=0,001, а связный смешанный эпизод

сохраняется только при длительности не менее $\Delta\tau_{min}=0{,}02$. По исходным временным историям дополнительно пересчитаны $\varepsilon\in\{0{,}0005;\ 0{,}001;\ 0{,}002;\ 0{,}004\}$ и $\Delta\tau_{min}\in\{0;\ 0{,}02;\ 0{,}05\}$. Эти новые события и величины J нельзя без пересчёта отождествлять с ранее опубликованными таблицами, использовавшими иные ограничения по времени, порогам и численным схемам.

При нормировке по массе камеры $q^*=\dot{m}R/(M_0c_0)$ порог ε преобразуется в $\varepsilon^*M=\varepsilon R/(M_0c_0)$, где $M_0=\rho_0 V_{chamber}$. От порога по площади $\varepsilon^*A=\varepsilon/(\rho_0c_0R^2)$ он отличается множителем $R^3/V_{chamber}$. Для опорного объёма PHB и $\varepsilon=10^{-3}$ исключительно как пример получаем $\varepsilon^*M=1{,}74672\times10^{-3}$ (HLLC) или $1{,}47625\times10^{-3}$ (OpenFOAM), тогда как $\varepsilon^*A=8{,}4515\times10^{-4}$ или $7{,}1429\times10^{-4}$ соответственно. Для ZPHB требуется собственная начальная масса камеры. Правило регистрации событий OpenFOAM и использованные ранее пороги q^* должны считываться из исходных постановок. Здесь не утверждается, что расчёты обоих решателей заново обработаны при едином ε^*M; времена сохраняют исходные пороги и шаги записи.

5.2 Смешанный двухпортовый режим

Множество Imix содержит времена, при которых верхний суммарный расход ниже $-\varepsilon$, а нижний выше $+\varepsilon$. Каждая связная компонента является отдельным эпизодом противоположных знаков с индексом j. Эпизод заканчивается при нарушении любого условия. Задержка событий $\Delta\tau_{lag}$ между первыми нижним и верхним разворотами равна непрерывной длительности разнонаправленного режима только тогда, когда оба знаковых условия выполняются на всём промежутке. В нескольких сохранённых рядах присутствует промежуточный верхний выпуск, поэтому задержка событий и связная длительность представлены отдельно.

5.3 Интегральные метрики направленности

Направленность оценивается до первого устойчивого верхнего разворота. Селективность нижнего выпуска равна полной вышедшей через нижнее отверстие массе, делённой на сумму полных вышедших масс двух отверстий. Ранняя верхняя утечка равна полной вышедшей через верхнее отверстие массе, делённой на начальную массу камеры M_0. Показатель нижнего переноса при малом суммарном верхнем расходе интегрирует нижний выпуск только на предшествующем переключению множестве $|\dot{m}_{top}|\le\varepsilon$ и $\dot{m}_{bottom}>\varepsilon$; он является условным переносом при малом суммарном верхнем расходе, а не измерением закрытия или единого непрерывного запирания.

Пусть Q_j^+ и Q_j^- — неотрицательные полные массовые расходы наружу и внутрь. Тогда $\dot{m}_j=Q_j^+-Q_j^-$. При ts — времени первого устойчивого верхнего переключения — определим $M_j^+(t_s)=\int_0^{t_s}Q_j^+dt$, $S_b=M_b^+/(M_b^++M_t^+)$, $L_t=M_t^+/M_0$. Условный нижний перенос равен $M_{b,low}/M_0=\int_0^{t_s}Q_b^+\mathbb{1}_{\{\mathscr{L}\}}dt/M_0$, где $\mathscr{L}=\{t\le t_s:|\dot{m}_t|\le\varepsilon,\dot{m}_b>\varepsilon\}$, а $\mathbb{1}_{\{\mathscr{L}\}}$ — индикатор этого множества, отличный от геометрической длины L. При интегрировании трапециями пара отсчётов учитывается, только если оба принадлежат $\mathscr{L}$. Эти определения задают нормировку и выборку для таблиц 3 и 6.

Локализованный вклад энергии запускает переходный выпуск. Основное событие верхнего переключения определяется установленным отрицательным порогом расхода и числом последовательных шагов. Подмножество малого суммарного верхнего расхода может состоять из отдельных интервалов, а одновременные верхний впуск и нижний выпуск могут повторяться после прерываний. Следующая последовательность обобщает основные состояния отверстий, не утверждая непрерывность каждого промежуточного интервала:

Для проверенной новой серии последовательность событий может включать: начальный выпуск через оба порта → переходные знаковые изменения → первый верхний впуск при ещё сохраняющемся нижнем впуске → отдельный, более поздний смешанный эпизод (верхний впуск / нижний выпуск) → релаксация. Последовательность не обязательно монотонна и может содержать повторные эпизоды.

Наиболее информативно смешанное состояние $\dot{m}_{top}<0$ и $\dot{m}_{bottom}>0$. Оба порта геометрически открыты постоянно, но в течение конечного временного окна выполняют разные функции. Именно поэтому эффект называется переходным переключением, а не статическим диодом потока.

В причинных кампаниях OpenFOAM знаковые расходы дополнительно нормируются как $q^*=qR/(M_0c_0)$. Сила разнонаправленного состояния задаётся скалярной метрикой $J=\int I_{mix}\min(-q^*_{top},q^*_{bottom})d\tau$. Величина J неотрицательна, равна нулю при отсутствии mixed-sign интервала и взвешивает интервал по меньшему из одновременно существующих потоков впуска и выпуска. Она используется только как компактная сравнительная характеристика; наличие события, времена, длительность и диагностические параметры давления рассматриваются отдельно, поэтому вывод не опирается на одну метрику J.

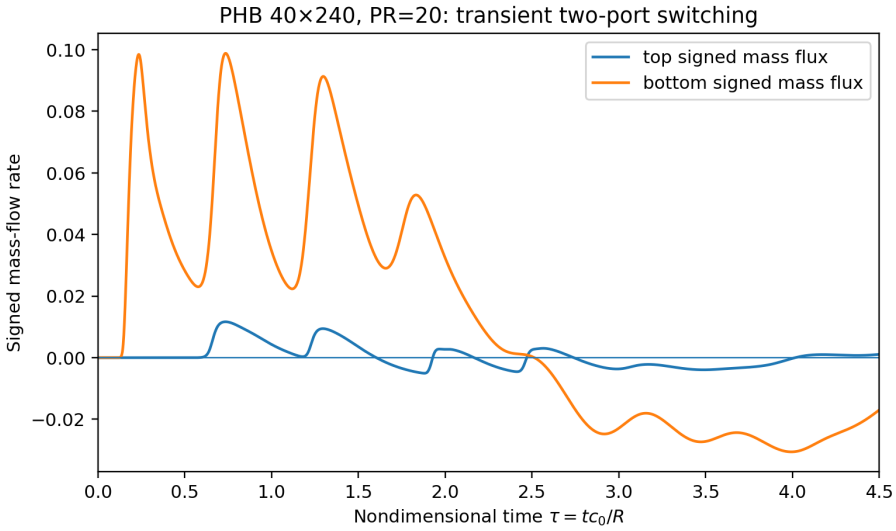

Рисунок 10. Истории знаковых расходов PHB при PR=20 на сетке 40×240 в дополнительном пересчёте. Положительные значения означают выпуск, отрицательные — впуск. За верхним разворотом следуют интервалы продолжающегося нижнего выпуска.

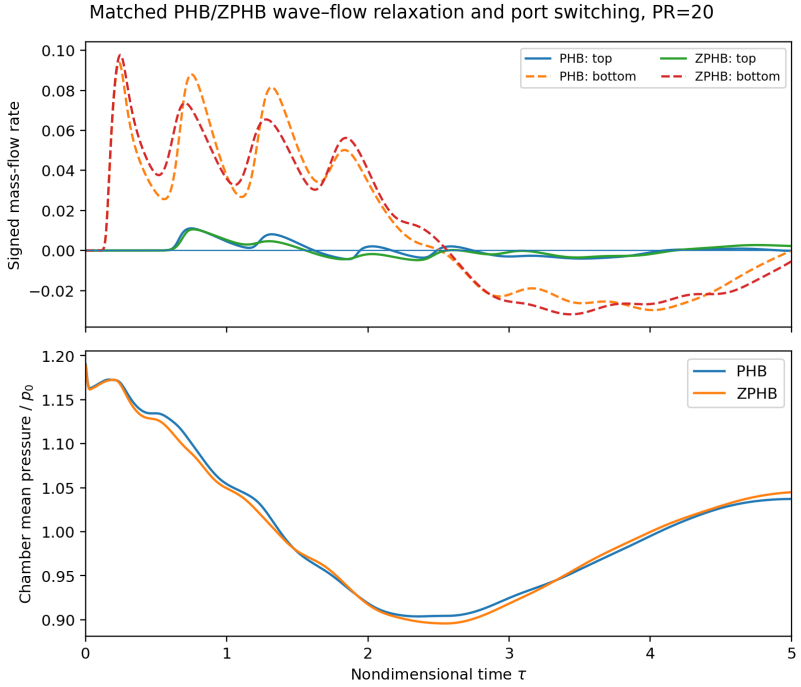

Рисунок 11. Последовательность событий по завершённым историям PHB/ZPHB: выпуск, его ослабление и состояние малого суммарного верхнего расхода, верхний разворот, разнонаправленный интервал впуска и выпуска, поздняя релаксация.

6 Семейство геометрий и причинные контроли

Причинная проверка требует нескольких контролей, потому что один контроль не способен исключить все альтернативные объяснения. Далекая прямостенная геометрия отвечает лишь на широкий вопрос о роли формы. Близкая деформация PHB проверяет чувствительность к точному профилю. ZPHB проверяет аналитически заданное преобразование исходной геометрии. Специальное согласование объема и площади порта необходимо, чтобы отделить тонкий специфический для данной геометрии эффект от тривиального изменения интегральных размеров.

Сравнения позволяют различить существование переключения и его специфичность. Переключение и у точного, и у деформированного PHB показывает, что переходный режим не является исключительным свойством точного профиля. Однако систематические изменения времени переключения, утечки и направленности демонстрируют чувствительность к форме границы. Подтверждённое причинное утверждение относится к распределённой геометрии, а не к отдельному фокальному инварианту.

Контроли отвечают на разные вопросы. Близкая деформация PHB сохраняет апертуры, но меняет распределённый профиль стенки и объём. Зеркальное построение ZPHB меняет аналитическую структуру границы и её фокальную архитектуру. Межгеометрический контроль был разработан для приближения ZPHB к интегральным размерам PHB, однако завершённого рабочего результата для него нет. Два дополнительных внутригеометрических контроля сохраняют собственные отверстия каждого представителя и приближённо согласуют его объём, нарушая точный профиль. Количественно используются только сравнения с завершёнными записями течения.

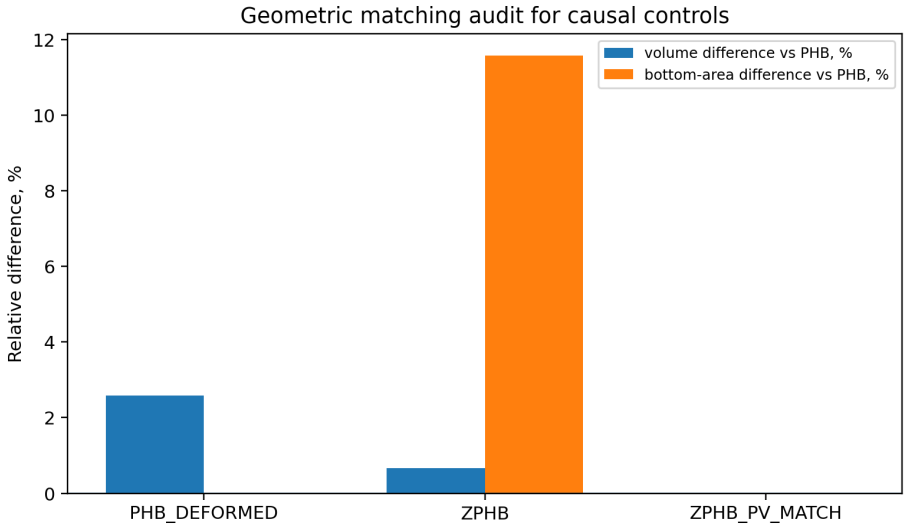

Рисунок 12. Созданное рабочим скриптом геометрическое сравнение дополнительной серии. Близкая деформация PHB сохраняет отверстия и изменяет распределённый профиль стенки; построение ZPHB документирует аналитически преобразованную геометрию. Рисунок сохранён из предыдущей проверенной статьи без реконструкции.

В завершённой паре PHB–ZPHB имеется существенное рассогласование: у ZPHB площадь нижнего отверстия приблизительно на 11,57% больше, а объём камеры — на 0,67% больше. Поэтому различия PHB–ZPHB характеризуют два аналитических устройства, но не доказывают, что изменения вызваны одной фокальной структурой. Это ограничение явно учитывается в интерпретации.

6.1 Что именно уравнивается в каждом контроле

Близкая деформация PHB в дополнительной серии сохраняет обе апертуры, но меняет объём камеры приблизительно на 2,58%. Основное сравнение PHB и ZPHB имеет одинаковые верхнюю апертуру, осевую длину и рабочий срез; у ZPHB площадь нижнего отверстия приблизительно на 11,57% больше, а объём — на 0,67%. Кроме того, отражённый родитель имеет другой параметр b, чем сравниваемый PHB. Эти условия определяют сравнение двух аналитических устройств, а не отражение при фиксированных родительских параметрах или однофакторную проверку фокальности.

Близкие контроли PHB задаются функцией $r_\delta(y)=r_{PHB}(y)[1+\delta \sin^2(\pi s)\sin(2\pi s)]$, где $s=y/R$ при $y\geq 0$ и $s=-y/|y_{cut}|$ при $y<0$. В дополнительной серии $\delta=0{,}10$; в контролях при конкретных параметрах $\delta=\pm 0{,}02$ и $\delta=0{,}10$ для более сильной деформации. Возмущение сохраняет радиусы концов и первые производные каждой ветви. Коэффициент δ задаёт амплитуду возмущения, а не равномерное процентное изменение радиуса.

Контрольный двойной конус задаётся кусочно-линейно: $r_{cone}(y)=L+(a-L)y/R$ при $y\geq 0$ и $r_{cone}(y)=L+[r_{cut}-L](-y)/|y_{cut}|$ при $y<0$, где $r_{cut}=r_{PHB}(y_{cut})$. Поэтому он сохраняет радиусы верхнего и нижнего отверстий и центральный радиус PHB, тогда как его прямые ветви меняют объём и локальные нормали. Этот прямостенный контроль совпадает с PHB по радиусам отверстий и центральному радиусу, но в общем случае не по объёму. Его нельзя отождествлять с отдельным биконусом, согласованным по объёму и отверстиям для единой серии G2–G4 (раздел 11.6); показатели J различных протоколов не взаимозаменяемы.

Причинная программа контролей опирается на завершённые внутрисемейные сравнения, сохраняющие рабочие порты и существенно уменьшающие рассогласование объёма. Именно эти контроли используются далее как рабочие данные чувствительности к профилю при тех же уравнениях и возбуждении.

6.2 Уровни причинного утверждения

Различаются четыре уровня интерпретации: наблюдение состояния противоположных знаков расходов; сохранение при численных изменениях и изменениях возбуждения; систематическая зависимость от выбранной геометрии; исключительное отнесение к определённому геометрическому инварианту. Завершённый корпус поддерживает первые три уровня в исследованной модели и условиях. Контроли также показывают, что точная фокальность не требуется для переключения в более широком наборе исследованных двухпортовых камер. Они не выделяют фокальность как единственную причину количественных различий.

6.3 Контроли с одинаковыми отверстиями и приближённо согласованными объёмами

Каждый точный представитель сопоставляется с близким профилем, сохраняющим его собственные верхнее и нижнее отверстия и рассчитанным на согласование объёма камеры. Контроли обозначены PHB-PV и ZPHB-PV; PV означает согласование отверстий и объёма. Их фактические остаточные различия непрерывных объёмов указаны ниже. Каждое устройство сравнивается со своим контролем, а не контроль ZPHB с основным PHB.

Для каждого точного профиля rG контроль PV задаётся как $r_{G,PV}(y)=r_G(y)+A_1\sin(2\pi\xi)+A_2\sin(\pi\xi)$, где $\xi=(y-y_{cut})/(R-y_{cut})$. В единицах R=1 для PHB $A_1=0{,}045$ и $A_2\approx-0{,}0197745823$, а для ZPHB $A_1=0{,}075$ и $A_2\approx-0{,}0281365506$. Оба синусоидальных слагаемых обращаются в нуль на двух отверстиях. Записанные контроли сохраняют коэффициенты, выбранные исходной единой 12-точечной квадратурой Гаусса — Лежандра на всём интервале; интегрирование с разделением даёт ненулевые остатки объёма, указанные далее.

Независимое интегрирование с разделением в центральном стыке даёт объёмы PHB и PHB-PV 0,483852592791 и 0,483930319204, то есть относительное различие 0,016064%. Для представленных профилей ZPHB и ZPHB-PV соответствующие объёмы приближённо равны 0,487094235 и 0,487188779 при относительном различии 0,019410%. Оба отверстия сохранены с численной точностью. Эти остатки возникают из-за неразделённой квадратуры, использованной для калибровки компенсационного коэффициента, а не из-за последующего сеточного представления. Они значительно меньше различия 2,58% для более широкой деформации PHB, но согласование объёмов остаётся приближённым.

Записанные переходные процессы соответствуют фактическим контрольным профилям с указанными конечными остатками объёма. Они пригодны для проверки чувствительности при установленном приближённом согласовании, тогда как сравнение при точно равных объёмах потребовало бы отдельно построенного и рассчитанного контроля.

На обзорных сетках 12×72 и 18×108 при PR=20 и на сетке 12×72 при PR=40 точные PHB и ZPHB переключаются раньше собственных PV-контролей во всех шести парных сравнениях. Это нельзя распространять на универсальное преимущество точной поверхности: дальнейшее уточнение контроля ZPHB меняет его временной режим. Поэтому таблица служит обзорной демонстрацией чувствительности к геометрии, а не доказательством превосходства фокальной поверхности.

Таблица 2. Времена переключения точных профилей и близких PV-контролей. Оба отверстия согласованы; остаточные различия объёма составляют 0.016064% для PHB и 0.019410% для ZPHB. Отрицательное Δτ означает более раннее первое устойчивое переключение точного профиля. Эти обзорные сетки не устанавливают асимптотическую сходимость различий.

Точная геометрия	Сетка	PR	τsw точный	τsw контроль	Δτ точный−PV
PHB	12×72	20	1,7201	1,8030	−0,0828
PHB	18×108	20	1,6792	1,7176	−0,0384
PHB	12×72	40	1,5914	1,6785	−0,0871
ZPHB	12×72	20	1,6338	1,7594	−0,1256
ZPHB	18×108	20	1,6140	1,7317	−0,1178
ZPHB	12×72	40	1,5113	1,6511	−0,1399

6.4 Сеточное поведение точной ZPHB и близких профилей

Для точной ZPHB первое устойчивое верхнее переключение происходит при τsw=1,6338, 1,6140, 1,6012 и 1,5892 на сетках 12×72, 18×108, 27×162 и 40×240. Последовательные сдвиги плавно уменьшаются при уточнении. Близкие профильные контроли сохраняют клапанное действие и изменяют временную траекторию, показывая, что время переключения и фазовая организация являются настраиваемыми распределённо-геометрическими наблюдаемыми величинами.

Программа согласованных контролей тем самым устанавливает геометрически зависимую временную организацию: аналитический представитель задаёт воспроизводимую опорную траекторию, а контролируемые изменения профиля сдвигают время событий, длительность фаз и интегральный перенос при тех же уравнениях.

7 Основное переходное переключение PHB

Первый вопрос состоит в том, воспроизводится ли последовательность «выпуск → затухание → разворот → впуск» в заданной модели. Порядок событий при разных отношениях давлений источника и сохранение режима при уточнении сетки дают более сильное свидетельство, чем одна доля позднего наполнения.

Завершённые случаи PHB начинаются с выпуска, после чего развиваются устойчивая смена направления верхнего потока и связные интервалы верхнего впуска при нижнем выпуске. В нескольких случаях задержка между первыми верхним и нижним переключениями больше первого связного эпизода противоположных знаков, поскольку между эпизодами впуска верхний выпуск может возобновляться. Критерий существования относится к конечным связным эпизодам, а не к предполагаемому непрерывному интервалу между двумя первыми событиями.

В завершённой основной серии верхний порт PHB меняет направление при безразмерных временах 1,736 для PR=10, 1,657 для PR=20 и 1,543 для PR=40 на сетке 27×162. Увеличение отношения давлений источника ускоряет переключение при сохранении

последовательности выпуска, затухания, разворота и впуска. Этот результат является тенденцией для исследованных воздействий, а не общим законом для любой амплитуды импульса.

Наблюдаемая зависимость τsw(PR) монотонна в исследованных трёх точках: увеличение начального отношения давлений от 10 до 40 уменьшает безразмерное время верхнего переключения. Это согласуется с тем, что более сильный начальный импульс ускоряет раннюю разгрузку и формирование последующей волны разрежения. Однако три значения PR не позволяют выводить универсальный степенной закон; в статье фиксируется только воспроизводимый тренд в проверенном диапазоне.

Таблица 3. Времена событий и направленность РНВ в завершённых допустимых расчётах.

Сетка	PR	Время переключения τ	Селективность внижнего выпуска	Ранняя утечка сверху/M0	Нижний выпуск при малом верхнем расходе/M₀
27×162	10	1,7365	0,926965	0,006099	0,028318
27×162	20	1,6572	0,935263	0,009822	0,044342
27×162	40	1,5434	0,936291	0,014308	0,072460
40×240	20	1,6380	0,934283	0,009931	0,047687
60×360	20	1,6209	0,933413	0,010002	0,048373

7.1 Сеточная устойчивость времени события

Численная диффузия может смещать время переключения. Поэтому сеточная проверка рассматривает и сохранение события, и изменение его безразмерного времени. Наличие события на последовательно уточняемых сетках подтверждает его существование в исследованной численной модели, тогда как смещение времени характеризует остаточную чувствительность к дискретизации; само по себе это не является доказательством предельного решения при нулевом шаге сетки.

При PR=20 время переключения меняется с 1,6572 на сетке 27×162 до 1,6380 на 40×240 и 1,6209 в завершённом уточнении РНВ 60×360. Основные показатели направленности также сравнительно устойчивы: селективность нижнего выпуска меняется приблизительно на 0,105% между двумя более грубыми сетками основной серии и остаётся близкой к 0,933 на сетке 60×360. Это существенно устойчивее малых долей пассивных меток, которые сходятся медленнее и потому не используются как основное определение элемента.

Относительное изменение τsw составляет приблизительно 1,16% между 27×162 и 40×240 и 1,04% между 40×240 и 60×360, если знаменателем служит значение на более грубой сетке. Систематическое смещение указывает на остаточную чувствительность к дискретизации, тогда как основное событие и конечный эпизод противоположных знаков сохраняются. Эти сетки подтверждают сохранение события, но сами по себе не устанавливают асимптотическую границу ошибки для полного переходного процесса. [7]

Четырёхгеометрическая серия расширяет последовательность PHB до сетки 12×72 и повторяет случай 18×108. При PR=20 значения τsw равны 1,7201, 1,6792, 1,6572, 1,6380 и 1,6209 для сеток 12×72, 18×108, 27×162, 40×240 и 60×360. Последовательные относительные изменения составляют около 2,38%, 1,31%, 1,16% и 1,04%. Повторение значения 18×108 в двух сериях проверяет воспроизводимость выполнения и диагностики при одном численном ядре. Это не является верификацией независимым решателем.

7.2 Дополнительная серия: смешанные эпизоды и моменты по сохранённым отсчётам

Отдельный пересчёт PHB с сохранением каждого двадцатого шага подтверждает раздельные эпизоды впуска и выпуска на трёх сетках. При $\varepsilon=10^{-3}$ и требовании трёх последовательных сохранённых отсчётов первое верхнее переключение происходит при τ=1,68316, 1,65995 и 1,63948 на сетках 18×108, 27×162 и 40×240. Длительности первого непрерывного эпизода со встречными знаками составляют приблизительно 0,25596, 0,26877 и 0,28245. Первые нижние переключения происходят около τ=2,537–2,541; интервал относительно верхнего переключения около 0,85–0,90 не является длительностью непрерывного смешанного режима.

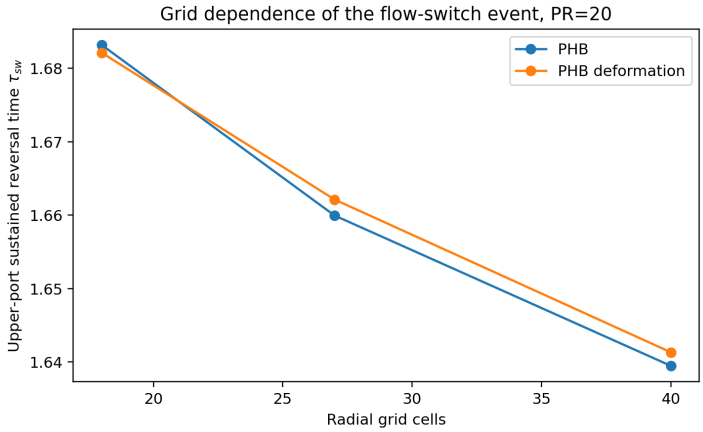

Рисунок 13. Время первого устойчивого разворота PHB и сравнение с близкой деформацией на сетках 18×108, 27×162 и 40×240. У обоих профилей событие сохраняется; его время продолжает смещаться при уточнении.

7.3 Конечный интервал смешанных знаков

Смешанный интервал имеет отдельный физический смысл. После начала верхнего впуска камера еще продолжает отдавать массу через нижний порт. Поэтому система на конечном времени реализует пространственно разделенные функции — впуск и выброс — через два постоянно открытых отверстия. Такой режим нельзя описать единственным коэффициентом сопротивления.

Для будущего эксперимента Δτmix является одним из наиболее прямых наблюдаемых параметров: его можно определить двумя синхронными расходомерами без восстановления полного внутреннего поля. Это делает интервал с противоположными знаками расходов не только вычислительной метрикой, но и практически проверяемым признаком предлагаемого класса.

В отдельной исходной серии замыкания при PR=20, в которой сохранялся каждый десятый шаг, длительность первого непрерывного эпизода встречных потоков составляет приблизительно 0,2720 на 27×162, 0,2833 на 40×240 и 0,2916 на 60×360 для PHB. Позднее возникают другие эпизоды, разделённые возвратом к верхнему истечению. Сохранение

первого эпизода при уточнении сетки поддерживает существование режима, но детали более поздней истории остаются чувствительными к дискретизации.

7.4 Событийные интервалы и разрешение временных отсчётов

В таблице 4 различаются первые связные эпизоды от задержек событий на основе сохранённых рядов при одном пороге. Значения являются границами по отсчётам, а не интерполированными пересечениями нуля. Основные сводки вычислялись на каждом шаге решателя, тогда как сохранённые истории прорежены в десять раз; дополнительная серия сохраняет каждый двадцатый шаг. Поэтому небольшие отличия восстановленных времён переключения и фазовых интегралов ожидаемы. Полные пошаговые ряды основной серии не сохранены, поэтому их скалярные сводки нельзя побитово воспроизвести из прореженных файлов.

Таблица 4. Первые непрерывные смешанные эпизоды при PR=20 по сохранённым историям исходной серии замыкания (в отличие от дополнительного пересчёта в разделе 7.2).

Геометрия	Сетка	Начало τ	Конец τ	Длительность Δτ
PHB	27×162	1,65833	1,93034	0,27201
PHB	40×240	1,63860	1,92193	0,28333
PHB	60×360	1,62101	1,91263	0,29162
ZPHB	27×162	1,60178	2,50412	0,90234
ZPHB	40×240	1,58929	1,96444	0,37515

Длительность первого эпизода PHB постепенно меняется при уточнении. Однако для ZPHB при PR=20 первый связный по порогу эпизод меняется от приблизительно 0,9023 на сетке 27×162 до 0,3751 на 40×240, поскольку уточнённый ряд верхнего расхода прерывает впуск. На мелкой сетке также присутствует последующий эпизод. Таким образом, более ранний первый разворот устойчив в исследованной паре, тогда как единое непрерывное окно впуска ZPHB пока не является сеточно устойчивым. Это различие не позволяет использовать благоприятный результат первого разворота как доказательство сходимости всего цикла.

7.5 Проверка смешанного состояния PHB в OpenFOAM при одинаковой энергии возбуждения

Строгая завершающая кампания OpenFOAM повторно проверила центральное состояние решателем Foundation 13 shockFluid на трёх согласованных сетках G1=70×18, G2=98×24 и G3=126×30. Для каждой возбуждаемой геометрии реальные объёмы исходных ячеек считывались из OpenFOAM, после чего приращение давления перенормировалось так, чтобы полная добавленная внутренняя энергия совпадала с одним и тем же аналитическим целевым значением. Все возбуждённые случаи прошли допуск по энергии 5×10^{-10}; максимальная относительная невязка массы в корпусе составила $1{,}21\times10^{-5}$ при критерии 5×10^{-4}. REST-контроли не достигали порога mixed-state.

Точная PHB реализует разнонаправленное состояние на всех трёх сетках. Время устойчивого верхнего разворота изменяется от τ=1.026826 до 1.041885 и 1.051250; время первого mixed-state — от 2.042957 до 2.070738 и 2.071882. При этом J уменьшается при уточнении (0.016795, 0.012659, 0.006513). Следовательно, существование и время события сходятся значительно лучше, чем его абсолютная сила; значение J на тонкой сетке не трактуется как уже асимптотически сошедшаяся константа устройства.

Таблица 5. Исходная серия строгого замыкания PHB в OpenFOAM при PR=20 (не более поздняя серия G2–G4 с Minmod/MinmodV). Показатель J — интеграл интенсивности смешанного состояния. Контроль PHB-PV приблизительно согласован по площади отверстий и объёму, но нарушает точный закон профиля; прямолинейный биконус служит отдельной контрольной геометрией.

Геометрия	G1 J	G2 J	G3 J	Mixed на G3?
Точная PHB	0.016795	0.012659	0.006513	да
PHB PV-broken	0.000000	0.000000	0.000000	нет
Согласованный биконус	0.004303	0.005040	0.005909	да

Строгое замыкание OpenFOAM сравнивает точную PHB с контролями интегральных размеров и профиля при одинаковой дискретной энергии источника. На G1–G3 точная PHB сохраняет mixed-sign состояние с временами переключения 1,026826, 1,041885 и 1,051250 и значениями J 0,016795, 0,012659 и 0,006513. Семейство контролей показывает, что время события и интегральная сила состояния являются распределённо-геометрическими наблюдаемыми величинами, а не простыми функциями объёма камеры.

8 PHB и ZPHB как различные геометрически программируемые отклики

Второй вопрос результатов состоит в том, как различается отклик PHB и зеркального представителя ZPHB того же семейства построения. Контур ZPHB получается евклидовым отражением его собственной родительской гиперболы. Газодинамический PHB, используемый для сравнения, имеет другой параметр b, как указано в разделе 2.7. Поэтому сравнение проверяет два связанных аналитических устройства с согласованными воздействием, верхней апертурой и осевой длиной; оно не является чистым отражением сравниваемого PHB при фиксированных параметрах.

Более раннее переключение ZPHB и согласованные сдвиги ряда показателей направленности рассматриваются как изменение отклика, а не как доказательство универсального превосходства. Для ГВИ важно именно то, что математически определенное преобразование G приводит к воспроизводимому преобразованию Y(t).

ZPHB является вторым точным представителем аналитического семейства. В четырёх завершённых сопоставленных состояниях — PR=10, PR=20 и PR=40 на 27×162 и PR=20 на 40×240 — ZPHB изменяет знак верхнего потока раньше PHB в каждой паре. При PR=20 различие сохраняется при уточнении: τsw меняется PHB→ZPHB с 1,6572→1,6012 на 27×162 и с 1,6380→1,5892 на 40×240.

Таблица 6. Завершённые переходные сравнения PHB-ZPHB.

Сетка	PR	PHB τsw	ZPHB τsw	Прирост селективности ZPHB	Снижение утечки ZPHB	Прирост условного нижнего выпуска
27×162	10	1,7365	1,6971	0,656%	13,29%	9,47%
27×162	20	1,6572	1,6012	0,830%	15,94%	20,41%
27×162	40	1,5434	1,4821	0,682%	13,35%	21,77%
40×240	20	1,6380	1,5892	0,871%	16,18%	12,17%

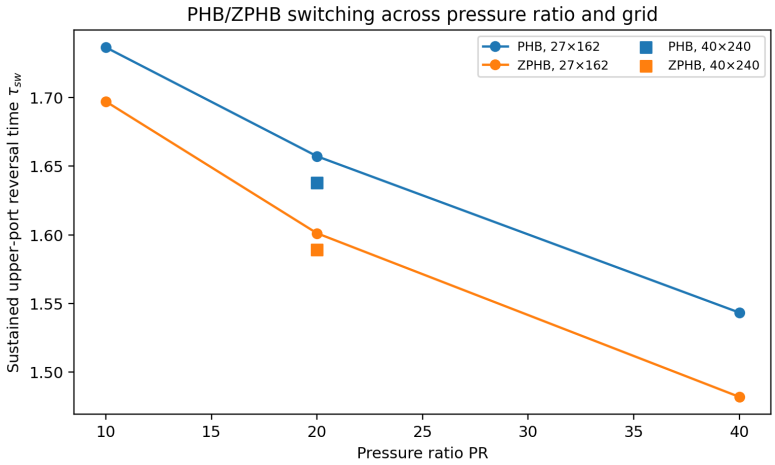

Рисунок 14. Время переключения в зависимости от отношения давлений для завершённых PHB и ZPHB. Рост PR ускоряет переключение, а ZPHB переключается раньше во всех сопоставленных состояниях.

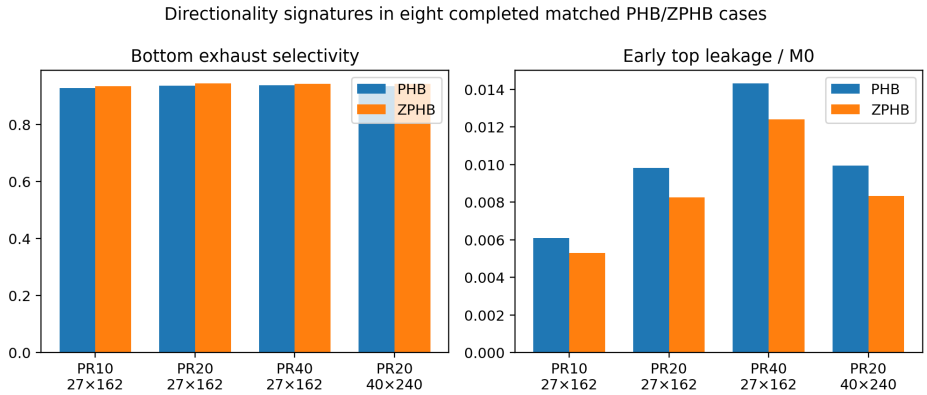

Рисунок 15. Различия направленности между сравниваемыми устройствами PHB и ZPHB, вычисленные по завершённым результатам. ZPHB является точным отражением собственного родителя; сравниваемый PHB имеет другой родительский параметр и другую площадь нижнего отверстия.

Согласованное ранжирование показателей в четырёх парах демонстрирует различие откликов двух построенных устройств. Конечные доли внешней метки и характеристики наполнения имеют неоднозначное ранжирование, а различие нижних апертур может влиять на более раннее истечение. Поэтому результаты устанавливают систематические изменения времён и распределения выпуска в указанных условиях сравнения без выделения одного геометрического инварианта или универсального превосходства ZPHB.

8.1 Геометрическое преобразование как преобразование оператора

Евклидово отражение сохраняет тип коники и преобразует её фокусы, но меняет положения и ориентации конечных ветвей. Сборка относительно выбранной оси создаёт новое поле нормалей границы и новые соотношения путей между отверстиями и стенкой. Для нелинейной газовой задачи эти изменения выбирают другое отображение решения SG. Отражённую геометрию необходимо относить к определяющему её родителю, который отличается от газодинамического PHB для сравнения, когда их параметры b различаются.

В четырёх завершённых парах режимов ZPHB сочетает более ранний верхний разворот с большей избирательностью нижнего выпуска, меньшей нормированной ранней верхней утечкой и большим условным нижним переносом до разворота. В таблице 5 относительные изменения вычислены со значением PHB в знаменателе. Эти наблюдаемые характеризуют разные стороны одного переходного процесса и взаимосвязаны; общий тренд усиливает согласованность, но не превращает их в независимые эксперименты.

8.2 Область интерпретации сравнения PHB–ZPHB

PHB и ZPHB являются двумя аналитически заданными устройствами, а не парой «эталон–контроль». Поэтому их сравнение используется для выявления воспроизводимых сдвигов многомерного вектора отклика: времени переключения, селективности выпуска, ранней верхней утечки, условного нижнего переноса и поступления свежего газа. Наиболее устойчивый повторяющийся признак ZPHB — усиленная направленность выпуска во всех завершённых согласованных рабочих состояниях.

Последующая знаковая серия ZPHB даёт более строгую локальную причинную проверку, сохраняя рабочие порты, центральный опорный радиус и непрерывный объём при возмущении профиля вокруг точной ZPHB.

8.3 Чувствительность к сетке амплитуде и размеру внешней области

Для точной ZPHB новая завершённая серия позволяет отделить устойчивость самого аналитического представителя от поведения его нарушенного контроля. При PR=20 τ_{sw} последовательно равно 1,633804, 1,613955, 1,601157 и 1,589150 на сетках 12×72, 18×108, 27×162 и 40×240. Последовательные относительные сдвиги составляют приблизительно 1,21%, 0,79% и 0,75%. Таким образом, первое устойчивое переключение ZPHB демонстрирует гладкую тенденцию при уточнении сетки в исследованном диапазоне.

Амплитудная проверка на сетке 27×162 сохраняет событие: τ_{sw}=1,697067 при PR=10, 1,601157 при PR=20 и 1,482066 при PR=40. Увеличение отношения давлений источника ускоряет переключение. Сравнение внешних областей при PR=20 даёт 1,601157 для η_{max}=8 с осевыми продолжениями 1,2R и 1,0R и 1,601608 для η_{max}=10 с продолжениями 1,8R и 1,6R. Относительное изменение составляет приблизительно $2{,}8\times10^{-4}$. Это проверяет одновременное увеличение радиального и осевых размеров внешней области, а не независимую чувствительность к каждой границе.

8.4 Строгое OpenFOAM-замыкание ZPHB и её контролей

Точная ZPHB также реализует определённое клапанное состояние на G1–G3; времена устойчивого верхнего разворота составляют τ=0.793722, 0.784594 и 0.778616. Интеграл J равен 0.002541, 0.001991 и 0.002393. Изменение G2→G3 существенно меньше, чем у точной PHB в этой кампании, а изменение параметра длины релаксации lInf от 2 до 8 в граничном условии OpenFOAM waveTransmissive меняет J ZPHB приблизительно на 2,9% против приблизительно 13,2% у PHB. Это проверка чувствительности к граничному условию давления, а не увеличение явно рассчитанной внешней газовой области; она не доказывает универсальную численную или инженерную устойчивость.

Таблица 7. Исходная серия строгого замыкания ZPHB в OpenFOAM при PR=20 (отдельная от центрированной знаковой серии ZPHB в таблице 12).

Геометрия	G1 J	G2 J	G3 J	Mixed на G3?
Точная ZPHB	0.002541	0.001991	0.002393	да
ZPHB PV-broken	0.002278	0.002440	0.003195	да
Согласованный биконус	0.004315	0.006262	0.006340	да

Контроль ZPHB-PV сохраняет разнонаправленное состояние на всех трёх сетках; прямостенный биконус в этой конкретной серии имеет более высокий J. Равнообъёмный цилиндр ZPHB не создаёт принятого смешанного эпизода. Поэтому ZPHB является расчётным представителем предлагаемого аналитического семейства, но результаты не доказывают исключительной фокальной причинности. Завершённая впоследствии знаковая серия ZPHB приведена в разделе 10.7: она подтверждает локальное сохранение состояния в испытанном центрированном семействе ±2%, а не теорему о критической точке.

9 Сильный знаково-чувствительный конечновременной отклик в окрестности PHB

Наиболее значимый завершённый результат относится к локальному пространству геометрий около точной PHB. Теперь вопрос состоит не только в том, сохраняется ли переключение после деформации, а в том, дают ли одинаковые по модулю изменения по разные стороны аналитического профиля симметричные ответы. Два независимо параметризованных семейства деформаций с согласованными отверстиями и объёмом отвечают на этот вопрос отрицательно.

Это различие принципиально. Гладкая деформация может сохранять двухпортовую архитектуру, но нарушать точное фокальное тождество PHB, одновременно изменяя наклоны, кривизну и распределённую геометрию распространения. Если бы отклик определялся только модулем нарушения фокального закона, почти одинаковые |defect| для ± ветвей должны были бы давать сопоставимые изменения. Завершённые расчёты вместо этого показывают резко знаковый нелинейный ответ.

Широкое сравнение деформаций первоначально установило чувствительность вектора отклика к форме. Новые причинные тесты усиливают этот вывод, сохраняя оба порта и непрерывный объём с численной точностью и сравнивая знаково-противоположные возмущения относительно точной аналитической опоры.

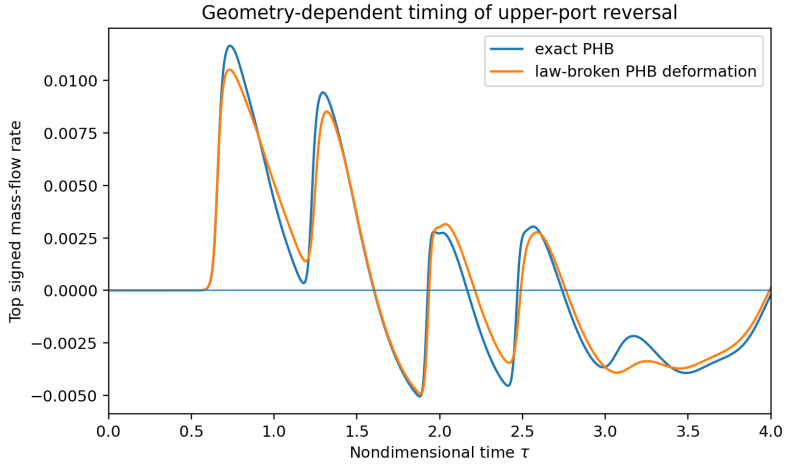

Рисунок 16. Истории верхнего расхода PHB и его близкой деформации в дополнительном пересчёте. Оба профиля дают разворот. Различия разрешённой формы временного ряда характеризуют чувствительность к профилю без установления исключительной фокальной причинности.

Завершённые сравнения с деформациями всё же различаются по удержанию внешней метки, импульсу через отверстия и деталям временных рядов. Параметрическое исследование на более тонкой сетке также показывает компромисс между избирательностью выпуска и замещением газа. Поскольку объём дополнительной деформированной камеры отличается примерно на 2,58%, количественные изменения нельзя отнести только к нарушению фокального закона. Они демонстрируют чувствительность отклика к заданному изменению границы.

9.1 Первое знаковое причинное семейство: разделение в 42,6 раза при ±0,5%

Первое знаковое семейство задаётся $r\varepsilon(y)=rPHB(y)+\varepsilon R\ \sin(2\pi x)+q_comp\ \sin(\pi x)$, где $x=(y-ycut)/(R-ycut)$. Компенсационный коэффициент q_comp выбирается из условия равенства непрерывных объёмов точной и деформированной камер; обе добавки обращаются в ноль на рабочих отверстиях. Профили пересекают исходный гиперболический генератор, поэтому знак ε описывает изменение формы, а не равномерное смещение стенки. Для точного PHB дефект фокального закона практически нулевой; для −0,5% и +0,5% соответствующие значения RMS равны 0,017324 и 0,017719.

Таблица 8. Первое причинное знаковое семейство PHB в собственной консервативной постановке OpenFOAM (PR=20, τ≤4, одинаковая дискретная энергия источника). Количественные сравнения относятся только к завершённым случаям.

Случай	Перекл. τ	Первый mixed τ	Mixed Δτ	J	Mixed?
−0,5% G2	1.014666	1.426179	0.662000	0.010332	да
точная G2	1.046163	1.807274	0.515797	0.006993	да
+0,5% G2	1.092211	2.699640	0.083152	0.000242	да
−1% G2	0.990743	1.397404	0.441095	0.003781	да
+1% G2	1.160340	—	0.000000	0.000000	нет
точная G3	1.054799	1.800505	0.528387	0.005603	да

Случай	Перекл. τ	Первый mixed τ	Mixed Δτ	J	Mixed?
−0,5% G3	1.020489	1.422769	0.578365	0.007124	да
+0,5% G3	1.106279	—	0.000000	0.000000	нет
−1% G3	0.995123	1.394223	0.542073	0.005291	да
+1% G3	1.186417	—	0.000000	0.000000	нет

На G2 получено J(−0,5%)=0,0103324, J(0)=0,00699319 и J(+0,5%)=0,000242305. Отношение J(−0,5%)/J(+0,5%) равно 42,64; отрицательная деформация в 1,48 раза сильнее точной PHB, а положительная сохраняет лишь 3,46% её J. При ±1% отрицательный случай остаётся mixed, тогда как положительный имеет J=0. Такая картина несовместима с простой монотонной зависимостью J=J(|Dfocal|).

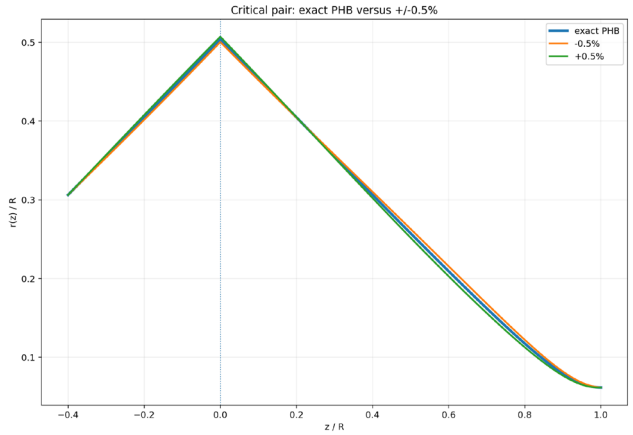

Рисунок 17. Точная PHB и критическая пара ±0,5% с одинаковыми отверстиями и согласованным объёмом. Рисунок получен непосредственно скриптом PHB_DEFORMATION_VISUALIZER_v1_0_0.py из закона деформации причинной кампании; реконструкция и ручная перерисовка не применялись. Это визуализация геометрии, а не поле CFD.

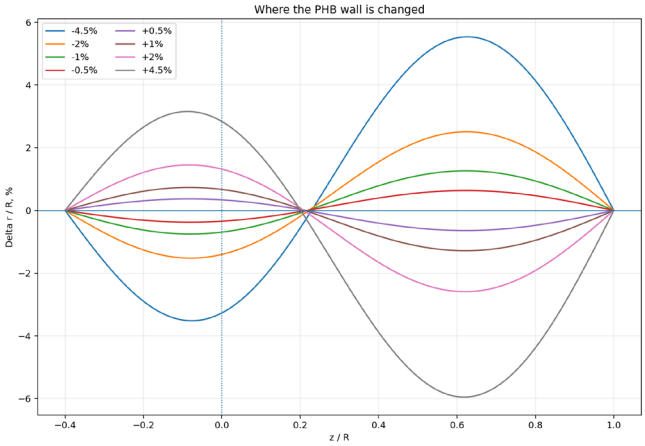

Рисунок 18. Локальное радиальное отклонение от точной PHB для знакового семейства деформаций. Получено непосредственно скриптом PHB_DEFORMATION_VISUALIZER_v1_0_0.py. Противоположные знаки меняют, какие участки стенки лежат внутри и снаружи точного профиля, поэтому ± не следует трактовать как равномерный радиальный сдвиг.

9.2 Повторение на более тонкой сетке и контроль амплитуды источника

Знаковый порядок воспроизводится на более тонкой сетке G3: точная PHB имеет J=0,00560307, −0,5% — J=0,00712353, тогда как +0,5% не образует mixed-sign интервала и имеет J=0. Аналогичное качественное разделение наблюдается при ±1%: J(−1%)=0,00529060, J(+1%)=0. Это сильнее одного отношения на G2, поскольку знак перехода режима сохраняется при уточнении сетки, хотя абсолютная величина J чувствительна к схеме и разрешению.

Отдельный source-control для точной PHB при номинальных PR=19,5, 20 и 20,5 даёт J=0,006883, 0,006993 и 0,007192 — размах всего в 1,045 раза. Поэтому разделение геометрической пары ±0,5% слишком велико, чтобы объясняться небольшими различиями эффективного источника в первом signed-семействе. Этот контроль исключает простейший конфаунд амплитуды источника, не утверждая, что каждая локальная особенность волновой формы имеет единственную геометрическую причину.

9.3 Независимое центрированное семейство деформаций

Чтобы проверить, не является ли signed-эффект свойством одного выбранного базиса, было построено второе независимое семейство. При x=(y−ycut)/(R−ycut) и xc=(0−ycut)/(R−ycut) нормированный базис f∝x(1−x)(x−xc) и компенсатор g∝x(1−x)(x−xc)² обращаются в ноль на обоих отверстиях и при y=0. Компенсирующий коэффициент выбирается из условия равенства непрерывного объёма точной PHB. Такая конструкция устраняет основные интегрально-размерные и локально-источниковые конфаунды первого семейства.

Таблица 9. Независимое центрированное семейство PHB: −0,5%, точный профиль и +0,5% с одинаковыми отверстиями, непрерывным объёмом и эффективной амплитудой источника.

Геометрия	Эффективное $\Delta p/p_0$	Перекл. τ	Первый mixed τ	Mixed Δτ	J
−0,5%	18.999668	1.018926	1.803237	0.618501	0.009286
Точная PHB	19.000007	1.046163	1.807274	0.515797	0.006993
+0,5%	19.000338	1.082148	2.614128	0.290861	0.001327

Независимое центрированное семейство воспроизводит тот же порядок: J(−0,5%)=0,00928611 > J(PHB)=0,00699319 >> J(+0,5%)=0,00132673, откуда отношение отрицательного и положительного случаев 6,999. Табличные эффективные избыточные давления источника $(p_{source}-p_0)/p_0$ равны 18,999668, 19,000007 и 19,000338, что соответствует абсолютному отношению давлений около PR=20, а не значению самого PR=19. В этом центрированном семействе RMS-дефекты для ±0,5% также близки: 0,005874 и 0,005942. Интегралы энергии возмущений на датчиках x/R=0,25, 0,50, 0,75 равны 1,6716, 1,5290 и 1,4452. Следовательно, знаковый порядок подтверждается как J, так и независимой диагностикой поля.

9.4 Продолжение высокооткликовой ветви PHB

Завершённая последовательность отрицательного знака продолжается за −1%. Случай −1,25% на G2 достигает заданного конечного времени и сохраняет mixed-sign состояние, показывая, что высокооткликовая сторона локальной геометрической координаты PHB существует на конечном интервале, а не только в паре ±0,5%.

Рисунок 19 документирует полное исследованное знаковое семейство профилей непосредственно из утверждённого рабочего скрипта визуализации. В настоящей статье количественные утверждения о режиме основаны на завершённых точной геометрии, ±0,5%, ±1%, завершённых продолжениях и независимом центрированном семействе.

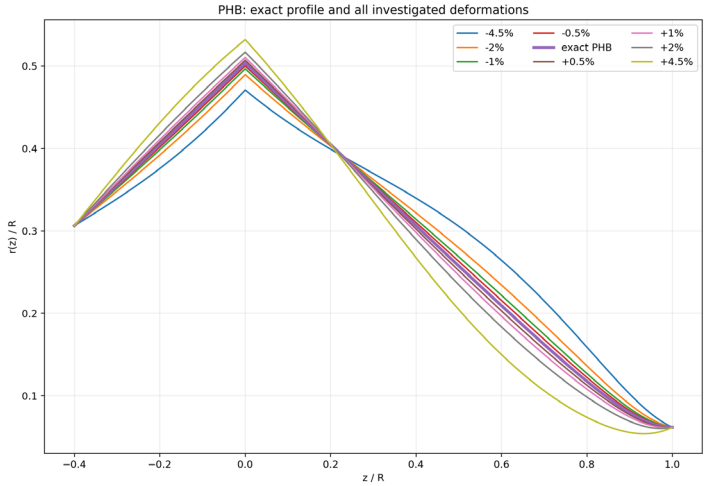

Рисунок 19. Точная PHB и все исследованные профили первого знакового семейства. Получено непосредственно утверждённым скриптом PHB_DEFORMATION_VISUALIZER_v1_0_0.py; реконструированная геометрия не используется. Рисунок документирует семейство форм, для которого выполнены причинные расчёты.

9.5 Интерпретация: знаково-чувствительный переходный отклик при заданном пороговом критерии

Два семейства деформаций поддерживают один центральный вывод: точная PHB является аналитической организующей/опорной геометрией, расположенной в резко асимметричной области отклика пространства форм. Малые отрицательные и положительные отклонения с близкой абсолютной геометрической ошибкой приводят к существенно разным временам событий, длительности и силе mixed-state. Это превращает знаковую координату геометрии в практическую переменную выбора состояния.

Знаковый переход определяется операционно через установленный порог расхода и минимальную длительность эпизода. Расчёты показывают резко различающиеся конечновременные отклики и отсутствие принимаемого разнонаправленного эпизода для некоторых исследованных возмущений при этих критериях. Это не исключает каждого слабого обратного потока и не устанавливает математические ветви решений или их устойчивость. Доказательство строгой бифуркации потребовало бы продолжения решений, анализа устойчивости и проверки сходимости по пространству и времени. Подтверждённый вывод — выраженная знаковая чувствительность численного отклика в установленной модели сжимаемого газа.

9.6 Механистические следствия знакового отклика

Знаковые возмущения показывают, что клапанный отклик определяется распределённой геометрией, а не одним параметром отверстия. При сохранении портов и объёма изменение профиля меняет нормали стенки, кривизну, градиенты площади и пути распространения; эти связанные геометрические изменения реорганизуют нелинейную волново-потоковую траекторию.

Причинное утверждение имеет два уровня: более широкая PHB-подобная архитектура поддерживает переходную двухпортовую функцию, а конкретная геометрия G настраивает время событий, силу mixed-state и интегральный перенос. Именно это понимается здесь под геометрически программируемой газовой динамикой.

10 Геометрические зависимости и карта отклика

10.1 Безразмерные проектные координаты и роль абсолютного масштаба R

Рабочее семейство PHB естественно описывается безразмерными координатами α=a/R, β=b/R и N=R/|ycut|. При ξ=y/R меридиональный радиус имеет вид r/R = α[1+((1−|ξ|)/β)^2]^(1/2), а площадь поперечного сечения — $A/R^2 = \pi\,\alpha^2[1+((1-|\xi|)/\beta)^2]$. Такая запись отделяет общий масштаб от формы: α задаёт нормированный масштаб горла/радиуса, β — скорость раскрытия гиперболического профиля и распределение наклонов стенки, а N — нормированное нижнее усечение и тем самым радиус нижнего порта и длину распространения. Полный клапанный отклик следует рассматривать как вектор Y=F(α,β,N,PR,γ,protocol), а не как функцию одного размерного параметра.

В рамках исследованного класса подобия для невязкого идеального газа R прежде всего задаёт физический масштаб. При фиксированных α, β, N, отношении давлений и γ характерное время масштабируется как R/c0, площади — как R^2, а масса, введённая энергия и импульсоподобные объёмные интегралы — как R^3. Следовательно, геометрически подобное увеличение изменяет физическое время и пропускную способность без изменения безразмерной рабочей точки, предсказываемой Euler-моделью. Для проектирования это разделение полезно: отношения α, β и N выбирают режим, а R — размер и характерное время.

10.2 Влияние a/R: масштаб отверстия и баланс «наполнение–импульс»

Параметр α=a/R квадратично входит в закон площади и изменяет нормированный масштаб отверстий и распределение нормалей стенки. В исходных результатах семиэлементного скрининга конфигурация low-N (α=0,12, N=2,4) при β=0,24 имеет показатель верхней метки происхождения 2,885% M_0 и нижний импульс/E=0,2177; для high-a (α=0,16, N=2,9) приведены 1,040% M_0 и 0,3236. Различия соответствуют −64,0% для метки верхнего происхождения и +48,6% для нормированного нижнего импульса. Поскольку одновременно изменяются α и N, это совместная геометрическая тенденция, а не изолированная производная $\partial Y/\partial\alpha$. Показатель трассера не является измерением именно свежего газа, пересёкшего верхнее отверстие.

При фиксированном β изменение α влияет как на отношение апертуры к камере A/R^2, так и на поле нормалей стенки. Заявленные в исходной серии показатели показывают, что α участвует в совместном изменении переноса импульса, обратного потока и распределения газа с внешней меткой происхождения. Чтобы выделить частную производную по α и доказать заправку камеры газом верхней внешней области, нужны однопараметрическая серия и попортовый поток маркированного газа.

10.3 Влияние b/R: скорость гиперболического раскрытия, время и замещение газа

Отдельная допустимая серия PHB использует a/R=0,06, ycut/R=−0,2 и b/R=0,2, 0,3 или 0,4 при PR=20 на сетке 27×162. Увеличение b/R от 0,2 до 0,4 сдвигает первое переключение от τ=1,26969 к 1,17453 и увеличивает конечную долю внешней метки при τ=10 с 0,27736 до 0,39646. Это даёт прямой монотонный пример геометрической настройки времени и замещения газа при одинаковой энергии источника.

Для b/R=0,3 близкие профильные расчёты на 40×240 и 60×360 сохраняют устойчивый верхний разворот и сдвигают наблюдаемые величины замещения внешним газом и направленности выпуска. Эти данные мотивировали более широкую карту проектирования α–β–N, суммированную в разделе 10.5.

Таблица 10. Сравнение отклика PHB и близких профилей при a/R=0,06, b/R=0,3, ycut/R=−0,2, PR=20 и τend=10.

Геометрия	Сетка	Переключение τ	Нижняя селективность	Доля внешней метки
PHB	40×240	1,24423	0,778644	0,297605
PHB −2%	40×240	1,24961	0,776675	0,291953
PHB +2%	40×240	1,23407	0,780158	0,309526
Деформация	40×240	1,12324	0,775470	0,361306
Двойной конус	40×240	1,25990	0,764699	0,300260
PHB	60×360	1,24643	0,778152	0,273887
Деформация	60×360	1,10806	0,771515	0,321925

Семейство профилей охватывает измеримое пространство компромиссов между временем переключения, распределением выпуска и замещением внешним газом. Поэтому оно используется как эксперимент по картированию отклика, а не как однометрическое ранжирование.

10.4 Локальные изменения профиля при согласованных портах и объёме

PV-контроли сохраняют рабочие порты и уменьшают рассогласование непрерывного объёма ниже 0,02%. Сдвиги времени событий при тех же уравнениях и возбуждении дают контролируемое свидетельство того, что переходную траекторию программирует распределённый профиль стенки, а не только интегральный размер.

Для точных PHB, ZPHB и их близких профильных семейств воспроизводимая последовательность состояний сохраняется, тогда как время событий, длительность фаз, направленность и интегральный перенос геометрически сдвигаются. Это связывает локальную знаковую причинность с глобальной картой проектирования.

10.5 Связанное пространство геометрия–отклик по α, β и N

Параметрический скрининг PHB описывает семейство аналитически заданных поверхностей, а не единственную камеру. Безразмерные параметры α=a/R, β=b/R и N=R/|ycut| совместно изменяют относительные размеры отверстий, наклоны стенки, объём и длину переноса. Семь конструкций PHB сопоставлялись в единой расчётной серии PR=20 на сетке 24×180; приведённые величины рассматриваются как показатели исходного численного протокола, а не как независимо подтверждённый КПД устройства.

Результаты семиточечного скрининга выделяют геометрии, ориентированные на разные показатели отклика. В отдельном длительном сравнении исходной серии на сетке 32×240 для low-N PHB (α=0,12, β=0,24, N=2,4) указана конечная доля газа с меткой внутри камеры 2,684%, а для balanced PHB — 1,992% (+34,7%). Накопленный показатель метки верхнего происхождения меняется с 2,784% до 3,684% M_0 (+32,4%), нижний обратный приток — с 17,812% до 16,456% M_0 (−7,6%), а Qrev/fresh — с 6,40 до 4,47 (−30,2%). Эти величины описывают чувствительность отклика исходной серии к совокупности параметров. Обозначение 'fresh' в исходных файлах означает диагностическую трассерную величину, а не независимо подтверждённую подачу новой порции газа через верхнее отверстие; последнее требует попортового баланса маркированного газа.

Другая область того же пространства параметров усиливает перенос импульса. Геометрия high-a α=0,16, β=0,24, N=2,9 достигает bottom impulse/E≈0,3236, тягово-ориентированная α=0,11, β=0,10, N=3,8 — ≈0,4886, а rectification-ориентированная α=0,15, β=0,12, N=3,0 — ≈0,4709. Эти точки показывают, что геометрию можно выбирать под разные рабочие цели, а не оптимизировать по одному универсальному скаляру.

Дополнительно исследовалось более широкое пространство параметров α–β–N. Однако полная первичная матрица этого поиска не прошла независимую сверку с публикационным архивом, поэтому результаты не используются здесь для доказательства количественного оптимума или превосходства. Соответственно, численные утверждения, основанные на не прошедших проверку сравнительных прогонах, исключены из доказательной базы. Количественные выводы этого раздела ограничены явно описанными скрининговыми наблюдениями и отдельными длительными расчётами с учётом их методических границ.

Независимая однопараметрическая серия по β, рассмотренная в разделе 10.3 при фиксированных a/R и нижнем срезе, дополняет многопараметрический скрининг. Совместно эти результаты характеризуют β как полезную координату настройки времени переключения и трассерного отклика. Из совместно изменяемых параметров семивариантного скрининга изолированные производные отклика не выводятся.

Группировка refill-ориентированных вариантов около b/a≈2 и вариантов с более высоким импульсом при меньшем b/a является описательным проектным ориентиром внутри опубликованной выборки, а не проверенной фазовой границей. Совместное изменение α, β и N в семи конструкциях не позволяет выделить независимые частные производные. Полная проверенная поверхность отклика с коэффициентами взаимодействия, R^2, RMSE и контролем по независимым данным на основе этих материалов не установлена и здесь не утверждается.

Таблица 11. Представленная семивариантная карта отклика PHB при PR=20 (скрининг 24×180, отдельно от длительных расчётов 32×240). «Свежий газ в камере» и метка верхнего происхождения — трассерные диагностики исходной серии, а не независимо подтверждённая подача новой порции через верхнее отверстие.

Конструкция PHB	alpha	beta	N	Свежая доля камеры	Метка верхнего происхождения / M₀	Нижний обратный / M0	Q_rev/fresh	Нижний импульс/E
Balanced	0.10	0.20	3.0	1.786%	2.455%	14.42%	5.88	0.2524
Strong-dual	0.07	0.14	3.0	1.148%	1.555%	14.81%	9.53	0.2444
Max-refill	0.13	0.26	2.6	1.695%	2.776%	14.24%	5.13	0.2352
Low-N valve	0.12	0.24	2.4	1.939%	2.885%	13.71%	4.75	0.2177
High-a valve	0.16	0.24	2.9	0.454%	1.040%	8.67%	8.33	0.3236
Rectification	0.15	0.12	3.0	0.065%	0.140%	2.48%	17.68	0.4709
Thrust	0.11	0.10	3.8	0.084%	0.177%	3.16%	17.82	0.4886

10.6 Влияние высоты нижнего среза

Нижний срез задаётся параметром N=R/|ycut|, или эквивалентно ycut/R=−1/N. Он непосредственно изменяет осевую часть нижней ветви PHB, сохраняемую в рабочей камере, а через аналитический профиль — радиус нижнего отверстия. Тем самым меняется расстояние, на котором волны сжатия и разрежения взаимодействуют с нижней стенкой до выхода через выпуск. В завершённом наборе геометрий refill-ориентированные кандидаты занимают N≈2,4–2,6, balanced точка использует N=3,0, а наиболее выраженная thrust-ориентированная точка — N=3,8. Такое распределение выделяет усечение как одну из основных координат пространства компромисса «импульс–наполнение».

Конфигурация low-N с α=0,12, β=0,24, N=2,4 рассматривается как кандидат, ориентированный на замещение газа, в исходном скрининге. В указанном длительном сравнении на сетке 32×240 относительно balanced PHB доля газа с меткой в камере меняется с 1,992% до 2,684% (+34,7%), количество газа с верхней меткой происхождения — с 2,784% до 3,684% M₀ (+32,4%), нижний обратный приток — с 17,812% до 16,456% M₀ (−7,6%), а Qrev/fresh — с 6,40 до 4,47 (−30,2%); нормированный нижний импульс меняется с 0,2730 до 0,2367. Поскольку вместе с N изменяются также α и β, это характеристика совокупной геометрической перестройки, а не изолированного влияния нижнего среза. Поступление нового газа верхнего резервуара через верхнее отверстие указанными показателями не доказано.

Для выделения влияния нижнего среза нужна зависимость Y(N) при фиксированных (α,β), а для влияния α и β — фиксация остальных координат. Сравнение семи конструкций характеризует только совместные изменения параметров. Подобие при изменении R также требует сохранения PR, γ, радиуса и положения источника относительно R, размеров внешней области относительно R, безразмерных начальных условий и порога обнаружения; влияние R нельзя считать безусловно отсутствующим.

10.7 PHB и ZPHB: локальная чувствительность и робастность

Финальное причинное сравнение проверяет, разделяет ли ZPHB резкую локальную знаковую чувствительность, обнаруженную около PHB. На каждой из сеток G2 и G3 рассчитаны семь активных геометрий ZPHB: точный профиль и центрированные возмущения ±0,5%, ±1% и ±2%. Возмущения сохраняют оба рабочих порта, центральный опорный радиус и непрерывный объём камеры; относительное рассогласование объёма составляет приблизительно $3{,}18\times10^{-10}$. Все случаи используют одну постановку shockFluid, протокол PR=20, $\tau\le4$ и аудит одинаковой энергии источника.

Завершённая знаковая серия ZPHB не обнаруживает PHB-подобной потери разнонаправленного состояния в проверенном центрированном семействе возмущений до ±2%. Состояние сохраняется на G2 и G3, а время переключения плавно зависит от знака возмущения. «Устойчивость» означает только локальное сохранение состояния, а не сеточную сходимость абсолютного J или допуск случайных производственных отклонений.

Уточнённый результат G3 образует робастное семейство клапанных состояний. Для точной ZPHB J=0,00163846 и τsw=0,788714. Для вариантов −0,5%, +0,5%, −1%, +1%, −2% и +2% получены J=0,00167168, 0,00163849, 0,00171038, 0,00167411, 0,00159779 и 0,00157551 соответственно, причём каждый случай сохраняет конечный mixed-sign интервал. Парные отношения J−/J+ равны 1,020, 1,022 и 1,014.

Знаковая тенденция времени сохраняется систематически, хотя J на G3 почти симметричен. Переключение сдвигается от τsw=0,780011 при −2% через 0,788714 для точной ZPHB к 0,801102 при +2%. Следовательно, знак деформации остаётся физически различимым во времени события, тогда как само клапанное состояние сохраняется во всей исследованной окрестности ±2%.

Этот результат разделяет два полезных режима геометрического программирования внутри семейства PHB/ZPHB. PHB задаёт чувствительную локальную координату выбора состояния; ZPHB задаёт локально робастную координату сохранения состояния с воспроизводимой настройкой времени. Ошибки энергии источника имеют порядок 10^{-12}–10^{-10}, остатки баланса массы — около 4×10^{-6}, а порты и непрерывный объём согласованы, что поддерживает геометрическую интерпретацию различия.

Таблица 12. Независимая центрированная знаковая серия ZPHB (отличная от исходной серии строгого замыкания в таблице 7). На G3 показано сохранение смешанного состояния при всех заявленных деформациях.

Геометрия ZPHB	G2 J	G3 J	G3 τsw	Mixed на G3?	G3 J−/J+
Точная	0,00166752	0,00163846	0,788714	да	—
−0,5%	0,00168900	0,00167168	0,786051	да	1,020
+0,5%	0,00156759	0,00163849	0,791633	да	1,020
−1%	0,00169901	0,00171038	0,783709	да	1,022
+1%	0,00141189	0,00167411	0,794696	да	1,022
−2%	0,00161115	0,00159779	0,780011	да	1,014
+2%	0,00101820	0,00157551	0,801102	да	1,014

10.8 Инженерные правила из завершённой карты геометрии

Вычислительные результаты позволяют сформулировать четыре ограниченных проектных ориентира. Во-первых, в невязкой модели подобия при фиксированных безразмерных условиях R главным образом задаёт масштаб, а α, β и N — форму. Во-вторых, в серии с постоянными a/R и нижним срезом увеличение β ускоряет фиксируемое переключение и изменяет долю газа с внешней меткой. В-третьих, скрининг нескольких геометрий указывает на различные области распределения импульса и трассерных показателей, но не доказывает глобальный оптимум. В-четвёртых, выбор аналитического семейства влияет на отклик сверх интегральных размеров: PHB обладает выраженной локальной знаковой чувствительностью, а ZPHB сохраняет исследованное разнонаправленное состояние при центрированных возмущениях до ±2%.

Задача проектирования многокритериальна: необходимо по отдельности оценивать время событий, распределение истечения, суммарный верхний приток, долю газа с внешней меткой, нижний обратный поток, интеграл J и перенос импульса. Имеющиеся расчёты демонстрируют геометрически зависимые компромиссы; ни одна трассерная величина без попортового баланса, ни отношение из предварительного скрининга сами по себе не доказывают полноценную заправку камеры свежим зарядом.

11 Дополнительная численная верификация

Дополнительная расчётная серия использует расширенную внешнюю область и три пассивные метки газа. Это отдельная завершённая кампания, но не независимая проверка другим решателем: поток HLLC, построитель геометрии, интегрирование источника и процедура выбора временного шага используют реализацию основной серии. Согласие подтверждает повторяемость в этой численной постановке, а не воспроизведение отдельно выведенным методом.

Завершённые случаи PHB и деформированного PHB воспроизводят устойчивый верхний разворот и конечные интервалы разнонаправленных потоков. Согласованные событийные признаки двух серий полезны как свидетельство устойчивости к различной организации диагностики. Общие газодинамические алгоритмы, однако, остаются коррелированным источником возможной ошибки.

В проверочном расчёте газ находится по обе стороны тонкой оболочки; твёрдые поверхности вокруг портов не добавляются. Радиальный источник давления использует ту же интегральную геометрию граней, что и консервативные потоки, сохраняя однородный покой до машинной точности. Это проверка согласованности, исключающая ложное переключение из-за топологии стенки или дискретизации геометрического источника.

Таблица 13. Завершённый дополнительный пересчёт при τ=20. Доля внешнего газа равна удержанной массе внешней метки, делённой на конечную массу камеры. Импульсы портов являются интегралами знакового избыточного нормального потока импульса в единицах кода и не означают тягу двигателя.

Геометрия	Сетка	Суммарная доля внешнего газа	Верхний избыточный импульс	Нижний избыточный импульс	Остаток массы	Остаток энергии
PHB	18×108	0,080998	0,002360	0,011927	4,62e-15	8,87e-16
PHB	27×162	0,100906	0,003284	0,012991	9,08e-15	3,15e-15
PHB	40×240	0,113640	0,004256	0,014613	1,81e-14	1,06e-14
Деформированный PHB	18×108	0,073390	0,002183	0,011750	4,24e-15	7,56e-16
Деформированный PHB	27×162	0,095021	0,002976	0,012936	8,70e-15	3,66e-15
Деформированный PHB	40×240	0,107713	0,003885	0,014655	1,84e-14	1,10e-14
ZPHB	18×108	0,077330	0,002489	0,011004	1,04e-14	2,53e-15

11.1 Определение импульса

Для открытой камеры абсолютный поток осевого импульса содержит статический вклад окружающего давления. Если его не вычесть, даже покоящаяся атмосфера дает ненулевой интеграл p0 A. Поэтому физически полезная диагностическая величина строится относительно окружающего состояния и используется как дополнительная характеристика перераспределения импульса, а не как автоматически равная тяге реального двигателя.

Вычитание p_0A из численного потока нормального импульса обращает вклад невозмущённой атмосферы в нуль. Полученный временной интеграл характеризует обмен импульсом через отверстие относительно этого состояния. Сам по себе он не является механическим импульсом или тягой всего корпуса: для них необходимы также силы на внутренней и внешней стенках и изменение накопленного импульса газа. [8]

Для отверстия j зададим отдельную диагностику нормального импульса $I_j^n=\int_0^T\int A_j[\rho u_n^2+p-p_0]dA\ dt$. Дискретный расчёт использует нормальный поток импульса HLLC с вычитанием p_0A_j перед интегрированием по времени. При внешней ориентации обоих сечений I_top^n и I_bottom^n — нормальные скаляры; в направленный осевой баланс входит их разность, а не сумма. Полная сила на корпус дополнительно требует давления на стенку, внешнего давления и производной импульса газа в камере. Невязки сохранения в таблице 13 относятся ко всей вычислительной газовой области и её удалённым граничным потокам; они не нормированы ни на энергию источника, ни на существенно меньшую массу газа камеры.

11.2 Интерпретация пассивных меток газа

Пассивные метки газа переносятся без обратного влияния на плотность, давление или скорость. Они различают первоначально внешний газ и назначенные ему области резервуара. Переключение измеряется по газодинамическим портовым расходам. Метка резервуара не определяет отверстие, через которое газ затем входит в камеру, поэтому отдельные доли TOP — верхнего резервуара, BOTTOM — нижнего резервуара и SIDE — бокового резервуара не используются для установления механизма переключения.

TOP, BOTTOM и SIDE обозначают метки, присвоенные различным частям начальной внешней области и соответствующим притокам через дальние границы. Поэтому SIDE на дальней радиальной границе является классификацией входа через границу, а не указанием физического отверстия, через которое газ впоследствии попадает в камеру. Эти метки нельзя трактовать как однозначно свежий заряд, поданный сверху. Их сумма отличает первоначально внешний газ от первоначально внутреннего с учётом диффузии переноса. Пассивные метки не влияют на первые четыре консервативные переменные; знаковые газодинамические расходы остаются пригодными.

Ограничение пассивных меток отслеживается отдельно от нижних ограничителей плотности и давления. В завершённых дополнительных случаях интегральная величина коррекций меток имеет порядок 10^{-13} в единицах кода, а коррекции нижних ограничителей плотности и давления равны нулю. Малые доли меток остаются чувствительными к диффузии переноса; учёт их сохранения не превращает их в измерение отверстия входа.

11.3 Охват верификации

В рабочих сравнениях используются завершённые случаи с установленными конечными временами. Частичный сохранённый временной ряд оценивается только на доступном интервале и не считается завершённой рабочей траекторией. Охват дополнительной серии указан ниже.

В дополнительной серии доступны завершённые случаи PHB, деформированного PHB и ZPHB на грубой сетке. Её рабочие случаи ZPHB на более тонких сетках и межгеометрический согласованный контроль отсутствуют, как и запланированные отдельные серии по числу Куранта и внешней области. Другие завершённые серии дают сравнения ZPHB по сетке, амплитуде и радиальному размеру области. Поэтому охват оценивается по всему корпусу, а случаи с общим численным ядром не считаются верификацией независимым решателем.

11.4 Завершённая верификация ZPHB с близкими контролями

Отдельная завершённая кампания содержит 15 случаев: PHB, ZPHB и ZPHB-PV на нескольких сетках при PR=20, дополнительные пары ZPHB/контроль при PR=10 и PR=40, а также проверку увеличенной внешней области. Все 15 случаев дошли до заданного конечного времени и во всех зарегистрировано устойчивое изменение знака верхнего потока. Максимальная относительная невязка массы по серии равна $4{,}63\times10^{-14}$, энергии — $3{,}13\times10^{-14}$, а относительная ошибка введённой энергии источника не превышает $3{,}33\times10^{-16}$. Таким образом, различия времён событий не связаны с заметной потерей глобальных законов сохранения.

Увеличение внешней области для ZPHB-PV меняет τ_{sw} с 1,197411 до 1,197152. Поэтому раннее событие малочувствительно к этому исследованному увеличению. Это не устанавливает причину изменения разрешённого отклика контроля между сетками 18×108

и 27×162. Независимо выведенный метод более высокого порядка и уточнение временного шага необходимы для различения физической смены режима и сохраняющейся численной чувствительности.

11.5 Завершённое сравнение четырёх геометрий

Четырёхгеометрическая серия содержит 12 завершённых случаев PHB, PHB-PV, ZPHB и ZPHB-PV. Устойчивое верхнее переключение зарегистрировано во всех 12 случаях. Проверки энергии источника и глобальных балансов массы и энергии пройдены; максимальные относительные невязки массы и энергии равны $9{,}92\times10^{-15}$ и $2{,}91\times10^{-15}$. Согласование отверстий сохраняется, тогда как независимое непрерывное интегрирование даёт конечные остатки объёма, указанные в разделе 6.3. Серия устанавливает контролируемую чувствительность к профилю при приближённом согласовании объёма; она не является доказательством асимптотической сходимости контрольных различий.

11.6 Согласованная трёхсеточная проверка PHB и биконуса

Дополнительно выполнены 17 расчётов на сетках G2/G3 и пять адресных расчётов G4 в OpenFOAM Foundation 13, shockFluid. Все случаи воспроизводят прежнюю невязкую модель сжимаемого идеального газа, 5-градусный осесимметричный клин, одинаковую добавленную энергию импульса, порты, принятые граничные условия и расчётное окно $\tau\in[0,4]$. Сетки: G2=98×24 (2352 ячейки), G3=126×30 (3780), G4=168×40 (6720). Для прямого сопоставления использованы только Minmod/MinmodV, maxCo=0,08, maxDeltaT=0,00025, ε=0,001 и минимальная длительность эпизода 0,02.

Таблица 14. PHB и согласованный биконус на сетках G2–G4 при едином протоколе Minmod/MinmodV, maxCo=0,08 и одинаковом критерии события; это не исходная серия замыкания таблицы 5.

Сетка	J(PHB)	J(биконус)	J(PHB)/J(биконус)	Δτ PHB	Δτ биконус
G2	0,006901965	0,000735643	9,382	0,500764	0,252716
G3	0,005520596	0,001087813	5,075	0,515420	0,290047
G4	0,003811925	0,001386456	2,749	0,450732	0,414072

Основной показатель J — интеграл $\min(-q^*_{top}, q^*_{bottom})$ только по принятым связным эпизодам, где $q^*_{top}<-\varepsilon$ и $q^*_{bottom}>\varepsilon$. Он измеряет совокупную интенсивность одновременного впуска и выпуска, но не КПД, не полезную работу, не массовый приток именно свежей смеси и не тягу. При G3→G4 J(PHB) уменьшился на 30,95%, а J(биконус) увеличился на 27,45%; отношение PHB/биконус уменьшилось на 45,82%. Следовательно, пока подтверждён результат для трёх конечных сеток, но не его асимптотическое численное значение.

11.7 Контрольные геометрии и время переключения на G4

Последний G4 этап включал точную PHB, согласованный по объёму и портам биконус, две знаковые контрольные деформации PHB по ±0,5% и точную ZPHB. Отрицательная деформация дала J=0,004518225, выше точной PHB (0,003811925), тогда как положительная деформация не дала принятого устойчивого смешанного эпизода при ε=0,001 и 0,0005. Этот знаковый контраст является свойством конкретного профиля и тестового режима, а не математически доказанной бифуркацией. У ZPHB смешанный эпизод длится дольше, но его интегральная интенсивность J ниже, чем у PHB.

Таблица 15. Группа G4: геометрически зависимый смешанный режим при τ≤4.

Геометрия	J	Длительность Δτ	Верхний разворот τ	Первый устойчивый mixed τ
Точная PHB	0,003811925	0,450732	1,062383	2,560722
Биконус PHB	0,001386456	0,414072	0,842801	2,465607
PHB −0,5%	0,004518225	0,457647	1,025540	1,415246
PHB +0,5%	0	0	1,117038	не обнаружен
Точная ZPHB	0,002077562	0,640220	0,783313	1,915880

11.8 Объёмное и локальное давление в момент смены режима

Впервые из тех же полноразмерных расчётных полей проверено объёмно-среднее давление: все сохранённые отсчёты пяти случаев G4 дают $\bar{p}>p0=1$. Для PHB G4 в момент первого верхнего разворота ($\tau\approx1,06238$) $\bar{p}\approx1,17621$; при первом устойчивом смешанном эпизоде ($\tau\approx2,56072$) $\bar{p}\approx1,22673$. Тем не менее, локальное разрежение возможно: минимальное давление PHB G4 при $\tau=2,625$ составляет приблизительно 0,9463. Поэтому вывод о невозможности объяснения только общей средней депрессией не отменяет локальных градиентов давления и инерционных эффектов; специфический фокальный механизм не выделен.

11.9 Численная верификация и проверка воспроизводимости

Подтверждены завершение 17+5 прогонов, штатное прохождение checkMesh для всех пяти G4, ошибка нормировки добавленной энергии менее $2,34\times10^{-10}$ и относительная массовая невязка менее $4,35\times10^{-6}$. Независимая проверка повторно рассчитала временные интегралы из сохранённых рядов (для G4 — 60 сочетаний порога и длительности). Первичные проверяемые источники: PHB_VALVE_IRA_MECHANISM_CLOSURE_V1_0_1_RESULTS.zip и PHB_VALVE_IRA_G4_FINAL_VERIFICATION_V1_0_2_RESULTS.zip; соответствующие версии сценариев v1.0.1 и v1.0.2. Следующим расчётным шагом при необходимости является сопоставление точной PHB и биконуса на G5; без такого этапа показатель J нельзя считать сеточно-сошедшимся.

11.10 Интегральный газообмен и его связь с клапаноподобным режимом

Независимое повторное интегрирование сохранённых историй всех 22 завершённых случаев OpenFOAM позволило отделить суммарный верхний приток от его части, совпадающей по времени с нижним выпуском. Приведённые величины являются интегралами суммарных знаковых расходов через отверстия, нормированными на начальную массу камеры M_0; они не представляют собой положительные потоки по отдельным граням и не измеряют массу свежего газа с помощью метки его происхождения. На едином протоколе G4 показано, что продолжительность смешанного режима, интенсивность J и поступившая масса характеризуют разные стороны процесса.

Таблица 16. Полный верхний приток и его совпадение с нижним выпуском на G4 (% начальной массы камеры M_0; интегральные знаковые расходы).

Геометрия (G4)	Весь верхний приток, % M_0	Верхний приток при нижнем выпуске, % M_0	Фильтрованная длительность Δτ

Геометрия (G4)	Весь верхний приток, % M_0	Верхний приток при нижнем выпуске, % M_0	Фильтрованная длительность $\Delta\tau$
Точная PHB	1,778	0,437	0,450732
PHB −0,5%	1,983	0,493	0,457647
PHB +0,5%	0,111	0 при фильтре ε=0,001	0
Точная ZPHB	0,785	0,213	0,640220

Для точной PHB совпадающий приток 0,437% M_0 составляет около 24,6% её общего верхнего притока 1,778% M_0. Для PHB +0,5% показатель J равен нулю при принятом пороге фильтрации, однако при снятии порога сохраняются слабые интервалы разнонаправленных знаков; нуль фильтрованного J не означает отсутствия движения газа. Точная ZPHB имеет большую отфильтрованную длительность смешанного режима, чем PHB, но меньший верхний приток в этом состоянии. В данной серии OpenFOAM не сохранялась метка происхождения газа, поэтому интегральный расход нельзя отождествлять с массой вновь поступившей горючей смеси.

11.11 Пространственная структура давления и скорости в процессе переключения

Независимый аудит охватил 246 исходных пространственных снимков и 3520 отсчётов объёмно-среднего давления в 22 случаях. Среднее по объёму давление камеры во всех сохранённых отсчётах превышало нормированное атмосферное значение p_0=1, тогда как во многих пространственных снимках встречались ячейки с локальным давлением ниже атмосферного. Это принципиальное различие: давление, среднее по объёму, само по себе не определяет локальный градиент, давление непосредственно на граничных гранях и знак нестационарного расхода.

Таблица 17. Исходный пространственный снимок PHB G4 при τ=2,625: разрешённые значения ячеек около верхнего отверстия (не значения на граничных гранях).

Показатель	Проверенное сохранённое значение	Интерпретация
Время	τ = 2,625	Один исходный снимок PHB G4
Суммарный верхний / нижний поток	−0,00505 / +0,02405	Верхний впуск при нижнем выпуске
Давление в ближайшем верхнем слое	1,28832–1,28938	Все исследованные ячейки выше p_0 = 1
Осевая скорость в ближайшем слое	от −0,17767 до −0,12615	Все 40 ячеек направлены внутрь
Давление и φ непосредственно на гранях	не сохранены	Нельзя получить gross-поток по граням

В этом отсчёте осевая скорость во всех 40 ячейках ближайшего к верхнему отверстию слоя направлена внутрь камеры, хотя давление в них выше атмосферного. Исходные давления непосредственно на гранях отверстия и массив гранных потоков φ в компактных полевых данных не сохранены. Поэтому давление в ближайшем слое нельзя обозначать p_face, а интегральную историю отверстия — измерением положительного gross-потока по граням. Похожие локальные состояния наблюдаются и у согласованного биконуса; эти

данные указывают на роль нестационарной инерционной и волновой газовой динамики, но не выделяют исключительный фокальный механизм PHB.

11.12 Чувствительность к численному протоколу и причинная интерпретация

Сравнение трёх сеток в таблице 14 сохраняет порядок PHB выше биконуса по отфильтрованному J на G2, G3 и G4, однако отношение уменьшается от 9,382 через 5,075 до 2,749. На G4 длительность при заданном пороге равна 0,450732 для PHB и 0,414072 для биконуса, а при учёте только знаков без порога — 0,774 и 0,786. На G2 совместное изменение ограничителей на vanLeer/vanLeerV и maxCo до 0,20 даёт J≈0,012660 вместо J≈0,006902 при Minmod/MinmodV и maxCo=0,08. Нельзя приписывать изменение одному ограничителю, поскольку одновременно изменялось число Куранта. Соответственно преимущество PHB относится к данным конкретных протоколов, а не к сеточно-сошедшемуся коэффициенту усиления; одинаковые объём и площади отверстий также не обеспечивают одинаковый угол стенки у верхнего отверстия. Согласование протоколов: значения точной PHB на G2=98×24 J=0,012659 (исходная строгая серия, таблица 5), J=0,00699319 (базовая точная форма первого знакового семейства, таблица 8), J≈0,006902 (согласованная серия Minmod/MinmodV, таблица 14) относятся к разным расчётным кампаниям и не образуют единую последовательность сеточной сходимости. Аналогично точная ZPHB на G3 с J=0,002393 и τ_sw=0,778616 (исходная строгая серия, таблица 7) отличается от J=0,00163846 и τ_sw=0,788714 (центрированная знаковая серия, таблица 12). Одинаковые номинальные сетки и энергия возбуждения сами по себе не гарантируют совпадения всех численных настроек; значения следует интерпретировать по соответствующим исходным протоколам. Поскольку доступные сводные материалы не устанавливают тождественность ограничителей, числа Куранта, нормировки источника по ячейкам, частоты сохранения результатов и фильтра длительности для всех исторических кампаний, эти межсерийные значения не рассматриваются как единый согласованный эталон или общая последовательность сеточной сходимости.

11.13 OpenFOAM с явной внешней областью: согласованный контроль и интерпретация трассеров

Дополнительная производственная серия v1.0.3 содержит по 160 сохранённых временных отсчётов для каждой геометрии до τ=4. Во всех трёх случаях зарегистрированы два разделённых интервала одновременного суммарного верхнего впуска и нижнего выпуска при постоянно открытых отверстиях. В таблице 18 приведены независимо повторно интегрированные результаты; доли массы и потоки в процентах нормированы на Mref первого сохранённого отсчёта, а не на отдельно восстановленную массу при t=0.

Таблица 18. Равноэнергетическое сравнение трёх геометрий в OpenFOAM 13 с явно рассчитанной внешней областью (v1.0.3; одна сетка; ε=0,001; минимальная длительность принятого эпизода 0,02). J — безразмерный показатель, а не КПД, полезная работа или эффективность замещения свежего газа.

Величина	PHB	ZPHB	Согласованный биконус
Смешанный эпизод 1, τ	1,625–1,875	1,575–1,900	1,600–1,875
Смешанный эпизод 2, τ	2,200–2,275	2,100–2,425	2,150–2,400
Общая длительность эпизодов, Δτ	0,325	0,650	0,525
Интенсивность смешанного режима, J	0,001619	0,003843	0,003085
Валовой верхний впуск, % Mref	0,852	0,878	0,883
Валовой нижний выпуск, % Mref	17,963	18,150	17,968
Снижение массы камеры, % Mref	12,444	11,779	12,624
Верхний трассер в камере при τ=4, % Mref	0	0	0
Нижний трассер в камере при τ=4, % Mref	1,241	1,083	1,093
Минимальное среднее давление p/p₀	0,8971	0,8887	0,8938
Абс. остаток баланса массы / Mref	$3{,}98\times10^{-5}$	$1{,}96\times10^{-5}$	$6{,}36\times10^{-5}$

На этой фиксированной сетке общая длительность смешанного состояния у ZPHB вдвое выше PHB, а показатель J — приблизительно в 2,37 раза выше. У биконуса J приблизительно в 1,91 раза больше, чем у PHB. Перебор порогов ε=0,0005; 0,001; 0,002 и 0,004 сохраняет порядок J(ZPHB)>J(биконус)>J(PHB). Это непосредственно измеренная зависимость отклика от геометрии, но она меняет порядок PHB и биконуса относительно прежней серии G2–G4 с открытыми граничными условиями на отверстиях (где J(PHB)/J(биконус)=9,382; 5,075; 2,749). Поскольку в новой серии OpenFOAM с внешней областью исследована лишь одна пространственная сетка, ни одно из ранжирований нельзя объявлять независимым от внешней области или сеточно-сошедшимся преимуществом.

В v1.0.3 PHB и биконус согласованы по непрерывному объёму, размерам обоих отверстий и осевой длине. Различия их временных историй тем самым свидетельствуют о зависимости организации течения от профиля при данном протоколе. Точная ZPHB имеет приблизительно на 0,67% больший объём и на 11,57% большую площадь нижнего отверстия, чем PHB. Поэтому её увеличенные J и длительность представляют собой свойства исследованной конфигурации ZPHB, а не изолированное доказательство решающей роли зеркального построения или общих фокусов.

Во всех сохранённых временных отсчётах трёх расчётов масса пассивного трассера, первоначально присвоенного верхней внешней области, внутри камеры равна нулю, хотя валовой приток через верхнее отверстие ненулевой. При τ=4 в камере присутствует трассер нижней внешней области. Боковая наружная область не размечена ни одним из этих двух маркеров; кроме того, исходная область газа не устанавливает однозначно порт его входа в камеру. Следовательно, суммарный верхний приток установлен, но поступление новой порции газа именно из верхней внешней области этими данными не доказано. Это нельзя напрямую отождествлять с показателями верхнего происхождения из других серий, выполненных при иных границах и правилах разметки.

В отличие от ранее сохранённых полей серии G4 с верхними и нижними граничными патчами, где среднее давление камеры выше атмосферного, в v1.0.3 объёмно-среднее давление во время принятых смешанных эпизодов ниже p_0. В отдельных отсчётах приближённое среднее давление у верхнего внутреннего сечения выше атмосферного при суммарном потоке внутрь. Такое сочетание согласуется с инерцией и нестационарной предысторией поля давления: одно только среднее давление по камере не определяет знак мгновенного местного потока. Сохранённая история не выделяет единственный фокальный газодинамический механизм.

Относительная ошибка согласования энергии источника не превышает $2{,}28\times10^{-10}$; независимо вычисленный остаток баланса массы по дискретным временным рядам не больше $6{,}36\times10^{-5}$ от Mref. Эти проверки подтверждают арифметическую согласованность и завершённость расчётов, но не асимптотическую сеточную сходимость. Компактный архив v1.0.3 включает исходный скрипт, временные истории по 160 отсчётов, аудиты энергии/сетки и ранние снимки трассеров, однако не содержит полных поздних пространственных полей и полных журналов производственных расчётов. Интегральные показатели можно перепроверить по сохранённым рядам; исследование пространственного механизма требует повторного прогона или восстановления исходных полей.

12 Интерпретация в рамках геометрической волновой инженерии

С точки зрения ГВИ решающим является не общий факт влияния формы на течение, а причинная структура проверки. Геометрия PHB/ZPHB определяется аналитически до расчёта поля; наблюдаемые величины и критерии задаются независимо; контролируемые изменения G воспроизводимо меняют Y(t). Знаковый результат PHB расширяет эту идею от непрерывной настройки к выбору режима: геометрия способна переводить одну и ту же нелинейную газовую систему между сильным, слабым и отсутствующим mixed-sign состоянием при номинально одинаковом возбуждении.

Это превращает форму из фонового конструктивного параметра в кандидата на переменную выбора состояния. В завершённых PHB-тестах изменение порядка 0,5% по знаковой координате деформации способно менять силу mixed-state более чем на порядок. ГВИ получает тем самым конкретную нелинейную газодинамическую реализацию: аналитическая геометрия → оператор краевой задачи → переходная волново-потоковая эволюция → выбранный рабочий режим. Точная PHB ценна как воспроизводимая аналитическая точка отсчёта, относительно которой можно измерять такие переходы в пространстве геометрий.

Измеряемый вклад камеры представляет собой переходный отклик состояний отверстий. Начальный импульс развивается во временную историю, зависящую от выбранной неподвижной границы. Термин «оператор» здесь означает нелинейное отображение решения с последующим наблюдением состояний отверстий; он не требует, чтобы стенка хранила сигнал или генерировала энергию.

Расчётные истории проходят через выпуск, его ослабление, устойчивый верхний разворот и связные эпизоды верхнего впуска при нижнем выпуске. Состояние малого суммарного верхнего расхода может прерываться и не является герметичным запиранием. Изменение G меняет времена и интегральный перенос, связанные с этой последовательностью. Геометрическое программирование здесь означает выбор неподвижной границы для получения заданного отклика на одинаковое воздействие.

12.1 Геометрия как индекс семейства динамических операторов

При заданных газовой модели и возбуждении I семейство {SG} индексируется геометрией границы. Две геометрии могут получать одинаковое начальное воздействие и давать разные истории YG(t). Поэтому выбор геометрии выбирает физический отклик внутри этой модели. В этом состоит математический смысл геометрического проектирования в данной задаче; ни линейность, ни взаимно однозначное соответствие геометрии и отклика не предполагаются.

Разные геометрии могут давать различные траектории отклика при одном заданном возбуждении; это проверяемое сравнение, а не универсальная теорема об инъективности SG.

Доказательная база объединяет определённое построение, наблюдаемую последовательность состояний отверстий, сеточные и амплитудные проверки, а также сравнения с преобразованными или возмущёнными границами. Эти проверки подтверждают предлагаемое работающее подмножество в модели Эйлера. Общее численное ядро и взаимосвязанные наблюдаемые ограничивают независимость свидетельств; другой решатель и лабораторные измерения дадут отдельную дополнительную проверку.

Контроли разделяют реализацию класса и количественную геометрическую специфичность. Точные PHB и ZPHB являются подтверждёнными аналитическими представителями, а близкие согласованные профили сдвигают время, длительность фаз и интегральный перенос. Наиболее сильная локальная специфичность — резко знаковый отклик PHB, воспроизведённый двумя независимыми семействами деформаций, и дополняющий его робастный знаковый отклик ZPHB.

12.2 Почему это волновая задача

Уравнения связывают распространение возмущений сжатия и расширения с объёмным переносом газа. Один коэффициент стационарного сопротивления не описывает наблюдаемый порядок разворотов расходов. Истории отверстий устанавливают конечные задержки событий, тогда как пространственное объяснение конкретных возвращающихся возмущений требует полей, выходящих за пределы сохранённой интегральной диагностики.

Отношение площадей апертур является неполным описанием начально-краевой задачи. Накопление массы и энергии в камере, нормали стенки и отклик внешней области также входят в переходное решение. Поэтому измеренные задержки полезны для сравнения форм, но не задают единственного внутреннего пути волны и не демонстрируют изолированного фокального механизма.

В гиперболической системе Эйлера возмущения распространяются с конечными характеристическими скоростями. Поэтому изменения положения или наклона стенки влияют на отверстия через развивающиеся поля давления и импульса. Наблюдаемые времена верхнего и нижнего переключений являются подходящими интегральными характеристиками этой эволюции. Представленные истории устанавливают их зависимость от геометрии; разрешённые характеристические пути не сохранены и не выдаются за измеренные траектории.

12.3 Междисциплинарный и частотный смысл

Методологию с первичным заданием геометрии можно также применять к электромагнитным, акустическим и упругим краевым задачам. Каждое применение

требует собственных уравнений, определяющих соотношений, граничных условий и наблюдаемых величин. Настоящая статья обосновывает только реализацию для сжимаемого газа в модели Эйлера. Междисциплинарный перенос построения является исследовательской гипотезой, а не автоматическим переносом газодинамической клапанной функции или её численных характеристик.

Один переходный процесс не определяет периодическую рабочую частоту. Для геометрически подобных невязких задач Эйлера при одинаковом безразмерном воздействии размерные времена событий масштабируются как R/c_0. Масштабирование реального устройства зависит также от вязкости, теплопроводности, толщины стенки и отклика материала. Поэтому перенос PHB/ZPHB в электромагнитные или упругие системы переносит принцип построения; конкретную функцию необходимо установить при уравнениях и потерях каждой среды.

Следовательно, тезис «управление волнами любой природы и частоты» в рамках ГВИ следует понимать как программу переноса принципа, а не как уже доказанную универсальную теорему. Геометрия способна входить в операторы разных краевых задач, но конкретные параметры, дисперсия, граничные условия и механизмы потерь различаются. Эта статья даёт один подробно проверенный пример — нелинейную сжимаемую газодинамику — и тем самым демонстрирует методологический, а не универсально-эффективностный уровень обобщения.

12.4 Доказанное техническое преимущество: выбор переходного режима, а не универсальное усиление потока

Наиболее убедительный результат PHB/ZPHB состоит в возможности аналитически заданного и ограниченного параметрами управления конечновременным откликом. Гиперболическую или зеркальную стенку можно воспроизводимо варьировать, выбирая время начала, длительность и интегральный перенос в двухпортовом состоянии. Знаковые окрестности PHB показывают сильную локальную различимость отклика; исследованное семейство ZPHB сохраняет смешанный режим при предписанных изменениях; новая серия OpenFOAM с внешней областью показывает, что ZPHB в проверенной конфигурации может обеспечивать существенно более продолжительный интервал одновременного впуска и выпуска, чем PHB. Это полезные потенциальные проектные степени свободы, но не утверждение, что PHB обязательно превосходит каждую традиционную форму.

Согласованный биконус играет решающую контрольную роль: он тоже переключается, а при явном расчёте окружающего газа его J может быть больше, чем у PHB. Поэтому сам факт переключения нельзя считать исключительным свойством фокальной поверхности. Технологический смысл ГВИ — в систематическом использовании аналитических профилей для настройки маршрутизации импульса, выбора порогового состояния и длительности переходного режима при фиксированных отверстиях. Показатели фактической заправки свежим газом, снижения потерь и циклической производительности остаются отдельными измеримыми задачами оптимизации.

13 Связь с известными пассивными средствами управления потоком

Функциональное отличие от обычного пассивного диода связано с измеряемым откликом. Клапаны типа Теслы обычно характеризуются сопротивлением или потерями давления в зависимости от направления. Здесь основной наблюдаемый результат — последовательность событий после одного импульса: затухание раннего выпуска,

интервалы малого суммарного верхнего расхода, устойчивый верхний разворот и эпизоды противоположных знаков, во время которых нижний выпуск продолжается.

Предлагаемый вклад представляет собой аналитически конструируемое семейство с установленной переходной функцией и численной верификацией его представителей. Сравнение с оптимизированными обычными клапанами требует согласованных рабочих условий и определённой инженерной цели. Представленные свидетельства устанавливают построение и рассчитанную функцию, а не универсальное ранжирование пассивных устройств.

Клапаны Теслы являются уместным ориентиром, поскольку их неподвижная геометрия создаёт зависящее от направления сопротивление и исследовалась при пульсирующем воздействии. [2] Работы по аэродинамическим клапанам рассматривают обратный поток внутри импульсных устройств с горением. [3,4] Настоящий объект, напротив, определяется построением камеры на основе коник и измеренной последовательностью после одного заданного импульса. Эти различия определяют вклад работы, не утверждая новизну самого нестационарного пассивного управления течением.

Предлагаемая новизна ограничена указанным аналитическим построением, операционным критерием и количественно определённым откликом. Цитируемая литература по пассивным клапанам уже демонстрирует нестационарный перенос, зависящий от геометрии. Оценка инженерного преимущества PHB/ZPHB требует цели конкретного применения и сравнений при согласованных потерях, нагрузке и возбуждении.

13.1 Функциональное отличие от диода потока

У классического пассивного диода потока основной вопрос обычно квазистационарный: насколько различаются перепад давления или гидравлическое сопротивление при противоположных направлениях одного и того же среднего потока. Для предлагаемого элемента состояние не задаётся заранее направлением внешнего насоса. Один начальный импульс порождает последовательность состояний, и ключевая характеристика — момент самопроизвольной смены знака расхода. Поэтому одинаковая терминология «без движущихся частей» не означает одинаковой физической функции.

13.2 Отличие от аэродинамического клапана периодического двигателя

Аэродинамические клапаны в пульсирующих устройствах также используют инерцию, потери и геометрию для ограничения обратного потока. Настоящее исследование не предполагает завершённого периодического цикла, горения или синхронизации с собственной частотой двигателя. Оно выделяет один полностью заданный переходный отклик. Это позволяет исследовать базовый эффект организованного геометрией переключения отдельно от самоподдерживающейся машины.

13.3 Операционный критерий предлагаемого класса

Следует различать семейство построения и рабочее подмножество. Первое определяется аналитическими правилами PHB/ZPHB. Второе состоит из представителей, проявляющих заданную клапанную последовательность при установленном возбуждении и газовой модели. Контроль вне точного аналитического семейства может проявлять сходную последовательность; тогда он свидетельствует о распространённости физического режима, а не опровергает существование построенного семейства.

Пусть G принадлежит аналитически заданному псевдогиперболоидальному семейству $\mathcal{G}$PHB/ZPHB и оба отверстия геометрически открыты. Реализация является численно обоснованным представителем предлагаемого класса переходных клапанов, когда после

заданного импульса существует ненулевой связный интервал с ṁtop<−ε и ṁbottom>ε, которому предшествует начальный выпуск, а первое устойчивое верхнее переключение сохраняется при исследованных уточнениях. При этом должны быть указаны модель, возбуждение, порог ε и проверенные сетки. Этот операционный критерий принадлежности не является теоремой об одинаковом поведении при любом выборе параметров.

13.4 Связь с автоматическим переключением без движущихся частей и струйными осцилляторами

Автоматическое переключение без движущихся частей имеет значительную предшествующую литературу. Tesař экспериментально исследовал Коанда-клапаны, которые перенаправляют струю при достижении порога внешней нагрузки без датчиков и механических приводов [10]. Коанда-осцилляторы способны попеременно направлять поток по выходам через обратную связь по давлению и собственную внутреннюю динамику [11]. Эти устройства являются важными аналогами, поскольку уже доказывают возможность выполнения функции переключения геометрией и нестационарной газо-/гидродинамикой.

РНВ отличается архитектурой и управляющей переменной. Здесь используется аналитически заданная кусочно-гладкая двухпортовая камера без петли обратной связи и без бистабильного прилипания струи; система запускается одним локализованным импульсом, а критерием служит самопроизвольное сосуществование впуска через одно постоянно открытое отверстие и выпуска через другое. Новая переменная — знак деформации аналитической опорной поверхности. Поэтому заявляемая новизна относится именно к данной конструкции и карте отклика, а не к общей идее клапана без движущихся частей.

13.5 Фокальный закон РНВ и границы его наследования газодинамикой

Меридиональные гиперболические образующие обладают точным фокальным соотношением геометрической оптики для определённых семейств зеркально отражающихся лучей. Однако частицы сжимаемого газа не подчиняются оптическому закону зеркального отражения от стенки камеры. Физический переход обеспечивают уравнения Эйлера, условие непроницаемости и передача импульса стенкой под действием давления. Для вертикальной стенки радиуса r(y) локальный наклон r′(y) определяет нормаль n=(e_r−r′e_y)/sqrt(1+r′²); поэтому нестационарное давление передаёт осевой импульс через интеграл по поверхности с геометрическими весами. Фокальная конструкция служит аналитическим способом задания поля нормалей, а не дополнительной силой и не теоремой о непосредственном направлении газовых струй.

Сравнение с двойным конусом имеет важное, но строго ограниченное причинное значение. Если объём камеры, площади окон, возбуждение и численная схема согласованы, различие временных историй расходов подтверждает влияние криволинейной аналитической границы, а не этих уравненных интегральных величин. Само по себе такое различие не выделяет оптическую фокальность как единственную причину: одновременно отличаются распределение кривизны, наклоны стенок, локальный импеданс, отражения волн и нелинейные градиенты давления. Для специфической проверки фокального механизма нужны нефокальные контрольные профили с раздельным согласованием перечисленных характеристик, а также пространственно-временные поля давления и потока импульса.

13.6 Согласованный двойной конус: что установлено расчётами

При едином численном протоколе OpenFOAM Foundation 13 с реконструкцией Minmod/MinmodV интегральная характеристика одновременного впуска и выпуска J для точного PHB выше, чем для согласованного двойного конуса, на всех трёх исследованных сетках. Приведённые отношения J(PHB)/J(двойной конус) составляют 9,382 на G2 (98×24 ячейки), 5,075 на G3 (126×30) и 2,749 на G4 (168×40). Изменение между G3 и G4 существенно; следовательно, эти значения нельзя представлять как сошедшийся коэффициент преимущества. Строго установленный результат состоит в сохранении знака преимущества PHB по данной метрике на проверенных сетках, тогда как его величина остаётся чувствительной к дискретизации. Двойной конус также способен демонстрировать смешанное состояние расходов; само явление не является исключительной принадлежностью PHB.

Метрика J интегрирует одновременный верхний впуск и нижний выпуск по принятым непрерывным временным интервалам. Она не равна термодинамическому КПД, тяге, обновлению горючей смеси или коэффициенту выпрямления механического клапана. При проектировании нужно совместно учитывать время первого разворота верхнего потока, начало и длительность устойчивого смешанного состояния, раннюю верхнюю утечку, обратный нижний приток, замещение газа и суммарный осевой импульс. Оптимизация одного показателя может ухудшить другой.

13.7 От пассивного газодинамического элемента к пульсирующему двигателю

Предлагаемая схема двигателя или горелки предусматривает подачу заранее приготовленной топливовоздушной смеси через постоянно открытое верхнее круглое окно, выпуск через нижнее усечённое окно и использование аналитической камеры PHB/ZPHB как пассивного времязадающего элемента. Событие с повышением давления сначала создаёт выброс; последующее перераспределение волн и давления может ограничить обратный поток через верхнее окно и обеспечить поступление свежей смеси при сохраняющемся нижнем выпуске. Следующее тепловыделение могло бы возобновить последовательность. Это физически мотивированная концепция двигателя, но не подтверждённый автономный цикл горения в рассматриваемых нереактивных расчётах.

Доказательство работы двигателя требует сопряжения сжимаемого течения с переносом компонентов, кинетикой дефлаграционного горения, теплообменом со стенками и заданным правилом зажигания. После единственного пускового воспламенения все следующие события должны возникать из рассчитанного состояния без принудительной второй искры. Необходимые показатели: масса свежей смеси с подтверждённым происхождением из верхнего входа, массы топлива и окислителя, обратный приток через нижнее окно, суммарный осевой импульс, выделившаяся химическая энергия и воспроизводимый период цикла. Устойчивый режим требует также ограниченного изменения состояния от цикла к циклу и полного баланса энергии и импульса. Разрешённые геометрические параметры остаются a, b, R и положение нижнего среза; аналитический закон стенки и топология PHB/ZPHB не изменяются.

13.8 Оптимизация геометрии и статус оптимума

Обозначим alpha=a/R, beta=b/R и lambda=y_cut/R. Целесообразная задача проектирования состоит не в простом максимуме J, а в поиске Парето-эффективных сочетаний свежего верхнего впуска, полезного нижнего импульса, малой верхней утечки, малого нижнего обратного притока, приемлемого времени переключения и, для реактивного устройства, воспроизводимого горения. Имеющиеся параметрические исследования показывают

зависимость отклика от этих координат, но не устанавливают единственный экспериментально подтверждённый оптимум. Оптимальные параметры должны приводиться вместе с интенсивностью источника, отношением давлений, весами целевых функций, сеткой, граничными условиями и допустимым диапазоном изготовления.

14 Инженерные архитектуры и перспективы технологий будущего

Инженерные проектные переменные — время верхнего переключения, длительность связного эпизода противоположных знаков, ранняя верхняя утечка и распределение выпуска. Они образуют многокритериальную задачу, поскольку более раннее первое переключение не обязательно удлиняет непрерывный впуск или улучшает замещение газа. Рассчитанные компромиссы дают основу для выбора геометрии под определённую переходную функцию.

Минимальный лабораторный прототип должен измерять именно временные события. Два синхронных двунаправленных расходомера, датчики давления в камере и резервуарах и воспроизводимый импульс позволят напрямую сравнить PHB, V-ZPHB и близкую деформированную геометрию. Такой эксперимент установит, сохраняется ли рассчитанная временная организация в реальном вязком трехмерном газе.

Наблюдаемое поведение предлагает несколько архитектур, не требующих трактовки как двигателя. Импульсный пневматический маршрутизатор может использовать смешанный интервал, когда через один порт идёт впуск, а остаточный выброс продолжается через другой. Элемент выравнивания давления может использовать задержку смены знака как пассивную временную переменную. Элемент изоляции импульсных возмущений может быть спроектирован для уменьшения ранней утечки при сохранении заданного пути выброса. В каждом случае уже продемонстрированная величина — время событий и история направленности; реальная эффективность потребует учёта вязкости, потерь, технологических допусков и эксперимента.

Помимо интегральных измерений расходов, шлирен-съёмка или высокоскоростная визуализация градиентов плотности позволят проверить предлагаемую волновую интерпретацию. Такие измерения следует синхронизировать с импульсом и сигналами обоих отверстий, чтобы связать видимое возвращающееся возмущение с конкретной сменой знака расхода. Расчёты обосновывают необходимость этого эксперимента, но не дают измеренного пространственного изображения, которое могло бы его заменить.

14.1 Пассивный импульсный пневматический маршрутизатор

Наиболее прямая архитектура использует два открытых отверстия и один импульс давления. Геометрия выбирается для получения заданного интервала противоположных знаков после раннего выпуска. Полезные проектные наблюдаемые — $\{\tau_{top,sw}, \Delta\tau_{mix}\}$. Такой элемент может принимать газ через одно отверстие при продолжающемся остаточном выпуске через другое. Расчёты демонстрируют этот интервал и его чувствительность к геометрии в исследованных условиях; нагрузочную способность и эффективность ещё предстоит установить.

14.2 Элемент пассивной временной развязки импульса

Вторая архитектура использует подмножество малого суммарного верхнего расхода и снижение ранней верхней утечки как изолирующую функцию. Входной импульс поступает в камеру, а геометрия перераспределяет его так, что на конечном интервале верхнее отверстие имеет малый или отрицательный расход при продолжающемся нижнем выпуске. Для инженерной оценки потребуются переданный импульс, пиковое давление и

длительность состояния малого расхода при одинаковой введённой энергии. Представленные расчёты устанавливают только направленность и времена, а не оптимизированную эффективность изоляции.

14.3 Геометрически настраиваемый элемент выпуска и впуска

Третья архитектура рассматривает a,b,R и нижнее усечение как проектные переменные для настройки времени перехода от выпуска к впуску. Целевая задержка задаётся формой. Практическое проектирование потребует оптимизации с ограничениями на объём, минимальный радиус кривизны, потери и допустимое давление. Наблюдаемая монотонная зависимость времени переключения от PR также означает чувствительность устройства к амплитуде входного импульса; это может быть как проектным ограничением, так и возможным механизмом пассивного преобразования амплитуды во время.

14.4 Геометрически закодированные пороговые и переключающие элементы

Знаковый переход PHB указывает на класс устройств, в которых геометрия изготовления используется для выбора переходного режима, а не только гидравлического сопротивления. Семейство соседних профилей можно проектировать так, чтобы один стандартный импульс давал сильную разнонаправленную маршрутизацию, слабый режим либо отсутствие mixed-sign интервала. В реальной пневматической или газораспределительной системе такое поведение потенциально способно реализовать пассивное пороговое действие или преобразование амплитуды в время/состояние без золотника, электрического датчика и активного контроллера. Доказанным здесь является shape-sensitive transient; реальное пороговое устройство требует вязких 3D-расчётов, анализа допусков и эксперимента.

14.5 Концепции для высоких температур, большого числа циклов и труднодоступных сред

Устройства без движущихся частей особенно привлекательны там, где ресурс механики, смазка, задержка привода или агрессивная среда ограничивают обычные клапаны [10]. Если геометрически программируемый режим сохранится при реалистичных потерях, жёсткий элемент PHB/ZPHB может быть исследован для маршрутизации импульсов горячего газа, подавления обратного потока в пульсирующих камерах, ударно-импульсной развязки, пневматической логики, микрофлюидного задания времени либо защищённой последовательности выпуска/впуска. Потенциальный технологический сдвиг состоит в переносе части функции управления от движущихся деталей и электроники к неизменяемой форме границы. Ни одно из этих применений не заявляется в настоящей работе как уже подтверждённая характеристика устройства.

15 Ограничения и область применимости

Настоящая доказательная база имеет аналитический и вычислительный характер. Основная газодинамическая модель осесимметрична, невязка и описывает идеальный газ; вязкость, пограничные слои, турбулентность, теплообмен со стенкой, податливость конструкции и трёхмерная асимметрия находятся вне текущей модели.

Продемонстрированная клапанная функция является переходной. Перенос в повторяющуюся камеру сгорания, пульсирующий реактивный двигатель или детонационную систему требует отдельных доказательств циклической подачи свежего заряда, динамики зажигания/горения, тепловой нагрузки, полезной тяги и устойчивости от цикла к циклу.

Знаковый отклик PHB показывает выраженное изменение категории конечновременного состояния, определённой принятым порогом, для исследованных возмущений. Такая операционная классификация не является теоремой о математической бифуркации и не доказывает исчезновения сколь угодно слабых обратных течений.

Разнонаправленное состояние не является исключительным свойством точной фокальной PHB: его демонстрируют также корректные контрольные двойные конусы и близкие профили. Специфический результат PHB — сильная локальная знаковая чувствительность. Согласование объёма и площадей отверстий само по себе не сохраняет наклоны стенки у кромок портов и в центральном сопряжении; необходимы контроль с $f=f'=0$ на соответствующих границах и аудит дискретных Vmesh, Atop, Abottom, Vsource, Eadded. G3 — повторение на более тонкой сетке, а не независимый эксперимент; датчики давления в том же расчёте — дополнительные диагностики. В OpenFOAM PHB J меняется с сеткой 0,016795; 0,012659; 0,006513, поэтому предельное значение J не заявлено, тогда как времена первого совместного события 2,042957; 2,070738; 2,071882 дают более устойчивое свидетельство о времени события.

Знаковые расчёты ZPHB подтверждают локальное сохранение разнонаправленного состояния в конкретном гладком центрированном семействе возмущений ±2% при исследованной рабочей точке. Они не устанавливают технологический допуск на шероховатость, овальность, перекос, температурную деформацию, эрозию или изменение толщины. Абсолютная величина J остаётся чувствительной к сетке.

Дополнительная серия OpenFOAM с явно рассчитанной внешней областью завершена до $\tau=4$ и прошла проверки сетки и интегральных балансов по сохранённым временным рядам, но использует только одну сетку; при равной внесённой энергии локальные эффективные отношения давления источника различаются. Изменение порядка PHB и биконуса по J относительно G2–G4 с граничными патчами не допускает утверждения об универсальном преимуществе, независимом от решателя и внешних границ. Верхний трассер во всех сохранённых состояниях камеры равен нулю, а боковая внешняя область отдельно не маркирована; поэтому измеренный валовой верхний приток не доказывает заправку газом из верхней внешней области. В компактном архиве v1.0.3 нет полных поздних пространственных полей.

Все рисунки статьи являются исходными результатами применения геометрических и расчётных скриптов исследования; они не реконструировались и не перерисовывались вручную. Оригинальные файлы изображений и соответствующие создающие скрипты должны входить в единый расчётный архив, сопровождающий публикацию на Zenodo. Это утверждение относится к происхождению рисунков, а не к независимой валидации каждой физической модели.

16 Заключение

В рассматриваемых осесимметричных моделях идеального газа исследованные PHB и ZPHB демонстрируют начальный выпуск, устойчивую смену знака суммарного верхнего расхода и конечные интервалы одновременного верхнего впуска и нижнего выпуска. Существование этих событий поддерживается приведёнными проверками сетки и возбуждения. Расчёты HLLC с явно заданной внешней областью и отдельные проверки граничных условий OpenFOAM имеют разный физико-численный смысл и не выдаются за единую проверку сходимости внешней области.

Работа устанавливает на аналитическом и вычислительном уровнях класс пассивных газодинамических клапанных элементов, в которых оба порта остаются геометрически

открытыми, а клапанная функция создаётся переходным состоянием газа. Точные представители PHB и ZPHB многократно переходят от начального выпуска к устойчивому развороту верхнего потока и конечным интервалам одновременного верхнего впуска и нижнего выпуска. Последовательность состояний сохраняется на исследованных сетках, отношениях давлений, при нормировке одинаковой энергии и изменении внешней области.

PHB задаёт чувствительную геометрически программируемую координату режима. В первом согласованном по портам и объёму знаковом семействе профили ±0,5% различаются по силе mixed-state в 42,64 раза на G2, а тот же знаковый порядок сохраняется при сеточном уточнении. Независимо параметризованное центрированное семейство воспроизводит порядок с отношением 6,999 при практически одинаковой амплитуде источника. Следовательно, локальный отклик в пространстве геометрий PHB резко зависит от знака изменения формы. Эти отношения относятся к конкретным численным сеткам и выбранным метрикам; они не являются сеточно-сошедшейся физической константой или измеренным множителем эффективности устройства.

В исследованных парах PHB/ZPHB, не полностью согласованных по объёму и портам, конкретные конструкции ZPHB переключаются раньше и демонстрируют указанное различие распределения выпускного потока. Эффект нельзя приписать только зеркальной или фокальной геометрии: объёмы отличаются примерно на 0,67%, площади нижних отверстий — на 11,57%, а исходное b также различно. В специальной знаковой серии G3 точная ZPHB и варианты ±0,5%, ±1%, ±2% сохраняют разнонаправленное состояние; J^-/J^+ равны 1,020, 1,022 и 1,014.

Параметрические исследования PHB дают дополнительный проектный результат. В исходном скрининге и оговорённых длительных сравнениях изменение $\alpha=a/R$, $\beta=b/R$ и $N=R/|y_{cut}|$ сопровождается изменением показателей трассеров, обратного потока, времени переключения и переноса импульса. Отдельная однопараметрическая серия по β также поддерживает возможность геометрической настройки времени события. Это конечная выборка с конкретным численным протоколом, а не доказанный глобальный оптимум или подтверждённая дозаправка верхним свежим газом.

Главный научный результат — воспроизводимая численная демонстрация геометрически зависимого переходного газообмена между двумя постоянно открытыми отверстиями, необычно высокой локальной знаковой чувствительности исследованной PHB и контрастного локального сохранения режима в проверенном семействе деформаций ZPHB. ГВИ задаёт подход к постановке и проверке подобных задач с первичным выбором геометрии на основе общепринятых уравнений. Результаты мотивируют дальнейшие контрольные расчёты и эксперименты, но не доказывают исключительность относительно всех возможных форм камер и не устанавливают нового универсального закона газовой динамики.

Третья постановка OpenFOAM 13 с явно моделируемым окружающим газом укрепляет доказательство переходного двухпортового режима: PHB, ZPHB и согласованный с PHB по объёму и отверстиям биконус демонстрируют разделённые интервалы одновременного верхнего впуска и нижнего выпуска. В данной конфигурации у ZPHB наибольшая суммарная длительность ($\Delta\tau=0{,}650$, вдвое выше PHB) и максимальное J (0,003843 против 0,001619 у PHB), причём биконус также превосходит PHB по J. Следовательно, подтверждённое полезное свойство — геометрически настраиваемые время и продолжительность состояний, а не универсальный выигрыш PHB по КПД. Трассеры дополнительно показывают различие между измеренным поступлением через верхнее

отверстие и доказанной заправкой газом верхней внешней области, которая в этих трёх расчётах не установлена. Две постановки OpenFOAM дают разные ранжирования и должны рассматриваться как отдельные вычислительные протоколы.

Доступность кода и данных.

Единый архив расчётных скриптов и соответствующих вычислительных данных будет размещён вместе с данной статьёй в одной записи Zenodo. Численные утверждения статьи относятся к явно указанным постановкам решателей и соответствующим наборам данных.

17 Литература

[1] E. F. Toro, Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics, 3rd ed., Springer, 2009. DOI: 10.1007/b79761.

[2] Q. M. Nguyen, J. Abouezzi, L. Ristroph, Early turbulence and pulsatile flows enhance diodicity of Tesla's macrofluidic valve, Nature Communications 12 (2021) 2884. DOI: 10.1038/s41467-021-23009-y.

[3] H. Qiu, C. Xiong, C.-J. Yan, L.-X. Zheng, Effect of aerodynamic valve on backflow in pulsed detonation tube, Aerospace Science and Technology 25(1) (2013) 1-15. DOI: 10.1016/j.ast.2011.12.003.

[4] H. Qiu et al., A theoretical and 1-D numerical investigation on a valve/valveless air-breathing pulse detonation engine, Chinese Journal of Aeronautics 34(1) (2021) 68–78. DOI: 10.1016/j.cja.2020.09.051.

[5] V. Khaustov, Focal-Transport Ray Law in Pseudohyperboloidal Cavities with Variable Negative Gaussian Curvature: Exact Focal Contraction, Event-Order Transport, Skew-Ray Unfolding, and Finite-Wavelength Computational Tests, 2026. DOI: 10.5281/zenodo.21969312.

[6] E. F. Toro, M. Spruce and W. Speares. Restoration of the contact surface in the HLL-Riemann solver. Shock Waves 4 (1994), 25–34. DOI: 10.1007/BF01414629.

[7] NASA/NPARC Alliance. Examining Spatial (Grid) Convergence. https://www.grc.nasa.gov/www/wind/valid/tutorial/spatconv.html. Дата обращения: 13 октября 2026 года.

[8] NASA Glenn Research Center. General Thrust Equation. https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/BGP/thrsteq.html. Дата обращения: 13 октября 2026 года.

[9] E. Stemme, G. Stemme, A valveless diffuser/nozzle-based fluid pump, Sensors and Actuators A: Physical 39(2) (1993) 159–167. DOI: 10.1016/0924-4247(93)80213-Z.

[10] V. Tesař, No-moving-part valve for automatic flow switching, Chemical Engineering Journal 162(1) (2010) 278–295. DOI: 10.1016/j.cej.2010.04.028.

[11] S. Wang, A. Batikh, L. Baldas, A. Kourta, N. Mazellier, S. Colin, S. Orieux, On the modelling of the switching mechanisms of a Coanda fluidic oscillator, Sensors and Actuators A: Physical 299 (2019) 111618. DOI: 10.1016/j.sna.2019.111618.

[12] M. A. Hilborn, K. A. Jauernig, M. J. Pegg, J. B. Haelssig, Analysis of Tesla valve geometric parameters for the optimization of diodicity within a flow control device, International Journal of Heat and Fluid Flow 120 (2026) 110396. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2026.110396.

[13] C. J. Greenshields, H. G. Weller, L. Gasparini and J. M. Reese, Implementation of semi-discrete, non-staggered central schemes in a colocated, polyhedral, finite volume framework, for

high-speed viscous flows, International Journal for Numerical Methods in Fluids 63(1) (2010), 1–21. DOI: 10.1002/fld.2069.

[14] A. Kurganov and E. Tadmor, New high-resolution central schemes for nonlinear conservation laws and convection–diffusion equations, Journal of Computational Physics 160 (2000), 241–282. DOI: 10.1006/jcph.2000.6459.

[15] OpenFOAM Foundation, shockFluid solver documentation and implementation, version 13. https://cpp.openfoam.org/v13/classFoam_1_1solvers_1_1shockFluid.html (accessed October 2026).