

03

Численное моделирование формирования возвратной отраженной ударной волны в полужамкнутом канале с газопроницаемыми высокопористыми преградами

© С.Г. Миронов, Т.В. Поплавская, С.В. Кириловский, И.С. Цырюльников

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mail: mironov@itam.nsc.ru

Поступило в Редакцию 17 февраля 2026 г.

В окончательной редакции 16 марта 2026 г.

Принято к публикации 16 марта 2026 г.

Приведены результаты численного исследования взаимодействия ударной волны (число Маха $M = 1.39$), формирующейся на входе в полужамкнутый цилиндрический канал, с высокопористыми газопроницаемыми преградами, расположенными в нем. Рассмотрены преграды с неоднородной пространственной структурой, предотвращающие формирование возвратной отраженной ударной волны вблизи входа в канал. Предложен метод управления образованием ударных волн в возвратном течении выхлопного тракта импульсной аэродинамической трубы.

Ключевые слова: ударные волны, полужамкнутый канал, газопроницаемые высокопористые преграды, метод управления, численное моделирование.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.12.62977.20657

Исследование взаимодействия ударных волн (УВ) с преградами имеет важное практическое значение для защиты объектов от воздействия УВ и предотвращения детонации горючих смесей в технологических процессах. В последнее время эти задачи решаются с использованием подхода, в котором напрямую моделируется течение газа в скелете пористого материала преграды, т. е. без использования континуальных моделей механики гетерогенных сред [1–7].

В [5–7] экспериментально и численно изучались процессы отражения УВ от высокопористых преград, установленных в полужамкнутом цилиндрическом канале, с целью предотвращения их фокусировки и преобразования в сильные УВ. Это показало, что процессы взаимодействия УВ с газопроницаемыми высокопористыми материалами могут быть использованы для управления течениями в импульсных газодинамических установках. При работе импульсной аэродинамической трубы сверхзвуковой поток из сопла истекает в предварительно откачанный выхлопной тракт, который обычно представляет собой полужамкнутый цилиндрический канал. Аэродинамические измерения ведутся в области однородного течения, примыкающего непосредственно к срезу сопла (область измерений). Основным источником искажения картины течения в этой области являются УВ, отраженные от заднего торца выхлопного тракта. Эти возвратные УВ взаимодействуют с основным потоком и приводят к нарушению рабочего режима аэродинамической трубы.

Задачей настоящей работы является подавление возвратных ударных волн с помощью установки в модельный полужамкнутый цилиндрический канал газопроницаемых высокопористых вставок. Ранее авторами

в работах [5–7] было показано, что оптимальной преградой для минимизации интенсивности отраженных волн вблизи преграды в полужамкнутом канале является комбинированная преграда, состоящая из четырех слоев треугольных сеток с уменьшающейся пористостью и одного слоя высокопористого ячеистого материала. Последовательные слои сеток обеспечивают минимальное отражение УВ от элементов их структуры и одновременно создают задержку по времени для отраженных волн, возникающих в глубине преграды. Слой высокопористого ячеистого материала, имея высокое гидравлическое сопротивление для течения, подавляет волны, пришедшие из буферного объема и являющиеся результатом отражений между торцом буферного объема и преградой. При этом снижение интенсивности отраженных волн было получено непосредственно перед комбинированной преградой.

Однако при движении ослабленных волн давления к переднему торцу длинного канала происходит их трансформация в УВ. Цель настоящей работы — построение комбинированной преграды, которая препятствует формированию УВ в возвратном течении вблизи переднего торца модельного канала.

Численное моделирование задачи взаимодействия УВ с преградами в полужамкнутом цилиндрическом канале осуществлялось путем решения нестационарных уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу, в двумерной (осесимметричной) постановке с использованием $k-\omega$ SST модели турбулентности с помощью пакета ANSYS Fluent при условии высоких чисел Рейнольдса Re (в настоящей работе $Re = \rho U D / \mu = 9 \cdot 10^6$, где ρ , U , μ — плотность, скорость и динамическая вязкость в течении за УВ). При решении задачи для

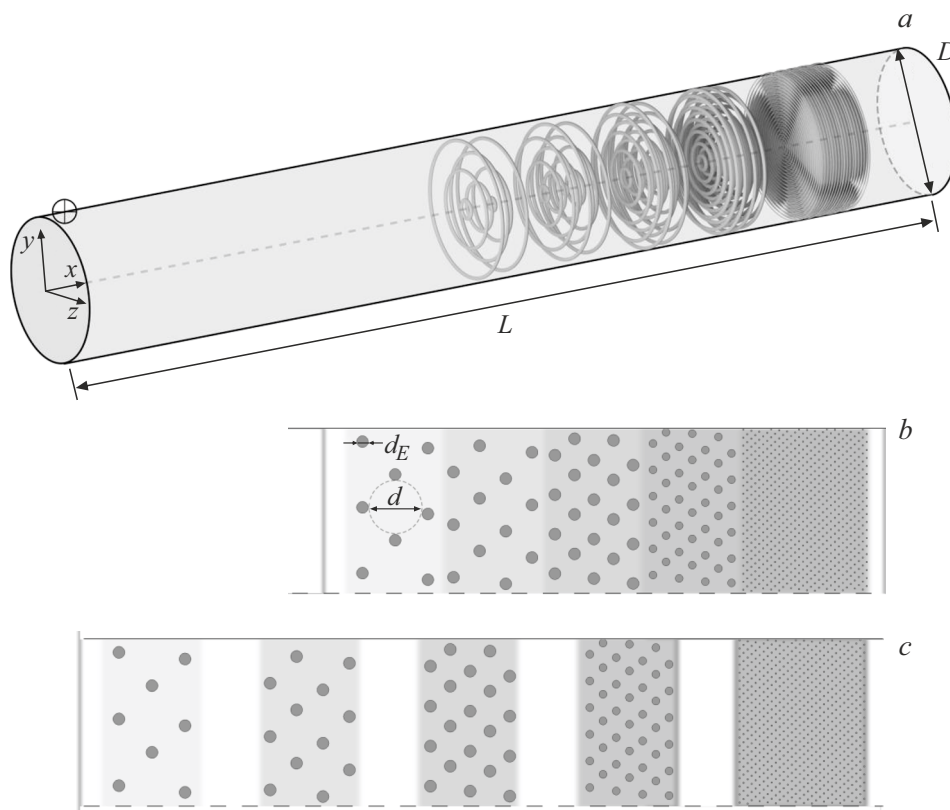


Рис. 1. Схематическое изображение общего вида расчетной области с тороидальной моделью скелета газопроницаемой преграды и указанием положения \oplus точки регистрации давления (а) и моделей скелета пятислойной преграды (срез в плоскости осевого сечения канала) с совмещенными слоями (b) и разнесенными слоями (c).

аппроксимации по времени использовалась явная схема Рунге–Кутты четвертого порядка, для пространственной аппроксимации — противопотоковая схема второго порядка, метод расщепления вектора потока — Roe-FDS с TVD-ограничителем для сохранения монотонности решения вблизи разрывов и локальных экстремумов течения. Для исследования течения в высокопористых преградах использовался подход, в котором напрямую моделируется течение газа в скелете пористого материала преграды, т.е. с разрешением элементов скелета пористой вставки.

Расчетная область представляла собой длинный полузамкнутый цилиндр длиной L и диаметром D (рис. 1, а). Далее все геометрические размеры отнесены к диаметру канала D . Внутри цилиндрического канала на расстоянии $L/D = 1.2$ от его заднего торца располагались модельные неоднородные пятислойные преграды (рис. 1, b, c). Для моделирования пористых преград применялась разработанная авторами тороидальная скелетная модель [8], представляющая собой набор торов, т.е. соосных кольцевых элементов круглого поперечного сечения (рис. 1, а). Таким образом, в плоскости осевого сечения (рис. 1, b) эта модель представляет собой набор непроницаемых круглых элементов диаметром d_E , расположенных в шахматном порядке. Диаметр d_E круглых элементов (торов), их количество N и расстояние между

ними d выбирались из условия задания пористости слоя. Величина пористости материала рассчитывалась по формуле $k = (1 - V_E/V_c)$, где V_E — объем элементов скелета в слое преграды с учетом диаметров торов, V_c — полный объем слоя преграды.

Расчетная область за пределами газопроницаемой преграды покрывалась регулярной прямоугольной расчетной сеткой со сгущением к преграде. Зона пористой преграды покрывалась нерегулярной четырехугольной сеткой. Расчетные сетки были согласованы со стенками канала и элементами скелета в пористой зоне. Методом сходящихся сеток были выбраны оптимальные расчетные сетки с количеством вычислительных ячеек 230 тыс. для канала без пористой преграды и 360 тыс. для каналов с пористыми преградами (197 тыс. в пористой зоне и 163 тыс. вне ее). При этом на половину диаметра D канала приходилось 250 ячеек, на длину канала — от 920 до 1440 ячеек в зависимости от отсутствия/наличия преград. На периметр сечений тороидальных элементов приходилось от 19 до 8 ячеек расчетной сетки в зависимости от диаметра элемента. Дальнейшее измельчение сетки не приводило к существенному изменению давления в отраженных волнах (отличие $< 2\%$).

В задаче рассматривались преграды разной толщины: 1 — преграда, состоящая из пяти совмещенных слоев высокопористого материала (рис. 1, b), значения

Параметры слоев высокопористой преграды

Параметр	Слой 1	Слой 2	Слой 3	Слой 4	Слой 5
Количество элементов скелета	8	12	20	42	651
d_E/D	0.036	0.036	0.036	0.024	0.005
d/D	0.2	0.16	0.12	0.08	0.024
k	0.95	0.92	0.88	0.87	0.95

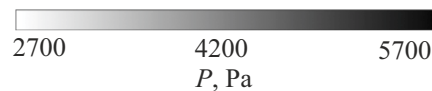


Рис. 2. Расчетные поля давления в плоскости осевого сечения модельного канала для разных моментов времени. *a* — без пористой преграды при $t/t^* = 1$; *b* — с преградой 1 при $t/t^* = 0.96$; *c* — с преградой 2 при $t/t^* = 0.74$.

параметров которых приведены в таблице; 2 — та же преграда, но с разнесенными вдоль канала передними четырьмя слоями на утроенную толщину каждого слоя (рис. 1, *c*) без смещения последнего слоя. Нормированная толщина первых четырех слоев равнялась 0.3, а последнего — 0.4. Следует заметить, что данные по толщине слоев и величине пористости k каждого слоя соответствуют данным, подобранным в работе [7] и обеспечивающим самый медленный рост давления во всех отраженных волнах вблизи пористой преграды. Данные по расстоянию между слоями получены в параметрических численных исследованиях: увеличение/уменьшение расстояния между слоями относительно указанного в работе приводило соответственно к росту амплитуд вариаций волн давления или к формированию возвратной УВ в точке регистрации давления (т.е. вблизи входа в канал).

Давление регистрировалось в точке на поверхности модельного канала на расстоянии $L/D = 0.25$ от переднего торца. На левой входной границе задавались значения полного давления и температуры, на стенках модельного канала, включая задний торец, и элементах скелета преграды — условия прилипания и адиабатическая температура поверхности. УВ формируется на входе в модельный канал за счет разницы полного давления P_0 на входной границе и начального статического давления в канале, такой, что формируется УВ с числом Маха $M = 1.39$.

Для этих условий выполнено численное моделирование взаимодействия УВ с модельными неоднородными пятислойными преградами 1 и 2. На рис. 2 приведены поля давления для модельного канала без пористой преграды и для модельного канала с обеими преградами

в моменты t/t^* прихода передних фронтов возвратного течения в точку регистрации давления (t^* — время прихода возвратной УВ в случае отсутствия пористой преграды). Видно, что в случае отсутствия преграды ко входу в канал приходит возвратная УВ с большим скачком давления. В случае с преградой 1 в точку регистрации также приходит возвратная УВ, поскольку движущиеся вдоль канала фронты волн давления, отраженные от отдельных слоев преграды 1, догоняют друг друга и тем самым формируют единую возвратную отраженную УВ, но с меньшим скачком давления. В случае с преградой 2 фронты волн давления, отраженные от отдельных слоев преграды, из-за разнесения этих слоев вдоль канала не успевают догнать друг друга и поэтому не формируют единую возвратную отраженную УВ. Вследствие этого на рис. 2, *c* видно наличие нескольких волн давления малой амплитуды, расположенных вдоль канала.

На рис. 3 приведены результаты расчетов в виде зависимостей от времени статического давления P , нормированного на полное давление, в точке регистрации давления также для модельного канала без пористой преграды и для модельного канала с обеими преградами. Прежде всего следует заметить, что результаты расчетов для модельного канала без пористой преграды показывают совпадение амплитуды скачка давления и времени t^* прихода УВ в точку регистрации с данными, полученными для плоской УВ в рамках одномерного течения идеального совершенного газа [9].

Для случая преграды 1 в точке регистрации давления, так же как для модельного канала без пористой преграды, наблюдается формирование интенсивного скачка давления вследствие трансформации отраженных от

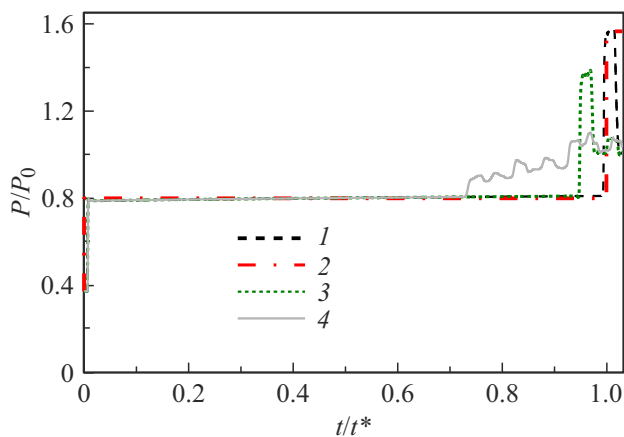


Рис. 3. Зависимости статического давления от времени в точке регистрации давления. 1 — расчет для модельного канала без пористой преграды; 2 — расчет по формулам для плоской УВ; 3 — расчет для модельного канала с преградой 1; 4 — расчет для модельного канала с преградой 2.

элементов каждого слоя преграды волн давления в единую возвратную ударную волну при их движении от преграды ко входу в канал. Однако при этом видно, что амплитуда скачка давления при наличии преграды 1 меньше, чем в ее отсутствие, вследствие потерь давления в процессе трения на элементах преграды.

В случае преграды 2 в точке регистрации давления вместо интенсивного скачка давления наблюдается растянутый во времени рост давления (безударный профиль давления) с амплитудой, в 1.5 раза меньшей скачка давления в УВ, формирующейся как в течении без преграды, так и в течении с преградой 1. Полученный эффект достигнут разнесением вдоль модельного канала слоев комбинированной преграды с разной пористостью и числом элементов в слое.

Из описанной выше газодинамики процесса следует метод управления образованием ударных волн в возвратном течении полузамкнутого канала, моделирующего выхлопной тракт импульсной аэродинамической трубы. Применение данного метода ослабления возвратного течения может существенно увеличить время стационарной работы импульсной трубы и участок однородного течения.

Таким образом, в работе получены результаты, позволяющие конструировать газопроницаемые высокопористые преграды, устанавливаемые в полузамкнутый цилиндрический канал и влияющие на характеристики возвратного течения. Преграды, предотвращающие формирование возвратной ударной волны вблизи входа в канал, должны состоять из нескольких слоев газопроницаемого высокопористого материала с увеличивающимся количеством элементов скелета, разнесенных вдоль канала. На основе этих результатов предложен метод управления формированием ударных волн в возвратных течениях выхлопного тракта импульсной аэродинамиче-

ской трубы с помощью многослойных высокопористых преград.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН с использованием оборудования ЦКП „Механика“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Е.Г. Глазова, А.В. Кочетков, А.А. Лисицын, И.А. Модин, Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки, **27** (4), 645 (2023). DOI: 10.14498/vsgtu2007
- [2] Д.А. Сидоренко, П.С. Уткин, Хим. физика, **37** (9), 43 (2018). DOI: 10.1134/S0207401X1809011X [D.A. Sidorenko, P.S. Utkin, Russ. J. Phys. Chem. B, **12** (5), 869 (2018). DOI: 10.1134/S1990793118050111].
- [3] V. Vinod, G.P. Majji, S.V. Anil, O. Ram, L.D. Chandrala, Phys. Fluids, **37** (7), 076135 (2025). DOI: 10.1063/5.0273908
- [4] J.D. Regele, J. Rabinovitch, T. Colonius, G. Blanquart, Int. J. Multiphase Flow, **61**, 1 (2014). DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.12.007
- [5] S. Mironov, S. Kirilovskiy, T. Poplavskaya, I. Tsyryulnikov, E3S Web Conf., **459**, 04007 (2023). DOI: 10.1051/e3sconf/202345904007
- [6] С.Г. Миронов, С.В. Кириловский, Т.В. Поплавская, И.С. Цырюльников, ПМТФ, **66** (2), 17 (2025). DOI: 10.15372/PMTF202415459 [S.G. Mironov, S.V. Kirilovskiy, T.V. Poplavskaya, I.S. Tsyryulnikov, J. Appl. Mech. Tech. Phys., **66** (2), 191 (2025). DOI: 10.1134/S0021894425020154].
- [7] С.Г. Миронов, Т.В. Поплавская, С.В. Кириловский, И.С. Цырюльников, ПМТФ, **66** (5), 105 (2025). DOI: 10.15372/PMTF202515672 [S.G. Mironov, T.V. Poplavskaya, S.V. Kirilovskii, I.S. Tsyryul'nikov, J. Appl. Mech. Tech. Phys., **66** (5), 916 (2025). DOI: 10.1134/S0021894425700476].
- [8] С.В. Кириловский, Т.В. Поплавская, С.Г. Миронов, И.С. Цырюльников, И.Р. Валиуллин, Т.С. Милицина, Теплофизика и аэромеханика, **29** (5), 741 (2022). [S.V. Kirilovskiy, T.V. Poplavskaya, S.G. Mironov, I.S. Tsyryulnikov, I.R. Valiullin, T.S. Militsina, Thermophys. Aeromech., **29** (5), 703 (2022). DOI: 10.1134/S0869864322050080].
- [9] Л.Г. Лойцянский, *Механика жидкости и газа* (Наука, М., 1987).