

Д. А. Губанов<sup>1,2</sup>, В. И. Запрягаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН  
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия*

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

*gubanov@itam.nsc.ru*

## МНОГОМОДОВЫЕ ПУЛЬСАЦИИ В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ПОЛОСТИ ПРИ ОБТЕКАНИИ СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

Представлены результаты экспериментального исследования структуры течения и спектральных характеристик пульсаций давления в осесимметричной полости, омываемой сверхзвуковым потоком при числе Маха 2. Выявлено наличие многомодовых пульсаций, характеризующихся тем, что в различные моменты времени доминируют различные моды колебаний. Максимальная амплитуда пульсаций давления одной моды соответствует минимальному значению другой. Зарегистрирован случайный характер перестройки режима колебаний с одной моды на другую с временем существования колебаний отдельной моды существенно больше ее периода. Установлено, что моды колебаний существуют в виде тороидальных и спиральных возмущений. Результаты численного моделирования качественно воспроизводят многомодовый характер пульсаций, наблюдаемый в эксперименте.

*Ключевые слова:* осесимметричная выемка, сверхзвуковое обтекание, многомодовые пульсации.

### Введение

Различные виды каверн встречаются повсеместно в авиационной технике (ниши шасси, отсеки для размещения фотоаппаратуры) и технологических установках (в рабочих частях трансзвуковых аэродинамических труб, теплообменниках, элементах двигательных установок) и во многих других инженерных приложениях. Явление сверхзвукового обтекания осесимметричного уступа, например, встречается в процессе отстыковки космических аппаратов и ступеней ракет. Часто при обтекании каверн возникают интенсивные пульсации давления. При определенных условиях уровни этих пульсаций могут достигать очень высоких величин и обуславливать недопустимо высокий уровень шума или даже повреждение близлежащих агрегатов, чувст-

вительной аппаратуры. Но существуют и положительные примеры использования каверн: использование последовательно установленных за конусом серии дисков (Multi-Row-Disk, MRD) для снижения веса, аэродинамического сопротивления и тепловых нагрузок летательных аппаратов как развитие применения аэродинамической иглы.

Пульсации течения в выемке при сверхзвуковом обтекании можно охарактеризовать наличием таких элементов течения, как слой сдвига, наличие области дозвукового возвратного течения, области отрыва и присоединения потока, ударные волны. Взаимодействие колеблющегося слоя сдвига с задним торцом полости вызывает периодическое втекание или вытекание некоторой массы газа [1]. При втекании газа в полость вблизи заднего торца формируется акустическая волна или ударная волна, которая

распространяется к переднему торцу выемки, достигает его и отражается. При отражении волны от передней стенки происходит повышение давления, что ведет к возмущению сдвигового слоя в точке его зарождения. Порожденное в слое сдвига возмущение сносится вниз по потоку, достигает заднего края полости и взаимодействует с ним, в результате чего новая порция газа вытекает из полости (или втекает в полость). Спектральный состав пульсаций давления в полости изменяется в зависимости от геометрии выемки и от числа Маха набегающего потока. Колебания в полости не строго детерминированы, а присутствует случайная составляющая значительной величины. Это проявляется как изменением амплитуды, так и некоторыми флуктуациями частоты пульсаций.

В работе [1] установлено, что при числе Маха 2,0 в зависимости от длины выемки спектры пульсаций могут иметь как шумовой характер, так и явно выраженные дискретные пики на спектрограммах. Для числа Маха потока 3,0 в осесимметричной выемке не обнаружено режимов с дискретными составляющими в спектре пульсаций давления, что соответствует результатам анализа устойчивости слоя сдвига при высоких скоростях потока [2], а именно: неустойчивости Рэлея не возникает при  $M_\infty > 2,5$ ; в коротких полостях резонанс не наступает вследствие неустойчивости слоя сдвига только к низкочастотным возмущениям.

Работы по исследованию обтекания каверн не теряют своей актуальности и в настоящее время. Статья [3] посвящена численному моделированию дозвукового ( $M_\infty < 0,12$ ) несжимаемого течения в каверне с соотношением длины к глубине равным 2 в зависимости от числа Рейнольдса ( $Re_L$  от 11 200 до 26 881). Было обнаружено, что при числах  $Re_L$  от 21 280 до 23 520 осуществлялся режим переключения моды, т. е. с течением времени случайно происходила перестройка колебаний с одной частоты на другую. В работе [4] проводилось исследование течения в конической выемке при числе Маха больше 3 применительно к многодисковому воздухозаборнику, который показал увеличение восстановления полного давления на 10 % при снижении веса конструкции по сравнению с коническим воздухозаборником. Статья [5] посвящена экспериментальному исследованию структуры и распределения

давления по дну осесимметричной выемки при ее сверхзвуковом ( $M_\infty = 2,84$ ) обтекании в зависимости от длины (глубина была постоянно равной 0,7 диаметра цилиндра). Авторами работы [6] выполнено экспериментальное и численное в осесимметричной постановке изучение влияния аэродинамической интерференции на процесс отделения капсулы от ракеты при  $M_\infty$  от 1,6 до 5. Изучено влияние параметров выемки на распределение давления и аэродинамическое сопротивление. Были определены и изучены режимы возникновения сильных пульсационных течений в выемке, которые возникают только при сверхзвуковой скорости потока. В работе [7] приведены результаты экспериментального исследования сверхзвукового обтекания модели осесимметричного тела с кольцевой выемкой на поверхности цилиндрического корпуса при числе Маха  $M_\infty = 2,5$ . Обнаружены и изучены гистерезисные явления по результатам визуализации течения и весовых измерений для диапазона относительных длин каверны  $L/h = 8-16$  при непрерывном изменении угла атаки. В [8] численно исследуется сверхзвуковое турбулентное течение около осесимметричного тела с кольцевой каверной при  $M_\infty = 3,0$  и 2,2. В зависимости от относительной длины каверны реализуется либо открытый, либо замкнутый тип течения. Воспроизведено явление газодинамического гистерезиса по реализации типов течения в каверне.

Известны случаи [9–12], когда в частотном спектре пульсаций давления в выемке наблюдается ряд дискретных составляющих, в том числе и не кратных друг другу по частоте. Однако в известной литературе не освещен вопрос о том, каким способом сосуществуют эти дискретные составляющие: в виде суперпозиции отдельных мод, существующих постоянно, или в поочередной смене различных мод колебаний. Если колебания различных мод существуют поочередно, то каков закон смены типов колебаний.

Сказанное приводит к необходимости подробного экспериментального изучения пульсаций в осесимметричной выемке при сверхзвуковой скорости внешнего потока. Данная работа посвящена исследованию многомодовых пульсаций в открытой мелкой каверне при сверхзвуковом обтекании потоком с числом Маха  $M_\infty = 2,0$ .

### Экспериментальное оборудование, методика проведения эксперимента и численного моделирования

#### Модель, оборудование и методика эксперимента

Эксперименты проведены в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-313 ИТПМ СО РАН (рис. 1) со следующими параметрами: число Маха набегающего потока  $M_\infty = 2$ ,  $Re_\infty = 2,5 \cdot 10^6$ , скоростной напор невозмущенного потока  $q_\infty = 0,7 \cdot 10^5$  Па.

Модель (рис. 2) представляла собой цилиндр с плоским торцом диаметром  $D = 100$  мм, по оси которого имелось отверстие для стержня диаметром  $d_{ст} = 16$  мм и длиной  $l$  ( $l/D = 0,9$ ). На стержень устанавливался носовой конус с диаметром основания  $d$  ( $d/D = 0,75$ ) и углом полураствора  $\beta = 10^\circ$ . На модели заподлицо с торцом цилиндра  $D$  устанавливались 4 виброизолированных датчика (D1–D4) пульсаций давления ЛХ-611АМ на диаметре  $d_d = 76$  мм под азимутальными углами  $0, 45, 90, 180^\circ$  (пронумерованы и отмечены красными точками на рис. 2, а). Расстояние между телами  $l$  при  $d > d_{ст}$ , определялось как длина выемки (рис. 2, б).

Согласно данным о числе Рейнольдса перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный на острых конусах, которые приведены в [13], при испытаниях в аэродинамических трубах число Рейнольдса перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный составляет  $Re_{x*} = (2 \div 4) \cdot 10^6$  для  $M_\infty = 2,0$ . Для данного случая число Рейнольдса, вычисленное по длине конуса с углом полураствора  $\beta = 10^\circ$  и относительным диаметром донного среза  $d/D = 0,75$  равно  $(5,3 \div 5,5) \cdot 10^6$ . На основании этого можно предполагать турбулентный характер пограничного слоя вблизи отрыва даже без дополнительного применения турбулизатора.

В работе выполнялась мгновенная шпирен-визуализация картины течения с использованием оптического прибора ИАБ-451 в сочетании с синхронизацией кадров с показаниями датчиков пульсаций давления. Выполнялось вычисление амплитудных спектров и получение зависимости интенсивности пульсаций в выделенных полосах частот при помощи селективного узкополосного анализатора частотных спектров в сочетании с низкочастотным фильтром с пороговой частотой 40 Гц.



Рис. 1. Сверхзвуковая аэродинамическая труба Т-313 ИТПМ СО РАН

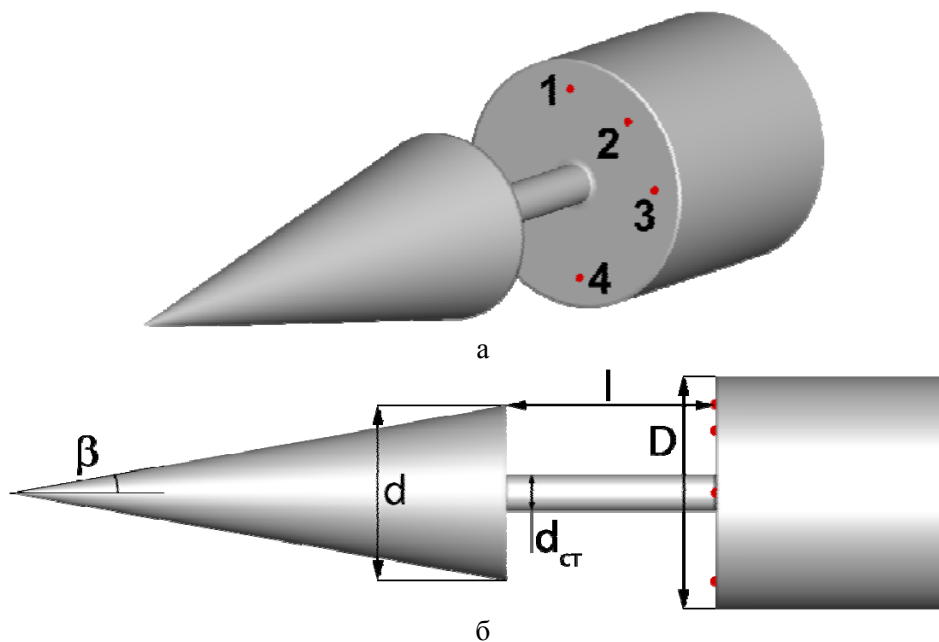


Рис. 2. Схема модели с осесимметричной выемкой

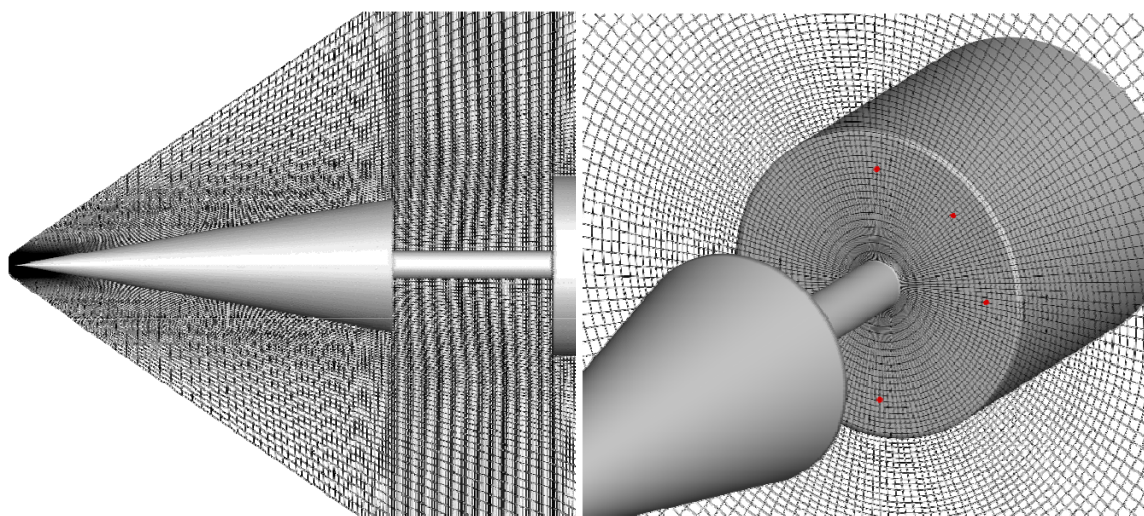


Рис. 3. Изображение элементов вычислительной сетки

#### Методика проведения численного моделирования

Экспериментальные данные дополнены результатами численного моделирования при помощи пакета Ansys Fluent на базе ИВЦ НГУ методом LES с подсеточной моделью турбулентности WALE на структурированной сетке (рис. 3) в 1,43 млн ячеек в рамках идеального газа вторым порядком точности аппроксимации по потоку и времени неявной схемой с числом Куранта 0,3

при шаге по времени  $\Delta t = 25 \cdot 10^{-6}$  с. Начальные условия задавались в виде покоящегося газа с давлением 0,24 атм и температурой 165 К. На левой границе расчетной области ставились условия, соответствующие параметрам газа в эксперименте, на правой – слабые граничные условия 0,24 атм, 165 К, на которые пересчитывались параметры с потока.

Размер ячейки в области каверны составлял не более  $1,5^3$  мм<sup>3</sup>. Геометрия модели и параметры потока в расчете совпадали с

экспериментальными. Сбор статистических данных о пульсациях давления с точек, где располагались датчики в эксперименте, был выполнен после установления решения. Длина реализации, соответствующая изменениям давления во времени, составила 8 192 отсчета.

Осредненный спектр вычислялся путем осреднения спектральных амплитуд, вычисленных по 16 реализациям длиной в 512 отсчетов с прямоугольной оконной функцией, расположенных без взаимного перекрытия. Также было выполнено построение зависимости величины среднеквадратичного значения пульсаций по выделенным диапазонам частот от времени. Это было реализовано за счет интегрирования по спектральным амплитудам необходимого частотного диапазона для каждого спектра из серии, вычисленным по реализациям длиной в 512 отсчетов с последовательным сдвигом на 64 отсчета по всей длине основной реализации (оконное преобразование Фурье) и последующей обработкой полученного сигнала фильтром низких частот с пороговой частотой 80 Гц.

## Результаты

### Экспериментальное исследование

По результатам измерения датчиками пульсаций давления в эксперименте получены спектр пульсаций в осесимметричной выемке. На графике (рис. 4) по оси ординат отложена амплитуда пульсаций давления  $p_f$  одного из четырех датчиков, отнесенная к скоростному напору невозмущенного потока  $q_{\infty}$  в зависимости от частоты  $f$ .

В статистически достоверном спектре зарегистрированы несколько дискретных

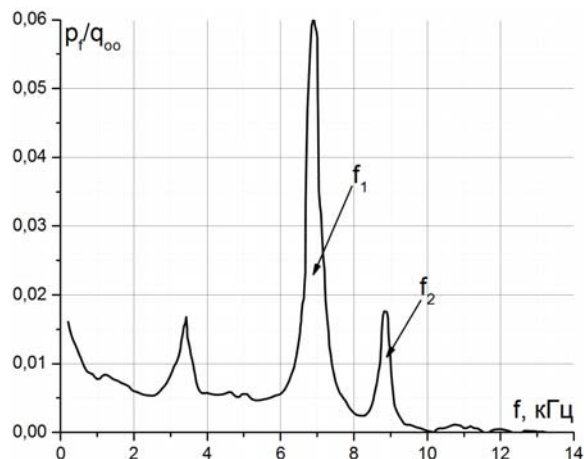


Рис. 4. Амплитудный спектр пульсаций давления в осесимметричной выемке, омываемой сверхзвуковым потоком

составляющих, две из которых, а именно  $f_1 = 6,9$  кГц и  $f_2 = 8,82$  кГц, соответствующие числам Струхала 1,36 и 1,75, не являются кратными по частоте. Наличие нескольких (от 2 до 5) спектральных составляющих является характерным признаком рассматриваемого колебательного процесса. Характер изменения амплитуды дискретных составляющих  $f_1$  и  $f_2$  в спектре пульсаций давления со временем представлен на рис. 5.

Максимальная амплитуда моды  $f_1$  соответствует минимальной амплитуде моды  $f_2$  и наоборот. Время существования одной моды  $\Delta t$  может быть существенным и достигает  $\sim 2,5$  с, что в периодах колебаний  $T_0$  составляет величину  $\Delta t/T_0 = 2 \cdot 10^4$ . Регистрируются и существенно меньшие отрезки времени, когда наблюдается доминирование некоторой моды колебаний. В целом характер изменения  $p_f(t)$  имеет случайный характер. Для данного пульсационного процесса

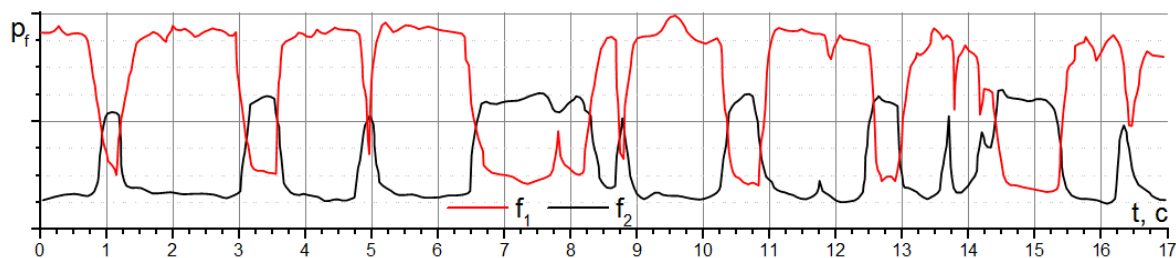


Рис. 5. Зависимость амплитуды выделенных спектральных составляющих от времени

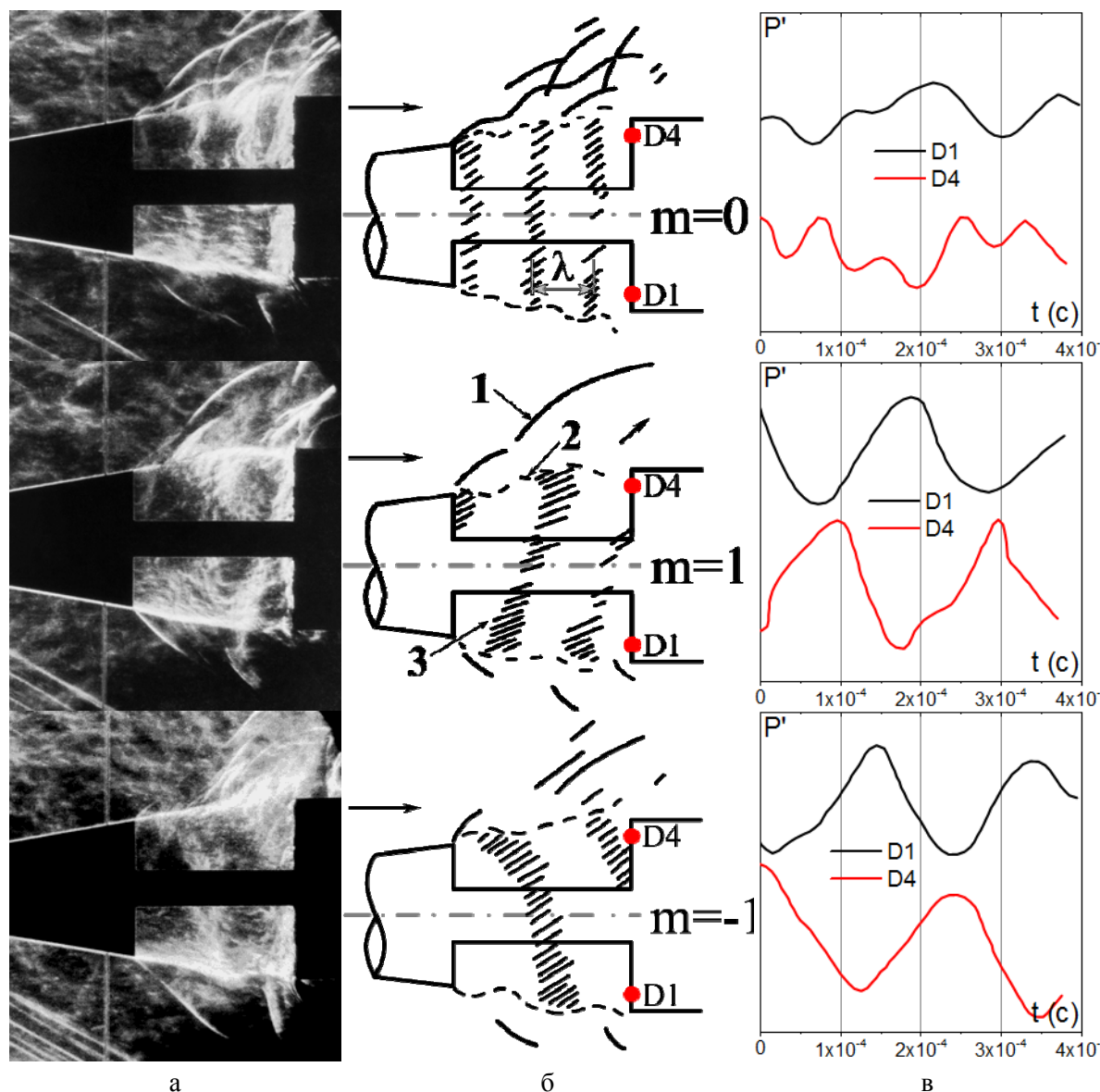


Рис. 6. Кадры мгновенной шлирен-визуализации (а) обтекания осесимметричной выемки и соответствующие им схемы течения (б), осциллограммы с датчиков пульсаций давления D1 и D4 (е) на торце цилиндра

определенная взаимосвязь просматривается лишь для дискретных составляющих с 6,9 и 8,82 кГц.

На рис. 6 представлены три шлирен-фотографии обтекания выемки, соответствующие им схемы течения и осциллограммы для осесимметричной каверны со слегка отличающейся длиной выемки ( $l/D = 0,87$  вместо 0,9). Направление потока на схемах показано стрелкой. Волны давления обозначены цифрой 1, слой сдвига – 2, волновые фронты возмущений в слое сдвига, видимые на шлирен-фотографиях в виде светлых полос, – 3. Длина волны возмущений сдвиго-

вого слоя обозначена  $\lambda$ , места расположения датчиков пульсаций – D1, D4.

Анализ мгновенных фотографий поля течения указывает, что имеющиеся отличия в поле течения необходимо объяснять не только различными фазами пульсаций. Различия в виде осциллограмм и мгновенных картин течения указывает на возможность проявления в различные моменты времени различных мод колебаний. Возмущения, наблюдаемые в осесимметричном течении, можно принять в виде

$$\Psi(x, r, \varphi, t) = \Phi(r)e^{i(kx - \omega t + m\varphi)},$$

где  $v = \frac{d\Psi}{dr}$  – возмущения поперечной компоненты скорости;  $\Phi(r)$  – функция от радиуса;  $x$  – продольная координата;  $\varphi$ ,  $\omega$ ,  $k$ ,  $m$  – азимутальный угол, циклическая частота, волновое число и номер моды колебаний. Значение  $m = 0$  соответствует симметричным (тороидальным) возмущениям с частотой 6,9 кГц,  $m = \pm 1$  – винтовым (спиральным) колебаниям на 8,82 кГц. Легко показать, что сдвиг фазы между датчиками для  $m = \pm 1$  соответствует  $180^\circ$ , а для  $m = 0$  колебания должны быть синфазными. Таким образом, показано, что в каждый момент времени определенная мода колебаний охватывает всю полость, но со временем возможна смена данной моды на другую.

### Численное моделирование

По результатам численного моделирования были получены осредненные спектры пульсаций (рис. 7), зафиксированных в точках расположения датчиков в эксперименте, вычисленные по всей длине реализации. Значение амплитуды на графике отложено в децибелах  $\left( [\text{дБ}] = 20 \log_{10} \frac{[\text{Па}]}{2 \cdot 10^{-5}} \right)$ . В спектре пульсаций присутствуют три дискретных составляющих – 2, 2,9, 3,9 кГц, значения которых не совпадают с полученными в эксперименте.

При анализе изменения спектральных амплитуд дискретных тонов во времени (рис. 8) установлено, что пульсации с частотами близкими к кратным 2 и 3,9 кГц явля-

ются взаимно-конкурирующими модами, а не тоном и обертоном. Среднее время доминирования одной моды колебания составляет около 10,67 мс, т. е. не менее 20 периодов колебания моды с меньшей частотой. Отмечено, что периоды взаимного конкурирования колебаний в полости иногда рассогласовываются, т. е. происходит одновременный рост или снижение как одной, так и другой дискретной частоты, но количество и длительность таких эпизодов невелико.

Среднее время доминирования одной моды колебания составляет около 10,67 мс, т. е. не менее 20 периодов колебания моды с меньшей частотой. Отмечено, что периоды взаимного конкурирования колебаний в полости иногда рассогласовываются, т. е. происходит одновременный рост или снижение как одной, так и другой дискретной частоты, но количество и длительность таких эпизодов невелико.

При анализе эволюции пространственной картины течения обтекания осесимметричной каверны во времени по результатам численного моделирования зарегистрированы тороидальные и спиральные пространственные возмущения (рис. 9), аналогичные наблюдаемым в эксперименте, что согласуется с механизмом переключения пульсаций с одной частоты на другую в омываемой сверхзвуковым потоком полости, предложенным ранее. Отмечается существенная неоднородность параметров потока в каверне как по радиальной, так и по азимутальной координате, несмотря на осесимметричную геометрию модели и расчетную сетку, а также равномерные начальные условия.

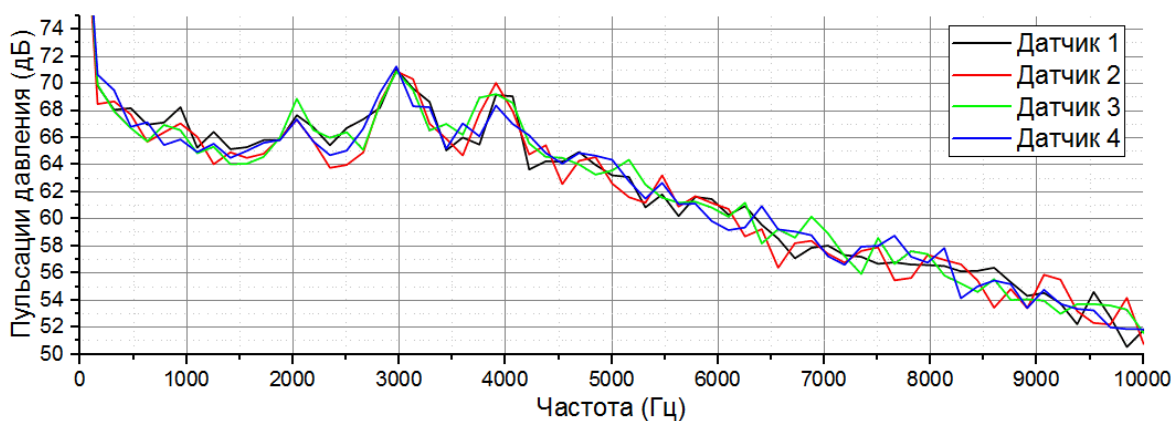


Рис. 7. Осредненный спектр пульсаций давления с датчиков D1–D4

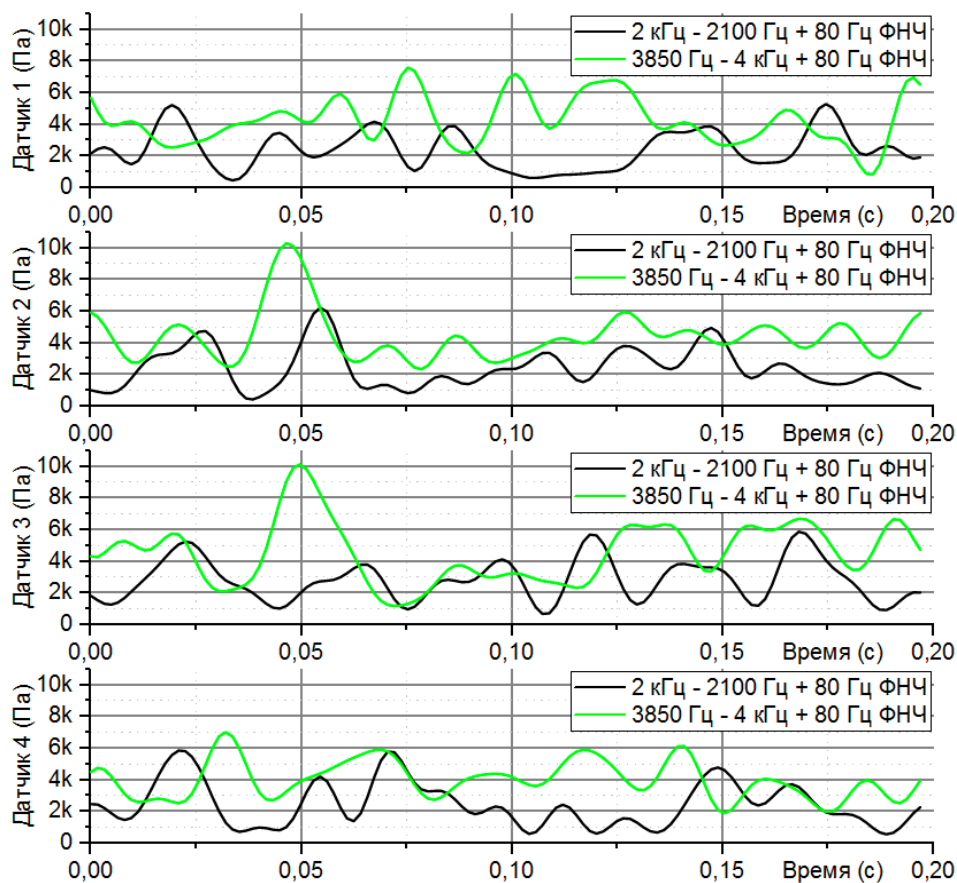


Рис. 8. Зависимость среднеквадратичного уровня пульсаций давления на датчиках 1–4 в двух полосах частот от времени

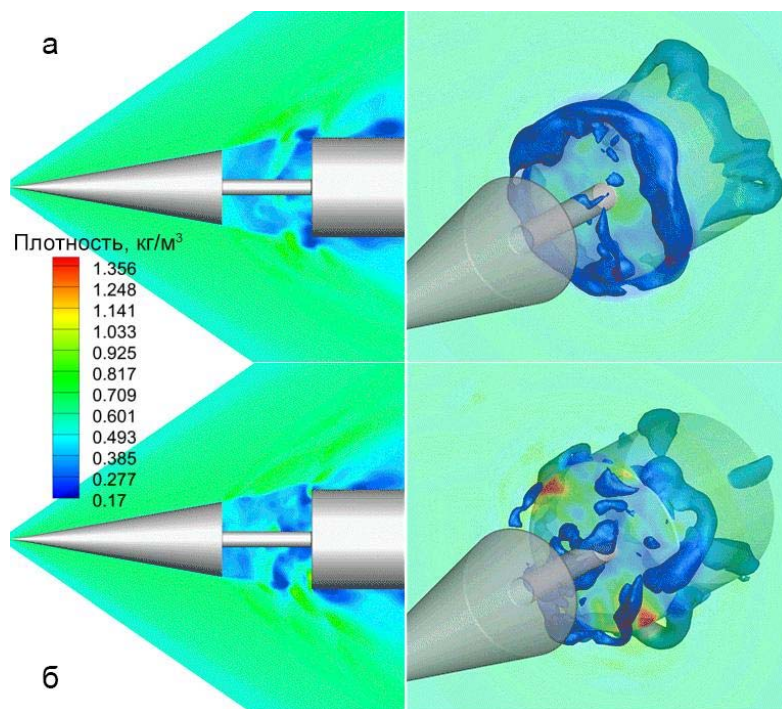


Рис. 9. Мгновенное поле распределения плотности в продольном сечении (слева) и изоповерхность плотности (справа) для тороидальной (а) и цилиндрической (б) мод пульсаций в осесимметричной камере



Вероятной причиной количественного расхождения результатов эксперимента и численного моделирования является недостаточное разрешение расчетной сетки.

### Заключение

В работе показано наличие многомодовых пульсаций в осесимметричной полости, омываемой сверхзвуковым потоком. Зарегистрирован случайный характер перестройки режима колебаний с одного типа на другой. Предложен механизм смены режимов колебаний. Показано, что в каждый момент времени доминирует определенная мода колебаний. Время существования отдельной моды пульсаций много больше периода колебаний. Многомодовый режим пульсаций качественно воспроизведен при численном моделировании.

### Список литературы

1. Запрягаев В. И. Исследование пульсаций течения в передних отрывных зонах и в выемках при сверхзвуковом обтекании осесимметричных тел: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 1989. 18 с.
2. Хэнки Шенг. Расчет пульсаций давления в открытой полости // Ракетная техника и космонавтика. 1980. Т. 18, № 8. С. 38–46.
3. Farkas B., Paál G., Szabó K. G. Descriptive analysis of a mode transition of the flow over an open cavity // Phys. Fluids. 2012. No. 24. P. 027102.
4. Kobayashi H., Kojima T., Okai K., Maru Y. Study of Supersonic Cavity Flow in Advanced Variable Geometry Inlet // 55<sup>th</sup> International Astronautical Congress. Vancouver, 2004.
5. Швец А. И. Исследование течения в цилиндрическом вырезе на осесимметричном теле при сверхзвуковом обтекании // Изв. РАН. МЖГ. 2002. № 1. С. 123–131.
6. Wang Y., Ozawa H., Koyama H., Nakamura Y. Simulation of Supersonic Stage Separation of Capsule-Shaped Abort System by Aerodynamic Interaction // 20<sup>th</sup> AIAA Computational Fluid Dynamics Conference. Honolulu, 2011.
7. Гувернюк С. В., Зубков А. Ф., Симоненко М. М., Швец А. И. Экспериментальное исследование трехмерного сверхзвукового обтекания осесимметричного тела с кольцевой каверной // Механика жидкости и газа. 2014. № 4. С. 136–142.
8. Иванов И. Э., Крюков И. А., Ларина Е. В., Тарасевич А. Г. Численное моделирование обтекания осесимметричного тела с кольцевой каверной // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2015. Т. 16 (2).
9. Запрягаев В. И. Исследование пульсаций в отрывной зоне свободной каверны при сверхзвуковой скорости потока // ПМТФ. 1985. № 6. С. 50–58.
10. Рокуэлл Наудашер. Обзор. Автоколебания в потоках, обтекающих полости // Теоретические основы инженерных расчетов. 1978. Т. 100, № 2. С. 119–135.
11. Jungowski W. M., Botros K. K., Studzinski W., Berg D. H. Tone Generation by Flow Past Confined, Deep Cylindrical Cavities // AIAA Paper. 1987. No. 2666. P. 14.
12. Rossiter J. E. Wind-tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds // R&M. Aeron. Res. Council. London, 1966. 32 p.
13. Гапонов С. А., Маслов А. А. Развитие возмущений в сжимаемых потоках. Новосибирск: Наука, 1980. 144 с.
14. Чжен П. Отрывные течения. М.: Мир, 1972. Т. 1–3.
15. Зуада С., Рокуэлл Д. Генерация высших гармоник автоколебательной системой при натекании слоя смешения на клин // Ракетная техника и космонавтика. 1982. Т. 20, № 3. С. 37–46.

**D. A. Gubanov**<sup>1,2</sup>, **V. I. Zapryagaev**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS  
4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

<sup>2</sup> *Novosibirsk State University  
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

*gubanov@itam.nsc.ru*

### **MULTIMODE PULSATIIONS IN THE AXISYMMETRIC CAVERN AT SUPERSONIC FLOW**

Experimental study results of flow structure and pressure pulsation spectral characteristics of axisymmetric cavern at supersonic flow with Mach number 2 is presented. Multimode pulsation existence is observed. Different modes dominate in different time moments. Maximum of one mode amplitude correspond to minimum value of another. Mode tuning nature is incidental. Time of one mode existence is much more than one of mode oscillation period. It is determine that pulsation mode exist in the form of toroidal and helical disturbances. Numerical calculation results qualitative reproduce multimode fluctuation and corresponded to experimental data.

*Keywords:* axisymmetric cavern, supersonic flow, multimode pulsation.