

03;10

## **Об эффективности метода звукопоглощающих покрытий в колебательно-возбужденном гиперзвуковом потоке**

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

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский национальный исследовательский государственный  
университет  
E-mail: popla@itam.nsc.ru

*Поступило в Редакцию 26 сентября 2014 г.*

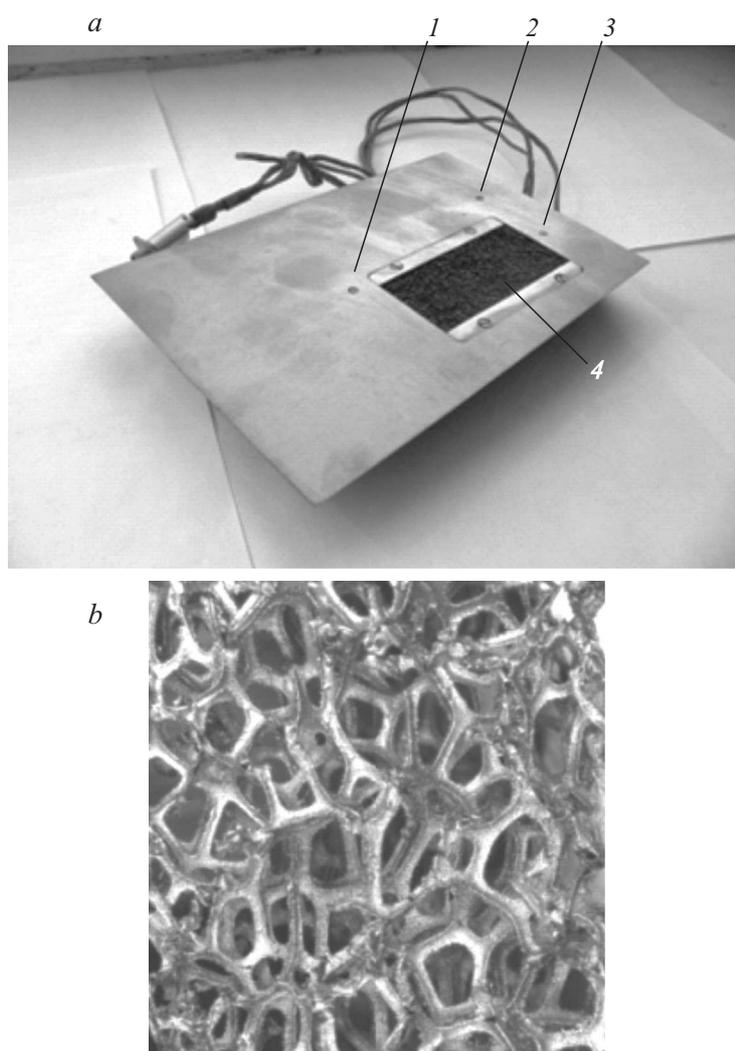
Приведены результаты экспериментального исследования воздействия пористой звукопоглощающей вставки на интенсивность пульсаций давления на поверхности пластины под углом атаки  $10.2^\circ$ , обтекаемой высокотемпературным гиперзвуковым потоком углекислого газа. Экспериментально определен модовый состав возмущений в ядре потока импульсной аэродинамической трубы, выявлено доминирование акустических возмущений быстрой моды. Показано, что в случае воздействия на ударный слой акустических возмущений быстрой моды звукопоглощающая вставка ослабляет интенсивность пульсаций давления на поверхности пластины по сравнению со сплошной поверхностью. Результаты экспериментов сопоставлены с данными численного моделирования.

Одним из перспективных методов управления ламинарно-турбулентным переходом в сверх- и гиперзвуковых пограничных слоях является метод звукопоглощающих пористых покрытий поверхности обтекаемого тела [1,2]. Метод основан на поглощении акустических возмущений таким покрытием, что приводит к ослаблению пульсаций второй моды неустойчивости пограничного слоя и в конечном итоге к задержке ламинарно-турбулентного перехода. Данный принцип воздействия на возмущения оказался применим и в условиях обтекания, соответствующих гиперзвуковому вязкому ударному слою (ВУС). Так в работе [3] для низкотемпературного гиперзвукового потока проводились

экспериментальные и расчетные исследования по определению влияния вставок из звукопоглощающих материалов канальной и ячеистой структуры на интенсивность пульсаций плотности и давления в ВУС на пластине под углами атаки, обтекаемой гиперзвуковым ( $M_\infty = 21$ ) потоком азота. Было показано, что пористое покрытие вызывает как ослабление высокочастотных возмущений, так и усиление низкочастотных возмущений ниже по потоку от звукопоглощающей вставки. В условиях реального гиперзвукового полета в высокотемпературном газе вблизи поверхности летательного аппарата идут физические процессы, включающие в себя возбуждение различных степеней свободы молекул, диссоциацию и ионизацию молекул, которые оказывают существенное воздействие как на среднее течение, так и на устойчивость и ламинарно-турбулентный переход в гиперзвуковых сдвиговых слоях [4,5]. С целью выяснения влияния возбуждения колебательных степеней свободы молекул и колебательной неравновесности на развитие возмущений в ВУС в данной работе было выполнено исследование обтекания гиперзвуковым высокотемпературным потоком углекислого газа пластины с пористо-ячеистой звукопоглощающей вставкой на ее поверхности. Выбор  $\text{CO}_2$  в качестве рабочего газа определялся его низкой характерной температурой возбуждения колебательных состояний молекул.

Эксперименты были выполнены в импульсной аэродинамической трубе ИТ-302М ИТПМ СО РАН. Рабочий газ нагревался в форкамере установки электрическим разрядом. После разрыва диафрагмы форкамеры происходило истечение газа в рабочую часть аэродинамической трубы через коническое сопло. В экспериментах температура торможения  $\text{CO}_2$  составляла  $T_0 = 2100$  К, число Маха потока на выходе из сопла  $M_\infty = 6.29$ , единичное число Рейнольдса  $Re_{1\infty} = 9.2 \cdot 10^5 \text{ m}^{-1}$ . Для данных условий эксперимента практически все молекулы  $\text{CO}_2$  в форкамере установки были колебательно возбуждены.

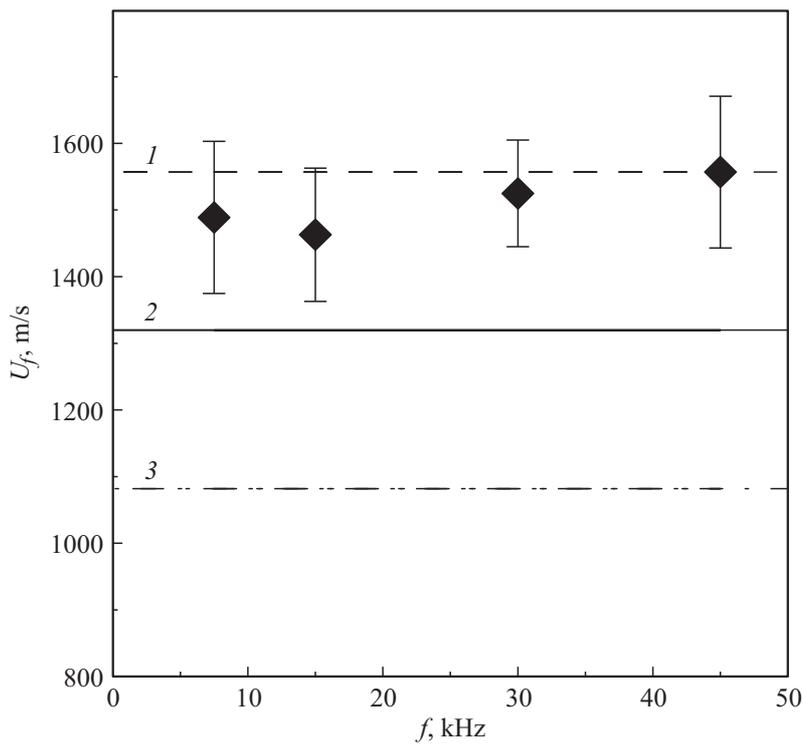
Моделью служила пластина трапециевидальной формы (рис. 1, *a*) длиной  $L = 200$  мм, с шириной передней острой кромки 150 мм, задней — 130 мм, установленной под углом атаки  $\alpha = 10.2^\circ$ . На расстоянии 90 мм от носика в пластине имелась смещенная от продольной оси в поперечном направлении прямоугольная каверна размером  $40 \times 80$  мм и глубиной 20 мм для установки вставок из пористо-ячеистого материала. На рис. 1, *b* представлена увеличенная фотография материала пористой вставки из вспененного никеля с характерным размером ячейки 1 мм и пористостью 95%. Аналогичный



**Рис. 1.** Общий вид модели пластины (а): 1–3 — датчики пульсаций давления; 4 — пористая звукопоглощающая вставка. Структура вставки (b).

материал использовался в работе [3]. В поверхность пластины были установлены 3 датчика пульсаций давления РСВ 132А31 — датчик 1 был установлен на расстоянии 80 мм от носика и 2 датчика на расстоянии 180 мм (датчик 2 на модели за гладкой поверхностью и датчик 3 за пористой вставкой). Сигнал датчиков пульсаций давления оцифровывался с частотой 400 кГц, записывался в память ПЭВМ и подвергался преобразованию в амплитудный спектр пульсаций давления. Нормировкой спектральных амплитуд пульсаций давления датчика 2 на спектральные амплитуды пульсаций давления датчика 1 определялась относительная величина спектральной амплитуды возмущений давления на сплошной поверхности пластины  $p'_2/p'_1$ . Эффективность воздействия пористых вставок на амплитуду пульсаций давления определялась как отношение спектральной амплитуды пульсаций давления датчика 3 за вставкой к спектральной амплитуде датчика 2 на сплошной поверхности пластины  $p'_3/p'_2$ .

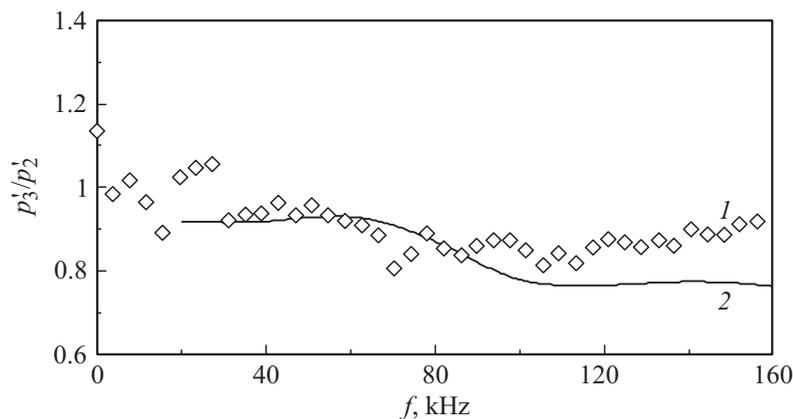
Для сопоставления расчета с данными эксперимента необходимо знать модовый состав возмущений в аэродинамической трубе ИТ-302М ИТПМ СО РАН. Эксперименты по определению модового состава возмущений проводились при истечении из сопла воздуха при достаточно близких к  $\text{CO}_2$  параметрах потока в рабочей камере аэродинамической трубы ( $M_\infty = 5.7$ ;  $\text{Re}_{1\infty} = 8 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$ ). С помощью высокоскоростной цифровой камеры (Phantom-310) с частотой кадров 120 кГц была получена временная последовательность шликрен-снимков потока в рабочей части аэродинамической трубы с визуализацией возмущений. Для каждой точки плоскости теневой картины потока по последовательности кадров проводилось преобразование Фурье сигнала яркости от времени. По массивам этих данных формировались динамические картины волнового поля потока для выбранной частоты. Далее для различных частот пульсаций строились зависимости фазы волн от координаты вдоль потока. Зависимости оказались практически линейными, и по углу их наклона с достаточной точностью можно было определить продольную фазовую скорость возмущений  $U_f$ . По величине этой фазовой скорости осуществлялась идентификация мод возмущений. На рис. 2 верхняя пунктирная прямая 1 соответствует фазовой скорости  $U_f = U_\infty + c_\infty$  распространения возмущений быстрой акустической моды, сплошная прямая 2 — фазовой скорости  $U_f = U_\infty$  возмущений энтропийной и вихревой мод, нижняя штрих-пунктирная прямая 3 — фазовой скорости  $U_f = U_\infty - c_\infty$  возмущений медленной акустической моды (здесь  $c_\infty$  —



**Рис. 2.** Продольная фазовая скорость возмущений в импульсной аэродинамической трубе ИТ-302М: рабочий газ — воздух,  $M_\infty = 5.7$ ;  $Re_{1\infty} = 8 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ ; 1 — фазовая скорость быстрой акустической моды возмущений; 2 — энтропийно-вихревой моды; 3 — медленной акустической моды; символы — экспериментальные данные.

скорость звука в набегающем потоке). Видно, что экспериментальные данные расположены близко к верхней прямой графика. Это говорит о том, что продольная фазовая скорость возмущений в импульсной трубе ИТ-302М соответствует фазовой скорости быстрых акустических волн.

В численном моделировании (с помощью пакета ANSYS Fluent на основе решения двумерных уравнений Навье–Стокса [6]) решалась



**Рис. 3.** Эффективность снижения амплитуды пульсаций давления в  $\text{CO}_2$  звукопоглощающим покрытием в зависимости от частоты: 1 — эксперимент; 2 — расчет для быстрой акустической моды.

задача взаимодействия двумерных акустических волн с ВУС на пластине со звукопоглощающей вставкой, обтекаемой неравновесным термически совершенным газом с конечным временем энергообмена между колебательными и поступательно-вращательными степенями свободы молекул. Для моделирования неравновесности колебательных степеней свободы  $\text{CO}_2$  использовалась двухтемпературная модель релаксационных течений, где изменение колебательной энергии от времени задавалось уравнением Ландау–Теллера для каждой колебательной степени свободы. В расчетную область была включена пористая вставка, моделируемая аналогично работе [3].

На рис. 3 символами представлены экспериментальные данные по эффективности воздействия звукопоглощающей вставки на поверхности пластины в потоке  $\text{CO}_2$  (1) в виде среднеквадратичных амплитуд пульсаций давления поверхности  $p_3'$  за пористой вставкой, отнесенных к пульсациям давления поверхности  $p_2'$  на сплошной пластине в зависимости от частоты возмущений. Результаты численного моделирования течения неравновесного  $\text{CO}_2$  при воздействии быстрой акустической моды внешних возмущений приведены сплошной кривой 2. Видно хорошее совпадение с экспериментом данных численного моделирования. Из

рис. 3 следует, что в пограничном слое  $\text{CO}_2$  интенсивность возмущений ослабляется звукопоглощающим покрытием на 10–20% в зависимости от частоты начальных возмущений.

Таким образом, в работе показано, что метод звукопоглощающих покрытий эффективно работает в колебательно-возбужденных гиперзвуковых потоках углекислого газа.

Работа выполнена при поддержке гранта правительства РФ (договор № 14.Z50.31.0019) для поддержки исследований под руководством ведущих ученых и гранта РФФИ № 12-08-00435.

## Список литературы

- [1] *Fedorov A.V., Malmuth N.D.* et al. // AIAA J. 2001. V. 39. N 4. P. 605–610.
- [2] *Fedorov A., Shiplyuk A., Maslov A.* et al. // J. Fluid Mech. 2003. V. 479. P. 99–130.
- [3] *Маслов А.А., Миронов С.Г.* и др. // ПМТФ. 2012. Т. 53. № 2. С. 21–32.
- [4] *Fujii K., Hornung H.G.* // AIAA Journal. 2003. V. 41. N 7. P. 1282–1291.
- [5] *Massa L.* // J. Fluid Mech. 2012. V. 693. P. 261–296.
- [6] *Кириловский С.В., Поплавская Т.В., Цырюльников И.С.* // Математическое моделирование. 2013. Т. 25. № 9. С. 32–42.