

03;04

## Подавление сильных автоколебаний ударных волн электрическим разрядом

© В.М. Фомин, Б.В. Постников, К.А. Ломанович

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

Поступило в Редакцию 18 февраля 2011 г.

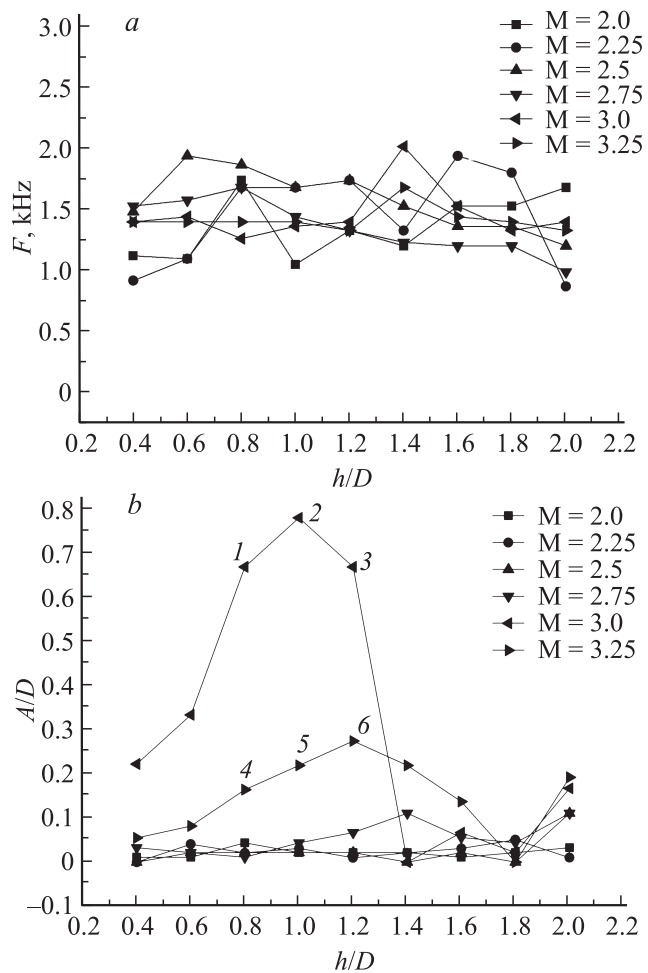
Экспериментально получены данные о подавлении сильных автоколебаний фронтов ударных волн, возникающих при натекании сверхзвуковой струи на сплошную и проницаемую преграду конечных размеров, воздействием электрического разряда на периферии струи.

За последнее десятилетие работам по магнитоплазменному управлению высокоскоростными потоками уделено много внимания [1]. Акцент в этих исследованиях в той или иной степени сделан на снижение сопротивления тел и на развитие новых способов управления потоками. В то же время существуют технологические процессы, в которых основным элементом выступает именно сверхзвуковой поток (струя). Традиционно в таких устройствах стараются избегать неустойчивых режимов работы, особенно связанных с сильными осцилляциями ударных волн. Тем не менее возможность работы и управления нестационарными процессами может оказаться интересной с технической точки зрения и позволит лучше понять физические механизмы развития и существования неустойчивых режимов. В работе в качестве объекта исследования рассматривается ударное натекание сверхзвукового потока на преграду конечных размеров. Известно, что такие течения при определенных газодинамических параметрах обладают свойством перехода стационарной ударно-волновой картины течения в сильно нестационарную, когда колебания фронтов ударных волн могут достигать амплитуды, сравнимой с выходным сечением сопла. Исследования натекания сверхзвуковой струи на конечную и бесконечную преграду ведутся начиная с 60-х годов [2–4]. Однако физика и механика возникновения сильных автоколебаний изучена не полностью. В последние годы активно исследуется влияние электрических разрядов на внутренние

характеристики свободной струи [5,6]. В качестве инструмента воздействия на высокоскоростной поток авторами был выбран электрический разряд, инициируемый на границе натекающей на плоскую преграду сверхзвуковой струи. В предыдущих исследованиях [7] было показано, что электрическим разрядом, инициированным на периферии струи, возможно изменить частоту колебаний фронтов ударных волн.

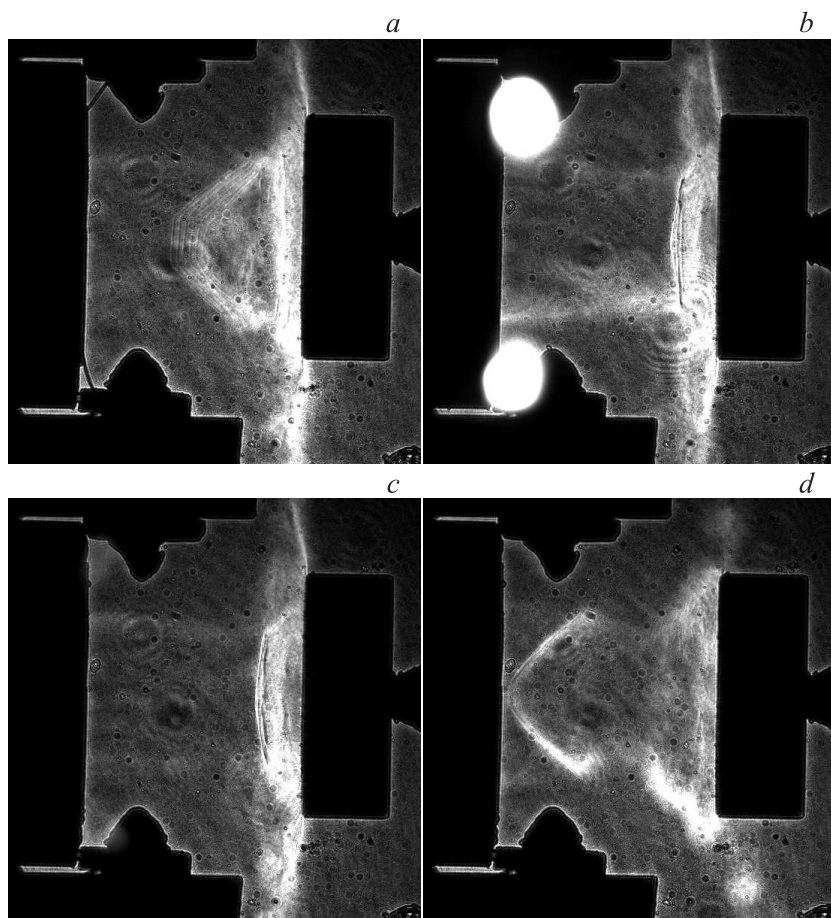
Экспериментальная установка представляет собой аэродинамическую сверхзвуковую трубу периодического действия с выхлопом в вакуумную емкость. Воздух атмосферного давления из помещения, где расположена установка, поступает в профилированное сопло Лавалья, что позволяет снизить возмущения потока на входе в сопло. На выходе из сопла, вблизи его кромки, симметрично размещались два электродных узла таким образом, что горящий разряд (дуга низкого давления) не перекрывал сверхзвуковой поток. В экспериментах использовалась трехэлектродная схема: два стержневых электрода на кромках сопла и центральный медный кольцевой электрод, сквозь который проходил поток. Инициирование разряда обеспечивалось закороткой разрядного промежутка. Типичное напряжение каждого из двух инициированных разрядных промежутков 30 В при установлении тока — в пределах 50–70 А. Торможение потока на цилиндрической преграде приводило к образованию осциллирующих фронтов ударных волн. Для визуализации течения импактной сверхзвуковой струи использовалась теневая схема с применением адаптивного визуализирующего транспаранта — АВТ [8], в качестве фотоприемника — скоростная камера PCO 1200 hs с частотой регистрации до 10 тыс. кадров в секунду (в режиме линейки пикселей до 24 тыс. кадров в секунду). По результатам скоростной визуализации было установлено, что колебания с большим амплитудным размахом имеют периодический характер — это автоколебания.

Газодинамические режимы с сильными осцилляциями фронтов для сплошной преграды представлены на рис. 1, как зависимости частоты и амплитуды колебаний от относительного удаления преграды от кромки сопла. Частоты колебаний хорошо укладываются в диапазон 1–2 кГц. В то же время амплитуды существенно выше для чисел Маха  $M = 3.0$  и  $M = 3.25$  (режим сильных автоколебаний). Эксперименты с разрядом проводились соответственно на соплах с  $M = 3.0$  и  $M = 3.25$ . Струя в этом случае оказывается перерасширенной и наблюдается небольшое схождение границ струи к оси симметрии. На рис. 2 приведены четыре шпирен-снимка, демонстрирующие последовательность смены



**Рис. 1.** Частота  $F$  (a) и относительная амплитуда  $A/D$  (b) колебаний головной ударной волны для сплошной преграды относительным диаметром  $d/D = 1.2$ . Цифрами 1–6 обозначены режимы с инициированием электрического разряда.

ударно-волновой картины течения при инициировании электрического разряда вблизи границы осциллирующей струи. Видно, что инициирование разряда позволяет подавить режим автоколебаний. Время реакции



**Рис. 2.** Визуализация подавления автоколебаний фронтов ударных волн инициированием электрического разряда на границе струи. Сплошная преграда:  $M = 3.0$ ;  $d/D = 1.2$ ;  $h/D = 1.2$ . *a* — режим с сильными автоколебаниями; *b* — подавление автоколебаний инициированием разряда; *c* — режим без автоколебаний; *d* — восстановление режима с сильными автоколебаниями.

потока на присутствие разряда не превышает 50 ms. В ряде случаев отмечена „мгновенная“ реакция потока, менее 1 ms. При выключении разряда автоколебания восстанавливаются не сразу, а с некоторой

задержкой (рис. 2, *c*), причем время задержки больше реакции потока на разряд — до 200 ms.

Схожие результаты по подавлению сильных автоколебаний были получены на преградах, выполненных из высокопористого ячеистого материала (ВПЯМ). Этот пространственный сетчато-ячеистый материал получают при дублировании высокопористой структуры сетчато-ячеистого полимера, например пенополиуретана, методами порошковой металлургии [9]. В экспериментах использовалась ВПЯМ-преграда из никеля относительным диаметром  $d/D = 2.8$ , где  $d$  — диаметр преграды,  $D$  — диаметр сопла. Преграда фиксировалась в кольцевом пилоне. Были исследованы преграды с количеством пор на дюйм:  $\phi = 10, 20$  и  $30$ . Автоколебательный режим получен на преграде с  $\phi = 30$  на относительном удалении  $h/D = 0.4$ , при числе Маха  $M = 3.25$ . Относительная амплитуда и частота автоколебаний составили  $A/D = 0.47$  и  $F = 1.3$  kHz. На больших удалениях и меньших  $\phi$  автоколебания не наблюдались. Особенностью обтекания ВПЯМ-преград является более близкое расположение фронтов прямых ударных волн к торцу преграды. Геометрия разрядного промежутка и характеристики источника питания соответствовали описанным выше. При иницировании электрического разряда также удалось подавить автоколебательный процесс и получить стационарную картину течения, аналогичную показанной на рис. 2, *b*.

Таким образом, впервые получены экспериментальные данные о возможности подавления сильных автоколебаний сверхзвуковой струи, натекающей на сплошную преграду и преграду из ВПЯМ, иницированием электрического разряда.

Работа выполнена при поддержке программы президиума РАН (проект № 11/11) и интеграционного проекта СО РАН № 80.

## Список литературы

- [1] Материалы Международных совещаний по магнитоплазменной аэродинамике. М.: ОИВТ РАН, 1999–2010.
- [2] Голубков А.Г., Козьменко Б.К., Остапенко В.А., Солотчин А.В. // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. науки. 1972. № 13. В. 3. С. 52.
- [3] Дулов В.Г., Лукьянов Г.А. Газодинамика процессов истечения. Новосибирск: Наука, 1984. 230 с.
- [4] Глазнев В.Н., Запрягаев В.И., Усков В.Н. и др. Струйные и нестационарные течения в газовой динамике. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 200 с.

- [5] *Utkin Y.G., Keshav S., Kim J.-H. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. V. 40. N 3. P. 685.*
- [6] *Kearney-Fischer M., Kim J.-H., Samimy M. // AIAA Paper 2010–4418.*
- [7] *Fomin V.M., Lomanovich K.A., Postnikov B.V. // AIAA Paper 2010–4887.*
- [8] *Бойко В.М., Оришич А.М., Павлов А.А., Пикалов В.В. Методы оптической диагностики в аэрофизическом эксперименте. Новосибирск, 2009. 450 с.*
- [9] *Анциферов В.Н., Макаров А.М., Остроушко А.А. Проблемы порошкового материаловедения. Ч. VII. Высокопористые проницаемые ячеистые материалы — перспективные носители катализаторов. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 227 с.*