

УДК 533.6+534.6

© 2004 г. В. Г. ПИМШТЕЙН

О ВНУТРЕННЕМ ПРОДОЛЬНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПИЛООБРАЗНЫХ ЗВУКОВЫХ ВОЛН НА ТУРБУЛЕНТНЫЕ СТРУИ

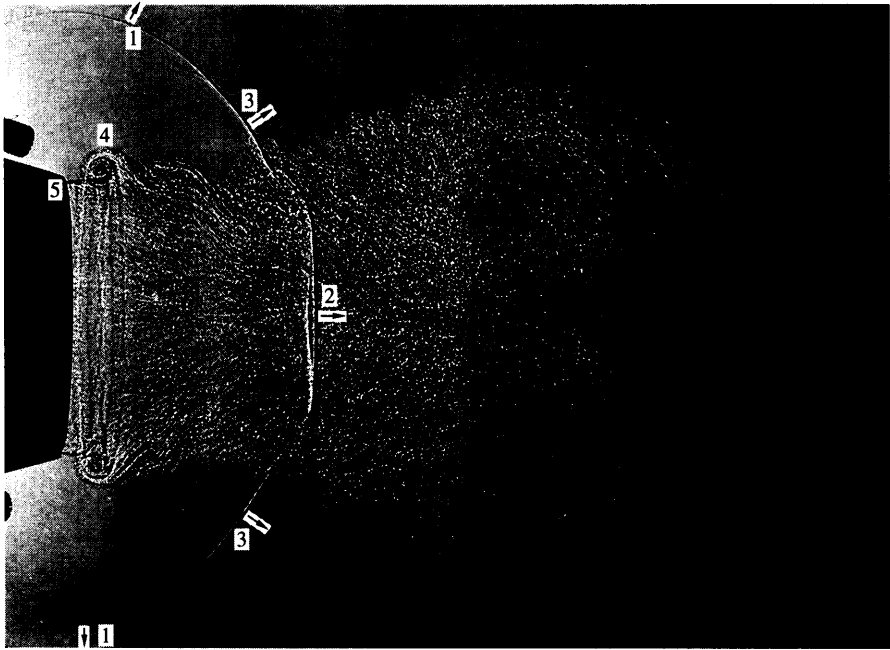
Представлены результаты экспериментального исследования особенностей структуры звукового поля турбулентных дозвуковых струй при внутреннем акустическом возбуждении. Показано, что при воздействии пилообразных волн конечной амплитуды турбулентные струи могут излучать в окружающее пространство волны Маха вследствие распространения по струе компактного акустического возмущения со скоростью, превышающей скорость звука в окружающем пространстве.

Ключевые слова: турбулентные струи, акустическое воздействие, волны Маха.

По-видимому, в [1] впервые указано на возможность излучения волн Маха турбулентными струями и разработана теория такого излучения: возмущения, перемещающиеся вдоль границы струи со скоростью, превышающей скорость звука в окружающем пространстве, излучают миниатюрные баллистические волны – волны Маха. В дальнейшем это явление стало предметом многочисленных исследований, а визуализация ближнего акустического поля сверхзвуковых струй позволила получить прямое подтверждение существования такого излучения.

Известно также, что дозвуковые струи относительно малой плотности (например, водородные или гелиевые) также могут излучать волны Маха на режимах истечения, при которых конвективная скорость распространения возмущений в струе превосходит скорость звука в окружающей среде. Цель настоящей работы – показать, что при определенных условиях при акустическом воздействии турбулентные струи также могут излучать волны Маха, а сверхзвуковые струи при таком воздействии могут излучать волны Маха под двумя различными углами. Ясно, что излучение волн Маха возможно только в том случае, когда скорость распространения возмущений превосходит скорость звука в окружающем пространстве. При акустическом воздействии на дозвуковые струи сверхзвуковая скорость распространения возмущений возможна при внутреннем возбуждении. При этом со сверхзвуковой скоростью распространяются акустические возмущения, в то время как возникающие в струе гидродинамические возмущения распространяются с дозвуковой скоростью. Необходимым условием наблюдения (визуализации) излучения волн Маха дозвуковыми струями при акустическом воздействии, является определенная форма воздействующего на струю акустического возмущения. При внутреннем акустическом воздействии на струю применение пилообразных звуковых волн конечной амплитуды, когда процесс аэроакустического взаимодействия локализован в довольно узком пространственно-временном интервале, позволяет визуализировать этот процесс с помощью прямого теневого метода. Следует отметить, что изучаемое явление можно рассматривать также как результат рефракции звука на слое смещения – в соответствии с принципом Гюйгенса оба подхода эквивалентны.

Опыты проводились в большой заглушенной акустической камере Акустического отделения ЦАГИ с холодными дозвуковыми и сверхзвуковыми воздушными струями, истекающими из осесимметричных сходящегося и сходящегося-расходящегося

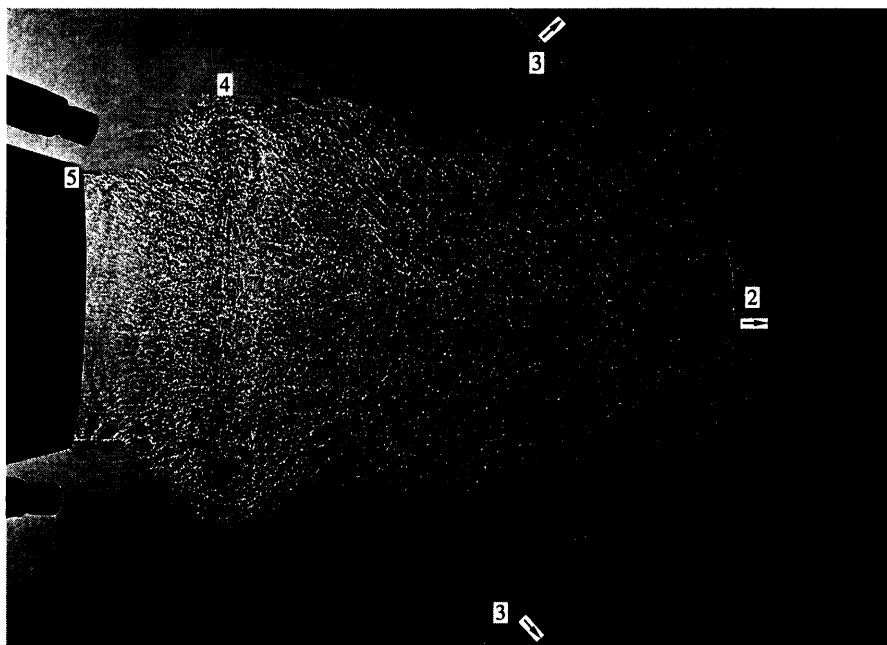


Фиг. 1. Дозвуковая струя ($p = 1.4$ атм, $f = 1.6$ кГц) при продольном внутреннем воздействии пилообразной звуковой волны конечной амплитуды: 1 – звуковая волна, дифрагированная на кромке сопла, 2 – звуковая волна, распространяющаяся по струе, 3 – волна Маха, 4 – вихрь, 5 – сопло

сопел с диаметром выходного сечения 60 и 20 мм соответственно и плоского сверхзвукового сопла с прозрачными стенками и регулируемым углом раскрытия с размером критического сечения 150×10 мм. Акустическое воздействие осуществлялось с помощью генератора Гартмана, помещенного в форкамеру сопла, так что необходимое полное давление в ней создавалось при поддержании на генераторе Гартмана перепада давления, соответствующего его рабочему режиму. Более подробное описание экспериментальной установки приведено в [2], конструкция сопла с прозрачными стенками аналогична конструкции сопла, примененного в [3]. Частота звукового воздействия в проведенных опытах составляла $f = 1.6$ кГц, а уровень звукового давления на кромке сопла $SPL = 162$ дБ (в случае внешнего акустического воздействия 174 дБ). Для визуализации струи, звуковых волн и волн Маха применялся прямой теневой метод с искровым источником света со временем экспозиции $2 \cdot 10^{-7}$ с.

На фиг. 1 приведена теневая фотография дозвуковой струи (перепад давления на сопле $p = 1.4$ атм), подвергающейся воздействию пилообразной звуковой волны конечной амплитуды. Масштаб скорости на снимке задается звуковой волной от генератора Гартмана, дифрагированной на кромке сопла 1, – она распространяется со скоростью звука в окружающем пространстве. Из рассмотрения расстояний, пройденных дифрагированной звуковой волной и звуковой волной, распространяющейся в струе 2, следует, что последняя распространяется в струе со скоростью, превышающей скорость звука в окружающем пространстве. Распространение акустического возмущения по струе со сверхзвуковой скоростью сопровождается излучением волн Маха 3.

Описанное явление позволяет предположить, что если в форкамере сопла (или, например, в тракте реактивного двигателя) возникают (продольные) акустические

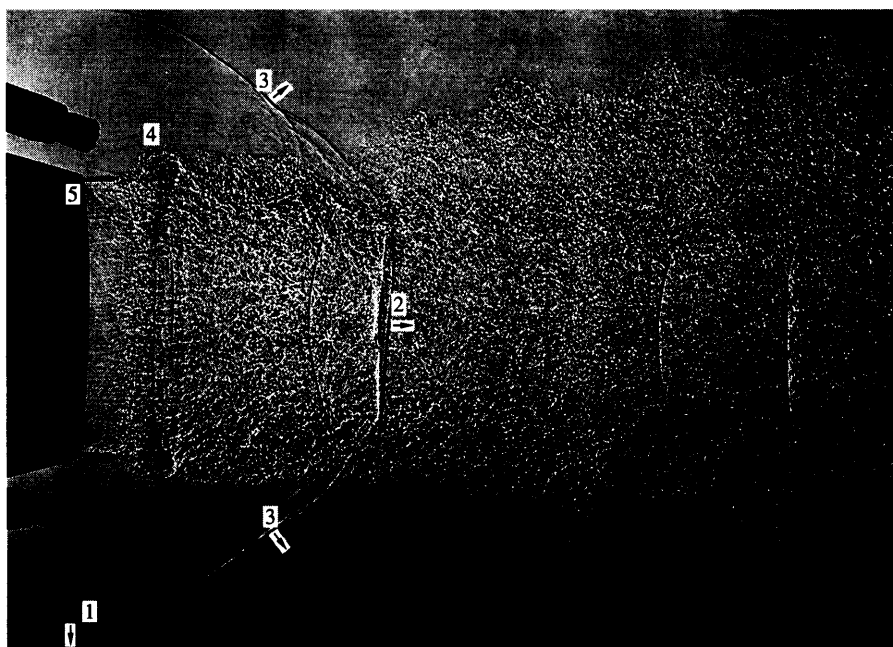


Фиг. 2. То же, что и на фиг. 1, при $p = 1.7$ атм

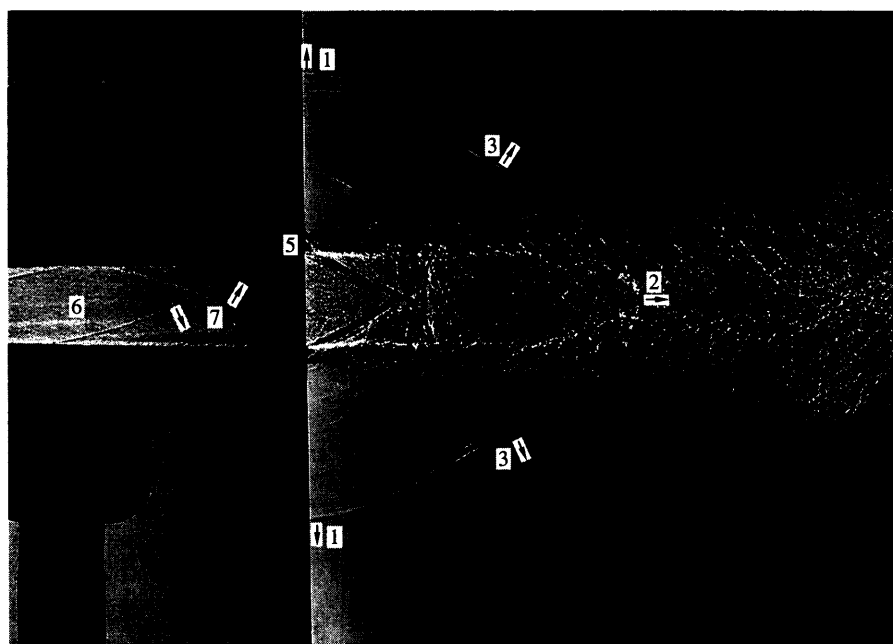
возмущения, то можно ожидать, что в дальнейшем акустическом поле они будут давать наибольший вклад в направлении, составляющем с направлением истечения струи угол, близкий к углу Маха, рассчитанного по скорости распространения акустического возмущения в струе. По мере формирования и распространения волны Маха, ее фронт вначале, как это следует из рассмотрения теневого снимка на фиг. 2, становится более крутым, как это происходит со звуковыми волнами конечной амплитуды на начальной стадии развития, прежде чем наступит их пространственное ослабление.

Излучение волн Маха акустическими возмущениями, распространяющимися по струе, можно также наблюдать при истечении холодных воздушных струй из сходящегося сопла при сверхкритических перепадах давления на сопле при внутреннем акустическом воздействии пилообразных звуковых волн конечной амплитуды (фиг. 3). Поскольку скорость истечения струи увеличилась, волна Маха, создаваемая акустическим возмущением, излучается под большим углом, чем в случае дозвуковой скорости истечения струи. Конвективная скорость распространения возникающих под действием звука возмущений в струе 4 при этом может оставаться дозвуковой по отношению к скорости звука в окружающем пространстве.

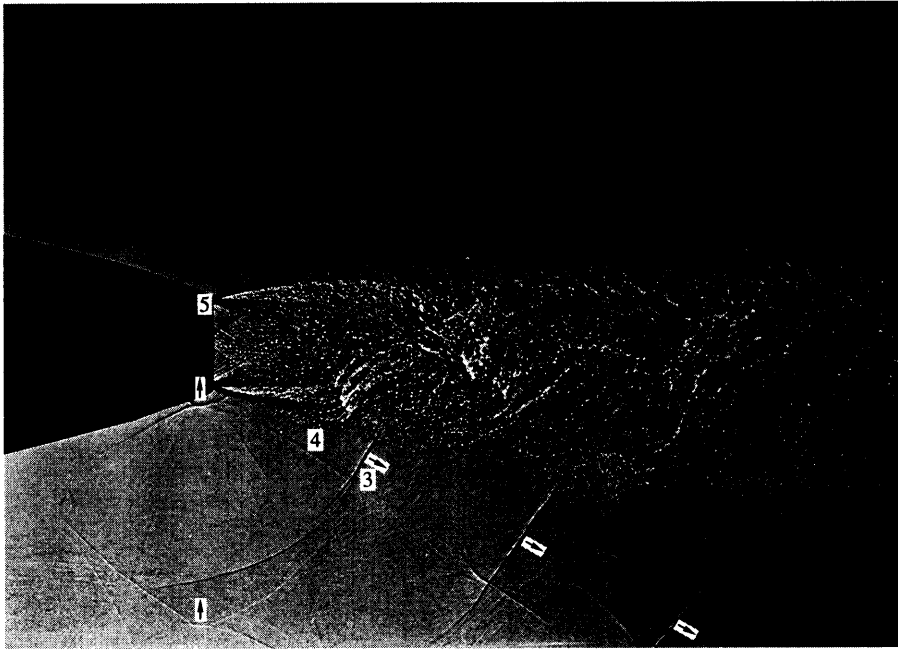
Теневые снимки аэроакустического взаимодействия при воздействии звука на осесимметричные струи дают представление о течении в осевом сечении струи. Используя плоское сопло, можно получить более отчетливое изображение волн Маха, излучаемых акустическим возмущением, поскольку в этом случае изображения вдоль длинной стороны сопла накладываются. Результаты такого опыта с соплом с прозрачными стенками приведены на фиг. 4 ($p = 4.5$ атм, угол полуоткрытия сопла $\alpha = 1^\circ$). На снимке видна также область течения в сопле вблизи его выходного сечения 6 и пилообразные звуковые волны, отраженные от входной части сопла и от его стенок 7. Как и в случае осесимметричной струи, излучение волн Маха сверхзвуковой струей происходит под большим углом, чем в случае дозвуковой струи, а направление излу-



Фиг. 3. Турбулентная струя при сверхкритическом перепаде давления $p = 2.5$ атм, обозначения как на фиг. 1



Фиг. 4. Сверхзвуковая струя, истекающая из сопла с прозрачными стенками ($p = 4.5$ атм, $\alpha = 1^\circ$, $f = 1.6$ кГц), обозначения как на фиг. 1



Фиг. 5. Сверхзвуковая струя при внешнем поперечном воздействии звуковой волны конечной амплитуды ($M = 2$, $n = 0.7$, $f = 10$ кГц, $SPL = 174$ дБ), обозначения как на фиг. 1

чения определяется скоростью распространения акустического возмущения по струе. Возмущение (вихрь), возникающее на срезе сопла при прохождении пилообразной звуковой волны, при исследованных перепадах давления распространяется с дозвуковой скоростью, как это следует из рассмотрения масштаба скорости, задаваемого звуковой волной, дифрагированной на срезе сопла. Присутствие отраженных волн в сопле при внутреннем продольном акустическом воздействии препятствует образованию в струе только одного компактного возмущения (вихря) на основной частоте акустического воздействия, так как их интенсивность и углы падения на кромку сопла, как правило, благоприятны для возникновения возмущений на частотах прохождения отраженных волн через выходное сечение сопла.

Как показано ранее [4], при внешнем акустическом воздействии на сверхзвуковые струи распространение компактных возмущений по границе струи сопровождается излучением волн Маха, если их скорость превосходит скорость звука в окружающем пространстве. На фиг. 5 струя истекает из сверхзвукового сопла, рассчитанного на число $M = 2$ на срезе сопла при степени нерасчетности $n = 0.7$ ($f = 10$ кГц, $SPL = 174$ дБ). Можно ожидать, что при продольном внутреннем акустическом воздействии турбулентные струи со сверхзвуковыми значениями конвективной скорости могут излучать две волны Маха: от акустических и гидродинамических возмущений под двумя различными углами. Такая возможность может быть реализована в рамках одного эксперимента при достаточно высоком значении полного давления в форкамере сопла.

Заключение. Турбулентные струи с дозвуковой конвективной скоростью могут излучать волны Маха вследствие распространения по струе компактного акустического возмущения, возникшего в форкамере сопла, со скоростью, превышающей скорость звука в окружающем пространстве. Сверхзвуковые струи также могут излучать вол-

ны Маха такой природы наряду с волнами Маха от компактных гидродинамических возмущений, возникших под действием звука и перемещающихся по границе струи со сверхзвуковой конвективной скоростью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 03-01-00492).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ffowcs Williams J.E.* The noise from turbulence convected at high speed // *Phil. Trans. Roy. Soc.* 1963. London. Ser. A.V. 225. № 1061. P. 469–503.
2. *Pimshtein V.G.* Disturbance generation in supersonic jets under acoustic excitation // *AIAA Journal.* 1994. V. 32. № 7. P. 1345–1349.
3. *Davin J.M., Petersen R.E.* An experimental investigation of unstable asymmetric jet separation in a supersonic converging-diverging nozzle // *AIAA/SAE/ASME 15th Joint Propulsion Conf. Paper* № 79-1256. Las Vegas, Nevada, 1979.
4. *Пимштейн В.Г.* О действии звука на сверхзвуковую струю // *Изв. АН СССР. МЖГ.* 1989. № 6. С. 170–174.

Москва

Поступила в редакцию
29.X.2003