

УДК 532.525.2 : 533.6.011.5

© 2000 г. В.Г. ПИМШТЕЙН

О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПИЛООБРАЗНЫХ ЗВУКОВЫХ ВОЛН КОНЕЧНОЙ АМПЛИТУДЫ С ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУЕЙ

Приведены результаты экспериментального исследования взаимодействия пилообразных звуковых волн конечной амплитуды (с уровнем звукового давления 170 дБ) с осесимметричной воздушной сверхзвуковой струей. Показано, что прохождение звуковых волн через струю сопровождается рефракцией звука на неоднородностях среднего потока, взаимодействием звука со скачками уплотнения и дифракцией.

Начиная с 1953 г., когда Лайтхилл [1] впервые указал на возможность излучения звука при взаимодействии турбулентности со скачками уплотнения, были проведены многочисленные исследования этого процесса, как теоретические, так и экспериментальные. Хотя, как показано в [2], взаимодействие любого типа возмущения (вихревого, звукового или энтропийного) со скачками уплотнения порождает все три вида возмущений, внимание исследователей привлекало главным образом взаимодействие турбулентности со скачками уплотнения. Эти исследования позволили в конечном счете получить удовлетворительное объяснение двух механизмов излучения звука нерасчетными сверхзвуковыми струями: излучения дискретного тона [3] и излучения широкополосной составляющей ударного шума [4]. И в настоящее время эта проблема продолжает привлекать внимание исследователей [5, 6].

Удивительно, но аналогичная проблема взаимодействия звука со скачками уплотнения оказалась практически не изученной, в доступной литературе не удалось обнаружить сколько-нибудь систематического теоретического или экспериментального исследования этой проблемы. Представляется, что отчасти это связано с менее ясными перспективами практического применения полученных знаний (по сравнению со случаем взаимодействия со скачками уплотнения турбулентности) и, возможно, с затруднениями, связанными с постановкой и проведением достаточно убедительных опытов по взаимодействию звука со скачками уплотнения.

Опыты по воздействию пилообразных звуковых волн конечной амплитуды на нерасчетные сверхзвуковые струи, содержащие скачки уплотнения, предоставляют возможность для такого исследования. Вообще говоря, применение пилообразных звуковых волн конечной амплитуды при исследованиях аэроакустических взаимодействий вместе с использованием прямого теневого метода позволяет визуализировать звуковые волны, не только воздействующие на струю, но и излучаемые возникшими под действием звука возмущениями в струе [7, 8]. Использование пилообразных звуковых волн в качестве средства воздействия на струйные течения позволяет также получать отчетливые вихревые образования, которые представляют собой удобные модели для исследования процессов смешения и излучения шума струями и вихрями.

Такие волны, однако, не только удобный инструмент исследований, они довольно часто встречаются на практике, например в случае излучения сверхзвуковыми струями на нерасчетных режимах истечения дискретного тона, имеющего, как правило,

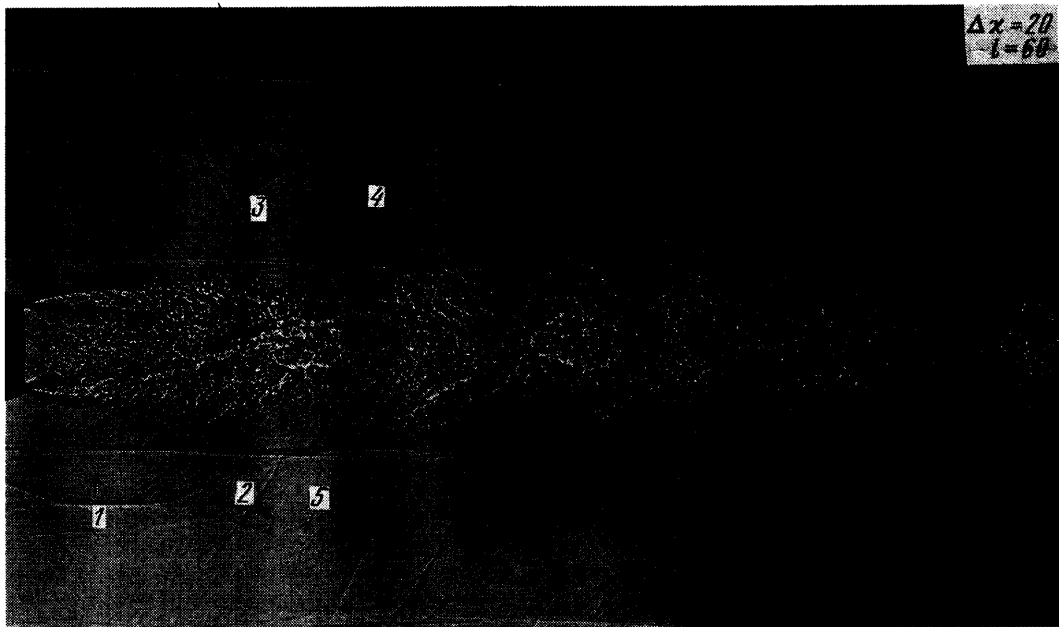
высокую интенсивность и спектр, богатый высшими гармониками, что характерно и для пилообразных звуковых волн конечной амплитуды. Применение пилообразных звуковых волн конечной амплитуды позволяет также проследить за изменениями, происходящими как с вихрями и струями под действием звука, так и со звуковыми волнами при их распространении, в частности, при их прохождении через вихри и струи. Использование в последнем случае акустических методов исследований (как спектральных, так и корреляционных) часто затруднительно, так как источники звука на одной и той же частоте могут иметь различную природу и место расположения. Например, при исследовании аэроакустических взаимодействий в сверхзвуковых струях источниками звука на одной частоте могут быть: внешний источник звука (излучатель); волны Маха, излучаемые возмущениями в струе; акустическое излучение при взаимодействии возмущений со скачками уплотнения в струе; звуковые волны, отраженные от сопла, и т.д.

Применение пилообразных волн и теневого метода визуализации позволяет избежать многих трудностей, неизбежных при спектральном или корреляционном анализе, но при этом остается проблема, связанная с относительной сложностью идентификации звуковых волн, видимых на теневых снимках, так как получаемое изображение – результат изменений, претерпеваемых лучом света на всем пути от источника до экрана. Тем не менее часто, привлекая некоторые дополнительные соображения, удается показать, что рассматриваемое событие, относящееся к взаимодействию звука со струей, произошло в определенном сечении струи (как правило, это вертикальное сечение, проходящее через ось струи).

При воздействии пилообразных звуковых волн на сверхзвуковые струи могут наблюдаться следующие эффекты: возникновение возмущений на кромке сопла при прохождении через нее фазы максимального сжатия в звуковой волне; излучение звука (волн Маха) возникшими возмущениями, если их конвективная скорость превосходит скорость звука в окружающем пространстве; излучение звука при взаимодействии образовавшихся возмущений со скачками уплотнения в структуре сверхзвуковой струи; рефракция звука на среднем потоке; рассеяние звука на неоднородностях в струе; взаимодействие звука со скачками уплотнения; дифракция звука на струе. Возникновение возмущений в сверхзвуковой струе под действием звука и излучение волн Маха возмущениями рассмотрены в [8], там же указано на излучение звука из конца первой ячейки периодической структуры с необлучаемой стороны в направлении выходного сечения сопла. В настоящей работе это явление рассматривается более подробно.

1. Экспериментальная установка и методика проведения исследований. В настоящей работе использованы данные, полученные при выполнении экспериментального исследования воздействия пилообразных звуковых волн конечной амплитуды на различные участки сверхзвуковой струи [8]. Опыты выполнены с осесимметричной воздушной сверхзвуковой струей, истекающей из конического сверхзвукового сопла с диаметром выходного сечения $d = 20$ мм, рассчитанного на число Маха на срезе сопла $M = 2$ при степенях нерасчетности $n = 0,5-2$. В качестве источника звука использовался газоструйный излучатель Гартмана с частотой $f = 10,5$ кГц, помещенный в один из фокусов эллиптического отражателя или в положение, смещенное относительно фокуса параболического отражателя – для формирования требуемого характера изменения уровня звукового давления по фронту волны. Акустическому воздействию подвергался участок струи от выходного сечения сопла до сечения $x' = x/d = 4$ ($x' = 0, 1, 2, 3$ и 4), расстояние от следа за кромкой сопла до выходного сечения отражателя $y' = y/d$ менялось от 1 до 5.

Теневая съемка структуры струи и звукового поля производилась прямым теневым методом, время экспозиции составляло $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ с. Более подробное описание используемой установки приведено в [8], где полученные данные были использованы для доказательства того, что взаимодействие звука со сверхзвуковой струей происходит в очень узкой области, прилегающей к выходному сечению сопла, и что звук

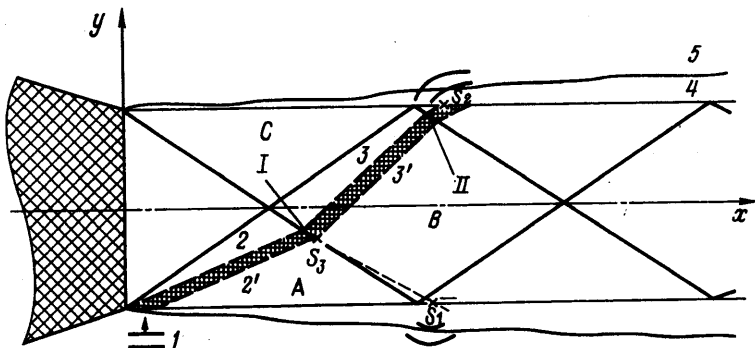


Фиг. 1. Взаимодействие пилообразной звуковой волны конечной амплитуды со сверхзвуковой струей: $n = 1,5$, $x' = 1,5$, $y' = 3$; 1 – падающая волна, 2 – волны Маха, излучаемые возникшими в струе возмущениями, 3 – звуковые волны, излучаемые из конца первой ячейки периодической структуры на частоте внешнего воздействия с необлучаемой стороны, 4 – широкополосная составляющая ударного шума, 5 – излучение звука из конца первой ячейки на частоте внешнего воздействия с облучаемой стороны

достигнутой в проводимых опытах интенсивности (170 дБ) не оказывает существенного влияния на уже образовавшиеся возмущения.

Основная трудность интерпретации результатов опытов с применением теневой фотосъемки заключается, как отмечалось, в том, что в исследуемом случае на экране изображаются и звуковые волны, не взаимодействующие со струей, и потому необходимо привлекать дополнительные соображения, чтобы из множества видимых на теневых снимках звуковых волн выделить те, которые испытывают взаимодействие со струей. Исследование структуры звукового поля излучателя в отсутствие струи и наличие отраженной от сопла волны и дифрагированной на кромке сопла волны (фиг. 1) указывают на то, что только волна 1 воздействует на кромку сопла, остальные волны (меньшей интенсивности) – часть сложной пространственной структуры звукового поля излучателя, образующейся по периферии отражателя, вне области вблизи его оси. Направление распространения всех звуковых волн на теневых снимках соответствует направлению от светлой полоски к темной на изображении фронта звуковой волны. Где это возможно, направление распространения звука также показано стрелками.

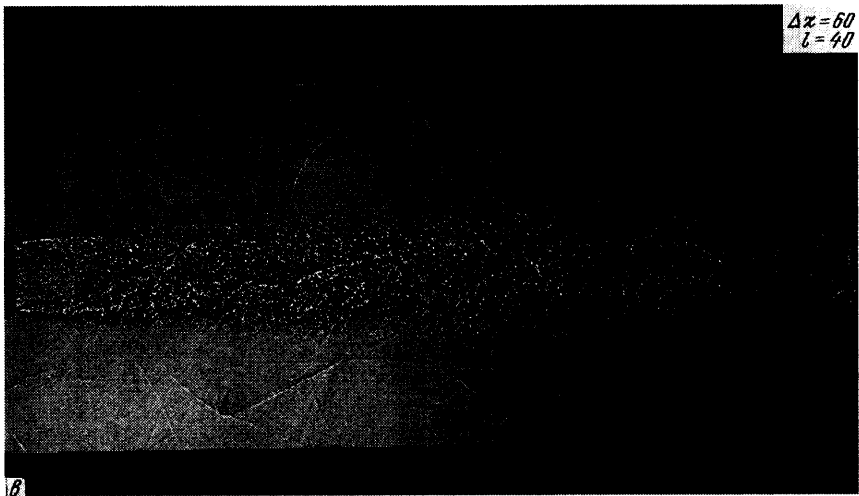
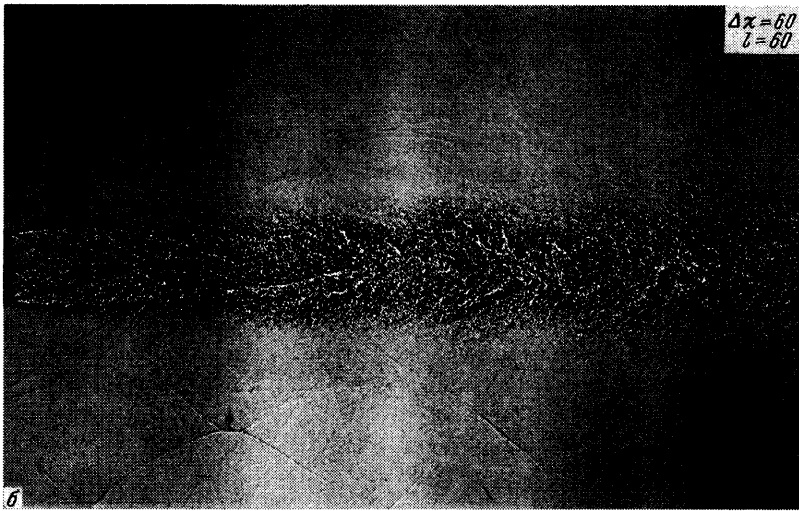
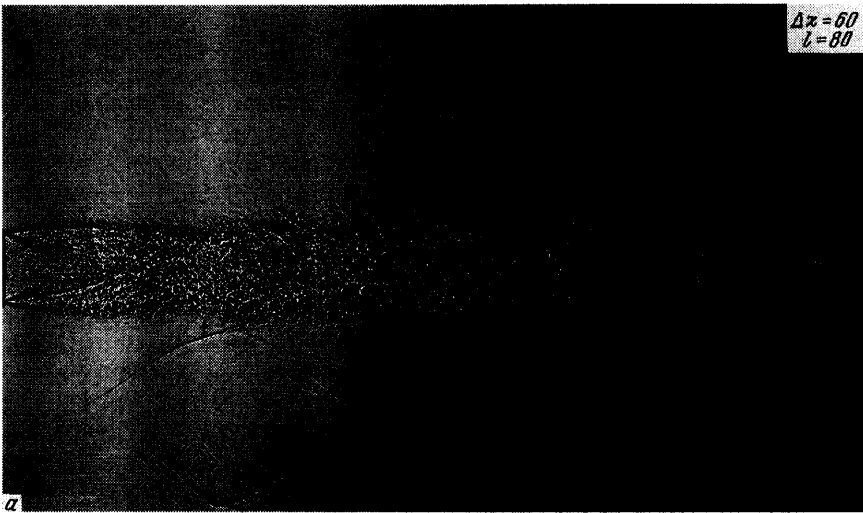
2. Результаты исследований и обсуждение. На фиг. 1 приведена типичная теневая фотография, характеризующая процесс взаимодействия пилообразной звуковой волны конечной амплитуды со сверхзвуковой струей: 1 – падающая звуковая волна, 2 – волны Маха, излучаемые при перемещении вихрей со сверхзвуковой конвективной скоростью, 3 – звуковая волна, излучаемая из конца первой ячейки периодической структуры с необлучаемой стороны на частоте внешнего воздействия. На оригинале снимка также можно усмотреть излучение широкополосной составляющей ударного шума 4 и излучение звука из конца первой ячейки на частоте внешнего воздействия с облучаемой стороны 5 ($n = 1,5$; параболический отражатель, $x' = 1$, $y' = 3$).



Фиг. 2. Схема взаимодействия пилообразной звуковой волны со сверхзвуковой струей: 1 – падающая волна, 2, 3 – линии Маха, A, B – возмущенная часть потока, C – невозмущенная часть потока, I, II – области взаимодействия звука со скачками уплотнения, S_1, S_2, S_3 – источники звука, 4 – звуковая линия, 5 – граница струи

Излучение звука на частоте внешнего воздействия, кажущийся источником которого располагается вблизи конца первой ячейки периодической ударно-волновой структуры сверхзвуковой струи, хотя и напоминает довольно хорошо изученное явление излучения звука при взаимодействии возмущений, образовавшихся под действием внешнего источника звука, со скачками уплотнения (см., например, [9]), тем не менее не является таковым. Во-первых, интенсивность этого излучения с необлучаемой стороны гораздо больше интенсивности излучения с облучаемой стороны, хотя, конечно, возмущения имеют существенно большую величину (амплитуду) именно с облучаемой стороны. Излучение звука из конца первой ячейки с облучаемой стороны из-за его небольшой интенсивности крайне редко можно наблюдать на полученных теневых фотографиях. Во-вторых, момент возникновения звука в конце первой ячейки не коррелирует с временем прохождения вихря через скачок уплотнения. И, в-третьих, продольные размеры вихря в конце первой ячейки уже настолько велики, что возможность обнаружения излучения звука при прохождении такого вихря через скачок прямым теневым методом из-за уменьшения градиента плотности очень мала. Визуализация с помощью тепловых съемки или с помощью интерферометра вполне могла бы обнаружить такое излучение, так как его интенсивность, как можно полагать, должна быть весьма значительной.

Наблюдаемое явление излучения звука с необлучаемой стороны струи связано с прохождением пилообразной звуковой волны конечной амплитуды через сверхзвуковую струю, сопровождающимся взаимодействием звука со скачками уплотнения, рефракцией звука на среднем потоке и дифракцией. Схема рассматриваемого явления приведена на фиг. 2: 1 – падающая на границу струи звуковая волна конечной амплитуды, 2, 3 – линии Маха (условно показаны прямыми линиями), отделяющие возмущенную часть потока A и B от невозмущенной C, I и II – области взаимодействия звука со скачками уплотнения, S_1 и S_2 – источники звука с облучаемой и с необлучаемой стороны, излучающие в направлении выходного сечения сопла (S_3 – источник звука из области взаимодействия I, возмущения от которого распространяются в области B). Источники звука S_1 и S_2 в соответствии с принципами Гюйгенса являются действительными источниками звука, как бы претерпевающего дифракцию на границе возмущенного и невозмущенного потоков. Присутствие на теневой фотографии на фиг. 1 звуковых волн 5 с облучаемой стороны, распространяющихся в направлении среза сопла, свидетельствует о том, что взаимодействие звука со скачком уплотнения в области I сопровождается излучением звука областью взаимодействия в область B и



Фиг. 3. Процесс взаимодействия звука со сверхзвуковой струей в развитии: $n = 1$, $x' = 3$; а - $\Delta\chi = 60$, $l = 80$; б - $\Delta\chi = 60$, $l = 60$; в - $\Delta\chi = 60$, $l = 40$

затем в окружающее пространство. Представляется, что наличие такого излучения с облучаемой стороны указывает на возможность усиления звука при его взаимодействии со скачками уплотнения, но это предположение нуждается в более надежном экспериментальном подтверждении.

Картина наблюдаемого явления гораздо сложнее из-за взаимодействия со струей звуковых волн вне фокального пятна отражателя, из-за того, что возмущения возникают по всей окружности выходного сечения сопла, а звуковые возмущения охватывают в конечном счете всю струю, за исключением конуса Маха с основанием в виде выходного сечения сопла (при $x' = 0$). Картина звукового поля осложняется также из-за прохождения звука высокой интенсивности через периферийную область струи вне рассматриваемого сечения, проходящего через ось струи, и из-за дифракции звука на струе как на цилиндре [7]. Тем не менее, приведенная схема отражает основные черты наблюдаемого процесса прохождения звуковых волн конечной амплитуды через нерасчетную сверхзвуковую струю, содержащую скачки уплотнения.

На фиг. 3 приведены теневые фотографии, показывающие процесс взаимодействия звука со струей в развитии и смещение всей наблюдаемой картины вниз по потоку, когда воздействию звука подвергается участок струи, отстоящий от плоскости выходного сечения сопла на расстоянии $x' = 3$. Кажущиеся источники звука в струе, располагающиеся вблизи концов ячеек периодической структуры струи и излучающие в направлении среза сопла, смещаются при этом вниз по потоку из конца первой ячейки в конец второй ячейки ($n = 1$). В этих опытах был использован эллиптический отражатель, позволяющий получать меньше, чем при использовании параболического отражателя, размеры фокального пятна. Можно видеть, что место расположения (кажущегося) источника звука с необлучаемой стороны струи на частоте внешнего воздействия в общем не совпадает с концом ячейки периодической структуры, по-прежнему являющимся (кажущимся) источником широкополосной составляющей ударного шума.

Заключение. В результате исследования взаимодействия пилообразных звуковых волн конечной амплитуды со сверхзвуковой струей, содержащей скачки уплотнения, показано, что излучение звука, кажущиеся источники которого располагаются вблизи концов ячеек периодической ударно-волновой структуры струи, связано с прохождением этих волн через струю: рефракцией звука на среднем потоке, взаимодействием звука со скачками уплотнения и дифракцией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lighthill M.J.* On the energy scattered from the interaction of turbulence with sound or shock waves // Proc. Camb. Phil. Soc. 1953. V. 49. № 3. P. 531–551.
2. *Kovaszny L.S.G.* Turbulence in supersonic flow // J. Aeronaut. Sci. 1953. V. 20. № 10. P. 657–674.
3. *Powell A.* On the mechanism of choked jet noise // Proc. Phys. Soc. London Ser. B. 1953. V. 66. № 12. P. 1039–1056.
4. *Harper-Bourne M., Fisher M.J.* The noise from shock waves in supersonic jets // AGARD-CR-131. 1973.
5. *Smart M.K., Kalkhori I.M.* Effect of shock strength on oblique shock-wave/vortex interaction // AIAA Journal. 1995. V. 33. № 11. P. 2137–2143.
6. *Casper J., Meadows K.R.* Using high-order accurate essentially nonoscillatory schemes for aeroacoustic application // AIAA Journal. 1996. V. 34. № 2. P. 244–250.
7. *Пимштейн В.Г.* О действии звука на сверхзвуковую струю // Изв. АН СССР. МЖГ. 1989. № 6. С. 170–174.
8. *Pimshtein V.G.* Disturbance generation in supersonic jets under acoustic excitation // AIAA Journal. 1994. V. 32. № 7. P. 1345–1349.
9. *Seiner K.M.* Advances in high speed jet aeroacoustics // AIAA Paper. № 84-2275. 1984. 40 p.