

УДК 534.83

О ВОЗНИКНОВЕНИИ СИСТЕМЫ КОЛЬЦЕВЫХ ВИХРЕЙ В СЛОЕ СМЕШЕНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

© 2016 г. В. Г. Пимштейн

*Научно-исследовательский Московский комплекс ЦАГИ**105005 Москва, ул. Радио 17**E-mail: Valerii_Pimshstein@mail.ru*

Поступила в редакцию 07.05.2015 г.

С применением прямого теневого метода визуализации исследуется процесс потери устойчивости сдвигового слоя дозвуковой осесимметричной турбулентной струи при продольном внутреннем воздействии пилообразных звуковых волн конечной амплитуды. Такое воздействие приводит к образованию системы кольцевых вихрей в слое смешения на частоте его собственной неустойчивости. Взаимодействие вихрей может сопровождаться излучением звука. Подобное явление наблюдается также в турбулентных струях при небольших сверхкритических перепадах давления на сопле.

Ключевые слова: акустическое воздействие, турбулентные струи, взаимодействие вихрей.

DOI: 10.7868/S0320791916040146

ВВЕДЕНИЕ

Исследования акустического воздействия на турбулентные струи – предмет многолетних исследований – получили особенно широкое развитие после обнаружения в турбулентных струях упорядоченных (когерентных) структур [1, 2]. В дальнейшем было показано, что акустическое воздействие может приводить к изменению турбулентных характеристик струй и, как следствие, к изменению их акустических характеристик [3]. В конечном счете, акустическое (или иное) воздействие на турбулентные струи имеет целью возбуждение или подавление когерентных структур. В современной трактовке это сводится к возбуждению или подавлению соответствующих мод волн неустойчивости [4, 5]. В исследованиях и практических приложениях акустического (или иного) воздействия, как правило, используют небольшую интенсивность воздействия, слегка подчеркивая или устраняя соответствующие процессы в невозмущенных струях. Использование при исследовании аэроакустических взаимодействий звука высокой интенсивности и, в частности, пилообразных звуковых волн конечной амплитуды позволяет, на наш взгляд, получить более полное представление о процессах, сопровождающих возникновение, распространение и разру-

шение когерентных структур в дозвуковых и сверхзвуковых турбулентных струях [6]. Как можно предположить, подобным образом протекают эти процессы и в струях, подвергающихся воздействию звука малой интенсивности, и в невозмущенных струях, но где их наблюдать гораздо сложнее. Цель настоящей работы – на удобных моделях с использованием прямого теневого метода с небольшим временем экспозиции исследовать процессы, сопровождающие появление, распространение и взаимодействие вихрей в турбулентных струях.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Опыты проводились в большой заглушенной камере Акустического отделения ЦАГИ с воздушными струями, истекающими из сходящихся сопел с диаметром выходного сечения 50 и 60 мм при перепадах давления на сопле $\overline{p_0} = 1.4$ и 1.9. Визуализация струй, пилообразных звуковых волн конечной амплитуды и возникающих вихрей осуществлялась прямым теневым методом. Время экспозиции при этом составляло $\approx 2 \times 10^{-7}$ с, размер светящегося тела ≈ 0.2 мм, расстояние от источника света до струи составляло 1500 мм, от струи до фотопленки – 200 мм, размер получаемого теневого снимка – 200 × 500 мм. Разрешаю-

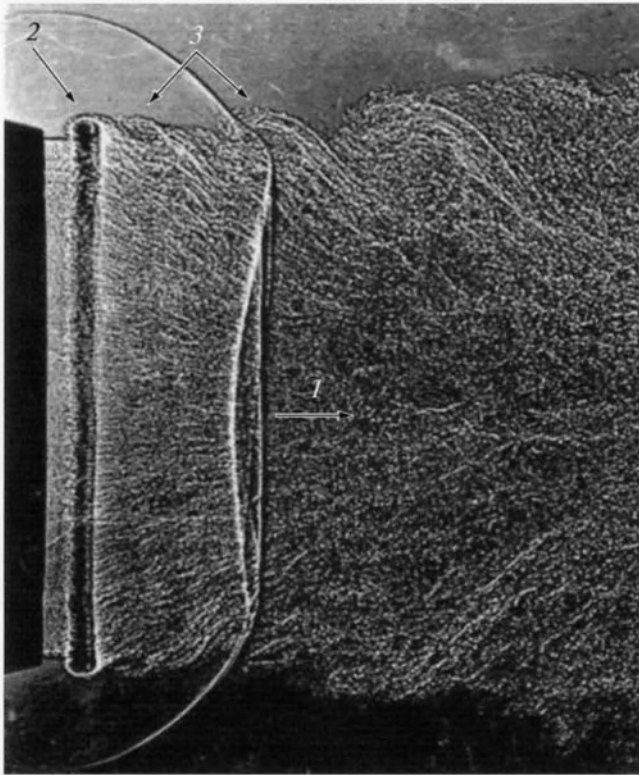


Рис. 1. Возникновение вихрей в слое смешения дозвуковой турбулентной струи при его возмущении кольцевым вихрем, создаваемым при продольном внутреннем акустическом воздействии: 1 – пилообразная звуковая волна конечной амплитуды, 2 – кольцевой вихрь, 3 – вихри в слое смешения ($d = 60$ мм, $\overline{p_0} = 1.4$, $f = 1.6$ кГц, $L \sim 160$ дБ).

шая способность метода в проведенных опытах составила 0.1–0.2 мм. Используемый в опытах в качестве источника звука газоструйный генератор Гартмана с частотами 1.3 и 1.6 кГц помещался в форкамере с диаметром 450 мм, на нем устанавливался перепад давления, необходимый для его нормального функционирования [7], уровень звукового давления L вблизи кромки сопла составлял 160 дБ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сворачивание возникших в слое смешения возмущений в кольцевые (в случае осесимметричных струй) вихри на начальном участке сечения известно как неустойчивость Кельвина–Гельмгольца. Эти вихри, в свою очередь, подвержены азимутальной неустойчивости, приводящей в конечном счете к их разрушению. Возникновение вихря на кромке сопла сопровождается излучением звука [8]. Ясно, что нестационарные процессы, связанные с вовлечением окружающей

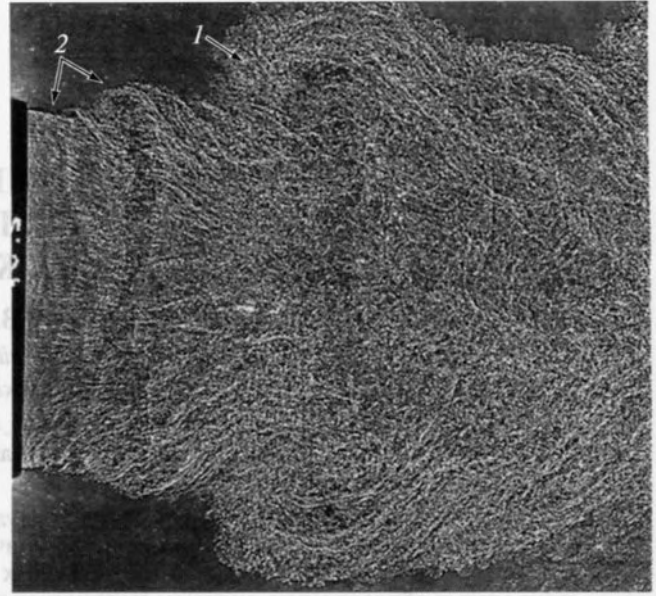


Рис. 2. Кольцевые вихри (2), возникшие в слое смешения дозвуковой струи после прохождения вихря (1), образовавшегося при акустическом воздействии ($d = 60$ мм, $\overline{p_0} = 1.4$, $f = 1.6$ кГц, $L \sim 160$ дБ).

среды и слоя смешения в развитии вихря, и особенно с его разрушением, также приводят к излучению звука [9]. Однако излучение звука при возникновении вихря на кромке сопла – это не единственная особенность данного процесса. На теневом снимке (рис. 1) можно видеть, что возникновение кольцевых вихрей при продольном внутреннем акустическом воздействии сопровождается возмущением сдвигового слоя на частоте, на порядок превышающей частоту акустического воздействия. Частота следования этих возмущений легко может быть определена, если на теневом фотоснимке присутствует изображение двух (или более) последовательных вихрей, образованных при прохождении звуковых волн через выходное сечение сопла. Она определяется по частоте акустического воздействия и отношению пространственного масштаба вихревой структуры, образовавшейся под действием звука, к масштабу возмущений, возникших в слое смешения. По ориентировочным подсчетам, эта частота составляет 15 кГц и, как можно предполагать, соответствует частоте максимального пространственного роста возмущений в соответствии с линейной теорией устойчивости [10]. Этот вид неустойчивости сдвигового слоя приводит к образованию кольцевых вихрей (рис. 2). Таким образом, возникновение кольцевого вихря в выходном сечении сопла, во всяком случае, при акусти-

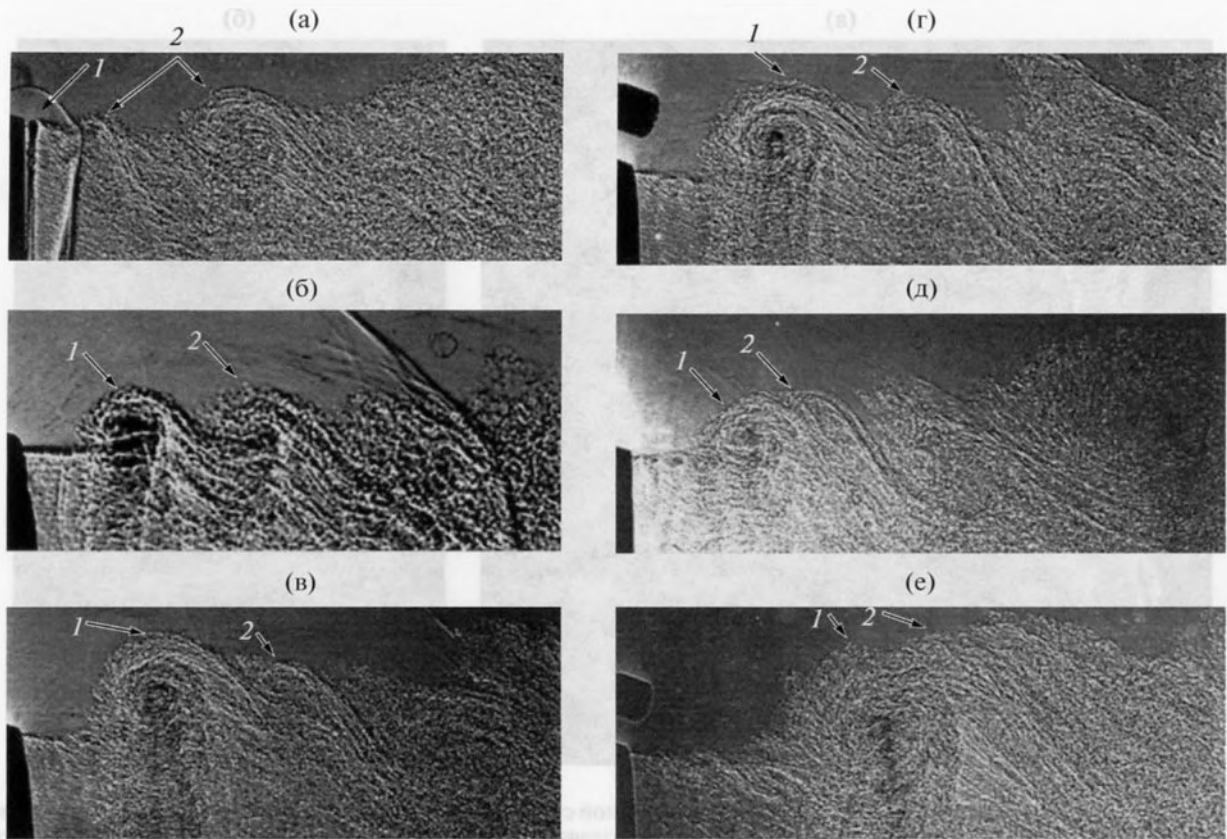


Рис. 3. Различные фазы (а), (б), (в), (г), (д), (е) процесса взаимодействия кольцевого вихря (1) с вихрями (2), развившимися в слое смешения ($d = 60$ мм, $\overline{p_0} = 1.4$, $f = 1.6$ кГц, $L \sim 160$ дБ).

ческом воздействии, приводит к возмущению сдвигового слоя струи и образованию системы кольцевых вихрей меньшей интенсивности.

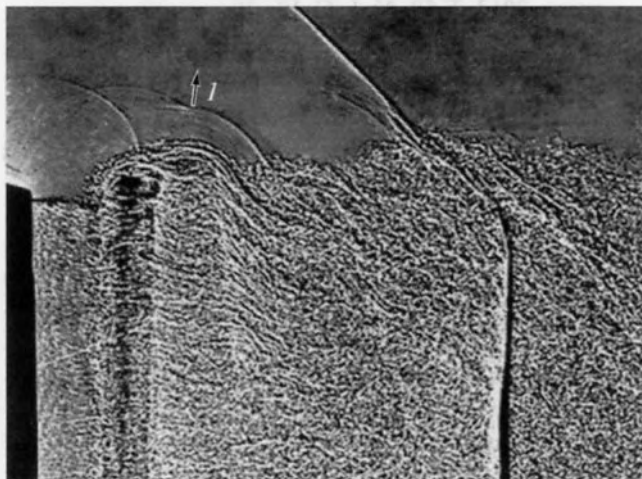


Рис. 4. Излучение звука в дозвуковой струе при взаимодействии вихря, образованного под действием звука, с вихрем, возникшим в слое смешения: 1 – звуковая волна ($\overline{p_0} = 1.4$).

Можно предположить, что подобный процесс происходит и в невозмущенных струях или в струях, подвергающихся акустическому воздействию небольшой амплитуды, но с существенно меньшей интенсивностью, и его гораздо труднее обнаружить. Вихрь, образующийся в струе при воздействии звука, при своем движении может взаимодействовать с кольцевыми вихрями, возникшими в слое смешения. На рис. 3. показаны различные фазы этого процесса по мере сближения и слияния вихрей. Это взаимодействие может сопровождаться излучением звука (рис. 4). При небольших сверхкритических перепадах давления ($\overline{p_0} = 1.9$) наблюдаемое явление протекает так же, как и в дозвуковых струях (рис. 5).

Наблюдаемое излучение звука при взаимодействии вихрей аналогично тому, что происходит при одновременном продольном и поперечном акустическом воздействии на струю [11], но в рассматриваемом случае оно связано с движением уединенного вихря.

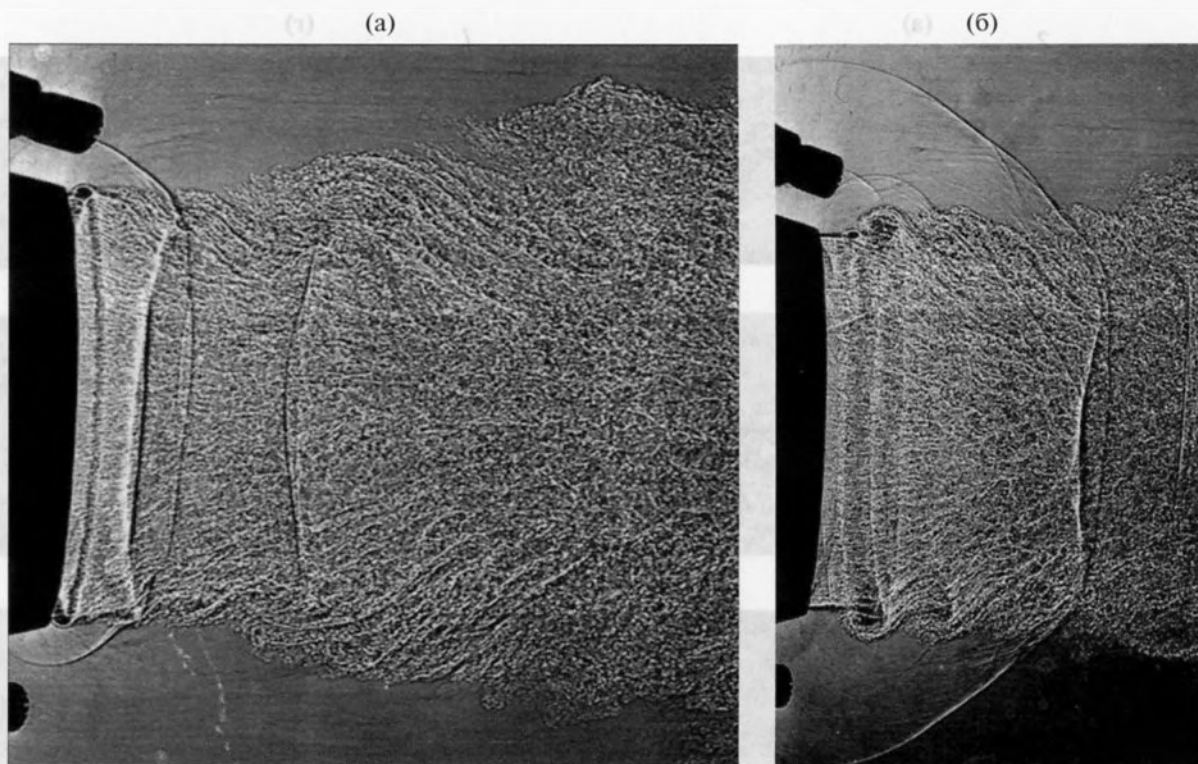


Рис. 5. Возникновение вихрей в слое смешения турбулентной струи при небольшом сверхкритическом перепаде давления, обусловленное возмущением кольцевым вихрем, создаваемым при продольном внутреннем акустическом воздействии (а); излучение звука в сверхзвуковой струе при взаимодействии вихря, образованного под действием звука, с вихрем, возникшем в слое смешения (б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании процессов аэроакустического взаимодействия в турбулентных струях с использованием теневого метода визуализации показано, что возникновение кольцевого вихря в выходном сечении сопла при продольном внутреннем акустическом воздействии сопровождается возбуждением слоя смешения турбулентной струи на частоте собственной неустойчивости с образованием кольцевых вихрей. Крупный вихрь, образовавшийся при акустическом воздействии, может взаимодействовать с этими вихрями, причем данный процесс может сопровождаться излучением звука.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Roshko A. Structure of turbulent shear flows. A new look // AIAA J. 1966. V. 4. № 10. P. 1349–1357.
2. Crow S.C., Champagne F.H. Orderly structure in jet turbulence // J. Fluid Mech. 1971. V. 48. № 3. P. 547–591.
3. Власов Е.В., Гиневский А.С. Акустическое воздействие на аэродинамические характеристики турбулентной струи // Изв. АН СССР. Механ. жидк. и газа. 1967. № 4. С. 133–138.
4. Kopiev V., Ostrikov N. Axisymmetrical instability wave control due to resonance coupling of azimuthal modes in high-speed jet from corrugated nozzle // AIAA Paper. 2012. № 2144.
5. Беляев И.В., Зайцев М.Ю., Копьев В.А., Копьев В.Ф., Фараносов Г.А. Акустическое управление волнами неустойчивости в турбулентной струе // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 1. С. 19–30.
6. Пимштейн В.Г. Альбом. Аэроакустические взаимодействия в турбулентных струях. М: Физматлит, 2010. 84 с.
7. Pimstein V.G. Disturbance generation in supersonic jets under acoustic excitation // AIAA J. 1994. V. 12. № 7. P. 1345–1349.
8. Пимштейн В.Г. Об излучении звука при возникновении возмущений в турбулентных струях при аэроакустических взаимодействиях // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 5. С. 466–469.
9. Eldredge J.D. The acoustics of two-dimensional leap-frogging vortices // AIAA Paper. 2005. № 2954.
10. Гиневский А.С., Власов Е.В., Каравосов Р.К. Акустическое управление турбулентными струями. М: Физматлит, 2001. 240 с.
11. Пимштейн В.Г. Об излучении звука при взаимодействии вихрей в турбулентной струе // ДАН. 1996. Т. 349. № 5. С. 628–629.