

УДК 532.5; 534.2
ББК 22.32
ПЗ2

П и м ш т е й н В. Г. Альбом. Аэроакустические взаимодействия в турбулентных струях. — Учебное пособие. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010.— 84 с. — ISBN 978-5-9221-1232-1.

Представлены результаты экспериментального исследования взаимодействия звука с дозвуковыми и сверхзвуковыми турбулентными струями. На приводимых в альбоме теневых фотографиях рассматривается широкий круг вопросов, связанных с возникновением и развитием возмущений, излучением волн Маха такими возмущениями, возникновением, развитием, взаимодействием и разрушением кольцевых и косых вихрей и вихрей Тейлора–Гёртлера, излучением звука вихрями и т. д.

Для аспирантов и студентов в учебных курсах, рассматривающих вопросы газодинамики, турбулентности и аэроакустики, для научных работников в области аэроакустики.

Рекомендовано Учебно-методическим объединением высших учебных заведений Российской Федерации по образованию в области прикладных математики и физики в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Прикладные математика и физика» или по другим смежным направлениям и специальностям в области естественных наук, техники и технологий.

Рецензент: кафедра гидродинамики и аэроакустики Московского физико-технического института
(зав. кафедрой проф. А. Г. Мунин)

Оглавление

Предисловие	4
Введение	5
1. Дозвуковые струи.....	7
2. Сверхзвуковые струи	31
3. Невозмущенные сверхзвуковые струи.....	59
Приложение 1. Схемы опытов.....	75
2. Параметры струй и излучателей.....	77
3. Список фотографий	79
4. Обозначения	81
Литература.....	82

Предисловие

В современной гидромеханике аэроакустические взаимодействия — предмет исследования, лежащий на стыке аэродинамики и акустики, — рассматривают как уникальный по своим возможностям метод исследования струйных течений и, особенно, упорядоченных, когерентных структур, присущих, как правило, таким течениям. С другой стороны, аэроакустические взаимодействия представляют эффективный способ воздействия на структуру и шум турбулентных струй, позволяющий существенно влиять на их аэродинамические и акустические характеристики. Предлагаемый вниманию читателей альбом «Аэроакустические взаимодействия в турбулентных струях», следующий традициям выдающегося «Альбома течений жидкости и газа» М. Ван-Дайка, рассмотревшего целый спектр фундаментальных проблем гидромеханики, посвящен одной из актуальных проблем аэроакустики — проблеме воздействия звука на дозвуковые и сверхзвуковые турбулентные струи и представляет собой собрание теневых фотографий, отражающих различные стороны процесса аэроакустических взаимодействий.

Особенность настоящего альбома — в использовании звуковых волн высокой интенсивности, видимых на фотографиях: визуализация процесса взаимодействия позволяет выявить ранее неизвестные детали этого процесса. Другая особенность альбома — он целиком основан на работах автора, полученных в последние годы. В альбоме рассматриваются процессы возникновения, развития, взаимодействия и разрушения крупномасштабных упорядоченных структур, их роль в образовании слоя смещения и излучении шума дозвуковыми и сверхзвуковыми турбулентными струями. Многие из представленных в альбоме ранее неизвестных явлений, таких, например, как усиление звука сверхзвуковой струей, взаимодействие звука с вихрями, влияние угла падения звука на границу струи и т.д. — не получили пока достаточного объяснения и рассчитаны на внимание и творческий интерес со стороны научных сотрудников в области аэроакустики. Использование альбома в качестве учебного пособия при преподавании учебных курсов, рассматривающих вопросы газовой динамики, турбулентности и аэроакустики, также представляется очень ценным.

Директор Центрального аэрогидродинамического
института им. проф. Н. Е. Жуковского
д-р физ.-мат. наук С. Л. Чернышев

Введение

Настоящая работа выполнена под влиянием известного «Альбома течений жидкости и газа» Мильтона Ван-Дайка и представляет собой попытку продвинуться по проложенному пути в области, касающейся, главным образом, взаимодействия звука с дозвуковыми и сверхзвуковыми турбулентными струями, в которой в последние годы получен ряд новых результатов.

В современной гидромеханике аэроакустические взаимодействия рассматриваются как уникальный по своим возможностям метод исследования струйных течений и, особенно, упорядоченных структур, присущих, как правило, таким течениям. С другой стороны, аэроакустические взаимодействия представляют собой эффективный способ воздействия на структуру и шум турбулентных струй, позволяющий существенно влиять на их аэродинамические и акустические характеристики. Эти особенности аэроакустических взаимодействий привлекают к ним внимание исследователей и в настоящее время литература по этому вопросу включает сотни наименований. Аэроакустические взаимодействия, таким образом, превратились в одно из перспективных направлений исследований при решении фундаментальных проблем газодинамики, связанных с процессами смешения и излучения звука турбулентными струями. Изучение роли крупномасштабных упорядоченных (когерентных) структур в процессах турбулентного смешения и излучения шума турбулентными струями является важным направлением исследований в рамках этой проблемы. Особый интерес представляет исследование процессов возникновения, развития, взаимодействия и разрушения крупномасштабных упорядоченных структур и выяснение их роли в образовании слоя смешения и излучении шума дозвуковыми и сверхзвуковыми турбулентными струями. В исследованиях, результаты которых представлены в альбоме, в качестве средства воздействия на струи использовались пилообразные волны конечной амплитуды, которые отчетливо видны на теневых фотографиях наряду со струями и их элементами (скачками уплотнения, возмущениями, вихрями и т.д.). Пилообразные волны конечной амплитуды не являются совершенно новым или необычным объектом исследования, они часто встречаются на практике. Например, излучение так называемого дискретного тона сверхзвуковыми струями на нерасчетных режимах истечения представляет собой именно такую волну, характеризующуюся высоким уровнем звукового давления и наличием большого числа гармоник. Такое излучение нередко наблюдается и в натуральных условиях в спектрах шума струй двигательных установок летательных аппаратов. Под действием пилообразных волн конечной амплитуды в струях образуются возмущения достаточно больших размеров, что дает возможность проследить за их эволюцией. При некоторых допущениях можно

предполагать, что и малые возмущения, которые трудно или невозможно обнаружить визуальными методами исследования, ведут себя подобным образом и что возмущения, образующиеся в струях под действием звуковых волн конечной амплитуды, можно рассматривать как удобные модели таких возмущений, возникающих и в невозмущенных струях. Теневые фотографии, приведенные в альбоме, получены с помощью прямого теневого метода с импульсным осветителем с длительностью экспозиции порядка 0,2–0,3 мкс. В качестве источников звука использовались газоструйные излучатели Гартмана с частотами 1–20 кГц, создававшие, как правило, пилообразные звуковые волны конечной амплитуды с уровнем звукового давления до 170 дБ (с отражателями звука). Обычно полагают, что теневой метод визуализации не позволяет однозначно интерпретировать полученные результаты. Это связывают с тем, что луч света на пути от источника до экрана претерпевает изменение на оптических неоднородностях объекта по всей его глубине и наблюдаемая на экране картина — результат наложения явлений, наблюдаемых в различных сечениях объекта. Это в самом деле так, но использование в качестве объектов исследования осесимметричной струи и пилообразных волн конечной амплитуды приводит к тому, что процесс аэроакустического взаимодействия, фиксируемый на экране, разворачивается в осевом вертикальном сечении струи на ее границе. Все детали процесса взаимодействия могут быть легко идентифицированы, направление распространения звуковых волн и волн Маха на всех представленных теневых фотографиях соответствует направлению от светлой к темной полоске на изображении их фронтов и, как правило, указано стрелками, а масштаб времени задается известной скоростью распространения звука в невозмущенной среде, так что скорость распространения возмущений и вихрей в струе может быть легко определена. Таким образом, особенности проводимых опытов — видимые на теневых фотоснимках фронты звуковых волн и отчетливые возмущения, возникающие в струях под действием звука, позволяют достаточно определенно интерпретировать их результаты.

В настоящей работе представлены результаты исследования возникновения, развития, взаимодействия и разрушения крупномасштабных возмущений (вихрей) в турбулентных струях под действием звука высокой интенсивности, их роли в процессах смешения и излучения шума турбулентными струями, эффектов и явлений, сопровождающих такие аэроакустические взаимодействия.

Вместе с фотографиями приведены схемы опытов и параметры струй и излучателей звука.

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №№ 94-01-01135, 96-02-19577, 00-01-00152, 03-01-00492 и 06-01-00093) и удостоена второй премии и серебряной медали на конкурсе им. проф. Н. Е. Жуковского (2008).

1. Дозвуковые струи

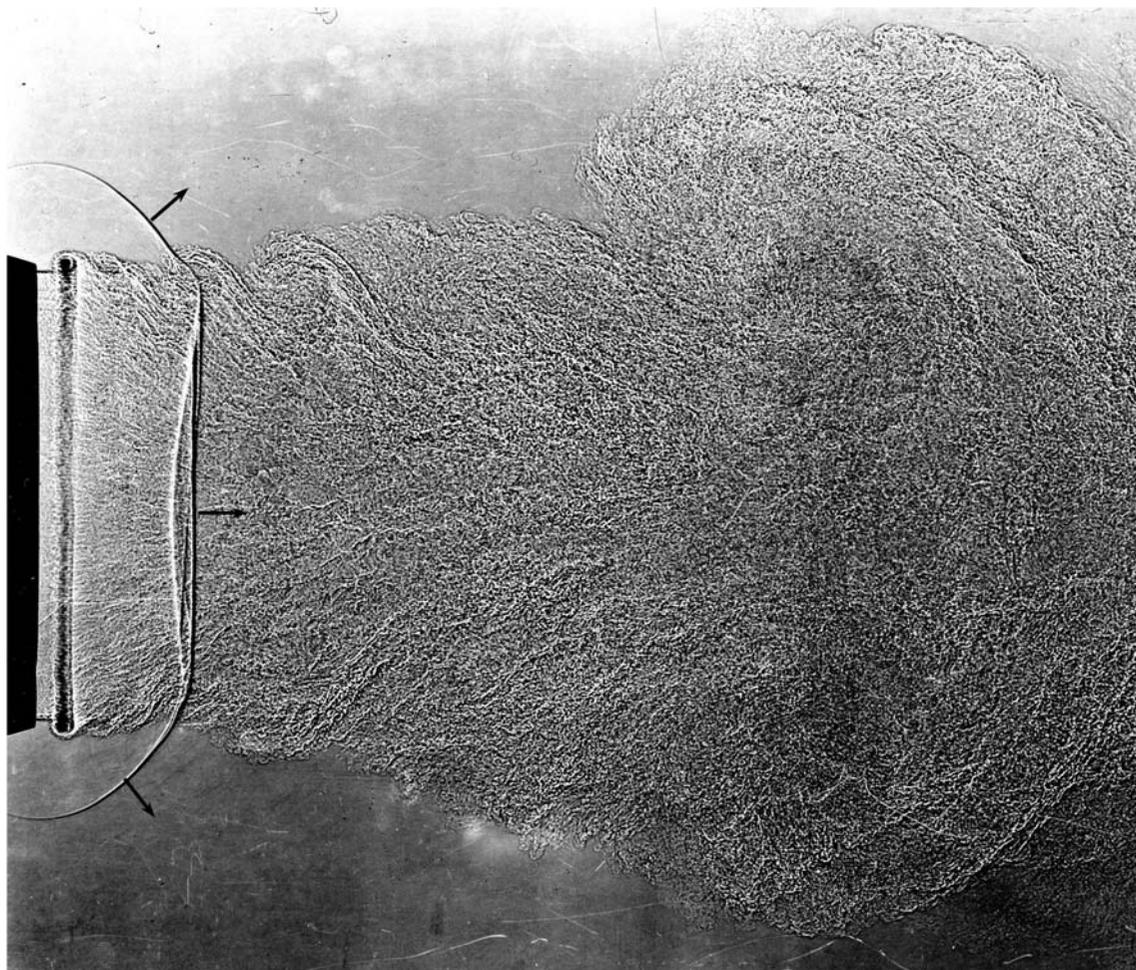
При продольном внутреннем акустическом возбуждении, производимом излучателем Гартмана, помещенным в форкамеру сопла, вихри образуются на кромке сопла при прохождении фазы максимального сжатия в звуковой волне через выходное сечение сопла. На начальном участке движений поперечные размеры вихря увеличиваются экспоненциально, затем их размеры не претерпевают заметных изменений, а при дальнейшем развитии вихри разрушаются. При увеличении частоты акустического воздействия образуется цепочка вихрей. Крупные вихри, возникающие в струях под действием звука, как правило, не взаимодействуют, но в некоторых опытах удалось наблюдать чехарду вихрей в турбулентных струях с достаточно большими числами Рейнольдса.

Акустическое воздействие на вихри в струях на частоте, отличной от частоты следования вихрей, приводит к образованию вихрей на этой частоте, возможности их взаимодействия с ранее образованными вихрями и излучения звука при таком взаимодействии. Имея в виду возможность излучения звука вихрем в струе при возникновении, развитии и разрушении, излучения звука при акустическом воздействии и при взаимодействии вихрей в струях оказываются тесно связанными. Вызвавшая появление кольцевого вихря звуковая волна, распространяясь вдоль струи, взаимодействует с ранее образованными вихрями, но при исследованных значениях параметров струи и излучателей звука не удается обнаружить заметных изменений в структуре вихря, подвергающегося такому воздействию. Звуковая волна, проходя через вихрь, претерпевает на нем рефракцию в связи с неоднородностью поля средней скорости, вызванной присутствием вихря, но при этом не удается обнаружить рассеянную волну и собственное излучение вихря. Это не означает, что эти эффекты отсутствуют, возможно их интенсивность недостаточна, чтобы выявить их с помощью используемого метода визуализации.

Излучение звука отдельным вихрем в турбулентной струе связано с нестационарностью процессов возникновения вихря, вовлечением в вихревое движение рабочего тела струи и окружающего пространства, перемещением вихря при сохранении относительно постоянной формы (в случае сверхзвуковой конвективной скорости), возникновением и развитием неустойчивости вихря и, наконец, его разрушением. Пока не удалось с достаточной достоверностью обнаружить излучение звука уединенным вихрем в турбулентной струе: применяемый в проведенных исследованиях прямой теневой метод визуализации обладает наибольшей чувствительностью по отношению к градиентам давления и поэтому позволяет обнаружить только те звуковые волны, градиент давления в которых достаточно велик, в частности, пилообразные волны. Поэтому даже интенсивное гармоническое излучение или излучение, обладающее сплошным спектром, не может быть

выявлено этим методом, а наблюдаемое излучение звука уединенным кольцевым вихрем связано, как можно предполагать, с излучением звука при его взаимодействии с вихрями, образующимися в сдвиговом слое на частоте собственной неустойчивости.

Также не удалось обнаружить результат воздействия пилообразных звуковых волн конечной амплитуды на только что образованный кольцевой вихрь при внешнем поперечном акустическом воздействии. Уровни звукового давления на кромке сопла могут при этом достигать величины порядка 170 дБ, но заметного изменения структуры части вихря, через которую уже прошел фронт звуковой волны, по сравнению с частью вихря, еще не подвергавшейся действию звука, не удастся выявить. Излучение звука при одновременном продольном внутреннем и поперечном внешнем воздействии звука на дозвуковую турбулентную струю, сопровождающемся образованием и взаимодействием кольцевого и косоугольного вихрей, можно интерпретировать как прямое экспериментальное подтверждение излучения звука при взаимодействии вихрей или как результат рассеяния падающей на кольцевой вихрь звуковой волны от внешнего источника звука. Струя гелия под действием звука высокой интенсивности расширяется существенно быстрее, чем воздушная струя, при одинаковом отношении интенсивности звука на кромке сопла к полному давлению с обеих струй: по-видимому, эта величина не может служить мерой воздействия звука на струи.



1.1. Образование вихря в турбулентной струе при акустическом воздействии. Кольцевой вихрь образуется в выходном сечении сопла при прохождении через него фазы максимального сжатия пилообразной звуковой волны конечной амплитуды, излучаемой ге-

нератором Гартмана, помещенным в форкамеру сопла. Ранее образованный вихрь возбуждает сдвиговой слой на частоте собственной неустойчивости, скорость струи 170 м/с, число Рейнольдса, рассчитанное по диаметру сопла, равно $7 \cdot 10^5$ [1]