

О РОЛИ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ В ИЗЛУЧЕНИИ ЗВУКА ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУЕЙ

В.Ф. Копьев, С.А. Чернышев, Г.А. Фараносов

ФАУ «ЦАГИ», Москва, vkopiev@mksagi.ru

Проблема излучения шума турбулентными струями до сих пор не имеет общепринятого теоретического решения. Причиной этого является то, что в турбулентной струе лишь малая часть гидродинамических пульсаций является эффективным источником шума, и в настоящее время нет общепринятого ответа на вопрос о том, какая составляющая турбулентных пульсаций в струе несет ответственность за генерацию шума. Это, в первую очередь, отражает сам факт нерешенности фундаментальной проблемы турбулентности.

Для определения звукового излучения струи в настоящее время широко применяются вихреразрешающие численные методы (LES). В этих расчетах удается определить многие важные характеристики турбулентных пульсаций в струе, в том числе и излучаемый ими шум [1–2]. Результаты численных расчетов имеют большое практическое значение и служат серьезной поддержкой в исследовании шума струи, но сами по себе они не дают понимания механизмов генерации звукового излучения турбулентными сдвиговыми потоками, которое необходимо для разработки методов снижения шума. Если говорить о теоретических подходах и теоретическом моделировании, то среди исследований в области шума струй можно выделить два основных направления. Первое основано на предположении о мелкомасштабности источников шума, а во втором в качестве источников звука рассматриваются крупномасштабные возмущения струи (волны неустойчивости и/или отдельные крупномасштабные вихри). Несмотря на то, что до сих пор отсутствует полная физическая модель мелкомасштабных источников звука, первый подход служит основой большого числа исследований и расчетов шума струи. Стандартным инструментом здесь является метод акустических аналогов [3–5], основанный на разделении механизмов генерации и распространения звуковых возмущений. При этом исходные

уравнения сплошной среды преобразуются к уравнениям, в левой части которых выделен оператор распространения, описывающий линейные возмущения системы, а остальные члены перенесены в правую часть уравнений и трактуются, как источник, динамика которого может быть описана независимо или смоделирована.

Одной из нерешенных проблем первого подхода, проявляющейся в большинстве акустических аналогий, является проблема так называемого сдвигового шума струи, связанного с возбуждением источниками вихревых возмущений сдвигового потока и дополнительным вкладом этих возмущений в звуковое излучение. До сих пор остается неясным, является ли сдвиговая компонента шума отражением реальных физических процессов или она связана с неверным подходом к разделению системы на две части в методе акустической аналогии.

Акустические измерения шума струи, полученные с помощью многомикрофонных методов позволили вернуться к этой проблеме на новом уровне. Экспериментальные данные, полученные методом ADT [6] (Azimuthal Decomposition Technique – ADT), получаемые разложением поля на азимутальные моды и получением статистических характеристик отдельных мод, могут служить жестким фильтром для отбора моделей источников звука в струе. Так, измерения показали безусловный квадрупольный характер источников звука.

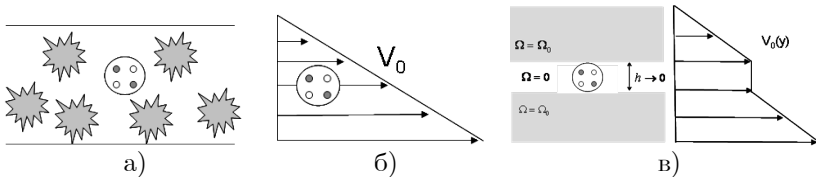


Рис. 1. Различные представления квадрупольных источников звука в турбулентном течении: а) источник в "газе вихрей" (до усреднения течения), б) источник звука на фоне среднего течения (после усреднения); в) источник в «исправленном» течении

Теоретический анализ азимутальных мод в [7] показал, что сдвиговая компонента возникает при моделировании шума струи за счет попаданием различных частей квадрупольного поля в области с разной скоростью (Рис. 1 а,б), что приводит к возбуждению источниками гидродинамических возмущений среднего течения,

содержащихся в операторе распространения. В этом случае источники в акустической аналогии не только непосредственно генерируют звуковые волны (собственный шум струи), но и возбуждают вихревые возмущения сдвигового течения, которые являются источниками вторичного звукового излучения (сдвиговый шум). Несоответствие моделей звукового излучения акустическим измерениям говорит об отсутствии сдвигового шума, который является следствием стандартного описания.

Возможные пути решения проблемы сдвигового шума могут быть связаны с устранением сдвига в области локализации источника (Рис. 1 в) или с использованием альтернативных акустических аналогий, в которых оператор распространения описывает неактивную среду, отвечающую только за распространение акустических возмущений, но не имеющую собственных гидродинамических степеней свободы. При использовании таких акустических аналогий сдвиговый шум не возникает, и соответствие модели и эксперимента достигается без искусственного исключения сдвиговой компоненты из суммарного звукового излучения. Новая акустическая аналогия, основанная на разделении акустических и гидродинамических переменных, была реализована в [8]. В этой работе в качестве оператора распространения используется конвективное волновое уравнение для акустического потенциала, а источник выражен через плотность вихревого импульса. Представление звукового источника в струе основано на дифференциальном уравнении с дельта-коррелированной правой частью. Физическая трактовка такого представления состоит в том, что элементарные события в вихревой динамике, ответственные за излучение звука, представляют собой быстрые «вспышки» возмущений со сравнительно более медленной дальнейшей эволюцией. Именно это быстрое начало гидродинамических процессов может быть выделено как источник звука на фоне других процессов, дающих большой вклад в энергию турбулентных пульсаций, но не эффективных с точки зрения генерации звука. С точки зрения вихревой динамики процесс «вспышек» можно трактовать на языке вихревого импульса, динамика которого определяется локальными деформациями вихревых нитей при воздействии внешних вихревых структур (Рис. 2).

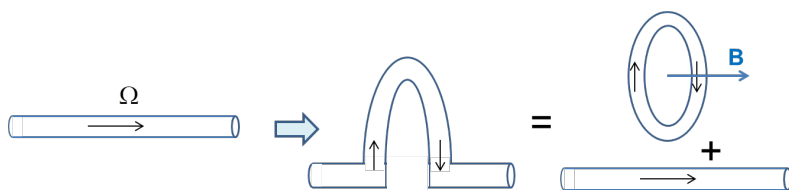


Рис. 2. Интерпретация элементарного события в вихревой динамике турбулентного течения (изгиб и растяжение вихревой нити) в терминах переменной плотности импульса. Локальное линейное нарастание импульса эквивалентно скачку производной по времени от него, т.е. рождению («вспышке») гидродинамической силы.

В рамках альтернативного подхода, заложенного в работах Т.Х. Седелникова, в качестве источников шума было предложено рассматривать линейные крупномасштабные возмущения струи или волны неустойчивости. В разработанной на основе волн неустойчивости теории предполагается, что звук излучается линейными возмущениями [9], развивающимися в слое смещения струи за счет механизма неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и связанными с собственными решениями линейного оператора распространения, описывающего эволюцию возмущений на фоне среднего течения. Механизм излучения звука волнами неустойчивости наиболее наглядно представляется в пространстве продольных волновых чисел, где отчетливо видна связь фазовой скорости возмущений в пакете с эффективностью излучения шума: она тем выше, чем выше скорость конвекции возмущений.

Для сверхзвуковой струи теория излучения шума волновыми пакетами была подтверждена экспериментально с использованием метода ADT [10]. По поводу значимости шума, излучаемого волнами неустойчивости, для дозвуковых струй существуют различные мнения. Имеется ряд работ, в которых шум таких струй моделируется волновыми пакетами, однако при этом приходится вводить в модель дополнительные параметры, «навязывающие» пакетам характеристики, не наблюдаемые в эксперименте. Совокупность экспериментальных данных по ближнему и дальнему полю дозвуковых струй, в том числе специфические свойства направленностей отдельных

азимутальных компонент, указывает на то, что эффективность прямого излучения звука волновыми пакетами в дозвуковых струях, по всей видимости, мала, и основной вклад в шум струи в этом случае вносят мелкомасштабные источники.

Отметим еще один линейный механизм излучения, связанный генерацией звука малыми возмущениями, которые могут развиваться в ядрах локализованных вихрей (вихревых колец). Его удастся идентифицировать в тонально возбужденных струях, когда локализованные тороидальные вихри реально существуют и наблюдаемы [11].

Рассмотренные в работе подходы являются в определенном смысле дополнительными друг к другу. Линейные волны неустойчивости, по-видимому, не дают значительного вклада в звуковое излучение струй с невысокими скоростями. Но при увеличении скорости именно наличие волн неустойчивости как дополнительного источника звука позволяет удовлетворить результатам измерений, особенно для нулевой моды. Отметим роль опознанных линейных механизмов излучения при выработке активных методов управления шумом, что является самостоятельной сложной задачей, требующей отдельного рассмотрения.

Наконец, следует сказать о вкладе численных методов в развитие необходимых представлений о структуре излучающей турбулентности. Несмотря на то, что сами по себе результаты даже самых точных расчетов не дают понимания механизмов генерации звукового излучения турбулентными сдвиговыми потоками, которое необходимо для разработки методов снижения шума, они могут рассматриваться как инструмент, расширяющий возможности физического эксперимента и служащий серьезной поддержкой в исследовании «физики» турбулентной струи. Например, с помощью результатов численного моделирования и их анализа [12] было показано, что наблюдаемые отклонения от нормального распределения в статистических свойствах пульсаций скорости в некоторых областях струи связаны с ее крупномасштабными колебаниями, а не с особенностями структуры мелкомасштабной турбулентности в слое смешения.

Экспериментальные результаты ЦАГИ, обсуждаемые в данной работе, получены с использованием УНУ “Заглушенная камера с потоком АК-2” ФАУ «ЦАГИ», модернизируемой при

финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по соглашению N.075-11-2021-066.

Результаты ЦАГИ, обсуждаемые в данной работе, получены в рамках проектов РФФИ (13-01-00476, 14-01-31041, 16-01-00746, 19-01-00229, 19-31-70005, 19-51-80002), РФФИ (17-11-01271, 21-71-30016), международных проектов OPENAIR, ORINOCO, ARTEM.

Литература

1. Shur M.L., Spalart P.R., Strelets M.Kh. Noise prediction for increasingly complex jets. IJA 2005. v4, n.3-4. pp. 213–266.
2. Brès G.A., Lele S.K. Modelling of jet noise: a perspective from large-eddy simulations // Phil. Trans. R. Soc. A. 2019. V. 377:20190081.
3. Lighthill M. J. On sound generated aerodynamically: I. general theory. Proc. Royal Soc. Series A. 1952. V. 211. P. 564–581.
4. Goldstein M.E. A Generalized Acoustic Analogy. JFM, 2003. V.488. pp.315–333.
5. Мунин А.Г., Кузнецов В.М., Леонтьев Е.А. Аэродинамические источники шума. М.: Машиностроение, 1981, 248 с.
6. Kopev V.F. et.al. The role of large-scale vortex in a turbulent jet noise. AIAA 1999-1839
7. Kopev V., Chernyshev S. Correlation model of quadrupole noise sources in turbulent jet: effect of refraction. AIAA 2015-3130.
8. Копьев В.Ф., Чернышев С.А. О разделении акустических и гидродинамических переменных в модели звуковых источников турбулентной струи. ДАН. Физика, технические науки, 2022, т.506 (1), с.1–25.
9. Tam C.K.W. Jet noise generated by large scale coherent motion. Aeroacoustics of Flight Vehicles. 1991. v.1. pp.311–390.
10. Зайцев М.Ю., Копьев В.Ф., Чернышев С.А. Экспериментальное исследование роли волн неустойчивости в механизме излучения шума сверхзвуковой струей, МЖГ, 2009 (4), с.124.
11. Kopev V.F., Zaitsev M.Yu., Chernyshev S.A., Ostrikov N.N. Vortex ring input in subsonic jet noise. IJA, 2007 v.6, n4, p.375.
12. Юдин М.А., Копьев В.Ф., Чернышев С.А., Фараносов Г.А. О вкладе волн неустойчивости в перемежаемость пульсаций скорости турбулентной струи. ДАН. Физика, технические науки, 2022, Т. 506 (1), с.26–32.