

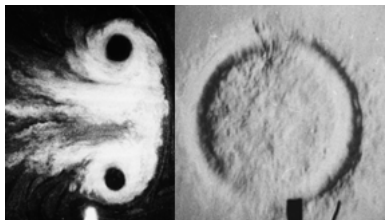


Турбулентное вихревое кольцо как «атом водорода» в аэроакустике

д.ф.-м.н., проф. **Виктор Феликсович Копьев**
и С.А. Чернышев

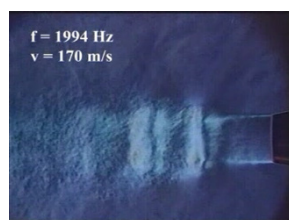
ФАУ «Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н.Е. Жуковского», Москва

Аэроакустика – достаточно молодая наука, она зародилась в 40-50 годах прошлого столетия на стыке классической аэродинамики и акустики и вобрала в себя самые сложные их разделы, включая проблему турбулентности, названную Ричардом Фейнманом «последней великой проблемой классической физики». Уже поэтому сама проблема моделирования аэродинамического шума турбулентными потоками более 70 лет находится на переднем крае фундаментальной науки, а разработка методов его снижения представляет собой сложнейшую нерешенную задачу. В докладе речь пойдет о таком характерном вихревом объекте как турбулентное вихревое кольцо [1,2], которое, по-видимому, до сих пор остается одним из наиболее интересных и перспективных объектов для исследований в гидродинамике.



Слева: турбулентное вихревое кольцо в профиль и анфас.

Снизу: вихревые кольца в турбулентных тонально возбужденных струях.



Уникальность этого объекта состоит в том, что вихревое кольцо пригодно для экспериментальных исследований и в то же время его поведение может быть описано в рамках основных уравнений сплошной среды. Самая важная особенность заключается в том, что, будучи порожденным, этот вихрь развивается только под воздействием собственной динамики и не испытывает влияния внешних границ. Это позволяет использовать вихревое кольцо как эталонный объект для исследования многих задач аэродинамики и аэроакустики. Многочисленные экспериментальные исследования показали [2,3], что существуют два качественно различных режима течения – ламинарный и турбулентный. Критическое число Рейнольдса Re_0 составляет около $2 \cdot 10^3$. При

меньших числах Re образуется вихрь с характерной и четко просматриваемой спиральной структурой [4,5]. При числах Re , превышающих Re_0 , характер течения принципиально меняется – течение становится турбулентным. Главные особенности такого течения состоят в том, что структура потока оказывается близкой к универсальной и не зависит от особенностей процесса формирования вихря. При этом течение разделяется на две области – ламинарное ядро, где сосредоточена завихренность, и область атмосферы кольца, где частицы жидкости совершают хаотическое движение (см. рисунок). Что особенно важно и интересно, граница между турбулентной и ламинарной областями остается резкой [3,6], несмотря на то, что кольцо успевает пройти большие расстояния. Именно такой турбулентный объект представляет интерес в аэроакустике как некий эталонный источник звука, генерация которого полностью определяется турбулентной вихревой динамикой без влияния внешних границ.

В работе [7] были исследованы колебания вихревого кольца, имеющие сложную структуру, связанную с вырождением частот собственных колебаний вихря, что как оказалось, приводит к новому механизму неустойчивости отдельных классов колебаний, возникновению множественных критических слоев в окрестности ламинарного ядра и появлению турбулентности в такой вихревой структуре [8]. В основе этого процесса лежит неустойчивость Майлса (известная как причина появления ветровых волн на воде [9]), имеющая ту же природу, что и механизм затухания Ландау в плазме [10]. Переход к турбулентности в вихревых кольцах по описанному механизму был валидирован не только с помощью визуализации и аэродинамического эксперимента, но и в аэроакустическом эксперименте при измерениях генерируемого вихревым кольцом шума, являющегося уникальным неинвазивным методом диагностики описанного сценария перехода [8,11]. Так, всю цепочку явлений от зарождения возмущений, их турбулизации и излучения ими звука удаётся построить из первых принципов на основе решения уравнений Эйлера, применимость которых в этой задаче, в свою очередь, подтверждается также начиная с чисел Рейнольдса $\sim 10^3$ (граница перехода в вихревых кольцах от спиралевидной структуры к турбулентному режиму с турбулентной атмосферой и выраженным ламинарным ядром). В отличие от малых вихревых колец, шум которых проявляется только в заглушенной камере [8], шум крупномасштабных вихревых колец, образуемых с помощью взрыва на полигоне, хорошо различим. Он напоминает шум пролетающего самолета, а его характеристики подтверждают некоторые дополнительные особенности генерации шума, предсказываемые теоретически [12].

Таким образом, турбулентное вихревое кольцо дает уникальный пример турбулентного объекта, в котором турбулентность можно описать аналитически, исходя из основных уравнений сплошной среды, в отличие от других видов турбулентности, описание которых основано на привлечении дополнительных

гипотез. При этом генерируемый турбулентным объектом шум, также предсказываемый аналитически, валидирует описанный сценарий, что подтверждает уникальную роль вихревого кольца как объекта аэроакустики, сравнимую с ролью атома водорода в понимании основных положений квантовой механики.

1. Сэффмэн Ф., в кн. Современная гидродинамика: Успехи и проблемы (Под ред. Дж. Бэтчелор, Г. Моффат) (М.: Мир, 1984) с. 77.
2. Луговцов Б.А. в сб. Некоторые проблемы математики и механики (Л.: Наука, 1970) с. 76.
3. Владимиров В.А., Луговцов Б.А., Тарасов В.Ф. Подавление турбулентности в ядрах концентрированных вихрей // ПМТФ. 1080. № 5. С. 69–76.
4. Ван-Дайк М. (Сост.) Альбом течений жидкости и газа (М.: Мир, 1986).
5. Shariff K., Leonard A. Vortex Rings // Ann. Rev. Fluid Mech. 1992. V. 24. 235–279.
6. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели 2-е изд. (М.: Наука, 1977).
7. Kopiev V.F., Chernyshev S.A. Vortex ring eigen-oscillation as a source of sound // J. Fluid Mech. 1997. V. 341. P. 19–57.
8. Копьев В.Ф., Чернышев С.А. Колебания вихревого кольца, возникновение в нем турбулентности и генерация звука // УФН. 2000. Т. 170. С. 713–442.
9. Miles J.W. On the generation of surface waves by shear flows // J. Fluid Mech. 1957. V. 3. P. 185–204.
10. Кадомцев Б.Б. Затухание Ландау и эхо в плазме // УФН. 1968. Т. 95. С. 111–129.
11. Копьев В.Ф., и др. Параметрическое исследование шума вихревых колец различного диаметра // Акустический журнал. 2018. Т. 64. С. 499–507.
12. Kopiev V., Zaytsev M., Akhmetov D., Nikulin V. Aerodynamic noise of large-scale vortex ring produced by explosion in cylindrical chamber // AIAA paper 2019-2739.

Авторы выражают благодарность Российскому научному фонду за поддержку в рамках гранта № 26-11-00377, <https://rscf.ru/project/26-11-00377/>.