

03

Наблюдение крупномасштабных гидродинамических структур в вихревой трубке и эффект Ранка

© В.А. Арбузов, Ю.Н. Дубнищев, А.В. Лебедев, М.Х. Правдина,
Н.И. Яворский

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск

Поступило в Редакцию 30 июля 1997 г.

Впервые обнаружено существование крупномасштабных структур в виде двойной вихревой спирали в закрученном потоке Ранка. Структура двойной вихревой спирали визуализирована в реальном времени методом бихроматической фильтрации Гильберта. Экспериментальный результат интерпретируется выводом, что наиболее вероятным физическим механизмом пространственного энергоразделения в потоке газа (эффект Ранка) является вязкий нагрев газа в тонком пограничном слое на стенках вихревой камеры и адиабатическое охлаждение в центре за счет формирования вблизи оси интенсивного вихревого жгута.

Эффект Ранка — удивительное явление, известное весьма давно [1], но до сих пор не имеющее адекватного физического объяснения. Основной проблемой, которая делает эффект Ранка загадочным, является возникновение существенно неоднородного распределения энтальпии торможения в сильно закрученном потоке газа. Фактически за малые времена порядка 0.1 с осуществляется значительное перераспределение в пространстве тепловой энергии, и мы имеем "реально действующего" демона Максвелла. Существует большое количество попыток объяснить этот феномен [2–4], но все они довольно далеки от реальности. Хорошо известно, что для постоянства энтальпии торможения достаточно выполнения следующих условий (теорема Бернулли): 1) течение должно быть стационарным, 2) силы вязкого трения в газе (жидкости) несущественны, 3) теплообмен между жидкими частицами пренебрежимо мал. Следует сказать, что нарушение стационарности течения само по себе не создает пространственного разделения теплосодержания, поскольку простая перестановка жидких частиц без соответствующего

энергообмена между ними не изменит энтальпии. Тем не менее нестационарные модели течения приводят к хорошему количественному согласию с экспериментом по кинематике течения [3]. Попытки учесть силы вязкости приведены в [2,4]. Общепринятой стала точка зрения, согласно которой процесс энергоразделения осуществляет в потоке некая тепловая машина [2,5]. Следует отметить, что эта гипотеза противоречит предположению об адиабатичности процесса, которое выполняется с хорошей точностью на больших масштабах течения.

В настоящее время имеются достаточные основания для предположения о принципиальной роли крупномасштабных вихревых структур в эффекте Ранка [6] и, в частности, в осуществлении работы предполагаемой тепловой машины. Для выяснения их роли предпринята попытка экспериментального наблюдения гидродинамических структур в вихревой трубке Ранка.

Разработан комплекс для визуализации крупномасштабных структур в аэродинамическом потоке. В качестве способа визуализации использован метод цветной гильберт-визуализации фазовых полей оптической плотности закрученных потоков, предусматривающий компенсацию оптических искажений от стационарных температурных градиентов [7]. Создан действующий макет визуализатора с полем наблюдения $\varnothing 100$ mm. Оптический сигнал регистрируется скоростной видеокамерой и вводится в систему обработки на базе персонального компьютера для выявления структурных и кинематических параметров исследуемого процесса.

В качестве объекта исследования выбран вихревой канал с квадратным сечением и прозрачными стенками, в котором организован закрученный поток, подобный течению в трубке Ранка. На "холодном" конце воздух закручивается в щелевом завихрителе. "Горячий" конец выполнен в виде радиального диффузора.

Осуществлялась визуализация в реальном времени градиента фазового поля оптической плотности в поперечном и продольном направлениях вихревого канала с минимальным временем экспозиции $250 \mu s$ при разных динамических режимах.

Установлено существование крупномасштабных структур, время жизни которых на порядки превышает время экспозиции. Впервые обнаружена двойная вихревая спираль (рис. 1), которая зарождается на плоской торцевой поверхности около периферийного выхода горячего воздуха, а затем распространяется вдоль продольной оси, многократно

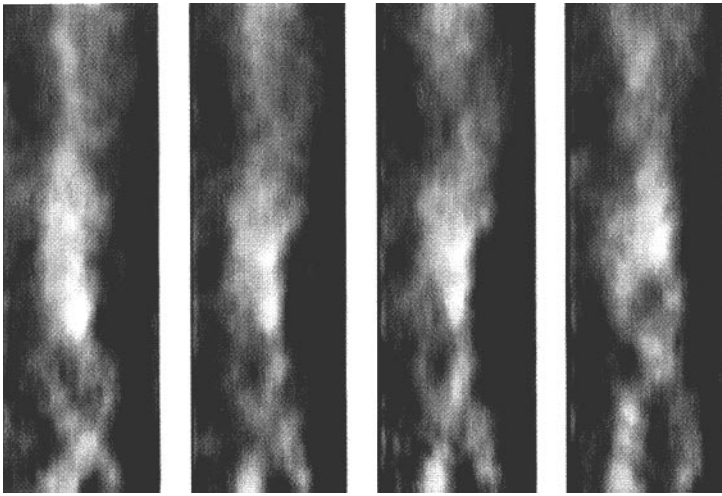


Рис. 1. Визуализация крупномасштабных вихревых структур в виде двойной спирали. Время экспозиции каждого кадра $250 \mu\text{s}$. Визуализирован радиальный градиент фазовой оптической плотности. Давление на входе в канал 0.6 МПа ; полный расход воздуха $4.5 \cdot 10^{-2} \text{ kg/s}$; изменение температуры на "холодном" и "горячем" выходах 33.9 и 1.6 К соответственно; отношение расхода на "холодном" выходе к полному 0.26 ; адиабатический КПД охлаждения — 0.3 .

перезамыкаясь и разрушаясь. В середине устройства можно выявить только отдельные ее фрагменты. Зафиксировано вращательное движение вихревой спирали. Наличие спиральной структуры свидетельствует об интенсивном обратном токе вдоль оси течения. Как показывают расчеты течений подобного типа [8], линии тока могут быть представлены следующим схематическим образом (рис. 2). Сильно закрученный поток из завихрителя двигается вдоль стенок трубы, затем небольшая часть потока покидает устройство (горячий воздух), а большая направляется к центру, значительно увеличивая завихренность (в силу сохранения циркуляции скорости по сжимающемуся контуру, расположенному перпендикулярно оси течения), что и является причиной возникновения двойной вихревой спирали. Следует отметить при этом, что вихревая спираль занимает центральную часть устройства и не возмущает значительным образом пристенный вязкий пограничный слой. В наших

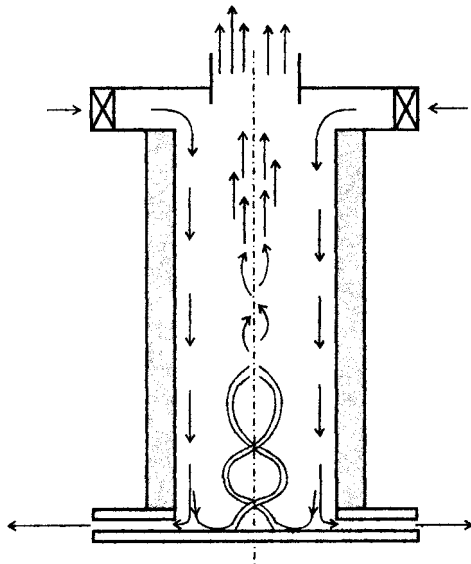


Рис. 2. Схема течения в вихревой трубке Ранка.

условиях число Рейнольдса Re составляет 10^5 и несколько выше, а величина пограничного слоя (δ — около 1 mm). После этого воздух вдоль оси движется в обратном направлении и выходит через отверстие в завихрителе (холодный воздух).

При общем перепаде давления в 4–5 атмосфер скорости течения газа в вихревой трубке составляют десятки метров в секунду (до 80 m/s). При ширине трубки 3.4 см и длине до 1 m время пребывания частицы в ней не должно превышать 0.1 s (продольная скорость не превышает 10 m/s). Как показывают измерения, перепад температуры торможения на выходе из вихревой трубки составляет 14 K. Нетрудно рассчитать, что для возникновения разницы температуры торможения в 14 K за 0.1 s необходимо на расстояниях около 4 см (поперечный размер трубки) иметь перепад температуры воздуха порядка 20 000 K! Реально внутри трубки трудно ожидать перепадов температуры выше 100 K, которые возникают в основном за счет адиабатического охлаждения и нагрева газа. Легко найти характерный размер, на котором за 0.1 s

происходит нагрев воздуха на 14 К при разнице температур в 100 К. Он составляет около 1 мм. Итак, для того чтобы работала тепловая машина, необходимо наличие локальных градиентов температуры в системе порядка 10^5 К/м. В свою очередь реальная физическая модель должна включать в себя объяснение того, как возникают в потоке такие высокие тепловые нагрузки. Можно предложить следующие четыре наиболее вероятных механизма энергоразделения в гидродинамическом течении: 1) в процессе разрушения крупномасштабной вихревой структуры образуется большое число мелкомасштабных (1 мм) локализованных вихрей высокой интенсивности, на характерных размерах которых происходит кондуктивный энергообмен между жидкими частицами с дальнейшей их сепарацией на больших пространственных масштабах; 2) в гидродинамической системе оказывается существенным явление баротеплопроводности, т.е. переноса тепла за счет градиента давления; 3) следует учитывать теплообмен газа со стенками вихревой трубы; 4) существенную роль играет нагрев газа за счет вязкой диссипации кинетической энергии.

Для реализации первого механизма необходимо, чтобы за короткие гидродинамические времена вихревая структура была разрушена вплоть до очень мелких масштабов. В принципе такая возможность может иметь место, если в гидродинамической системе будет присутствовать явление vortex breakdown, т.е. распад вихря. Однако возникает вопрос о механизме сепарации, в результате которого более холодные частицы собираются в центре камеры, а более горячие — на периферии ее. С другой стороны, явление баротеплопроводности (второй механизм) изучено очень слабо. По всей видимости, оно незначительно в обычных процессах тепломассопереноса. Во всяком случае, ожидать, что соответствующий кинетический коэффициент будет значительно выше обычной теплопроводности, не приходится. Тепловой же контакт газового потока с окружающими его стенками (третий механизм) требует более подробного рассмотрения.

Прежде всего отметим, что число Прандтля для воздуха составляет около 0.7, и, следовательно, толщина теплового пограничного слоя будет примерно такого же порядка, как и гидродинамического, т.е. около 1 мм. Таким образом, мы видим, что основная тепловая нагрузка может быть сосредоточена в вязком пограничном слое. Далее, скорость движения газа в пограничном слое заметно ниже скорости основного потока, поэтому время теплового контакта частиц воздуха со стенкой

в несколько раз превышает оценку в 0.1 s. Отсюда вытекает, что для существенного изменения температуры газа перепад температуры между стенкой и газом может составлять всего несколько десятков градусов. Влияние теплообмена со стенкой наблюдалось экспериментально другими авторами [2], однако его не связывали напрямую с тепловыми процессами в пограничном слое.

В пограничном слое происходит интенсивная диссипация кинетической энергии, которая может сильно подогреть газ за характерные времена в несколько десятых секунды. Оценим величину вязкого нагрева. Имеем

$$\begin{aligned} \frac{\Delta T}{\tau} &\cong \frac{\nu}{2c_p} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)^2 \cong \frac{\nu}{2c_p} \frac{u^2}{\delta^2} \\ &\cong \frac{T}{2} \frac{u^2}{c_p T} \frac{\nu}{\delta^2} \cong \frac{T}{2} \frac{u^2}{c_p T} \frac{u}{25l} \cong \frac{T}{2} M^2 \frac{u}{25l}, \end{aligned}$$

где T — абсолютная температура воздуха на входе в устройство (~ 300 K), τ — время пребывания частицы в нем (~ 0.1 s), M — число Маха ($M^2 \sim 0.1$), u — характерная скорость (~ 100 m/s), l — характерный размер (~ 4 cm), $\delta = 5l/Re^{1/2}$ — толщина пограничного слоя. Отсюда увеличение температуры торможения воздуха за счет вязкого нагрева может составить около 150 K, если пренебречь теплообменом газа пограничного слоя со стенками вихревой трубы и турбулентным закрученным потоком вне пограничного слоя. Как уже указывалось, в наших опытах увеличение температуры торможения составляло около 14 K, что на порядок меньше оценки и свидетельствует об очень интенсивном теплообмене между пограничным слоем и основным турбулентным потоком газа, который, как и теплообмен со стенкой, отрицательно сказывается на эффекте Ранка. Таким образом, видно, что учет вязкого нагрева газа в принципе решает проблему ”энергоразделения”. Следует добавить, что в наших опытах изменялся зазор, через который отводился горячий воздух. При этом максимальный эффект достигался тогда, когда ширина зазора становилась равной толщине пограничного слоя, что подтверждает сделанный выше вывод.

Помимо нагрева газа, существенным элементом эффекта Ранка является охлаждение основного потока до значительных отрицательных температур. Это явление можно было бы объяснить, если в районе оси течения возникло бы разрежение, существенно превышающее то, кото-

рое бы появилось в результате вращательного движения газа, вызванного пристеночными струйными потоками, вытекающими из завихрителя. Такое возможно, если в центре трубы имеется интенсивная вихревая структура, которая и была обнаружена нами экспериментально. Наличие вблизи оси области с высокой концентрацией завихренности является причиной значительного понижения в ней давления и, следовательно, адиабатического охлаждения газа, движущегося вне пограничного слоя. В результате температура газа в приосевой области значительно падает, о чем и свидетельствует выход холодного газа через центральное отверстие в завихрителе.

На основе вышеизложенного можно сделать вывод, что наиболее вероятные физические механизмы, ответственные за пространственное энергоразделение в потоке газа (эффект Ранка), — это вязкий нагрев газа в тонком пограничном слое на стенках вихревой камеры и адиабатическое его охлаждение в центре за счет формирования вблизи оси интенсивного вихревого жгута, экспериментальное наблюдение которого впервые было осуществлено в данной работе.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

Список литературы

- [1] *Ranque G.L.* // J. Phys. Radium. Paris. 1993. V. 4. P. 112–115.
- [2] *Меркулов А.П.* Вихревой эффект и его применение в технике. М.: Машиностроение, 1969. 183 с.
- [3] *Алексеевко С.В., Окулов В.Л.* // Теплофизика и аэромеханика. Т. 3. № 2. С. 101–138.
- [4] *Гольдштик М.А.* Вихревые потоки. Новосибирск: Наука, 1981. 366 с.
- [5] *Deissler R.G., Perlmutter M.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 1959. V. 1. P. 173–191.
- [6] *Лукачев С.В.* // ИФЖ. 1981. Т. 41. № 5. С. 784–790.
- [7] *Arbuzov V.A., Dubnistchev Yu.N.* // Optics and Laser Technology. 1991. V. 23. P. 118–120.
- [8] *Яворский Н.И., Башкатов М.В.* // ЖТФ. 1996. № 4. С. 45–57.