

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИХРЕВЫХ НИТЕЙ

С.В.Алексеевко, С.И.Шторк

*Институт теплофизики СО РАН
630090 Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 18 апреля 1994 г.

Экспериментально обнаружена и описана двухспиральная стационарная структура из взаимодействующих вихревых нитей одного знака.

Одним из наиболее актуальных и перспективных направлений в проблеме описания турбулентности является изучение когерентных структур (или организованных движений) [1]. Давно уже известно, что турбулентность в сдвиговых течениях не есть чисто стохастический процесс, а включает в себя многообразные и достаточно хорошо определенные структуры – "пятна", "подковы", "шпильки" и т.д. [1–5]. Формирование и эволюция таких структур существенным образом связаны с взаимодействием и распадом вихрей разных масштабов.

Особенно удивительным фактом является существование в турбулентном потоке протяженных продольных вихрей – собственно, вихревых нитей, продольный размер которых может в десятки и даже сотни раз превышать их диаметр. Вихревые нити, по-видимому, играют особую роль в турбулентном движении. В гидродинамике сверхтекучего гелия считается общепризнанным, что турбулентность представляет собой процесс взаимодействия квантованных вихревых нитей [6]. Чрезвычайно важно выявить роль вихревых нитей и в вязкой жидкости. Однако в силу нестационарности, трехмерности и малых масштабов когерентных структур изучение организованных движений в турбулентных потоках, несмотря на стремительный рост количества работ, находится на стадии накопления эмпирической информации. В представленной работе получены новые экспериментальные данные, которые могут стать основой для детального исследования взаимодействия вихревых нитей в вязких жидкостях.

При постановке эксперимента авторы исходили из следующих фактов. Сужение выходного отверстия в вихревых или циклонных камерах приводит к концентрации завихренности у оси камеры и образованию вихря, радиус которого много меньше размеров камеры [7, 8]. То есть генерируется крупномасштабная вихревая нить. Любая несимметрия, например смещение выходного отверстия относительно геометрической оси камеры, вынуждает нить изогнуться и за счет самоиндуцированного движения принять форму винтовой линии, которая фиксирована в пространстве [8]. Кинематический анализ закрученного течения со спиральной осью дает возможность предположить существование течения с двумя переплетенными осями и таким образом смоделировать на макроуровне взаимодействие двух вихревых нитей. Многократные попытки создать подобный режим увенчались успехом для варианта вихревой камеры с центральным выходным отверстием и двухскатным торцом. Результаты исследований приведены ниже.

Эксперименты проводились в гидравлической вихревой камере квадратного сечения 188×188 мм и высотой до 625 мм (рис.1а). При изучении вихревых нитей, как показано в опытах с цилиндрическими вставками, форма поперечного сечения не играла принципиальной роли. Подача жидкости и организация

закрученного течения осуществлялась через 12 поворотных прямоугольных сопел, оси которых направлены по касательной к некоторой окружности. Меняя угол направления сопел в поперечной плоскости, можно регулировать степень закрученности потока. Конструкция камеры позволяла менять: форму дна (нижнего торца), высоту H и диаметр выходного отверстия d_{ex} . Все эти геометрические параметры оказывали сильное влияние на структуру закрученного потока. В то время как относительно числа Рейнольдса течение было автомодельно. В качестве рабочей жидкости использовалась вода. Скорость истечения из сопел достигала 2 м/с, а число Рейнольдса Re , определенное по параметрам сопла, $4 \cdot 10^4$.

Опыты проводились следующим образом. Вначале устанавливалось плоское дно и при заданном диаметре выходного отверстия ($d_{ex} = 40 - 70$ мм) путем регулирования направления сопел организовывался режим с устойчивой вихревой нитью. Для визуализации течения в камеру вводились мелкие пузырьки воздуха. Поскольку у оси вихревой нити имеет место сильное разрежение, то пузырьки собираются в непрерывный тонкий воздушный шнур, эффективно визуализируя физическую ось вихря. Для определения параметров вихря и доказательства существования вихревой нити измерялось поле скоростей бесконтактным оптическим методом – методом стробоскопической визуализации частиц. Частицами – метками служили пузырьки воздуха. Характерные профили тангенциальной и аксиальной компонент скорости изображены на рис.2. Экспериментальные данные обобщаются эмпирическими зависимостями, которые предложены в [9], и описываются формулами

$$V(r) = A[1 - \exp(-\alpha_1 r^2)]/r, \quad (1)$$

$$W(r) = W_1 + W_2 \exp(-\alpha_2 r^2), \quad (2)$$

где A , α_1 , α_2 , W_1 , W_2 – эмпирические константы. Как следует из графика, радиус вихря, определенный по максимуму тангенциальной скорости, равен 1,7 мм, что много меньше ширины камеры и длины вихря, совпадающей с высотой камеры $H = 430$ мм.

При замене плоского дна на двухскатное (рис.1а) была обнаружена квазистационарная двухвихревая структура, фотография которой показана на рис.1б, а соответствующая кинематическая схема – на рис.1а. На фотографии светлые линии – это тонкие воздушные шнуры, визуализирующие оси двух вихревых нитей. То, что это действительно оси, следует из визуализации течения в вертикальной плоскости с помощью светового "ножа" (рис.3). Хорошо видно, как траектории отдельных пузырьков обвиваются вокруг воздушных шнуров. Незначительные нарушения осевой симметрии приводят к тому, что доминирует лишь одна из спиралей, а вторая не наблюдается.

Кинематика потока следующая. В целом поток в камере закручен вправо, причем у стенок превалирует тангенциальная компонента скорости (рис.1а). В каждой вихревой нити закрутка течения тоже правая, но с заметной аксиальной компонентой скорости (см. рис.2). Таким образом реализуется взаимодействие двух вихревых нитей одного знака. Результат взаимодействия есть двойная спираль, винтовые оси которой также завиты вправо. Исключительно благодаря такой топологии возможно кинематическое сопряжение двух вихрей одного знака, а именно, векторы скоростей обеих вихревых трубок сопрягаются на геометрической оси камеры и направлены вертикально вверх.

На параметры двойной спирали (расстояние между нитями S , длину волны λ и число полуволн j) сильное влияние оказывает угол β наклона скатов на дне камеры. Например, при $\beta = 50^\circ$ $j = 3$, $\lambda = 250$ мм, $S = 60$ мм (рис.1б), а для $\beta = 30^\circ$ $j = 6$, $\lambda = 115$ мм, $S = 25$ мм (рис.1с).

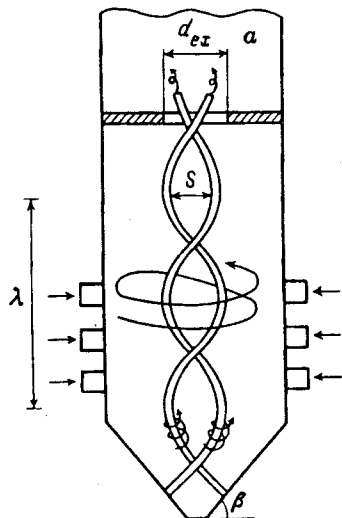
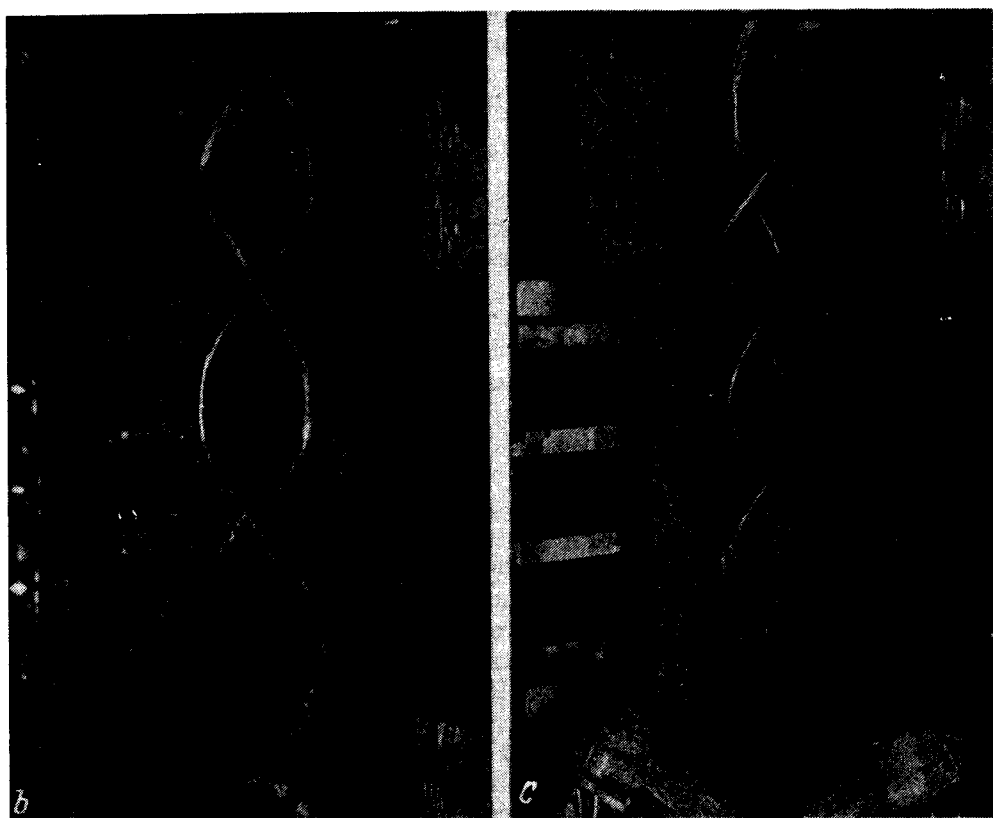


Рис.1. Двухспиральное взаимодействие вихревых нитей: *a* – схема эксперимента, *b, c* – визуализация течения



В основе механизма взаимодействия вихревых нитей лежит, очевидно, закон Био-Савара, действием которого обусловлено еще и самоиндуцированное

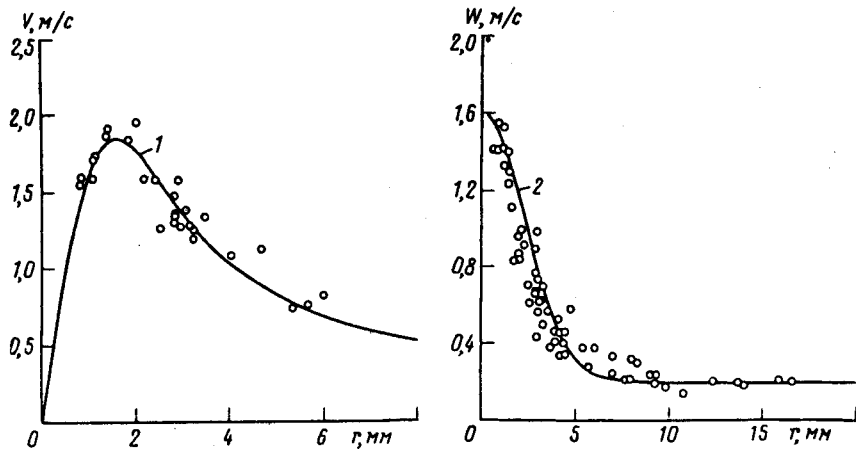


Рис.2. Профили тангенциальной V и аксиальной W компонент скорости в окрестности прямолинейной вихревой нити. 1, 2 – аппроксимационные зависимости, построенные по формулам (1), (2), соответственно



Рис.3. Визуализация течения в вертикальной плоскости через центр канала

движение нитей. Но при теоретическом анализе должны учитываться также вязкостные эффекты.

В литературе изучению движения двух вихрей (вихревых нитей) разного знака посвящено множество теоретических работ [5,6]. В то же время, взаимодействие одинаково закрученных вихревых нитей рассмотрено лишь в одной теоретической работе [10] для случая идеальной жидкости. На основе закона Био-Савара и следящего из него так называемого "локализованного индукционного уравнения" построено стационарное слабонелинейное решение в виде двойной спирали из вихревых нитей, которая движется поступательно вдоль продольной оси. Условия применимости решения: $r \ll S \ll L$, где r - характерный радиус вихря, S - расстояние между нитями, L - длина усечения, составляющая величину порядка длины волны λ . Для данного эксперимента эти условия приближенно выполняются. Поэтому наблюдаемую картину вполне можно считать соответствующей модели [10], по крайней мере, качественно. Неподвижность же двойной спирали в эксперименте можно объяснить компенсацией фазовой скорости средним движением потока и привязкой осей вихрей к скатам дна.

Несмотря на трудность наблюдения двухспиральных структур, в литературе имеются отдельные указания на подобные явления, но все они нестационарны. Так, в [11] зафиксировано спиральное скручивание двух протяженных вихрей в пограничном слое. В [12] нестационарное спиральное спаривание двух вихревых нитей наблюдалось при естественной конвекции во вращающемся объеме, причем конечной стадией было слияние двух вихрей в один более мощный. Явно двухспиральный характер носит система шпилькообразных вихрей в следе за телом в погранслое [4]. Двойная спираль образуется и при распаде вихря [13].

Таким образом, в данном эксперименте впервые обнаружена и описана двухспиральная стационарная структура из взаимодействующих вихревых нитей одного знака, изучение которой дает возможность построить адекватные теории взаимодействия трехмерных вихрей в реальных жидкостях и внести вклад в проблему изучения когерентных структур в турбулентности.

-
1. Когерентные структуры в турбулентном пограничном слое, Обзор №269. Сост.: В.А.Жаров, Е.П.Широкопояс, ЦАГИ, 1993.
 2. H.T.Kim, S.J.Kline, and W.C.Reynolds, *J.Fluid Mech.* **50**, 133 (1971).
 3. I.Tani, H.Komoda, and Y.Komatsu, *Aeronaut. Res. Inst. Rept.* 375, Univ. Tokyo, Nov. 1962.
 4. M.S.Acarlar and C.R.Smith, *J. Fluid Mech.* **175**, Pt. 1, 1 (1987); **175**, Pt.2, 43 (1987).
 5. S.Widnall, *Ann. Rev. Fluid Mech.* **7**, 141 (1975).
 6. R.J.Donnely, *Scientific America* **259**(5), 66 (1988).
 7. A.R.Gupta, D.G.Lilley, and N.Syred, *Swirl Flow*, Turnbridge: Abakus Press, 1984.
 8. С.В.Алексеевко, Аэродинамические эффекты в энергетике, Препринт №216-90, Новосибирск: Институт теплофизики, 1990.
 9. A.K.Garg and S.Leibovich, *Phys. Fluids* **22**(11), 2053 (1979).
 10. R.Takaki and A.K.M.F.Hussain, *Phys. Fluids.* **27**(4), 761 (1984).
 11. C.Chandrsuda, R.D.Mehta, A.D.Weir, and P.Bradshaw, *J. Fluid Mech.* **85**, 693 (1978).
 12. B.M.Bouhnov and G.S.Golitsyn, *J.Fluid Mech.* **167**, 503 (1986).
 13. S.Leibovich, *Ann. Rev. Fluid Mech.* **10**, 221 (1978).