

03;12

Бегущий распад вихря

© С.В. Алексеенко, С.И. Шторк

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск

Поступило в Редакцию 3 июня 1997 г.

Экспериментально обнаружен новый тип распространяющихся возмущений на вихревой нити — бегущий распад вихря. Применен метод контролируемого внешнего воздействия на вихревое течение с известными параметрами. Получены данные по абсолютной скорости распространения возмущений в зависимости от режимных условий в вихревой камере, определяющих характеристики вихря.

Распад вихря играет принципиальную роль в динамике протяженных вихрей. Протяженные вихри наблюдаются как на микромасштабах (вихревые нити в сверхтекучем гелии, вихревые структурные элементы в турбулентности), так и макромасштабах (закрученный поток в вихревой камере, смерчи и торнадо). Наиболее драматичным этапом в эволюции вихрей является их внезапное разрушение — так называемый распад вихря. К настоящему времени существует весьма обширная библиография по этой проблеме (см. обзор [1]). Первоначально распад вихря наблюдался при обтекании дельтовидного крыла под большим углом атаки. Но большинство работ связано с изучением распада в слабо расширяющейся трубе, что позволяет строго контролировать условия эксперимента. Распад вихря приводит к кардинальной перестройке структуры течения и турбулизации. В частности, возникновение и разрушение вихревых структур присутствует в различных сценариях развития турбулентности в отрывных и пристенных течениях [2]. Распад вихря и его непредсказуемость есть одна из основных причин, снижающих эффективность и поэтому сдерживающих развитие вихревых технологий [3].

Выдвинуто довольно много теоретических моделей распада вихря [1]. Однако отсутствуют адекватные теории, с достаточной точностью предсказывающие момент, положение и тип разрушения вихря. К числу перспективных подходов следует отнести волновые теории [1,4]. Предполагается, что в силу неустойчивости течения или внешнего воздействия

может формироваться столь интенсивная одиночная волна (типа солитона Кортевега–де Вриза), что возникает локально возвратное движение, приводящее к разрушению или перестройке течения. Однако такие теории весьма трудно проверить, поскольку в литературе в основном описаны эксперименты с фиксированным в пространстве положением распада.

В представленной работе впервые экспериментально обнаружен и описан бегущий распад вихря, генерируемый в контролируемых условиях. Эти результаты проливают свет на новые свойства явления распада и могут быть основой для развития волнового подхода, так как открывается возможность проследить весь процесс формирования распада в пространстве и времени. При этом самым важным моментом является тот факт, что явлением распада можно управлять путем изменения условий генерации начальных возмущений и параметров вихревой нити в вихревой камере.

Эксперименты проводились в гидравлической вихревой камере квадратного сечения 188×188 mm и высотой до 630 mm (см. [5]). При изучении вихревых нитей, как показано в опытах с цилиндрическими вставками, форма поперечного сечения не играла принципиальной роли. Подача жидкости и организации закрученного течения осуществлялись через 12 поворотных прямоугольных сопел, оси которых направлены по касательной к некоторой окружности. Изменяя конструктивный параметр крутки установки (угол поворота сопел), расход Q и диаметр выходного отверстия диафрагмы можно достаточно просто регулировать характеристики вихревого движения (циркуляцию, скорость вдоль оси вихря и диаметр вихря). Параметры вихревого ядра определялись с помощью измерения профилей скорости вблизи оси вихря по трекам частиц и измерения статического давления на торцевой стенке. Экспериментальные точки ложатся на эмпирические зависимости, которые хорошо описывают профили тангенциальной V и осевой W компонент скорости в канонических вихревых устройствах [6,7]:

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

$$W = W_1 + W_2 \exp(-Br^2),$$

где A , B , W_1 , W_2 — эмпирические коэффициенты, r — радиальное расстояние от оси вихря.

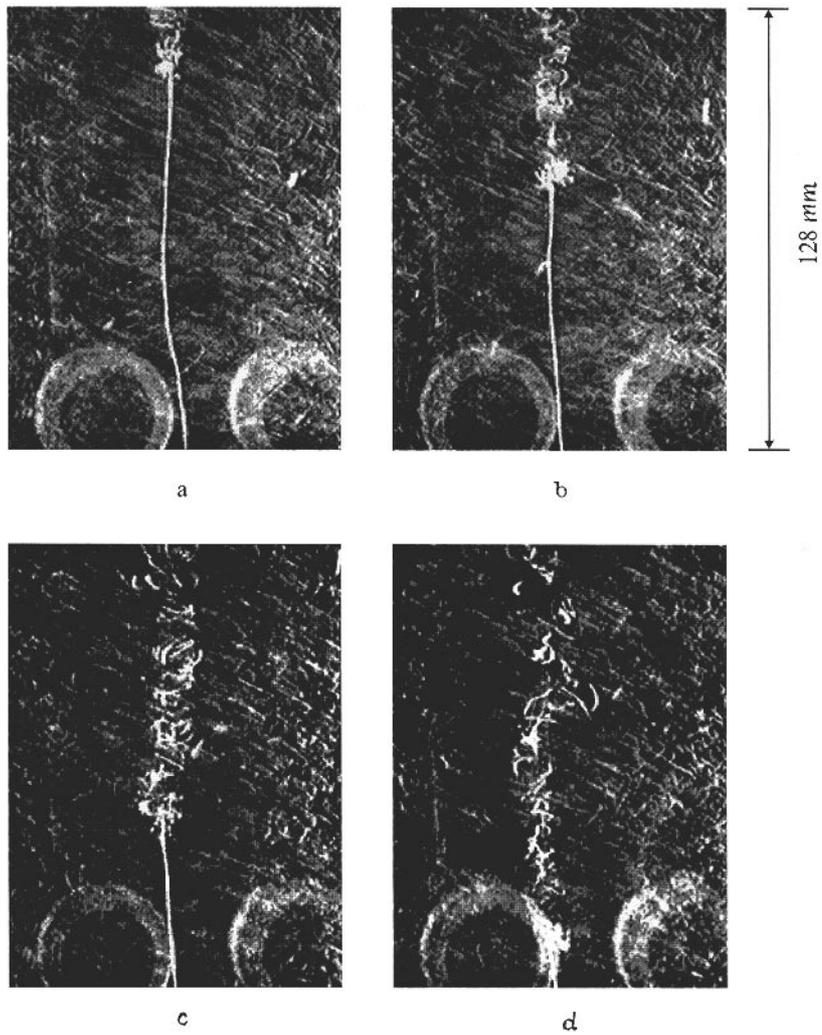


Рис. 1. Стоп-кадры вынужденного бегущего распада вихря. Интервал времени между кадрами 80 ms. Вихревой поток движется снизу вверх. Воздействие на вихревое ядро производилось на расстоянии 50 mm от верхнего края кадра. $Q = 1.31/s$, $S = 3.5$.

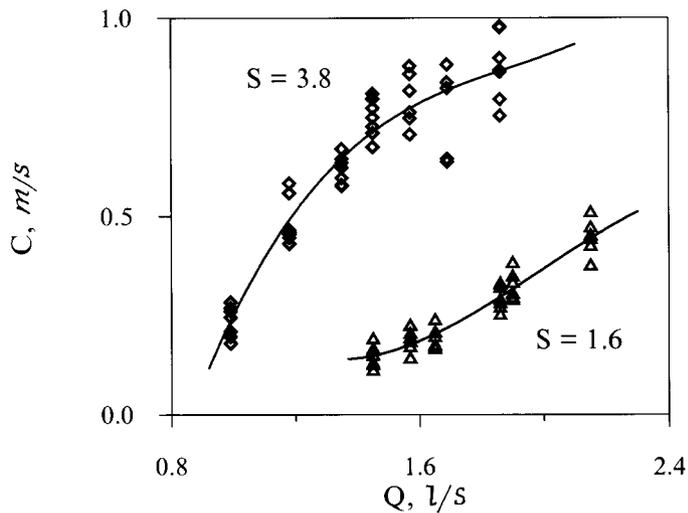


Рис. 2. Абсолютная скорость распространения бегущего распада в зависимости от режимных условий в вихревой камере.

Характерный диаметр вихрей, на которых инициировались возмущения, не превышал 4 mm, а характерная их длина была более 400 mm. Так как поперечная ширина камеры 188 mm, то отсюда следует, что вихрь в камере можно интерпретировать как изолированную вихревую нить. В тонком ядре такой нити сконцентрированы завихренность и осевое движение, т. е. осевая и тангенциальная скорости там значительно превосходят скорости в окружающей среде.

Возмущение течения создавалось на расстоянии 80 mm от выходного отверстия диафрагмы путем пересечения вихревого ядра прутком диаметром 6 mm. Этот способ позволяет воздействовать на вихревую нить, не возмущая заметно среднее течение. В результате формировалась область распада, которая двигалась вверх по потоку, образуя почти цилиндрический след, а окружающая жидкость до точки распада оставалась невозмущенной. Визуализация течения осуществлялась мелкими пузырьками воздуха. Вследствие резкого падения давления на оси концентрированного вихря пузырьки собираются на оси, образуя воздушную нить, которая эффективно визуализирует ось вихря. Ха-

рактрный диаметр области распада был порядка 10 mm. Визуальные наблюдения картины течения сопровождалась видеосъемкой (рис. 1). Видеоизображения оцифровывались и обрабатывались на персональном компьютере.

При обработке видеозаписи бегущего распада были получены экспериментальные зависимости скорости движения распада от параметра крутки S и числа Рейнольдса (или расхода Q) вихревого течения (рис. 2). Параметр крутки определен как $S = (m \cdot d)/(n \cdot f)$, где $m = 188$ mm — поперечная ширина камеры; d — диаметр условной окружности, по касательной к которой направлены оси сопел завихрителя; $n = 12$ — количество сопел; $f = 14 \times 23$ mm² — площадь одного сопла. Как видно из графика, скорость возмущений возрастает с увеличением крутки потока и расхода.

Для выявления механизмов образования наблюдаемых явлений и сопоставления с волновыми теориями распада необходимы исследования локальной структуры бегущего распада, которые представляют собой отдельную и довольно трудную гидродинамическую задачу в связи с трехмерностью и нестационарными условиями.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 96-01-01667).

Список литературы

- [1] *Esculier M.P.* // Prog. Aerospace Sci. 1988. V. 25. P. 189–229.
- [2] *Grigorév Yu.N.* // Russian J. of Eng. Thermophysics. 1994. V. 4. N 2. P. 197–237.
- [3] *Алексеенко С.В., Окулов В.Л.* // Теплофизика и аэромеханика. 1996. Т. 3. № 2. С. 101–138.
- [4] *Randall J.D., Leibovich S.* // J. of Fluid Mech. 1973. V. 53. P. 495–515.
- [5] *Alekseenko S.V., Shtork S.I.* // Russian J. of Eng. Thermophysics. 1992. V. 2. N 4. P. 231–265.
- [6] *Garg A.K., Leibovich S.* // Phys. Fluids. 1979. V. 22. N 11. P. 2053–2064.
- [7] *Алексеенко С.В., Шторк С.И.* // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 59. В. 11. С. 746–750.