

УДК 537.523

АНИЗОТРОПИЯ ПРОЦЕССА ДИФФУЗИИ В ТОРОИДАЛЬНОМ (КОЛЬЦЕВОМ) ВИХРЕ В ВОДЕ

У. Юсупалиев, П. У. Юсупалиев¹, С. А. Шутеев¹, К. З. Рухадзе²

Экспериментально исследован процесс диффузии частиц краски (туши) в тороидальном (кольцевом) вихре в однородной по плотности жидкости (воде). Обнаружен эффект анизотропии процесса диффузии частиц во вращающейся воде вихря, заключающийся в том, что величина коэффициента диффузии частиц в направлении, перпендикулярном к оси вращения ядра тора, намного меньше, чем величина соответствующего коэффициента диффузии в направлении, параллельном оси вращения.

Об особенностях процесса теплопроводности в высокотемпературном (плазменном) тороидальном вихре (ПТВ) впервые сообщается в работе [1]. В ней экспериментально показано, что аномальное долговсвечение ПТВ в воздухе при атмосферном давлении связано с уменьшением коэффициента теплопроводности плазмы/горячего газа в перпендикулярном к оси вращения направлении, а следовательно, и теплового потока из тороидального вихря в окружающую среду. Такое снижение теплового потока в перпендикулярном к оси вращения направлении является следствием анизотропии процесса теплопроводности в двух направлениях: вдоль и поперек оси вращения плазмы/газа. Из этого факта следует, что величина коэффициента теплопроводности плазмы/газа в перпендикулярном к оси вращения направлении меньше, чем величина соответствующего коэффициента вдоль оси вращения.

При импульсном дозвуковом истечении плазмы из сопла плазмотрона в воздух, помимо ПТВ, образуется плазменное облако [2]. Спектральные данные излучения таких плазменных образований показывают, что захваченное в вихревое движение вещество

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119992, Москва, nesu@phys.msu.ru

²Московский институт радиотехники, электроники и автоматики, 119456, Москва, пр. Вернадского, 78.

(ионы, атомы, молекулы) переносится вихрем на значительно большее расстояние по сравнению с плазменным облаком – плазменным образованием без вихревого движения. Так, до своего распада (за время 600 – 700 мс) ПТВ перемещается на расстояние порядка 13 – 15 м, тогда как плазменное облако до своего распада (за время 15 – 20 мс) проходит практически на порядок меньшее расстояние при тех же начальных характеристиках. В работе [3] показано, что такой экспериментальный факт можно объяснить анизотропией процесса диффузии в вихре: коэффициент диффузии плазмы/газа вдоль оси вращения D_{\parallel} намного больше соответствующего коэффициента в перпендикулярном к оси вращения направлении D_{\perp} . При этом, однако, не удалось количественно определить величины коэффициентов диффузии.

Процесс диффузии аэрозольных частиц дыма в воздушном тороидальном вихре (ТВ) исследовался в работе [4]. В отличие от ПТВ для воздушного ТВ удалось экспериментально определить коэффициенты диффузии аэрозольных частиц дыма. Так, для воздушного ТВ с начальным радиусом 43 мм и начальной скоростью 0.6 м/с отношение коэффициентов диффузии в двух направлениях D_{\perp}/D_{\parallel} составило ~ 0.014 .

Что касается исследования закономерностей процесса диффузии частиц внутри тороидального вихря в жидкостях, то они практически не изучены. Поэтому целью данного краткого сообщения является экспериментальное исследование анизотропии процесса диффузии частиц краски (туши) во вращающейся воде тороидального вихря, движущегося в неограниченной однородной среде – воде.

Экспериментальная установка. Установка состояла из генератора тороидального вихря, заполненного водой резервуара с оптически прозрачными стенками, источников подсветки и двух видеокамер (рис. 1). Резервуар был изготовлен из оргстекла толщиной 20 мм и имел размеры 40 × 40 × 50 см³. Генератор вихря состоял из блока поршня, системы запуска краски, блока толкателя поршня, рабочей камеры и сопла. Блок поршня подсоединялся с одного конца рабочей камеры, а к ее другому концу крепилось сопло. Внутренний диаметр и длина сопла составляли 35 и 65 мм соответственно. Генератор вихря крепился к верхней крышке резервуара так, чтобы их оси симметрии совпадали, рабочая камера генератора полностью погружалась в жидкость. При приведении в движение толкателя поршня он выталкивал порцию воды, из которой и формировался ТВ в воде.

Для изучения процесса диффузии частиц во вращающейся воде вихря использовалась краска (тушь, чернила). Наблюдение за динамикой такого ТВ осуществлялось с помощью стандартных видеокамер (25 кадров/с), так как скорость поступательного

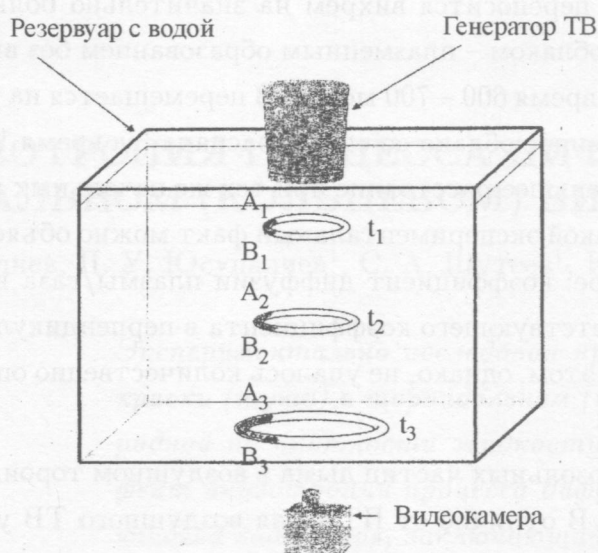


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

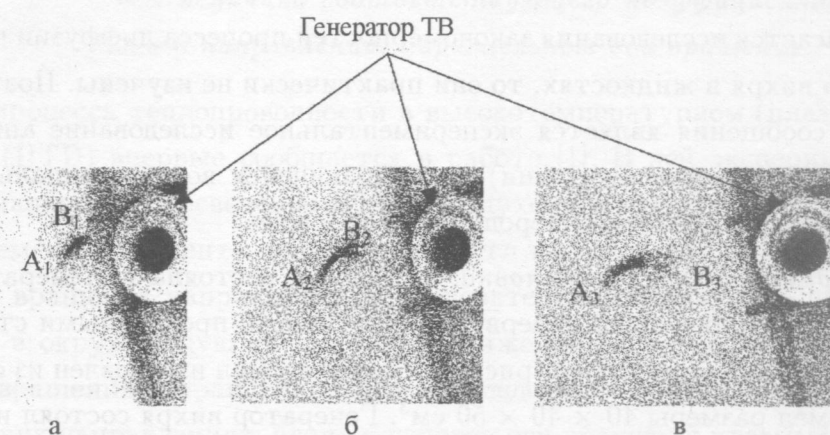


Рис. 2. Изменение во времени размеров области вихря, занятой черной краской.

движения исследуемых ТВ в воде не превышала 0.5 м/с. Две видеокамеры использовались для одновременной регистрации движущегося ТВ с краской с двух взаимно-перпендикулярных направлений: с торца и с боку вихря. Такой способ фоторегистрации позволил определить характерные геометрические размеры области, занятой диффундирующей краской во вращающейся воде вихря. Взаимное расположение генератора ТВ и видеокамер, а также пространственные положения ТВ с краской в различные моменты времени (t_1, t_2, t_3) схематически приведены на рис. 1 (ось Oz и ее начало совпадают с осью сопла генератора ТВ и центром среза сопла соответственно).

Определение коэффициентов диффузии частиц краски во вращающейся воде тороидального вихря. Для этого применялся следующий метод. На расстоянии 50 мм от среза сопла на нем было просверлено отверстие под углом 45° к его поверхности. С внешней стороны сопла в это отверстие был припаян штуцер (с внутренним диаметром 3 мм), через который с помощью шприца вводилась порция краски внутрь сопла. На внутренней поверхности сопла вдоль его образующей была сделана канавка (шириной 3 мм, глубиной 3 мм и длиной 45 мм), соединяющая указанное отверстие и срез сопла. Канавка была герметично закрыта тонкой полиэтиленовой пленкой с 8 отверстиями (диаметром 1 мм) вдоль канавки. При вводе краски канавка заполнялась, и краска, выходя через эти отверстия, образовывала тонкую полоску вблизи внутренней поверхности сопла. При импульсном выталкивании поршнем воды с краской формируется водяной ТВ с краской, попадающей в ядро тора вихря. На рис. 2 представлена последовательность кадров движения такого ТВ, полученная с помощью видеокамеры. После образования вихря краска оказывается сосредоточенной в небольшой части тора (краска на рис. 2а, на рис. 1 заполненная краской часть тора A_1B_1 в момент времени t_1 зачернена). Далее следовало бы ожидать, что вследствие процесса диффузии частицы краски будут диффундировать во всех направлениях равномерно. Однако на опыте происходит иное (рис. 2б): при дальнейшем движении ТВ в процессе диффузии частиц краски появляются два выделенных направления – параллельное и перпендикулярное к оси вращения тора. Причем, как видно из рис. 2б и рис. 2в, диффузия частиц краски в направлении, параллельном оси тора, происходит намного быстрее, чем в перпендикулярном к оси вращения направлении. На рис. 1 схематически показана последовательность процесса диффузии частиц краски (темная область ТВ) в моменты времени t_2 и t_3 , которым соответствуют кадры на рис. 2б и рис. 2в. Длина части тора, заполненной краской в процессе диффузии ТВ, при t_2 и t_3 равна A_2B_2 и A_3B_3 соответственно.

Из литературных данных известно, что высокотемпературные [1, 2, 9] и низкотемпературные [5 – 9] тороидальные вихри полностью формируются на расстоянии от сопла, равном $z_0 \approx (6 - 8) \cdot r_c$ (где r_c – радиус сопла генератора ТВ). Поэтому измерение параметров вихря проводилось при $z > z_0$. Для ТВ в воде с начальным диаметром 40 мм и начальной скоростью 0.64 м/с за промежуток времени $\Delta t \approx 0.28$ с изменение длины части тора, заполненной частицами краски в процессе диффузии, составляет $\Delta l \approx 2.1 \cdot 10^{-2}$ м. Из формулы Эйнштейна $\Delta l = \sqrt{D_{\parallel} \cdot \Delta t}$ можно определить среднее значение коэффициента диффузии частиц краски во вращающейся воде вихря в направлении, параллельном оси вращения ядра вихря: $D_{\parallel} \approx 5.6 \cdot 10^{-4}$ (м²/с). Здесь

под средним значением коэффициента диффузии D_{\parallel} понимается среднее значение по сечению тора. За тот же промежуток времени расширение диаметра тора, заполненного частицами краски в процессе его диффузии, составляет $\Delta r \approx 2.8 \cdot 10^{-2}$ м. Далее, предполагая, что формула Эйнштейна справедлива также и в поле центробежных сил вихря, определим коэффициент диффузии частиц краски во вращающейся воде вихря в перпендикулярном к оси вращения направлении. Из приведенных данных по формуле $D_{\perp} = \frac{(\Delta r)^2}{\Delta t}$ получим, что $D_{\perp} \approx 1.43 \cdot 10^{-5}$ (м²/с).

Итак, проведенный опыт показывает, что коэффициент диффузии частиц краски во вращающейся воде ТВ в жидкости (воде) в перпендикулярном к оси вращения направлении намного меньше, чем в параллельном оси вращения направлении:

$$D_{\perp} \ll D_{\parallel}.$$

Таким образом, экспериментально показано, что эффект анизотропии процесса диффузии частиц наблюдается не только в плазменном тороидальном вихре и во вращающемся воздухе вихря для аэрозольных частиц, но и для частиц краски во вращающейся воде вихря.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] У. Юсупалиев. Физика плазмы **31**(6), 543 (2005).
- [2] У. Юсупалиев. ЖТФ **74**(7), 52 (2004).
- [3] У. Юсупалиев, П. У. Юсупалиев, С. А. Шутеев. Краткие сообщения по физике N 4, 39 (2006).
- [4] А. Ф. Александров, У. Юсупалиев, П. У. Юсупалиев, С. А. Шутеев. Прикладная физика N 6, 154 (2006).
- [5] В. Ф. Тарасов. Экспериментальные исследования турбулентных вихревых колец. Диссер. на соис. уч. ст. к.ф.-м.н. (НГУ, Новосибирск, 1975).
- [6] K. Sheriff, M. Leonard. Ann. Rev. Fluid Mech. **24**, 235 (1992).
- [7] M. Gharib, E. Rambod, K. J. Sheriff. Fluid Mech. **360**, 121 (1998).
- [8] Д. Г. Ахметов. ПМТФ **42**(5), 70 (2001).
- [9] У. Юсупалиев, П. У. Юсупалиев, С. А. Шутеев. Физика плазмы **33**(3), 226 (2007).

Институт общей физики
им. А.М. Прохорова РАН

Поступила в редакцию 1 марта 2007 г.