

УДК 53.043

## Исследование анизотропии процесса диффузии в тороидальных вихрях

*А. Ф. Александров, У. Юсупалиев, П. У. Юсупалиев, С. А. Шутеев*

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет,  
Россия

*Экспериментально обнаружен эффект анизотропии процесса диффузии вещества в высокотемпературном (плазменном) и низкотемпературном тороидальных вихрях: величина коэффициента диффузии в перпендикулярном направлении к оси вращения ядра тора значительно меньше, чем величина соответствующего коэффициента диффузии в направлении, параллельном оси вращения.*

В работе [1] экспериментально показано, что аномальное долговечение плазменного тороидального вихря (ПТВ) в воздухе, неограниченном пространстве при атмосферном давлении, связано с уменьшением коэффициента теплопроводности плазмы (либо горячего газа) в перпендикулярном к оси вращения направлении, а следовательно, и теплового потока из ПТВ в окружающую среду, а также с подавлением флуктуации скорости частиц (особенно низкочастотных составляющих) в перпендикулярном к оси вращения направлении.

Снижение теплового потока к стенке трубы от протекающего нагретого газа при организации его вращения в трубе наблюдалось в работах [2, 3]. Такое снижение теплового потока в перпендикулярном к оси вращения направлении является следствием анизотропии коэффициента теплопроводности в двух направлениях: вдоль и поперек оси вращения газа. Из этого факта следует, что величина коэффициента теплопроводности газа в перпендикулярном к оси вращения направлении меньше, чем величина соответствующего коэффициента вдоль оси вращения. Анизотропией коэффициентов теплопроводности объясняется также стабилизация длинной электрической дуги с помощью принудительного вращения подаваемого газа в разрядную камеру [4]. Здесь под длинной дугой понимается электрическая дуга, у которой длина намного больше ее радиуса. Как известно, такая дуга без принудительного вращения газа горит нестабильно [4].

Заметим, что уменьшение величины транспортных коэффициентов плазмы имеет место в замагниченной плазме в перпендикулярном направлении к силовым линиям магнитного поля [5]. Из анализа опытных данных по исследованию цилиндрических и тороидальных вихрей в работе [1] сделано заключение о том, что возникновение анизотропии коэффициентов теплопроводности плазмы/газа в параллельном направлении к оси вращения и в перпендикулярном направлении к оси ее/его вращения является общей закономерностью вне зависимости от способа организации вращательного движения.

Известно [6], что коэффициенты диффузии и теплопроводности газов, слабоионизованной плазмы при отсутствии внешних силовых полей связаны между собой. Поэтому можно предположить, что в тороидальных вихрях (ТВ) при наличии поля центробежных сил также должна наблюдаться анизотропия коэффициента диффузии. Однако до сих пор этот эффект как в высокотемпературном ТВ [1, 7—10], так и низкотемпературном ТВ [11—20] практически не изучен. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию анизотропии процесса диффузии в таких ТВ в неограниченном пространстве воздуха при атмосферном давлении.

### Экспериментальная установка

Для создания низкотемпературного тороидального

вихря (НТВ) в неограниченном пространстве воздуха при атмосферном давлении использовался генератор тороидального вихря, состоящий из блока поршня, системы запуска рабочего газа, блока толкателя поршня, рабочей камеры и сопла. Блок поршня крепился к одному концу рабочей камеры — металлической трубе толщиной 5 мм, а к ее другому концу — сопло. Длина и диаметр трубы составляли 1000 и 70 мм, соответственно. При приведении в движение толкателя поршня он выталкивал порцию газа, из которой и формировался НТВ в воздухе.

Для визуализации НТВ использовался белый дым (аэрозольные частицы). Визуализация динамики ТВ осуществлялась с помощью стандартной видеокамеры (25 кадров/с), так как скорость поступательного движения исследуемых НТВ не превышала 4 м/с. Указанную скорость движения такого вихря определяли акустическими датчиками, сигналы с которых подавались на входы осциллографа TDS-2012. Взаимное расположение акустических датчиков ( $D$ ), генератора НТВ и видеокамеры, а также пространственные положения НТВ с дымом 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). Измерение характерных геометрических размеров НТВ во времени проводилось с помощью фоторегистрации.

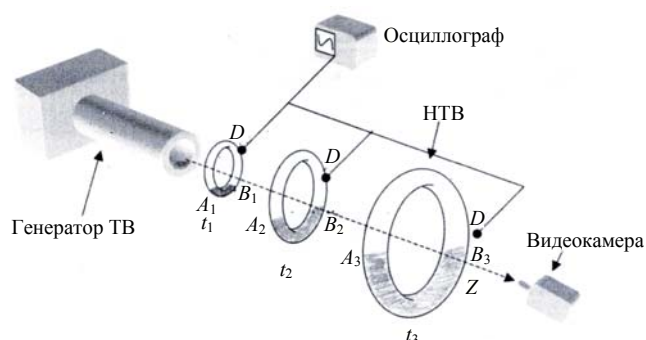


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Для создания ПТВ в неограниченном воздухе при атмосферном давлении использовался импульсный плазмотрон, устройство которого подробно описано в работе [1]. Объем разрядной камеры плазмотрона был равен  $24 \text{ см}^3$ , а диаметр его сопла составлял 20 мм. Плазмотрон был подключен к разрядному контуру с емкостным накопителем электрической энергии с рабочим напряжением 5—25 кВ и емкостью 30 мкФ.

Анализ показывает, что прямое измерение коэффициентов диффузии в ПТВ представляет собой сложную задачу. Об анизотропии процесса диффузии в нем, однако, можно судить по изменению во времени химического состава плазмы. Для исследования химического состава плазмы, переносимой ТВ в воздухе, применяли метод регистрации спектра излучения плазмы в начальной стадии движения ПТВ и спектра поглощения — в поздней стадии [1]. Этот метод регистрации спектров излучения и поглощения плазмы ТВ подробно изложен в работе [1], согласно которой максимальное значение температуры ПТВ составляет 7000—8000 К, а

среднее давление в нем не превышает атмосферного. При таких условиях для определения химического состава плазмы движущегося ПТВ можно использовать инертные газы, предпочтительно ксенон или криптон. Дело в том, что, по данным исследований импульсных источников света [21], при таких температурах и давлениях плазмы в спектральном диапазоне 800—1100 нм ксенон (криптон) имеет ряд сильно излучающих спектральных линий, соответствующих переходам 6P—6S (5P—5S) возбужденного атома. Эти переходы для холодного ксенона (криптона) проявляются в виде спектральных линий поглощения, и поэтому рабочим газом плазмотрона был выбран ксенон (криптон).

#### Изменение химического состава ПТВ во времени

Исследование спектров излучения и поглощения веществ ПТВ показало следующее. На стадии формирования такого вихря ( $t \leq \Delta t_u$ , где  $t$  — текущее время,  $\Delta t_u$  — длительность истечения плазменной струи) его спектр излучения является смешанным: на континуум наложены спектральные линии ионов и атомов, входящих в состав рабочего газа (Xe, Kr), электродов (Cu, Al, Fe) и диэлектрической стенки разрядной камеры плазмотрона (C, N, H). При  $t > \Delta t_u$  по мере остывания плазмы в вихре интенсивность континуума и спектральных линий излучения ионов сильно уменьшается, интенсивные дуговые линии Xe и Kr в диапазоне 800—900 нм продолжают светиться, а также появляются излучательные полосы двухатомных молекул CN,  $C_2$ , FeO, OH, AlO, CuO. При временах  $t \gg \Delta t_u$  (когда вихрь светится слабо) в спектре поглощения ПТВ появляются характерные сильные линии поглощения атомов Xe и Kr в диапазоне 800—900 нм и слабые полосы поглощения трехатомных молекул  $CO_2$  и  $H_2O$ .

На основе приведенных спектральных данных можно сделать следующий вывод. Изначально захваченные в вихревое движение ионы и атомы при дальнейшем движении вихря из него не теряются: ионы, рекомбинируя с электронами, превращаются в атомы; эти же атомы, взаимодействуя между собой, в результате химической реакции образуют сначала двухатомные, а затем — трехатомные молекулы; атомы рабочего газа из разрядной камеры сначала наблюдаются в излучении, а когда их свечение ослабевает настолько, что регистрация невозможна, тогда наличие этих атомов в вихре подтверждается их спектром поглощения. Появление атомов кислорода в вихре прежде всего свидетельствует о захвате воздуха в вихревое движение на стадии его формирования, поскольку кислород в исходном химическом составе рабочего газа, электродов и диэлектрической стенки разрядной камеры плазмотрона отсутствует (захват окружающего воздуха в ТВ при его формировании экспериментально показан в работе [22]). Кроме того, при наличии атома кислорода, как показывает анализ, в остывающей плазме вихря в основном происходят экзотермические химические реакции, т. е. в ПТВ выделяется дополнительная тепловая энергия. В этом смысле ПТВ является открытой динамической системой: окислитель попадает в него из ок-

ружающей среды при его формировании.

Известно [23], что при импульсном дозвуковом истечении плазмы из сопла плазматрона в воздух помимо ПТВ образуется плазменное облако. Спектральные данные излучения таких плазменных образований показывают, что захваченное в вихревое движение вещество (ионы, атомы, молекулы) переносится вихрем на значительно большее расстояние по сравнению с плазменным облаком — плазменным образованием без вихревого движения. Так, за время 0,6—0,7 с ПТВ перемещается на расстояние порядка 13—15 м, тогда как плазменное облако до своего распада (за время 15—20 мс) проходит на порядок меньшее расстояние при тех же начальных характеристиках плазматрона. Такой экспериментальный факт можно объяснить анизотропией процесса диффузии в вихре: коэффициент диффузии вдоль оси вращения  $D_{\parallel}$  намного больше соответствующего коэффициента в перпендикулярном к оси вращения направлении  $D_{\perp}$ . При этом, однако, количественно определить величины этих коэффициентов диффузии не удается.

#### Коэффициенты диффузии в газовом ТВ

Для измерения коэффициента диффузии в низкотемпературном ТВ применяли следующий метод. Перед выталкиванием порции воздуха из сопла генератора вихря в нижней части внутренней поверхности сопла была нанесена узкая полоса жидкого хлористого титана, параллельная оси сопла. Образовавшийся белый дым имеет форму, подобную форме исходного хлористого титана. При импульсном выталкивании воздуха поршнем формируется воздушный ТВ с дымом, попадающим в ядро тора вихря. На рис. 2 представлена последовательность кадров движения такого НТВ с дымом, полученная с помощью видеокамеры. После образования вихря дым оказывается сосредоточенным в небольшой нижней части тора (белый дым на рис. 2, *a* и на рис. 1 длина заполненной дымом части тора  $A_1B_1$  в момент времени  $t_1$  зачернена). Это значит, что концентрация аэрозольных частиц дыма в области тора с размерами  $A_1B_1$  вдоль оси вращения его ядра высока, а следовательно, вследствие процесса диффузии частицы дыма должны были бы диффундировать во всех направлениях изотропно. Однако на опыте такого не происходит (см. рис. 2, *b*): со временем при дальнейшем движении НТВ в процессе диффузии частиц дыма в вихре появляются два выделенных направления, а именно — параллельное и перпендикулярное оси вращения тора. Как видно из рис. 2, *b* и *в*, со временем диффузия аэрозольных частиц дыма в параллельном направлении к оси вращения происходит намного быстрее, чем в перпендикулярном (радиальном) направлении к этой оси. На рис. 1 схематически показана последовательность процесса диффузии аэрозольных частиц дыма (темная область ТВ) в моменты времени  $t_2$  и  $t_3$ , которым соответствуют кадры на рис. 2, *b* и *в*. Длина тора, заполненного дымом в процессе диффузии ТВ, при  $t_2$  и  $t_3$  равна  $A_2B_2$  и  $A_3B_3$ , соответственно.

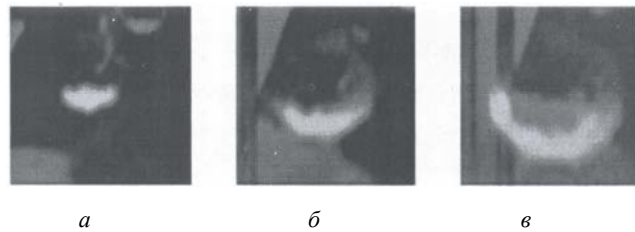


Рис. 2. Последовательность кадров процесса диффузии аэрозольных частиц (белого дыма) в низкотемпературном газовом тороидальном вихре

Известно, что высоко- [1, 9, 10] и низкотемпературные [11—13, 17, 19, 20] тороидальные вихри полностью формируются (когда в его ядре образуется твердотельное ядро вращения) на расстоянии от сопла, равном  $z_0 \approx (6-8)r_c$  (где  $r_c$  — радиус сопла генератора ТВ). Поэтому измерение параметров вихря проводилось при  $z_0 > z$ . Так, при числе Рейнольдса  $Re_0 \approx 2 \cdot 10^4$  за промежутки времени  $\Delta t \approx 4,2$  с изменение длины тора, заполненного дымом в процессе диффузии в одну сторону, составляет  $\Delta l \approx 12,0 \cdot 10^{-2}$  м. В работе [24] показано, что формула Эйнштейна для диффузии в газах справедлива и для процесса диффузии аэрозольных частиц в газе и слабоионизованной плазме. Поэтому из приведенных данных по формуле Эйнштейна  $\Delta l = \sqrt{D_{\parallel} \cdot \Delta t}$  можно определить среднее значение коэффициента диффузии аэрозольных частиц дыма во вращающемся воздухе вихря в направлении, параллельном оси вращения ядра вихря

$$D_{\parallel} \approx 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ (м}^2\text{/с)}.$$

Здесь под средним значением коэффициента диффузии  $D_{\parallel}$  понимается среднее значение по сечению тора.

За тот же промежуток времени расширение радиуса тора, заполненного дымом в процессе его диффузии, составляет  $\Delta r \approx 1,4 \cdot 10^{-2}$  м. Далее, предполагая, что формула Эйнштейна справедлива также в поле центробежных сил вихря, определим коэффициент диффузии аэрозольных частиц дыма в перпендикулярном к оси вращения направлении. Из приведенных данных по формуле  $D_{\perp} = \frac{(\Delta r)^2}{\Delta t}$  получим, что

$$D_{\perp} \approx 4,7 \cdot 10^{-5} \text{ (м}^2\text{/с)}.$$

Таким образом, при начальной скорости ТВ 0,6 м/с отношение  $D_{\perp}/D_{\parallel}$  составляет  $\sim 0,014$ , т. е. коэффициент диффузии аэрозольных частиц дыма во вращающемся воздухе вихря в перпендикулярном к оси вращения направлении значительно меньше, чем в параллельном той же оси направлении:

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

Понятно, что такое снижение коэффициента диффузии вещества в перпендикулярном направлении к оси вращения связано с вихревым движением.

#### Заключение

Экспериментально показано, что эффект анизотропии коэффициентов диффузии в ТВ наблюдается как для плазмы, газа, так и для аэрозольных частиц в воздухе, находящихся внутри вихря. Более того, при заданном числе Рейнольдса для низкотемпературного ТВ удалось определить величину коэффициентов диффузии  $D_{\parallel}$  и  $D_{\perp}$  аэрозольных частиц дыма во вращающемся воздухе ТВ.

**Л и т е р а т у р а**

1. Юсупалиев У.// Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 6. С. 543.
2. Ibetson A., Tritton D. J.// J. Fluid Mech. 1975. V. 68. № 4. P. 639.
3. Сухович Е. П. Конвективный теплообмен ограниченного струйного течения в поле центробежных сил. — В кн.: Тепломассообмен — 5. Т. 1. Ч. 2. — Минск: Наука и техника, 1976.
4. Жуков М. Ф.// Изв. СО АН СССР. Сер. Технические науки. 1975. Вып. 2. № 8. С. 3.
5. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т. 1. — М.: Наука, 2000.
6. Елецкий А. В., Палкина Л. А., Смирнов Б. М. Явление переноса в слабоионизованной плазме. — М.: Атомиздат, 1975.
7. Андрианов А. М., Синицин В. И.// ЖТФ. 1977. Т. 47. № 11. С. 2318.
8. Aleksandrov A. F., Timofeev I. B., Chernikov B. A., Yusupaliev U.// Proc. XVII Intern. Conf. Phen. Ion. Gas, Suansu (UK). 1987. Part 2. P. 426.
9. Юсупалиев У. Дис. на соиск. ... канд. физ.-мат. наук. — М.:

МГУ, 1988.

10. Александров А. Ф., Тимофеев И. Б., Черников В. А., Юсупалиев У.// ТВТ. 1988. Т. 26. № 4. С. 639.
11. Луговцов Б. А. Турбулентные вихревые кольца. Автореф. дис. на соиск. уч. ст. д-ра физ.-мат. наук. — Новосибирск, 1973.
12. Тарасов В. Ф. Экспериментальные исследования турбулентных вихревых колец. Автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. физ.-мат. наук. — Новосибирск, 1975.
13. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. — М.: Наука, 1973.
14. Sullivan J. P., Windall S. E., Ezekiel S.// AIAA J. 1973. V. 11. P. 1384.
15. Maxworthy T.// J. Fluid Mech. 1977. V. 81. Part 3. P. 465.
16. Glezer A.// Phys. Fluid. 1988. V. 31. P. 3532.
17. Shariff, K., Leonard M.// Ann. Rev. Fluid Mech. 1992. V. 24. P. 235.
18. Gharib M., Rambod E., Shariff K.// J. Fluid Mech. 1998. V. 360. P. 121.
19. Ахметов Д. Г.// ПМТФ. 2001. Т. 42. № 5. С. 70.
20. Ахметов Д. Г. Экспериментальные исследования формирования и структуры вихревых колец. Автореф. дис. на соиск. ... канд. физ.-мат. наук. — Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР. 2002.
21. Импульсные источники света/ Под общей ред. И. С. Мар-шака. — М.: Энергия, 1978.
22. Юсупалиев У., Юсупалиев П. У., Шутеев С. А.// Краткие сообщения по физике. 2006. № 4. С. 39.
23. Юсупалиев У.// ЖТФ. 2004. Т. 74. № 7. С. 52.
24. Смирнов Б. М. Аэрозоли в газе и плазме. — М.: ИВТАН, 1990.

Статья поступила в редакцию 18 июля 2006 г.

## Investigation of the anisotropy of the diffusion process in air toroidal vortexes

*A. F. Alexandrov, U. Yusupaliev, P. U. Yusupaliev, S. A. Shuteyev*  
Physical Faculty of the Moscow State University, Russia

*Anisotropy effect of the diffusion matter process in high temperature (plasma) and low temperature toroidal vortexes is determined experimentally. This effect is that diffusivity in the perpendicular direction to rotation axis of the tore core is considerably smaller then diffusivity in the parallel direction to rotation axis of the tore core.*