

УДК 537.523

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ ТОРОИДАЛЬНЫХ ВИХРЕЙ В ВОЗДУХЕ

У. Юсупалиев, П. У. Юсупалиев, С. А. Шутеев

Экспериментально исследован механизм образования высокотемпературных (плазменных) и низкотемпературных тороидальных (кольцевых) вихрей при импульсном дозвуковом истечении плазмы (газа) в воздух. Импульсно истекающая струя индуцирует вокруг себя течение окружающей среды. В результате взаимодействия импульсной струи с этим индуцированным течением образуется тороидальный вихрь.

Анализ работ по исследованию плазменных тороидальных вихрей (ПТВ) [1 – 4] и газовых кольцевых вихрей в воздухе и воде [5 – 11] показывает, что они образуются при импульсном дозвуковом истечении потока плазмы, газа или жидкости в неограниченную однородную среду (плазмы в воздух, газа в воздух, жидкости в жидкость), и следовательно, процессы их формирования имеют общие черты. Несмотря на давнюю историю исследования тороидальных (кольцевых) вихрей (ТВ) [12, 13], механизм их образования изучен недостаточно подробно. Так, в работах [5, 6, 8, 10] исходным механизмом образования кольцевого вихря считается процесс сворачивания пограничного слоя на кромке сопла при выталкивании порции газа (жидкости) из генератора ТВ в окружающую среду. Однако не ясно, вследствие каких процессов происходит это сворачивание. Пограничный слой образуется всегда вокруг любой струи (как стационарной, так и импульсной), но на опыте не всегда наблюдается образование кольцевого вихря из этого слоя струи. Также, несмотря на наличие пограничного слоя около внутренней поверхности сопла, не наблюдается образование ТВ при импульсном истечении плазмы и газа в сильно разреженную газовую среду либо вакуум [3]. Результаты этой экспериментальной работы свидетельствуют о том, что окружающая среда играет важную роль в процессе образования ТВ. На это обстоятельство впервые обратил внимание

автор работы [9]. Из экспериментальных данных сделан вывод о том, что механизмом образования ТВ является торможение истекающей струи окружающей средой. Опыт показывает [3], что эффективное торможение головной части импульсной (как плазменной, так и газовой) струи происходит и в режиме сверхзвукового истечения. При этом, однако, не наблюдается образование ТВ. Таким образом, торможение головной части импульсной струи окружающей средой также не является основным механизмом образования ТВ.

Итак, механизм образования ТВ остается не до конца изученным. По этой причине до сих пор не удается получить формулы для оценки начальных параметров ТВ в зависимости от параметров генератора ТВ и окружающей среды. (Здесь под начальными параметрами ТВ подразумеваются его параметры к моменту завершения его образования). Практика, однако, требует целенаправленного регулирования этих начальных параметров ТВ. Такая регулировка невозможна без знания закономерностей механизма его образования. Следовательно, изучение механизма образования ТВ является актуальным, и оно является целью данной работы.

1. *Экспериментальная установка.* Для исследования динамики формирования ТВ были использованы импульсный плазматрон и генератор газовых ТВ.

Для создания ПТВ в воздухе при атмосферном давлении использовался специальный генератор импульсной плазменной струи – плазматрон, конструкция которого подробно изложена в [3, 4]. Плазматрон был подключен к разрядному контуру с емкостью накопителя электрической энергии 30 мкФ и рабочим напряжением $V = 5 - 25 \text{ кВ}$. Разрядная камера плазматрона после откачки до давления $0.5 \cdot 10^2 \text{ Па}$ наполнялась рабочим газом (Xe, Kr, N_2) до давления $p_0 = (0.6 - 1.0) \cdot 10^5 \text{ Па}$. Динамика образования ПТВ изучалась сверхскоростными фоторегистраторами СФР-2М. Для изучения распределения скорости плазменной струи в поперечном направлении на срезе сопла плазматрона использовались два фоторегистратора СФР-2М, работающих одновременно в режиме щелевой развертки. При этом на их щели оптической системой фоторегистраторов проектировались две узкие области струи на срезе сопла шириной $3 - 5 \text{ мм}$, параллельные ее оси и расположенные на различных расстояниях от нее.

Генератор газовых ТВ представлял собой металлическую трубу (диаметр $4r_n$) с поршнем, к открытому концу которой прикреплялось сопло, состоящее из конфузора и трубы диаметром $2r_n$ и длиной r_n (где $r_n = 35 \text{ мм}$). В эксперименте длина рабочего хода поршня регулировалась. ТВ создавался выталкиванием порции воздуха из трубы с помощью поршня, который приводился в движение специальным устройством.

Изучение истекающей импульсной струи воздуха при формировании ТВ проводилось визуализацией потока с помощью табачного дыма, для чего объем генератора наполнялся (помимо воздуха) табачным дымом. Для наблюдения за динамикой формирования воздушного ТВ применялась фоторегистрация с помощью СФР, оптическая ось которого была перпендикулярна к оси сопла. Воздушная импульсная струя и формирующийся ТВ освещались импульсной лампой. Работа генератора газового ТВ, скоростного фоторегистратора и импульсной лампы была синхронизирована.

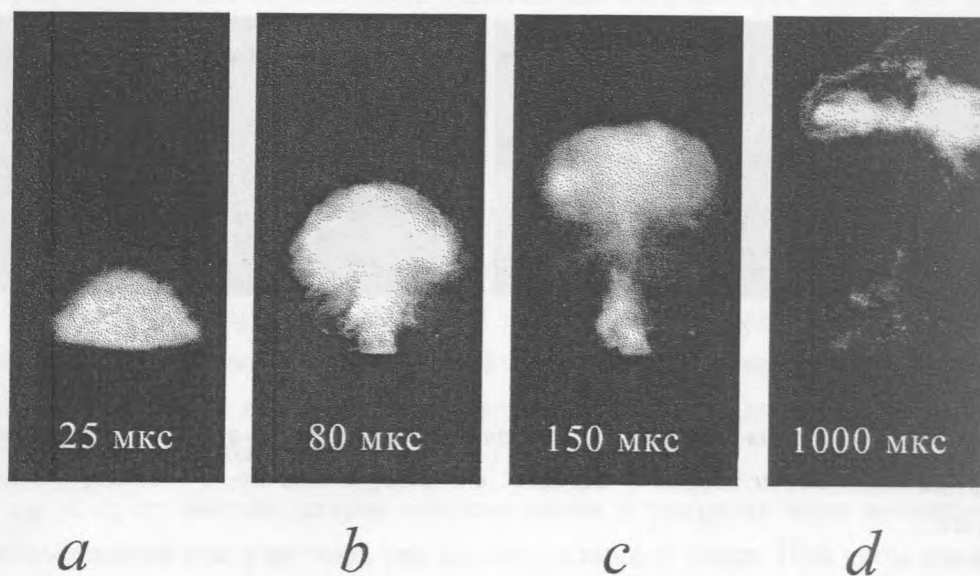


Рис. 1. Процесс образования плазменного тороидального вихря в воздухе при $V = 20 \text{ кВ}$ и $p_0 = 1.0 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Моменты регистрации кадров фоторегистрации отсчитываются от начала истечения плазмы. Время экспозиции кадров $\sim 2 \text{ мкс}$.

2. Экспериментальные результаты. Последовательности кадров фоторегистрации процесса формирования высокотемпературного (плазменного) и низкотемпературного воздушного тороидальных (кольцевых) вихрей в воздухе при атмосферном давлении представлены на рис. 1 и рис. 2 соответственно. Максимальная величина скорости истечения плазменной струи u_j для данных на рис. 1 составляет 680 м/с , а соответствующая величина u_j для воздушной импульсной струи (рис. 2) – 11 м/с . Максимальное значение числа Рейнольдса для плазменной и воздушной струй соответственно равны $\sim 5 \cdot 10^6$ и $\sim 2 \cdot 10^4$. Как видно из этих рисунков, несмотря на разницу на два порядка скорости истечения плазменной и воздушной струй, процессы формирования как плазменного, так и воздушного ТВ имеют сходные черты. Так, в начале импульсного

истечения его головная часть имеет форму, близкую к полусфере (рис. 1а; рис. 2а); затем начинает формироваться грибовидная конфигурация импульсной струи (рис. 1, b,c; рис. 2, b-f); после окончания истечения струи через некоторое время практически остается только движущаяся “шляпка” гриба (рис. 1d), которая и представляет собой тороидальный вихрь.

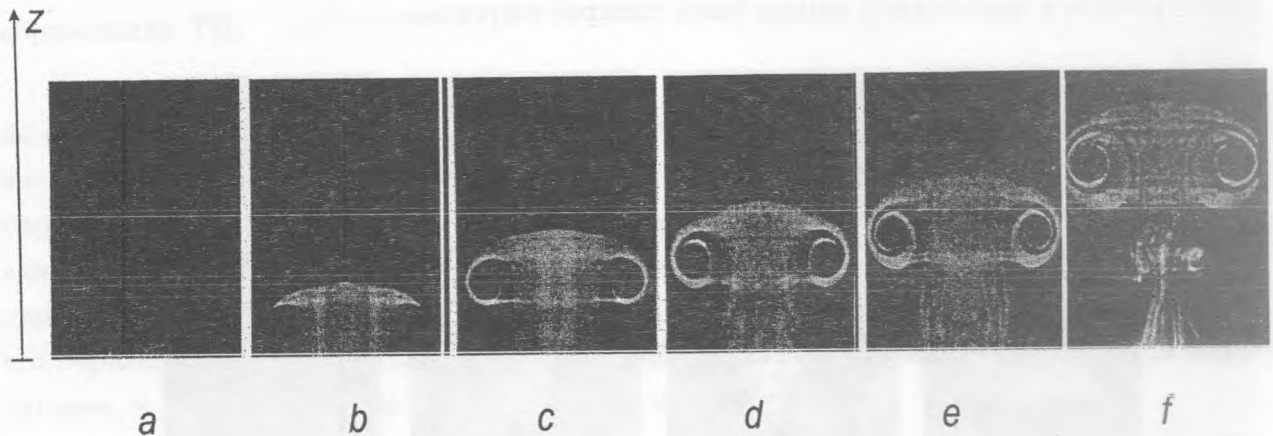


Рис. 2. Процесс образования воздушного тороидального вихря в воздухе при атмосферном давлении. Время экспозиции кадров ~ 0.1 мкс. а – 2 мс, b – 10 мс, c – 18 мс, d – 21 мс, e – 25 мс, f – 36 мс.

Для импульсной воздушной струи с дымом (при малых скоростях ее истечения, рис. 2c-f) четко видна внутренняя структура “шляпки” гриба, чего нельзя сказать о “шляпке” гриба импульсной плазменной струи. Но для последней хорошо прослеживается течение окружающей ее среды (рис. 1b, c), вызываемое самой же импульсной струей.

Из рис. 2b-f видно, что внутренняя структура “шляпки” грибовидной конфигурации импульсной струи представляет собой тороидальную спираль в формирующемся вихре.

Стадии формирования тороидальных вихрей. Анализ опытных данных показывает, что процесс формирования высокотемпературных и низкотемпературных ТВ имеет характерные три стадии: начальная стадия (рис. 1а; рис. 2а); стадия образования тороидальной спирали в формирующемся вихре (грибовидной конфигурации струи, рис. 1b, c и рис. 2b-f); стадия установления определенного распределения завихренности в “шляпке” гриба после прекращения истечения плазмы (газа).

Рассмотрим каждую из этих стадий в отдельности. Для этого, прежде всего, выберем цилиндрическую систему координат (r, φ, z) , ось Oz и начало координат которой совпадают с осью струи и с центром струи на срезе сопла.

Начальная стадия. Под начальной стадией истечения понимается промежуток времени Δt_1 от начала процесса истечения до момента времени, когда начинает нарушаться сферичность истекающего потока. При $t > \Delta t_1$ сферическая форма истекающего потока нарушается и возникает выделенное направление вдоль оси потока. При импульсном дозвуковом истечении плазмы (газа) в воздух образуется контактная поверхность, разделяющая газ внешней среды и истекающий (плазменный/газовый) поток. При этом если скорость контактной поверхности u_K превышает скорость звука в воздухе c ($u_K \geq c$), то по мере движения этой поверхности перед ней формируется ударно-сжатый слой газа окружающей среды, передний фронт которого ограничен ударной волной, а за ним – сжатый слой плазмы (газа) и истекающий плазменный (газовый) поток [3]. Ударно-сжатый слой газа внешней среды тормозит истекающий относительно высокоскоростной поток. В этой стадии истечения торможение истекающего потока происходит в основном за счет вовлечения в движение вытесненного газа окружающей среды плазменным (газовым) потоком.

Если $u_K < c$, то вместо ударно-сжатых слоев и ударных волн возникают сжатые слои и волны сжатия как в потоке, так и в окружающей среде. При этом также происходит торможение истекающего потока, экспериментальное доказательство чему представлено на рис. 3. На этом рисунке показана щелевая СФР-грамма импульсного дозвукового истечения плотной плазмы из разрядной камеры плазмотрона для случая $u_K < c$. Зависимость величины u_K от времени исследована в работе [14].

В случае малых значений скорости истечения импульсной струи ($u_K \ll c$) полусферическая форма головной части струи выражена слабо (рис. 2а). Затем начинает формироваться грибообразная конфигурация импульсной струи (рис. 2б–ф). Опыт показывает, что и в этом случае также происходит торможение истекающей струи. Для случая, показанного на рис. 2, величина скорости u_K составляет $\sim 0.45 - 0.50) \cdot u_j$.

Стадия образования тороидальной спирали в тороидальном вихре (грибообразной конфигурации импульсной струи, рис. 1в, рис. 2с–ф). Из рис. 1 и рис. 2 следует, что образование тороидальной спирали в формирующемся ТВ (грибообразной конфигурации импульсной струи) происходит в несколько этапов. Рассмотрим каждый этап в отдельности. Для дальнейшего понимания процесса формирования ТВ на основе опытных данных по формированию ПТВ (рис. 1) и воздушного ТВ с дымом (рис. 2) была

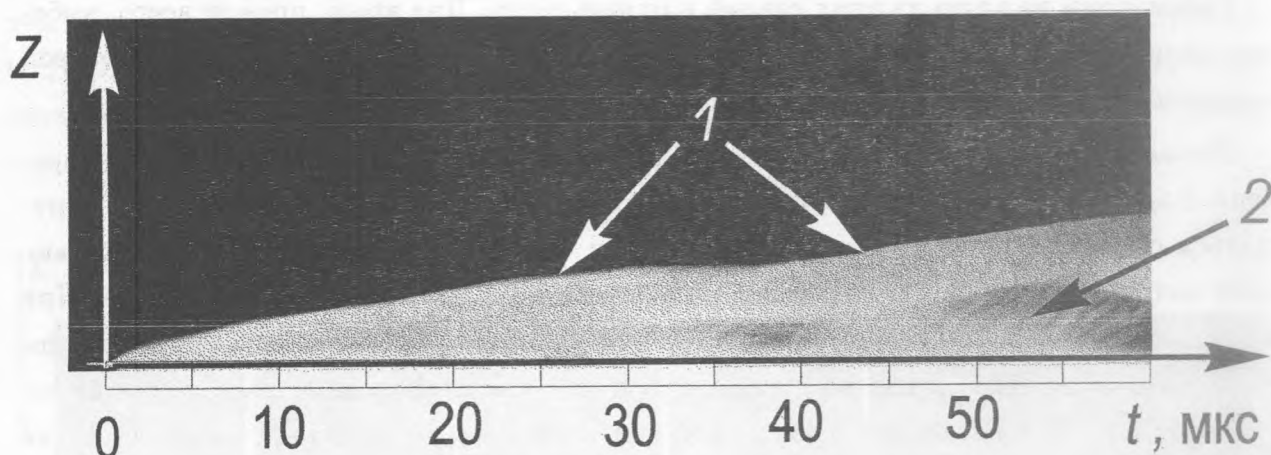


Рис. 3. Характерная развертка во времени импульсного истечения излучающей плазмы в воздухе при $V = 15$ кВ и $p_0 = 1.0 \cdot 10^5$ Па. 1 – контактная поверхность, 2 – возмущение в плазменном потоке (наклонный “треск”).

построена качественная картина такого процесса, представленная на рис. 4 при двух значениях угла конусности внешней поверхности сопла генератора ТВ β .

Этап 1. Импульсная дозвуковая осесимметричная струя, истекающая в окружающую среду (плазмы в воздух, воздуха в воздух), создает перед собой динамическое препятствие из окружающего воздуха. Движение потока в головной части импульсной струи зависит от того, как распределено в ней полное давление. Давление в головной части импульсной струи определяется в основном динамическим напором тормозящегося потока. Поэтому на опыте проводилось изучение радиального распределения скорости истечения плазменного газового потока в поперечном направлении струи на срезе сопла. Измерения показали, что величина скорости истечения потока струи уменьшается по мере приближения к ее краю, т.е. поперечное распределение скорости истекающего потока плазмы является неоднородным: $u_j = f(r)$. Следовательно, при торможении импульсной струи окружающей средой (воздухом) в ее головной (лобовой) части полное давление $p(r) = p_\alpha + \frac{\rho_j}{2}[u_j(r) - u_K]^2$ также распределено неравномерно (где ρ_j – плотность струи, p_α – давление окружающей среды). Между центральной и периферийными частями головной части струи возникает разность давлений. Под действием этой разности давления и силы вязкости плазма/газ из головной части струи дополнительно приобретает ускорение в радиальном направлении $dV_r/dt = -\nabla p(r)/\rho_j - \nu \Delta V_r$, ($\nabla p(r)$ – градиент давления в радиальном направлении, ΔV_r – лапласиан радиальной скорости, ν – кинематическая вязкость окружающего воздуха). В результате с течением времени

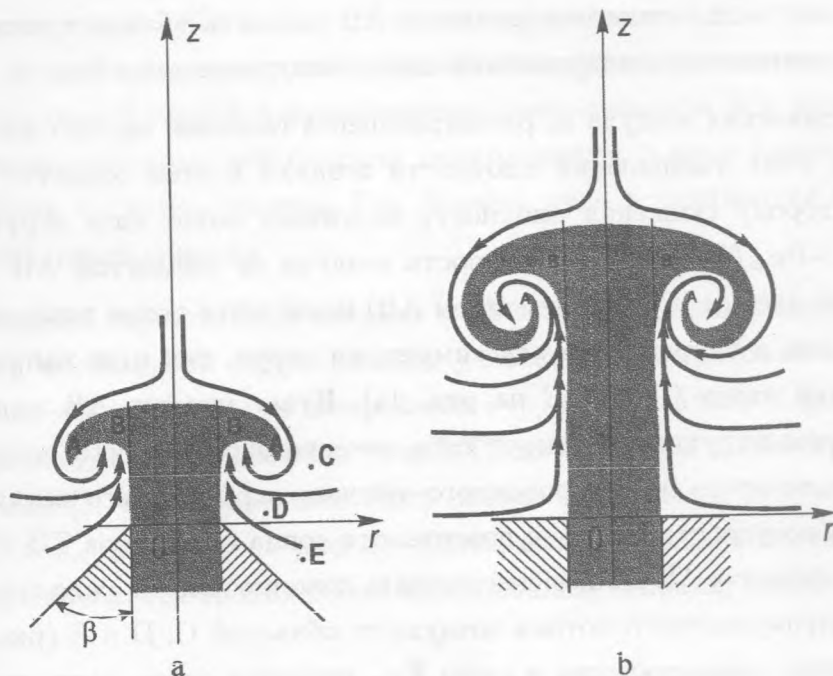


Рис. 4. Качественная картина процесса образования тороидального вихря и индуцированного течения окаружающего воздуха вокруг импульсной струи при двух значениях угла конусности внешней поверхности сопла генератора вихря β . а - $\beta < 90^\circ$, б: $\beta = 90^\circ$.

у головной части импульсной струи появляется радиальная составляющая скорости V_r . Так появляется осесимметричный поперечный поток головной части струи, движущийся в радиальном направлении со скоростью V_r , а в направлении оси Oz - со скоростью u_K (рис. 2б и элемент АВ на рис. 4а).

Этап 2. Осесимметричный радиальный поток (расширяющаяся головная часть) импульсной струи усиливает ее торможение. В результате перед расширяющейся головной частью струи (элементом АВ на рис. 4а) давление набегающего потока воздуха повышается на величину $(\rho_\infty u_K^2)/2$, а за ней снижается (ρ_∞ - плотность воздуха). Следовательно, на движущийся элемент АВ струи против направления его движения (оси Oz) со стороны набегающего потока воздуха действует сила сопротивления F_C . Помимо этой силы на этот элемент АВ также действуют сила $F_{BA} = \Delta p_{BA} \delta z 2\pi r_n$ (где Δp_{BA} - разность полного давления между началом и концом элемента АВ, δz - толщина элемента АВ), создаваемая истекающей струей и направленная вдоль элемента АВ, и сила вязкости F_B со стороны окружающего элемент АВ воздуха. Под действием указанных

сил передняя часть движущегося элемента АВ (область вблизи точки А на рис. 4а) начинает поворачиваться в направлении, противоположном оси Oz .

Снижение давления воздуха за расширяющейся головной частью импульсной струи происходит за счет уменьшения плотности воздуха в этой области ($\partial\rho_\infty/\partial t < 0$). При этом в сторону снижения плотности возникает поток газа окружающей среды $\text{div}(\rho_\infty V_\infty) = -\partial\rho_\infty/\partial t$, где V_∞ – скорость воздуха за элементом АВ. За расширяющейся головной частью струи (элементом АВ) появляется поток воздуха, движущийся одновременно как в направлении оси симметрии струи, так и по направлению оси Oz (из окрестностей точек С, D и E на рис. 4а). Итак, элемент АВ импульсной струи своим движением индуцирует вокруг себя течение окружающего воздуха. Из рис. 4 видно, что объем этого индуцированного течения окружающего воздуха зависит от величины угла конусности внешней поверхности сопла генератора ТВ β . Теперь на головную часть элемента АВ начнет действовать дополнительная сила сопротивления F_I со стороны индуцированного потока воздуха из областей С, D и E (рис. 4а). Под действием этой силы сопротивления и силы F_{BA} передняя часть движущегося элемента АВ повернется сначала в направлении, противоположном оси Or , а затем по направлению оси Oz . В результате у элемента АВ импульсной струи возникает вращательное движение относительно центра ядра формирующегося тороида. Дальнейшее движение элемента АВ подчиняется закономерностям вращательного движения, и, следовательно, радиус его вращения определяется его скоростью и градиентом давления воздуха с наружной и внутренней сторон этого элемента. Скорость потока элемента АВ по мере удаления от сечения В (начала тороидальной спирали) уменьшается вследствие взаимодействия с частицами воздуха, непосредственно соприкасающегося с поверхностью данного элемента струи. С уменьшением скорости элемента АВ струи, при практически постоянном градиенте давления, согласно закономерностям вращательного движения, также уменьшается и радиус его вращения. Так появляется первый виток тороидальной спирали (рис. 2с и 4в).

Из вышеизложенного следует, что внутри тороидальной спирали давление меньше, чем снаружи: возникает градиент давления между ее внутренней и внешней поверхностями. В тороидальной спирали формирующегося ТВ центробежная сила уравнивается этим градиентом давления.

Этап 3. Изучение зависимости скорости импульсного истечения потока u_j от времени t как для плазмотрона, так и для генератора газового ТВ показало, что к концу истечения струи величина u_j начинает уменьшаться. Такая зависимость u_j от времени

t на процесс формирования ТВ отразится следующим образом. Если скорость истекающей струи u_j не превышает скорости динамического препятствия u_K , то сила F_{BA} , создаваемая истекающей струей и направленная вдоль элемента AB , исчезает и дальнейшее образование тороидальной спирали прекращается, а сама спираль состоит из одного витка. Если $u_j > u_K$, то сила F_{BA} больше нуля и начинается формирование следующего витка такой спирали.

Количество витков тороидальной спирали в ТВ зависит от длины импульсной струи, причем скорость истекающей струи должна удовлетворять требованию $u_j > u_K$. В противном случае хвостовая часть импульсной струи не попадает в формирующийся вихрь. При этом если струя плазменная, то за ПТВ из хвостовой части струи образуется плазменное облако [3, 4]. Образование двух витков спиральной структуры в случае $u_K \ll c$ при $u_j > u_K$ показано на рис. 2f. Далее, если выполняется условие $u_j > u_K$, то начинает формироваться третий виток тороидальной спирали, затем – четвертый и т.д.

Стадия установления определенного радиального распределения завихренности (азимутальной скорости вращения) в ТВ после прекращения истечения импульсной струи. Со временем после прекращения истечения струи вследствие вязкости энергия вращения захваченного в тороид воздуха (темные спиральные полосы внутри тороида на рис. 2с–f) увеличивается, а следовательно, энергия вращения тороидальной спирали в тороиде уменьшается. Головная часть тороидальной спирали (ее близлежащие к центру тороида части) больше теряют свою энергию вращения в результате длительного взаимодействия с захваченным в тороид воздухом. При этом, чем ближе к центру тороида, тем меньше величина азимутальной скорости спирали. Результатом такого взаимодействия является сглаживание сдвига в радиальном распределении вращательной скорости. Такое сглаживание продолжается до тех пор, пока между вращающимися слоями тороидальной спирали и захваченного в тороид воздуха существует сдвиг скоростей. А такой сдвиг скоростей между вращающимися слоями газа перестает существовать, когда угловая скорость этих слоев выравнивается. Итак, после окончания истечения импульсной струи в результате взаимодействия потока тороидальной спирали с захваченным в тороид воздухом со временем устанавливается твердотельное ядро вращения. За это же время τ_r внешняя граница тора, взаимодействуя с окружающим его воздухом (вследствие вязкости), вовлекает в свое вращательное движение близлежащие слои воздуха и увеличивает свой диаметр. Этот слой представляет собой наружный вязкий слой, так как его внешние слои отстают от внутренних слоев, и он расположен вне твердо-

тельного ядра вращения. Образование твердотельного ядра вращения плазмы с вязким слоем в ПТВ к моменту завершения его формирования экспериментально показано в работе [4]. Заметим, что аналогичное радиальное распределение вращательной скорости устанавливается и в интенсивных атмосферных вихрях [15 – 17]. По этой причине такое радиальное распределение азимутальной скорости вращения в ТВ, состоящее из твердотельного ядра вращения и вязкого внешнего слоя, можно рассматривать как универсальное распределение. Для установления универсального распределения азимутальной скорости вращения в формирующемся ТВ требуется некоторое время τ_P . Другими словами, время образования ТВ равно $\tau_V = \Delta t_u + \tau_P$.

Итак, экспериментальное исследование процесса образования как ПТВ, так и низкотемпературных ТВ показало, что механизмом их образования являются торможение осесимметричной импульсной струи окружающей средой и создание ею индуцированного течения окружающей среды вокруг себя, а также взаимодействие такой струи с этим индуцированным течением окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Андрианов А. М., Синицин В. И. ЖТФ, **47**, N 11, 2318 (1977).
- [2] Aleksandrov A. F., Timofeev I. V., Chernikov B. A., and Yusaliev U. Proc. XVII Intern. Conf. Phen. Ion. Gas. Suansu (UK), part 2, 426 (1987).
- [3] Юсупалиев У. ЖТФ, **74**, N 7, 52 (2004).
- [4] Юсупалиев У. Физика плазмы, **31**, N 6, 543 (2005).
- [5] Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели, М., Наука, 1973.
- [6] Тарасов В. Ф. Экспериментальные исследования турбулентных вихревых колец. Автореферат диссер. на соиск. уч. ст. к.ф.-м.н. Новосибирск, Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1975.
- [7] Ахметов Д. Г. ПМТФ, **42**, N 5, 70 (2001).
- [8] Shariff K. and Leonard M. Ann. Rev. Fluid Mech., **24**, 235 (1992).
- [9] Петров П. А. Изв. АН СССР, сер. МЖГ, N 2, 19 (1973).
- [10] Владимиров В. А., Тарасов В. Ф. Изв. СО АН СССР, сер. техн. науки, N 3, 3 (1980).
- [11] Бояринцев В. И., Бояринцева Т. Е., Коротаев Д. Г. и др. Изв. АН СССР, сер. МЖГ, N 3, 125 (1997).

- [12] R e y n o l d s O. On the Resistance Encountered by Vortex Rings. Nature, 14, 477 (1876).
- [13] W o o d R. Vortex rings. Nature, 63, 418 (1901).
- [14] Ю с у п а л и е в У. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 6, 46 (2005).
- [15] М о м е д о в Э. С., П а в л о в Н. И. Тайфуны, Л., Гидрометеиздат, 1974.
- [16] Интенсивные атмосферные вихри. М., Мир, 1985.
- [17] F a b e r T. E. Fluid dynamics for physicists. Cambridge, University Press, 2001.

Институт общей физики
им. А. М. Прохорова РАН

Поступила в редакцию 18 мая 2005 г.