

УДК 537.523

ВИХРЕВЫЕ КОЛЬЦА И ПЛАЗМЕННЫЕ ТОРОИДАЛЬНЫЕ ВИХРИ В ОДНОРОДНЫХ НЕОГРАНИЧЕННЫХ СРЕДАХ. II. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ВИХРЯ

У. Юсупалиев¹, Н. П. Савенкова², Ю. В. Трощев², С. А. Шутеев²,
С. А. Складчиков², Е. Э. Винке², Н. Г. Гусейн-заде¹

Экспериментально определены условия образования тороидальных вихрей (ТВ): плазменного ТВ и воздушного вихревого кольца в воздухе при атмосферном давлении. Проведено численное моделирование процесса формирования ТВ и получены локальные характеристики импульсной струи, индуцированного течения окружающей среды (воздуха) и формирующегося ТВ в различные моменты времени. Показано, что результаты предварительного численного расчёта согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: тороидальные вихри, вихревые кольца, численное моделирование, процесс формирования тороидальных вихрей.

1. *Введение.* В работах [1–17] показано, что плазменный (высокотемпературный) тороидальный вихрь (ПТВ) [1–7] и вихревые кольца (низкотемпературные тороидальные вихри) в воздухе [8–13, 15–17] и воде [8, 10, 14] обладают общими закономерностями динамики движения и процесса образования. Динамика движения таких тороидальных вихрей (ТВ) исследована достаточно подробно: исходя из идентичности динамических свойств вихрей, выведено общее уравнение их движения, решение которого согласуется с опытными данными как для ПТВ [5], так и для ТВ в воде [14], воздухе [15–17].

Несмотря на давнюю историю исследования ТВ (вихревых колец, ПТВ), процесс их образования изучен недостаточно подробно. До сих пор не определены такие важные параметры, как трёхмерное поле скоростей, распределение плотности и температуры

¹ Учреждение Российской академии наук Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119992, Москва; e-mail: nesu@phys.msu.ru.

в вихрях в различные моменты времени при их образовании. Это связано с тем, что определение этих локальных характеристик ТВ в экспериментальном отношении представляет значительные трудности. Так, при диаметре ТВ 10 см для получения поля скоростей необходимо одновременно измерить скорость v , плотность ρ и температуру T жидкости (плазмы, газа) в по крайней мере 500–1000 точках, что современными методами невозможно реализовать [18]. По этой причине количество экспериментальных работ по определению локальных величин мало. На текущий момент времени авторам известны только три работы в этой области: две по определению поля скоростей (в ПТВ [5] и воздушном ТВ [9, 16] для заданного момента времени) и одна работа [5] по определению распределения температуры плазмы в ПТВ для заданного момента времени. Работы по определению распределения плотности в ТВ отсутствуют.

Однако для решения прикладных задач с использованием ТВ необходимо знать именно пространственно-временные распределения скоростей, плотности и температуры в них. Отсюда возникает необходимость дальнейшего экспериментального и теоретического исследования процесса образования ТВ.

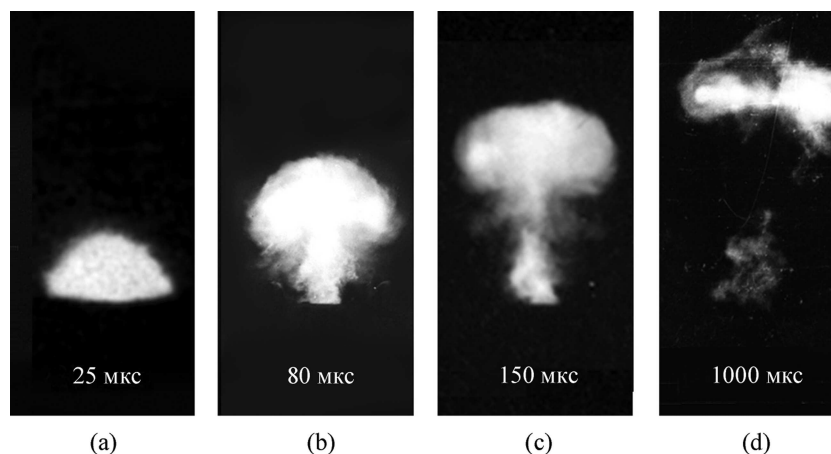


Рис. 1: Процесс образования плазменного тороидального вихря в воздухе при атмосферном давлении, $U_0 = 20$ кВ и $p_0 = 1.0 \cdot 10^5$ Па. Моменты регистрации кадров фото-регистрации отсчитываются от начала истечения плазмы. Время экспозиции кадров ~ 2 мкс.

2. *Экспериментальные установки и методики исследований.* Для создания ПТВ использовался импульсный плазмотрон, принцип работы и конструкция которого подробно описаны в работах [1–7]. Плазмотрон был подключен к разрядному контуру, содержащему батарею конденсаторов (емкостью 30 мкФ и рабочим напряжением

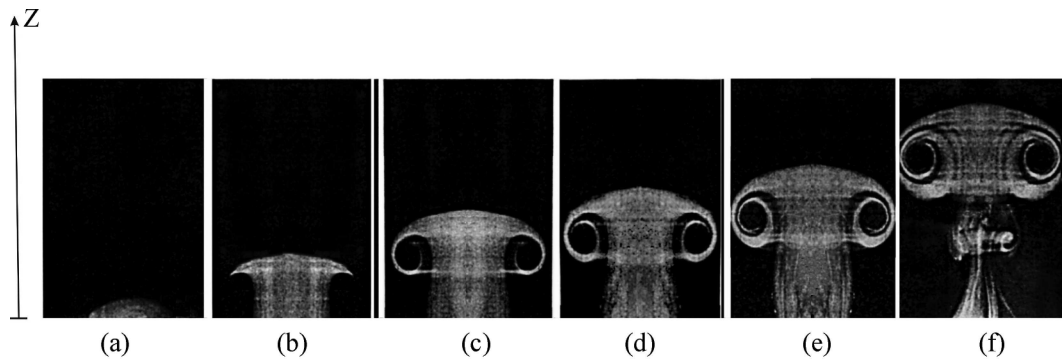


Рис. 2: Процесс образования воздушного ТВ в воздухе при атмосферном давлении. Вре-
 мя экспозиции кадров ~ 0.1 мс: (a) 2 мс, (b) 10 мс, (c) 18 мс, (d) 21 мс, (e) 25 мс,
 (f) 36 мс.

$U_0 = 5 - 25$ кВ) и разрядник с системой управления.

Генератор газовых ТВ представлял собой металлическую трубу с поршнем, к от-
 крытому концу которой прикреплялось сопло, представляющее собой трубу диаметром
 $2r_{\text{nozz}}$ и длиной $L_n = 3r_{\text{nozz}}$ ($r_{\text{nozz}} = 35$ мм – радиус сопла). В эксперименте длина ра-
 бочего хода поршня регулировалась. ТВ создавался выталкиванием порции воздуха из
 трубы с помощью поршня, который приводился в движение специальным устройством.
 Изучение течения истекающей импульсной струи воздуха при формировании ТВ про-
 водилось визуализацией потока с помощью дыма, которым, помимо воздуха, наполнялся
 рабочий объем генератора. Воздушная импульсная струя и формирующийся ТВ осве-
 щались импульсной лампой.

Методы измерения характеристик ТВ (ПТВ и вихревых колец) подробно изложены в
 работах [1–8, 11, 13, 15–17]. Работы генератора газового ТВ и плазматрона, скоростного
 фоторегистратора и импульсной лампы были синхронизированы.

3. *Экспериментальные результаты.* Для рассмотрения процесса формирования ТВ
 выберем цилиндрическую систему координат (r, φ, z) , ось $0z$ и начало координат кото-
 рой совпадают с осью струи и с центром струи на срезе сопла соответственно.

Последовательности кадров фоторегистрации процесса формирования плазменного
 и воздушного ТВ в воздухе при атмосферном давлении показаны на рис. 1 и рис. 2
 соответственно. Скорость плазменной струи u_j для данных на рис. 1 составляет
 680 м/с (при местной скорости звука $c_j = 2300$ м/с), а соответствующая величина для
 воздушной импульсной струи – 11 м/с (при местной скорости звука $c_j = 330$ м/с). Как
 видно из этих рисунков, несмотря на заметное отличие скоростей истечения осесим-

метричной плазменной и воздушной струй, процессы формирования как плазменного, так и воздушного ТВ имеют *сходные черты*. Для воздушной струи (рис. 2(с)–(f)) четко видна внутренняя структура “шляпки” гриба, чего нельзя сказать о “шляпке” гриба плазменной струи. Но для последней хорошо прослеживается течение окружающей её среды (рис. 1(b), (с)), вызываемое самой же струей. Более того, благодаря высокой интенсивности излучения плазмы удастся измерить скорость такого индуцированного струей течения газа окружающей среды в различных точках, т.е. удастся определить поле скоростей такого течения.

Из рис. 2(b)–(f) видно, что внутренняя структура “шляпки” грибообразной конфигурации струи представляет собой *тороидальную спиральную струю* в формирующемся вихре.

Процесс формирования плазменного и газового ТВ имеет три характерные стадии: *начальную стадию* (рис. 1(a); рис. 2(a)); *стадию образования тороидальной спиральной струи в формирующемся вихре* (рис. 1(с)–(d); рис. 2(b)–(f)) и *стадию установления определенного распределения азимутальной скорости вращения в вихре после прекращения истечения плазмы/газа*. Указанные стадии исследованы в работах [6, 12, 13]. Здесь отметим лишь те моменты, о которых в этих работах не говорилось.

Законы движения плазменного ТВ и плазменного облака, не захваченного в вихревое движение, начинают различаться, когда в вихре образуется твердотельное ядро вращения. Из этого факта следует один из *основных выводов проведенных исследований: ПТВ существует как самостоятельная плазмогидродинамическая структура, обладающая собственными закономерностями движения, после того, как в процессе его образования в нём сформируется твердотельное ядро вращения*. Именно такие ТВ являются устойчивыми. В работе [6] устойчивость движения ТВ исследована в зависимости от характеристик этого твердотельного ядра вращения.

Условия образования ТВ. Проведённые нами опыты показали, что ПТВ в воздухе образуется при дозвуковом осесимметричном истечении порции плазмы в воздух, а кольцевые вихри в воздухе – при дозвуковом осесимметричном истечении порции газа в воздух. Для образования ТВ характеристики импульсной струи и окружающей среды должны удовлетворять следующим условиям.

1) Истекающая струя должна быть дозвуковой

$$u_j(0) < c_j \quad (1)$$

и осесимметричной, где $u_j(0)$ – скорость струи на её оси симметрии $r = 0$ (максимальное значение скорости в её радиальном распределении $u_j(r)$ на срезе сопла генератора

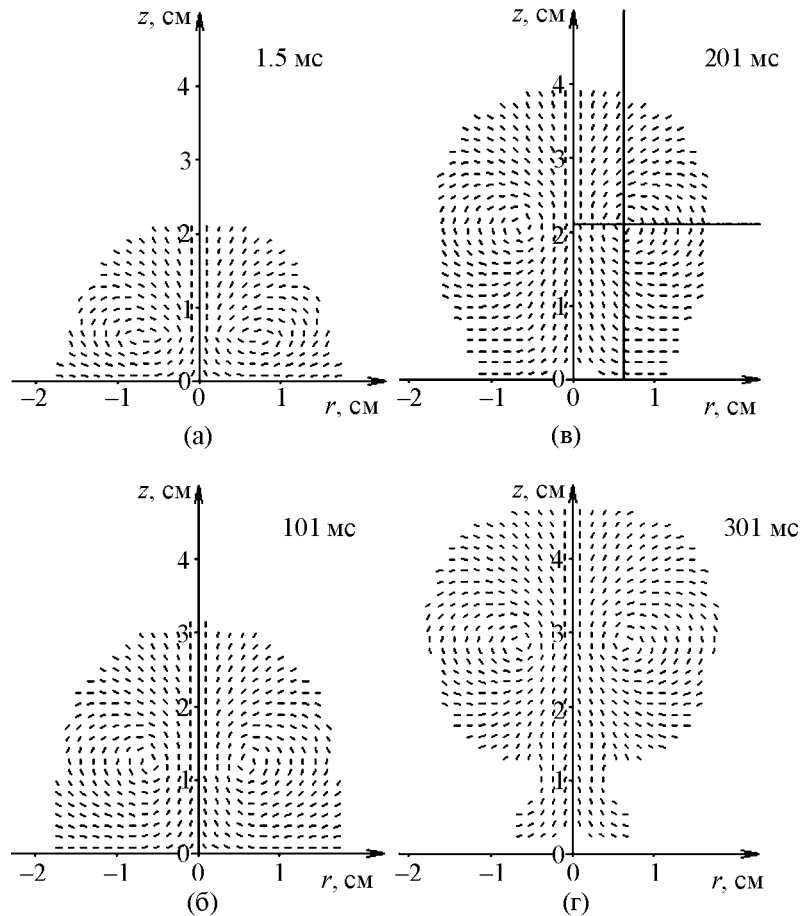


Рис. 3: Поля направлений скоростей импульсной струи, индуцированного течения окружающей среды и формирующегося ТВ в процесс образования воздушного ТВ в воздухе при атмосферном давлении в различные моменты времени: (а) 1.5 мс; (б) 101 мс; (в) 201 мс; (г) 301 мс. Вектор скорости изображается при условии, что он по абсолютной величине не меньше 0.02 от максимального его значения. Для момента времени 201 мс изображены прямые, пересекающиеся в точке $(r, z) = (0.63 \text{ см}, 2.1 \text{ см})$.

вихря). Радиальное распределение скорости $u_j(r)$ в импульсной струе устанавливается при взаимодействии струи с поверхностью сопла.

2) Импульсная струя и окружающая среда, куда она истекает, должны быть сплошными средами, т.е. числа Кнудсена для них должны удовлетворять условиям:

$$Kn_j = l_j/r_{\text{nozz}} \ll 1, \quad Kn_I = l_I/r_{\text{nozz}} \ll 1, \quad (2)$$

где l_j, l_I – длины свободного пробега частиц в струе и окружающей среде соответственно.

3) Характерные размеры окружающей среды X_i должны быть намного больше радиуса сопла генератора вихря r_{nozz} : $X_i \gg r_{\text{nozz}}$.

4) Длина импульсной струи L_j должна удовлетворять условию:

$$2r_{\text{nozz}} \leq_j L \leq 15r_{\text{nozz}}. \quad (3)$$

При $L_j < 2r_{\text{nozz}}$ сформированный ТВ неустойчив и быстро распадается, а при $L_j > 15r_{\text{nozz}}$ хвостовая часть струи начинает разрушать уже сформированный ТВ.

5) Длительность Δt_u истечения импульсной струи должна быть не меньше характерного времени образования тороидальной спирали формирующегося вихря τ_B :

$$\tau_B \leq \Delta t_u. \quad (4)$$

Опыт показал, что при выполнении указанных условий ТВ образуются при следующих сочетаниях агрегатных состояний импульсной струи и окружающей среды: истечение плазмы в газ; газа в газ; жидкости в жидкость и газожидкости в жидкость.

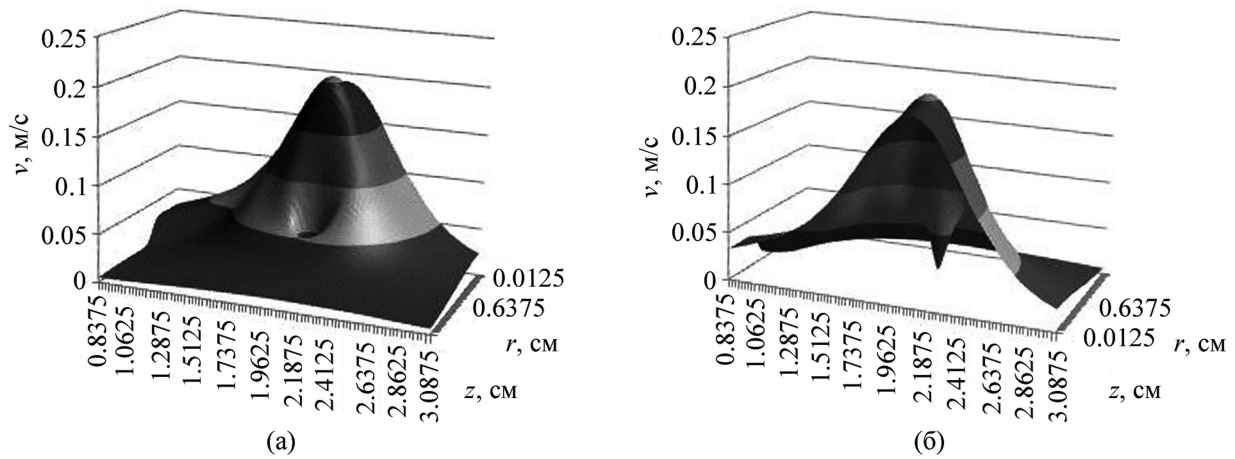


Рис. 4: Зависимость модуля скорости $|\mathbf{v}|$ от координат (r, z) в момент времени $t = 201$ мс. (а) вид снаружи, (б) вид изнутри (обратное направление по оси $0r$).

Механизм образования ТВ. При выполнении указанных выше условий механизм образования ТВ являются: торможение осесимметричной дозвуковой импульсной струи окружающей средой, создание струей индуцированного течения этой среды вокруг себя, а также самосогласованное взаимодействие между ними, в результате которого формируется твердотельное ядро вращения в ТВ.

Описанный механизм образования ТВ отличается от механизма образования, предложенного в работах [10–13, 15–17]. В них механизмом образования предполагается

процесс сворачивания пограничного слоя на кромке сопла при выталкивании порции жидкости из генератора ТВ в окружающую среду и торможение истекающего потока этой средой.

Закон сохранения количества движения при процессе образования ТВ. Исходя из механизма и условий образования ТВ, для процесса его формирования можно применить закон сохранения количества движения. Индуцированное течение окружающей среды (воздуха) появляется в начальной стадии образования ТВ за счет движения сжатого слоя воздуха перед головной частью струи. То есть количества движения индуцированного течения окружающей среды $\mathbf{P}_{in}(t, r, z)$, вихря $\mathbf{P}_{TV}(t, r, z)$ и хвостовой части струи $\mathbf{P}_0(t, r, z)$ обусловлены движением импульсно-истекающей струи. В соответствии с законом сохранения количества движения для замкнутой системы “импульсная струя – окружающая среда” в любой момент времени t до момента образования ТВ сумма названных величин должна быть равна количеству движения импульсной струи $\mathbf{P}_j(t)$:

$$\mathbf{P}_j(t) = \mathbf{P}_{in}(t, r, z) + \mathbf{P}_{TV}(t, r, z) + \mathbf{P}_0(t, r, z). \quad (5)$$

Так как истекающая струя является дозвуковой (1), то в уравнении (5) сжимаемостью импульсной струи и окружающей среды можно пренебречь. При написании (5) учтена осесимметричность струи, индуцированного течения и вихря.

Кроме того, опыт показал, что при изменении величины скорости истечения импульсной струи u_j на один-два порядка отношение скоростей $\frac{V_{TV0}}{u_j}$ и отношения $\frac{P_{TV}}{P_j}$, $\frac{P_{in}}{P_j}$ и $\frac{P_0}{P_j}$ в пределах ошибки измерения практически слабо меняются. В таблице 1 приведены значения указанных отношений для ПТВ и воздушного ТВ в воздухе.

Т а б л и ц а 1

	$\frac{V_{TV0}}{u_j}$	$\frac{P_{TV}}{P_j}$	$\frac{P_{in}}{P_j}$	$\frac{P_0}{P_j}$
Эксперимент ПТВ и воздушный ТВ в воздухе	0.25–0.37	0.45–0.63	0.23–0.29	0.32–0.1
Численное моделирование	0.3	0.49	0.26	0.25

4. *Математическое моделирование процесса образования ТВ.* Для моделирования процесса формирования ТВ использовались уравнения непрерывности, движения для несжимаемой жидкости (Навье–Стокса) и состояния (Менделеева–Клайперона). В цилиндрической системе координат указанные уравнения в осесимметричном случае име-

ют следующий вид [19]:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial r} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial z} + \frac{\partial^2 \mathbf{C}}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{D}}{\partial r \partial z} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} = -\frac{1}{r} \mathbf{F}, \quad (6)$$

где

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \rho v_r \\ \rho v_z \\ \rho \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} p + \rho v_r^2 \\ \rho v_r v_z \\ \rho v_r \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \rho v_z v_r \\ p + \rho v_z^2 \\ \rho v_z \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -2\eta v_r \\ -\eta v_z \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} -\eta v_z \\ -\eta v_r \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} -\eta v_r \\ -2\eta v_z \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho v_r^2 + 2\eta v_r/r + 2\eta \partial v_r / \partial r \\ r q_z + \rho v_z v_r + \eta (\partial v_r / \partial z + \partial v_z / \partial r) \\ \rho v_r \end{bmatrix},$$

$$p = \frac{\rho}{\mu} RT, \quad (7)$$

где v_r, v_z – компоненты скорости газа ρ, p, η и μ – плотность, давление, динамическая вязкость и молярная масса газа соответственно, q_z – объемная плотность силы f_z , действующей вдоль оси $0z$ и создающей импульсную струю, R – универсальная газовая постоянная. Функция q_z введена нами для моделирования работы “поршня” генератора ТВ и зависит от принципа работы “поршня” и её вид должен быть таким, чтобы удовлетворялись условия образования вихря (1)–(4). Рассмотрим вкратце принцип работы “поршня”.

“Поршнем” импульсного плазмотрона служит импульсный сильноточный электрический разряд в газе при атмосферном давлении и выше. Для создания ТВ в воде используется электромеханический поршень [11, 14], а для создания ТВ в воздухе – газодинамический “поршень” [8, 11, 17] и “поршень” на основе ВВ [10, 11]. Под действием указанных “поршней” в рабочем объёме генератора сначала повышается давление жидкости (плазмы, газа, воды), в результате чего начинается истечение струи через сопло в окружающую среду. А через некоторое время давление в рабочем объёме снижается до давления окружающей среды (истечение струи прекращается). В этом и состоят общие черты указанных «поршней» независимо от их физической природы.

Таким образом, “поршень” генератора ТВ работает в течение времени Δt и создаёт заданную длину струи L_j с определенным радиальным распределением скорости в струе

$u_j(r)$. Исходя из этого, объемную плотность q_z силы f_z зададим следующей функцией:

$$q_z = q_0 f(t) g(r) h(z), \quad (8a)$$

где

$$\begin{aligned} f(t) &= [1 - \cos(2\pi t/\Delta t)]/2, \\ g(r) &= [1 + \cos(\pi r/r_{\text{nozz}})]/2, \\ h(z) &= \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi(z - z_1)}{(z_2 - z_1)}\right) \right] / 2, \end{aligned} \quad (8b)$$

q_0 – амплитуда величины q_z (в $\text{кг}/(\text{м}^2 \text{ с}^2)$), $(z_2 - z_1)\pi r_{\text{nozz}}^2$ – объём, в котором действует сила f_z . Функция q_z имеет колоколообразную форму с максимумом q_0 .

Для проведения численного расчета необходимо выбрать значения характеристик импульсной струи ($r_{\text{nozz}}, L_j, T_j, \mu_j, \eta_j, p_j$), “поршня” генератора вихря ($q_0, \Delta t, z_1, z_2$) и окружающей среды (T_0, p_0, μ_0, η_0). Значения этих характеристик выбираются, исходя из требований экспериментально установленных условий образования ТВ (1)–(4).

Согласно этим условиям, рассматривается импульсное дозвуковое осесимметричное истечение воздуха ($T_j = 293 \text{ К}$, $\rho_j = 101325 \text{ Па}$, $\mu_j = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, $\eta_j = 1.82 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$), через сопло (радиусом $r_{\text{nozz}} = 10^{-2} \text{ м}$) в воздух при температуре $T_0 = 293 \text{ К}$ и атмосферном давлении $p_0 = 101325 \text{ Па}$ в цилиндрической системе координат (r, φ, z) , начало которой совпадает с центром задней стенки рабочего объёма (или неподвижного механического “поршня”), а ось $0z$ – с осью симметрии рабочего объёма и сопла; струя и окружающий воздух являются сплошными средами, так как длины свободных пробегов частиц равны $l_j = l_I = 2 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ при $r_{\text{nozz}} = 10^{-2} \text{ м}$ ($Kn_j = Kn_I = 2 \cdot 10^{-6}$); вследствие осесимметричности струи параметры индуцированного течения и вихря не зависят от азимутальной координаты φ .

Характерные размеры окружающей среды, куда истекает порция воздуха, выбраны из требования третьего условия образования ТВ: расчёты проводились для цилиндрического объёма диаметром $X_1 \equiv D_0 = 0.1 \text{ м}$ и длиной $X_2 \equiv Z_0 = 0.05 \text{ м}$ ($D_0 \gg r_{\text{nozz}}, Z_0 \gg r_{\text{nozz}}$).

Начальные и граничные условия. На границах области $t \in [0; 0.05]$, $r \in [-0.01; 0.01]$, $z \in [0.005; 0.0075]$ объёмная плотность силы q_z непрерывно и дифференцируемо переходит в нулевое значение (отрицательные значения r в данном случае имеют иллюстративный характер и соответствуют отрицательной координате по оси $0x$). Начальные и граничные условия для компонент скоростей v_r и v_z определяются объёмной плотностью силы q_z .

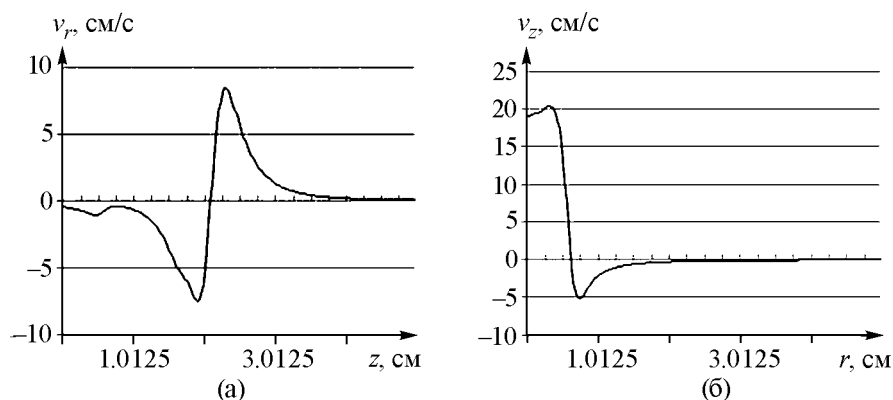


Рис. 5: Распределения компонент скорости \mathbf{v} по координатам в момент времени $t = 201$ мс: (а) зависимость r -компоненты скорости v_r от координаты z при $r = 0.63$; (б) зависимость z -компоненты скорости v_z от координаты r при $z = 2.1$.

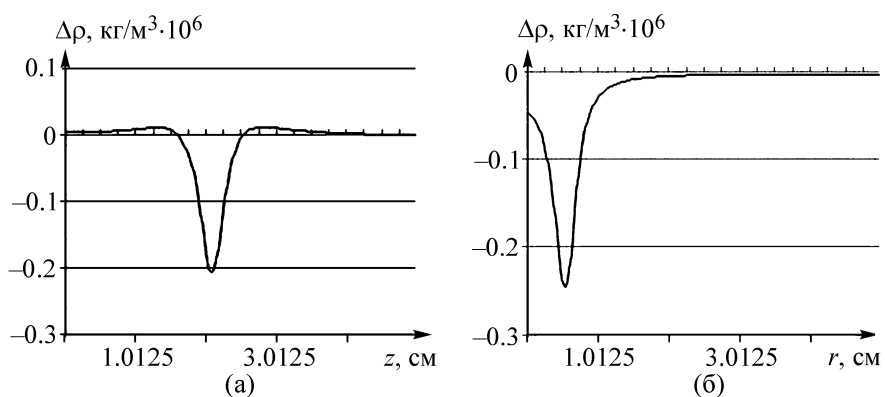


Рис. 6: Распределения плотности воздуха по двум осям: по Oz при $r = 0.63$ см (а) и по Or при $z = 2.1$ см (б) в момент времени $t = 201$ мс.

Ниже приведены результаты численного расчета в системе координат генератора вихря при следующих значениях параметров его “поршня” (объемной плотности силы q_z): длительность действия $\Delta t = 0.05$ с; амплитуда $q_0 = 100$ кг/м²с² в цилиндрическом рабочем объеме генератора $(z_2 - z_1)\pi r_{\text{nozz}}^2 = 1.57 \cdot 10^{-6}$ м³ ($z_2 - z_1 = 0.075 - 0.05 = 0.005$ м), заполненном воздухом при температуре 293 К и давлении 101325 Па до начала действия силы q_z . Значение величины q_0 выбрано из требования дозвукового истечения импульсной струи (1): максимальное значение скорости $u_j = 0.25$ м/с при местной скорости звука в струе $c_j = 330$ м/с. Максимальное ускорение достигается при $t =$

0.025, $r = 0$, $z = 0.625$ и равно $q_0/\rho = 10/0.0011997 = 83.35$ м/с².

Поле скоростей. На рис. 3 приведено изменение во времени поля направлений скоростей $\mathbf{V}(t, r, z)$ формирующегося вихря и индуцированного течения окружающей среды, возникающих при импульсном истечении воздушной струи в воздух в осесимметричном случае. Видны внешние сходства расчётных данных (рис. 3) и экспериментальных данных (рис. 1, рис. 2) как на начальной стадии (рис. 3(а); рис. 1(а) и рис. 2(а)), так и на стадии образования тороидальной структуры (рис. 3(б) и рис. 3(г); рис. 1(б),(г) и рис. 2(с)–(е)). На рис. 3(б)–(г) хорошо прослеживается поле скоростей индуцированного течения окружающей среды.

Расчёт проведён до момента времени 301 мс после начала истечения. В этот момент времени струя продолжает истекать: на рис. 3(г) видна хвостовая часть импульсной струи. К этому моменту времени формирующийся ТВ прошел путь всего лишь $z = 3r_{\text{nozz}} = 3$ см. А согласно экспериментальным данным [1, 12, 18] ТВ полностью сформируется на расстоянии $z = (6 - 10)r_{\text{nozz}}$ от среза сопла. Поэтому к моменту времени $t = 301$ мс ТВ не полностью сформировался.

Распределение модуля скорости $|\mathbf{v}| = |\mathbf{v}(r, z)|$ в момент времени $t = 201$ мс приведено на рис. 4. Максимальное значение скорости достигается не на оси $0z$, а на некотором расстоянии от неё. Из рис. 4(б) видно, что поверхность модуля скорости имеет вид “воронки”, координаты нижней точки которой можно определить из графиков, представленных на рис. 5. Из этих графиков найдем координаты нижней точки “воронки”: $z_B = 2.01$ см и $r_B = 0.63$ см. Кроме того, из них (рис. 5(а)) следует, что на одинаковом расстоянии от координаты $z_B = 2.01$ см по обе стороны максимальные значения скоростей равны $[V_r(z_B + \Delta z) = V_r(z_B - \Delta z)]$ и их направления противоположны. Отсюда можно предположить, что эта “воронка” представляет собой твёрдотельное ядро вращения. Если это так, то из данных графика рис. 5(б) можно определить скорость поступательного движения V_{TB} формирующегося ТВ. Действительно, в системе координат вихря, движущегося со скоростью V_{TV} относительно генератора вихря, для твёрдотельного ядра вращения должно выполняться следующее соотношение:

$$(v_z)_{\max} - V_{TB} = V_{TB} - (v_z)_{\min}. \quad (9)$$

Из (9) получим, что $V_{TB} = [(v_z)_{\max} + (v_z)_{\min}]/2 = 7.5$ см/с, так как $(v_z)_{\max} = 20$ см/с, $(v_z)_{\min} = -5$ см/с в системе координат генератора вихря.

Скорость формирующегося вихря V_{TB} при $t = 301$ мс также равна 7.5 см/с. Тогда отношение этой скорости к максимальной скорости истечения струи $\frac{V_{TB0}}{u_j}$ составляет

0.3, что согласуется с экспериментальными данными работ [13, 18] (см. таблицу 1).

Разрежение воздуха наблюдается внутри твёрдотельного ядра вращения, что показано на рис. 6. При этом минимум плотности газа приблизительно совпадает с точкой нулевой его скорости.

При известных полях скоростей $\mathbf{V}(t, r, z)$ и распределении плотности $\rho(t, r, z)$ можно вычислить количества движения индуцированного течения окружающей среды $\mathbf{P}_{in}(t, r, z)$, вихря $\mathbf{P}_{TV}(t, r, z)$ и хвостовой части струи $\mathbf{P}_0(t, r, z)$. Вследствие осесимметричности импульсной струи, индуцированного течения и вихря у векторов $\mathbf{P}_j(t, r, z)$, $\mathbf{P}_{in}(t, r, z)$, $\mathbf{P}_{TV}(t, r, z)$ и $\mathbf{P}_0(t, r, z)$ имеется только z -компонента. К моменту времени $t = 301$ мс были вычислены значения величин P_j, P_{TV}, P_{in}, P_0 . В таблице 1 также приведены значения отношений $\frac{P_{TV}}{P_j}, \frac{P_{in}}{P_j}$ и $\frac{P_0}{P_j}$ при $t = 301$ мс. Из таблицы 1 видно, что расчётные значения для этих отношений в пределах ошибки измерения согласуются с экспериментальными данными.

Таким образом, результаты предварительного численного расчета согласуются с экспериментальными данными: для интегральных скоростей ТВ; импульса индуцированного течения, импульсной струи и вихря. Из численного расчета также получено твёрдотельное ядро вращения в ТВ, что наблюдается и на опыте.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. F. Aleksandrov, I. B. Timofeev, V. A. Cherenkov, et al., in: *Proc. XVII Intern. Conf. Phen. Ion. Gas, Suansu* (UK, 1987), part 2, p. 426.
- [2] А. Ф. Александров, И. Б. Тимофеев, У. Юсупалиев, ТВТ **29**(1), 108 (1991).
- [3] У. Юсупалиев, Краткие сообщения по физике ФИАН, N 6, 46 (2005).
- [4] У. Юсупалиев, ЖТФ **74**(7), 52 (2004).
- [5] У. Юсупалиев, Физика плазмы **31**(6), 543 (2005).
- [6] У. Юсупалиев, П. У. Юсупалиев, С. А. Шутеев, ЖТФ **77**(7), 50 (2007).
- [7] У. Юсупалиев, П. У. Юсупалиев, С. А. Шутеев, Физика плазмы **33**(3), 226 (2007).
- [8] Д. Г. Ахметов, О. П. Кисаров, ПМТФ **7**(4), 120 (1996).
- [9] J. P. Sullivan, S. E. Windall and S. Ezekiel, AIAA J **11**, 1384 (1973).
- [10] М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат, *Проблемы гидродинамики и их математические модели* (М., Наука, 1973).

- [11] В. Ф. Тарасов, *Дисс. на соиск. к. ф.-м. н.* (Новосибирск, Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1975).
- [12] В. А. Владимиров, В. Ф. Тарасов, *ПМТФ* **21**(3), 3 (1980).
- [13] K. Shariff and M. Leonard, *Ann. Rev. Fluid. Mech.* **24**, 235 (1992).
- [14] В. И. Бояринцев, Т. Е. Бояринцева, *Изв. РАН Сер. МЖГ* N 3, 125 (1997).
- [15] Д. Г. Ахметов, *ПМТФ* **42**(5), 70 (2001).
- [16] Д. Г. Ахметов, *Авторефер. дисс. на соиск. к. ф.-м. н.* (Новосибирск, Ин-т гидродинамики СО РАН, 2002).
- [17] Д. Г. Ахметов, *Вихревые кольца* (Новосибирск, Академ. издательство "Гео", 2007).
- [18] T. E. Faber, *Fluid Dynamics for Physicists* (University Press, Cambridge, 2001).
- [19] Л. Д. Ландау, И. М. Лифшиц, *Гидродинамика* (М., Наука, 1988).

Поступила в редакцию 14 июля 2011 г.