

УДК 533.6.697

МАКЕТ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР ТЕЧЕНИЯ В ВИХРЕВОЙ КАМЕРЕ

В. В. БАБЕНКО* В. Н. ТУРИК**

* Институт гидромеханики НАН Украины, Киев,

** Национальный технический университет Украины “КПИ”

Получено 05.02.2008

Приведены результаты экспериментальных исследований структуры течения в вихревой камере. С помощью различных методов визуализации получены фотографии и фильмы течения в ней. На основании анализа картин визуализации и полученных результатов количественных измерений обнаружены специфические когерентные вихревые структуры. Построен макет взаимодействия когерентных вихревых структур в вихревой камере.

Наведені результати експериментальних дослідів структури течії в вихровій камері. За допомогою різних методів візуалізації одержано фотографії та фільми течії у ній. На основі аналізу картин візуалізації та здобутих результатів кількісних замірів виявлено специфічні когерентні вихрові структури. Побудовано макет взаємодії когерентних вихрових структур у вихровій камері.

Results of experimental researches of flow structure in the vortical chamber are resulted. Photos and films of flow in the vortical chamber are received by means of various methods of visualization. On the basis of the analysis of pictures of visualization and the received results of quantitative measurements specific coherent vortical structures are found out. The breadboard model of interaction of coherent vortical structures in the vortical chamber is constructed.

ВВЕДЕНИЕ

Вихревые камеры находят широкое применение в энергетических и технологических машинах и аппаратах для организации их рабочих процессов и интенсификации переноса массы, импульса и теплоты [1–4]. При использовании для местной закрутки потока завихрителей тангенциального и тангенциально-щелевого типов, вдоль проточной части имеет место нестабилизированное закрученное течение достаточно сложной структуры [1, 3–5]. В пристеночной и приосевой областях могут существовать течения с продольными градиентами статического давления различных знаков. Наряду с радиальными градиентами давления это значительно усложняет структуру потоков и представляет проблему при расчетах внутренних закрученных течений [6].

При образовании зон возвратного течения, используемых, в частности, в камерах сгорания для предотвращения отрыва пламени, возникают условия интенсификации турбулентного перемешивания. Вместе с тем, радиальное перемещение турбулентных молей, вызванное пульсацией скорости и связанное с совершением работы против центробежных сил, может приводить к торможению процессов переноса в радиальном направлении и способствовать устойчивой стратификации по плотности и температуре. Это явление используется для улучшения характеристик газовых завес в высокотемпературных установках и в пла-

зменной технологии с целью защиты поверхности каналов от воздействия высоких температур. Теоретический анализ и экспериментальные данные работ [1, 7, 8] также свидетельствуют о возможности стабилизирующего и даже блокирующего влияния закрутки потока на турбулентный перенос в вихревой камере.

Определяющую роль в формировании областей с активным и консервативным характером воздействия центробежных массовых сил на структуру потока имеют законы радиального изменения осевой и трансверсальной составляющих скоростей [4, 9]. Для проточных частей вихревой камеры эти законы изучены намного полнее, чем для тупиковых областей. Отмечается также фактор влияния так называемого “торцевого эффекта” [9, 10], в частности, для вихревых камер с завихрителями в виде одиночных сопел [11, 12] и поясов впускных окон прямоугольного сечения, равномерно распределенных по окружности [13]. Физические закономерности взаимодействия указанных факторов практически не изучены. Кроме того, не исследованы особенности вихревых структур в вихревых камерах. Все это затрудняет дальнейшее совершенствование вихревых камер как важнейших элементов теплообменных аппаратов, химических реакторов, смесителей, циклонных камер и других энергетических и технологических установок.

Цель настоящей работы – систематическое изложение и анализ результатов экспериментальных

исследований различных видов вихревых когерентных структур, формирующихся в вихревой камере при наличии завихрителя в виде единичного сопла прямоугольной формы. На основании полученных результатов построен макет взаимодействия когерентных вихревых структур вихревой камеры.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальные исследования проводились в аэродинамическом стенде вихревой камеры, конструкция которой подробно приведена в [11, 14]. Цилиндрическая часть вихревой камеры выполнена в виде прозрачного полированного цилиндра из органического стекла с толщиной стенки 0.02 м, внутренним диаметром $d_0=0.102$ м и длиной $l_0=0.635$ м. По торцам цилиндр имел фланцы, одним из которых соединялся с остальными элементами аэродинамической установки. Была возможность устанавливать как два фиксированных значения длины глухого торцевого участка, так и любую длину торцевого участка, в том числе и осуществлять колебания торцевой стенки в продольном направлении. Завихрители представляли собой сменные вставки с поясами из шести равномерно распределенных по периметру цилиндра впускных окон, имеющих различную площадь. Кроме того, на цилиндре устанавливалась вставка с одиночным окном с размерами входного сечения 0.041×0.025 м.

Конструкция вставки позволяла плавно изменять углы α входа пристеночной струи в цилиндрическую часть в любом направлении на любой угол. Этот угол определяет поворот струи относительно продольной оси симметрии цилиндра. Были изготовлены четыре сменных входных окна с различными углами тангенциальности γ , позволяющими изменять угол входа струи относительно внутренней поверхности цилиндра. В одном случае пристеночная струя направлялась относительно поверхности цилиндра практически по касательной. В другом крайнем случае пристеночная струя направлялась практически вдоль вертикальной оси симметрии цилиндра. Площадь поперечного сечения сопла, отнесенная к поперечному внутреннему сечению цилиндра, была $\bar{S}=0.123$. Относительная глубина тупиковой зоны составляла в серии опытов по определению окружных (трансверсальных) скоростей $L/d_0 = 1.52 \div 4.04$. Фиксированному значению короткого торца соответствовала величина 1.52, а длинного торца – 4.04. В серии опытов по определению осевых

(продольных) скоростей соответствующие значения изменялись в диапазоне $L/d_0 = 1.82 \div 4.04$.

В экспериментах проводились измерения осредненных по времени осевых w и трансверсальных u составляющих скорости в тупиковой области вихревой камеры. Осевые компоненты скорости w направлены вдоль продольной оси симметрии цилиндра (ось z системы координат), а трансверсальные u – вдоль образующей внутренней поверхности цилиндра (ось x системы координат). Ось y направлена вертикально вниз вдоль вертикальной оси симметрии цилиндра. Начало координат расположено в центре сопла на внутренней поверхности цилиндра. Максимальная среднерасходная скорость в проточной (активной) части камеры составила $w=4.6$ м/с. Это соответствует объемному расходу через вихревую камеру $Q_{max}=0.0376$ м³/с, средней скорости потока в сопле $u_s = 37.44$ м/с и числу Рейнольдса $Re_s = 8.1 \cdot 10^4$. Примем для сопла значения $u_{max}=38$ м/с и $Re_s = 8.23 \cdot 10^4$.

Методика выполнения экспериментальных исследований заключалась в том, что первоначально проводилась визуализация потока тремя методами. Обнаруженные структуры потока фотографировались, фиксировались скоростной киносъемкой и видеокамерой. Наиболее характерные места тщательно исследовались термоанемометрической аппаратурой, с помощью лазерного луча, Т-образного экранированного насадка скорости и мобильного датчика направления местных течений. Полученная картина потока в вихревой камере дополнялась результатами измерений микротрубкой Пито, в основном, во внутренних областях вихревой камеры. Экспериментальная установка и методика проведения исследований приведены в [12, 15].

Анализ полученных результатов позволил выделить следующие основные области течения в вихревой камере:

- течение во внутренней области вихревой камеры;
- течение в районе сопла;
- течение в периферической области вихревой камеры;
- течение в районе торца;
- течение в активной области.

Рассмотрим в отдельности особенности течения в указанных частях вихревой камеры и взаимодействие вихревых структур во всех частях вихревой камеры.

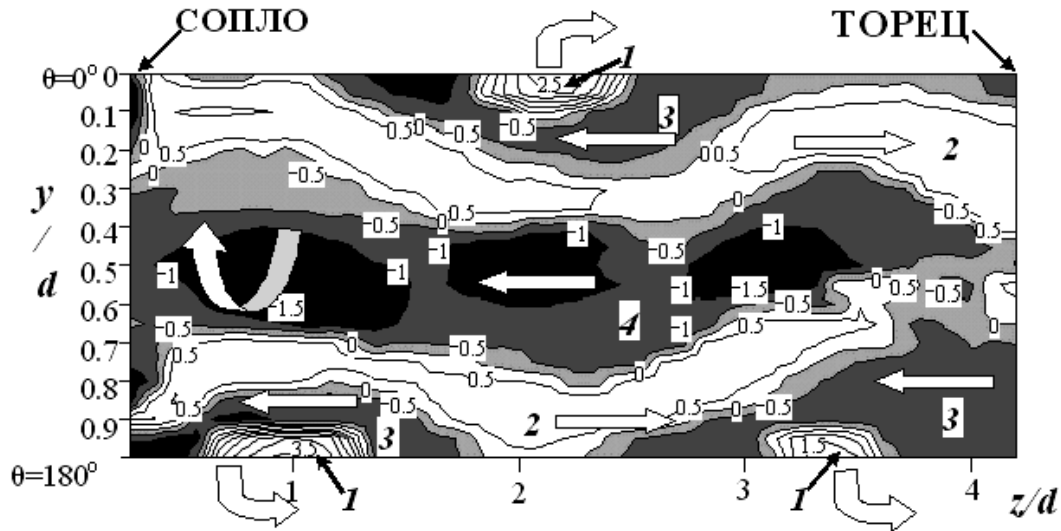


Рис. 1. Распределение осевой скорости вдоль тупиковой области вихревой камеры:
 1 – вихревые системы “усы”; 2 – область течения по направлению к торцу; 3 – периферическая область течения по направлению к активной области; 4 – квазитвердотельное течение; $Re_s = 8.1 \cdot 10^4$, $L/d_0 = 4.4$

2. ТЕЧЕНИЕ ВО ВНУТРЕННЕЙ ОБЛАСТИ ВИХРЕВОЙ КАМЕРЫ

Течение во внутренней области вихревой камеры подробно исследовано с помощью T-образного экранированного насадка скорости, трубки Пито и термо-анемометрической аппаратуры, а также специально изготовленного датчика направления потока [11, 12]. Остановимся кратко на основных результатах исследований, приведенных на рис. 1. Белым цветом обозначено направление течения при $z/d > 0$ (течение к торцу), а серым – направление при $z/d < 0$ (течение в сторону активной области). Черный цвет соответствует более высокой скорости. Цифрами обозначены изолинии равных скоростей в каждой области течения. Цифры соответствуют местной скорости потока, отнесенной к средне-расходной скорости в активной области вихревой камеры. Наибольшая скорость и энергия зафиксированы в области вихрей, так называемых “усов” 1. Вихри имеют спиралевидную форму. При распространении этих вихрей от сопла к торцу их скорость и энергия уменьшаются.

По диаграммам и графикам окружных u и осевых w скоростей, отнесенных к среднерасходной скорости в активной зоне камеры, для спиралевидного крупномасштабного вихревого жгута “усы” в сторону глухого торца имеем:

– при полярном угле $\varphi = 3\pi$ (полтора оборота пристеночной струи после выхода из сопла – “обо-

ротная” струя плюс пол-оборота) $w/U_{mid} = 3.5$;

– при $\varphi = 4\pi - w/U_{mid} = 2.5$;

– при $\varphi = 5\pi - w/U_{mid} = 1.5$.

Измерения проводились при $r_0 = 0,88r_{max}$, где U_{mid} – среднерасходная скорость в проточной части вихревой камеры; r_0 – радиус внутренней поверхности цилиндра; r_{max} – расстояние, при котором окружная скорость максимальна и осевые скорости также близки к максимальным. Максимальная окружная скорость в “усе” на этом же радиусе практически не зависит от продольной координаты и при любых значениях угла составляет $u/U_{mid} = 2.4$.

Таким образом, для полярных углов $\varphi = 3\pi$, $\varphi = 4\pi$ и $\varphi = 5\pi$ по диаграммам скоростей в пятнах “уса” в вертикальной плоскости, по мере приближения к торцу осредненные по времени и поперечным сечениям пятен значения максимальной результирующей (фазовой) скорости винтообразного движения вихревого жгута “усы” соответственно составляют $v = 19.5$; 15.94 и 13 м/с.

Наименее энергонесущими областями потока являются две области. Одна из них имеет форму меандрирующей кольцевой трубки 2, поток в которой направлен к торцу. В результате вращения пристеночной струи, входящей в сопло, в осевой области цилиндра возникает разрежение. В итоге в место пониженного давления в районе сопла устремляется поток воздуха как со стороны торца, так и со стороны активной области.

Движение со стороны торца в активную область

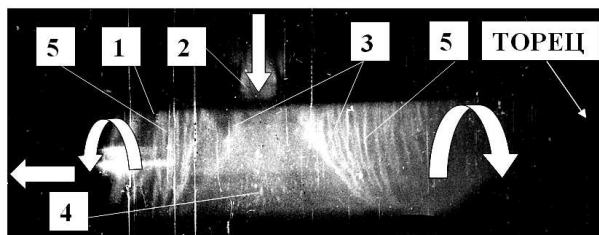


Рис. 2. Визуализация вихревых структур в вихревой камере с помощью пудры (скоростная киносъемка): 1 – вихревая камера; 2 – цилиндр для подачи пудры; 3 – крупные расходящиеся вихревые образования “усы”; 4 – мелкие вихревые структуры; 5 – вихревые структуры, поглощаемые “усами”

вызывается также вентилятором, который высасывает воздух из вихревой камеры. Для компенсации потока, движущегося со стороны торца, в соответствии с условием неразрывности и вследствие возникшего разряжения происходит движение высокоскоростных вихрей в виде “усов”, а также низкоскоростного течения 2 в сторону торца. В активной области за соплом измерения показали обратные токи по направлению от активной области в сторону сопла, вызванные также разряжением в области сопла.

Вторая область низкоскоростного течения 3 направлена от торца в сторону активной области. Такое движение вызвано, с одной стороны, как указывалось, разряжением в районе сопла и, с другой стороны, относительным перемещением жидкости 3 при ее обтекании перемещающимися с большой скоростью “усами”. След “усов” при визуализации позволяет утверждать, что “усы” представляют собой крупную пару вращающихся по направлению к стенке вихрей. Вращение этих вихрей вызывает относительное перемещение жидкости 3 от торца в сторону сопла.

3. ТЕЧЕНИЕ В РАЙОНЕ СОПЛА

На рис. 2 приведена фотография из фильма, полученного с помощью скоростной кинокамеры. Здесь торец расположен справа, а активная зона слева. Над соплом виден цилиндр 2, из которого поступает пудра в вихревую камеру 1. Прямыми стрелками показано направление входящего и выходящего воздуха. При просмотре фильма видно, как при виде спереди от сопла формируются устойчивые крупные вихревые структуры 3 (“усы”), расходящиеся в стороны от сопла по винтовой линии. Направление вращения “усов”

показано криволинейными стрелками. Серый цвет на этих стрелках соответствует движению воздуха в задней части внутренней поверхности цилиндра, а белый цвет стрелки соответствует направлению потока по внутренней поверхности цилиндра в передней его части. Под соплом образуется зона в виде криволинейного конуса, заполненная мелкими вихревыми структурами 4, движущимися вдоль окружности внутренней поверхности цилиндра. “Усы” 3 постоянно поглощают другие более мелкие по отношению к ним вихревые структуры 5, которые поступают сверху вниз по периферии внутренней стенки цилиндра вихревой камеры. С помощью скоростной кинокамеры хорошо виден процесс формирования вихревых структур, которые поглощаются “усами”. Результаты визуализации показали, что скорость движения “усов” сразу за соплом после их формирования составляет 32.6 м/с. Кроме того, видно вращение пары вихрей в “усах” навстречу друг другу.

Подобная картина зафиксирована в фильмах, полученных с помощью видеокамеры и того же метода визуализации. На рис. 3 приведена фотография вихревой камеры с длинным торцом. Также зафиксированы крупные вихревые структуры “усы”, движущиеся по винтовой линии вдоль внутренней поверхности цилиндра вихревой камеры как в сторону торца, так и в активную зону (слева на рисунке).

Параметрические уравнения винтовой линии имеют следующий вид:

$$x = r_0 \cos \varphi, \quad y = r_0 \sin \varphi, \quad z = c\varphi, \quad (1)$$

где $c = w/u$, φ – полярный угол, отсчитываемый от оси x (угол между осью x и радиусом r_0 в плоскости xoy основания цилиндра). Ось z совпадает с осью цилиндра. Приведенные уравнения – это уравнения правого винта. Уравнения левого винта – те же и отличаются только знаком перед коэффициентом c . Длина одного витка винтовой линии запишется в виде

$$s = 2\pi \sqrt{r_0^2 + c^2}. \quad (2)$$

При $u_{max} = 38$ м/с в сопле ($Re_{max} = 8.23 \cdot 10^4$) можно получить уравнение прямой для коэффициента c :

$$c = -0.1326\varphi + 2.708, \quad (3)$$

где φ – в радианах.

Шаг винтовой линии по рис. 3 составил:

$$Z_v = (0.21 \div 0.23) Z_v/d_0 = (2.1 \div 2.2). \quad (4)$$

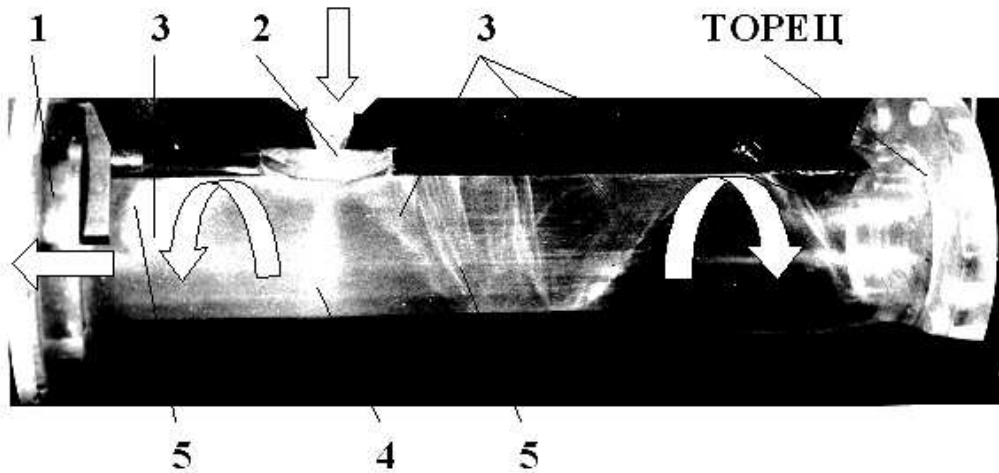


Рис. 3. Визуалізація вихрових структур в вихровій камері при допомозі пудри:
 1 – корпус вихрової камери; 2 – циліндр для подачі пудри; 3 – крупні розходяться вихрові образования “усы”; 4 – мелкіе вихровіе структури; 5 – вихровіе структури, поглицаеміе “усамаи”. $L/d_0 = 4.4$,
 $Re_s = 7.8 \cdot 10^4$, $\alpha = 0^\circ$, $\gamma = 67^\circ$

Вихрова система “усы” состоит из двух вихрей, вращающихся навстречу друг другу. Как показали результаты визуализации, зафиксированные с помощью скоростной кино- и видеокамеры, оба вихря вращаются навстречу друг другу также по вытянутым винтовым линиям. В поперечном сечении каждый вихрь вихровой пары “усы” имеет квазисимметричную форму с негладкой наружной поверхностью, обусловленной взаимодействием с набегающими на “усы” вихревыми системами 5 (рис. 3). Осредненная длина волны в плоскости поперечного сечения этой вихровой пары “усы” составляет $\lambda = (1.2 \div 1.4) \cdot 10^{-2}$ м.

Угол криволинейного конуса под соплом, заполненный мелкими вихрями 4, составляет примерно 55° . Криволинейный конус под соплом неравномерный. В зависимости от длины торцевой зоны угол конусной области различный. Так, при коротком торце угол конусности в сторону торца составляет порядка 30° , а в сторону активной зоны – порядка 25° . При длинном торце, напротив, в сторону торца угол конусной зоны примерно 25° , а в сторону активной зоны возрастает примерно до 45° .

Более мелкие вихревые структуры 5, “подпитывающие” “усы”, также движутся по винтовой линии в тех же направлениях, но шаг их винтовой линии существенно меньше. Поэтому при вращении вдоль образующей цилиндра эти вихревые структуры пересекаются с “усамаи”, которые поглощают их. При коротком торце такое поглощение

происходит вплоть до торца, а при длинном торце поглощение заканчивается до торца. В этом случае к торцу приближаются в основном укрупнившиеся вихревые структуры “усы”.

Наиболее четко удалось зафиксировать развитие указанных вихревых структур при применении сажевого метода визуализации (рис. 4). На верхней фотографии входящая в сопло 2 пристеночная струя направлена под углом $\gamma = 67^\circ$ к внутренней поверхности вихровой камеры 1; угол $\theta = 90^\circ$. Рядом с фотографией справа показано поперечное сечение вихровой камеры. В связи с тем, что поток входит в вихревую камеру не по касательной, за соплом на внутренней поверхности вихровой камеры образуется зона отрыва 5. Так же, как и на рис. 3, зафиксированы крупные вихревые структуры 3 – “усы”. После $\theta = 90^\circ$ под соплом на внутренней поверхности цилиндра вихровой камеры зафиксированы мелкие вихревые структуры 4 типа вихрей Гертлера-Людвига. Кинематические характеристики этих вихрей подробно исследованы в [14, 15]. Справа на верхней фотографии от сопла зафиксированы вихревые структуры 6, движущиеся по винтовой линии. Они, как и на предыдущих фотографиях, поглощаются “усамаи”. Эти вихревые структуры начинают формироваться уже в нижней части фотографии в районе криволинейного конуса. Видно, как вихри 4 укрупняются – появляются черные полосы с большим шагом. Эти укрупненные структуры хорошо видны на концах фотографии справа и слева. Так

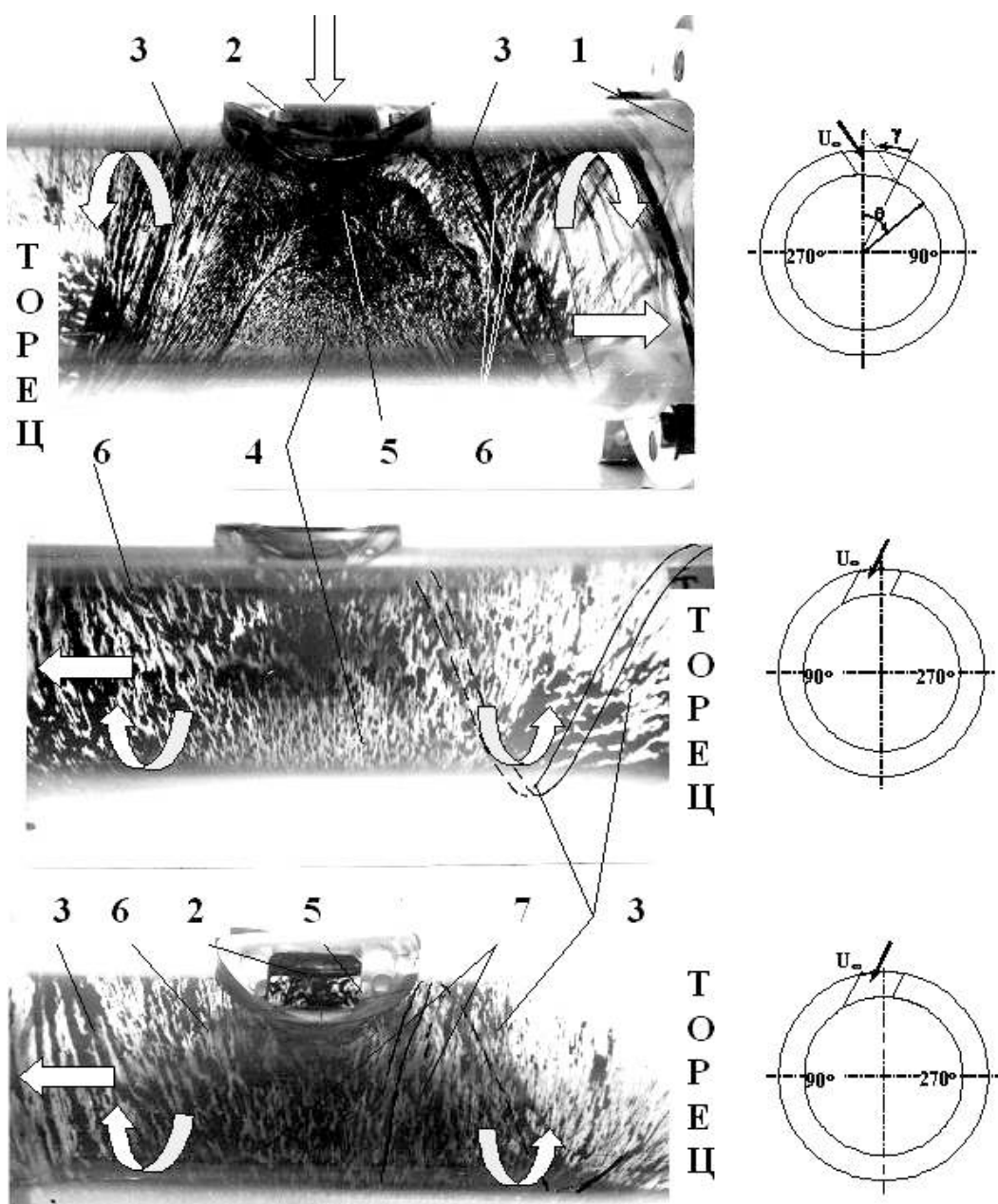


Рис. 4. Визуализация вихревых структур в вихревой камере с помощью сажевого метода: 1 – вихревая камера; 2 – сопло; 3 – крупные расходящиеся вихревые образования “усы”; 4 – мелкие вихревые структуры типа вихрей Гертлера-Людвига; 5 – застойная вихревая область; 6 – вихревые структуры, поглощаемые “усами”; 7 – границы первичной криволинейной пристеночной струи. Сечение вихревой камеры по оси сопла

как цилиндр вихревой камеры выполнен из прозрачного органического стекла, то в этих частях фотографии зафиксированы вихревые структуры на противоположной стороне внутренней поверхности цилиндра – при $\theta > 270^\circ$. Видно также, что темные полоски по винтовой линии переходят на переднюю часть цилиндра в виде вихрей 6.

На средней фотографии запечатлена визуализа-

ция при $\theta > 180^\circ$ – с обратной стороны цилиндра по сравнению с верхней фотографией. Видно, как укрупняются вихри типа Гертлера-Людвига после $\theta = 270^\circ$. При этом в области под соплом укрупнение указанных вихрей происходит медленнее, а конус расширения области вихрей небольшой. “Первичная пристеночная криволинейная струя”, формирующаяся на внутренней поверхности ци-

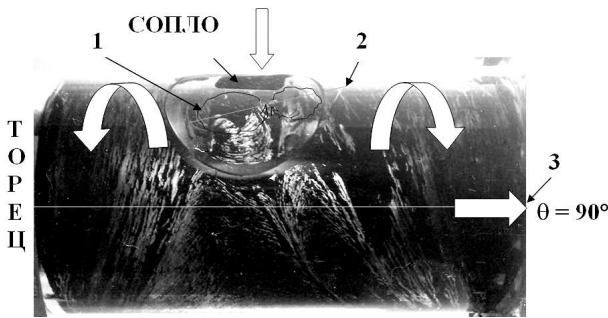


Рис. 5. Визуализация вихревых структур в периферической области вихревой камеры: 1 – торнадоподобные вихри; 2 – ось взаимного расположения вихрей 1; 3 – ось симметрии цилиндра

линдра после сопла, расширяется незначительно вплоть до $\theta = 300^\circ$. Затем эта струя при приближении к соплу начинает расширяться вследствие натекания на входящую из сопла “первичную” струю.

Справа и слева по отношению к этой области пристеночной струи зафиксировано существенное расширение струи и формирование больших размеров вихревых структур. Природа этих вихрей иная, по сравнению с вихрями типа Гертлера–Людвига. Справа на средней фотографии штриховой линией показаны контуры “усов”, которые просматриваются на противоположной стенке цилиндра через его прозрачные стенки. Сплошные линии фиксируют винтовой след “усов” с обратной стороны цилиндра вихревой камеры при $180^\circ < \theta < 270^\circ$. На нижней фотографии линиями 7 условно обозначены границы “первичной пристеночной криволинейной струи”. В сопле 2 видны вихри 5 в отрывной области на стенке цилиндра за соплом.

При исследовании Гертлеровской устойчивости [14] зафиксированы пары вихрей. В одной паре скорости вращения вихрей направлены от стенки. Область между ними называется пиком. При этом жидкость между вихрями выносится в наружную область пограничного слоя. Расположенная соседняя пара, включая один из рассмотренных продольных вихрей, имеет вращение, направленное к стенке. Область между этими вихрями называется впадиной. В этом случае воздух между вихрями направлен к обтекаемой стенке. На фотографиях визуализации с помощью пудры видны светлые полосы – области впадин между вращающимися соседними вихрями, в которых поток заторможен и направлен к стенке. Поэтому пудра в этих местах прилипает к стенке. Движение вихрей динамическое – светлые полосы постоянно меняют форму

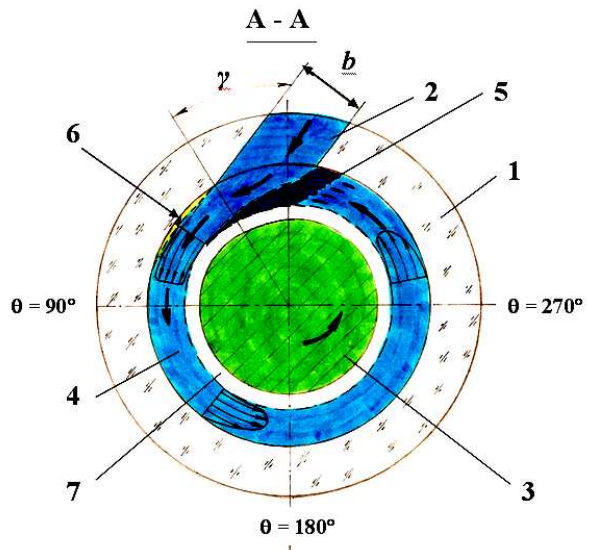


Рис. 6. Схема течения внутри вихревой камеры: 1 – цилиндр вихревой камеры; 2 – сопло; 3 – квази-твердотельное течение; 4 – контуры “первичной” пристеночной струи; 5 – контуры “вторичной” пристеночной струи; 6 – отрывная область – зона торнадоподобных вихрей; 7 – области течения к торцу

и положение.

На рис. 5 приведена фотография визуализации сажевым методом вихревых структур на внутренней поверхности вихревой камеры. Течение во входящей струе сопла направлено навстречу наблюдателю, т.е. ось цилиндра на фотографии соответствует примерно $\theta = 90^\circ$ (см. рис. 4). За соплом видны два торнадоподобных вихря по отношению к внутренней поверхности цилиндра. Оси взаимного расположения этих вихрей смещены по отношению к образующей цилиндра. Положение этих вихрей нестационарно относительно друг друга.

4. ТЕЧЕНИЕ В ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ ВИХРЕВОЙ КАМЕРЫ

Структура потока внутри вихревой камеры в районе сопла приведена на рис. 6. Средняя часть потока 3 в вихревой камере 1 – это квази-цилиндрическое квази-твердотельное вращение потока по направлению от торца к активной части вихревой камеры (навстречу наблюдателю). Диаметр такого течения в районе сопла составляет примерно 0.6 внутреннего диаметра цилиндра. В сопле формируется пристеночная струя 2, поперечное сечение которой сразу за срезом сопла уменьшается и прижимается к внутренней поверхности

цилиндра под действием двух факторов: центробежной силы и “вторичной” пристеночной струи 5. В соответствии с законами неразрывности и сохранения массы “первичная” пристеночная струя существенно уменьшает толщину и одновременно увеличивает ширину так, что площадь ее поперечного сечения постоянна с учетом потерь на трение. Толщина “первичной” пристеночной струи составляет примерно половину ширины b сопла. Сделав один оборот, “первичная” пристеночная струя настекает на выходящий из сопла поток. При этом она прижимает выходящий поток к внутренней стенке цилиндра, а сама обтекает этот поток по ширине, как условно показано на нижней части рис. 6. Область пристеночной струи, которая обтекает выходящий из сопла поток, условно назовем “вторичной” пристеночной струей.

На рис. 7 приведена схема формирования вихревых структур в периферической области вихревой камеры. Как видно из рис. 6, в зависимости от угла γ длина стенок сопла изменяется. Например, при $\gamma = 67^\circ$ длина стенки справа составляет примерно 21 мм, а слева – 36 мм. Несмотря на округления, в угловых местах сопла имеются предпосылки для формирования пар угловых вихрей. При этом скорость вдоль стенок сопла существенно возрастает от нулевого значения на наружной границе сопла до максимального значения на внутренней границе сопла. На рис. 7 показаны пары вихрей 3, 4 в угловых областях сопла. В соответствии с указанной картиной нестационарного течения в сопле вихревые пары будут возникать не в начале сопла, а примерно в середине толщины сопла. Значения скорости, геометрических размеров и завихренности вихревых пар 3 и 4 будут существенно отличаться, а их диаметр вдоль сопла будет изменяться в связи с ускорением потока по толщине сопла. Согласно рис. 6 завихренность пары вихрей 3, сформированных в угловых областях сопла на стороне сопла, примыкающей к внутренней поверхности цилиндра, будет существенно больше, чем у вихрей 4, которые будут вытекать из сопла и развиваться во внутренней области “первичной” пристеночной струи. Первые из указанных вихревых пар 3 будут источником зарождения вихрей 5 (“усы”).

В отрывной области за соплом на внутренней поверхности цилиндра 1 формируются торнадоподобные вихри 6. В пристеночной области “первичной” пристеночной струи зафиксированы системы вихрей 7 типа Гертлера–Людвига, которые увеличиваются по мере продвижения пристеночной струи вдоль внутренней поверхности цилиндра. Измерения показали (рис. 6), что между течениями

пристеночной струи 4 и квазитвердотельного ядра 3 внутри торцевого участка вихревой камеры существует низкоскоростное течение 7 (см. также рис. 1). Таким образом, согласно рис. 6, наблюдается сильное вращение слоя пристеночной струи, которая движется между внутренней поверхностью цилиндра и низкоскоростного слоя жидкости 7. При проведении многочисленных экспериментов Тейлоровского течения известны несколько типичных вариантов:

- вращается наружный цилиндр, а внутренний остается неподвижным;
- вращается внутренний цилиндр, а наружный остается неподвижным;
- вращается наружный цилиндр, а внутренний вращается в ту или иную сторону со значительно меньшей скоростью;
- во время проведения экспериментов внутренний цилиндр приводится в периодическое движение относительно продольной оси цилиндра.

Таким образом, при анализе обнаруженных типов течения в вихревой камере становится очевидным, что имеются необходимые предпосылки к существованию Тейлоровского типа течения во вращающейся пристеночной струе. На рис. 7 показаны пары Тэйлоровских вихрей 10, возникающих в “первичной” 8 и “вторичной” 9 пристеночных струях. Так как толщина “вторичной” пристеночной струи 9 больше толщины “первичной” пристеночной струи, то размеры Тэйлоровских вихрей также отличаются в области этих струй. Тэйлоровские вихри поглощают менее энергоемкие системы вихрей типа Гертлера–Людвига. И уже после одного оборота пристеночной струи визуализация зафиксировала следы в области впадин от пар Тэйлоровских вихрей. На видеофильмах хорошо видно, как эти системы Тэйлоровских вихрей при достижении вихрей типа “усы” поглощаются последними, энергия которых существенно больше, а размеры соизмеримы. Таким образом, взаимодействие вихрей происходит в соответствии с законами взаимодействия вихревых возмущений [16, 17].

5. ТЕЧЕНИЕ В РАЙОНЕ ТОРЦА

Чрезвычайно важны закономерности течения непосредственно вблизи торца, где поток вихрей “усы” и низкоскоростное течение 2 (см. рис. 1) преобразуется в квази-твердотельное течение, движущееся в сторону активной области. На рис. 8 приведены результаты визуализации потока вблизи торца, полученные с помощью пудры. К цилиндру

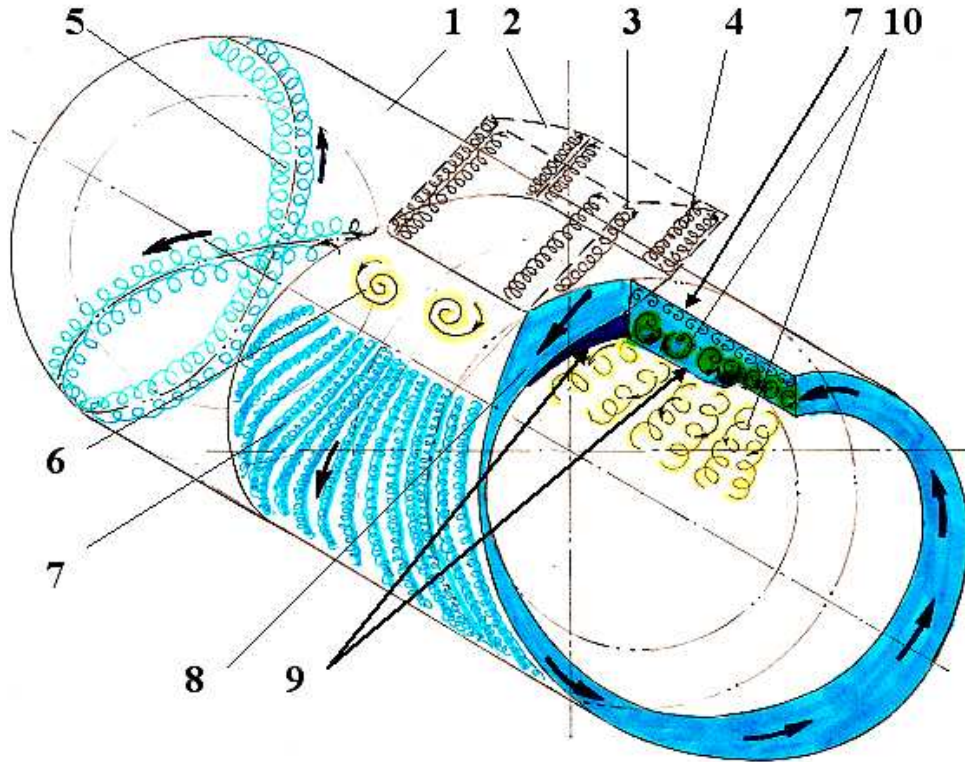


Рис. 7. Схема формирования вихревых структур в периферической области вихревой камеры: 1 – цилиндр вихревой камеры; 2 – сопло; 3, 4 – пары вихрей в угловых местах сопла; 5 – крупные вихревые системы “усы”; 6 – торнадоподобные вихри в отрывной зоне за соплом; 7 – система вихрей типа Гертлера–Людвига; 8 – “первичная” пристеночная струя; 9 – “вторичная” пристеночная струя; 10 – система вихрей типа Тейлоровских

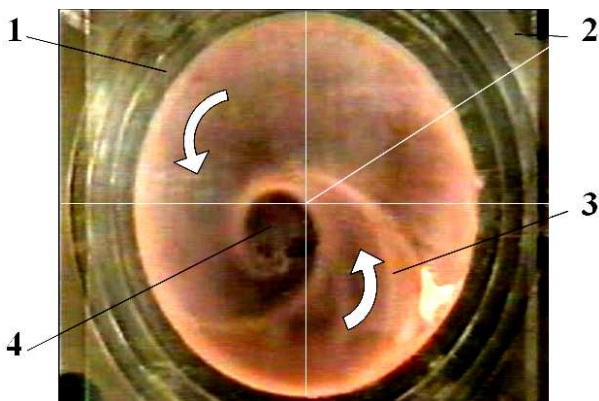


Рис. 8. Визуализация структуры потока в районе торца вихревой камеры: 1 – цилиндр вихревой камеры; 2 – торцевая прозрачная пластина; 3 – конусообразное спиральное течение вблизи торца; 4 – квази-твердотельное течение

Это позволило наблюдать характер течения вблизи торца, на внутренней поверхности цилиндра и на самом торце. Вихревые системы,двигающиеся к торцу вдоль внутренней поверхности цилиндра, при соприкосновении с торцом делают неполный оборот в угловой области сопряжения цилиндра с торцом. Затем это угловое течение преобразуется в конусообразное спиральное течение 3, которое отделяется от торца и направляется в активную область. По мере удаления от торца диаметр поверхности конусообразного течения уменьшается, а скорость течения по спиральной конусообразной поверхности возрастает.

На расстоянии, равном примерно радиусу цилиндра, скорость вращения возрастает настолько, что пудра диффундирует. Поэтому на рис. 8 видно темное округлое пятно, которое представляет собой начало развития квази-твердотельного течения 4 вблизи продольной оси цилиндра. Криволинейные стрелки на рис. 8 показывают направление вращения соответствующих вихревых структур, а светлые линии – оси координат цилиндра. Спра-

вихревой камеры с торца 1 примыкает прозрачная пластина 2, выполненная из органического стекла.

ва на рис. 8 видна застойная область, в которой накапливается пудра. В соответствии с приведенными в разделе 3 сведениями об особенности течения пары вихрей можно считать, что белые следы пудры на рис. 8 отражают течение пары вихрей, вращающихся навстречу друг друга. На рис. 8 зафиксированы две пары спиралеобразных вихрей. Наблюдаются также нечеткие следы более мелких пар вихрей. Указанные вихри являются следами “усов”, вращающихся вдоль торца. Две пары спиралеобразных вихрей соединяются на некотором удалении от торца в одну пару вихрей, которая резко уменьшает радиус спирали и формирует квазитвердотельное движение. Более размытая поверхность пудры на торце представляет собой след от течения 2 (рис. 1). Период смены картины визуализации на торце – $0.16 \div 0.24$ с. Скорость вращения вдоль торца такая же, как и в вихревой паре “усы”, измеренной вблизи торца. Диаметр спиралеобразного торнадоподобного вихря уменьшается в 4 раза по сравнению с размером вихря на торце и составляет

$$d_v/d_o = 0.22 \div 0.24. \quad (5)$$

Теоретически подобная картина течения решена Бёдевадтом [18] вблизи плоского диска. Получено точное решение уравнения Навье-Стокса, когда на большом расстоянии от стенки вращается жидкость с постоянной угловой скоростью ω вокруг оси, перпендикулярной к плоскости диска. Для частиц жидкости, находящихся на большом расстоянии от стенки, центробежная сила и радиальный градиент давления взаимно уравновешиваются. Для частиц же жидкости, находящихся вблизи стенки, окружная скорость вследствие торможения понижена, поэтому здесь центробежная сила значительно уменьшена. При этом направленный внутрь радиальный градиент давления остается таким же, как и на большом расстоянии от стенки. В результате вблизи стенки возникает направленное внутрь радиальное течение, которое, в свою очередь, вызывает, вследствие условия неразрывности, восходящее течение в осевом направлении.

На рис. 9 приведена схема течения, принятая в расчете Бёдевадта. Величины u , v , w – составляющие скорости соответственно в радиальном, окружном и осевом направлениях. Вблизи диска окружная скорость вследствие трения заторможена. В результате возникает вторичное течение, направленное радиально внутрь диска.

Учитывая рассмотренные выше картины визуализации течения в вихревой камере, становится

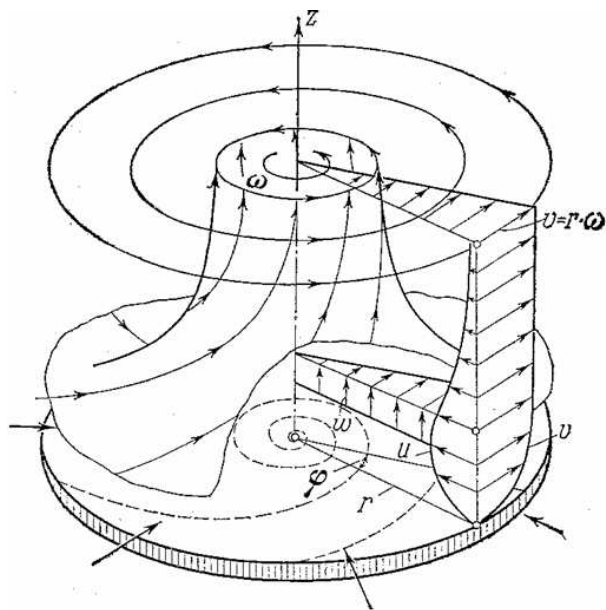


Рис. 9. Вращательное движение жидкости над неподвижным основанием [18]

очевидным, что структуры потока в вихревой камере и в теоретической задаче Бёдевадта существенно отличаются. В вихревой камере квазитвердотельное течение вдоль продольной оси цилиндра от торца возникает вследствие существующего разряжения в районе сопла и за счет притока к торцу вихревых пар “усы”, а также низкоскоростного течения 2 (см. рис. 1). При этом поток внутри вихревой камеры имеет взаимно противоположное течение. Вращение вблизи торца осуществляется за счет вращающихся по винтовой линии вихревых систем “усы”, а их движение приводит к меандрированию всех подвложенных цилиндрических структур течения внутри вихревой камеры (рис. 1).

Анализ видеофильмов, на которых были зафиксированы особенности вихревых структур, показал, что на торце центр формирования торнадоподобного течения находится примерно на половине радиуса, расположенного почти посередине третьего квадранта – между $\theta = 180^\circ$ и $\theta = 270^\circ$.

Для торнадоподобного спиралеобразного вихревого течения, формирующегося вблизи торца в середине вихревой камеры и преобразующегося в дальнейшем в квазитвердотельное течение, можно применить вторую кинематическую теорему Гельмгольца о вихрях. Эта теорема, одинаково справедливая для движения невязкой и вязкой жидкостей, утверждает, что интенсивность вихревой трубки одинакова по ее длине.

Для вихревой трубки конечных размеров и осредненных значений модулей завихренности Ω_1 и Ω_2 в ее поперечных сечениях σ_1 и σ_2 имеем:

$$\Omega_1 \cdot \sigma_1 = \Omega_2 \cdot \sigma_2. \quad (6)$$

Основание конической вихревой воронки расположено на поверхности глухого торца камеры. Протяжённость воронки приблизительно равняется среднему диаметру ее основания, размер и расположение которого на торце зависят от геометрических параметров впускного сопла, относительной глубины тупиковой части камеры и, в меньшей мере, от расходного режима работы камеры. Конический спиралевидный характер центрального торнадоподобного вихря, по-видимому, обусловлен поджимающим влиянием на него вихревой структуры “усы”, движущейся во встречном направлении к торцу и обладающей значительно большей кинетической энергией вращения.

Результаты визуализации и инструментальных измерений позволили обнаружить увеличение окружной скорости вращения газа на коническом спиралевидном участке вихревой трубки при удалении от торца. Это согласуется со второй теоремой Гельмгольца о вихрях: при уменьшении площади поперечного сечения вихревой трубки увеличивается угловая скорость вращения частиц. Квазитвердотельный закон вращения спиралевидного вихря приводит к соответствующему росту окружной скорости на видимой поверхности раздела рассматриваемой торнадоподобной вихревой трубки.

Согласно теореме Стокса, интенсивность вихревой трубки равна циркуляции скорости по любому охватывающему ее замкнутому контуру. Циркуляция скорости оценивает момент количества движения вращающегося вихревого образования, приведенный к единице массы жидкости. В простейшем случае цилиндрической вихревой трубки радиуса r циркуляция скорости по её контуру равна $\Gamma = 2\pi vr$ и приближённо принята постоянной по абсолютной величине. Здесь скорость v направлена по касательной к окружности. Отсюда следует, что уменьшение радиуса вихревой трубки в результате поджатия её на коническом приторцевом участке должно сопровождаться ростом окружной скорости вращения.

Вращение вихревой системы “усы” вдоль внутренней поверхности цилиндра так же, как и вращение пристеночной струи в районе сопла, приводит к разряжению в периферической области цилиндра. Это разряжение существенно меньше, чем в районе сопла, так как количество движения

“усов” меньше, чем у пристеночной струи. В результате этого разряжения на некотором удалении от торца спиралевидное торнадоподобное течение увеличивает диаметр и уменьшает окружную и осевую скорости твердотельного течения.

При длинном торцевом участке вихревой камеры (рис. 3) при приближении к торцу все квазитэйлоровские системы вихрей поглощены вихревыми системами “усы”. К торцу поток переносится в основном “усами”. В этом случае (см. рис. 1) на внутренней поверхности цилиндра существуют области низкоскоростного течения \mathcal{Z} , направленного в сторону активной области (от торца). При этом на поверхности цилиндра визуализация позволила зафиксировать в пограничном слое этих областей системы продольных вихрей, подобных 7 этапу переходного пограничного слоя на плоской пластине [16]. Были зафиксированы также возмущения, подобные Λ -образным вихрям на 4 этапе в переходном пограничном слое плоской пластины. На рис. 10 приведены фотографии таких вихревых структур. Стрелкой показано направление низкоскоростного течения вблизи внутренней поверхности цилиндра.

6. ТЕЧЕНИЕ В АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ

На рис. 11 приведена фотография визуализации течения в вихревой камере, полученная из соответствующего видеofilmа, при наличии короткого торца. Сравнение с визуализацией обтекания вихревой камеры с длинным торцом (рис. 3) показало отличие картины течения в области торца. Кроме того, короткий торец позволяет обнаружить особенности течения в активной области.

За соплом в сторону активной области формируется $2 \div 3$ “уса”, которые поглощают квазитэйлоровские вихри на очень коротком расстоянии от сопла. Шаг винтовой линии “усов”, движущихся в активную область, в $2 \div 3$ раза меньше, чем шаг винтовой линии “усов”, движущихся в сторону торца.

Шаг винтовой линии по рис. 11 составил:

$$Z_v = (0.08 \div 0.1) Z_v/d_o = (0.8 \div 0.95). \quad (7)$$

Через $z/d_o = 1.5$ шаг резко возрастает до значений $Z_v/d_o = (1.75 \div 1.88)$. В дальнейшем, в направлении в активную область на расстоянии $(2 \div 3)d_o$ система “усов” сливается в один “ус”. При этом шаг винтовой линии такого “уса” становится примерно равным (несколько больше) ша-

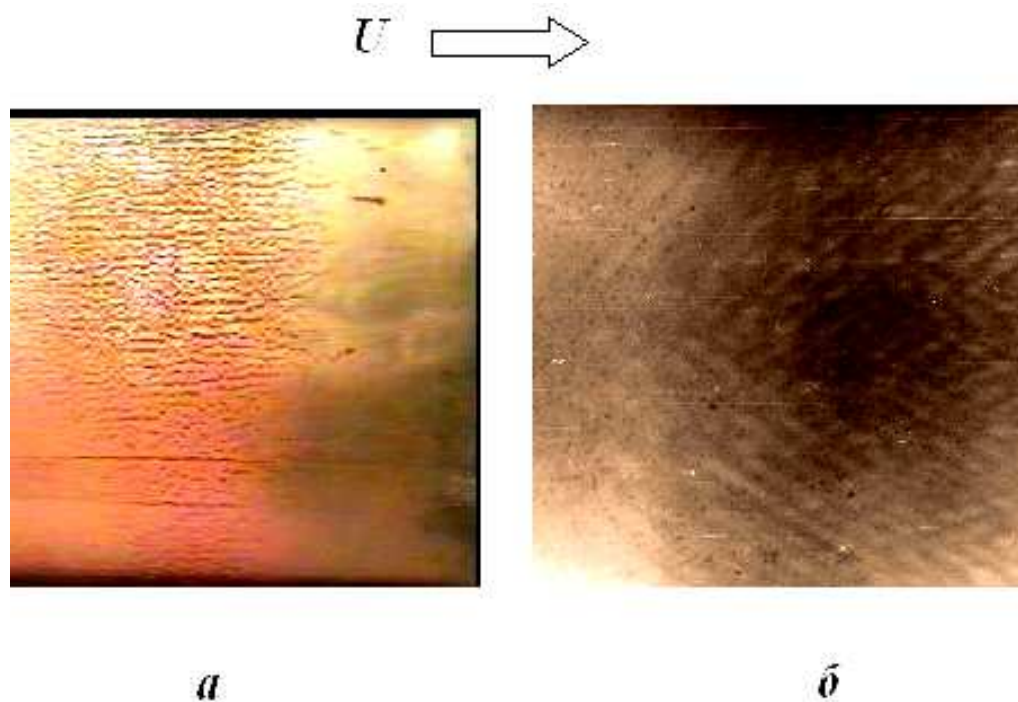


Рис. 10. Продольные и Λ -образные вихревые структуры на поверхности цилиндра вблизи торца вихревой камеры

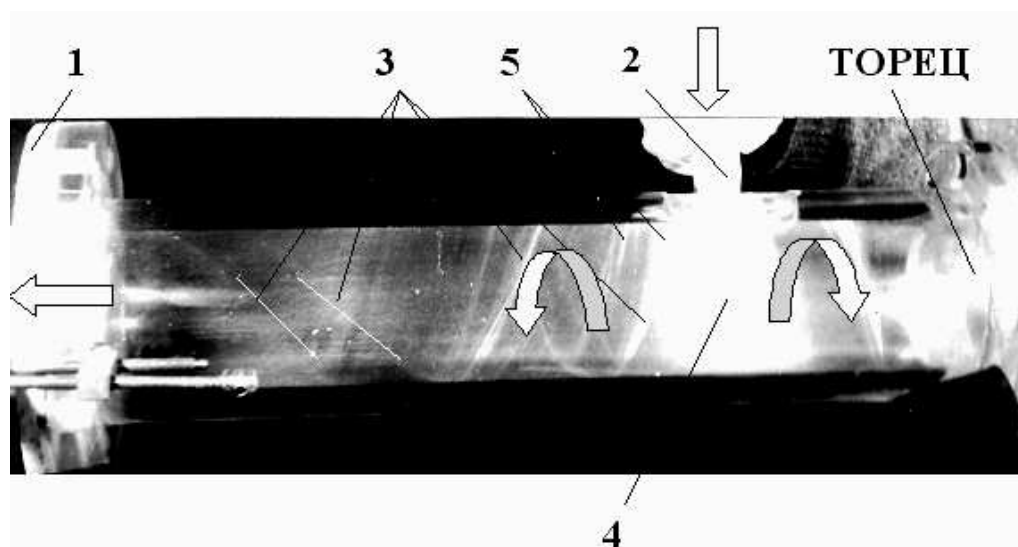


Рис. 11. Визуализация вихревых структур в вихревой камере с коротким торцом: 1 – корпус вихревой камеры; 2 – цилиндр для подачи пудры; 3 – крупные расходящиеся вихревые образования (“усы”); 4 – мелкие вихревые структуры; 5 – квази-тэйлоровские вихревые структуры, поглощаемые “усами”

гу “уса”, движущегося в сторону длинного торца (рис. 3).

Формирование 2 ÷ 3 “усов” вблизи сопла в сторону активной области связано с особенностью движения жидкости в квазитвердотельном ядре.

Структура вихревых течений в сторону активной области несколько отличается от развития течения в сторону торца. При вращении входящей в сопло пристеночной струи в районе сопла в центральной части цилиндра вихревой камеры во-

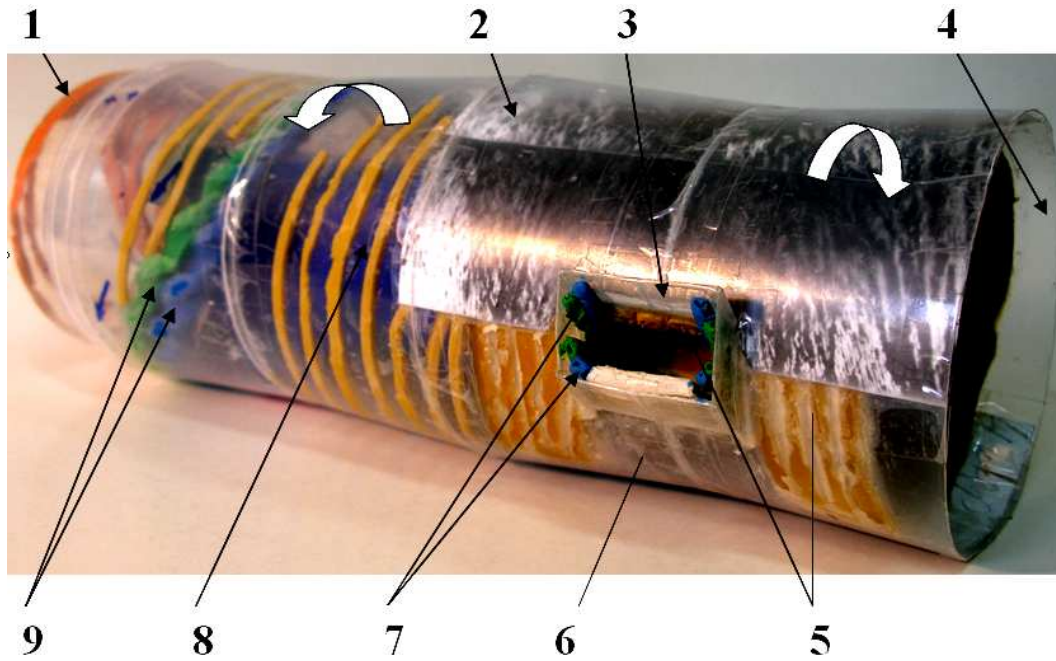


Рис. 12. Макет вихревых структур вихревой камеры:
 1 – торцевая часть; 2 – цилиндр; 3 – сопло; 4 – активная область; 5 – квази-тэйлоровские вихри; 6 – вихри типа Герлера-Людвига; 7 – вихри в угловых местах сопла; 8 – квази-твердотельное течение вдоль продольной оси цилиндра; 9 – вихревые пары “усы”

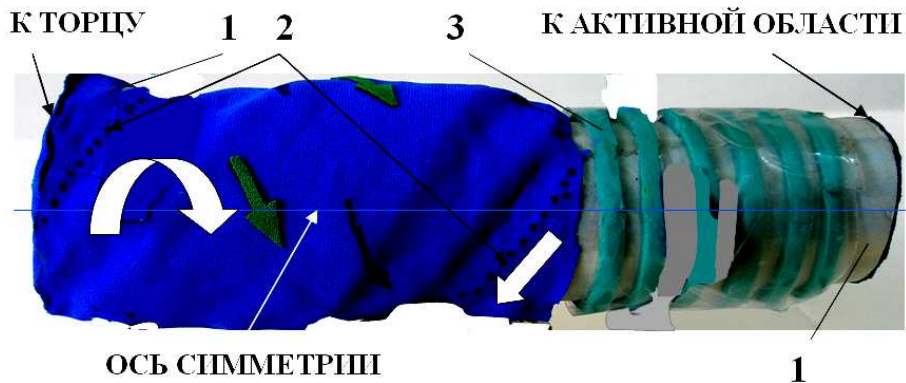


Рис. 13. Форма квазитвердотельного цилиндра по оси вихревой камеры:
 1 – квазитвердотельное течение вдоль продольной оси цилиндра; 2 – места расположения вихревой пары “усы”; 3 – квази-тэйлоровские вихри

зникает разрежение. При движении жидкости в активную область в результате разрежения в пристеночной области цилиндра возникают обратные токи жидкости, которые формируют слой 2 (см. рис. 1). При этом квазитвердотельное течение по оси цилиндра за соплом в сторону активной области увеличивается в диаметре, а шаг винтовой линии “усов” резко уменьшается. Квазитвердотельное течение после прохождения оси симметрии сопла имеет пульсационный характер. По мере за-

тухания этих колебаний диаметра квазитвердотельного течения формируется вихревая структура “усы” такого же типа, что и в случае длинной торцевой области. В зависимости от длины активной области вихревая структура “усы” постепенно диссипирует и сливается с твердотельным течением, имеющем слабо-винтовое движение.

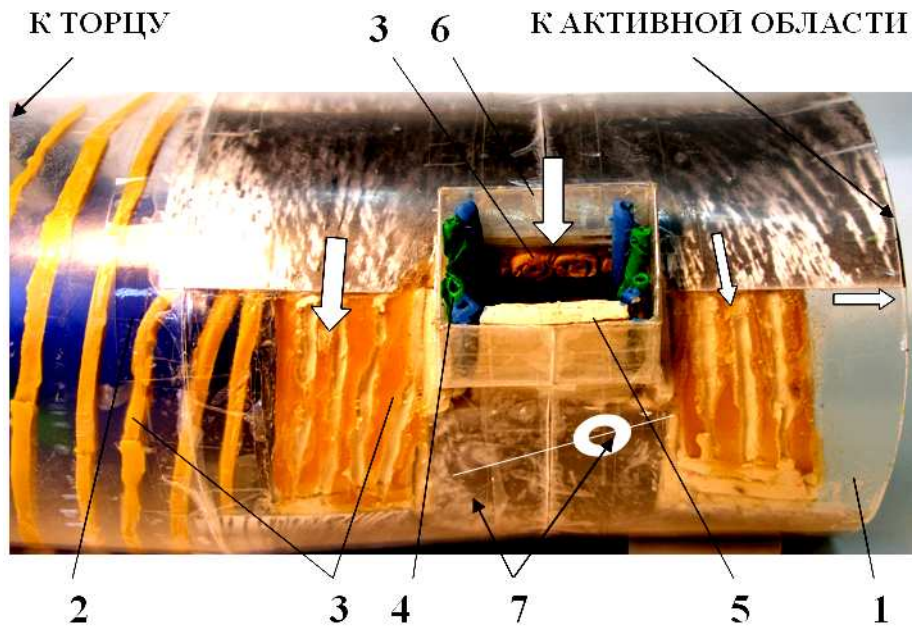


Рис. 14. Макет вихревых структур в районе сопла:

1 – цилиндр вихревой камеры; 2 – квазитвердотельное течение вдоль продольной оси цилиндра; 3 – квази-тэйлоровские вихри во “вторичной” пристеночной струе; 4 – пары вихрей в угловых местах сопла; 5 – элемент входящего в сопло потока; 6 – сопло; 7 – торнадоподобные вихри в отрывной зоне за соплом

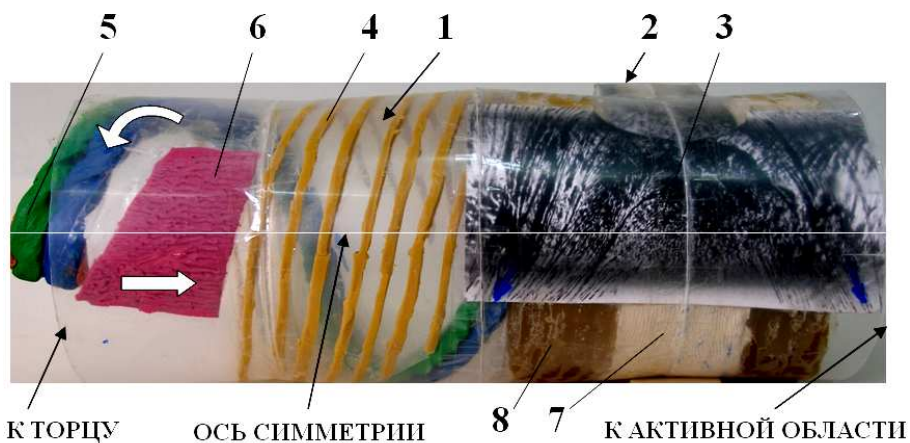


Рис. 15. Вихревые структуры в периферической области при $\theta = 90^\circ$:

1 – цилиндр вихревой камеры; 2 – сопло; 3 – вихри типа Гертлера-Людвига; 4 – квази-тэйлоровские вихри во “вторичной” пристеночной струе; 5 – вихревой пары “усы”; 6 – системы продольных вихрей на внутренней поверхности цилиндра вблизи торца вихревой камеры; 7 – “первичная” пристеночная струя; 8 – “вторичная” пристеночная струя

7. МАКЕТ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР ВИХРЕВОЙ КАМЕРЫ

На основании приведенных выше результатов исследования картин визуализации и количественных измерений был разработан и изготовлен трехмерный макет развития вихревых структур тече-

ния в вихревой камере. На рис. 12 приведена общая схема взаимодействующих вихревых структур. Рассмотрим вихревые структуры в соответствии с вышеприведенными разделами. Основные виды вихревых структур течения во внутренней области вихревой камеры приведены на рис. 1. Рассмотрены четыре типа вихревых структур: 1 – вихревые системы “усы”; 2 – область течения по

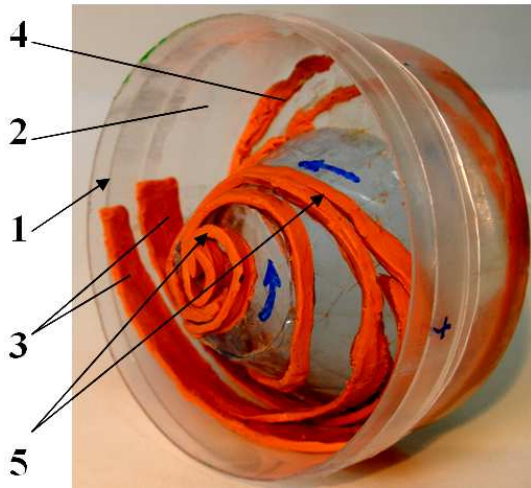


Рис. 16. Вихревые структуры на торце при виде изнутри:

1 – цилиндр вихревой камеры; 2 – торец; 3 – вихревые пары “усы”, приближающиеся к торцу; 4 – вихревые системы, вращающиеся на стенке торца; 5 – вихревые системы, закручивающиеся в квазитвердотельное течение по спирали

направлению к торцу; 3 – периферическая область течения по направлению к активной области; 4 – квазитвердотельное течение.

Обозначенные на рис. 12 квазитэйлоровские вихри 5 сформированы во “вторичной” пристеночной струе. Вихри 5 взаимодействуют с вихрями типа Гертлера–Людвига 6 и вихрями 7, возникающими в угловых местах сопла. За внутренней кромкой сопла 3 на внутренней поверхности цилиндра 2 возникает местный отрыв “первичной” пристеночной струи в районе сопряжения сопла 3 с цилиндром 2. В области присоединения зоны отрыва к поверхности цилиндра в результате взаимодействия вихрей 5, 6 и 7 возникают крупные вихревые пары 9 – “усы”. Эти вихревые пары движутся вдоль внутренней поверхности цилиндра по винтовой линии к торцу и в активную область. По мере продвижения вихревые пары “усы” поглощают квазитэйлоровские вихри, энергия которых и шаг винтовой линии существенно меньше, чем у “усов”.

На рис. 13 представлена форма квазитвердотельного течения 1 от торца в активную область. Крупными стрелками показано вращение течения 1 по винтовой линии слева направо. Точками 2 показано место расположения вихревой пары “усы” в пристеночной области внутренней поверхности цилиндра. Светлая стрелка показывает направление движения “усов” справа налево. Существуют все необходимые предпосылки для формирования

на поверхности квазитвердотельного течения системы квазитэйлоровских вихрей 3.

Согласно результатам измерений, приведенных на рис. 1, между квазитвердотельным течением и “усами” существуют два квази–цилиндрических течения: 2 (движение от сопла к торцу вследствие разряжения в районе сопла) и 3 (движение от торца в активную область).

Рассмотрим типы вихревых структур в районе сопла. На рис. 14 приведен макет области течения в районе сопла. Соответствующая схема представлена на рис. 7. Система квазитэйлоровских вихрей 3 зафиксирована в процессе визуализации вблизи внутренней поверхности цилиндра во “вторичной” пристеночной струе. Пара торнадоподобных вихрей 8 образовалась в отрывной области “первичной” пристеночной струи за стыком сопла с внутренней поверхностью цилиндра. Ось, условно соединяющая эту пару вихрей 8, меандрирует.

Течение в периферической области вихревой камеры приведено на рис. 15 (квазитвердотельное течение по оси цилиндра не показано). Поток входит в сопло навстречу наблюдателю ($\theta = 90^\circ$). Соответствующие пояснения формирования вихревых структур приведены выше. На рис. 11 показаны продольные и Λ -образные вихревые структуры на поверхности цилиндра вблизи торца вихревой камеры. На рис. 15 – продольные вихревые структуры 6, зафиксированные на видеофильме. Форма указанных вихревых структур зависит от местного числа Рейнольдса, зависящего, в частности, от скорости в сопле и длины торцевого участка. Течение в области указанных продольных вихревых структур направлено от торца в сторону активной области (показано белой стрелкой) в соответствии с рис. 1. Криволинейная стрелка обозначает направление движение “усов”.

Течение в районе торца приведено на рис. 16. В соответствии с видеофильмом и измерениями, приведенными, в частности, на рис. 1, к торцу подходят два типа течения: вихревая система “усы” 1 и квази–цилиндрический закрученный поток 2. При этом скорость, а, следовательно, и количество движения в вихрях 1 в три раза больше, чем в течении 2. В районе торца оба типа течения соединяются и вращаются на торце так, как показано на рис. 8, 9. Вследствие вращения вблизи торца в районе продольной оси цилиндра вихревой камеры возникает разряжение, как в вихревых системах торнадо. Видеофильм позволил увидеть, что вращающийся на торце 2 вихревой камеры поток 4 (рис. 16) втягивается в вихревую трубку 5 и по воронкообразной поверхности устремляется в сторону активной области в виде вращающегося ква-

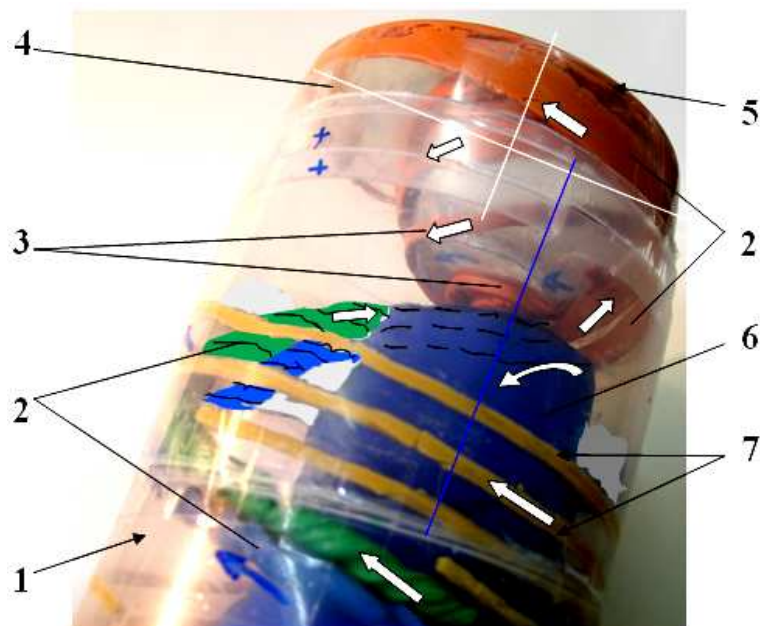


Рис. 17. Взаимодействие вихревых структур в районе торца:
 1 – цилиндр вихревой камеры; 2 – вихревой пары “усы”; 3 – вихревые системы, закручивающиеся в торнадоподобный вихрь; 4 – вихревые системы, вращающиеся на торце; 5 – торец; 6 – квазитвердотельное течение; 7 – квази-тэйлоровские вихри

зитвердотельного течения.

На рис. 17 приведено взаимодействие вихрей в районе торца вихревой камеры. Темной линией показана продольная ось симметрии торнадоподобного вихря в районе торца. Вихревые пары “усы” 2 по винтовой линии направляется к торцу 5, на котором вращаются совместно с торцевыми вихрями 4. Ускоряясь и смещаясь к центру, торцевое течение 4 ввинчивается в воронку и вращается в торнадоподобном вихре 3, который формирует квазитвердотельное течение 6 на некотором удалении от торца, примерно равном радиусу торца.

Как указывалось ранее, продольная ось воронки торнадоподобного вихря 3 смещена относительно продольной оси цилиндра и располагается примерно на половине радиуса торца. Это расстояние зависит от параметров сопла. Затем диаметр воронки увеличивается, и течение трансформируется в квазитвердотельное, угловая скорость которого уменьшается по мере продвижения к соплу.

ВЫВОДЫ

Разработана методика проведения тонких физических экспериментальных исследований на специально сконструированной и изготовленной экспериментальной установке вихревой камеры. Методика включает различные методы визуализа-

ции и фиксирования полученных результатов с помощью скоростной кино- и видеокамеры. Обнаруженные характерные места вихревых структур в дальнейшем исследовались с помощью современной измерительной аппаратуры, позволившей выполнить количественные измерения различных параметров течений.

Впервые обнаружены и детально измерены характерные типы вихревых структур в различных участках вихревой камеры. К ним относятся вихревые системы “усы”, расходящиеся вихри типа Гертлера-Людвига, пара вихрей типа торнадо за соплом, различные виды квазитэйлоровских вихрей и спиралевидная система вихрей типа торнадо, основание которой расположено на торце, а другой конец формирует квазитвердотельный вихрь, движущийся от торца в сторону вихревой камеры. Приведены характерные масштабы и кинематические характеристики этих вихревых структур.

Последовательно рассмотрено взаимодействие характерных вихревых структур в основных областях течения в вихревой камере: во внутренней области вихревой камеры; в районе сопла; в периферической области вихревой камеры; в районе торца и в активной области.

На основании полученных результатов изготовлен трехмерный макет обнаруженных и исследо-

ванных вихревых структур и течений вихревой камеры. Это дало возможность выполнить анализ закономерностей формирования и взаимодействия указанных типов вихревых структур.

Полученные результаты распределения геометрических, кинематических и динамических параметров течения в различных местах вихревой камеры позволяют разработать программу исследования методов управления течения и эффективности вихревой камеры.

1. Кутателадзе С. С., Волчков Э. П., Терехов В. И. Аэродинамика и теплообмен в ограниченных вихревых потоках.– М.: Энергоатомиздат, 1987.– 283 с.
2. Волшаник В. В., Зуйков А. Л., Мордасов А. П. Закрученные потоки в гидротехнических сооружениях.– М.: Энергоатомиздат, 1990.– 280 с.
3. Халатов А. А., Шевчук И. В., Авраменко А. А., Кобзарь С. Г., Железная Т. А. Термогазодинамика сложных потоков около криволинейных поверхностей.– Киев: Институт теплофизики НАН Украины, 1999.– 299 с.
4. Халатов А. А., Авраменко А. А., Шевчук И. В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Т. 3: Закрученные потоки.– Киев: Институт теплофизики НАН Украины, 2000.– 474 с.
5. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки.– М.: Мир, 1987.– 588 с.
6. Сухович Е. П. Турбулентное смешение ограниченных закрученных струй // Известия АН Латв. ССР. Сер. Физ. и техн. Наук.– 1982.– № 1.– С. 72–80
7. Левин В. Б. О стабилизирующем влиянии вращения потока на турбулентность // Теплофизика высоких температур.– 1964, 2, № 6.– С. 892–900.
8. Петриченко М. Р. Блокирующее действие вращательного движения газа на теплопередачу в камере сжатия (сгорания) // Двигателестроение.– 1990.– № 4.– С. 57–58.
9. Гольдштик М. А. Вихревые потоки.– Новосибирск: Наука, Сиб. Отделение, 1981.– 366 с.
10. Уормли Аналитическая модель несжимаемого потока в коротких вихревых камерах // Труды Амер. Общ-ства инженеров-механиков: Теор. Основы инж. расчетов.– 1969.– 91.– С. № 2, 145–159
11. Турик В. Н., Макаренко Р. А. Обобщение характеристик тангенциальных течений в тупиковой части вихревой камеры // Вестник Нац. Техн. Унта Украины КПИ: Машиностроение.– 2000.– 1.– С. № 38, 38–44.
12. Макаренко Р. А., Турик В. Н. Кинематика течения в тупиковой части вихревой камеры // Прикладная гидромеханика.– 2001.– 3(75).– С. № 1, 46–51.
13. Турик В. Н., Макаренко Р. А. Аэродинамика вихревой камеры с равномерным тангенциальным подводом воздуха // Збірник праць кіровоградського держ. техн. університету.– 2000.– № 7.– С. 38–43.
14. Бабенко В. В., Воскобойник А. В., Воскобойник В. А., Турик В. М. Вихори Гьортлера над увігнутою поверхнею вхідної частини вихревої камери // Прикладна гідромеханіка.– 2003.– № 2(28).– С. 105–110.
15. Бабенко В. В., Воскобойник В. А., Воскобойник А. В., Турик В. Н. Поле пульсаций скорости в пристеночной струе вихревой камеры // Вибрации в технике и технологиях.– 2007.– 9(81).– С. № 2-3, 25–36.
16. Козлов Л. Ф., Цыганюк А. И., Бабенко В. В. и др. Формирование турбулентности в сдвиговых течениях.– Киев: Наукова думка, 1985.– 283 с.
17. Babenko V. V., Turick V. N. Coherent vortical structures control in flat and curvilinear parietal flows The World Congress "Aviation in the XXI-st Century", September 14-16 2003Kiev Ukraine
18. Bodewadt U. T. Die Drehstromung uber festen Grund // Z. Angew. Math. Mech.– 1940.– 20.– P. 241–253.