

4. Ashkenas H., Sherman F. S. The structure and utilisation of supersonic free jets in low density wind tunnels. Proc. 4-th Sympos. Rarefied Gas Dynamics, 1964, New York — London, Acad. Press, 1966.
5. Rother D. E. Electron beam studies of the diffusive separation of helium-argon mixtures. Phys. Fluids, 1966, vol. 9, No. 9.
6. Reis V. H., Fenn J. B. Separation of gas mixtures in supersonic jets. J. Chem. Phys., 1963, vol. 39, No. 12.
7. Zigan F. Gasdynamische Berechnung der Trenndüsen — Entmischung. Z. Naturforsch., 1962, Bd 17a, H. 9.

## ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ И ДВИЖЕНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ВИХРЕЙ В ВОДЕ

А. А. Бузук

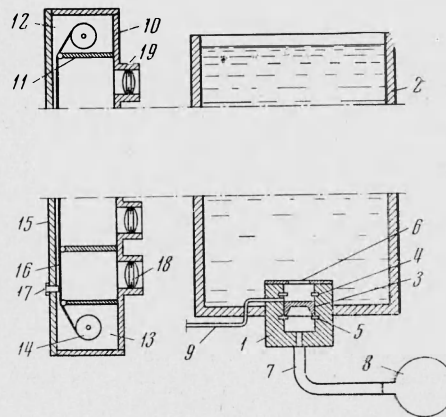
(Новосибирск)

Приводятся результаты экспериментального изучения процессов образования и движения кольцевых вихрей в воде. При помощи покадрового фотографирования и скоростной киносъемки получены зависимости скорости движения вихря и его размеров от проходимого им расстояния. Методом фотометрирования негативного изображения вихря определена интенсивность обмена жидкости, захваченной вихрем при его образовании, с жидкостью среды, в которой вихрь движется. Полученные экспериментальные результаты сопоставляются с имеющимися теоретическими представлениями о характере движения кольцевого вихря [1-3].

**1. Экспериментальная установка и методика измерений.** Эксперименты проводились на установке, схематический вид которой представлен на фиг. 1. Генератор вихрей 1, установленный на дне кюветы 2 из оргстекла, представляет собой цилиндр с внутренним диаметром 35 мм, разделенный поршнем 3. При перемещении поршня между нижним и верхним упорами 4, 5 через сопло генератора 6, имеющее диаметр 19,3 мм, в кювету выбрасывается определенное количество жидкости, формирующей кольцевой вихрь. Во всех опытах ход поршня был установлен равным 4 мм. К нижней части корпуса генератора при помощи патрубка 7 подсоединена резиновая груша 8, интенсивность обжатия которой определяет скорость выбрасывания струи жидкости через сопло генератора.

Для визуализации процесса распространения вихрей перед опытом в генератор через отверстие 9 медленно вводился раствор красителя, имевшего удельный вес, незначительно превышающий удельный вес чистой воды. Поэтому при достаточно медленной подаче красителя чистая вода выдавливается через сопло генератора и удается сохранить четкой границу раздела между подкрашенной и чистой жидкостью. Степень разбавления красителя подбиралась таким образом, чтобы при фотометрировании негативов уровень сигнала не выходил за пределы рабочего участка характеристик фотоэлементов, а при фотографировании вихрей просматривалась их внутренняя структура.

Покадровое фотографирование вихрей производилось при помощи специально изготовленной многообъективной фотокамеры. Корпус камеры 10 представляет собой коробку, разделенную светонепроницаемыми перегородками 11 на десять кадровых секций с размерами кадров  $55 \times 55$  мм<sup>2</sup>. Фотокамера имеет отделение 12 для установки неэкспонированной фотопленки (использовалась ролевая любительская пленка шириной 60 мм с удлиненной светозащитной полосой) и отделение 13 для приема экспониро-



Фиг. 1

ванной фотопленки на съемный валик 14 с широкими светозащитными бортами. Фильмовый канал закрывается крышкой 15, имеющей планки 16 для прижима пленки и глазок 17 для наблюдения за числом протянутых кадров.

На фотокамере установлено десять объективов 18 типа Т-22 с центральным затвором (фокусное расстояние 75 мм). Фокусировка изображения осуществлялась при помощи телескопических тубусов 19.

Затворы объективов были установлены на экспозицию 1/250 сек. Так как скорости течения жидкости в моменты фотографирования даже самых высокоскоростных вихрей не превышали 25 см/сек, максимальная размытость изображения на пленке составляла не более 1 мм, что было достаточно для требуемого разрешения изображения. Команда на последовательное включение затворов подавалась при прохождении вихрем оптической оси каждого из объективов.

Применение описанной конструкции фотокамеры позволило получать четкие, в масштабе 1 : 1, негативные изображения вихря в процессе всего его движения на расстоянии до 650 мм с одной и той же позиции относительно него. Фотографирование вихря во всех фазах его движения на одну пленку обеспечивало одинаковый режим обработки кадров, что необходимо для правильной количественной оценки массы красителя, переносимой вихрем, при помощи фотометрирования.

Параллельно с покадровым фотографированием производилась киносъемка процесса кинокамерой КСР-1М со скоростью 36 кадров в секунду и скоростная киносъемка камерой «Pentazet» со скоростью 300 кадров в секунду течений при образовании вихря вблизи сопла генератора. Подсветка явления осуществлялась при помощи системы ламп накаливания, равномерно освещавших белый матовый экран, расположенный за кюветой.

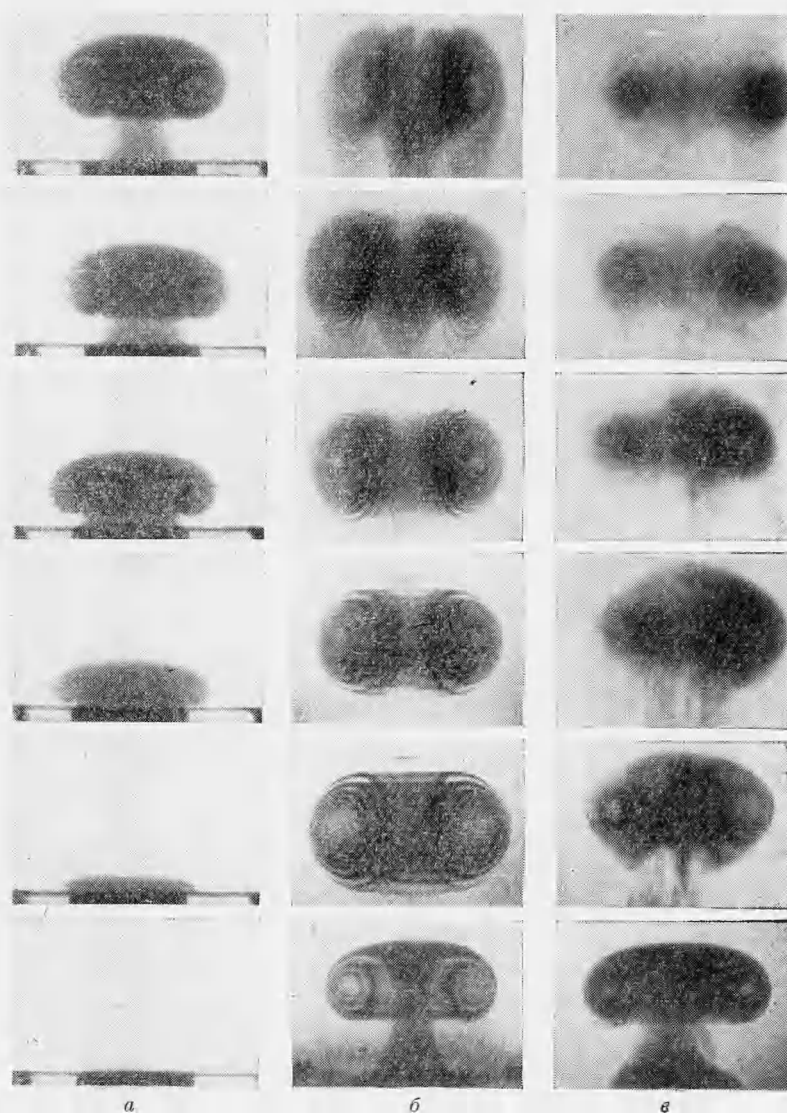
Для определения скорости обмена массой жидкости между кольцевым вихрем и средой, в которой вихрь движется, производилось фотометрирование каждого квадратного миллиметра негативного изображения вихря и последующее суммирование сигналов, полученных по всей площади изображения. Плотность точек измерения оказалась достаточной для разрешения особенностей течений в вихре, характерный линейный размер которых не превышает 1 мм.

Проблема отождествления получаемых с фотоэлементов прибора сигналов с количеством красителя в вихре заключается в том, что оптическая плотность изображения на фотопленке сложным, нелинейным образом зависит от концентрации красителя и глубины области, занятой подкрашенной жидкостью. Кроме того, эта зависимость меняется с изменением интенсивности освещения, светографических характеристик фотоэмульсии и режима обработки светочувствительного слоя. Поэтому при помощи предварительных экспериментов были выбраны интенсивность подсветки, состав красителя, экспозиция и режим обработки фотоматериалов такие, что две основные характеристики — зависимость оптической плотности негатива от степени разбавления красителя при неизменном размере зоны, занятой им, и зависимость оптической плотности негатива от глубины зоны, занятой красителем при неизменном его составе, — имели близкий к линейному участок. При съемках оптических полигонов были построены калибровочные кривые, при помощи которых при известном уровне фонового освещения определялось в относительных единицах количество красителя, приходящееся на единицу площади изображения. Среди большого количества отснятого материала для окончательной обработки были выбраны те фотопленки, на которых оптическая плотность изображения и фона подсветки не выходила за выбранные пределы линейности характеристик. Допустимые погрешности измерений в среднем составляли 15%. Однако погрешности возрастали до 25% при существенном уменьшении уровня сигнала, что наблюдалось лишь в случае измерений массы примеси для высокоскоростных вихрей, ушедших на предельные расстояния.

**2. Образование кольцевого вихря и начальная фаза его движения.** На фиг. 2 представлены кинокадры, на которых видны последовательные этапы образования и движения кольцевых вихрей в воде. Кадр *a* соответствует начальной фазе образования кольцевого вихря (время между съемками 150 мсек); *б* — движению ламинарного кольцевого вихря (начальная скорость истечения струи жидкости из генератора вихрей 4 см/сек); *в* — движению турбулентного кольцевого вихря (начальная скорость истечения струи жидкости 25 см/сек). В двух последних кинограммах вихрь между кадрами проходит около 70 мм.

В начальной стадии движения поршня в генераторе вихрей скорость перемещения границы раздела между чистой и подкрашенной жидкостью в горизонтальном (вдоль верхней плоскости корпуса генератора) и в вертикальном направлениях оказывается одинаковой (первые и вторые кадры на фиг. 2, *a*). Причем эта скорость быстро нарастает и через время от 20 до 50 мсек достигает максимальной. Но затем, несмотря на то что истечение жидкости из генератора продолжается с постоянной скоростью, скорость перемещения границы раздела вдоль оси генератора начинает уменьшаться.

На фиг. 3, *a* представлена зависимость относительной скорости границы раздела жидкостей на оси генератора  $V/v_0$  от относительного расстояния  $X/\delta$ , проходящего этой границей, где  $v_0$  — максимальная скорость перемещения границы, а  $\delta$  — диаметр



Фиг. 2

выходного отверстия генератора вихрей. Здесь и на фиг. 3, б, в экспериментальные точки 1, ..., 8 соответствуют следующим начальным значениям скорости выхода струи из генератора вихрей (см/сек)

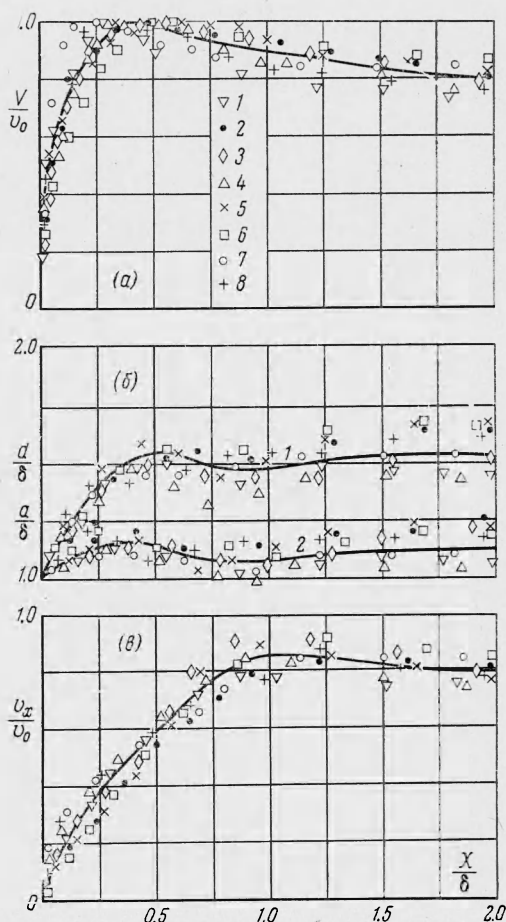
1	2	3	4	5	6	7	8
$v_0 = 4.3$	2.9	11.9	13.0	13.9	19.5	26.0	27.0

Как следует из приведенного графика, максимальная скорость  $v_0$  достигается тогда, когда граница раздела чистой и подкрашенной жидкости отходит от среза сопла генератора на  $0.4 \delta$ . К этому времени головная часть струи принимает вид «заклепки» (третий кадр), и снижение скорости перемещения струи вдоль оси генератора объясняется тем, что вдоль всей торцовой поверхности струи развивается радиальное течение.

В результате этого течения из подкрашенной и чистой жидкости формируется растекающийся за боковые края струи слой, движение которого вначале направлено горизонтально, а затем отклоняется вниз, замыкая некоторое количество чистой жидко

сти в кольцевом объеме, прилегающем к верхнему фланцу корпуса генератора. Таким образом, непосредственно вблизи выходного отверстия генератора формируется ядро будущего кольцевого вихря, причем диаметр ядра на 10—15% превышает диаметр сопла.

На фиг. 3, б представлены результаты измерений диаметра струи подкрашенной жидкости  $d/\delta$  в стадии ее расширения (1) и диаметра кольцевой зоны  $a/\delta$ , образующей ядро вихря (2) в зависимости от относительного расстояния  $X/\delta$ . Эксперименты показали, что характер изменения параметров  $d$  и  $a$  не зависит от начальной скорости истечения струи жидкости. Лишь в некоторых опытах было зафиксировано небольшое



Фиг. 3

ков струи подкрашенной жидкости (пятый и шестой кадры).

В рассматриваемых условиях окончательное формирование вихря осуществлялось при удалении верхней границы струи от среза сопла генератора на расстояние, равное  $2\delta$ . Ядро вихря находилось в этот момент на расстоянии, равном  $1.6\delta$ . В описываемых опытах интенсивное перехватывающее течение организовывалось к тому времени, когда поршень в цилиндре генератора доходил до верхнего упора и подача жидкости из генератора прекращалась. Возможно, что процесс образования вихря будет продолжаться дольше, если истечение струи не прекращать. В этом случае величины  $d_0/\delta$  и  $a_0/\delta$ , характеризующие начальные параметры вихря, могут превышать измеренные в данной работе.

Общая картина образования кольцевого вихря, описанная выше, наблюдается и в том случае, когда вихрь создается в воздухе [2]. Но, если скорость истечения струи нарастает настолько быстро, что на срезе сопла генератора образуется ударная волна [4], характер течения жидкости вблизи сопла меняется и параметры образовавшегося вихря оказываются не такими, какие получены при выполнении данного исследования. Если же в рассматриваемых опытах время нарастания скорости истечения жидкости до максимальной сокращалось до 10 мсек, на кромке сопла генератора образовывалась

(до 10%) уменьшение  $d$  и  $a$ , что можно объяснить пульсациями скорости истечения жидкости из сопла генератора вихрей. Но при этом размеры  $d$  и  $a$  быстро восстанавливались до первоначальных, достигнутых при  $X = 0.4\delta$ . Таким образом, измеренное в опытах максимальное значение скорости перемещения границы раздела жидкостей  $v_0$ , которое практически равно максимальной скорости истечения струи жидкости из генератора, а также максимальное установившееся значение величин  $d_0$  и  $a_0$ , характеризующих размеры струи в момент окончательного формирования вихря, можно принять за исходные параметры, определяющие начальную скорость и начальные размеры вихря.

Скорость перемещения ядра вихря  $v_x$  нарастает значительно медленнее, чем  $V$  (фиг. 3, в). Лишь после того как развивается интенсивное радиальное течение в струе выбрасываемой жидкости, ядро вихря начинает отсоединяться от торцевой крышки генератора вихрей. При удалении верхней точки границы раздела жидкостей на расстояние  $0.8\delta$  (четвертый кадр на фиг. 2, а) скорость движения ядра вихря  $v_x$  достигает своего максимального значения и становится равной  $0.85 v_0$ . Следует заметить, что к этому времени скорость  $V$  также оказывается равной  $0.85 v_0$  и в дальнейшем  $v_x$  и  $V$  совпадают. При указанном значении  $X/\delta$  окончательно формируется обтекание головной части струи, а течение чистой жидкости, направленное к оси генератора и развивающееся вдоль его верхней плоскости, замыкает вихрь, отсоединяя его от остат-

кавитационная каверна. Затем кольцевая каверна с диаметром канала 2—4 мм подхватывалась вихрем и переносилась на большое расстояние, однако размер вихря и скорость его движения отличались от тех, которые наблюдались в случае безотрывного течения жидкости из сопла.

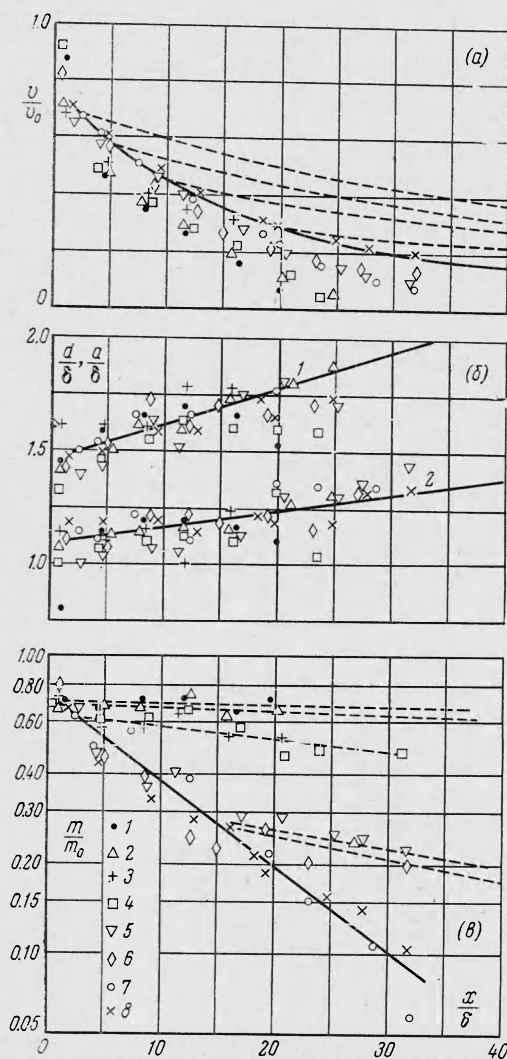
Существенным результатом проведенного исследования является определение предельного значения числа Рейнольдса  $R_0$ , вводимого как  $d_0 v_0 / \nu$ , при переходе через которое движение кольцевого вихря становится турбулентным. Характер течения жидкости на стадии формирования вихря не зависит от начальной скорости истечения струи, но в дальнейшем определяется величиной начальной скорости. На основании проведенных опытов установлено, что если  $R_0 < 2 \cdot 10^3$ , то образуется ламинарный вихрь и в течение всего времени его существования наблюдается характерная для таких вихрей [2] спиральная структура слоев чистой и подкрашенной жидкости (фиг. 2, б). При  $R_0 > 2 \cdot 10^3$  начинающая формироваться спиральная структура течения быстро исчезает и вихрь становится турбулентным, но при этом сохраняется внешняя форма кольцевого вихря и просматривается его ядро (фиг. 2, в). Интересно, что для низкоскоростных турбулентных вихрей за счет постепенного снижения их скорости текущее значение  $R$ , равное  $d v / \nu$ , может стать ниже  $2 \cdot 10^3$ . Полного восстановления ламинарного режима течения и появления спирально закручивающихся слоев жидкости не фиксировалось, но уменьшение отдельных областей завихрений внутри вихря и общее успокоение течения наблюдалось.

**3. Измерение скорости и размеров кольцевого вихря при его движении на большие расстояния.** В процессе движения кольцевого вихря происходит уменьшение его скорости, причем тем более интенсивное, чем выше его начальная скорость. На фиг. 4, а представлены полученные экспериментально зависимости  $v / v_0$  от  $x / \delta$ , где  $v$  — текущая скорость вихря,  $v_0$  — максимальная скорость истечения струи жидкости из сопла генератора,  $x$  — расстояние, проходимое ядром вихря. Здесь, а также на фиг. 4, б, в экспериментальные точки 1, ..., 8 соответствуют следующим максимальным скоростям выхода струи жидкости из генератора вихрей (см/сек):

1	2	3	4	5	6	7	8
$v_0 = 5.6$	7.0	8.0	8.1	15.4	15.8	23.8	28.4

Эксперименты показали, что при удалении вихрей на расстояние до  $30 \delta$  потеря скорости составляет 60—80%. А при малых скоростях истечения струи ( $R_0 < 1.5 \cdot 10^3$ ) вихрь останавливался, не доходя до отметки  $30\delta$ , несмотря на то что внутреннее циркуляционное течение внутри него продолжалось. Через некоторое время вихрь разрушался и сгусток красителя, принесенный им, начинал тонуть.

Это объясняется тем, что на движение медленных вихрей оказывала влияние сила тяжести, так как раствор красителя, захваченного вихрем, имел удельный вес, несколько



Фиг. 4

ко превышающий удельный вес чистой воды в кювете. И, таким образом, данные по скорости таких вихрей не являются характерными. Поэтому, несмотря на то что экспериментальные точки на фиг. 4, а, соответствующие опытам с вихрями различных начальных скоростей, не лежат на одной кривой, можно зависимость  $v/v_0$  от  $x/\delta$  отобразить как огибающую по точкам, полученным на высокоскоростных вихрях, на которые сила тяжести не могла повлиять заметным образом (сплошная линия). Специальные опыты, в которых изучалось движение кольцевых вихрей в воде в условиях, исключавших влияние силы тяжести [5], показали, что зависимость  $v/v_0$  от  $x/\delta$  общая для вихрей с различными начальными параметрами ( $10^4 < R_0 < 10^6$ ) и соответствует графику на фиг. 4, а.

Одновременно с определением скорости движения кольцевого вихря производилось измерение двух его линейных размеров — поперечного диаметра  $d$  и диаметра ядра  $a$ . На фиг. 4, б приведены зависимости  $d/\delta$  (1) и  $a/\delta$  (2) от  $x/\delta$ .

Как следует из графиков, относительные размеры вихрей от опыта к опыту отличаются на 7—10%, однако этот разброс не является систематическим и не связан со скоростью движения вихря. Лишь в тех случаях, когда поступательное движение вихря прекращалось (медленные вихри), происходило резкое уменьшение его размера и вихрь разрушался. Полученные экспериментальные зависимости  $d/\delta$  и  $a/\delta$  от  $x/\delta$  близки к линейным и с точностью до 10% в интервале  $x/\delta$  от 3 до 30 могут быть отбразены эмпирическими формулами

$$d = 1.46 \delta + 0.0167x, \quad a = 1.11\delta + 0.0057x \quad (3.1)$$

Линейный характер полученных зависимостей (3.1) позволяет сравнить экспериментально измеренную скорость движения кольцевого вихря с расчетной [6]. Действительно, преобразуя зависимость пути  $L(t)$ , который проходит турбулентный кольцевой вихрь, от времени, полученную в автомоделльной постановке, и переходя к принятым в данной работе обозначениям

$$L(t) = \frac{a^\circ}{2\alpha} \left[ \left( 1 + \frac{8\alpha v^\circ}{a^\circ} t \right)^{1/4} - 1 \right]$$

можем получить

$$\frac{v}{v_0} = \frac{v^\circ}{v_0} \left[ \frac{2\alpha\delta}{a^\circ} \left( \frac{x}{\delta} - \frac{x^\circ}{\delta} \right) + 1 \right]^{-3} \quad (3.2)$$

Здесь  $x^\circ$  — некоторое произвольно выбираемое начало координат, в котором турбулентный вихрь считается окончательно сформировавшимся,  $v^\circ$  — поступательная скорость перемещения вихря в точке  $x^\circ$ ,  $a^\circ$  — диаметр ядра вихря в точке  $x^\circ$ ,  $\alpha$  — угол расходимости ядра вихря, который можно определить согласно [6] как  $(a - a^\circ) / 2(x - x^\circ)$ .

Воспользовавшись данными экспериментов, представленными на фиг. 4, б, определим, что  $\alpha = 3.4 \cdot 10^{-3}$ . Тогда, выбирая в качестве условного начала отсчета точки с координатами  $x^\circ/\delta$ , равными 2, 5, 10 и 20, и определяя из графика на фиг. 4, а соответствующие этим значениям  $x^\circ/\delta$ , относительные скорости  $v^\circ/v_0$  и из графика на фиг. 4, б относительные диаметры ядра вихря  $a^\circ/\delta$ , можем рассчитать по формуле (3.2) скорость дальнейшего движения вихря.

Результаты расчета представлены на фиг. 4, а пунктирными линиями. Как следует из графиков, наблюдается расхождение между опытными и расчетными данными, причем это расхождение становится тем более существенным, чем на более ранней стадии движения вихря выбирается точка начала отсчета  $x^\circ/\delta$ . Только при значениях  $x^\circ/\delta$ , больших 20, реальная траектория движения вихря оказывается близкой к расчетной.

Полученный результат объясняется тем, что в начальной стадии движения вихря не успевает выработаться автомоделльный характер завихренности, который предполагается при постановке задачи в [6]. Кроме того, в описываемых опытах начальная скорость даже самых быстрых вихрей не превышала 30 см/сек ( $R_0 < 7 \cdot 10^3$ ), а в процессе их движения текущее значение  $R$  падало до  $1.5 \cdot 10^3$ . Поэтому на более поздних стадиях движения вихря сформировавшийся турбулентный режим течения мог нарушаться. Возможно, что при достаточно больших начальных скоростях вихрей, когда  $R_0 > 10^4$  и вихри проходят расстояния, большие  $100\delta$ , результат расчета, начиная с  $x^\circ/\delta > > 30$ , будет лучше соответствовать эксперименту. Это подтверждается опытами с высокоскоростными воздушными вихрями [6].

4. Перенос примесей кольцевым вихрем. На фиг. 4, в приведены измеренные зависимости относительного количества красителя  $m/m_0$ , содержащегося в вихре, от относительного расстояния  $x/\delta$ , проходимого им. Здесь  $m$  — текущее содержание примеси,  $m_0$  — количество примеси, выбрасываемое из генератора. Зависимости получены для кольцевых вихрей, имевших различную начальную скорость в диапазоне чисел  $R_0$  от  $1 \cdot 10^3$  до  $7 \cdot 10^3$ .

При формировании вихря непосредственно вблизи генератора остается 30% массы выброшенной жидкости. Киносъемка показывает, что эта масса представляет собой остаток струи после отсечения от нее вихря. Доля потерянной при формировании вихря массы красителя не зависит от скорости истечения струи жидкости из генератора.

Однако, начиная с расстояния, на котором кольцевой вихрь окончательно формируется и отсоединяется от струи ( $x/\delta \sim 2$ ), характер дальнейшего изменения содержания красителя в вихре существенно зависит от начальной скорости. Если  $R_0 < 2 \cdot 10^3$ , т. е. вихрь ламинарный в течение всего времени его движения (фиг. 2, б), потери массы красителя малы и составляют при удалении вихря от генератора на расстоянии  $25\delta$  всего 5–7%.

При больших начальных скоростях вихрей, когда  $R_0 > 5 \cdot 10^3$ , интенсивная потеря массы красителя осуществляется на всем измерявшемся пути движения вихря и составляет 90–95% на расстояниях  $25\delta$  (фиг. 2, в). Для турбулентных вихрей, начальное значение  $R_0$  которых лежит в интервале от  $3 \cdot 10^3$  до  $5 \cdot 10^3$ , интенсивность обмена массы на начальном участке пути такая же, как и для высокоскоростных вихрей, но затем резко снижается при уменьшении текущего значения  $R$  до  $2 \cdot 10^3$ . Замечательно, что именно этому значению  $R$  соответствует переход от турбулентного к ламинарному режиму движения вихря.

Таким образом, относительное содержание красителя на одних и тех же расстояниях для вихрей различных начальных скоростей оказывается неодинаковым.

Для ламинарных вихрей естественно предположить, что потеря массы осуществляется за счет конвективной диффузии. Действительно, вязкость воды  $\nu$  составляет  $10^{-2}$  см<sup>2</sup>/сек, а коэффициент молекулярной диффузии  $D_m$  в водном растворе  $\sim 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/сек. Отсюда число Прандтля  $P$ , характеризующее возможность молекулярного переноса вещества и равное  $\nu/D_m$ , составляет  $\sim 10^3$ . Это говорит о том, что уже при небольших скоростях течения жидкости механизмом, ответственным за перенос вещества, является конвективная диффузия.

Оценим интенсивность потери массы красителя при движении вихря в турбулентном режиме. Уравнение турбулентной диффузии выглядит следующим образом:

$$\partial C / \partial t = D_T \Delta C \quad (4.1)$$

где  $C$  — концентрация растворенного вещества,  $D_T$  — коэффициент турбулентной диффузии.

Считая, что процесс перемешивания жидкости в турбулентном вихре идет достаточно интенсивно и в нем устанавливается некоторое постоянное распределение концентрации примеси, можем оценить по порядку величины члены уравнения (4.1), заменив значение концентрации  $C$  на текущее суммарное содержание примеси

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} \sim D_T \frac{m}{d^2} \quad (4.2)$$

Умножая левую и правую части (4.2) на элементарное перемещение  $\Delta x$ , получаем

$$\frac{\Delta m}{\Delta x} \sim D_T \frac{m}{d^2 \nu} \quad (4.3)$$

Коэффициент турбулентной диффузии  $D_T$  можно выразить через величины, характеризующие турбулентный поток [7]

$$D_T \sim \nu d$$

Отсюда следует, что, пока вихрь остается турбулентным, потеря массы примеси не зависит от скорости вихря

$$\frac{\Delta m}{\Delta x} \sim - \frac{m}{d} \quad (4.4)$$

Действительно, измерения показали (фиг. 4, в, сплошная линия), что до тех пор, пока  $R$  не ниже  $2 \cdot 10^3$ , выполняется зависимость (4.4). В соответствии с этим после определения эмпирических коэффициентов потеря массы турбулентным вихрем может быть описана формулой

$$m = 0.73 m_0 \exp(-0.064 x / \delta) \quad (4.5)$$

Коэффициент 0.73 в (4.5) имеет смысл доли оставшейся в вихре массы красителя после его окончательного формирования.

Наблюдением установлено, что в случае движения ламинарных вихрей (фиг. 2, б) в течение всего времени их движения ядро остается «пустым» и вся масса красителя сосредоточена вне ядра. Для турбулентных вихрей (фиг. 2, в) в начальной фазе их движения в ядре также содержится в основном жидкость среды, но в дальнейшем краситель заполняет ядро и потери его из ядра идут с меньшей интенсивностью, чем из всего остального объема. Отдельные опыты показывают, что при удалении вихрей на расстоянии до  $150 \delta$  вихрь становится трудно отличим от среды [5], так как происходит практически полное замещение жидкости, содержащейся в вихре, на жидкость среды. И лишь в кольцевом объеме, занятом ядром вихря, краситель задерживается несколько дольше.

В заключение автор благодарит В. И. Якушева и Л. Ф. Гладкову за помощь в проведении экспериментов и обработке их результатов.

Поступила 4 XI 1970

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ламб Г. Гидродинамика. М.— Л., Гостехиздат, 1947.
2. Magarvey R. H., MacLatchy C. S. The formation and structure of vortex ring. *Canad. J. Phys.*, 1964, vol. 42, No. 4.
3. Ахметов Д. Г., Кисаров О. П. Гидродинамическая структура кольцевого вихря. ПМТФ, 1966, № 4.
4. Elder F. K. Jr., de Haas N. Experimental study of the formation of a vortex ring at the open end of cylindrical shock tube. *J. Appl. Phys.*, 1952, vol. 23, No. 10.
5. Бузукоев А. А., Кузавов В. Т. Выпрыгивающие вихри. В сб. «Динамика сплошной среды», Новосибирск, «Наука», 1969, вып. 3.
6. Луговцов А. А., Луговцов В. А., Тарасов В. Ф. О движении турбулентного вихревого кольца. В сб. «Динамика сплошной среды», Новосибирск, «Наука», 1969, вып. 3.
7. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика М., Физматгиз, 1959.

#### К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕЛЬФИНА

*Т. Е. Алексеева, Б. Н. Семенов*

(Новосибирск)

В статье описываются некоторые результаты экспериментального определения гидродинамического сопротивления дельфина. Эти результаты сравниваются с расчетными значениями для установившегося движения подобной жесткой модели и уточняют данные о гидродинамическом сопротивлении афалины, полученные в работе [1]. Сопротивление дельфина оказалось значительно меньше расчетного, даже с учетом начального ламинарного участка. Из анализа полученных результатов делаются следующие выводы.

1. Экспериментальные результаты подтверждают с большой достоверностью существование гидродинамического феномена дельфина афалины.
2. Этим объясняется возникновение парадокса Грэя для данного рода животных.
3. По-видимому, явление, лежащее в основе метода снижения сопротивления дельфина, является регулируемым.

4. Можно предположить, что афалина имеет ламинарное безотрывное обтекание.

1. **Методика эксперимента.** Использованная ранее одним из авторов [1] методика в данном эксперименте была улучшена, в результате чего погрешность измерения сопротивления была уменьшена примерно в два раза. Ранее измерялось перемещение дельфина во времени и пространстве, затем дифференцированием по времени полученных данных определялись скорости и ускорения. Второе дифференцирование при этом проводилось с весьма значительными погрешностями. В данном же опыте скорость дельфина определялась из сравнения со скоростью эталонного шарика диаметром 6 мм, падающего в трубке с внутренним диаметром 12 мм и фиксируемого кино съемкой одновременно с перемещением животного.

Ускорение рассчитывалось как первая производная по времени замеренных скоростей движения дельфина. Эксперимент проводился с дельфинами рода *tursiops tursiops*