

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСИ ТУРБУЛЕНТНЫМ ВИХРЕВЫМ КОЛЬЦОМ

В. Ф. Тарасов, В. И. Якушев

(Новосибирск)

Рассматривается перенос примеси турбулентным вихревым кольцом. Для определения массы пассивной примеси, переносимой вихрем, в зависимости от пройденного им расстояния получена формула, хорошо согласующаяся с опытными данными. Указан способ заполнения примесью той области вихря, которая переносит ее без потерь. Проведено исследование влияния на перенос примеси следующих факторов: начального числа Рейнольдса вихря, шероховатости стенок выходного отверстия генератора вихрей, разности плотностей раствора с примесью и среды. Рассматривается вопрос о переносе вихрем аэрозолей и взвесей. Сравниваются два метода измерения переноса примеси.

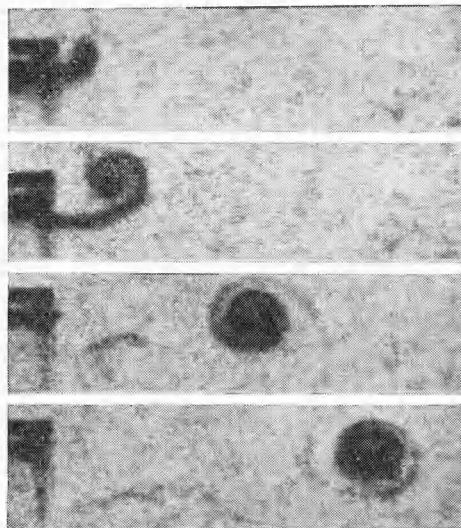
1. Переносу примесей вихревыми кольцами посвящены работы [1, 2].

В [1] рассматривается вопрос о турбулентной диффузии вихря и сделан вывод о том, что некоторая область вихря может переносить примесь, не теряя ее.

В [2] приведены результаты экспериментальных исследований по переносу примесей вихревым кольцом, полученные с помощью фотометрирования. Объектом изучения в этой работе являются ламинарный и турбулент-

ный вихри с начальным числом Рейнольдса Re_0 (определяемым по начальной скорости u_0 и радиусу вихря R_0) не более $5 \cdot 10^3$.

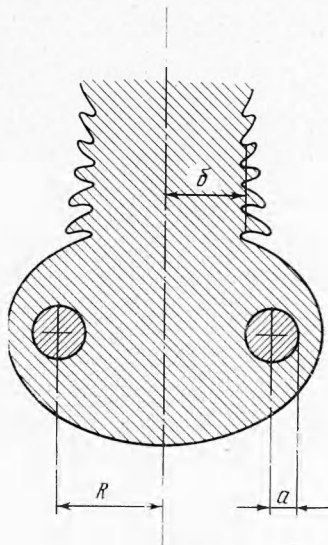
Визуальные наблюдения за подкрашенным турбулентным вихревым кольцом показывают, что при движении за ним остается характерный след из подкрашивающего вещества, причем краска из так называемой «атмосферы» вихря (см. [3]) быстро попадает в след. В ярко выраженной тороидальной области примесь сохраняется практически до конца движения вихря. Предполагалось, что эта область состоит из части пограничного слоя, образующегося при выталкивании струи жидкости из генератора вихрей. Киносъемка процесса образования вихря с подкрашиванием только внутренней поверхности трубки, из которой производился



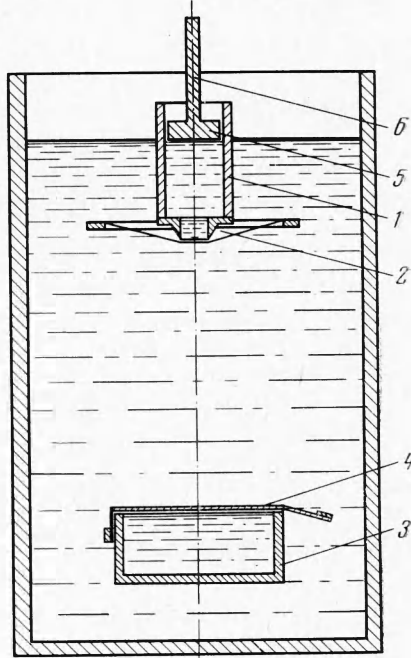
Фиг. 1

запуск вихря, подтвердила это предположение (кинограмма на фиг. 1). Этот опыт показал также, что на начальной стадии движения вихря область, в которой сосредоточен максимум завихренности (ядро вихря) и область, которая несет пассивную примесь, не теряя ее, приблизительно совпадают между собой.

Можно предложить следующую модель переноса примеси турбулентным вихревым кольцом. Будем считать, что 1) концентрация примеси c в «атмосфере» за счет турбулентного перемешивания поддерживается однородной (хотя в области, прилегающей к ядру вихря она несколько выше, чем в остальной части атмосферы); 2) концентрация примеси в следе



Фиг. 2



Фиг. 3

(средний радиус его обозначим через δ (фиг. 2.)), попавшей в него из атмосферы через ее границы вследствие турбулентной диффузии, тоже однородна и из-за более интенсивного перемешивания с окружающей средой меньше, чем в атмосфере (обозначим ее через nc , где $n < 1$ — постоянный коэффициент); 3) из тороидальной области, совпадающей с началом движения вихря с его ядром, примесь не теряется.

Обозначим через M'_0 и M' начальную и текущую массы примеси в атмосфере вихря. Согласно принятой схеме для массы примеси, уходящей в след из атмосферы, можно написать уравнение

$$(1.1) \quad dM' / dt = -ncu\pi\delta^2$$

где u — скорость вихря. Примем во внимание, что радиус вихря R вследствие турбулентной вязкости увеличивается по линейному закону [4]:

$$(1.2) \quad R = R_0 + \alpha L$$

где $\alpha \sim 10^{-2} \div 10^{-3}$ — постоянная при движении вихря величина, зависящая от начальных условий опыта, L — расстояние, пройденное вихрем. Пренебрегая начальным объемом ядра по сравнению с объемом всего вихря V , можно записать $M' = cAR^3$, где $A = V / R^3$ — постоянный коэффициент. Учитывая, что $dL / dt = u$, $\delta^2 = BR^2 / \pi$ (B — постоянная), из (1.1) получим

$$(1.3) \quad dM' / dR = -nBM' / \alpha AR$$

Отсюда

$$(1.4) \quad M' = M_0' (R_0 / R)^{\beta/\alpha}, \quad \beta = nB / A$$

Для массы пассивной примеси M , переносимой вихрем, получим

$$(1.5) \quad M = m_0 + M_0' (1 + \alpha L / R_0)^{-\beta/\alpha}$$

где m_0 — начальная масса примеси в ядре вихря.

2. Для проверки формулы (1.5) и определения постоянных величин m_0 и β были проведены эксперименты с турбулентными вихревыми кольцами, начальное число Рейнольдса которых менялось от $4 \cdot 10^3$ до $4 \cdot 10^4$. Схема установки приведена на фиг. 3.

Опыт производился следующим образом. В генератор вихрей 1, выходное отверстие которого закрыто диафрагмой 2, заливалась определенная порция подкрашенной жидкости. В качестве подкрашивающего вещества использовался раствор флуоресцеина, позволяющий при заданных размерах вихря и ловушки 3 производить измерения с помощью фотоэлектрического колориметра ФЭК-56. После разрыва резиновой диафрагмы 2, обеспечивающей однородность проведения опытов, производился запуск вихря. После попадания вихря в ловушку 3, установленную на заданном расстоянии от генератора вихрей, срабатывал резиновый затвор 4, герметично закрывающий ее. Коэффициент пропускания полученного в ловушке раствора измерялся колориметром ФЭК-56. Концентрация раствора определялась по предварительно полученной тарировочной кривой. По известному объему ловушки определялось количество примеси, попавшей в нее.

Из генератора выталкивались такие объемы жидкости, которые полностью входили в вихрь. Формирование вихря в рассматриваемом случае осуществлялось на расстоянии $4 \div 5 R_0$ от среза сопла генератора. Специально поставленные эксперименты показали, что доля подкрашенной жидкости составляет более 95% всего объема образующегося вихря. Постоянный ход поршня 5 генератора вихрей в каждой из серий проводимых опытов обеспечивал постоянство объема выталкиваемой струи. Для контроля и отбора вихрей с одинаковой начальной скоростью в серии производилась запись закона движения поршня на осциллографе с помощью реостата, подвижный контакт которого укреплялся на штоке 6. Скорость поршня варьировалась и в каждой серии была постоянна. Диаметр выходного отверстия генератора d и ход поршня менялись и выбирались такими, чтобы длина выталкиваемой струи l не превышала $4d$. Это является условием того, что струя полностью входит в вихрь. Начальный радиус вихря R_0 и постоянная α были получены с помощью киносъемки. Съемка производилась кинокамерой «Конвас» с синхронным двигателем. Частота съемки 25 кадр./сек.

3. Типичная зависимость переносимой массы пассивной примеси от пройденного расстояния показана на фиг. 4 (кривая 1). Кружками обозначены экспериментальные точки. Характер кривой подтверждает наличие в вихре двух отмеченных ранее областей. Сплошная кривая 1 проведена согласно (1.5), которую в этом случае запишем в виде

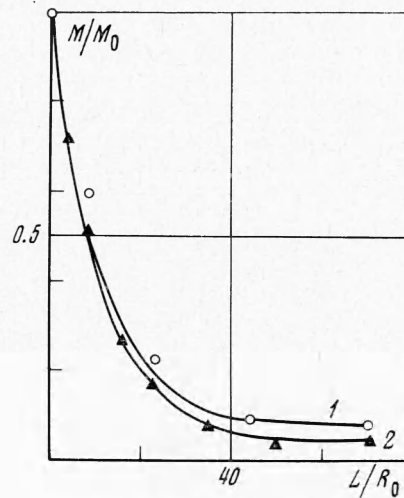
$$M / M_0 = 0.077 + 0.923 (1 + \alpha L / R_0)^{-14.2}$$

Числа 0.077 и 0.923 выражают соответственно отношение начальной массы примеси в ядре и в атмосфере к начальной массе примеси во всем вихре. Остальные численные значения в этой серии: $R_0 = 1.36$ см, $\alpha = 7 \cdot 10^{-3}$, $u_0 = 1.5$ м/сек, $d = 2$ см, $l = 6.6$ см. При этом $\beta = 0.1$.

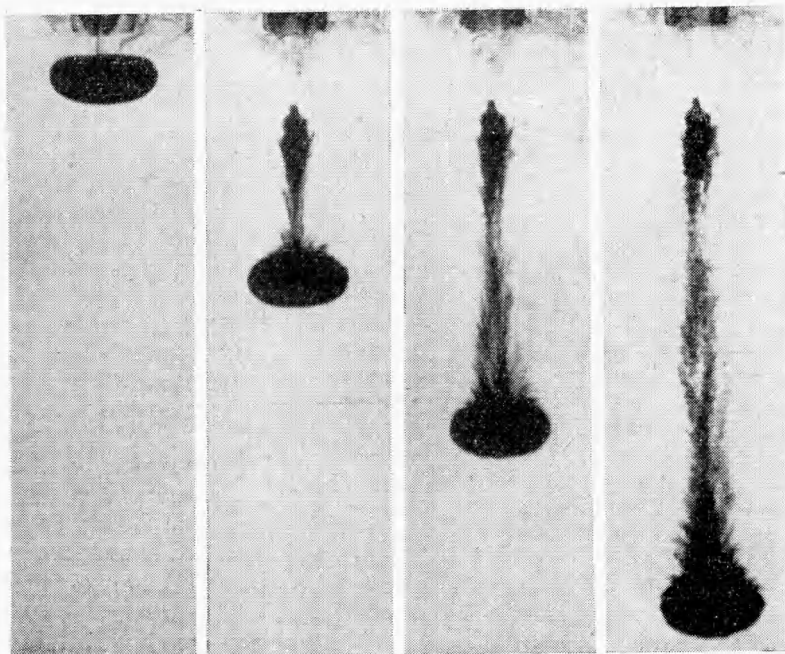
Сравнение по кинограммам относительных размеров следа δ / R у измеряемого вихря и других турбулентных вихрей показывает, что эта величина (α вместе с ней и β) постоянна. На основании проведенных опытов следует положить $\beta = 0.1$.

При $Re_0 < 4 \cdot 10^4$ образующиеся вихри на начальном участке движения могут быть почти ламинарными. Величина δ / R у такого вихря в этой фазе движения оказывается малой по сравнению с δ / R у турбулентных вихрей. При дальнейшем движении вихрь турбулизуется и за ним образуется след обычной ширины. Такой вихрь может оставить часть краски в процессе формирования. Сказанное иллюстрирует кинограмма на фиг. 5. Величины δ / R , а также β для таких вихрей при движении не являются постоянными.

Отмеченная «ламинарность» вихря на начальном участке движения при таких числах Re_0 зависит от начальных условий опыта, и в частности от отношения l/d . Так, например, при $l/d = 2$ получающийся вихрь



Фиг. 4

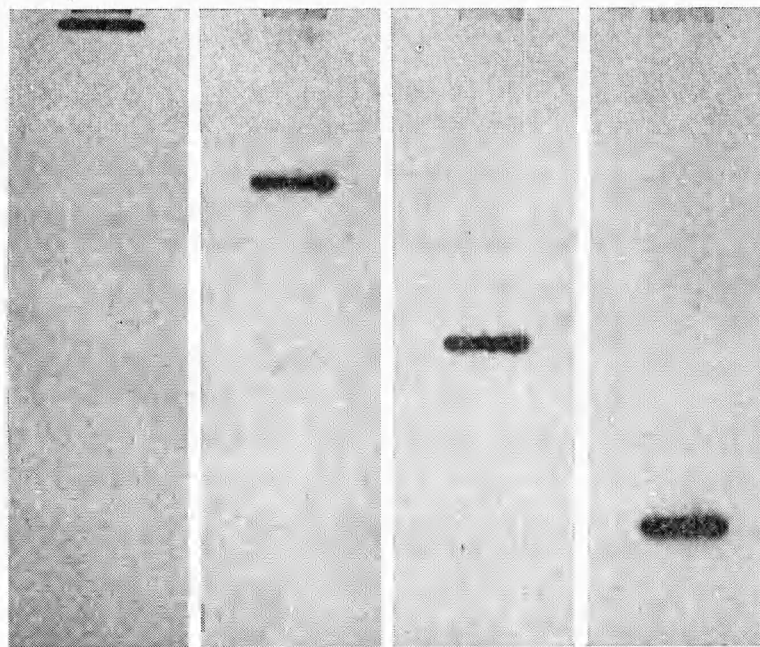


Фиг. 5

обладает описанным свойством. Остальные параметры те же, что и у рассматриваемого выше вихря с $l/d = 3.3$. Считая, что β постоянна и положив ее равной 0.068, получим хорошее согласие с экспериментом.

Возможны также случаи, когда при $Re_0 \sim 10^3$ вихри на начальном участке движения ламинарны и примесь не теряют. Затем вихрь может турбулизироваться и дальнейший перенос примеси будет осуществляться согласно формуле (1.5). При этом начальные параметры должны быть взяты в момент турбулизации вихря.

Нанесение на стенки сопла генератора вихрей искусственной шероховатости приводит к тому, что струя при выходе из него турбулизуется. Получающийся вихрь турбулентен и перенос примеси описывается формулой (1.5) с $\beta = 0.1$. От величины l/d в этом случае потери не зависят.



Фиг. 6

Незначительные изменения плотности жидкости, заливаемой в генератор вихрей, по сравнению с плотностью среды, в которой вихрь движется $((\rho - \rho') / \rho = 10\%)$, заметного влияния на перенос примеси не оказывают.

4. Анализ кинограмм показывает, что относительный начальный радиус ядра вихря a_0 / R_0 в зависимости от Re_0 меняется в пределах от $1/6$ до $1/12$, при этом $v_0 / V = 1/8 \div 1/20$, где v_0 — начальный объем ядра. Оценим характер этой зависимости. Поскольку средняя толщина пограничного слоя $\Delta \sim l / \sqrt{Re^\circ}$, то $v_0 \sim l^2 d / \sqrt{Re^\circ}$ (Re° — число Рейнольдса для струи, вытекающей из генератора вихрей). Опыт показывает, что при $l/d \leq 4$ величина Re° пропорциональна Re_0 . Поэтому при постоянных l и d для вихрей с различными Re_0 получим

$$(4.1) \quad v_0 \sqrt{Re_0} = \text{const}$$

Результаты экспериментов подтверждают эту формулу.

Для переноса вихрем примеси без потерь нужно, чтобы ею был заполнен объем v_0 . Для этого примесь должна вводиться в переднюю часть по-

граничного слоя, образующегося при выталкивании струи жидкости из генератора вихрей. При выполнении этих условий получаются результаты, которые иллюстрируются кинограммой фиг. 6.

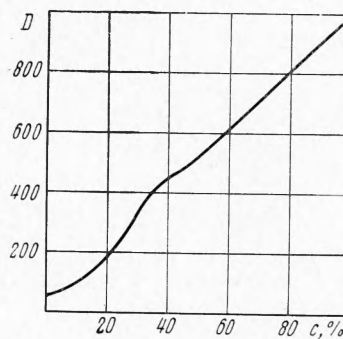
5. Опыт показывает, что для имеющихся плотности и размера частицы аэрозоля или взвеси у вихря имеется критическое число Рейнольдса Re_* , при достижении которого перенос примеси не описывается формулой (1.5). При $Re_0 > Re_*$ примесь в области ядра и его окрестности перестает быть пассивной и под действием центробежных сил частицы аэрозоля выбрасываются из ядра в атмосферу, причем процесс выбрасывания начинается в момент выталкивания струи из генератора вихрей. Например, для частиц табачного дыма, размеры которых $\sim 10^{-5}$ см, для воздушных вихрей $Re_* = 8 \cdot 10^3$. Таким образом, в этом случае частиц в области, которая может нести примесь, не теряя ее, не оказывается и формула (1.5) должна быть заменена на

$$(5.1) \quad M / M_0 = (1 + \alpha L / R_0)^{-\beta/\alpha}, \quad \beta = 0.1$$

6. Указанный способ измерения позволяет получить полные данные о переносе примеси вихрем, но этот метод очень трудоемок. Более простым и удобным является метод фотометрирования изображения вихря на фотоматериале. Чтобы фотометрировать сразу все изображение вихря необходима линейная зависимость между показаниями линейной шкалы микрофотометра D и переменной концентрацией подкрашивающего раствора c . Такая линейность может быть достигнута благодаря тому, что кривые зависимости $D = D(k)$ (k — коэффициент поглощения раствора) и $k = k(c)$ имеют кривизну разного знака.

Варьируя фотоматериал, режим обработки пленки, подкрашивающий раствор, его начальную концентрацию, светофильтры, условия съемки (диафрагма, выдержка) удалось получить зависимость между D и c , изображенную на фиг. 7. Для проводимых опытов также важна равномерность света освещения. Для этого в качестве источника света использовались лампы дневного света, установленные вплотную одна к другой, освещающие матовое стекло. Оно и являлось равномерно светящимся фоном. Съемка производилась кинокамерой «Конвас». Использование синхронного двигателя обеспечивало постоянство частоты съемки, равной 25 кадр./сек. Во избежание размазывания изображения вихря на пленке стандартный обтюратор «Конваса» был заменен другим, обеспечивающим при этой частоте выдержку $1/250$ сек. Подкрашивающим раствором служили синие чернила. При съемке использовались кинопленка МЗ-2 и светофильтр ОС-12. Фотометрировались те же вихри, потери которых измерялись при помощи ловушки.

На фиг. 4 представлены кривые 1, 2 переноса примеси, полученные соответственно с помощью ловушки и с использованием фотометрирования. График показывает, что разница между двумя методами измерения не велика. Расхождение наблюдается при $L / R_0 > 15$, так как к этому моменту концентрация примеси в атмосфере становится малой и линейность на графике (фиг. 7) при таких значениях концентрации c отсутствует. Видно также, что фотометрирование занижает примерно в 1.5 раза размеры области, которая переносит примесь без потерь. Тем не менее совпадение



Фиг. 7

результатов двух методов оказывается хорошим и при аналогичных измерениях фотометрирование может быть использовано с соблюдением указанных выше условий.

Поступила 1 VI 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. *Луговцов Б. А.* О движении турбулентного вихревого кольца и переносе им пассивной примеси. В сб. «Некоторые проблемы математики и механики». Л., «Наука», 1970.
 2. *Бузуков А. А.* Особенности образования и движения кольцевых вихрей в воде. ПМТФ, 1971, № 2.
 3. *Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В.* Теоретическая гидродинамика, ч. 1. М., Физматгиз, 1963.
 4. *Луговцов Б. А., Луговцов А. А., Тарасов В. Ф.* О движении турбулентного вихревого кольца. В сб. «Динамика сплошной среды». вып. 3. Новосибирск, «Наука», 1969.
-