

ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ НЕСТАЦИОНАРНОЙ СТРУИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ОБЪЕМА ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА

А.И. Стручаев

Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова

Проблемная научно-исследовательская лаборатория
физики аэродисперсных систем

ул. Дворянская, 2, Одесса, 65082, Украина, mailto <aist_sullivan@list.ru>

В условиях экономии материальных и энергетических ресурсов весьма актуальной задачей становится использование вихревых колец при транспортировке веществ в дисперсном виде [1]. Особенно важна при этом высокая эффективность переноса дисперсной примеси «транспортным» объемом при его перемещении на максимальное расстояние [2].

Роль длины импульсной струи в формировании «транспортного» объема вихревого кольца, занимаемой торообразной вихревой структурой, состоящей из «ядра» и «атмосферы» сводится к следующему. Величина этого объема определяется областью, Диффузионные процессы, протекающие в этих областях, заметно отличаются своей интенсивностью: в «атмосфере» преобладает турбулентная диффузия, из-за чего потери примеси на начальном этапе приводят к оголению «ядра». Такое поведение примеси, помимо прочего, зависит и от условий формирования транспортного объема, связанного с длиной нестационарной струи.

Если бы весь объем вытолкнутой струи $(\pi D_a^2/4) \cdot l_j$ шел на создание объема вихревого кольца $\pi^2 D_0 a_0^2/4$, их равенство дало бы необходимую для этого длину струи (в безразмерном виде $\lambda_j = \pi \varepsilon^2 (D_0/D_a)^2$, связав с ней приведенную «толщину» кольца в виде $\varepsilon = (D_0/D_a) \cdot (\lambda_j/\pi)^{1/2}$, (где D_a и D_0 – диаметр отверстия генератора вихрей и начальный диаметр вихревого кольца соответственно; a_0 – начальный диаметр «ядра»; l_j – длина нестационарной струи, которая идет на формирование вихревого кольца).

Такая модель формирования кольца приемлема, когда трансформация объема струи в кольцевой вихрь идет по типу «диск – кольцо» (для диска $l_j/D_0 \leq 0,1$). Однако расчет приведенной «толщины» кольца с учетом соотношения $D_0/D_a = 1 + 0,85 \lambda_j^{1/4} \text{Re}_j^{-1/8}$ в области $800 < \text{Re}_j < 3000$ дает завышенные значения ($\varepsilon \geq 0,72$) против экспериментально наблюдаемых ($0,18 < \varepsilon < 0,37$), что характерно, скорее, для сферического вихря Хилла, как предельного случая существования вихревого кольца. Отмеченное расхождение вызвано некорректностью расчетов на основе лишь геометрических соображений, принимаемых во внимание при формировании объема вихря, что делает рассмотренную схему неприемлемой.

В работе предложен метод определения объема вихревого кольца в зависимости от длины вытолкнутой струи.

Учитывая, что «транспортный» объем формируется лишь из части нестационарного пограничного слоя струи толщиной $\delta \cong 5,05 \cdot l_j \text{Re}^{-1/2}$, из равенства объемов кольца и вовлеченного пограничного слоя находим длину пограничного слоя $l_\delta \approx \pi \varepsilon^2 \sqrt{\text{Re}} \cdot D_0/9$ и приведенную длину струи, участвующей в формировании кольца, $\lambda_j = (\pi \varepsilon^2 \gamma^{5/4}/5) \sqrt{\text{Re}}$, что дает зависимость толщины ядра от длины струи $\varepsilon = A \lambda_j^{1/2} \text{Re}^{-1/4}$, $A \approx (10/\pi)^{1/2} \gamma^{-5/8}$, что в наиболее приемлемом для формирования кольца диапазоне длин струй ($1,25 < \lambda_j < 3,75$ при $885 < \text{Re} < 3000$) близкую к полученной ранее [3]

$$\varepsilon = a_0/D_0 \cong B \lambda_j^{1/2} \text{Re}^{-1/4}, \quad B = 0.9 \cdot (1.03)^{-7/4} \lambda^{-1/12}.$$

Влияние длины формирующей струи на транспортные возможности вихревого кольца проанализировано по результатам ранее проведенных экспериментов. В воздухе переносимую «квазипассивную» примесь моделировали дымами хлоридов натрия ($1,88 \cdot 10^{-6} \text{ м} < d_{\text{NaCl}} < 3,15 \cdot 10^{-6} \text{ м}$) и аммония ($2,14 \cdot 10^{-6} \text{ м} < d_{\text{NH}_4\text{Cl}} < 3,56 \cdot 10^{-6} \text{ м}$), а в воде – раствором хлористой меди ($\rho_{\text{CuCl}} = 1,06 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$). Относительная погрешность определения в воздухе составляла: начальных диаметров кольца D_0 и ядра a_0 – $\varepsilon(D_0) = 5.5\%$, $\varepsilon(a_0) = 9.2$, чисел Рейнольдса струи и кольца – $\varepsilon(\text{Re}_j) \leq 12.2\%$ и $\varepsilon(\text{Re}_0) \leq 14.3\%$, дальности распространения L и «транспортного» коэффициента $\eta = \Delta m/m_0$ – $\varepsilon(L) = 1.0\%$ и $\varepsilon(\eta) \leq 8.6\%$, а в воде – $\varepsilon(D_0) = 3.0\%$, $\varepsilon(a_0) = 8.4$, $\varepsilon(\text{Re}_j) \leq 11.8\%$, $\varepsilon(\text{Re}_0) \leq 12.5\%$, $\varepsilon(L) = 1.0\%$, $\varepsilon(\eta) \leq 4.1\%$.

Проведенные эксперименты дают основание полагать, что при малых относительных длинах струй ($0.90 < \lambda < 2.25$) в области переходных режимов ($8,85 \cdot 10^2 < \text{Re} < 3 \cdot 10^3$) весь нестационарный пограничный слой входит в объем формирующегося вихревого кольца, которое при таких условиях образования длительное время существует в устойчивом состоянии, перенося находящуюся в нем примесь с минимальными потерями по сравнению с другими условиями образования вихря.

Литература:

1. Тарасов В.Ф., Якушев В.И. Экспериментальное исследование переноса примеси турбулентным вихревым кольцом // *Ж. прикл. мех. и техн. физ.*, 1974. – № 1. – С. 130 – 136.
2. Alexander I. Struchayev. Aerosols transport effectiveness of vortex rings // *J. Aerosol Sci.*, 1995. – Vol. 26, Suppl. 1. – P. 307 – 308.
3. Стручаев А.И. Связь кинематических и геометрических характеристик вихревых колец с параметрами генерирующего устройства при самоорганизации струйного течения // *Физика аэродисп. систем*, Вып. 42 – Одесса: Астропринт, 2007. – С. 100 – 111.