

УДК 532.516

А.И. Стручаев

Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова

Проблемная научно-исследовательская лаборатория физики аэродисперсных систем

ул. Дворянская, 2, Одесса, 65082, Украина, тел. +38(0482)639787

E-mail: aist_salivan@list.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ «МНОГОСЛОЙНОГО» ЯДРА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ КОНВЕКТИВНОГО МАССОПЕРЕНОСА ВИХРЕВЫМ КОЛЬЦОМ

Применен новый подход к объяснению результатов массопереноса, побужденного движением вихревого кольца в невозмущенной среде. Его особенность состоит в использовании модели «многослойного» устройства внутренней структуры вихревого кольца вместо принятой в гидродинамике модели «твердотельного» ядра. Эксперименты в диапазоне переходных режимов движения показывают обоснованность такого подхода.

В процессах массопереноса, особенно относящихся к конвективному переносу гомогенных и гетерогенных систем течениями с концентрированной завихренностью, важную роль играют зоны пространственной локализации такой завихренности. Они во многом обуславливают преобладающее влияние турбулентной диффузии на поведение переносимой субстанции в этих областях. Речь идет, прежде всего, об «атмосфере» и «ядре» вихревого кольца, которые могут использоваться для транспортировки «пассивной» примеси, т.е. вещества, не изменяющего своим присутствием основных характеристик несущего гидродинамического течения.

Научный и практический интерес к этим проблемам, связанным, в частности, с поиском и разработкой приоритетных энерго- и ресурсосберегающих технологий, побуждает к исследованию подобных течений при наличии тепло- и массообмена. Особые надежды при этом возлагаются на использование тех свойств упорядоченных вихревых структур, которые вносят основной вклад в турбулентный перенос и могут служить средством управления течением и тепломассообменом в потоке. Эти соображения делают особый вид гидродинамического течения, содержащего область концентрированной завихренности в форме вихревого кольца, привлекательным объектом исследования. Его строение обычно определяют, придерживаясь концепции «твердотельно вращающегося ядра» [1], не вдаваясь в возможные особенности его структуры и пространственной локализации зон завихренности.

Как показал анализ, проведенный в работе [2], размер «ядра» сформировавшегося вихревого кольца, должен описываться зависимостью

$$a_0 = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3), \quad \pi_1 = \frac{U_j D_a}{\nu} \equiv \text{Re}_j, \quad \pi_2 = \frac{L_j}{D_a} \equiv \lambda_j, \quad \pi_3 = \frac{\nu t}{L_j^2} \equiv \text{Fo}_\nu \quad (1)$$

учитывающей как влияние геометрического параметра (приведенную длину истекающей струи λ_j), так и роль гидродинамического режима истечения (число Рейнольдса Re_j) с учетом явной нестационарности условий импульсного течения (число Фурье Fo_ν для струи). Однако и в работе Сэффмана [3]

$$a_0 = 0,4 D_a \cdot \lambda_j^{2/3} \quad (2)$$

и в более ранней работе Максворти [4]

$$a_0 = 0,28 D_a \lambda_j^{2/3} \quad (3)$$

размер ядра, к сожалению, не зависит от определяющих безразмерных комплексов π_1 и π_3 , представленных в (1), а зависит лишь от приведенной длины λ_j . К тому же сами зависимости (2) и (3) отличаются друг от друга по величине, более чем в 1,43 раза. Более того, относительная толщина вихревых колец, сформированных из струй приемлемой длины, экспериментально наблюдается лишь у ламинарных вихревых колец.

В отличие от [3] и [4] в работе [5] влияние погранслоя на формирование ядра было учтено через его длину, связанную с длиной истекающей струи и режимом истечения струи

$$l_\delta = 0,505 \gamma^{-5/4} L_j, \quad \gamma = 1,03 (L_j / D_a)^{1/3},$$

что позволило при $0,85 < B < 0,97$ в диапазоне $4,0 > \lambda > 0,75$ получить выражение для размера образовавшегося ядра

$$a_0 = 0,9 \gamma^{-7/4} L_j \text{Re}_a^{-1/4} \equiv 0,95 L_j (D_a / L_j)^{1/12} (L_j / D_a)^{2/3} \text{Re}^{-1/4} = B L_j \lambda^{2/3} \text{Re}^{-1/4}, \quad (4)$$

Приведенные выражения (2), (3) и (4), с оговорками и необходимыми ограничениями, в разной степени применимы в рамках «однослойной» модели «ядра» вихревого кольца. Однако отмечаемое расхождение их с экспериментальными данными, нуждается в углубленном анализе причин такого положения и требует критического подхода при выборе той или иной модели ядра для объяснения

результатов конвективного массопереноса особенно в области переходных режимов движения вихревого кольца.

Разумеется, подобный подход вполне оправдан, когда речь идет лишь об определении геометрических и кинематических характеристик сформировавшегося устойчивого вихревого кольца, при гидродинамическом режиме движения которого достигаются числа Рейнольдса, характерные для турбулентного течения. Однако в исследованиях конвективного массопереноса, сопровождающего перемещение вихревого кольца в сплошной среде, особенно в области переходных гидродинамических режимов ($950 < Re < 1950$), экспериментально обнаруживается заметная неравномерность изменения размеров ядра («видимого» диаметра) по мере его движения по траектории [6]. Это, как правило, объясняется потерей «трассера» (красящего вещества, используемого для визуализации вихревого кольца и процессов массопереноса, сопровождающих его движение) из окружающей ядро «атмосферы». При этом неравномерность потерь примеси из ядра на тех участках движения, где «атмосфера» уже потеряна, разумного объяснения не находит, если придерживаться все той же модели «твердотельно» вращающегося ядра. Возможность же модели сложной «многослойной» структуры ядра вихревого кольца не рассматривается, а возникающие несоответствия результатов массопереноса принятой «твердотельной» модели при этом игнорируются.

В то же время известна модель устройства внутренней структуры вихревого кольца, относящаяся к структуре его ядра [7], в которой существование областей с различающимся строением и течением в этих областях, открывает возможности для нового объяснения имеющихся результатов.

Если придерживаться предложенной в упомянутой работе [7] концепции «многослойного» ядра вихревого кольца, образовавшегося на острой кромке выходного отверстия, его строение можно условно представить состоящим из трех областей в виде «вложенных» друг в друга тороидов, каждый из которых различается структурой течения во внутренних областях. Это приводит, в итоге, к различию в характере потерь переносимой примеси из различных областей «ядра» вихревого кольца.

Схему расположения областей внутренней структуры «ядра» вихревого кольца в поперечном сечении можно представить, исходя из физических принципов его формирования (рисунок 1). Во внешней области III «ядра», граничащей с «атмосферой» вихревого кольца, располагается тонкий пограничный слой, плотно скрученный в спираль на кромке выходного отверстия, из которого истекала импульсная струя, инициирующая образование вихревого течения с концентрированной завихренностью в форме вихревого кольца. Размер этой области определяется радиусом

$$r_{III} \sim (\gamma t)^{1/(p+1)}, \quad (5)$$

где γ – экспериментальная константа; $p = [2 - \sigma / (1 + m)] - 1$; $\sigma = \pi / (2\pi - \theta)$; $\pi/2 \geq \theta \geq 0$; причем, для «ядра», формирующегося на острой кромке кругового отверстия, расположенного перпендикулярно истекающей струе, $\theta = \pi/2$.

В области II, в которой действуют эффекты уменьшения расстояния между тонким пограничным слоем, сворачивающимся благодаря перемещению вихревой пелены как $\gamma^{(2+p)} t^{-1}$, а сам слой утолщается благодаря вязкой диффузии как $(\nu t)^{1/2}$, образуется, в основном, невязкое вращающееся ядро радиуса

$$r_{II} \sim (\epsilon \nu^{1/2} t^{3/2})^{1/(p+1)}, \quad (6)$$

где ϵ – некоторый размерный коэффициент.

В области I находится вязкое подядро радиуса

$$r_I \sim (\nu t)^{1/2}. \quad (7)$$

Следуя модели «многослойного» ядра и учитывая (5), (6), и (7), нужно так же предположить, что существование подобной структуры во внутренних областях ядра вихревого кольца с последовательностью их расположения $r_{III} > r_{II} > r_I$ обеспечивается при выполнении условия $t \gg t_v$, где $t_v = [\nu^{2-\delta} / \gamma^{2(1+m)}]^{1/(2m+\delta)}$ – промежуток времени, за который инерционные эффекты начинают преобладать в первой («внешней») области вихревого ядра.

Придерживаясь мнения о том, что структура вихревого кольца, образовавшегося на кромке выходного отверстия, угол которой $\pi/2 \geq \theta_I \geq 0$, является многослойной, и определив $\delta = \pi / (2\pi - \theta_I)$, из анализа Сэффмана (когда, разумеется, отсутствуют эффекты аксиальной скорости) может быть получено соотношение размеров внешней и внутренней областей ядра вихря. Поскольку радиус вязкого подядра вихревого кольца $r_{III} = (4\nu t)^{1/2}$, отношение r_I / r_{III} при $t = t_f$ для кругового отверстия, расположенного перпендикулярно направлению истечения струи, может быть получено из [7]

$$r_{III} / r_I = 2,4k(D_p, D_a) Re^{-1/2} \lambda^{1/6} \quad (8)$$

Из (8) следует, что в большинстве экспериментальных случаев вихревое кольцо хотя бы первоначально испытывает преобладание инерционных эффектов. После срыва с кромки r_{III} будет увеличиваться как $(\nu t)^{1/2}$, тогда как r_I должно оставаться постоянным.

Что же касается области невязкого вращающегося ядра, то считая, что растяжение вихревого погранслоя прекращается после срыва, радиус ядра r_{II} будет продолжать увеличиваться как $r_{II} \sim (\nu t)^{1/2(p+2)}$, благодаря утолщению пограничного слоя.

На рисунке 1 показано изменение характера потерь «пассивной» примеси на разных участках траектории вихревого кольца. Подобное поведение теряемой примеси невозможно объяснить одной лишь сменой гидродинамического режима движения кольца. Если же воспользоваться представлениями модели «многослойного» ядра, то объяснение в различиях потерь примеси на разных участках движения вполне удовлетворяется такой моделью: на участке I потери, в основном, происходят из области внешнего слоя (ламинарной «атмосферы»); на участке II – из области, соответствующей «гладкой спирали»; а на участке III – примесь теряется из области вязкого подядра. Последовательные потери переносимой примеси этих областей в конечном итоге приводит к «обнажению» «вязкого» ядра в области IV, где происходит его разрушение нарастающей азимутальной неустойчивостью при потере поступательной скорости.

Надежным основанием для принятия предложенной модели «многослойного» строения ядра вихревого кольца, учитывающей различие структуры течения во внутренних областях наряду с проявлением там инерционных или вязких эффектов, можно считать экспериментально наблюдаемое различие [6] в характере потерь переносимой примеси (аэрозольной – при моделировании в воздухе или красящего вещества, если моделирование массопереноса проводится в жидкости) на разных участках движения вихревого кольца. Анализируя характер и интенсивность потерь переносимого вещества (dm/dL) из объема вихря, обнаруженное различие можно объяснить, если следовать концепции «многослойного» строения внутренних областей кольца, т.е. его вихревого ядра.

Так, рисунок 2 показывает, что внутренние области «ядра» характеризуются различной интенсивностью потерь примеси, т.е. различной величиной множителя b_i [6] в законе потерь транспортируемой примеси, предложенном ранее [8]

$$m_i = m_0 \exp\{-b_i \cdot L(t)/D_0\} \quad (9)$$

где m_i – масса «пассивной» примеси, остающейся в объеме вихревого кольца к концу i -го участка; m_0 – начальная масса «примеси» в кольце; D_0 и $L(t)$ – начальный диаметр вихревого кольца и пройденное расстояние.

Из анализа интенсивности потерь примеси, происходящих на различных участках движения вихревого кольца, следует, что величина dm_i/dt , оставаясь постоянной в пределах каждого из участков с различной структурой течения, заметно различается по величине. При этом видимое «ядро» вихревого кольца, регистрируемое на каждом из модельных участков (см. рисунок 2), ведет себя в соответствии с наблюдаемой интенсивностью потерь.

Уменьшение видимых размеров ядра dr_I/dL на участке I коррелирует с величиной потерь dm_I/dL на этом же участке, что может свидетельствовать об удачном выборе границ модельных областей. Аналогичное качественное совпадение наблюдается и на других участках с большей или меньшей степенью количественного соответствия.

При любых режимах движения вихревых колец, характеризующихся разными значениями чисел Рейнольдса, обращают на себя внимание три отличающихся друг от друга участка траектории, на

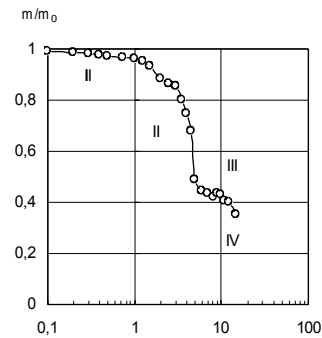


Рисунок 1 – Характерные изменения величины относительны потерь переносимой примеси из объема вихревого кольца, как характеристика его «транспортной» эффективности на разных участках движения

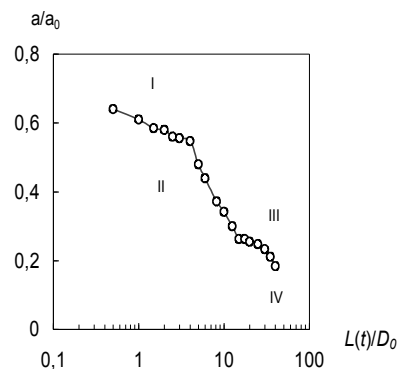


Рисунок 2 – Изменение относительного диаметра a/a_0 «ядра» вихревого кольца при потерях примеси в различных областях «слоистой» модели

которых потери аэрозольной примеси происходят по-разному. На начальном участке – от выхода вихревого кольца из устья или апертуры генератора до момента выхода на автомоделный режим движения – происходит формирование структуры вихревого кольца и нарастание циркуляции скорости $\Gamma(t)$ от нуля до некоторого постоянного значения, т.е. $d\Gamma/dt > 0$ при $0 \leq \Gamma(t) \leq \Gamma_0 = \text{const}$. На этом участке образовавшееся вихревое кольцо "толстое", а структура "атмосферы" и ядра из-за срыва завихренности в гидродинамический след еще окончательно не установилась. Ядро представляется явно неоднослойным: на этапе параллельно протекающих процессов формирования внутренней структуры ядра и интенсивно теряемой из объема вихревого кольца примеси "твердотельного" ядра пока не видно; вязкое ядро также скрыто "атмосферой" вихря.

На участке «автомодельного» движения ("автомодельность по Луговцову") сохраняется подобие в изменении кинематических характеристик вихревого кольца. Циркуляция скорости остается постоянной $\Gamma(t) = \Gamma_0 = \text{const}$, о чем свидетельствуют экспериментально полученные результаты изменения диаметра ядра вихревого кольца – на этом участке наблюдается примерная неизменность его толщины, возможная при условии $d\Gamma/dt = 0$.

На участке остановки и распада вихревого кольца IV наблюдается потеря поступательной скорости при сохранении вращательной. При этом из-за нарастания азимутальной неустойчивости возникают интенсивные турбулентные пульсации. Как следствие, дополнительно интенсифицируется турбулентное движение с переходом на молекулярный масштаб, что сопровождается разрушением ядра вихревого кольца. Циркуляция скорости быстро затухает от установившегося значения до нуля, т.е. $d\Gamma/dt < 0$ при $\Gamma_0 \approx \text{const} \geq \Gamma(t) \geq 0$; начинается более быстрое (по темпу нарастания) растяжение диаметра D_0 вихревого кольца и, как следствие, утоньшение диаметра "ядра" a_0 вихря.

Турбулентные пульсации скорости достигают такой амплитуды и интенсивности, что в результате остановившееся кольцо вскоре разрушается нарастанием азимутальных возмущений.

Отмеченные закономерности изменения диаметра «ядра» вихревого кольца и наблюдаемые корреляции с интенсивностью потерь из его объема на разных участках движения указывают на возможность использования концепции «слоистого» ядра для объяснения выявленных особенностей массопереноса в области переходных режимов.

Библиографический список

1. Tung C. Motion and decay of a vortex ring / C. Tung, L. Ting // *Phys. Fluids*. — 1967. — Vol. 10, No. 5. — P. 901 – 910.
2. Стручаев А.И. Связь кинематических и геометрических характеристик вихревых колец с параметрами генерирующего устройства при самоорганизации струйного течения / А.И. Стручаев // *Физика аэродисперсн. систем*. — 2007. — Вып. 43. — С. 100 – 112.
3. Saffman P.G. On the formation of vortex rings / P.G. Saffman // *Stud. Appl. Math.* — 1975. — Vol. 54, No. 3. — P. 261 – 268.
4. Maxworthy T. Some experimental studies of vortex rings / T. Maxworthy // *J. Fluid Mech.* — 1977. — Vol. 81, No. 3. — P. 465 – 495.
5. Тарасов В.Ф. Экспериментальное исследование переноса примеси турбулентным вихревым кольцом / В.Ф. Тарасов, В.И. Якушев // *Ж. прикл. мех. и техн. физ.* — 1974. — № 1. — С. 130 – 136.
6. Стручаев А.И. Особенности переноса пассивной примеси вихревыми кольцами в области переходных чисел Рейнольдса / А.И. Стручаев // *Вестник СевГТУ: Сер. Физика и Математика*. Вып. 43. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2003 — С. 124 – 132.
7. Pullin D.I. Vortex ring formation at tube and orifice opening / D.I. Pullin // *Phys. Fluids*. — 1979. — Vol. 22, No 3. — P. 401 – 403
8. Луговцов Б.А. О движении турбулентного вихревого кольца и переносе им примеси / Б.А. Луговцов // *Некоторые проблемы математ. и мех.* — Л.: Наука, 1970. — С. 15 – 21.

Поступила в редакцию 10.07.2007 г.