

Стручаев А.И.

Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова

Изменение характеристик конвективного массопереноса при движении вихревого кольца из-за порождения его неустойчивости

Высказывается предположение о влиянии неустойчивости вихревого кольца, возникающей на этапе формирования его ядра, на особенности переноса им «пассивной» примеси. Нередко наблюдаемые в области переходных чисел Рейнольдса отклонения от универсального закона переноса, удовлетворительно описывающего этот процесс в переходной области движения, иллюстрируются результатами экспериментальных наблюдений конвективного переноса «пассивной» дисперсной примеси на этом участке.

Введение. Возрастающий научный и практический интерес к процессам конвективного массопереноса, особенно к переносу гетерогенных (дисперсных) систем течениями с концентрированной завихренностью, связан, в частности, с поиском и разработкой энерго- и ресурсосберегающих технологий и побуждает к углубленному исследованию подобных течений. 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 теплообменом в потоке. Эти соображения делают гидродинамические течения, содержащие локальные вихревые структуры в форме вихревого кольца, привлекательным объектом исследования.

Зоны пространственной локализации завихренности, возникающие при самоорганизации непрерывного потока к дискретному вихревому кольцу, во многом обуславливают превалирующее влияние турбулентной диффузии на поведение переносимой субстанции в процессах тепло- и массообмена. Речь идет, прежде всего, об особых областях вихревого кольца - «атмосфере» и «ядре». Как показано в работах [1 – 4], они могут быть использованы в качестве транспортного средства для переноса взвешенных дисперсных примесей.

Систематические лабораторные и натурные исследования переноса «пассивной» дисперсной примеси вихревыми кольцами позволили получить важные результаты, относящиеся к эффективности их транспортировки [3, 4].

Общие представления и суть проблемы. Вихревое кольцо в своем развитии проходит три этапа: формирование тороидального вихря из нестационарной импульсной струи, выбрасываемой в окружающую среду, этап «квазиавтомодельного» развития с подобным преобразованием собственных кинематических характеристик (этап «автомодельного» движения по Луговцову) и этап затухания вихря, завершающегося не только потерей поступательной скорости, но и, собственно, распадом самого вихря. На каждом из этих этапов поведение вихревого кольца, а особенно, его внешней и внутренней областей, охваченных вихревым движением, имеет особенности гидродинамического вихревого течения, которые обуславливают изменение характерных параметров и характер

движения кольца на всем этапе его существования.

Рассмотрим один из способов формирования вихревого кольца, скажем, в результате импульсного истечения струи через круговое отверстие в стенке [5]. внутренние причины будут способствовать, во многих случаях, самоорганизации такого непрерывного потенциального течения к течению с локальной концентрацией завихренности в форме тороидального вихревого кольца.

Гидродинамический режим непрерывного струйного течения, характеризуемый числом Рейнольдса $Re_j = \nu^{-1} U_j D_a$ (где ν – кинематическая вязкость окружающей среды, U_j – скорость истечения струи из сопла диаметром D_a), во многом определяет так же и режим движения сформировавшейся локальной вихревой структуры – дискретного тороидального вихревого течения, чаще называемого вихревым кольцом. Если число Рейнольдса $Re_0 = \nu^{-1} U_0 D_0$ (U_0 – начальная скорость вихревого кольца, D_0 – начальный диаметр кольца), характеризующего режим движения сформировавшегося вихревого кольца, не превышает $Re_0 < 1000$, принято считать, что его движение происходит в ламинарном режиме. С превышением числом Рейнольдса значений $Re_0 > 3000$ движение переходит в область турбулентного режима. В диапазоне значений характерных чисел Рейнольдса $1000 < Re_0 < 3000$ находится область переходных гидродинамических режимов движения вихревого кольца.

Сформировавшиеся вихревые кольца в результате случайных начальных возмущений (чаще всего в зависимости от условий формирования и, несомненно, благодаря режиму движения) бывают устойчивыми, и неустойчивыми. Первые из них могут двигаться как в ламинарном режиме, так и в турбулентном, длительное время сохраняя начальную торообразную форму (рис. 1).

Причины порождения неустойчивости ядра вихревого кольца. Говоря о порождении неустойчивости вихревого кольца, как основной причине, вызывающей отклонения от универсального закона переноса «пассивной» примеси [3] и способствующей, кроме этого, затуханию поступательного движения кольца под действием возникающих возмущений течения в ядре вихря, следует

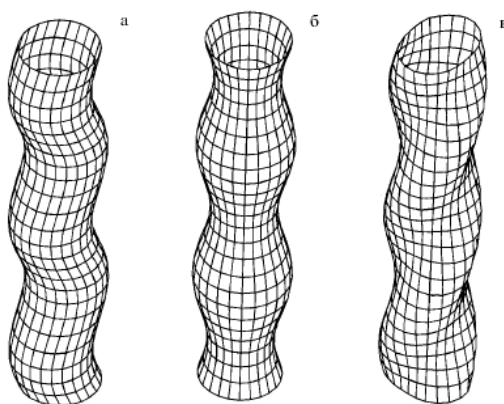


Рис. 1. Возможные формы возмущения границы цилиндрического вихря (элемент ядра вихревого кольца с однородной завихренностью $\zeta/r = const$): изгибная мода ($m = 1$, рис. 1а), бочкообразная мода ($m = 0$, рис. 1б), бесселевские моды и изолированная мода ($m = 2$, рис. 1в).

заметить следующее.

Прежде всего, сформировавшееся из непрерывного потенциального потока дискретное вихревое кольцо представляет собой неравновесную диссипативную систему. Если исходить с позиций устойчивости по Ляпунову, то такая система становится неустойчивой в случае нарастающего отклонения какой-либо характеристики от своего значения в положении равновесия при любых малых возмущениях. Ее развитие в результате самоорганизации может привести к установлению самосогласованных движений, при которых поступление энергии из внешнего источника компенсируется диссипативными потерями.

Наблюдаемая в экспериментах потеря устойчивости вихревых колец [6], сопровождаемая изменением торообразной формы вихря, возможна, вообще говоря, в любом гидродинамическом режиме, однако чаще всего она наблюдается в переходном. При этом в переходном режиме движения неустойчивость вихревых колец проявляется в двух видах. В обоих случаях изначально возникают внешне устойчивые кольца, но перестройка внутреннего течения приводит в одном случае к их «кувырканию» на некотором этапе движения, подавляя со временем этот процесс выработкой устойчивого течения и установлением новой стабильной внутренней структуры, а в другом - к диффузному размытию.

Непродолжительное существование «диффузных» вихревых колец связано с тем, что устойчивая внутренняя структура у них не успевает установиться, поскольку пульсации скорости не подавляются, а нарастают, что и способствует диффузному размытию вихревой структуры. Разумеется, конвективный перенос осуществляется любыми видами образовавшихся вихревых структур в форме колец, но его систематические закономерности удастся установить лишь для устойчивых вихревых колец, к которым все же следует отнести «кувыркающиеся» кольца, поскольку после установления устойчивой внутренней структуры последующий этап их движения подчиняется закономерностям, свойственным стабильным вихревым кольцам.

Движение вихревого кольца, как уже отмечалось раньше, сопровождается потерей переносимой примеси в его гидродинамический след. Причем, вначале из его объема уносится часть примеси, находящаяся в «атмосфере», а на эффективность переноса этой примеси влияет режим движения вихревого кольца. Оказывается, однако, что смена гидродинамического режима течения – не единственная причина наблюдаемой зависимости. Важную роль в этом играет также строение внутренней области вихревого кольца, т.е. его «атмосфера» и «ядро». Причем, замечена корреляция результатов, связанных с массопереносом из области превалирующей локализации примеси и структурой этой области [7]. Другими словами – эффективность переноса и изменение размеров видимой части «ядра» схожи в схожих точках траектории вихревого кольца.

Причиной порождения неустойчивости вихревых колец, как показано в [8], являются их собственные колебания, большая часть которых при учете «размазывания» (диффузии) ядра вихря теряет устойчивость. Причем утверждается, что эффект потери устойчивости определяется знаком энергии колебаний в двух выделенных классах колебаний – модах с положительной энергией и мо-

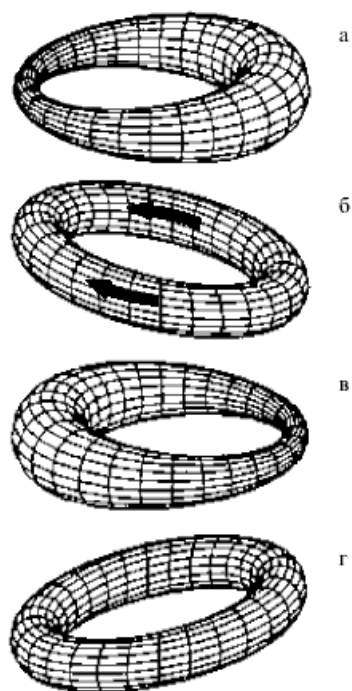
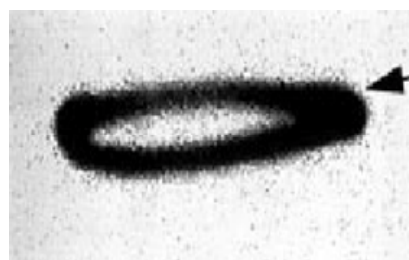


Рис. 2. Картина деформации поверхности ядра с одновременным действием бочкообразной и изгибной деформации.



а



б

Рис. 3. Проявление действия бочкообразной и изгибной деформации на ядре всплывающего вихревого кольца.

дах с отрицательной энергией. Показано, что именно моды с положительной энергией теряют устойчивость при диффузии завихренности ядра.

Решение для собственных колебаний и определение формы возмущенной поверхности ядра вихревого кольца (рис. 2) получено в [8] и использовано в настоящей работе для иллюстрации совпадения указанных форм с возникающими фигурами видимого ядра, полученного в экспериментах с задымленными вихревыми кольцами [9] (рис. 3).

На рис. 2*а*, 2*б*, 2*в* и 2*г* показана бочкообразная стоячая мода ($l = 0, n = \pm 1, i = \geq 1$), при которой бочкообразная деформации поверхности сопровождается изгибной, сдвинутой по фазе на $\pi/2$.

На рис. 3 приведены фотографии вихревых колец тепловой природы. Одно из них распространяется в невозмущенной среде в области переходного режима (рис. 3*а*, после отрыва гидродинамического следа, $Re_0 = 1.55 \cdot 10^3$), а второе (рис. 3*б*, $Re_0 \sim 5 \cdot 10^5$), поднимаясь в свободной атмосфере под действием сил плавучести, сносится в горизонтальном направлении силой бокового ветра. Возникновение бочкообразной деформации ядра вихревого кольца, отчетливо проявляющейся на фотографиях, подобно изображенной на рис. 2*а* и 2*в*, сопровождается заметной изгибной деформацией (фото *б* рис. 3), как следствие



Рис. 4. (фото 1, 2, 3). Возмущение поверхности ядра под действием собственных колебаний вихревого кольца при движении в области переходного гидродинамического режима [10] в разные моменты времени: 1 – 0.85 с; 2 – 1.35 с; 3 – 3.05 с

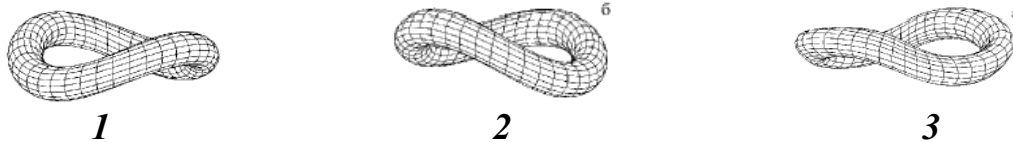


Рис. 5. Расчетные формы возмущения границы ядра вихревого кольца при изгибной моде ($l = 0, n = 2, j = 0$), соответствующие изменениям формы его поверхности на фото 1, 2 и 3 (рис. 4).

упругости любого завихренного течения. На фото 3.б обращает на себя внимание более интенсивное проявление потерь примеси из ядра вихревого кольца в области бочкообразной деформации. Если судить, исходя из того, что подобного вида деформация наблюдается как в переходном ($Re_0 = 1,55 \cdot 10^3$), так и турбулентном ($Re_0 \sim 5 \cdot 10^5$) режимах движения вихревого кольца, ее проявление носит универсальный характер.

Как будет показано, возникающие возмущения границы вихревого ядра тороидального вихря, сопровождаемые «размазыванием» завихренности из-за эффектов диффузии в реальной жидкости (особенно заметные на фото 1 рис. 4), вполне могут явиться причиной особенностей конвективного массопереноса при движении вихревого кольца в области переходных гидродинамических режимов. Развитие же турбулентности при множественной неустойчивости колебаний вихревого кольца и особенности их пространственной структуры является следствием нелинейного развития именно этих процессов (рис.5).

Влияние возникающей неустойчивости ядра на перенос примеси. В общем случае, при осуществлении конвективного переноса вихревым кольцом, количество «пассивной» примеси $m(\lambda)$, остающейся в его «транспортном» объеме с пройденным расстоянием λ , можно описать выражением

$$m(\lambda) = m_0 \exp\{-\beta\lambda(t)\}, \quad \lambda(t) = L(t)/D_0, \quad (1)$$

а эффективность переноса на каждом из участков N , различающихся условиями поведения «ядра», характеризовать «транспортным» коэффициентом [11]

$$\eta(N) = \frac{m_N(\lambda)}{m_{N-1}} = b_m \cdot \exp\{-\beta(N) \cdot \lambda(N)\}, \quad N = I, II, III \quad b_m \cong 1.0 \quad (2)$$

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

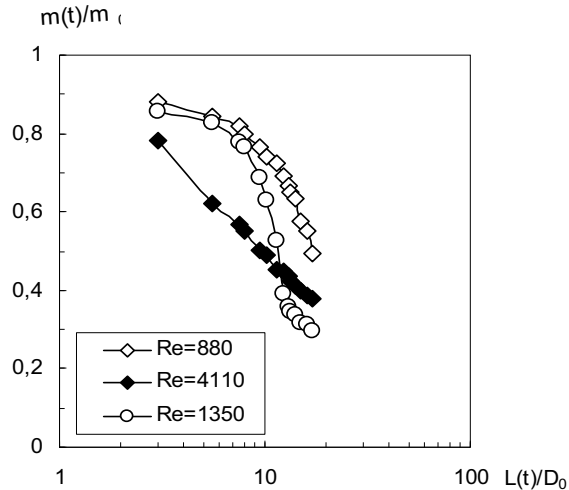


Рис. 6. Транспортная эффективность вихревого кольца $m(t)/m_0$ в области ламинарного ($Re = 880$), переходного ($Re = 1350$) и слаботурбулентного ($Re = 4110$) режимов движения на участке $3 < \lambda < 12$

Анализ экспериментов по переносу «пассивной» дисперсной примеси вихревыми кольцами позволил выявить некоторые характерные особенности в исследованном диапазоне чисел Рейнольдса при $8.80 \cdot 10^2 < Re_0 < 8.35 \cdot 10^4$.

Различия в скорости диффузии примеси из «атмосферы» и из «ядра» при конвективном переносе вихревым кольцом вполне объяснимы. В «атмосфере» турбулентность способствует срыву завихренности и уносу ее в гидродинамический след, а в «ядре» вихря происходит подавление турбулентных пульсаций [12]. Другое дело – аномалия в интенсивности потерь в переходном режиме, особенно на участке $5 < L(t)/D_0 < 12$, где приведенное объяснение неприемлемо.

Как видно из рис. 6 на нижней границе диапазона $8.85 \cdot 10^2 < Re_0 < 1.85 \cdot 10^3$, где процессы переноса «пассивной» примеси из областей ее локализации определяются в основном молекулярной вязкостью и диффузией, транспортная эффективность ламинарных вихревых колец на начальном участке заметно выше, чем у колец, движущихся в переходном и слаботурбулентном режиме. Возникновение неустойчивости внутреннего течения в кольце в этой области практически не наблюдается.

На верхней же границе диапазона ($Re_0 > 4.0 \cdot 10^4$), где происходит зарождение турбулентного режима, турбулентная диффузия становится преобладающей и способствует интенсивному высыпанию переносимой примеси из объема вихревого кольца в гидродинамический след. Возможное порождение неустойчивости ядра подавляется его ламинаризацией [11]. Это снижает потери примеси из ядра, в то время, как унос примеси из «атмосферы» вихря идет с большой, но постоянной интенсивностью, о чем свидетельствует ход зависимости транспортной эффективности на рис. 6 для режима $Re_0 = 4140$.

Особый интерес представляет область переходного ($2.00 \cdot 10^3 < Re_0 < 2.55 \cdot 10^3$) режима. На начальном этапе движения вихревого кольца ($N = L$), когда только начинается развитие процесса зарождения неустойчивости ядра, перенос

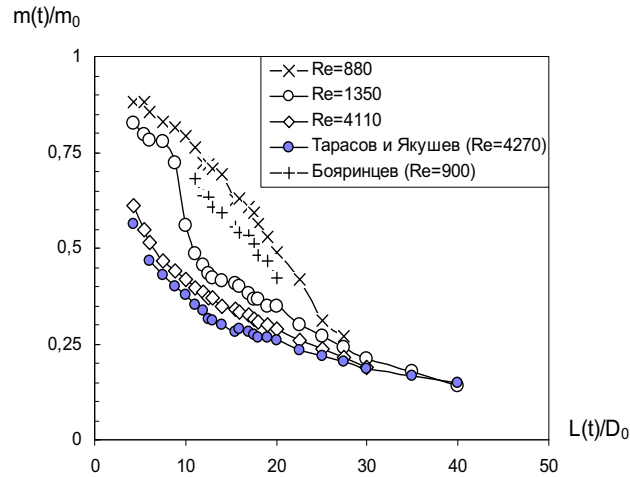


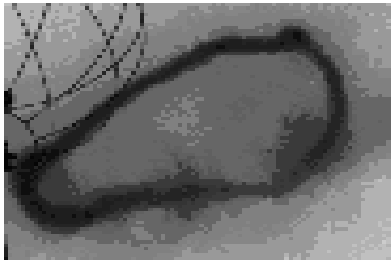
Рис. 7. Зависимость «транспортной» эффективности вихревого кольца от пройденного им расстояния (дальности доставки)

примеси происходит так же, как и при ламинарном движении (начальный участок кривой $Re_0 = 1350$ на рис. 6). Затем, на участке перехода ($N = II$), происходит резкое изменение интенсивности потерь примеси, вызванное сменой режима течения при установлении одного из упоминавшихся ранее видов неустойчивости ядра вихревого кольца. Причем, о ходе перестройки течения в ядре вихревого кольца, влияющего на интенсивности потерь примеси, говорит характер поведения коэффициента транспортной эффективности – он резко снижается от значений, характерных для ламинарного режима до величин, свойственных переносу в турбулентном режиме движения. Количество примеси, сохраняющейся в объеме вихревого кольца на этом этапе движения описывается модифицированным выражением, которое, с учетом чувствительности коэффициента β к гидродинамическому режиму движения ($\beta = \psi(Re_0)$), позволяет на основе экспериментальных данных представить зависимость (1) в переходной области ($1.0 \cdot 10^3 < Re_0 < 3.0 \cdot 10^3$) в виде

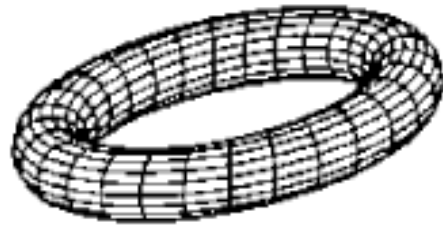
$$m(\lambda) = m_0 \exp\{-1.04 Re_0^{-1/3} \lambda(t)\}, \quad (3)$$

Анализ экспериментов [3, 10, 11, 13] по переносу «пассивной» примеси вихревыми кольцами позволил выявить некоторые отличия в поведении коэффициента «транспортной» эффективности, вызванные различными условиями её потерь при движении в разных гидродинамических режимах. Поведение коэффициента «транспортной» эффективности вихревого кольца указывает на то, что существуют участки траектории с различающейся интенсивностью потерь примеси (рис. 7).

В области I, если судить по количеству примеси, остающейся в транспортном объеме вихревого кольца, интенсивность потерь dm/dt на начальном участке движения ($\lambda < 12$) заметно превышает эту характеристику на участке $12 < \lambda < 25$. Это вполне объяснимо, хотя бы уже тем, что первый участок, на котором происходит формирование «атмосферы» и устойчивого «ядра» вихревого кольца, устанавливает характер внутреннего течения в объеме вихря и иерархию



а



б

Рис. 8. Результат (8а) действия изгибной и бочкообразной деформации (8б) на заключительном этапе существования вихревого кольца [9]

возможных пульсаций скорости, нарастающих в «атмосфере» и подавляемых в ядре вихря. Это, естественно, ведет к наблюдаемому высыпанию из «атмосферы» вихревого кольца частиц примеси, не попавших в формирующееся «ядро».

Так, на участке $0 < \lambda < 6$ ($N = I$), где потери переносимой примеси происходят в основном из «атмосферы» вихревого кольца. Их интенсивность ниже, чем на участке $6 < \lambda < 12$ ($N = II$), где основные потери вызваны перестройкой внутреннего течения в результате конкурирующих процессов подавления ведущих пульсационных мод и выработкой нового устойчивого течения в «ядре».

По мере движения кольца в области $25 < \lambda < 35$ ($N = III$) почти вся примесь уже захвачена устойчивым внутренним течением сформировавшегося «ядра», где пульсации скорости сильно подавлены. Интенсивность потерь dm/dt в этой области, если судить по поведению коэффициента «транспортной» эффективности $\eta(\lambda)$, заметно уменьшается, т.к. остатки примеси локализованы в плотно-скрученном «ядре», диффузия из которого приглушена наступившей «ламинаризацией» его структуры. Некоторое количество примеси, окружающей «ядро», все еще сопровождает его, однако заметного повышения потерь вызвать не может. Об этом свидетельствует и изменение величины коэффициента β по сравнению с его величиной на участке интенсивных потерь в области II .

На этапе $\lambda > 35$ ($N = IV$), который соответствует потере вихревым кольцом поступательной скорости и прогрессирующей стадии разрушения вихря, потери примеси из транспортного объема вихря снова возрастают. Однако это возрастание носит плохо воспроизводимый характер из-за нелинейности процесса разрушения ядра вихревого кольца нарастающей азимутальной неустойчивостью и действием действие изгибной и бочкообразной деформации (рис. 8).

Рост неустойчивости на ядре вихревого кольца провоцирует так же и рост неустойчивости внутреннего течения: «ламинаризация» ядра исчезает, уступая место усиливающейся турбулентной диффузии. Это, естественно, интенсифицирует процесс потерь примеси, окончательно разрушая транспортный объем.

Заключение. Наблюдаемые в области переходного режима движения отклонения от универсального закона переноса «пассивной» примеси [2] при транспортировке ее вихревым кольцом вполне объяснимы порождением неустойчивости ядра [8], существенно изменяющей структуру внутреннего течения в нем и приводящей к «включению» дополнительных механизмов интенсифи-

кации потерь из транспортного объема. Привлекаемые объяснения вполне могут оказаться не единственной причиной экспериментально обнаруженных особенностей переноса примеси в переходном режиме, однако результаты систематических наблюдений удачно согласуются с учетом влияния на конвективный массоперенос механизма порождения неустойчивости ядра вихревого кольца в принятой модели.

Литература:

1. *Turner J.S.* On the intermittent release of smoke from chimneys // *Mech. Enging. Sci.*, 1960. – Vol.2. – P. 356-359.
2. *Луговцов Б.А.* О движении турбулентного вихревого кольца и переносе им примеси // *Некоторые проблемы математатики и механики.* – Л.:Наука, 1970. – С.15 - 21.
3. *Тарасов В.Ф., Якушев В.И.* Экспериментальное исследование переноса примеси турбулентным вихревым кольцом // *Журнал прикладной механики и технической физики.* – 1974. – №1. – С. 130 - 136.
4. *Стручаев А.И.* Перенос аэрозолей организованными вихревыми структурами: изолированным кольцом, взаимопроникающей парой и каскадом // XIV Всес. конф. “Актуальные вопросы физ. аэродисперс. систем”, Одесса, 29 сент.- 2 окт., 1986 г. / Тез. докл. – Одесса: 1986. – Т.1. – С. 97.
5. *Pullin D.I.* Vortex ring formation at tube and orifice opening // *Phys. Fluids*, 1979. – Vol. 2, No. 3. – P.P. 401 – 403.
6. *Chen C.F, Mattingly J.E., Viets H.* Discussion: Flow patterns of a circular vortex rings with density difference under gravity // *Trans. ASME: J. Appl. Mech., E.*, 1973. – Vol. 40, No. 2. – P. 637 – 639.
7. *Стручаев А.И., Копыт Н.Х., Бойко Ю.И.* Эффективность переноса дисперсной примеси вихревыми кольцами // *Гидродинамические проблемы технологических процессов.* – М.: Наука, 1989. – С. 126 – 134.
8. *Копьев В.Ф., Чернышев С.А.* Колебания вихревого кольца, возникновение в нем турбулентности и генерации звука // *Успехи физических наук.* – 2000.– Т. 170, №7. – С. 713 – 742.
9. *Кузнецов А.А., Конопасов Н.Г.* Экспериментальные исследования кольцевых вихрей продуктов сгорания в свободной атмосфере // *Физика аэродисперсных систем* – Одесса: Астропринт, 2006. – №.43. – С. 100-105.
10. *Юсупалиев У., Юсупалиев П.У., Шутеев С.А.* Импульсное осесимметричное истечение плотной плазмы в газовую среду. 2. Условия образования и устойчивость плазменного тороидального вихря // *Журнал технической физики.* – 2007. – Т.77, № 1. – С. 50 – 62.
11. *Стручаев А.И.* Особенности переноса пассивной примеси вихревыми кольцами в области переходных чисел Рейнольдса // *Вестник СевГТУ: Сер. Физика и Математика.* Вып. 43. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2003. – С. 124-132.
12. *Владимиров В.А., Луговцов Б.А., Тарасов В.Ф.* Подавление турбулентности в ядрах концентрированных вихрей // *Журнал прикладной механики и техни-*

13. Бояринцев В.И., Леонтьев А.И., Сысоев В.И. Массоперенос жидкости вихревых колец в стратифицированных средах // Науч. тр. Моск. лесотехн. ин-та, 1981. – № 130. – С. 51 - 59.

Стручаев О.И.

Зміна характеристик конвективного масопереносу при русі вихрового кільця завдяки породженню його нестійкості

АНОТАЦІЯ

Висловлюється припущення щодо впливу нестійкості вихрового кільця, яка виникає на етапі формування його ядра, на особливості перенесення їм «пасивної» домішки. Нерідко спостережувані у області перехідних чисел Рейнольдса відхилення від універсального закону, який задовільно описує цей процес в перехідній області руху, ілюструються результатами експериментальних спостережень конвективного «пасивної» дисперсної домішки на цій ділянці.

Stroutchayev A.I.

Convective mass transfer characteristics change on a vortex ring motion due to instability generation

SUMMARY

The assumptions were formulated about effect of vortex ring instability arising on the "core" formation stage on the «passive» admixture transfer peculiarities. Often observed deviations from the universal law at intermediate Reynolds numbers were illustrated by the experimental study results of convective mass transfer of dispersed "passive" admixture.