Письма в ЖЭТФ, том 103, вып. 7, с. 516 – 521

Явление вихревого перезамыкания в закрученном потоке

С. В. Алексеенко, П. А. Куйбин, С. И. Шторк, С. Г. Скрипкин[1], М. А. Цой

[+]*Институт теплофизики им. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия*

[*]*Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 14 января 2016 г.
После переработки 29 февраля 2016 г.

Представлены результаты экспериментального исследования процессов вихревого перезамыкания на винтовом вихре, который формируется в закрученном течении в коническом диффузоре. Показано, что перезамыкание может приводить к образованию как изолированного вихревого кольца, так и зацепленного с основным винтовым вихрем. Описан ряд особенностей процесса вихревого перезамыкания, включая эффекты асимметрии, генерацию волн Кельвина и формирование разнообразных мостиков (bridges).

DOI: 10.7868/S0370274X16070067

Среди огромного многообразия вихревых структур выделяются концентрированные вихри типа бесконечно тонких вихревых нитей или вихревых трубок, имеющих конечный размер ядра [1, 2]. Наиболее важным свойством вихревых трубок является их индуцированное движение, которое приводит к взаимодействию как разных трубок друг с другом, так и отдельных частей одной искривленной трубки между собой. Принципиально важным представляется явление вихревого перезамыкания (*vortex reconnection*), приводящее к кардинальному изменению топологии вихревых структур [3].

Концепция вихревых нитей была особенно плодотворна при разработке теории турбулентности сверхтекучего гелия [4]. Квантовая турбулентность представляется пучком взаимодействующих квантовых вихрей [4, 5]. И именно вихревое перезамыкание является механизмом, отвечающим за это взаимодействие и последующий энергетический каскад, связанный с непрерывным образованием все более мелких вихревых петель (колец). Экспериментально доказаны существование квантовых вихрей, наличие процессов вихревого перезамыкания, образование вихревых колец и волн Кельвина [6, 7].

Подавляющее большинство исследований процесса вихревого перезамыкания в обычной жидкости основано на методах теоретического или численного моделирования. Они начинались с анализа синусоидальной неустойчивости пары вихрей противоположного знака, срывающихся с концов крыльев самолета [8]. В последующие годы интенсивные теоретические исследования, включая прямое численное моделирование на основе полных уравнений Навье–Стокса, были выполнены для следующих основных случаев взаимодействия: две антипараллельные вихревые трубки [9–16], две перпендикулярно ориентированные трубки [17], два вихревых кольца [18–20], два зацепленных вихревых кольца [20], замкнутая вихревая трубка в форме тройного узла [21, 22]. Исходя из этих расчетов, сценарий вихревого перезамыкания можно описать следующим образом. При любой исходной ориентации двух трубок они начинают сближаться благодаря взаимной индукции или самоиндукции таким образом, что части двух трубок располагаются антипараллельно друг к другу (с противоположным направлением вектора завихренности) [23]. При этом они уплощаются. Далее включаются вязкие механизмы, вследствие которых трубки изгибаются в месте соединения, а между ними возникают два мостика (*bridges*) [10, 13–16]. Затем вновь образовавшиеся трубки вблизи мостиков принимают форму подковообразных вихрей (*hairpin vortices*) и быстро удаляются друг от друга за счет самоиндуцированного движения. Между мостиками формируются две тонкие параллельные нити (*threads*).

Описанные выше механизмы и сценарии лишь частично подтверждены в экспериментах в силу ограниченности последних. Опыты проведены преимущественно по взаимодействию двух вихревых колец [24–26]. В эксперименте Hama [27] удалось пронаблюдать отрыв вихревого кольца от участка вихревой трубки в пограничном слое при формировании подковообразных вихрей и последующем вихревом перезамыкании. Известно также несколько работ [28, 29],

[1]e-mail: Skryp91@mail.ru

посвященных моделированию пары вихревых трубок противоположного знака, сходящих с концов крыльев самолета. Наиболее детальные эксперименты по вихревому перезамыканию проведены недавно с двумя зацепленными кольцами и для вихря в форме тройного узла [30, 31]. Такие вихревые структуры создавались искусственно в жидкости с использованием методики ускоренного движения специально профилированных гидрокрыльев, которые изготавливались на 3D-принтере. Показано, что в итоге процессов вихревого перезамыкания в обоих случаях всегда формировались два вихревых кольца. Таким образом, из доступных экспериментальных работ следует, что процесс вихревого перезамыкания действительно реализуется в разнообразных вихревых системах. Однако количество таких экспериментов весьма ограничено, а сам процесс вихревого перезамыкания практически не изучен.

Данная статья представляет результаты экспериментального наблюдения вязкого вихревого перезамыкания в закрученном потоке. Впервые в деталях показан процесс образования изолированных и зацепленных вихревых колец за счет перезамыкания между отдельными частями спиральной вихревой трубки, которая формируется в закрученном течении в расширяющемся канале.

Исследования проводились с использованием замкнутого гидродинамического контура, имеющего вертикальную компоновку. В качестве рабочего участка использовался конический диффузор, изготовленный из прозрачного оргстекла с полированными стенками (рис. 1). Закрутка потока производилась перед входом в диффузор посредством лопаточного завихрителя, который обеспечивал значение параметра крутки потока $s = 2M/KD = 0.47$. Здесь M – поток момента количества движения, K – поток количества движения, D – диаметр горловины диффузора. Параметр s вычислялся непосредственным интегрированием профилей скоростей, измеренных с помощью лазерно-доплеровского анемометра. Визуализация вихревых структур осуществлялась паровыми пузырьками, которые образовывались за счет кавитации в областях пониженного давления, т.е. на оси вихря. При необходимости в поток добавлялись пузырьки воздуха. С целью видео- и фотосъемки картины течения применялась различная техника: скоростная видеокамера Photron с максимальным разрешением 1 Мп и частотой кадров до 20 кГц; скоростная видеокамера CMOS PCO 1200.hs. При значении параметра крутки потока $s = 0.47$ происходит распад вихря с образованием прецессирующей

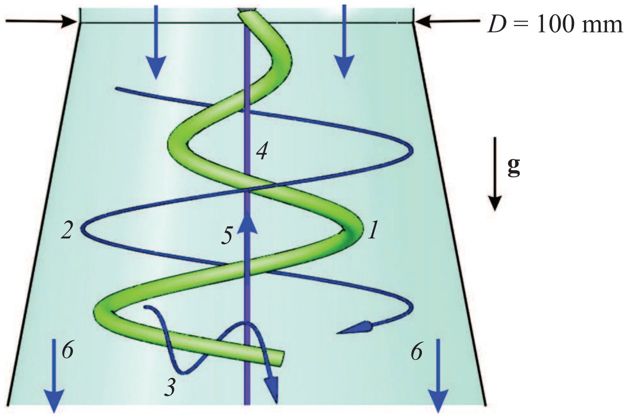

Рис. 1. (Цветной онлайн) Спиральный вихрь в закрученном потоке в коническом диффузоре: *1* – спиральная вихревая нить, *2*, *3* – траектории частиц жидкости вблизи стенки и оси вихря, *4* – воображаемая ось канала, *5*, *6* – направление потока вдоль оси и стенок канала. Жидкость движется сверху вниз. Общая закрутка потока по часовой стрелке (если смотреть сверху). Спиральный вихрь вращается (прецессирует) в сторону закрутки потока

вихревой нити спиральной формы [1]. Структура базового течения, реализующегося в коническом рабочем участке, представлена на рис. 1. Видно, что вихревое ядро сворачивается в левовинтовую спираль (ход винта противоположен направлению закрутки потока). Условия распада вихря связаны с образованием противотока вдоль геометрической оси канала. При этом прямое опускное движение реализуется вдоль стенок рабочего участка. Для условий, при которых проводились исследования, характерная частота прецессии винтообразного вихря составляет 58 Гц, что соответствует периоду полного оборота спирали 17 мс. Для сравнения укажем, что характерные времена процессов перезамыкания вихревого ядра, как будет описано ниже, составляют порядка нескольких мс.

Процесс формирования изолированного вихревого кольца вследствие вихревого перезамыкания показан на рис. 2 и 3. На рис. 2 представлены результаты видеосъемки, полученные с помощью высокоскоростной камеры Photron.

Здесь и далее число Рейнольдса Re определено как Γ/ν, где ν – кинематическая вязкость, Γ – циркуляция, значение которой оценено на основе теоретической модели [2]. Общая схема процесса соответствует результатам численного моделирования ряда работ, например [10, 13–16]. Однако наблюдаются и некоторые отличия. Кадр 3 демонстрирует исходное состояние вихревой системы. Завитая влево спираль-

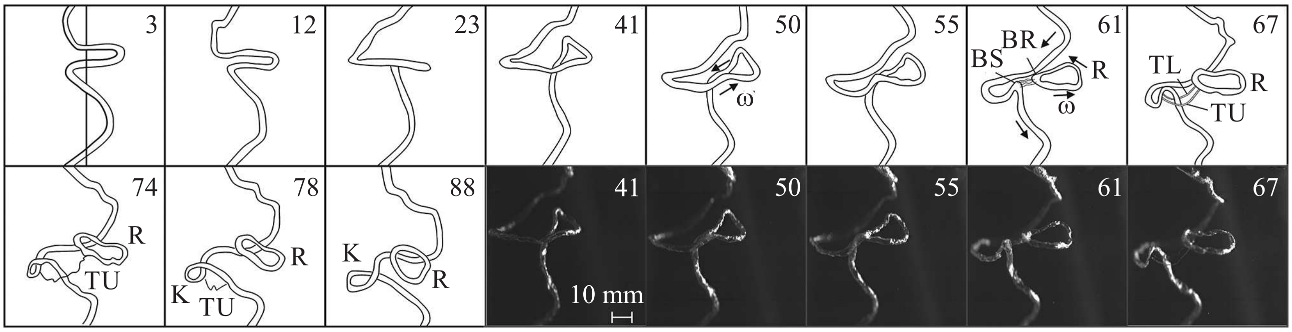

Рис. 2. Визуализация и схема процесса вихревого перезамыкания на спиральной вихревой трубке с образованием изолированного вихревого кольца. Цифры обозначают номера кадров в видеосъемке. Частота съемки 7000 кадр/с, экспозиция 50 мкс, число Рейнольдса $Re = 1.1 \cdot 10^5$. Обозначения: S – спиральная вихревая трубка, R – вихревое кольцо, K – волна Кельвина, BS и BR – мостики на спиральной вихревой трубке и кольце соответственно, TU и TL – нити, возникшие из верхней и нижней частей спиральной вихревой трубки, т.е. тех участков трубки, которые соединялись в процессе перезамыкания. Стрелка показывает направление вектора завихренности ω. Интернет-ссылка на видеофильм: https://cloud.mail.ru/public/Lq8p/AgczqLZRK

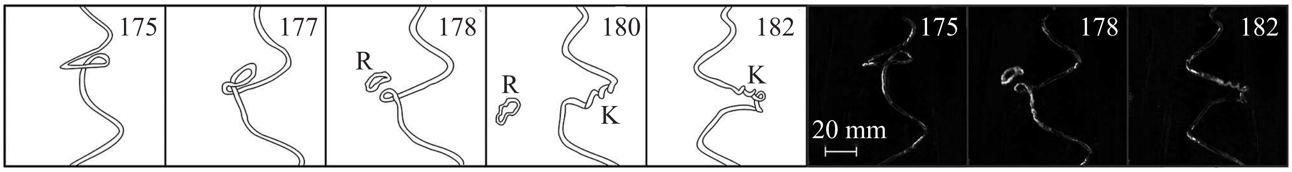

Рис. 3. Визуализация и схема процесса вихревого перезамыкания на спиральной вихревой трубке с образованием изолированного вихревого кольца. Частота съемки 499 кадр/с, экспозиция 100 мкс, $Re = 1.3 \cdot 10^5$. Остальные обозначения см. на рис. 2. Интернет-ссылка на видеофильм: https://cloud.mail.ru/public/5TG1/vN3G1CbGV

ная вихревая трубка вращается вместе с закрученным потоком вправо (если смотреть сверху). В силу неустойчивого состояния вихревой системы в расширяющемся канале, в частности из-за подъемного движения жидкости в приосевой зоне канала, в некоторый момент времени один из витков спирали начинает подниматься вверх (кадры 12, 23). Затем наблюдается перехлест этого витка (41), а далее включается механизм сближения участков трубки (50). Вихревые трубки с противоположными направлениями вектора завихренности ориентируются антипараллельно друг другу. За время порядка 1.2 мс трубки изгибаются в области их соединения (55), сплющиваются, как будет более наглядно показано ниже, и в течение 1 мс происходит процесс перезамыкания с формированием двух мостиков (*bridges*) между разными участками трубки и двух остаточных нитей (*threads*), похожих на мостики, но значительно тоньше, в месте сближения участков трубки (61, 67). Здесь использована терминология, предложенная в [14]. Мостики изгибаются в форме подковообразных вихрей и начинают удаляться друг от друга вследствие индуцированного движения. В результате перезамыкания от спиральной трубки S отсоединяется вихревое кольцо R, а на вихревой трубке формируется волна Кельвина, бегущая вверх по трубке (61–88). Таким образом, весь процесс перезамыкания, начиная с антипараллельной ориентации вихревых трубок и заканчивая отрывом вихревого кольца, занимает 2.2 мс, что почти на порядок меньше периода прецессии.

В отличие от симметричной постановки задачи в численном моделировании данный эксперимент демонстрирует явную асимметрию процесса перезамыкания. Поэтому на рисунках введены разные обозначения для двух мостиков и двух остаточных нитей: BS и BR – мостики на спиральной вихревой трубке и кольце соответственно, TU и TL – нити, возникшие из верхней и нижней частей спиральной вихревой трубки, т.е. тех участков трубки, которые соединялись в процессе перезамыкания. Для мостика BR на кольце условия почти симметричны. На спиральной же трубке соединяющиеся участки трубки сближаются при почти перпендикулярной ориентации (61, 67). Это приводит к появлению сильно искривленной петли спиральной формы – мостик BS на кадре 61, который и является источником волны Кельвина K. Асимметрия наблюдается, соответственно, и для

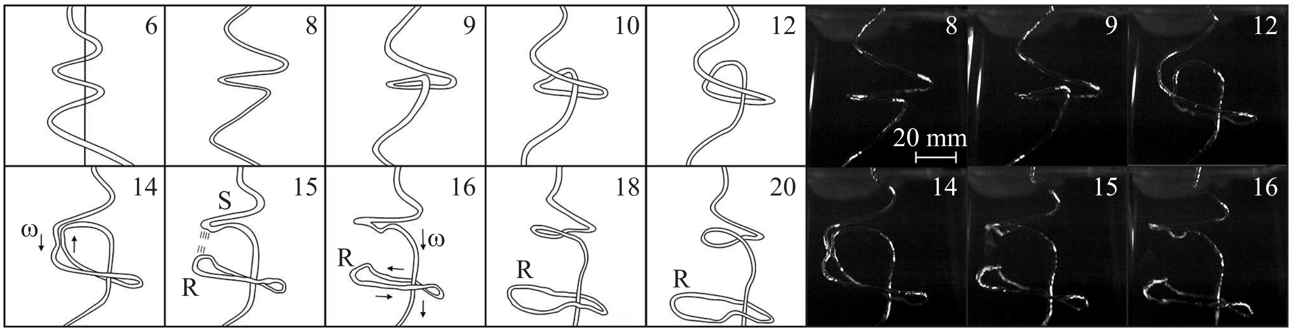

Рис. 4. Визуализация и схема процесса вихревого перезамыкания на спиральной вихревой трубке с образованием зацепленного вихревого кольца. Частота съемки 499 кадр/с, экспозиция 200 мкс, $\mathrm{Re} = 1.1 \cdot 10^5$. Остальные обозначения см. на рис. 2. Интернет-ссылка на видеофильм: https://cloud.mail.ru/public/819w/Jm1xiw1Bi

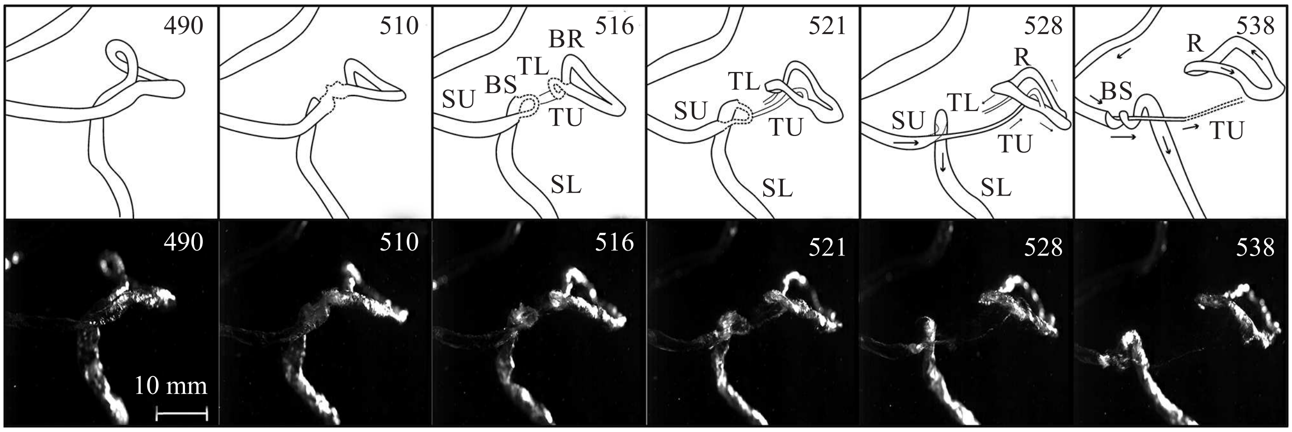

Рис. 5. Визуализация и схема процесса вихревого перезамыкания на спиральной вихревой трубке с образованием изолированного вихревого кольца. Частота съемки 14000 кадр/с, экспозиция 1/14 мс, $\mathrm{Re} = 1.1 \cdot 10^5$, SU и SL – верхняя и нижняя части спиральной вихревой трубки соответственно. Остальные обозначения см. на рис. 2. Интернет-ссылка на видеофильм: https://cloud.mail.ru/public/2j1A/Wi1t3fLec

двух нитей, TU и TL. Как правило, нить TU является более долгоживущей и более ярко выраженной (67–78).

На рис. 3 представлены аналогичные рис. 2 данные, но в этом случае съемка выполнена камерой PCO 1200.hs с меньшей частотой кадров. В отличие от рис. 2, здесь процесс перезамыкания можно разглядеть с другого ракурса, а благодаря большему времени съемки можно в деталях рассмотреть процесс образования и эволюции волн Кельвина. Видно, что после отрыва вихревого кольца R возникает крупноамплитудное возмущение, которое генерирует бегущие вверх по трубке спиральные волны – волны Кельвина K (кадры 178–182). Как и основная спираль, спиральные волны являются левовинтовыми.

Из анализа фото- и видеосъемки следует, что для данных условий эксперимента процесс перезамыкания с образованием изолированного кольца наблюдается регулярно. Средняя частота отрыва изолированного кольца 20 Гц (частота прецессии спирального вихря 58 Гц). Кроме того, можно заключить, что в терминах фазы θ спирали как геометрической фигуры образование кольца происходит примерно при $\Delta\theta \approx \pi$. Тем самым определяется размер кольца.

Процесс перезамыкания с образованием зацепленного кольца изображен на рис. 4. Использование камеры PCO 1200.hs позволяет разглядеть только основные этапы эволюции. Исходное состояние вихревой системы (кадр 6) не отличается от предыдущих случаев (см. рис. 2 и 3). На начальной стадии один из витков спирали также начинает двигаться вверх (8, 9), снова наблюдается перехлест (9). Однако сближения участков нити не происходит, так как они находятся достаточно далеко друг от друга. Этот виток продолжает двигаться вверх (9, 10). И только на кадре 14 два участка вихревой трубки сближаются, выстраиваясь антипараллельно. На кадре 15 мы видим уже результат перезамыкания: вихревое кольцо

R, надетое на спиральную вихревую трубку S. Далее кольцо распространяется вниз вдоль вихревой трубки (16–20).

В отличие от случая перезамыкания с образованием изолированного кольца, когда замыкание происходит на участке спирали с $\Delta\theta \approx \pi$, здесь $\Delta\theta \approx 2\pi$. Поэтому размер зацепленного кольца в 2 и более раз (с учетом явного растяжения вихря) больше в сравнении с изолированным кольцом. Описанный процесс имеет хорошую повторяемость, но частота образования зацепленных колец на порядок меньше, чем изолированных.

Рассмотрим теперь детально зону, в которой непосредственно происходит процесс перезамыкания. С этой целью обратимся к серии кадров, полученных с высоким временным разрешением, 1/14000 с (рис. 5). Здесь показан случай образования изолированного кольца. Кадр 490 демонстрирует момент сближения двух антипараллельных участков вихревой трубки. При просмотре видео отчетливо видно существенное уплощение этих участков при соединении. Примерно через 2.7 мс после антипараллельного сближения соединенные участки изгибаются дугой вверх, а кавитационная полость начинает разрушаться (кадр 510). Спустя 0.43 мс происходит разрыв кавитационной полости в месте соединения трубок и начинают формироваться нити TU и TL, соединяющие, соответственно, верхнюю (SU) и нижнюю (SL) части спиральной трубки с кольцом R (кадр 516). Мостик BR на кольце почти сформировался, а на спиральной трубке процесс формирования мостика продолжается. Кажется, что BS уже существует на кадре 516. Однако это остаточные паровые следы, так же как и на кадре 521. На кадре 528 хорошо видно, что участки трубки SU и SL никак не связаны друг с другом. Более того, эти участки ориентированы перпендикулярно друг другу, что сильно затрудняет их соединение (замыкание). Из верхней части SL формируется область завихренности в виде завитого вправо спирального хобота (*trunk*), который соединяется с участком SU, завершая таким образом процесс замыкания вихревой спиральной трубки (мостик BS в кадре 538). Мостик BS представляет собой петлю большой кривизны и является, как отмечалось выше, источником возмущения для волн Кельвина. Обратим внимание на то, что нить TU наблюдается в течение 6 мс, а нить TL – лишь в течение 1 мс. На кадре 528 можно увидеть, как нить TU наматывается с правой завивкой на участок вихревого кольца.

Кроме мостиков и нитей, которые описаны выше и через которые, собственно, осуществляются процессы перезамыкания, в наших экспериментах наблюдались и другие типы мостиков (рис. 6). Эти мостики существенно тоньше основной вихревой трубки. Они располагаются на некотором расстоянии от области перезамыкания. Поэтому их можно назвать внешними мостиками. Внешние мостики могут существовать вообще вне зависимости от процессов перезамыкания (в отличие от численных расчетов [21, 22]).

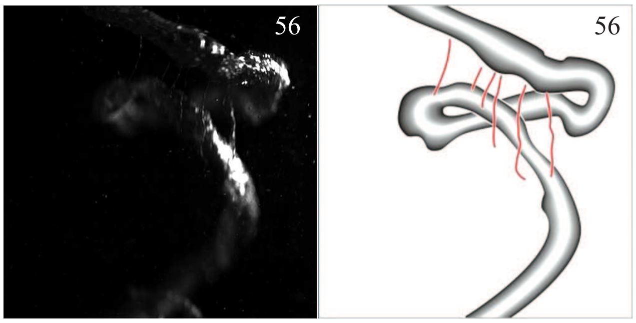

Рис. 6. (Цветной онлайн) Визуализация и схема формирования внешних мостиков, соединяющих участки спиральной вихревой трубки вне связи с процессами вихревого перезамыкания. Интернет-ссылка на видеофильм: https://cloud.mail.ru/public/2n1r/2EFgaYAvE

Таким образом, в данной экспериментальной работе впервые продемонстрировано явление процессов вихревого перезамыкания на спиральной вихревой трубке, которая формируется в закрученном потоке в коническом диффузоре при достаточно большом значении параметра крутки. Результатом перезамыкания может быть либо образование изолированного вихревого кольца с сохранением базовой спиральной вихревой трубки, либо формирование системы, состоящей из вихревого кольца, зацепленного со спиральной трубкой. В зоне перезамыкания на исходной спирали всегда генерируется волна Кельвина, завитая влево и бегущая вверх по вихревой трубке. Выявлен ряд топологических особенностей процесса вихревого перезамыкания: асимметрия этого процесса в окрестностях кольца и спиральной трубки; формирование двух мостиков и двух нитей, также демонстрирующих асимметрию; формирование внешних мостиков, не связанных с процессом вихревого перезамыкания. Дальнейшие исследования будут основаны на использовании оптических методов диагностики высокого временного и пространственного разрешения, включая количественные измерения, чтобы провести сопоставления с соответствующими численными расчетами и выяснить в деталях механизмы вихревого перезамыкания.

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (проект # 14-29-00093). Авторы выражают признательность Новосибирскому государственному университету за предоставленную возможность использования производственных помещений и оборудования.

---

1. S. V. Alekseenko, P. A. Kuibin, and V. L. Okulov, *Theory of Concentrated Vortices: an Introduction*, Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg–N.Y. (2007).
2. S. V. Alekseenko, P. A. Kuibin, V. L. Okulov, and S. I. Shtork, J. Fluid Mech. **382**, 195 (1999).
3. S. Kida and M. Takaoka, Annu. Rev. Fluid Mech. **26**, 169 (1994).
4. R. J. Donnelly, *Quantized Vortices in Helium II*, Cambridge University Press, Cambridge (1991).
5. S. K. Nemirovskii, Phys. Rep. **524**, 85 (2013).
6. M. S. Paoletti, M. E. Fisher, and D. P. Lathrop, Physica D **239**, 1367 (2010).
7. E. Fonda, D. P. Meichle, N. T. Ouellette, S. Hormoz, and D. P. Lathrop, PNAS **111**(1), 4707 (2014).
8. S. Crow, AIAA J. **8**, 2172 (1970).
9. T. Misaka, F. Holzapfel, I. Hennemann, T. Gerz, M. Manhart, and F. Schwertfirm, Phys. Fluids **24**, 025104 (2012).
10. M. V. Melander and F. Hussain, Phys. Fluids A **1**, 633 (1989).
11. P. G. Saffman, J. Fluid Mech. **212**, 395 (1990).
12. M. J. Shelley, D. I. Meiron, and S. A. Orszag, J. Fluid Mech. **246**, 613 (1993).
13. R. M. Kerr, Phys. Fluids **25**, 065101 (2013).
14. F. Hussain and K. Duraisamy, Phys. Fluids **23**, 021701 (2011).
15. W. M. van Rees, F. Hussain, and P. Koumoutsakos, Phys. Fluids **24**, 075105 (2012).
16. Q. Ni, F. Hussain, J. Wang, and S. Chen, Phys. Fluids **24**, 105102 (2012).
17. M. V. Melander and N. J. Zabusky, Fluid Dyn. Res. **3**, 247 (1988).
18. W. T. Ashurst and D. I. Meiron, Phys. Rev. Lett. **58**, 1632 (1987).
19. H. Aref and I. Zawadzki, Nature **354**(50–53), 50 (1991).
20. P. Chatelain, D. Kivotides, and A. Leonard, Phys. Rev. Lett. **90**(5–7), 054501 (2003).
21. S. Kida and M. Takaoka, Phys. Fluids **30**, 2911 (1987).
22. S. Kida and M. Takaoka, Fluid Dyn. Res. **3**, 257 (1988).
23. E. D. Siggia, Phys. Fluids **28**, 794 (1985).
24. T. Fohl and J. S. Turner, Phys. Fluids **18**, 433 (1975).
25. Y. Oshima and S. Asaka, Nat. Sci. Rep., Ochanomizu University **26**(1), 31 (1975).
26. Y. Oshima and N. Izutsu, Phys. Fluids **31**, 2401 (1988).
27. F. R. Hama, in *Proc. Heat Trans. and Fluid Mech. Inst.*, Stanford Univ. Press (1960).
28. T. Leweke and C. H. K. Williamson, Phys. Fluids **23**, 024101 (2011).
29. D. P. Delisi and W. F. Pierce, *AIAA 2011-3033, 3rd AIAA Atmospheric Space Environments Conference Honolulu*, Hawaii, June 2011.
30. D. Kleckner and W. T. M. Irvine, Nat. Phys. **9**, 253 (2013).
31. D. Kleckner, M. W. Scheeler, and W. T. M. Irvine, Phys. Fluids **26**, 091105 (2014).