

УДК 532.517.4.013.4

© 1993 г. Е. В. ГУСЛЯКОВА

О ВИХРЕОБРАЗОВАНИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ ПРИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОМ ВРАЩЕНИИ ДНА СОСУДА

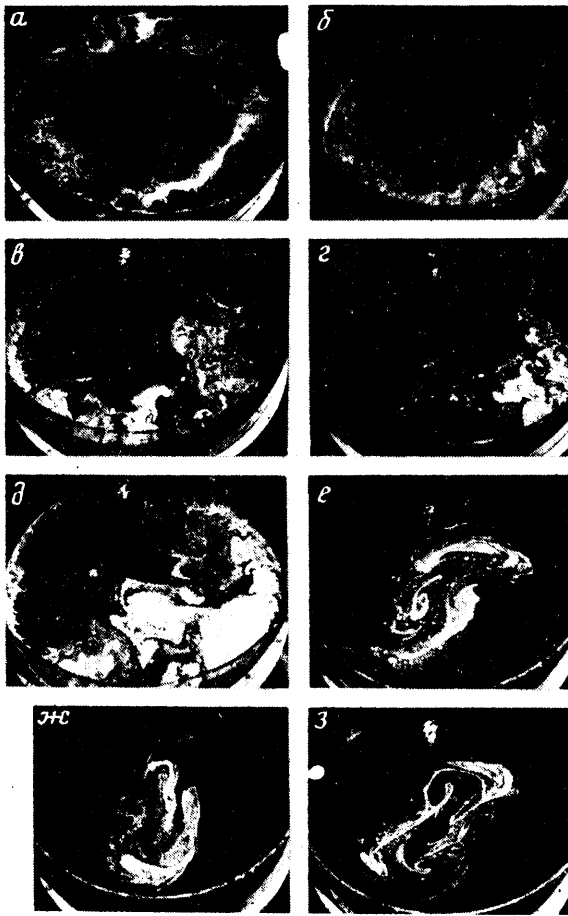
Проведены экспериментальные исследования развития неустойчивости осесимметричного течения. Прослеживается эволюция возмущений от высокочастотных флуктуаций к крупномасштабным упорядоченным структурам с волновыми числами $n = 2, 3, 4, 5, 6, 7$. Построена экспериментальная диаграмма областей устойчивого существования различных типов возмущений. Экспериментально получены циклы периодических перебросов гидродинамической системы по n при неизменных внешних условиях в отсутствие вынуждающих воздействий.

Вопросам неустойчивости осесимметричного течения посвящено достаточно большое количество исследований, в том числе [1—5]. В настоящей работе эксперименты проводились на установке, описанной в [6, 7]. Установка представляла собой цилиндрический сосуд диаметром 0,46 м, плоское дно которого было составлено из центрального диска диаметром 0,2 м и двух концентрических колец — внутреннего и внешнего — шириной соответственно 0,1 и 0,03 м. Кольца и диск устанавливались на верхних концах полых валов, объединенных в один телескопический вал. Снизу на каждый вал монтировались шкивы, которые посредством клиноременной передачи связывались с двигателями. С помощью плавной регулировки подачи напряжения на каждый из трех двигателей варьировались скорости вращения диска и колец. Частоты вращения секторов дна фиксировались датчиками, показания которых выводились на частотомер. Визуализация поверхностных движений жидкости в сосуде проводилась частицами ликоподия размером порядка 20 мкм, картины течения фиксировались кино- и фотосъемкой.

Задавались следующие условия эксперимента: центральный диск покоился ($\omega_1 = 0$), среднее кольцо вращалось против часовой стрелки с частотой ω_2 ($10 \leq \omega_2 \leq 19$ рад/с). Вращение внешнего кольца с частотой ω_3 ($1 \leq |\omega_3| \leq 6$ рад/с) имело противоположное направление. Толщина h слоя воды бралась неизменной и равной 2,5 см. Толщина экмановского пограничного слоя $(\nu/2\Omega)^{1/2} \sim (2-5) \cdot 10^{-2}$ см ($\ll h$), где ν — коэффициент кинематической вязкости, принявшийся равным 10^{-2} см²/с, Ω — частота среднего вращения.

В результате потери устойчивости осесимметричного течения возбуждались возмущения, стадии эволюции которых прослеживаются на фиг. 1, а—з. Наблюдался рост и слияние высокочастотных флуктуаций, в конечном счете приводившие к образованию регулярных структур, существовавших на фоне мелкомасштабной турбулентности. Процесс определялся изменениями ω_2, ω_3 , значения которых даны в табл. 1. Экспериментально были получены регулярные возмущения, характеризовавшиеся $n = 2, 3, 4, 5, 6, 7$ (фиг. 2).

В качестве основных безразмерных параметров использовались числа Россби $Ro = \nu/2\Omega L$ и Тейлора $Ta = 4h^4\Omega^2/\nu^2$, записанные с учетом направления вращения потоков: $Ro = (\omega_2 + \omega_3)/2 (\omega_2 - \omega_3)$, $Ta = h^4 (\omega_2 - \omega_3)^2/\nu^2$, где ν — характерная скорость; L, h — характерные горизонтальный и вертикальный масштабы. Число Россби описывало относительный сдвиг скорости, Тейлора — интенсивность потока. Число Рейнольдса $Re = \nu L/\nu = (L/h)^2 Ro Ta^{1/2}$ имело порядок 10^5 . В плоскости



Фиг. 1

изменения параметров (Ta , Ro) была построена экспериментальная диаграмма областей устойчивости режимов различных волновых чисел (фиг. 3).

Прослеживались различные стадии развития возмущенного потока в зависимости от изменения внешних определяющих параметров: 1) возбуждение, рост и слияние высокочастотных флуктуаций (фиг. 1); 2) формирование систем крупномасштабных волн с зонами слабой циркуляции в вершинах; 3) интенсификация вихрей, изменение формы волн; 4) локализация вихрей, разрыв огибающего потока, формирование между вихрями интенсивного соединительного течения; 5) разрыв соединительного течения, переход к режиму уединенных вихрей. Эволюция от волновых возмущений к отсеченным вихрям иллюстрируется фиг. 4, $a—e$ на примере $n = 3$. Каждая стадия развития при неизменных внешних параметрах представляла устойчивый режим движения.

Различие типов возмущений определялось изменениями параметра относительного сдвига (Ro). Изменения параметра интенсивности (Ta) обуславливали переходы по n . В области I диаграммы устойчивости $0,5 < Ro < 0,57$ наблюдались высокочастотные возмущения. В пределах $0,57 < Ro < 0,76$ (II) развивались регулярные крупномасштабные волны. Переход к значениям $0,76 < Ro < 0,87$ (III) определял интенсификацию вихрей в вершинах волн, изменение формы волны. Для $0,87 < Ro < 1$ (IV) был характерен разрыв огибающего потока, формирование

Тип возмущений	ω_2 , рад/с	$ \omega_3 $, рад/с
Мелкомасштабные	3,22—4,92	1,26—1,4
Рост и слияние	6,66—7,61	1,85—1,93
Регулярные структуры	9,80—11,44	2,34—2,38

соединительного течения. При $1 < Ro < 1,1$ (V) следовал переход к режиму долгоживущих отсеченных вихрей.

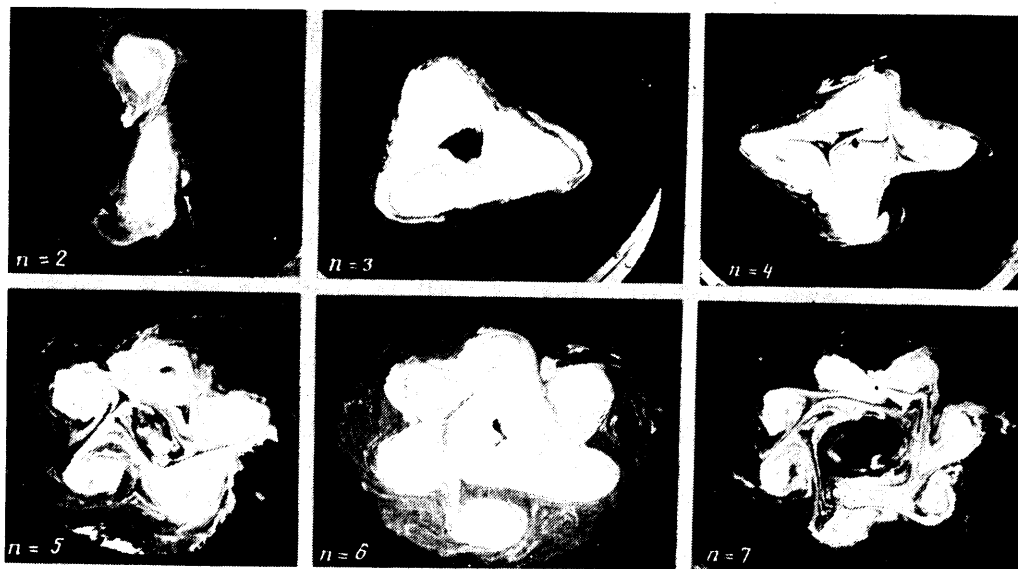
Анализ диаграммы выявил возможность реализации различных путей эволюции гидродинамической системы по волновым числам в зависимости от изменения Ta , Ro . Так, при фиксированных Ro рост Ta обуславливал увеличение n на всех стадиях развития возмущений, что согласуется с выводами линейной теории устойчивости [1, 5, 8, 9]. Увеличение Ro при неизменном Ta определяло убывание n для возмущений типа 2, 3 и его рост для типов 4, 5 (луч (OA) на фиг. 3). Интенсификация среднего потока (рост Ta) приводила к росту n , что согласуется с выводами линейной теории устойчивости (при одновременном увеличении Ro) в зоне, ограниченной лучами, углы наклона которых к оси абсцисс (φ) лежат в пределах $0^\circ < \varphi < 39^\circ$ для областей II, III (луч (BC) на фиг. 3) и $0^\circ < \varphi < 90^\circ$ для IV, V. То же наблюдалось при одновременном ослаблении Ro и росте Ta в пределах $90^\circ < \varphi < 180^\circ$ для II, III и $129^\circ < \varphi < 180^\circ$ для IV, V (луч (DE) на фиг. 3). Уменьшение волнового числа возмущенного потока при росте Ta происходило с ростом Ro в пределах $39^\circ < \varphi < 90^\circ$ для II, III и при ослаблении Ro в пределах $90^\circ < \varphi < 129^\circ$ для IV, V.

При математической интерпретации полученных экспериментально режимов движения привлекались результаты численного решения задачи эволюции неустойчивых областей постоянной завихренности, полученные в [10, 11]. Рассматривалось двойное кольцо завихренности, которое интерпретировалось как струйное круговое течение в покоящейся жидкости. Численные эксперименты, исследовавшие эволюцию двойного кольца, проводились методом контурной динамики. Полученные этапы распада осесимметричного кольца качественно подобны режимам 2, 3, наблюдавшимся в физическом эксперименте. Возмущения типов 4, 5 физического эксперимента численно не достигались. Это связано с необходимостью учета трехмерности реального потока (комбинированного горизонтально-вертикального сдвига скорости).

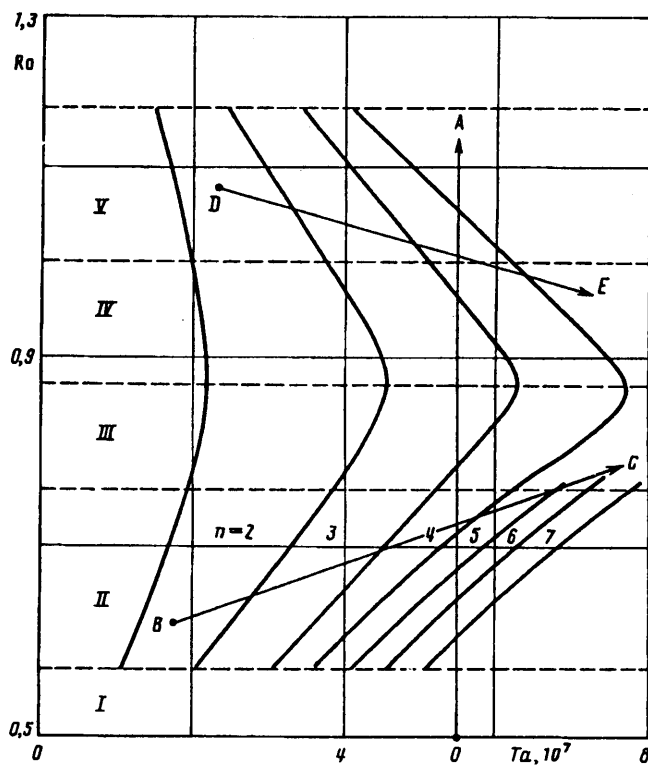
Качественный анализ пространственной организации движения жидкости в сосуде показал, что для режимов 2—5 весь поверхностный слой (за исключением 2—3 мм у стенки) вовлекался во вращение против часовой стрелки. При этом вращение внешнего кольца дна установки (ширина 0,03 м) имело противоположное направление, т. е. существовал вертикальный сдвиг скорости, менявший знак и достигавший наибольшей величины для режимов 4, 5. Течение приобретало существенно трехмерный характер, что определяло переход к режиму долгоживущих отсеченных вихрей.

Структура единичных вихрей в вертикальной плоскости представляла зоны локальных воронкообразных искривлений свободной поверхности. Каждый вихрь характеризовался собственным вращением; устойчивая система вихрей вращалась против часовой стрелки относительно центра сосуда. Экспериментально оценивались диаметр вихря d ($2 \leq d \leq 4$ см) и глубина воронки H ($0,2 \leq H \leq 2,5$ см). Исследовались зависимости этих характеристик от изменения Ta , Ro . Оказалось, что профили воронок в системе n вихрей определялись заданием параметра относительного сдвига Ro , влияние изменений Ta (при фиксированном Ro) обнаружено не было. Получены зависимости

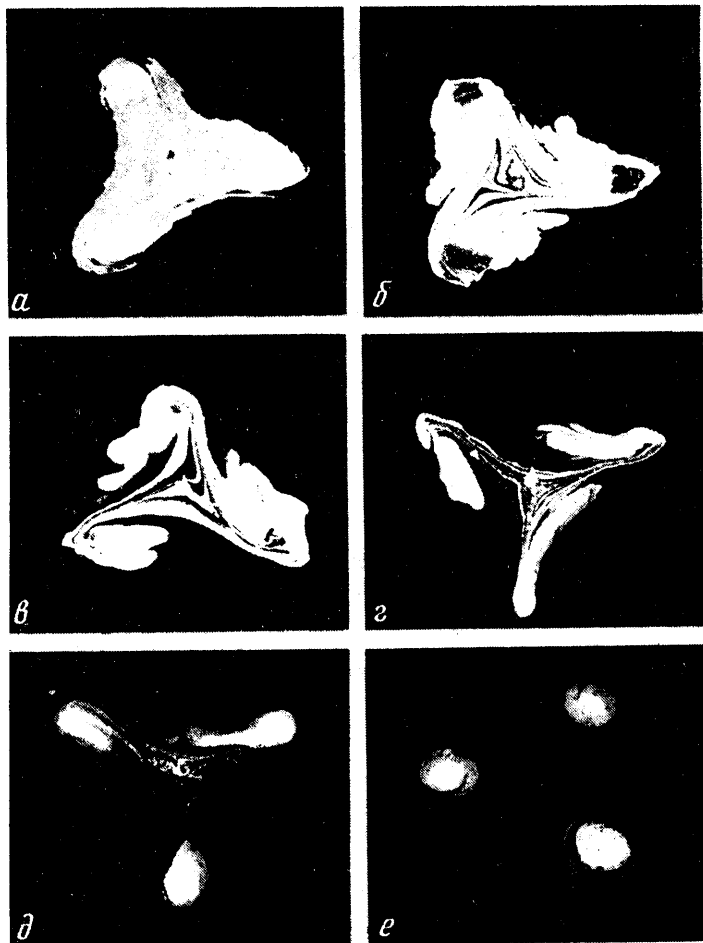
$$d = a + a_1 Ro + b Ro^2 + b_1 Ro^3, \quad H = c_1 \exp(-c_2 (Ro - 1)^3)$$



Фиг. 2



Фиг. 3

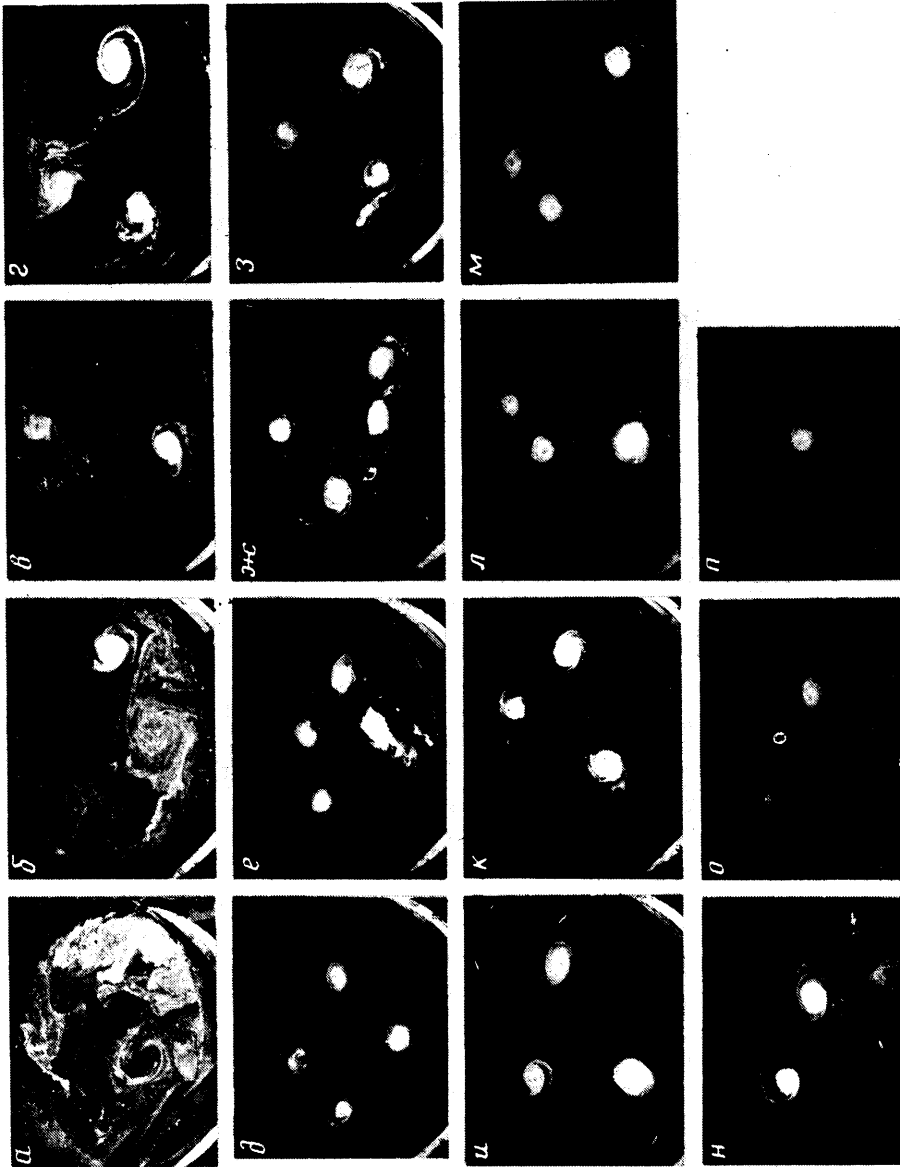


Фиг. 4

$$a = 7,1, \quad a_1 = 2,8, \quad b = -7,4, \quad b_1 = 1,6, \quad c_1 = 2,5, \quad c_2 = -166,3$$

Экспериментально были реализованы режимы периодических перебросов по волновым числам — спонтанные переходы системы из одного квазиустойчивого состояния в другое и затем вновь в начальное при неизменных внешних параметрах в отсутствие вынуждающих воздействий.

На фиг. 5 представлен цикл перебросов по n для $Ta = 3,23 \cdot 10^7$; $Ro = 1,11$. Начальный этап представлял картину хаотического поверхностного движения, наблюдавшуюся в течение 5—7 с (фиг. 5, а). Затем на фоне мелкомасштабной турбулентности спонтанно формировался центр вихревой циркуляции, вокруг которого происходила локальная концентрация завихренности. За 8—9 с образовывалась крупномасштабная вихревая воронка (фиг. 5, б). Диаметрально по отношению к первому аналогичным образом формировался второй вихрь (фиг. 5, в). Время жизни пары вихрей составляло 10—12 с, по прошествии которых следовал переход к системе $n = 3$, существовавшей 15—20 с (фиг. 5, г). Затем возбуждался четвертый вихрь (фиг. 5, д) (время жизни 5—6 с). Далее происходило резкое ослабление образовавшихся вихревых структур (уменьшение глубин воронок и диаметров ядер). Нарушалась геометрия системы — два из четырех вихрей сближались, а затем сливались (фиг. 5, е—з). Осуществлялся



n	d , см	H , см	ω , рад/с	n	d , см	H , см	ω , рад/с
1	3,5	1,0	1,6	3	3,5	2,2	1,8
2	3,5	2,0	1,7	3*	0,8	2,0	1,6
3	3,5	2,4	1,9	2	3,5	1,8	1,6
4	3,3	2,3	2,1	2*	3,0	0,8	1,5
4*	3,0	1,0	1,9	1	3,0	1,0	1,5

переход к $n = 3$ (фиг. 5, u). В течение 15—18 с наблюдался рост интенсивности вихрей, затем следовал ее резкий спад. Два из трех вихрей сближались и сливались — система переходила к $n = 2$ (фиг. 5, $k-n$). Рост интенсивности двух вихрей занимал 5—8 с, по истечении которых происходил ее спад и переход к $n = 1$ (фиг. 5, $o-n$). Через 4—5 с единственный вихрь диссипировал — система возвращалась к стадии нерегулярного мелкомасштабного движения. Затем весь цикл вновь повторялся.

В режиме перебросов фиксировались параметры d , H , а также скорости переносного вращения системы n вихрей (ω) относительно центра сосуда. Результаты представлены в табл. 2, где звездочка отмечает стадии резкого ослабления интенсивности вихрей.

Анализ полученных данных показал, что последовательное формирование регулярных вихревых структур на фоне мелкомасштабной турбулентности соответствовало росту локальной концентрации завихренности в вихревых воронках. Одновременно наблюдалось увеличение скорости переносного движения. За счет нелинейных взаимодействий в сдвиговой циркуляционной системе происходила передача энергии мелкомасштабной турбулентности в крупномасштабное вихревое движение — накачка. Аналогичные явления в турбулентных течениях рассмотрены в [12—16]. Как следствие стабилизации потока возростала ω . Система $n = 4$ соответствовала максимальному (при данных внешних условиях) уровню концентрации завихренности. После его достижения за счет вязкого трения происходила частичная диссипация регулярных структур. Одновременно падала ω . Характерно, что переход к меньшему n сопровождался временным ростом интенсивности вихрей с последующим резким ее спадом. Соответственно изменялась скорость переносного движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hide R., Titman C. W. Detached shear layers in a rotating fluid//J. Fluid Mech. 1967. V. 29. № 1. P. 39—60.
2. Довженко В. А., Крымов В. А. Перенос момента импульса вихревыми возмущениями при потере устойчивости плоского аксиально-симметричного сдвигового течения//Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1983. Т. 19. № 5. С. 534—539.
3. Должанский Ф. В. О генерации вихревых возмущений на фоне двумерного течения со сдвигом, возбуждаемого в поле сил Кориолиса источниками и стоками массы//Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1981. Т. 17. № 6. С. 563—573.
4. Черноусько Ю. Л. Экспериментальные исследования двумерных течений с горизонтальным сдвигом во вращающейся системе//Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1980. Т. 16. № 4. С. 423—427.
5. Niino H., Misawa N. An experimental and theoretical study of barotropic instability//J. Atmos. Sci. 1984. V. 41. № 12. P. 1992—2011.
6. Лушин В. М., Ланно С. С. Геогидравлическая модель: а. с. № 647572 СССР//Б. И. 1979. № 6.
7. Ланно С. С., Гуслякова Е. В., Соловьев А. А. Лабораторное моделирование вихрей с учетом широтного распределения параметра Кориолиса//Гидрометеорологические закономерности фор-

- мирования среднеширотных энергоактивных областей Мирового океана. М.: Гидрометеоздат, 1986. С. 107—117.
8. Гринспен Э. П. Теория вращающихся жидкостей. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 304 с.
 9. *Dunst M.* An experimental and analytical study of instability of asymmetric jetstream-like currents in a rotating fluid//*J. Fluid Mech.* 1973. V. 60. № 2. P. 391—400.
 10. Козлов В. Ф., Макаров В. Г. Моделирование эволюции неустойчивых геострофических вихрей в баротропном океане//*Океанология.* 1984. Т. 24. № 5. С. 737—743.
 11. Козлов В. Ф., Макаров В. Г. Моделирование неустойчивости осесимметричных вихревых шнуров с помощью метода контурной динамики//*Изв. АН СССР. МЖГ.* 1985. № 1. С. 33—39.
 12. *Brown G. L., Roshko A.* On density effects and large structure in turbulent mixing layers//*J. Fluid Mech.* 1974. V. 64. № 4. P. 775—816.
 13. *Aref H., Siggia E. D.* Vortex dynamics of the two-dimensional turbulent shear layer//*J. Fluid Mech.* 1980. V. 100. № 4. P. 705—737.
 14. Рабинович М. И., Суцук М. М. Когерентные структуры в турбулентных течениях//*Нелинейные волны: Самоорганизация.* М.: Наука, 1983. С. 56—85.
 15. *Старр В. П.* Физика явлений с отрицательной вязкостью. М.: Мир, 1971. 260 с.
 16. *Mc Ewan A. D.* A laboratory demonstration of angular momentum mixing//*Geophys. Fluid Dynamics.* 1973. V. 5. № 3. P. 283—311.

Москва

Поступила в редакцию
24.IX.1991