

УДК 551.465

ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА СДВИГОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ МОРСКОГО ВДОЛЬБЕРЕГОВОГО ТЕЧЕНИЯ

© 2014 г. Д. Н. Елкин, А. Г. Зацепин

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва**e-mail: dmelkin@mail.ru*

Поступила в редакцию 28.04.2013 г., после доработки 22.06.2013 г.

Проведены лабораторные опыты по изучению сдвиговой неустойчивости вдольберегового течения во вращающейся и невращающейся однородной жидкости и условий формирования цепочек вихрей – когерентных структур в сдвиговом течении. При этом исследованы ситуации с циклоническим и антициклоническим сдвигом скорости между стрежнем течения и берегом в широком диапазоне изменения величины безразмерного сдвига скорости. Получено, что в невращающейся жидкости сдвиговое течение имеет турбулентный характер и когерентных вихревых структур не наблюдается. Установлено, что во вращающейся жидкости при наличии течения с циклоническим сдвигом скорости образуются цепочки когерентных вихрей. В случае течения с антициклоническим сдвигом скорости цепочки когерентных вихрей наблюдаются только при сравнительно небольших значениях сдвига скорости, а при больших – течение имеет хаотический турбулентный характер. Рассмотрена физическая модель, качественно объясняющая асимметрию образования когерентных вихревых структур в течениях с циклоническим и антициклоническим сдвигом скорости во вращающейся жидкости. Результаты опытов согласуются с наблюдениями в прибрежной зоне Черного моря.

DOI: 10.7868/S0030157414050049

1. ВВЕДЕНИЕ

В практику исследования динамики узкой прибрежной (шельфово-склоновой) зоны в северо-восточной части Черного моря, в недавнем прошлом был внедрен новый инструментально-методический подход, обеспечивающий высокое пространственно-временное разрешение в измерении поля течений [3]. Важным результатом использования этого подхода явилось частое обнаружение интенсивных шельфовых вихрей, как циклонического, так и антициклонического знака вращения, диаметр которых составляет 4–8 км [4]. По-видимому, эти вихри играют важную роль в кросшельфовом водообмене и в диссипации энергии крупномасштабных течений. Однако установить механизмы образования шельфовых вихрей и исследовать закономерности их эволюции в природных условиях не представляется возможным. С этой целью были выполнены лабораторные эксперименты, некоторые результаты которых кратко описаны ниже.

При постановке задачи рассматривались два возможных механизма вихреобразования. Первый механизм – периодическое образование вихрей за мысами (по данным природных наблюдений) вследствие отрыва потока, при наличии интенсивного прибрежного течения. Этот механизм был исследован и описан нами в [2]. Основным результатом исследования заключается в том, что

периодическое вихреобразование за препятствием в виде мыса происходит только во вращающейся жидкости, и только в тормозящемся циклоническом течении. При этом образуются антициклонические шельфовые вихри. Данный результат не противоречит наблюдениям.

Второй механизм – сдвиговая неустойчивость вдольберегового течения. При этом в случае вдольберегового течения циклонического направления (Основное черноморское течение) на шельфе должны преимущественно образовываться антициклонические вихри, а в случае вдольберегового течения антициклонического направления (антициклонические мезомасштабные вихри) должны преимущественно образовываться циклонические вихри. Согласно результатам теоретических и экспериментальных исследований (см., например, [6]), для развития неустойчивости течения и вихреобразования в невращающейся жидкости важными условиями являются: 1) существование свободных слоев смешения, где профиль скорости имеет точку перегиба; 2) достижение числом Рейнольдса, оцененном по сдвигу скорости, критической величины. Если сдвига “не хватает”, то вихрей не образуется и течение имеет поступательный характер. С другой стороны, если число Рейнольдса очень велико, сдвиговое течение имеет турбулентный (хаотический) характер и когерентных вихрей также не

должно наблюдаться. Из этих рассуждений следует, что когерентные вихревые структуры в сдвиговом течении должны наблюдаться в определенном диапазоне изменения значений числа Рейнольдса. Однако эффекты вращения Земли могут изменять условия наступления сдвиговой неустойчивости течения и сделать их зависимыми не только от числа Рейнольдса, но и от других безразмерных параметров, зависящих от параметра Кориолиса.

В данной работе описываются лабораторные эксперименты, направленные на исследование условий вихреобразования во вдольбереговом течении за счет сдвиговой неустойчивости во вращающейся и невращающейся жидкости. Однако перед тем, как приступить к описанию лабораторной установки, экспериментальных методов, результатов исследования и их использования для интерпретации данных натуральных наблюдений, обсудим кратко физические основы влияния эффектов вращения на сдвиговую неустойчивость течений и переход к турбулентности.

2. ВЛИЯНИЕ ВРАЩЕНИЯ НА ТУРБУЛЕНТНОЕ ДВИЖЕНИЕ И СДВИГОВУЮ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ

Известно, что вращение системы в целом оказывает стабилизирующее влияние на турбулентное движение. Например, конвекция в невращающейся жидкости при больших значениях числа Рэлея является турбулентной [5], однако в быстро вращающейся жидкости она приобретает упорядоченный вихревой характер [1, 7]. Точно так же, хаотическое вихревое движение, порождаемое в жидкости колеблющейся решеткой [5], при наличии вращения упорядочивается [9]. Физический механизм упорядочивания турбулентного вихревого движения во вращающейся однородной жидкости заключается в том, что большие вихри оказываются “схваченными” вращением и из трехмерных образований превращаются в баротропные вихревые столбы Тейлора. При этом число Россби, рассчитанное для вихря, имеет значение, меньшее единицы. В отличие от трехмерных турбулентных вихрей, схваченные вращением, квазидвумерные вихри являются долгоживущими когерентными структурами. Таким образом, можно заключить, что вращение системы (для геофизических течений – вращение Земли) способствует образованию когерентных вихревых структур.

Следуя [6], обсудим физический механизм влияния вращения на развитие неустойчивости сдвигового течения. Схема течения с циклоническим и антициклоническим сдвигами скорости в вращающейся жидкости приведена на рис. 1а и 1б, соответственно.

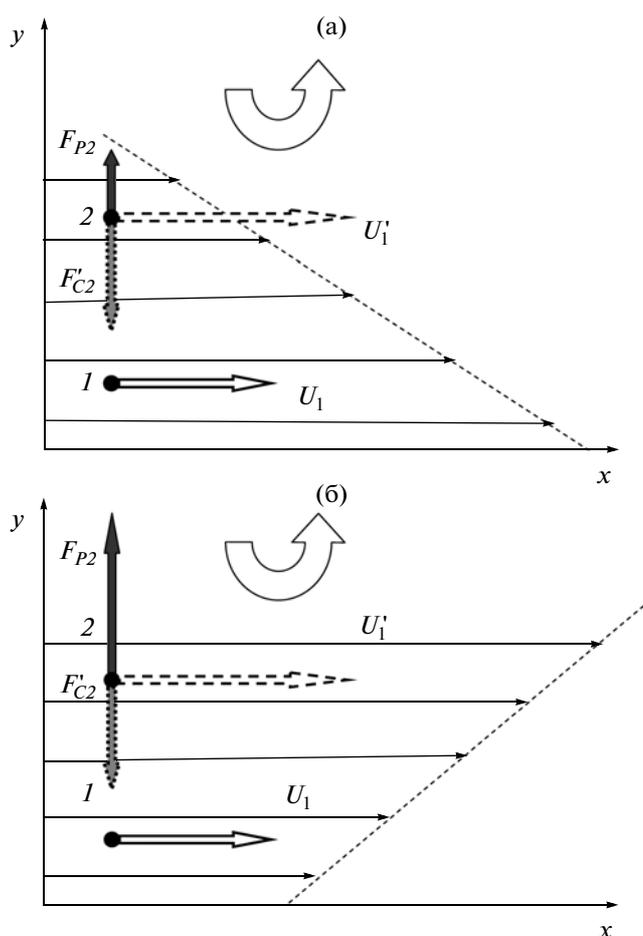


Рис. 1. Схема течения с циклоническим (а) и антициклоническим (б) сдвигом скорости во вращающейся жидкости. Широкая полукруглая стрелка – направление вращения системы (циклоническое). Стрелки, параллельные оси x , длина которых изменяется с изменением координаты y , показывают направление и сдвиг скорости течения. Остальные обозначения раскрыты в тексте.

Если исходное сдвиговое течение стационарно, то в отсутствии трения действующие на частицы жидкости вдоль оси y сила Кориолиса (F_C) и сила давления (F_P), существующая за счет искривления уровня свободной поверхности жидкости, уравниваются друг друга. При этом сила Кориолиса направлена в сторону убывающих значений y , а сила давления – в сторону возрастающих. Используя эту схему, рассмотрим, к чему приведет смещение частицы поперек сдвига скорости на расстояние Δy в сторону возрастающих значений y из точки 1, где скорость исходного течения вдоль оси x равна U_1 , в точку 2, где скорость исходного течения равна U_2 . Если перемещенная частица в точке 2 будет иметь скорость $U'_1 > U_2$, то возросшая сила Кориолиса (F'_{C2}) будет стремиться вернуть ее к исходному положению равнове-

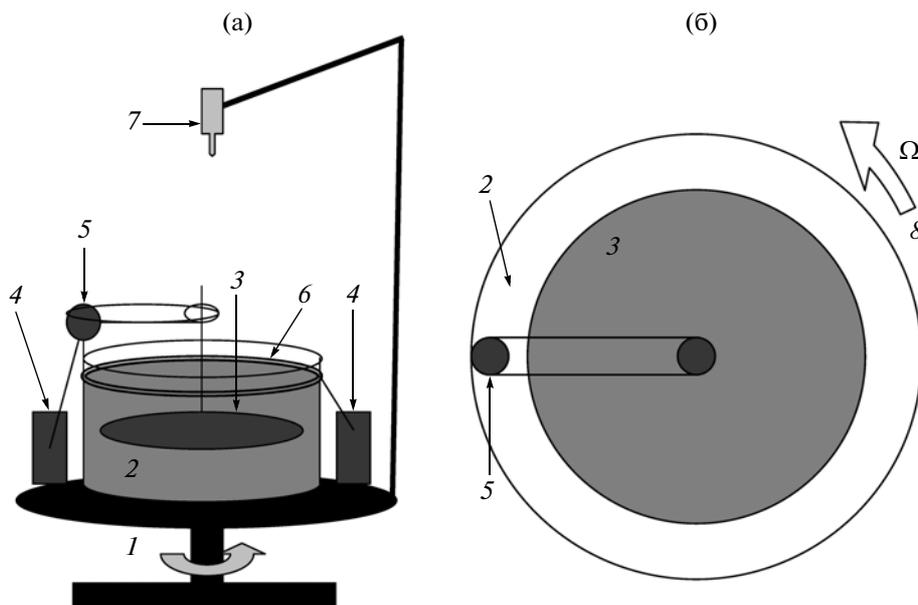


Рис. 2. Схема лабораторной установки: (а) – вид сбоку; (б) – вид сверху. 1 – вращающаяся платформа; 2 – бассейн из органического стекла, заполненный жидкостью; 3 – вращающийся диск; 4 – блок питания с регулятором напряжения; 5 – электродвигатель; 6 – электроды для электрохимической визуализации течения; 7 – видеокамера; 8 – направление вращения платформы.

сия, т.е. в точку 1 (рис. 1а). В этом случае вращение системы способствует сохранению устойчивости течения. Если же перемещенная частица в точке 2 будет иметь скорость $U'_1 < U_2$, то уменьшившаяся сила Кориолиса (F'_{c2}) не сможет противодействовать силе давления, которая будет смещать частицу дальше от исходной точки 1 (рис. 1б). В этом случае вращение системы способствует развитию неустойчивости течения.

Скорость U'_1 в точке 2 определяется формулой

$$U'_1 = U_1 + \int fV dt = U_1 + f\Delta y, \quad (1)$$

где V – скорость смещения, а t – время, за которое происходит смещение. Исходную скорость U_2 в этой точке можно также выразить через U_1 в виде

$$U_2 = U_1 + (\partial U / \partial y) \Delta y. \quad (2)$$

Здесь $\partial U / \partial y$ – производная скорости по оси y , положительная в случае циклонического сдвига, и отрицательная – в случае антициклонического. Из (1) и (2) следует, что

$$U'_1 - U_2 = (f - \partial U / \partial y) \Delta y. \quad (3)$$

Соответственно, левая часть (3) положительна (устойчивость), если:

$$f - \partial U / \partial y > 0. \quad (4)$$

Неравенство (4) автоматически выполняется при всех отрицательных значениях $\partial U / \partial y$, т.е. при циклоническом сдвиге скорости. Поэтому в тече-

ниях с циклоническим сдвигом скорости вращение системы должно приводить к увеличению устойчивости (рис. 1а). Во вращающейся жидкости неустойчивость должна проявляться только в течениях с антициклоническим сдвигом скорости, в том случае, когда $\partial U / \partial y > f$ (рис. 1б).

Если ввести безразмерный параметр – сдвиговое число Россби $Ro_s = (\partial U / \partial y) / f$, то при $Ro_s < 0$ и $0 < Ro_s < 1$ сдвиговое течение во вращающейся жидкости должно иметь повышенную устойчивость по сравнению с невращающейся жидкостью, а при $Ro_s > 1$ вращение системы должно способствовать развитию сдвиговой неустойчивости.

Одной из задач описываемого ниже лабораторного эксперимента являлась проверка этих достаточно простых физических рассуждений.

3. ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

Эксперименты по исследованию вихреобразования вследствие сдвиговой неустойчивости проводились в плоском водном слое в цилиндрическом бассейне, установленном на вращающейся платформе (рис. 2). Для создания сдвигового течения вблизи стенки бассейна в его центральной части параллельно дну и вблизи него осесимметрично размещался тонкий круглый диск с диаметром, меньшим диаметра бассейна. Диск приводился в дифференциальное вращение относительно бассейна с помощью электродвигателя постоянного тока с регулируемой скоростью вра-

щения. При вращении диска в направлении вращения платформы над ним формировалось циклоническое течение, а вблизи стенки — область горизонтального антициклонического сдвига скорости. При вращении диска в направлении, противоположном вращению платформы, над ним формировалось антициклоническое течение, а вблизи стенки — область горизонтального циклонического сдвига. Частота вращения диска от опыта к опыту изменялась в широких пределах. Это делалось для того, чтобы исследовать закономерности вихреобразования не только в зависимости от знака, но и от величины сдвига скорости.

Для визуализации вихрей слой жидкости подкрашивался тимоловым синим индикатором, а в бассейн помещалась электродная пара, причем один из электродов располагался вдоль стенки и представлял собой кольцевую нихромовую нить. При подаче на него отрицательного потенциала тимоловый раствор окрашивался вблизи него в ярко-синий цвет, образуя подкрашенное кольцо. При наличии вихрей это кольцо разрывалось и его части “наматывались” на вихри, визуализируя их. Кроме того, по поверхности воды разбрасывались мелкие бумажные пелетки, служившие трассерами течения. Каждый опыт регистрировался с помощью видеокамеры, расположенной на вращающейся платформе сверху. Данные видеосъемки каждого опыта обрабатывались с помощью специальной программы, обеспечивающей построение векторов течения на основе определения величины и направления смещения пелеток за малый промежуток времени. Результаты обработки использовались для анализа структуры и количественных характеристик течения.

4. АНАЛИЗ РАЗМЕРНОСТЕЙ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ РАЗМЕРНЫЕ И БЕЗРАЗМЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ДИАПАЗОНЫ ИХ ИЗМЕНЕНИЯ

Будем считать, что сдвиговое течение в лабораторном бассейне характеризуется следующими размерными параметрами задачи: R_1 — радиус дифференциально вращающегося диска, d — ширина зазора между краем диска и стенкой бассейна ($R_1 + d = R$ — радиус бассейна), H — толщина слоя жидкости в бассейне, ν — кинематическая вязкость жидкости, ω — угловая частота вращения диска, $f = 2\Omega$ — параметр Кориолиса, где Ω — угловая частота вращения платформы. Такие параметры, как толщина диска и расстояние от диска до дна бассейна, сочтем несущественными.

Данный набор из шести параметров характеризуется двумя независимыми размерностями. Согласно пи-теореме, сдвиговое течение в зазоре во вращающейся жидкости определяется четырьмя безразмерными параметрами, которые можно

представить в следующем виде: $\theta = d/R_1$ — масштабное отношение, $Re = \omega R_1 d / \nu$ — число Рейнольдса, $Ek = \nu / f H^2$ — число Экмана, $Ro = \omega / f$ — число Россби. Если платформа не вращается ($\Omega = 0$), то три безразмерных параметра определяют сдвиговое течение: θ , Re и Ek/Ro .

Опыты проводились при фиксированных значениях $R = 30$ см, $d = 6$ см, $\nu = 10^{-2}$ см²/с (дистиллированная вода при комнатной температуре). Некоторые эксперименты проводились при $R = 27$ см, $d = 3$ см. Параметр Кориолиса (угловая частота вращения платформы) в различных сериях опытов имел три фиксированных значения: $f = 0, 1.25$ и 2.5 с⁻¹. Абсолютная величина угловой скорости вращения диска изменялась в широких пределах $|\omega| = 0.22 - 2.09$ с⁻¹. При этом знак вращения диска был как циклоническим, так и антициклоническим. Толщина слоя жидкости не очень сильно изменялась от опыта к опыту и имела значения $H = 3 - 6$ см. Таким образом, масштабное отношение имело два фиксированных значения $\theta = 0.125$ и $\theta = 0.25$, а число Экмана для опытов с вращением платформы было достаточно мало и изменялось в сравнительно небольших пределах: $Ek \approx 10^{-3} - 10^{-4}$. Наиболее значительно менялись безразмерные параметры $Re \approx 3000 - 30000$ и $Ro = 0.09 - 1.75$. При этом в сериях опытов с фиксированной угловой частотой вращения платформы $Re = \text{const} \cdot Ro$. В таком случае можно полагать, что характеристики сдвигового течения должны в основном определяться одним единственным безразмерным параметром, например, числом Россби. Увеличение значения числа Россби от опыта к опыту одновременно уменьшает стабилизирующее влияние вращения и увеличивает уровень турбулентности за счет роста значения числа Рейнольдса. При этом должен осуществляться переход от более упорядоченного течения к менее упорядоченному, т.е., от когерентного — к хаотическому. На этот переход должен оказывать влияние знак сдвига скорости: как следует из предыдущего раздела статьи, циклонический сдвиг и небольшой антициклонический сдвиг должны препятствовать развитию неустойчивости и переходу к турбулентности и тем самым способствовать образованию когерентных вихревых структур.

Чтобы привести критерий устойчивости сдвигового течения в лабораторном эксперименте к описанному ранее в статье критерию $Ro_s = (\partial U / \partial y) / f$, разделим $Ro = \omega / f$ на параметр $\theta = d / R_1$. В результате получим:

$$Ro / \theta = \omega R_1 / f d = -(\partial U / \partial y) / f = -Ro_s. \quad (5)$$

В данном случае мы отождествили ось y в декартовой системе координат с осью r в цилиндрической системе координат, связанной с лабораторным бассейном и направленной от его центра. Кроме того, мы приняли линейную аппроксима-

Условия эксперимента и его основные результаты

С вращением или без вращения	Циклонический или антициклонический сдвиг	Кол-во опытов	Основные результаты опытов
Без вращения	Циклонический	4	Наблюдался турбулентный режим течения без образования когерентных вихревых структур
	Антициклонический	4	Наблюдался турбулентный режим течения без образования когерентных вихревых структур
С вращением	Циклонический	17	При $Ro_s < 4$ наблюдались пристеночные циклонические вихри, при $Ro_s > 4$ наблюдался турбулентный режим течения без образования когерентных вихревых структур
	Антициклонический	13	При $Ro_s > -1.5$ наблюдались пристеночные антициклонические вихри, при $Ro_s < -1.5$ наблюдался турбулентный режим течения без образования когерентных вихревых структур

цию радиального градиента скорости в зазоре: $\omega R_1/d = -(\partial U/\partial y)$. В действительности, сдвиг скорости в зазоре должен быть несколько меньше, чем приведенный выше масштаб, поскольку скорость вращения края диска по абсолютной величине всегда превышает скорость течения в прилегающем к нему слое жидкости. Помня это, мы будем использовать безразмерный параметр – сдвиговое число Россби $Ro_s = -Ro/\theta$ для анализа результатов лабораторного эксперимента.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

Условия, количество и результаты опытов даны в таблице. В опытах, где вдольбереговое течение было циклоническим, а сдвиг скорости между берегом и стрежнем течения – антициклоническим, пристеночные вихри наблюдались только при относительно небольших отрицательных значениях сдвига скорости течения (рис. 3а), когда $-1.5 < Ro_s < 0$. При больших отрицательных значениях сдвига скорости, когда $Ro_s < -1.5$, течение в зазоре между краем диска и стенкой бассейна было хаотическим (турбулентным), когерентных вихревых структур не наблюдалось (рис. 3б).

В опытах, где течение было антициклоническим, а сдвиг – циклоническим, практически всегда формировались пристеночные циклонические вихри (рис. 4а, 4б), число которых увеличивалось с уменьшением сдвига скорости, а их размер – увеличивался. Эти вихри образовывали цепочку и располагались примерно на одинаковом расстоянии друг от друга. Они двигались вдоль стенки бассейна в направлении вращения диска, но со скоростью меньшей, чем линейная скорость вращения его края.

При малой скорости вращения диска, когда $Ro_s < 2$ каждый вихрь существовал довольно дол-

гое время (нескольких лабораторных суток и более), претерпевая определенную эволюцию от образования до исчезновения. Зарождаясь, он имел форму, близкую к круглой, и находился у самой стенки. Диаметр его увеличивался со временем, и одновременно происходило растяжение вихря в направлении течения. В конечном счете, он разрушался за счет этого растяжения. За время своего существования он успевал сместиться на расстояние, составляющее, как минимум, несколько его диаметров. К моменту разрушения “старого” вихря на некотором расстоянии от него формировался новый вихрь. Таким образом, общее число вихрей по периметру бассейна в каждом опыте сохранялось практически постоянным.

При $2 < Ro_s < 4$ в бассейне было два или три устойчивых вихря. Размеры этих вихрей почти не менялись. При $Ro_s \approx 4$ каждый вихрь был неустойчивым и существовал весьма ограниченное время. Диаметр его увеличивался со временем, и за счет этого он разрушался. При $Ro_s > 4$ течение в зазоре между краем диска и стенкой бассейна было турбулентным, также как и при $Ro_s < -1.5$, когерентных вихревых структур не наблюдалось. Диаграмма режимов вдольберегового течения в зависимости от значения Ro_s , как для циклонического, так и для антициклонического сдвига скорости представлена на рис. 5.

По данным видеосъемки пелеток и с использованием специальной компьютерной программы рассчитывались такие характеристики, как радиус R_e и орбитальная скорость V_{orb} вихря и оценивалось число Россби для каждого вихря $Ro_e = V_{orb}/R_e f$. Результаты этих расчетов для опытов с циклоническим сдвигом скорости приведены на рис. 6а–6б.

Из этого рисунка следует, что диаметр вихря на стадии его полного развития приблизительно равен зазору между диском и стенкой бассейна

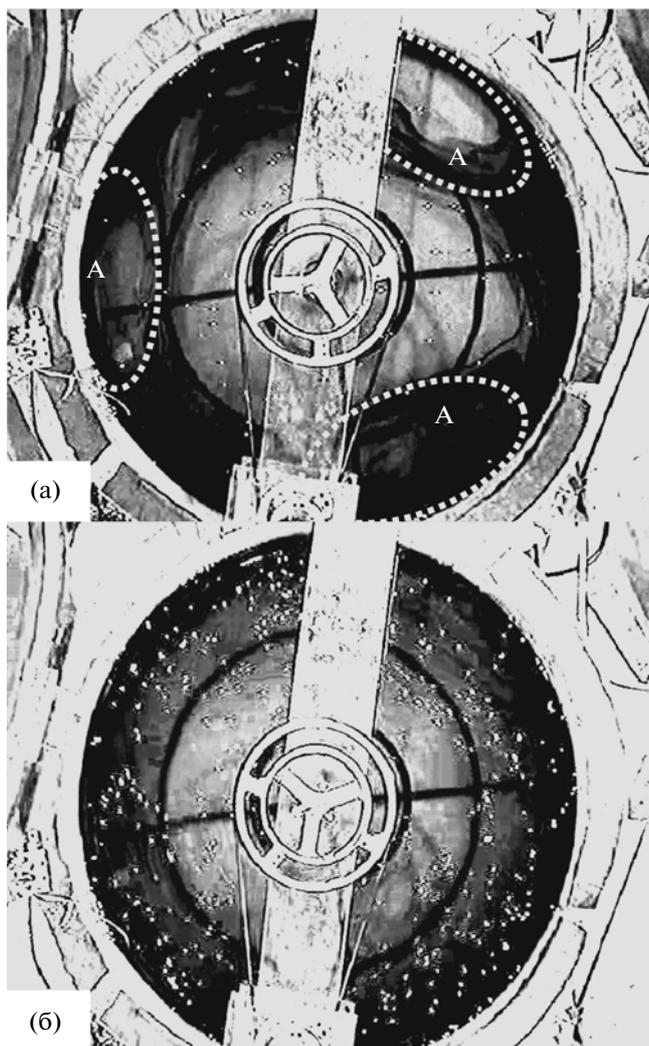


Рис. 3. Течения на поверхности слоя жидкости в опытах, где вдольбереговое течение было циклоническим: (а) – $Ro_s = -0.6$; (б) – $Ro_s = -2.3$. Антициклонические вихри выделены пунктиром и обозначены буквой “А”.

($2R_e = D_e \approx d$), орбитальная скорость вихря составляет примерно одну шестую от линейной скорости вращения диска ($V_{orb}/\omega R_1 \approx 0.2$), скорость перемещения вихря вниз по потоку составляет примерно две трети его орбитальной скорости ($V_{tr}/V_{orb} \approx 0.65$). Все эти параметры слабо зависят от сдвигового числа Россби Ro_s .

В отсутствии вращения платформы сдвиговая неустойчивость течения изучалась в широком диапазоне изменения безразмерного сдвига скорости (числа Рейнольдса): $3000 < Re = \omega R_1 d/\nu < 30000$. Оказалось, что во всем этом диапазоне реализуется турбулентный режим течения без образования когерентных вихревых структур.

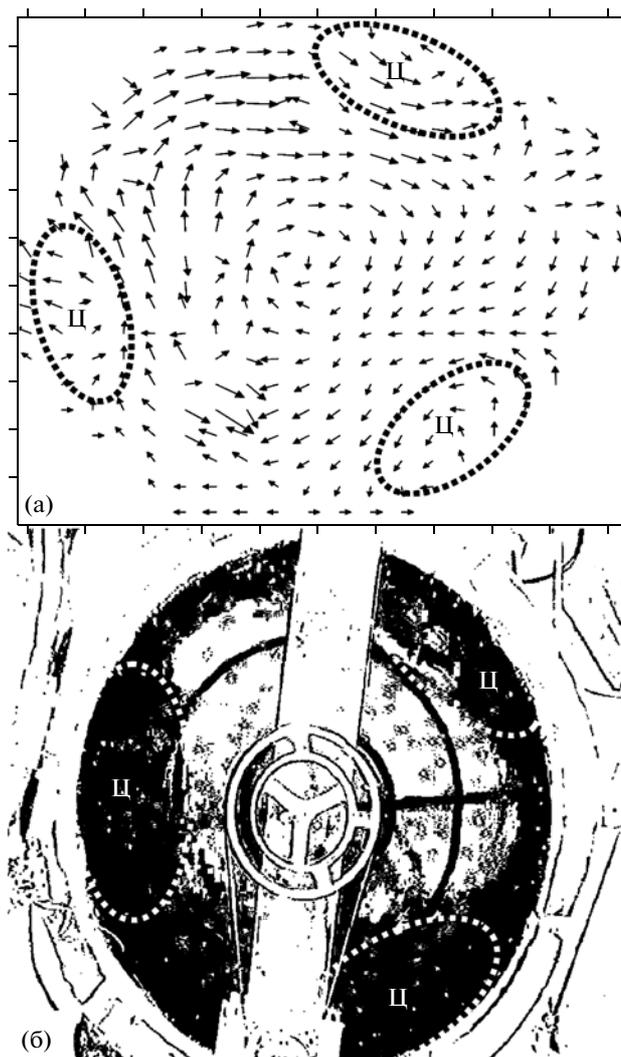


Рис. 4. Течения на поверхности слоя жидкости в опыте, где вдольбереговое течение было антициклоническим: (а) – циклонические вихри в поле поверхностной скорости (стрелки) рассчитанной по трассерам (бумажным пелеткам); (б) – циклонические вихри, визуализированные с помощью тимолового синего индикатора. $Ro_s = 4$. Вихри выделены пунктиром и обозначены буквой “Ц”.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В разделе 2 с помощью простой физической модели было показано, что при $Ro_s > 1$ вращение системы оказывает дестабилизирующее влияние на сдвиговый слой жидкости, тогда как при $Ro_s < 1$ – стабилизирующее. На первый взгляд, результаты опытов противоречат модели, поскольку вихревые структуры наблюдались при $4.5 > Ro_s > 0.5$ и $-0.5 > Ro_s > -1.5$, т.е. в диапазоне, где вращение системы должно увеличивать устойчивость сдвигового слоя. Однако стабилизирующее или дестабилизирующее влияние вращения следует рассматривать в сравнении с невращающейся жид-

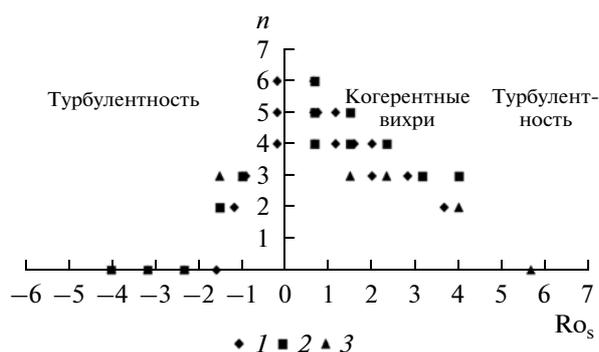


Рис. 5. Диаграмма режимов вдольберегового течения в зависимости от значения Ro_s , как для циклонического, так и для антициклонического сдвига скорости. $1 - f = 2.5 \text{ с}^{-1}$, $d = 6 \text{ см}$; $2 - f = 1.25 \text{ с}^{-1}$, $d = 6 \text{ см}$; $3 - f = 2.5 \text{ с}^{-1}$, $d = 3 \text{ см}$. По оси ординат отложено число n – количество наблюдавшихся вихрей.

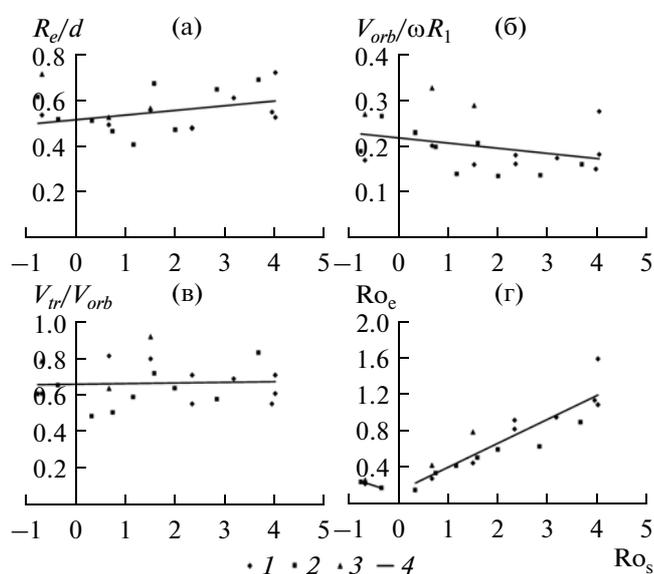


Рис. 6. Зависимости следующих параметров от Ro_s : (а) – безразмерного радиуса вихря; (б) – безразмерной орбитальной скорости вихря; (в) – безразмерной скорости перемещения вихря по течению; (г) – числа Россби для вихря: $1 - f = 2.5 \text{ с}^{-1}$, $d = 6 \text{ см}$; $2 - f = 1.25 \text{ с}^{-1}$, $d = 6 \text{ см}$; $3 - f = 2.5 \text{ с}^{-1}$, $d = 3 \text{ см}$; 4 – линейная регрессия.

костью. Как уже указывалось выше, при тех же угловых скоростях вращения диска сдвиговый слой в невращающейся жидкости был турбулентным. Увеличение устойчивости системы за счет влияния вращения приводило к подавлению турбулентности и к появлению когерентных вихревых структур. В данном случае существует весьма близкая аналогия с влиянием вращения на турбулентную конвекцию (см. раздел 2). При больших числах Рэля в невращающейся жидкости наблюдается турбулентная конвекция, а в условиях вра-

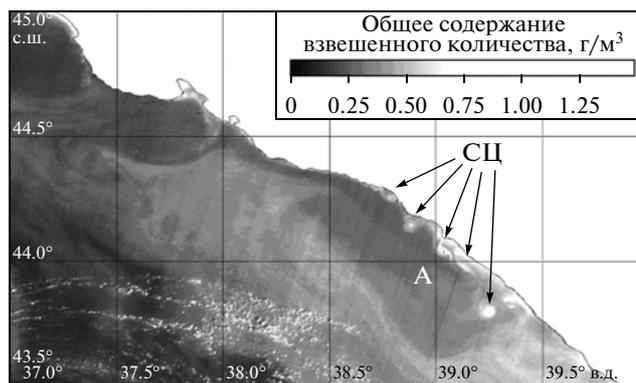


Рис. 7. Субмезомасштабные циклоны (СЦ) на периферии мезомасштабного антициклона (А) в северо-восточной части Черного моря (спутниковый снимок MERIS-Envisat, 8 августа 2010 г., концентрация взвешенного вещества).

щения она преобразуется в систему упорядоченных вихрей с вертикальной осью [1, 7]. К системе упорядоченных вихрей стремится и “решетчатая” турбулентность под влиянием вращения системы [8]. Таким образом, результаты вышеописанных опытов в целом неплохо соответствуют предсказаниям модели. При больших абсолютных значениях Ro_s , как при циклоническом, так и при антициклоническом сдвиге скорости влияние вращения на режим сдвигового слоя становится несущественным. Поэтому не удивительно, что при $Ro_s > 4.5$ упорядоченные вихревые структуры исчезали, и наблюдался турбулентный (хаотический) режим сдвигового течения. Впрочем, критическое число Россби, при котором происходит переход к турбулентности, должно быть функцией числа Рейнольдса.

Следует также пояснить, почему переход к турбулентному режиму течения происходил в опытах при $Ro_s < -1.5$, или при $Ro_s > 4.5$ а согласно физической модели этот переход должен происходить при $Ro_s < 1$. По-видимому, это различие связано с уже упоминавшимся выше различием между реальным горизонтальным сдвигом скорости течения в зазоре и использовавшимся нами масштабом, в основном на скорости движения края дифференциально-вращающегося диска. Однако для проверки этого предположения необходимо выполнить измерения горизонтального распределения скорости в зазоре, которые в наших опытах не проводились.

В заключение отметим, что лабораторные эксперименты во вращающейся жидкости по исследованию формирования вихрей в сдвиговом течении в постановке, близкой к нашей, проводились ранее и описаны в [8]. В этих экспериментах было установлено образование вихревых структур, как при циклоническом, так и при антициклоническом сдвиге скорости. В определенной степени

результаты нашей работы согласуются с результатами [8]. Однако имеются и существенные отличия. Во-первых, эксперименты Хайда и Титмана [8] проводились при существенно меньших значениях числа Россби ($0.01 < Ro < 0.3$) и, соответственно, числа Рейнольдса, и в них исследовался переход от ламинарного осесимметричного режима течения к ламинарному неосесимметричному (ламинарно-вихревому) режиму течения для проверки результатов линейной теории развития неустойчивости. Турбулентный режим течения ими не воспроизводился и не исследовался. Во-вторых, в их работе не воспроизводилось сдвиговое течение в невращающейся жидкости. Таким образом, наша работа расширяет круг результатов, полученных ранее Хайдом и Титманом.

Следует также отметить, что цепочки циклонических вихрей в прибрежной области мезомасштабных антициклонических вихрей в северо-восточной части Черного моря неоднократно наблюдались на спутниковых снимках MERIS-Envisat (рис. 7). Лучше всего шельфовые циклонические вихри “сдвигового” происхождения видны в поле концентрации взвешенного вещества, как области повышенной концентрации. Эти снимки косвенным образом подтверждают результаты описанных выше лабораторных опытов.

Сопоставляя результаты данных лабораторных опытов, а также описанных в [2] с натурными наблюдениями, можно сделать предварительный вывод, что в северо-восточной части Черного моря цепочки шельфовых антициклонических вихрей преимущественно формируются в зоне отрыва течения северо-западного направления за выступами береговой линии, тогда как цепочки циклонических шельфовых вихрей порождаются благодаря сдвиговой неустойчивости вдольберегового течения юго-восточного направления, образованного мезомасштабным антициклоническим вихрем. При этом влияние вращения Земли на формирование и циклонических, и антицик-

лонических вихревых структур на шельфе имеет определяющее значение.

Авторы благодарят Д.М. Соловьева за предоставление спутниковых снимков MERIS-Envisat, на которых видны цепочки шельфовых вихрей.

Работа выполнена при поддержке Программы 23 РАН, контракта с Министерством образования и науки Российской Федерации (ГК № 11.519.11.5020), проекта РФФИ № 11-05-00830.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дикарев С.Н. О влиянии вращения на структуру конвекции в глубокой однородной жидкости // Докл. АН СССР. 1983. Т. 283 № 3. С. 718–720.
2. Елкин Д.Н., Зацепин А.Г. Лабораторное исследование механизма периодического вихреобразования за мысами в прибрежной зоне моря // Океанология. 2013. Т. 53. № 1. С. 29–41.
3. Зацепин А.Г., Корж А.О., Кременецкий В.В. и др. Изучение гидрофизических процессов на шельфе и верхней части континентального склона Черного моря с использованием традиционных и новых методов измерений // Океанология. 2008. Т. 48. № 4. С. 510–519.
4. Зацепин А.Г., Кондрашов А.А., Корж А.О. и др. Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 592–605.
5. Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкости. М.: Мир, 1977. 431 с.
6. Тритон Д.Дж., Дэвис П.А. Неустойчивости в геофизической гидродинамике // Гидродинамические неустойчивости и переход к турбулентности / Под ред. Суини Х., Голлаба Дж. М.: Мир, 1984. 344 с.
7. Boubnov V.M., Golitsyn G.S. Convection in rotating fluids. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995. 224 p.
8. Hide R., Titman C.W. Detached shear layers in a rotating fluid // J. Fluid Mech. 1967. V. 29. P. 39–60.
9. Hopfinger E.J., Browand F.K., Gagne Y. Turbulence and waves in a rotating tank // J. Fluid Mech. 1982. V. 125. P. 505–534.

Laboratory Study of a Shear Instability of an Alongshore Sea Current

D. N. Elkin, A. G. Zatsepin

A laboratory study of the alongshore current shear instability in rotating and non-rotating homogeneous fluid was carried out with the special attention paid to the conditions of coherent eddy structure formation in a shear flow. The cases with both cyclonic and anticyclonic velocity shear between the current core and the coast were reproduced in a wide range of non-dimensional velocity shear variations. No coherent eddy-like structure formation was observed in non-rotating fluid; the flow was always chaotic or turbulent. However, chains of coherent eddy-like structures were formed in rotating fluid in the case with cyclonic velocity shear, in a broad range of its variations. In case with anticyclonic velocity shear, the chain of eddies was observed only when the velocity shear was quite low. When it was high – the flow was chaotic, or turbulent. The physical model that explained the asymmetry in the conditions of coherent eddy-like structure formation in the rotating fluid with cyclonic and anticyclonic velocity shear was considered. The laboratory results agreed with the observations of coherent submesoscale eddies in the Black Sea coastal zone.