

Турбулентность, вихри и волны в гидродинамических лабораторных экспериментах во вращающихся системах

А.Е.Гледзер¹, Е.Б.Гледзер¹, А.А.Хапаев¹, О.Г.Чхетиани^{1,2}

¹Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва

²Институт космических исследований РАН, Москва

Эксперименты, начатые в 70-80 годы в ИФА под руководством А.М.Обухова и продолженные в настоящее время, используют несколько методов генерации вихрей, волн и турбулентности в однородных стационарных и вращающихся гидродинамических системах [1,2].

Инерционный метод основан на начальном вращении сосуда и жидкости с последующей остановкой сосуда и развитием в нем системы вихрей. С его помощью в начале 70-х годов экспериментально для эллипсоидов и эллиптических цилиндров был обнаружен новый тип гидродинамической неустойчивости в однородной жидкости - эллиптическая неустойчивость. Этот метод применим и для существенно трехмерных течений жидкости, а для квазидвумерных потоков в тонких слоях начиная с 80-х годов в ИФА используются МГД-метод и метод источников-стоков.

Магнитогидродинамический метод основан на генерации силы Ампера в слабопроводящей жидкости при наличии системы постоянных магнитов и постоянного электрического тока. Метод использовался для экспериментального моделирования течения Колмогорова и изучения неустойчивости сдвиговых зональных течений в круговой геометрии [1,2]. В последние годы с помощью МГД генерации исследуются статистические характеристики квазидвумерной турбулентности [3-5]. При этом изучается влияние на динамику трехмерных эффектов, возникающих из-за трения тонкого слоя жидкости над твердой поверхностью при выполнении условия прилипания. Трехмерная диссипация энергии существенна для атмосферных процессов, если иметь в виду, что идея обратного каскада, сформулированная в 1989 г. Лилли [6], может быть использована для объяснения некоторых особенностей спектрального распределения энергии при измерении поля скорости в масштабах 3-3000км в атмосфере. Согласно классическим данным горизонтальные спектры поля скорости в

верхней тропосфере-нижней стратосфере, согласно [7] близкие к зависимости k^{-3} для крупных масштабов (1000-3000км), могут быть интерпретированы именно с точки зрения двумерной турбулентности с ее прямым каскадом энтропии. Спектральная зависимость для более мелких масштабов (3-1000км) $k^{-5/3}$ приписывается обратному двумерному каскаду энергии. При этом возникает проблема идентификации источников-стоков энергии для различных масштабов атмосферных движений, что приводит к трудностям в согласовании общей картины потоков энергии между разномасштабными движениями. Обратный каскад энергии при спектре $k^{-5/3}$ также требует, чтобы знаки структурных функций третьего порядка $D_{LLL}, D_{LLL} + D_{LNN}$ были положительными, что не подтверждается соответствующими расчетами на основе данных измерений, как это было сделано в [8].

На рис.1 построены структурные функции третьего порядка D_{LLL} и $3D_{LNN}$ (продольная и утроенная продольно-поперечная). Тонкая линия на рис.1 показывает линейную зависимость от r с приблизительным равенством $D_{LLL} = 3D_{LNN}$.

Для рассматриваемого случая в масштабах вихрей, возбуждаемых взаимодействием тока и внешнего магнитного поля имеются вертикальные источники и стоки массы от поверхности ко дну слоя жидкости, что нарушает двумерность течения, так что $P(r) \neq 0$. А трехмерные эффекты, приводящие к диссипации энергии на возмущениях малых масштабов, возвращает систему к трехмерной динамике со стандартным для 3D отрицательным знаком функций D_{LLL} и $3D_{LNN}$.

Метод **источников-стоков** позволяет промоделировать бета-эффект во вращающемся слое жидкости над наклонным дном в широком канале с образованием зональных встречных потоков и волн Россби [9,10]. При этом для профилей средней зональной скорости с малой средней по ширине канала относительной угловой скоростью вращения вокруг оси вращения сосуда может происходить почти полная остановка переноса вихрей (баротропное блокирование).

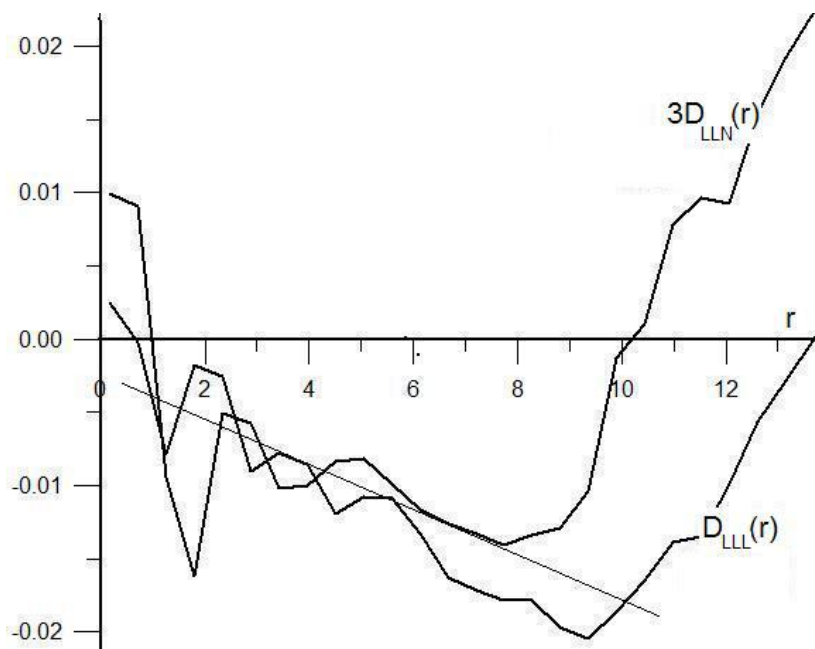


Рис.1 Структурные функции третьего порядка D_{LLL} (1) и $3D_{LNN}$.

Метод источников-стоков и МГД-метод используются для моделирования волн Россби и связанных с ними возмущений, имитирующих процессы в атмосферах вращающихся планет, в экспериментах с потоками однородной жидкости во вращающихся кольцевых каналах. Из количественных характеристик в экспериментах определяются число возникающих вихревых структур, скорость их движения. На их основе строятся диаграммы режимов течений в зависимости от внешних параметров, которыми являются числа Рейнольдса, Тейлора и Россби, связанные с угловой скоростью общего вращения, шириной канала, высотой слоя жидкости, вязкостью, а также ее расходом при использовании метода источников-стоков, а волновые числа определяются по числу вихрей в азимутальном направлении.

Диаграммы с использованием параметров, вычисляемых на основе измерений поля скорости PIV-методом, рассматривались в работах [9-11]. При этом вычислялись среднее значение зональной скорости, зависящей от формы профиля зонального течения, определяемого распределением источников-стоков и общим вращением, а также скорость переноса вихревых структур. Такие

величины позволили более наглядно представить видимую или скрытую структуру течений во вращающемся канале. Встречные зональные потоки в экспериментах [9,10] возбуждались затравочными слабыми радиальными течениями из-за источников (стоков) на двух границах канала и стока (источника) по окружности в его середине при действии силы Кориолиса и придонного трения. В результате может моделироваться атмосферная циркуляция с восточными полярным и экваториальным переносами и западным средним течением в умеренных широтах. МГД-метод применялся в конфигурации кольцевого канала с наклонным дном для создания в поле встречных течений циклонов и антициклонов на различных расстояниях от центра вращения [11]. Дно кругового канала с внутренним и внешним радиусами 1.5 см и $L=14.5$ см имеет осесимметричную коническую форму с высотой на внутреннем радиусе $h_0 = 0.5$ см. Глубина слоя жидкости у этого радиуса 1 см.

Круговое расположение магнитов на разных расстояниях от оси вращения с различным числом магнитов по окружности позволяет менять величину силы Ампера $\sim [jH]$, действующую на электропроводящую жидкость. Различное расположение магнитных колец и изменение величин магнитного поля и тока дает возможность менять геометрию встречных течений, что приводит к появлению вихрей с отличающимися скоростями движения. В режимах быстрого вращения с тонким слоем жидкости, когда масштаб Россби-Обухова не превышает характерных размеров сосуда, возникает система возмущений с почти неподвижными антициклонами во внешней части течения и быстро перемещающимися циклонами в основном потоке.

На рис.2а приведена диаграмма режимов в переменных относительных угловых скоростей осредненного зонального потока ω и переноса вихрей вокруг оси вращения системы ω_v , для экспериментов с МГД генерацией и с источникам-стокам. Сплошные прямые на рис.2а отмечают линии, вдоль которых группируются результаты экспериментов с источникам-стоками. В отличие от них при МГД генерации вихрей их размеры и азимутальная скорость перемещения могут быть разными в зависимости от расстояния от оси вращения системы. При этом при почти неподвижных антициклонах вблизи внешней границы

сосуда движение циклонов в его середине и у его внутренней границы происходит с большой угловой скоростью.

На рис.2б приведены результаты численных расчетов в рамках уравнений мелкой воды для течений в лабораторных экспериментах с вращающимся кольцевым каналом и коническим дном [12]. Для моделирования экспериментальных источников-стоков жидкости в уравнения для глубины слоя вводится осесимметричная функция источника массы, которая вместе с силой Кориолиса создает встречные зональные потоки. Различные конфигурации и амплитуды источников массы приводят к возникновению вихревых движений в канале с различными циркуляционными движениями в вихрях и азимутальными перемещениями их центров вдоль канала. Численные эксперименты позволяют вычислить также толщину слоя жидкости.

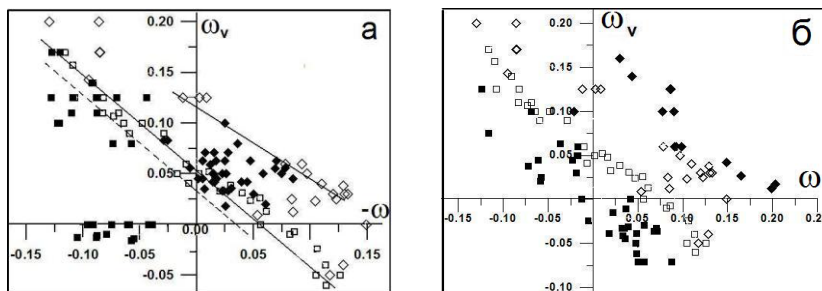


Рис. 2. Относительная угловая скорость осредненного зонального потока ω и относительная угловая скорость переноса вихрей ω_v :
(а)- для экспериментов с МГД генерацией (сплошные значки) и с источникам-стоками (открытые значки),
(б)- для численных расчетов по уравнениям мелкой воды (квадраты и ромбы) (открытые квадраты и ромбы - для экспериментов с источниками-стоками).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 14-17-00806).

Литература

1. Гледзер Е.Б., Должанский Ф.В., Обухов А.М. Системы гидродинамического типа и их применение. М.:Наука,1981.

2. *Должанский Ф.В.* Основы геофизической гидродинамики. 2011. Физматлит. 264с.
3. *Гледзер А.Е., Гледзер Е.Б., Хапаев А.А., Чхетиани О.Г.* Структурные функции в квазидвумерной турбулентности в лабораторном эксперименте. ЖЭТФ, 2011, Т.140, №3, 590.
4. *С.И.Кострыкин, А.А.Хапаев, И.Г.Якушкин.* О законе затухания квазидвумерной турбулентности // Письма в ЖЭТФ Т.95 583 (2012).
5. *А.Е.Гледзер, Е.Б.Гледзер, А.А.Хапаев, О.Г.Чхетиани.* Влияние трехмерных структур на динамику турбулентности в тонких слоях жидкости в лабораторном эксперименте// Изв.РАН, ФАО, 2013. Т.49, С.208-222.
6. *Lilly D.K.* Two-dimensional turbulence generated by energy sources at two scales// J.Atmos.Sci., bf 40, 2026 (1989).
7. *Gage K.S., Nastrom G.D.* Theoretical interpretation of atmospheric wavenumber spectra of wind and temperature observed by commercial aircraft during GASP // J.Atmos.Sci. 1986. V.43. P.729-740.
8. *Cho J.Y.N., Lindborg E.* Horizontal velocity structure functions in the upper troposphere and lower stratosphere. 1.Observations // J.Geophys.Res.2001. v.106, № D10, P.10,223-10,232.
9. *Гледзер А.Е., Гледзер Е.Б., Хапаев А.А., Черноушко Ю.Л.* Баротропное блокирование переноса вихрей в лабораторных экспериментах с вращающимся кольцевым каналом// ДАН, Геофизика, 2012, Т.444, №3, 309-314.
10. *Гледзер А.Е., Гледзер Е.Б., Хапаев А.А., Черноушко Ю.Л.* Зональные потоки, волны Россби и перенос вихрей в лабораторных экспериментах с вращающимся кольцевым каналом// Изв.РАН, ФАО, 2014, Т.50, N1.
11. *Гледзер А.Е., Гледзер Е.Б., Хапаев А.А., Чхетиани О.Г.* Экспериментальное обнаружение блокирования переноса вихрей и волн Россби при МГД-возбуждении квазидвумерных течений во вращающемся цилиндрическом сосуде// Письма в ЖЭТФ, 2013, Т.97, С.359-365.
12. *Гледзер А.Е.* Численная модель течений, генерируемых источниками-стоками массы в кольцевом вращающемся канале// Изв.РАН, ФАО, 2014, Т.50, №3, С.331-343.