

03;07;12

Регистрация динамической волновой структуры на поверхности вращающейся жидкости

© П.П. Белоусов, П.Я. Белоусов, Ю.Н. Дубнищев

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск

Поступило в Редакцию 18 января 1999 г.

Методами лазерной оптико-волоконной доплеровской 2D анемометрии и теневой визуализации впервые зарегистрирована волновая структура на поверхности вращающейся жидкости.

Экспериментальные исследования волновых процессов на поверхности вращающейся жидкости связаны с проблемой моделирования влияния вращения Земли на движение волн и приливные явления в океанах. Хотя теория этих процессов разработана достаточно глубоко, экспериментальное моделирование и обоснование теоретических выводов вызывает значительные трудности. Возможность изучения таких волновых структур в лабораторных условиях ограничивается уровнем метрологического обеспечения, необходимые требования к которому заключаются в невозмущающем характере измерений и высокой чувствительности при определении в первую очередь коллинеарной к оси вращения компоненты вектора локальной скорости поверхности жидкости.

Как известно [1,2], поверхностная волновая структура жидкости во вращающемся круглом бассейне описывается в цилиндрических координатах (r, θ) уравнением Гельмгольца, решение которого имеет вид

$$z = J_m(kr) \cos(\omega t - m\theta),$$

где ω — собственная частота колебаний, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, $k^2 = \frac{\omega^2 - 4\Omega^2}{gh}$, Ω — угловая скорость вращения, h — глубина бассейна, g — ускорение свободного падения. Краевая задача здесь не имеет простого решения. Волновая структура может содержать симметричные и антисимметричные моды колебаний. Вращение вызывает расщепление мод, и решение состоит из сложной системы волн типа Кельвина

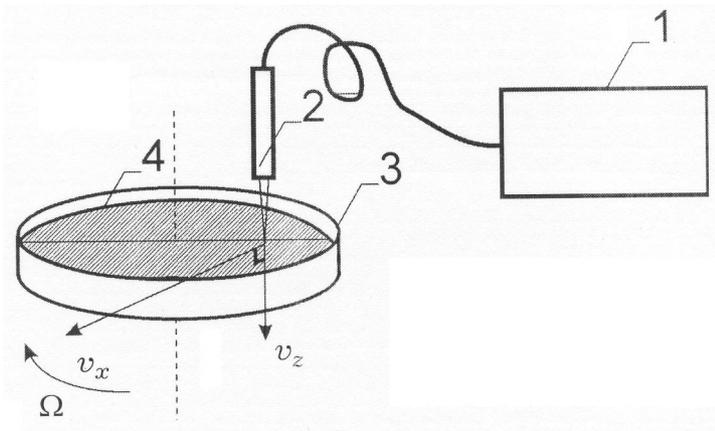


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — лазерный измеритель 2D вектора скорости; 2 — оптоволоконный зонд; 3 — вращающийся цилиндрический сосуд с водой ($\varnothing = 170$ мм, глубина $h = 50$ мм, угловая скорость $\omega \sim 0.75$ rev/s); 4 — поверхность воды.

и Пуанкаре, распространяющейся по направлению или против направления вращения бассейна. Возможность метрологического обеспечения экспериментальных исследований в лабораторных условиях появилась с разработкой оптоволоконного лазерного доплеровского измерителя 2D вектора скорости в ортогональном координатном базисе, сформированном в двухпучковой дифференциальной конфигурации [3,4]. Создание прибора позволило выполнить экспериментальные исследования структуры волн, возбуждаемых на водной поверхности вращающегося цилиндрического сосуда. Схема эксперимента показана на рис. 1. Одновременно измерялись коллинеарная оси вращения (v_z) и тангенциальная (v_x) компоненты вектора скорости. Чувствительность измерителя для осевой компоненты $\gamma_z = \frac{f_{Dz}}{v_z} = 3(\text{MHz} \cdot \text{m})/\text{s}$, для тангенциальной компоненты $\gamma_x = \frac{f_{Dx}}{v_x} = 0.108(\text{MHz} \cdot \text{m})/\text{s}$ (здесь f_{Dz} и f_{Dx} — доплеровские сдвиги частот в z и x измерительных каналах). Таким образом, чувствительность измерения осевой компоненты увеличена в ~ 30 раз по сравнению с чувствительностью при измерении тангенциальной составляющей. Высокое разрешение прибора позволило выявить динамическую волновую структуру на поверхности вращающейся жидкости.

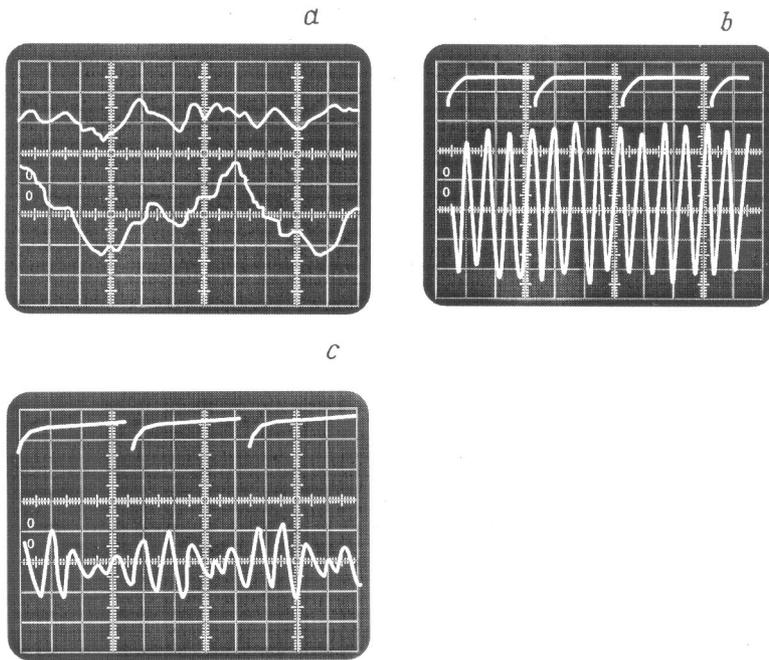


Рис. 2. Измерение тангенциальной v_x и коллинеарной оси вращения v_z компонент скорости поверхностных волн: *a* — аналоговые сигналы, соответствующие v_x (вверху) и v_z (внизу) компонентам вектора скорости (масштаб по вертикали v_x — 15.5 mm/s на клетку, v_z — 0.56 mm/s на клетку, по горизонтали — 0.1 s на клетку); *b* — аналоговый сигнал, соответствующий v_z компоненте скорости. Вверху приведен сигнал синхронизации с вращением цилиндрического сосуда (протяженность меток соответствует периоду вращения $T = 1.33$ s). Масштаб по вертикали 0.56 mm/s; *c* — аналоговый сигнал, соответствующий v_z компоненте скорости. Частота вращения слегка увеличена по сравнению с рис. 2, *b*.

На рис. 2 показан пример аналоговых сигналов, отражающих изменение во времени тангенциальной (вверху) и коллинеарной оси вращения (внизу) компонент вектора локальной скорости поверхностных волн в лабораторной системе координат. Аналоговый сигнал, соответствующий

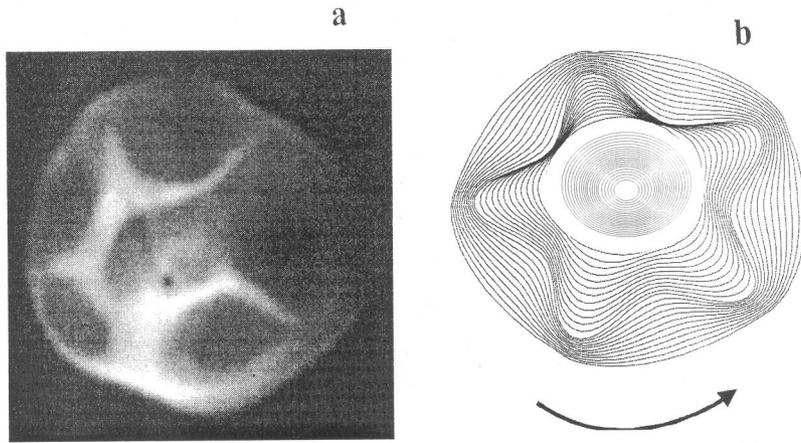


Рис. 3. *a* — визуализированный при косом освещении динамический рельеф поверхностных волн (пятилучевая структура). Амплитуда волны ~ 0.3 мм; *b* — качественный вид пятилучевой структуры динамического профиля поверхностных волн (без соблюдения масштаба).

v_z составляющей, представлен на рис. 2, *b*. Вверху приведен сигнал синхронизации с вращением сосуда. Эти сигналы не менялись при смещении зондирующего поля вдоль радиуса, что свидетельствует о наличии радиальных узловых линий в волновой структуре. Рис. 2, *c* представляет сигнал, соответствующий v_z компоненте в ситуации, когда угловая скорость слегка увеличена.

На рис. 3, *a* показан визуализированный при косом освещении динамический рельеф поверхностных волн (пятилучевая вращающаяся структура). Амплитуда перепада рельефа (от пика до впадины) составляет 0.3 мм. Визуализация представляет серьезные проблемы. Применение классических методов (например, модификация в отраженном свете гильберт-преобразования [5]) вызывает значительные трудности из-за параболической формы среднего уровня поверхности, которую принимает жидкость при вращении. Визуализация с использованием косого освещения и соответствующей пространственной фильтрации позволяет выявить динамическую структуру поверхности, но при этом имеют место проекционные искажения. На рис. 3, *a* хорошо видна пятилучевая

радиальная ($m = 5$) и концентрическая структура узловых линий, отражающих антисимметричную моду колебаний [6]. Рис. 3, *b* дает качественное представление (без соблюдения масштаба) о пятилучевой структуре динамического профиля. Приведенные примеры выявления структуры поверхностных волн вращающейся жидкости соответствуют теоретическим моделям и подтверждают адекватность разработанных оптических методов этому классу гидродинамических задач.

Авторы выражают благодарность В.Г. Меледину, Г.В. Баакину, И.В. Наумову и В.В. Сотникову за помощь в работе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ 96–02–19246.

Список литературы

- [1] Ламб Г. Гидродинамика. Л.: Гостехтеоретиздат, 1947. 928 с.
- [2] Сретенский Л.Н. Теория волновых движений жидкости. М., Л.: ОНТИ НКВД СССР, 1936. 303 с.
- [3] Дубнищев Ю.Н. // Автометрия. 1996. № 2. С. 13–20.
- [4] Белоусов П.П., Белоусов П.Я., Дубнищев Ю.Н. // Автометрия. 1998. № 2. С. 8–12.
- [5] Арбузов В.А., Дубнищев Ю.Н., Лебедев А.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 24. В. 17. С. 54–58.
- [6] Ле Блон П., Майсек Л. Волны в океане. Ч. I М.: Мир, 1981. 480 с.