

УДК 532.5.011.12

© Э. М. Владимирова, А. А. Коновалов, А. Д. Литвин, М. А. Полетаева, И. В. Стецюк
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург
irene_stetsuok@yahoo.com

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ФОНОВЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН И СЛЕДА ЗА СФЕРОЙ ПРИ ЕЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ

Приводятся результаты экспериментального исследования взаимодействия фоновых внутренних волн и процессов, вызванных движением сферы в стратифицированной по плотности жидкости. Рассмотрены два типа стратификации: профиль с распределением плотности, близким к линейному, и профиль с распределением плотности, содержащим пикноклин конечной толщины. При проведении исследования использовались контактные методы и теневой шлирен-метод. Выполнена статистическая обработка полученных экспериментальных данных, включающая цифровой анализ теневых изображений течений жидкости и спектральный анализ. Наличие в жидкости фоновых внутренних волн приводит к трансформации следа за сферой. Наличие фоновых внутренних волн свидетельствует о более интенсивном вихревом переносе в жидкости вследствие взаимодействия вихревых движений от двух различных источников. При движении вблизи пикноклина область резкого градиента плотности жидкости препятствует распространению возмущений к свободной поверхности. Показано, что процессы взаимодействия фоновых внутренних волн и следа за сферой при ее горизонтальном движении в стратифицированной жидкости играют важную роль в формировании структуры как турбулентных, так и волновых движений стратифицированной жидкости. Существенное значение при этом имеет тип плотностной стратификации.

Ключевые слова: внутренние волны, свободная поверхность, гидрофизические поля, след.

Je. M. Vladimirova, A. A. Konovalov, A. D. Litvin, M. A. Poletaeva, I. V. Stetsyuk
Krylov state research center, St.-Petersburg, Russia

THE INTERACTION OF BACKGROUND INTERNAL WAVES AND WAKE OVER THE HORIZONTALLY MOVING SPHERE IN STRATIFIED FLUIDS

The results of experimental studies of the interaction of background internal waves and processes, caused by the movement of the sphere in a stratified fluid are presented in this paper. Two distinct types of stratification are considered: a profile with a distribution of density that is close to linear and profile with a distribution of density that contains the pycnocline of finite thickness. The contact methods and schlieren-method are used in this study. Statistical processing of experimental data, including digital analysis of the shadow images of fluid and spectral analysis, are performed. It is shown that the presence of background internal waves leads to the transform of a wake over the sphere. The presence of background internal waves indicates more intense vortex transfer in the fluid due to the interaction of vortex motions from two different sources. Pycnocline prevents the propagation of perturbations from a moving sphere to the free surface. It is shown that the processes of interaction of background internal waves and a wake over the sphere in a stratified fluid play an important role in a formation of turbulent and wave motions in a stratified fluid, the type of a density stratification is of major importance.

Key words: internal waves, free surface, hydrophysical fields, wake.

В неоднородной по плотности жидкости могут возникать внутренние волны. Внутренние волны появляются под воздействием внешних возмущающих сил, нарушающих равновесие в положительно стратифицированной среде, сил тяжести и плавучести, которые стремятся вернуть жидкость в равновесное состояние. Характер колебаний при этом будет зависеть от величины силы, длительности и масштабов возмущающего воздействия, а также от распределения плотности жидкости в невозмущенном состоянии. Источником внутренних волн может быть движущееся в стратифицированной по плотности среде тело [1]. Взаимодействие внутренних волн, вызванных движением тела и фоновых внутренних волн (ФВВ) от иного источника, а также характер развития течения за движущимся в поле ФВВ телом представляет научный интерес.

Одним из наиболее хорошо изученных стратифицированных течений является течение за сферой. Структура течения за сферой в стратифицированной по плотности жидкости исследовалась многими авторами [2—8]. В данной работе рассматривается влияние ФВВ на структуру течения за сферой и характеристики процессов смешения, обусловленные взаимодействием структур следа и ФВВ, измененные на различных расстояниях между горизонтом движения сферы и свободной поверхностью.

Целью проведения экспериментов являлось изучение процессов взаимодействия ФВВ и следа за сферой в стратифицированной по плотности среде при различных условиях стратификации.

Эксперимент проводился на стратифицированной установке ФГУП «Крыловский государственный научный центр», позволяющей исследовать неоднородные по плотности течения при движении различных моделей. В данном эксперименте в качестве модели была использована сфера. Диаметр сферы D составлял 0,032 м. Установка представляет собой гидролоток с линейными размерами $L \times B \times H = 2,13 \times 0,17 \times 0,34$ м³, заполненный водно-солевым раствором. Общий вид экспериментальной установки изображен на рис. 1. На стойке над гидролотком размещены: координатное устройство для установки гидрологического зонда; генератор внутренних волн с волнопродуктором; система, обеспечивающая движение сферы. Движение сферы осуществлялось с помощью системы, которая состояла из электродвигателя и редуктора, вертикальных направляющих для перевода движения лески из вертикального в горизонтальное направление и противовеса для натяжения лески на которой была закреплена модель. В качестве датчика определения плотности использовался гидрологический зонд для измерения температуры и электропроводности. Зонд имел следующие технические характеристики: частота опроса датчика 4 Гц, диапазон измерения электропроводности 0—100 мСм/см. Внутренние волны генерировались волнопродуктором в виде двух горизонтальных пластин с размерами $l \times b = 17 \times 4$ см², толщиной 1,2 см, соединённых через два штока с кривошипно-шатунным механизмом и совершающих возвратно-поступательное движение вдоль вертикальной оси из нижней точки в верхнюю за счет подачи регулируемого напряжения на блок питания постоянного тока. Генерация внутренних волн осуществлялась непрерывно в течение определенного периода времени. Для исключения возможности появления стоячих волн в торцевых частях гидролотка устанавливались специальные волногасители.

Визуализация течения осуществлялась через смотровое окно с помощью оптического шлирен-теневого прибора ИАБ-455, реализующего теневой шлирен-метод и скоростной цифровой видеокамеры. Видеосъемка проводилась с частотой 100 кадров в секунду. Осветительная и приемная часть ИАБ-455 устанавливались на специальных подставках напротив смотрового окна с обеих сторон гидролотка. Диаметр поля зрения ИАБ-455 равен 90 мм, горизонт движения сферы проходил в нижней части поля зрения оптической аппаратуры и позволял регистрировать картину течений в следе за сферой и окружающей среде в области смотрового окна, нижняя граница которого расположена на расстоянии 11 см от дна бассейна. Смотровые окна изготовлены из оптического стекла и имеют следующие размеры: длина $L_w = 54$ см, высота $H_w = 11,5$ см, толщина стекла 3,5 см.

Неоднородность по плотности задавалась путем послойной заливки растворов различной солёности от 5 до 40 ‰ на высоту 29 см от дна бассейна. При заливке гидролотка для создания определенного типа стратификации емкости с солевыми растворами необходимой концентрации устанавливались на площадку подъемного устройства на высоту, достаточную для обеспечения медленной послойной заливки без перемешивания с последовательно возрастающей концентрацией солевых растворов через отверстие на дне гидролотка. Распределение плотности по вертикали измерялось CTD-зондом с частотой опроса датчика 4 Гц.

Исследования проводились для двух типов стратификации:

- стратификация с распределением плотности близким к линейному (рис. 2, а);
- стратификация с распределением плотности,

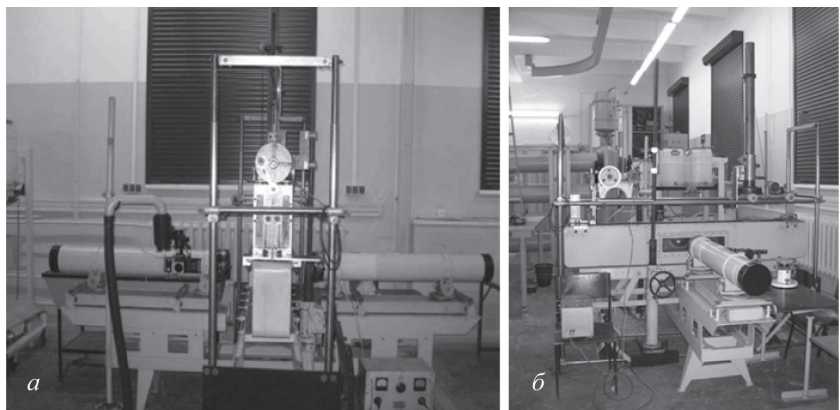


Рис. 1. Экспериментальная установка.
а — вид спереди, б — вид справа.

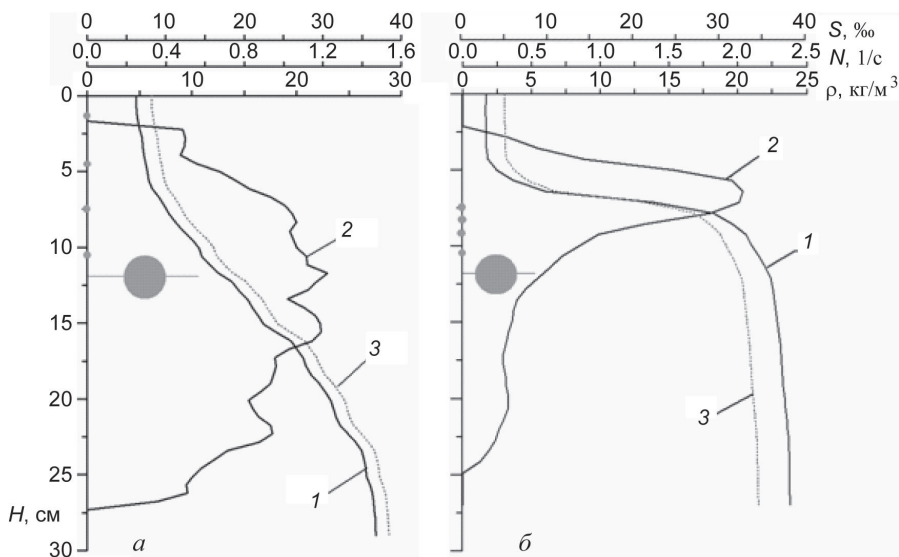


Рис. 2. Пример распределения условной плотности (1), частоты Вайсяля-Брента (2) и солености (3) по глубине.
 а — стратификация с распределением плотности близким к линейному;
 б — стратификация с распределением плотности, содержащим пикноклин.

содержащим пикноклин конечной толщины (рис. 2, б).

Горизонт движения сферы располагался на расстоянии $3.75D$ от свободной поверхности. Измерение плотности в случае стратификации с распределением плотности близком к линейному проводилось на расстоянии $\bar{h} = \frac{H_s - h_i}{D} = 0.5$,

1.4, 2.3 и 3.3 от свободной поверхности, в точке, расположенной на $0.625D$ в сторону от оси движения модели. Здесь H_s — расстояние от свободной поверхности до оси движения сферы; h_i — расстояние от оси движения

сферы до точки измерения. В случае стратификации с распределением плотности, содержащим пикноклин конечной толщины, измерения проводились в области пикноклина на расстоянии $\bar{h} = 2.3, 2.7, 3$ и 3.3 от свободной поверхности.

Измерения характеристик течения в следе проводились при скорости движения сферы 0.33 м/с.

Плотностное число Фруда вычислялось по формуле $Fi = \frac{U}{ND}$, где U — скорость движения модели,

D — характерный вертикальный размер тела (для сферы диаметр), N — частота Вайсяля-Брента. В случае стратификации первого типа $N = 1.1 \text{ с}^{-1}$ на горизонте движения сферы и число Фруда $Fi = 9.37$, для стратификации второго типа $N = N_{\max}(z)$ — значение частоты Вайсяля-Брента в центре пикноклина и число Фруда $Fi = 5.16$. Число Рейнольдса составляло $Re = \frac{UD}{\nu} = 1.03 \cdot 10^4$.

Измерения характеристик течения в следе за сферой проводились в неподвижной среде и в среде, характеризуемой наличием ФВВ заданной частоты и амплитуды. Частота работы волнопродуктора составляла $f = 0.03$ Гц, размах колебаний пластин волнопродуктора составлял 3 см.

Отличие процесса смещения при движении сферы в неподвижной среде от случая движения в присутствии ФВВ можно увидеть с помощью шлирен-теневой аппаратуры. Оптические теневые методы исследований неоднородных течений получили широкое распространение [5—7]. В основе теневых методов лежит связь между оптическими характеристиками течения (градиентом коэффициента преломления света) и параметрами, определяющими локальную плотность неоднородного потока (градиент плотности). Так, в соответствии с законом Лоренца—Лоренца и соотношением Гладстона—Дейла выражение, описывающее связь изменчивости градиентов оптического показателя преломления n и плотности ρ может быть представлено в виде [9]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial z} = r \frac{\partial n}{\partial z},$$

где $r \approx \text{const}$ постоянная Гладстона—Дейла.

В ходе проведения экспериментального исследования при использовании теневого прибора ИАБ-455 применялся метод «горизонтальной щели» и «нити». На рис. 3 представлены теневые изображения поля плотностных неоднородностей в следе за движущейся сферой в неподвижной стратифицированной среде и в среде при наличии ФВВ при распределении плотности по вертикали близком к линейному на начальном этапе развития течения (рис. 3, а) и в период формирования слоистых структур в жидкости (рис. 3, б). Величина Nt характеризует безразмерное время $\bar{t} = Nt$, здесь t — текущее время. Горизонтальная линия на рисунках соответствует горизонту перемещения сферы. Можно

отметить, что наличие фоновых волн приводит к более интенсивному распространению возмущений в окружающую жидкость с тенденцией их перемещения к свободной поверхности и способствует сохранению более резких плотностных градиентов в области над горизонтом движения сферы.

Метод цифровой обработки теневых изображений заключается в преобразовании исходного изображения в цифровую матрицу интенсивности освещенности. Такое преобразование позволяет анализировать пространственные структуры по горизонтальным и вертикальным направлениям в поле зрения оптической аппаратуры. При использовании высокоскоростной видеокамеры возможно также получение характеристик изменения поля интенсивности освещенности в любой точке пространства, лежащей в поле видимости оптической аппаратуры в течение всего времени проведения эксперимента. Методика определения численных значений

$\partial\rho/\partial z$ заключалась в установлении связи между данными о распределении условной плотности по глубине бассейна, полученными с помощью гидрологического CTD-зонда с вертикальным столбцом цифровой матрицы интенсивности освещенности в невозмущенной жидкости в соответствии с соотношением: $\partial\rho/\partial z = K1I$, где $\partial\rho/\partial z$ — вертикальная компонента градиента плотности; I — элемент матрицы интенсивности освещенности; $K1 = 0.74$ — калибровочный коэффициент.

На рис. 4 представлен образец результатов цифровой обработки изображений видеоматериалов соответствующих вертикальному профилю значений $\partial\rho/\partial z$ в следе за сферой, движущейся в неподвижной среде с распределением плотности близким к линейному при $Nt = 4.4$ (рис. 3).

На рис. 5 представлены крупномасштабные изменения условной плотности (рис. 5, а) и изменения пульсаций условной плотности по вертикали (рис. 5, б) в поперечном сечении следа за сферой в момент времени $Nt = 4.4$.

На рис. 6 представлено изменение со временем мгновенных и осредненных по времени значений $\partial\rho/\partial z$ на оси следа в неподвижной стратифицированной среде и при наличии ФВВ. Мгновенные значения следуют с дискретностью 0.01 с. Осреднение было выполнено методом скользящего среднего с интервалом скользящего в 100 точек, что соответствует временному интервалу осреднения $\tau = 1$ с, т. е. по временному отрезку эквивалентному по значению периоду Вайсяля—Брента на оси следа $TВ.Б. = 1$ с. Можно отметить, что в различные моменты времени наибольший вклад в структуру течения при $t \leq 30$ с вносят мелкомасштабные (высокочастотные) изменения $\partial\rho/\partial z$, а при $t \geq 30$ с — крупномасштабные (низкочастотные) изменения $\partial\rho/\partial z$. Периоды флуктуаций $\partial\rho/\partial z$ изменяются от 0.03 с на малых возрастах до 5 с в дальней области течения за сферой. Как следует из данных, приведенных на рис. 6, на оси следа за сферой наличие ФВВ оказывает наибольшее воздействие на крупномасштабные изменения $\partial\rho/\partial z$ в диапазоне возрастов до $t \leq 25$ с.

Путем статистической обработки серии снимков теневых изображений течения за сферой получены зависимости среднеквадратического отклонения пульсаций вертикальной компоненты градиента плотности $\partial\rho/\partial z$

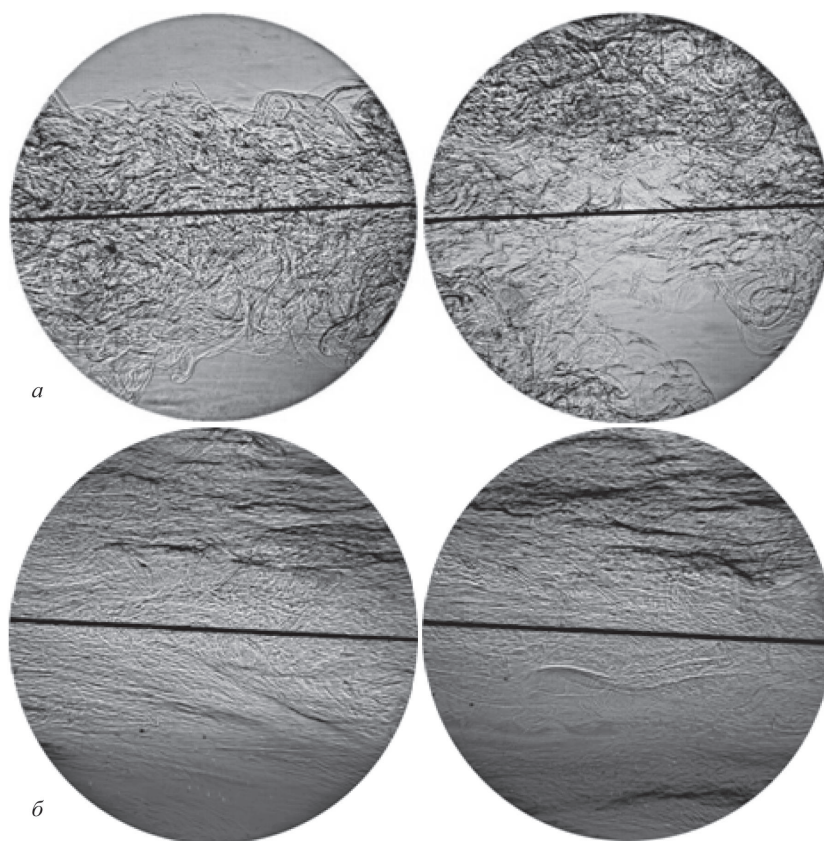


Рис. 3. Теневые изображения поля плотностных неоднородностей в следе за движущейся сферой, $Nt = 4.4$ (а), $Nt = 18.6$ (б). Слева — в неподвижной стратифицированной среде, справа — при наличии фоновых внутренних волн (стратификация с распределением плотности близким к линейному).

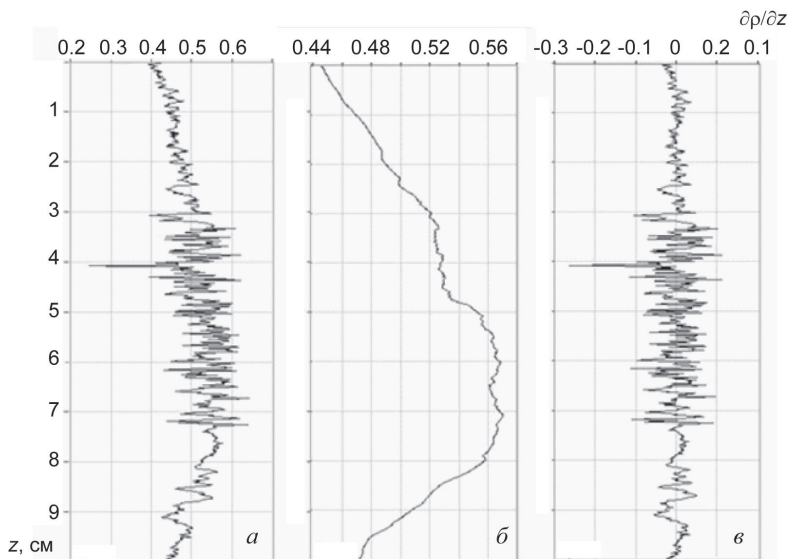


Рис. 4. Результаты цифровой обработки теневого изображения следа за сферой.

a — мгновенные значения $\partial\rho/\partial z$; *б* — крупномасштабные изменения $\partial\rho/\partial z$; *в* — пульсационные значения $\partial\rho/\partial z$.

свидетельствует о более интенсивном вихревом переносе в жидкости вследствие взаимодействия вихревых движений от двух различных источников. Уменьшение среднеквадратичного отклонения пульсационных значений $\partial\rho/\partial z$ на оси следа за сферой при наличии ФВВ также может быть обусловлено вертикальным смещением области спутного течения под воздействием ФВВ. В стратифицированной жидкости смещения поверхностей равной плотности от горизонтального положения будут создавать завихренность [10]. При отсутствии других источников завихренности в вязкой стратифицированной жидкости, внутренние волны будут являться единственной причиной ненулевых значений ротора скорости и, следовательно, единственным источником завихренности течения. При наличии источников завихренности, обусловленных течением за сферой, ФВВ являются дополнительной причиной образования локальных вихревых областей. Вихревой характер внутренних волн, развивающихся в стратифицированной по плотности среде, подтверждается результатами исследований динамики развития прогрессивных внутренних волн в лабораторных условиях [11], полученными с применением оптических методов.

Применение методов точечных измерений температуры, скорости, электропроводности в исследованиях неоднородных течений позволяет непосредственно определять количественные характеристики потоков. На рис. 8 изображено изменение поля безразмерной плотности

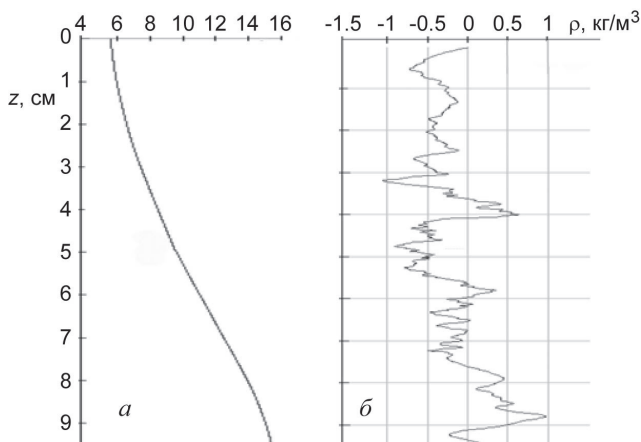


Рис. 5. Вертикальные изменения характеристик плотности в следе за сферой.

a — крупномасштабные изменения условной плотности; *б* — пульсации условной плотности; $Nt = 4.4$.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \rho_i}{\partial z} - \bar{\frac{\partial \rho}{\partial z}} \right)^2} \quad \text{на оси}$$

следа за сферой от времени для случаев ее движения в неподвижной среде и в среде при наличии ФВВ. Пример временного изменения среднеквадратичного отклонения пульсаций вертикальной компоненты градиента плотности $\partial\rho/\partial z$ показан на рис. 7.

Наличие ФВВ в стратифицированной жидкости с распределением плотности близким к линейному приводит к уменьшению среднеквадратичного отклонения пульсационных значений $\partial\rho/\partial z$ на оси следа за сферой по сравнению со случаем движения сферы в неподвижной среде. Уменьшение среднеквадратичного отклонения пульсационных значений $\partial\rho/\partial z$ на оси следа за сферой при наличии ФВВ

описывается формулой $\bar{\rho}' = \frac{\rho' - \rho'_h}{\rho'_h}$ ФВВ во времени $\bar{t} = N \cdot t$, измеренное на расстоянии $\bar{h} = 2.3$ от свободной поверхности, полученное с помощью системы СТ2Х. Здесь ρ' — измеренное значение условной плотности, ρ'_h — средняя условная плотность на горизонте измерения возмущений во времени (рис. 2, *a*).

В данном случае в жидкости формируются ФВВ с периодом $T = 21$ с. В условиях эксперимента такие волны можно рассматривать как длиннопериодные.

При взаимодействии ФВВ и возмущений в следе за сферой на горизонтах $\bar{h} = 3.3$ и 2.3 отмечается увеличение максимального размаха колебаний в стратифицированной жидкости

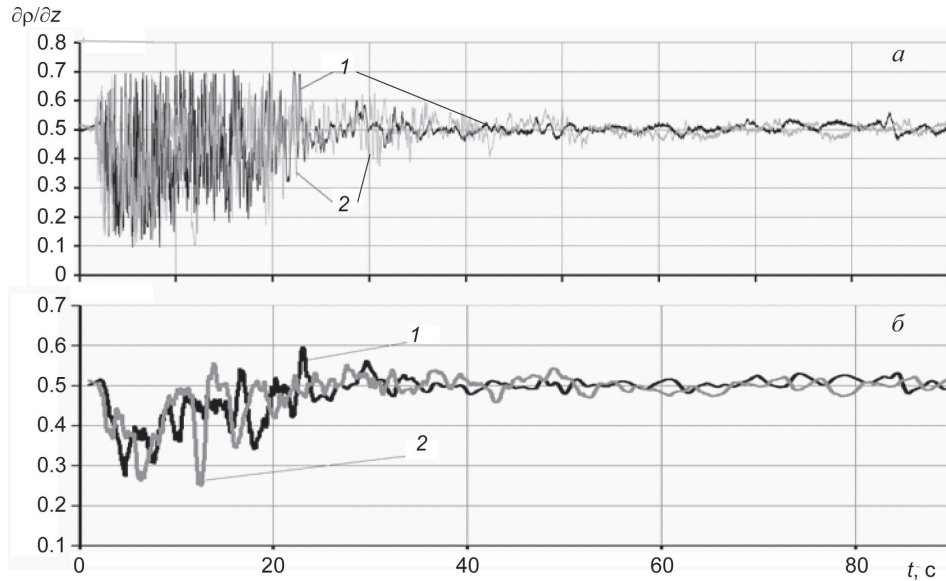


Рис. 6. Временное изменение мгновенных (а) и осредненных (б) значений $\partial\rho/\partial z$ на оси следа в неподвижной стратифицированной среде (1) и при наличии фоновых внутренних волн (2).

по сравнению со случаем движения сферы в неподвижной среде (рис. 9, а, б).

Процесс взаимодействия следа за сферой и ФВВ можно условно разделить на два участка (рис. 9, а). При $Nt < 100$ происходит интенсивное смещение стратифицированной жидкости, характеризующееся высокочастотными колебаниями большой амплитуды. Максимум смещения в жидкости происходит при $Nt \approx 10$. При $Nt > 100$ амплитуда колебаний плотности жидкости уменьшается и можно наблюдать низкочастотный волновой процесс, период которого уменьшается с течением времени. Данный процесс характеризует собой внутренние волны, которые затухают по мере перехода возмущенной жидкости в состояние равновесия. Время жизни волновых возмущений в следе за сферой составляет порядка $Nt \approx 400$.

На рис. 9, б представлено изменение безразмерной плотности до и после прохода сферы в неподвижной среде и в среде при наличии ФВВ на горизонте $\bar{h} = 2.3$. Участок $Nt < 80$ соответствует фоновым процессам. Проход сферы создает возмущения, которые приводят к трансформации поля ФВВ, вызванной нестационарными колебаниями структур в следе за сферой. На приповерхностном горизонте $\bar{h} = 0.5$ ФВВ не приводят к столь значительному увеличению амплитуды возмущений поля плотности в следе за сферой (рис. 9, в).

При проведении спектрального анализа процессов, представленных на рис. 8, 9, б использованы методы статистической обработки нестационарных случайных процессов [12]. Спектры получены для центрированных значений флуктуаций безразмерной плотности после исключения трендов. Результаты спектрального анализа представлены на рис. 10, где приведены амплитудные спектры флуктуаций безразмерной плотности $\bar{S}(f)$,

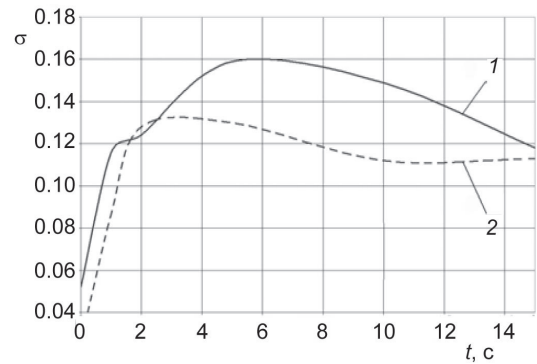


Рис. 7. Временное изменение среднеквадратического отклонения пульсационных значений $\partial\rho/\partial z$ на оси следа за сферой. 1 — движение сферы в неподвижной среде; 2 — движение сферы в среде при наличии фоновых внутренних волн.

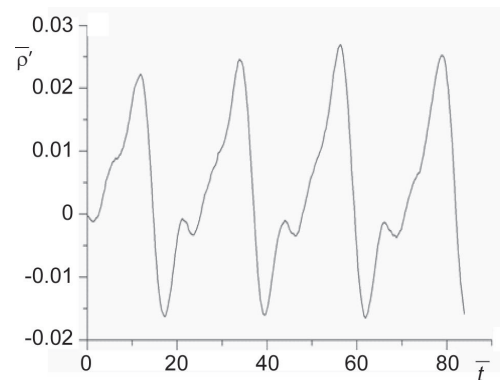


Рис. 8. Изменение безразмерной плотности во времени при наличии фоновых внутренних волн, $\bar{h} = 2.3$, стратификация с распределением плотности близким к линейному.

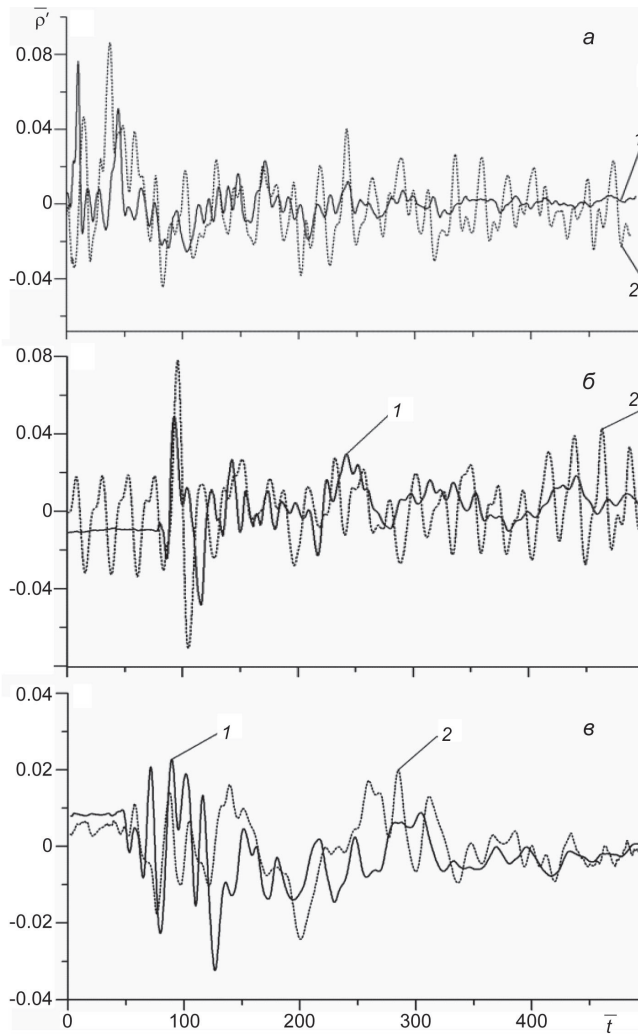


Рис. 9. Изменение безразмерной плотности во времени.

$a — \bar{h} = 3.3$; $б — \bar{h} = 2.3$; $в — \bar{h} = 0.5$.

1 — движение сферы в неподвижной среде; 2 — движение сферы в среде при наличии фоновых внутренних волн; стратификация с распределением плотности близким к линейному.

сферы в среде при наличии ФВВ. Процессы, обусловленные распространением ФВВ (рис. 8), имеют квазистационарный характер. Для спектрального анализа процессов, связанных с движением сферы, были выделены квазистационарные участки записи процессов в диапазоне безразмерных возрастов: $125 \leq Nt \leq 600$.

Результаты спектрального анализа показывают, что ФВВ характеризуются преобладанием в спектре колебаний двух основных частот (рис. 10, a). Наибольший вклад происходит при частоте колебаний $\bar{f} = 0.04$, вторая гармоника соответствует частоте $\bar{f} = 0.09$. В случае движения сферы в неподвижной среде спектр мощности флуктуаций плотности характеризуется многомодовой структурой (рис. 10, $б$) с преобладанием двух частот $\bar{f} = 0.01$ и 0.05 , которые можно отождествить с длиннопериодными внутренними волнами. Взаимодействие ФВВ и колебаний в следе за сферой приводит к изменению амплитудно-частотной характеристики результирующего процесса (рис. 10, $в$). При сохранении основных частот ФВВ $\bar{f} = 0.04$ и 0.09 появляются дополнительные гармоники на низких и промежуточных частотах.

Теневые изображения поля плотностных неоднородностей, возникающих при движении сферы в неподвижной среде и при наличии ФВВ для стратификации, содержащей пикноклин, в различные моменты времени изображено на рис. 11. При движении сферы в неподвижной среде слой

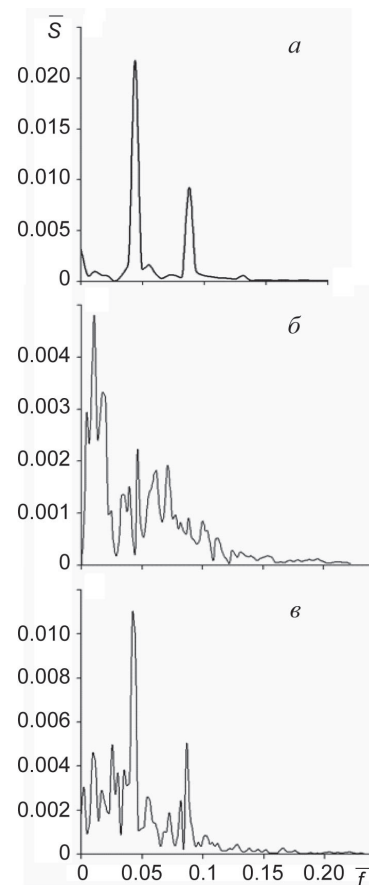


Рис. 10. Амплитудно-частотная характеристика. a — фоновые внутренние волны; $б$ — процесс в следе за сферой, движущейся в неподвижной среде; $в$ — процесс в следе за сферой, движущейся в среде при наличии фоновых внутренних волн. Профиль стратификации с распределением плотности близким к линейному, $\bar{h} = 2.3$, $\bar{f} = 1/\bar{t}$.

здесь $\bar{f} = 1/\bar{t}$ — безразмерная частота для трех случаев: распространение ФВВ, движение сферы в неподвижной среде и движение

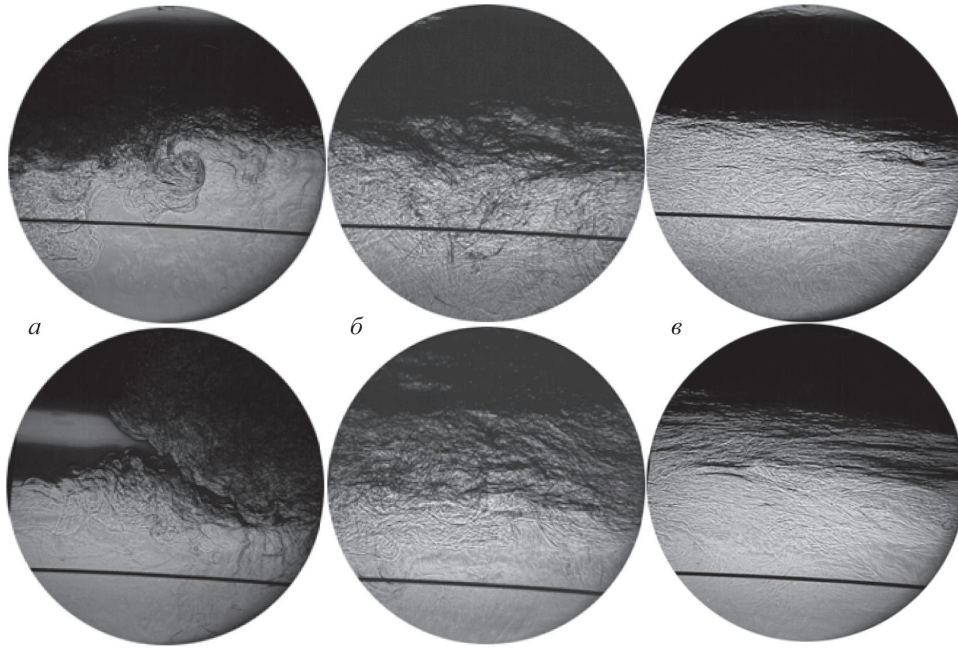


Рис. 11. Теневые изображения поля плотностных неоднородностей при движении сферы в неподвижной среде (*вверху*) и в присутствии фоновых внутренних волн (*внизу*) при $Nt = 4.4$ (*а*), $Nt = 18.6$ (*б*) и $Nt = 39.2$ (*в*); стратификация с распределением плотности, содержащим пикноклин.

пикноклина препятствует проникновению перемешанной жидкости в следе к свободной поверхности (рис. 11, *а*), что способствует развитию возмущений в области горизонта движения сферы (рис. 11, *в*). При движении сферы в среде при наличии ФВВ, вследствие расслоения (рис. 11, *б*) пикноклин обладает меньшей устойчивостью к внешнему воздействию, что приводит к более однородному процессу перемешивания структур следа в поле ФВВ (рис. 11, *з*). Область взаимодействия внутренних волн и следа за сферой в данном случае располагается выше по сравнению со случаем движения сферы в неподвижной среде. В процессе перехода жидкости в состояние равновесия область формирования слоистой структуры захватывает значительную часть пикноклина (рис. 11, *е*), в отличие от случая движения сферы в неподвижной среде (рис. 11, *д*).

В случае наличия в среде пикноклина в результате прохода сферы в неподвижной среде на различных горизонтах регистрируются нестационарные колебания условной плотности с различной амплитудой и частотой (рис. 12). Наибольшие возмущения поля плотности наблюдаются в области с наиболее резким изменением фонового распределения плотности. В данном случае наибольшее

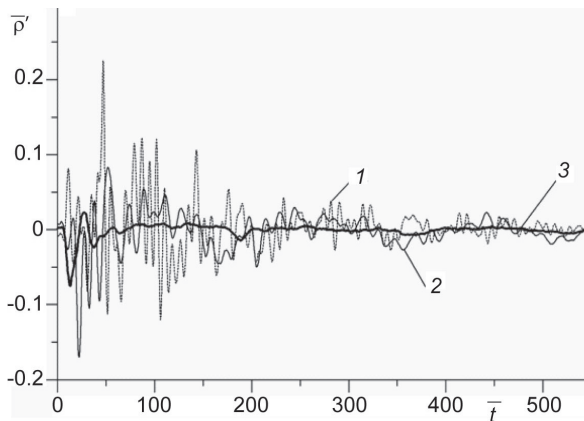


Рис. 12. Изменение безразмерной плотности во времени в неподвижной среде.
1 — $\bar{h} = 2.7$; 2 — $\bar{h} = 3$; 3 — $\bar{h} = 3.3$; стратификация с распределением плотности, содержащим пикноклин.

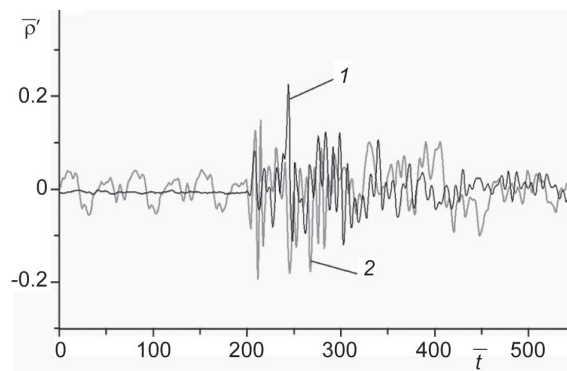


Рис. 13. Изменение безразмерной плотности при наличии фоновых внутренних волн.
1 — движение сферы в неподвижной среде; 2 — движение сферы в среде при наличии фоновых внутренних волн, $\bar{h} = 2.3$; стратификация с распределением плотности, содержащим пикноклин.

возмущение поля плотности происходит в точке измерений, которая расположена на наиболее удаленном расстоянии от горизонта движения сферы ($\bar{h} = 2.7$).

Движение сферы под пикноклином при наличии в жидкости ФВВ приводит к трансформации поля ФВВ (рис. 13), которое проявляется в увеличении амплитуды и частоты колебаний жидкости. На рисунке можно различить три стадии колебательного процесса в жидкости: первый участок соответствует регистрации ФВВ $0 < Nt < 200$, второй участок характеризуется интенсивным процессом взаимодействия ФВВ и нестационарных структур следа за сферой $200 < Nt < 300$. Третий участок характеризуется восстановлением первоначальной структуры фонового волнения в жидкости, обусловленного затуханием возмущений, вызванных проходом сферы в неоднородной среде $300 < Nt < 550$.

На рис. 14 представлены спектры мощности флуктуаций безразмерной плотности $\bar{S}$ для случаев распространения ФВВ, движения сферы в неподвижной среде и движения сферы в среде при наличии ФВВ для профиля стратификации, содержащего пикноклин. Спектры получены для центрированных значений флуктуаций безразмерной плотности на квазистационарных участках [10].

Результаты спектрального анализа показывают, что ФВВ в пикноклине имеют многомодовую структуру: первая мода соответствует частоте $\bar{f} \approx 0.015$ вторая мода соответствует частоте $\bar{f} \approx 0.03$ (рис. 14, а) и наличием дополнительных гармоник более высокой частоты в окрестности $\bar{f} \approx 0.1$.

В случае движения сферы в неподвижной среде имеет место более широкий спектр мощности флуктуаций плотности, при этом существенен вклад более высоких мод (рис. 14, б). Это свидетельствует о порождении сравнительно короткопериодных внутренних волн вследствие процессов перемешивания неоднородной по плотности жидкости в следе за сферой.

Взаимодействие ФВВ и возмущений в следе за сферой при движении вблизи пикноклина приводит к качественной перестройке спектра: на низких частотах увеличивается полнота спектра за счет появления дополнительных гармоник, вызванных влиянием следа. На более высоких частотах воздействие следа за сферой на поле ФВВ приводит к увеличению амплитуды в спектре. На промежуточных частотах флуктуации плотности в следе подавляются за счет взаимодействия с ФВВ, их вклад уменьшается (рис. 14, в).

Таким образом, наличие в жидкости ФВВ в линейно стратифицированной среде приводит к более интенсивному распространению возмущений, вызванных движением сферы в окружающую жидкость с тенденцией их перемещения к свободной поверхности.

Пикноклин препятствует распространению вихревых возмущений, вызванных движением сферы, в вышерасположенные слои жидкости. Вклад ФВВ в среде с наличием пикноклина сопоставим с вкладом от внутренних волн, порождаемых движением сферы, что отражается в наличии нескольких гармоник с близкой по значению амплитудой в спектре на низких частотах.

Характер взаимодействия ФВВ и следа за сферой при ее горизонтальном движении в стратифицированной жидкости зависит от распределения частоты Вайсяля—Брента по глубине при одинаковых начальных параметрах задаваемого фонового волнения. При постоянном значении частоты Вайсяля—Брента (профиль с распределением плотности, близким к линейному) в жидкости формируются ФВВ с двухмодовой структурой. При наличии резкого изменения частоты Вайсяля—Брента (профиль с распределением плотности, содержащим пикноклин конечной толщины) структура ФВВ многомодовая. При движении в среде с наличием резкого

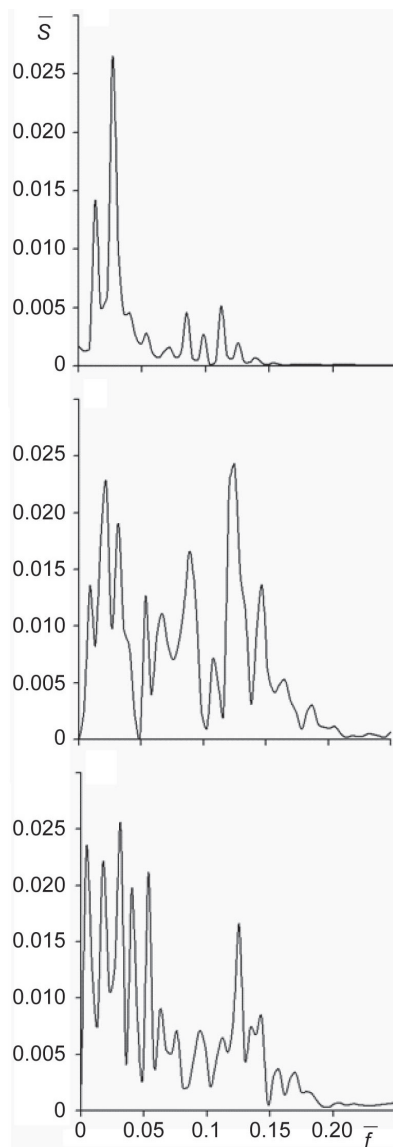


Рис. 14. Амплитудно-частотная характеристика.

а — фоновые внутренние волны; б — процесс в следе за сферой, движущейся в неподвижной среде; в — процесс в следе за сферой, движущейся в среде при наличии фоновых внутренних волн, $\bar{h} = 2.3$; стратификация с распределением плотности, содержащим пикноклин.

пикноклина амплитуды распределены более равномерно на всем пространстве частот, в отличие от случая распределения плотности близкого к линейному, когда в области низких частот наблюдается спектральный пик. При взаимодействии ФВВ со следом за сферой при движении вблизи пикноклина наибольший прирост получают низкочастотные составляющие спектра. На промежуточных частотах взаимовлияние внутренних волн проявляется в затухании этих составляющих и соответствует диссипативным процессам в среде. В среде с распределением плотности близким к линейному ослабление ФВВ происходит непосредственно через усиление длиннопериодных волн в следе за сферой.

Как показали результаты экспериментального исследования, процессы взаимодействия ФВВ и следа за сферой при ее горизонтальном движении в стратифицированной жидкости играют важную роль в формировании структуры как турбулентных, так и волновых движений стратифицированной жидкости. Существенное значение имеет тип плотностной стратификации, характеризующийся особенностями распределения частоты Вайсяля—Брента по глубине жидкости.

Авторы выражают благодарность за помощь в подготовке и проведении эксперимента Иванову Д. В., Козлову А. А., Седых Д. Н.

Литература

1. Васильева В. В. Внутренние волны и волновое сопротивление погруженных тел // Труды ВНТО им. ак. А. Н. Крылова. 1999. С. 140—153.
2. Bonnier M. et al. On the density structure of far-wake vortices in a stratified fluid // Dynamics of Atmospheres and Oceans. 2000. № 31. P. 117—137.
3. Hopfinger E. J. et al. Internal waves generated by a moving sphere and its wake in a stratified fluid // Experiments in Fluids. 1991. № 11. P. 255—261.
4. Qiang Lin et al. Internal waves generated by the turbulent wake of a sphere // Experiments in Fluids. 1993. № 15. P. 147—154.
5. Чашечкин Ю. Д. Гидродинамика сферы в стратифицированной жидкости // Известия Академии наук. Механика жидкости и газа. 1989. № 1. С. 3—9.
6. Bonneton P. et al. Internal waves produced by the turbulent wake of a sphere moving horizontally in a stratified fluid // J. Fluid Mechanics. 1993. V. 254. P. 23—40.
7. Сысоева Е. Я., Чашечкин Ю. Д. Пространственная структура следа за сферой в стратифицированной жидкости // Журнал прикладной механики и технической физики. 1988. № 5. С. 59—65.
8. Гуцин В. А., Матюшин П. В. Математическое моделирование и визуализация трансформации вихревой структуры течения около сферы при увеличении степени стратификации жидкости // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2011. Т. 51, № 2. С. 268—281.
9. Брамсон М. А. и др. Морская рефрактометрия. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 246 с.
10. Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкостях. М.: Мир, 1977.
11. Владимирова Э. М. и др. Исследование особенностей гидрофизических процессов в верхнем слое морской среды в целях обеспечения безопасности функционирования морской техники // IX междунар. конф. «Российское судостроение и судоходство, деятельность портов, освоение океана и шельфа» «Нева-2007». Тез. докл., Санкт-Петербург, 2007.
12. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 540 с.

Статья поступила в редакцию 26.12.2014 г.