

8. Максименко В. Н. Предельное равновесие анизотропной пластины, ослабленной эллиптическим отверстием и системой трещин сложной формы // Учен. зап. ЦАГИ. — 1987. — № 3.
9. Cartwright D. J., Parker A. P. Opening mode stress intensity factors for cracks in pin-loads joints // Intern. J. Fracture. — 1982. — V. 18, N 1.

г. Новосибирск

Поступила 23/1 1989 г.

УДК 53.082.25

Е. В. Гуменник, Ю. Д. Чашечкин

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ТЕЧЕНИЙ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Основной особенностью турбулентных и вихревых движений в стратифицированной среде являются анизотропия переноса в вертикальном и горизонтальном направлениях, вызванная действием сил плавучести, и образование слоистых структур [1]. До настоящего времени механизмы образования, законы эволюции и вырождения этих структур изучены недостаточно. Одна из причин этого заключается в недостаточном высоком уровне развития экспериментальных методов и средств для измерения тонкой структуры распределения плотности в стратифицированных средах.

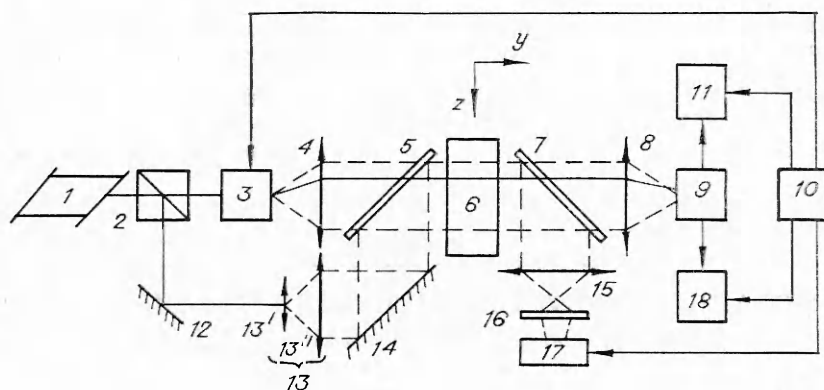
Для экспериментального исследования плотностной структуры стратифицированных течений широко применяются бесконтактные оптические методы. В частности, существенные результаты получены теневыми методами, с помощью которых, однако, затруднительно организовать оперативную обработку информации с применением современных измерительных средств.

Лазерные сканирующие рефрактометры (ЛСР), основанные на использовании электрической регистрации мгновенного значения угла рефракции узкого сканируемого лазерного пучка, зондирующего исследуемый объект [2, 3], дают возможность получать оперативную количественную информацию о его плотностной структуре. При этом измеряемым параметром, так же как и в теневых методах, является интегральное по длине зондирующего луча значение градиента показателя преломления. Но информация здесь получается не в виде распределения освещенности в плоскости теневое изображение объекта, а в виде электрического сигнала, что позволяет непосредственно применять для обработки информации современные измерительные средства, в частности ЭВМ [4].

Однако в настоящее время реализованы лишь ЛСР со строчной разверткой [2, 4], что связано с техническими трудностями изготовления соответствующих двухкоординатных сканеров, необходимых для организации в ЛСР кадровой развертки. Увеличение возможностей лазерных сканирующих систем со строчной разверткой связано с комплексированием ЛСР с традиционными теневыми приборами [4], но оптимизация параметров ЛСР ограничена при этом конструктивными особенностями, габаритными размерами и оптическими характеристиками серийных теневых приборов. Так, пространственное разрешение ЛСР, совмещенного с прибором ИАБ-458 [4], определяется размером зондирующего пучка в исследуемом объекте $w_0 = \lambda f_T / \pi w$ (λ — длина волны излучения лазера, w — размер лазерного пучка на сканере, f_T — фокусное расстояние главного объектива теневое прибора) и не может быть достаточно малым из-за большого значения f_T .

В настоящей работе приведены результаты разработки измерительной системы, совмещающей лазерный прибор (ТП) и ЛСР, для которых общим источником света является лазер и имеется возможность независимого варьирования параметров ЛСР и ТП, а также результаты использования этой системы для исследования структуры стратифицированного течения за тупым цилиндром.

Эксперименты проводились в малом лабораторном бассейне из оргстекла размерами $60 \times 10 \times 20$ см. Водосливовка плохообтекаемого цилиндрического тела осуществлялась вдоль оси симметрии бассейна. Линейная стратификация создавалась методом непрерывного вытеснения [5] за счет изменения концентрации водного раствора хлористого натрия вдоль вертикального направления. При этом брали три значения периода плавучести $T_* = 2\pi/N = 2\pi(g/\Lambda)^{1/2}$, рассчитанные по заливке: 3,5; 4,9; 9,8 с. Здесь N — частота плавучести; g — ускорение силы тяжести; масштаб изменения плотности в невозмущенной среде $\Lambda = (d \ln \rho / dz)^{-1}$; ρ — плотность; z — вертикальная координата, связанная с g . Кроме того, использовались два режима буксировки по скоростям U , для которых рассчитанные по диаметру цилиндра d значения чисел Рейнольдса $Re = 650$ и 1300 . Такие условия позволили провести эксперименты при



Р и с. 1

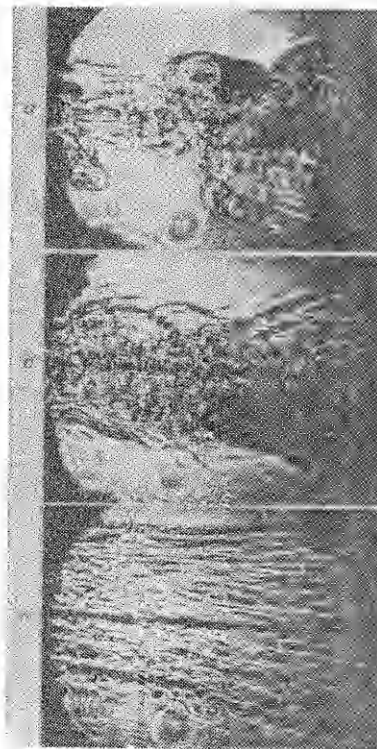
внутренних числах Фруда $Fr = U^2 \Lambda / g d^2 = 4,6; 9,0; 18,4; 36,0; 144,0$.

Структурная схема ЛСР со строчной разверткой зондирующего пучка по вертикали и совмещенного с ним лазерного ТП представлена на рис. 1. ЛСР включает лазер 1, сканер 2, осветительный 4 и приемный 8 объективы, позиционно-чувствительный фотоприемник (ПЧФ) 9, вторичную аппаратуру, в состав которой входит анализатор спектра 11 и самописец 18, и блок синхронизации 10. Сканер лазерного пучка — это зеркало, управляемое по углу наклона с помощью электрического сигнала, находящееся в передней фокальной плоскости осветительного объектива. При работе сканера осуществляется плоскопараллельное перемещение лазерного пучка, зондирующего исследуемый объект 6. ПЧФ образован двумя фотодиодами на общей подложке, разделенными узкой границей и включенными дифференциально [6], и расположен в задней фокальной плоскости приемного объектива. Таким образом, с точностью до аберраций оптической системы ЛСР при отсутствии в зондируемом объеме неоднородностей показателя преломления n , вызванных возмущениями плотности, на выходе ПЧФ имеется нулевой сигнал во всем диапазоне сканирования. При сканировании исследуемого объекта электрический сигнал u на выходе ПЧФ в каждый момент времени t определяется интегральным по длине зондирующего пучка значением градиента плотности на соответствующем t согласно закону сканирования $z = \varphi(t)$:

$$u(t) = B f_2 \frac{0,231}{n_0} \int_0^L \frac{\partial \rho}{\partial z} dy.$$

Здесь B — крутизна координатной характеристики ПЧФ [6]; f_2 — заднее фокусное расстояние приемного объектива ЛСР; n_0 — показатель преломления среды, окружающей изучаемый объект; L — размер рабочей части вдоль направления y . Без учета дисперсии показателя преломления раствора хлористого натрия принято $n = 1,4020 + 0,231\rho/\rho_0$ [7] (ρ_0 — плотность воды при 4 °С).

При достаточно быстром сканировании, когда время строки меньше



характерного времени τ изменения плотности в исследуемом течении, частотная структура сигнала $u(t)$ с точностью до пространственного разрешения ЛСР адекватна пространственной структуре величины $R(z) =$

$$= \int_0^L (\partial\rho/\partial z) dy, \text{ а для двумерного объекта, когда } \rho \neq \varphi(y), \text{ — величины}$$

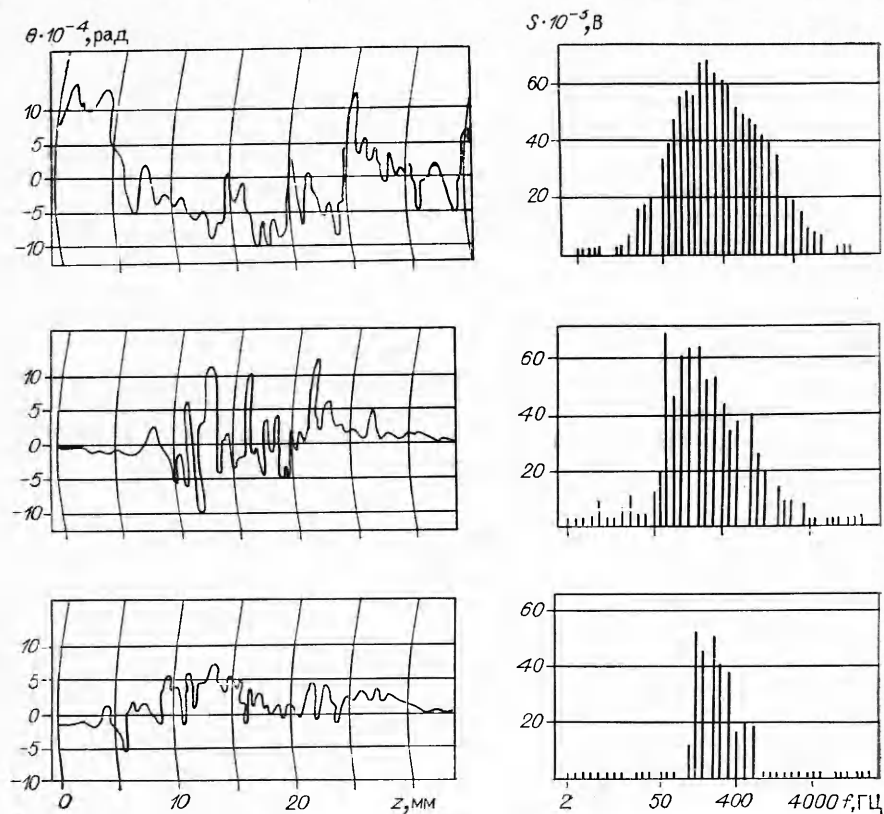
$R_0(z) = L\partial\rho/\partial z$. Более подробное описание работы ЛСР, а также анализ его рабочих характеристик приведены в [3, 4].

Теневой прибор включает лазер 1, делительный кубик 2, систему расширения лазерного пучка 13, состоящую из микрообъектива 13' и длиннофокусного объектива 13'', поворотные зеркала 12 и 14, приемный объектив 15, экран 16 и кинофоторегистрирующую аппаратуру 17. Параллельный пучок когерентного света, образующийся после преобразования генерируемого лазером излучения системой 13, освещает объект. Имеющиеся в объекте флуктуации показателя преломления (плотности) вызывают рефракцию света на выходе из него на угол $\theta_z =$

$$= -\frac{1}{n_0} \int_0^L (\partial n/\partial z) dy, \text{ которая с помощью приемного объектива преобразуется}$$

в перераспределение освещенности на экране, формируя теневую картину.

Совмещение ТП и ЛСР осуществляется с помощью двух плоскопараллельных полупрозрачных пластин 5 и 7. Теневая картина позволяет представить структуру течения в целом, а с помощью ЛСР, совмещенного с ТП, в контролируемых условиях иметь количественную информацию о вертикальном распределении градиента плотности. Поскольку система создавалась для измерения параметров тонкой структуры, ТП был настроен на регистрацию $\partial^2 n/\partial z^2$. Это дало возможность исключить влияние



Р и с. 2

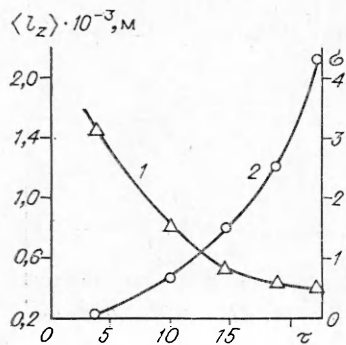
на теньевую картину тонкой структуры плотностных возмущений, вызванных внутренними волнами. Изменение режима ТП (настройка его на $\partial n/\partial z$) осуществляется путем помещения в фокальную плоскость объектива визуализирующей диафрагмы.

На рис. 2 показаны теньевые картины спутного течения за буксируемым цилиндром в различные моменты времени при $Re = 1300$, $Fr = 36$ и соответствующие этим картинам регистрограммы сигналов ЛСР, которые получены синхронно с теньевыми картинками и представляют собой «мгновенные» профили вертикального распределения градиента плотности в спутном течении, а также их спектры. Рис. 2, *a* отвечает моменту времени $\tau = t/T_* = 0,5$, *b* — $\tau = 1$, *в* — $\tau = 5$, где время t отсчитывается от момента прохождения буксируемым телом плоскости сканирования, совпадающей с центральным сечением теньевой картины. Регистрограммы получены с помощью быстродействующего самописца НЗЗ8, а спектры — с помощью спектроанализатора параллельного типа FSP-80, работа которого синхронизировалась с работой сканера.

На рис. 2 видно хорошее соответствие результатов, представленных в виде теньевой картины, сигнала ЛСР и его спектра. Так, на ранней стадии развития (*a*) течение характеризуется наличием существенных длиннопериодных возмущений плотности и широким спектром их пространственных масштабов. При эволюции течения происходят уменьшение абсолютных значений градиента плотности и сужение спектра пространственных масштабов (*b*). Показанное на рис. 2, *в* распределение характеризуется небольшими по амплитуде и достаточно регулярными по вертикальной координате отклонениями градиента плотности, что типично для слоистой структуры вертикального распределения плотности, формирующейся при эволюции спутного течения в стратифицированной среде.

Трансформацию вида спектра от симметричного к несимметричному и бимодальному (см. рис. 2, *a* — *в* соответственно) можно объяснить спецификой процесса переноса энергии по пространственному спектру в стратифицированном течении. Однако вопрос этот требует более детального рассмотрения, так как возможна аппаратная природа указанной трансформации спектра, которая связана с приборным завышением высокочастотной (короткопериодной) части спектра вследствие ограниченного пространственного разрешения ЛСР. Так, в проводившихся измерениях характерный размер зондирующего лазерного пучка $\sim 0,15$ мм и плотностные неоднородности с масштабами $\leq 0,15$ мм вызвали отклик прибора, связанный не с рефракцией зондирующего пучка как целого (приближение геометрической оптики), а с его дифракцией на мелкомасштабных флуктуациях плотности.

На рис. 3 показаны зависимости, полученные путем спектральной обработки сигналов ЛСР, которые представляют собой временные зависимости среднего размера $\langle l_z \rangle$ неоднородностей вертикального профиля градиента плотности (линия 2) и относительного разброса σ размеров этих неоднородностей около среднего значения (линия 1). При этом $Re = 1300$, $Fr = 36$, а



Р и с. 3

$$\langle l_z \rangle = v \left(\frac{\sum_{i=1}^k S_i f_i \Delta f_i}{\sum_{i=1}^k S_i \Delta f_i} \right)^{-1},$$

$$\sigma = \left(\frac{\sum_{i=1}^k S_i (v/f_i - \langle l_z \rangle)^2 \Delta f_i}{\sum_{i=1}^k S_i \Delta f_i} \right)^{1/2},$$

где v — скорость сканирования зондирующего лазерного пучка; S_i — измеряемая

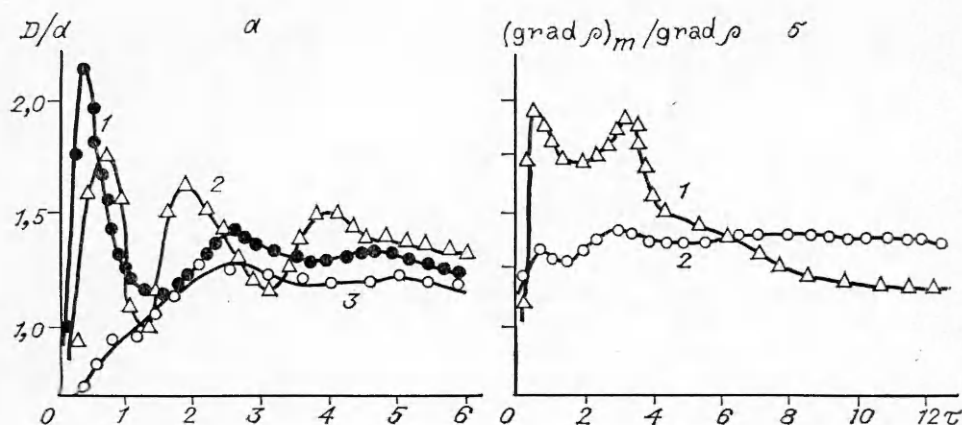


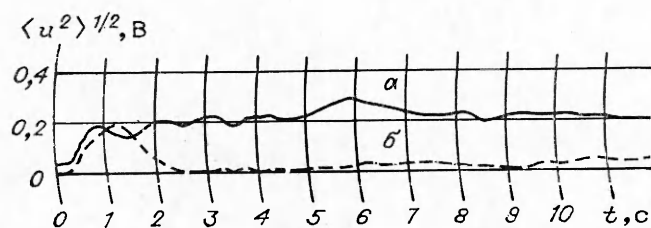
Рис. 4

спектральная составляющая сигнала ЛСР; f_i и Δf_i — центральная частота и полоса пропускания i -го фильтра спектроанализатора FSP-80, который работает по принципу многоканального фильтрации и имеет 38 ($i = 1, 2, \dots, k = 38$) параллельных фильтров, перекрывающих диапазон частот 1,5 Гц — 22,4 кГц.

На рис. 4 приведены найденные в результате обработки ЛСР-регистраграмм зависимости вертикального размера спутного течения D (а) и максимальной величины вертикальной компоненты градиента плотности $(\text{grad } \rho)_m$ в нем (б) от безразмерного времени τ при $Re = 1300$. Здесь $(\text{grad } \rho)_0$ характеризует начальную стратификацию невозмущенной среды. Анализ получения данных показывает, что при больших Fr в исследуемом спутном течении происходит интенсивное перемешивание жидкости, которое осуществляется крупномасштабными вихрями (см. рис. 2, а, 3, 4, б). Образующееся при этом неравновесное распределение плотности коллапсирует под действием сил плавучести (рис. 4, а); отметим, что при наиболее слабой из исследованных стратификаций ($Fr = 144,0$) найденное значение для времени начала коллапса $\tau_* = 0,3$ (линия 1) совпадает с данными [8, 9]. При более сильной стратификации ($Fr = 36,0$) коллапс наступает позже и $\tau_* = 0,5$ (линия 2). Это можно объяснить тем, что более сильная стратификация эффективнее подавляет крупномасштабные вихри, в результате чего медленнее происходит перемешивание в спутном течении и действие сил плавучести проявляется позже. Эти рассуждения подтверждаются и поведением зависимости 3, представленной на рис. 4, а, соответствующей наиболее сильной из исследованных стратификаций, а также сравнением зависимостей 1 и 2, приведенных на рис. 4, б.

Отметим, что полученное при $Re = 1300$, $Fr = 36,0$ максимальное значение градиента плотности в прослойках примерно в 2 раза превышает значение, характеризующее начальную стратификацию. При этом уменьшение $(\text{grad } \rho)_m$ при $\tau \sim 2$ и увеличение при $\tau \sim 3,5$ (см. рис. 4, б, линия 1) связаны с соответствующим увеличением и уменьшением ширины спутного течения (см. рис. 4, а, линия 2).

Методом лазерного сканирования изучался также процесс релаксации возмущенного спутным течением вертикального профиля градиента плотности к исходному состоянию. Применялось быстрое сканирование объекта, а сигнал с выхода ПЧФ подавался на вольтметр среднеквадратичного значения. Время осреднения вольтметра устанавливалось много больше, чем время строки сканирования, и в проводившихся экспериментах было равно 0,3 с при частоте сканирования 30 Гц. Величина $\langle u^2 \rangle^{1/2}$, равная разности сигналов на выходе вольтметра при сканировании объекта $\langle u_c^2 \rangle^{1/2}$ и при сканировании исходной стратификации $\langle u_0^2 \rangle^{1/2}$, принималась за количественную характеристику отклонения вертикального



Р и с. 5

профиля градиента плотности от исходного состояния и регистрировалась с помощью самописца.

Результаты проведенных исследований показали, что после завершения активной стадии движения длительное время наблюдается отличие вертикального профиля градиента плотности в среде от исходного. Стирание этого отличия происходит медленно, так как определяется процессами медленной адвекции и молекулярной диффузии. На рис. 5 приведены регистрограммы сигналов на выходе вольтметра среднеквадратичного значения при $Re = 1300$ и $Fr = 36,0$ (α) и при $Re = 650$, $Fr = 36,0$ (β). Следует отметить, что отличие вертикального профиля градиента плотности от фонового уровня $\langle u_0^2 \rangle^{1/2}$ наблюдается и при значительно больших временах, чем те, которые прослеживаются на рис. 5. Так, для спутного течения, характеризуемого параметрами $Re = 1300$, $Fr = 18,4$, такое отличие надежно регистрировалось при временах $\sim 5 \cdot 10^3$ с.

Таким образом, использование сканирования узкого лазерного пучка в сочетании с теневыми методами позволяет эффективно изучать динамику плотностной структуры стратифицированных течений. При этом не предъявляется высоких требований к оптическому качеству бассейна и метод является достаточно универсальным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкости. — М.: Мир, 1977.
2. Гуменник Е. В., Ринкевичюс Б. С. Лазерный сканирующий рефрактометр для теплофизических исследований // ТВТ. — 1985. — Т. 23, № 4.
3. Гуменник Е. В., Евтихьева О. А., Ринкевичюс Б. С., Чашечкин Ю. Д. Совместное использование качественных и количественных рефрактометрических методов // ИФЖ. — 1986. — Т. 50, № 4.
4. Гуменник Е. В., Ринкевичюс Б. С. Использование рефракции сканируемого лазерного пучка для исследования структуры прозрачных неоднородностей // ТВТ. — 1987. — Т. 25, № 6.
5. Oster G. Density gradients // Scient. Amer. — 1965. — V. 212, N 12.
6. Айвазова Л. С., Горбач Т. Я., Кролевец К. М., Савелов В. Н. Четырехэлементные позиционно-чувствительные фотодиоды // Полупроводниковая техника и микроэлектроника. — Киев: Наук. думка, 1966.
7. Mowbray D. E. The use of schlieren and shadowgraph techniques in the study of the flow patterns in density stratified // J. Fluid Mech. — 1967. — V. 27, N 3.
8. Schooley A. H. Wake collapse in a stratified fluid // Science. — 1967. — V. 157, N 3787.
9. Merritt G. E. Wake growth and collapse in stratified flow // AIAA J. — 1974. — V. 12, N 7.

г. Москва

Поступила 15/XI 1988 г.

УДК 533.95:537.84

П. И. Зубков, Л. А. Лукьянчиков, К. А. Тен

УПРАВЛЕНИЕ ТОКОМ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ИНДУКТИВНОСТЬЮ

Ряд авторов [1—3] справедливо отмечают «паразитную» роль индуктивности цепи коммутатора, выводящего энергию из накопителя в нагрузку. Действительно, напряжение на коммутаторе в простейшей электротехнической модели (рис. 1) дается выражением

© 1990 Зубков П. И., Лукьянчиков Л. А., Тен К. А.