

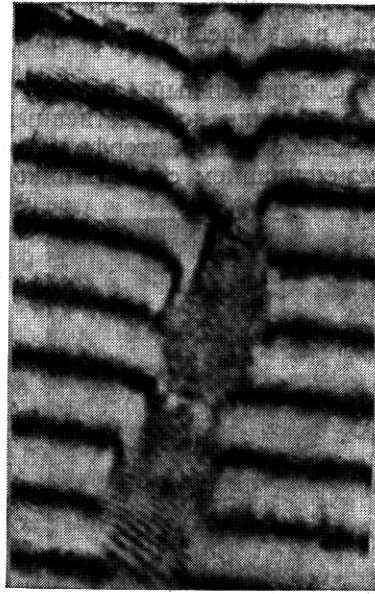
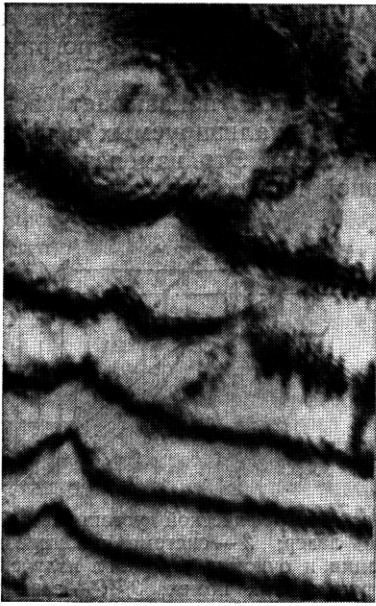
Б. В. Курбатов, Э. Г. Махмутов

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТОКОВ ОБТЕКАНИЯ ГИДРОБИОНТОВ (ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ)

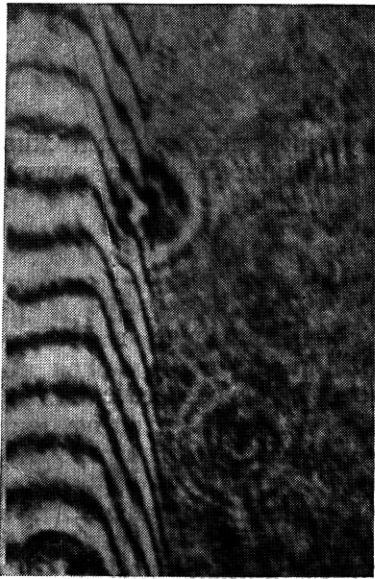
Успехи в исследовании гидродинамических свойств гидробионтов в значительной степени определяются возможностями различных методов визуализации потоков обтекания. Прямые методы визуализации возмущенной движением животного жидкости вследствие ее несжимаемости невозможны, поэтому исследователи используют косвенные методы: вводят добавки, обычно поглощающие красители; используют также пузырьки воздуха, водорода (теллур-метод) или твердые добавки — порошок алюминия, полистироловые микрошарики; применяют также наклеивание тонких шелковых нитей на исследуемый объект [1, 3]. Перечисленные методы имеют много недостатков. Основной из них заключается в том, что получаемые картины обтекания не содержат количественной информации для оценки параметров потоков, а служат в основном для иллюстрации теоретических расчетов. Для визуализации потоков обтекания планктонных организмов указанные методы вообще неприменимы из-за сравнимых размеров добавок и организмов. Была применена стратификация жидкости и теневой (ширный) прибор для визуализации скачков веслоногого рачка [4]. Несмотря на высокую чувствительность теневого прибора, на приведенных снимках потоки обтекания не визуализируются, видны только возмущения в момент каждого скачка. Другим недостатком теневого метода является то, что для его реализации требуются высококачественные оптика и оптические ограждения сосуда. Эти требования удорожают эксперимент. Теневые картины для получения количественной информации требуют фотометрирования и при изменении условий эксперимента дают неоднозначные результаты.

Методы голографической интерферометрии [2] позволяют использовать оптические элементы невысокого качества и компенсируют искажения, вызываемые неоднородностями оптического ограждения сосудов. В лаборатории гидробионики ИнБЮМ АН УССР проведены предварительные эксперименты по использованию этих методов для визуализации потоков обтекания планктонных организмов. На рис. 1 и 2 представлены интерферограммы потоков обтекания при свободном движении циклопа и погружении мертвой копеподы в стратифицированной жидкости; на рис. 3 — часть пограничного слоя на поверхности цилиндра, погружаемого с небольшой скоростью, на рис. 4 — часть турбулентного следа свободно падающего шарика, на рис. 5 — интерференционные полосы настройки установки. Искажения интерференционных полос в виде точек вызваны пузырьками воздуха в оптических элементах. Качество интерферограммы соответствует интерферограммам, получаемым на высококачественном интерферометре типа Цендера — Маха. Схема голографической установки приведена на рис. 6.

Визуализацию проводили в реальном времени. При первой экспозиции получали голограмму кюветы с нестратифицированной жидкостью. После фотообработки ее устанавливали с достижимой точностью на прежнее место. Вследствие некоторой нестабильности всех элементов схемы, а также напряжений в фотоэмульсии на первоначальной картине наблюдали одну-две паразитных интерференционных полосы. Затем производили стратификацию жидкости растворением сахара и небольшого количества поваренной соли для стабилизации раствора. Качество стратификации контролировали по наблюдаемой интерфе-



1. Интерферограмма обтекания и спутного следа свободно движущегося циклопа. Здесь и на рис. 2—5: Увеличение 20 $\times$.
2. Интерферограмма обтекания при погружении мертвого рачка.

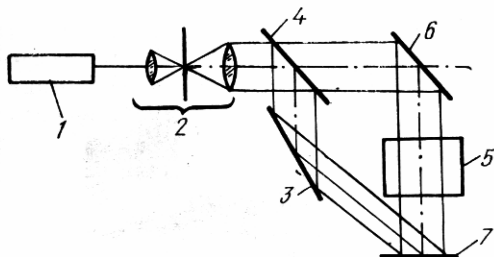
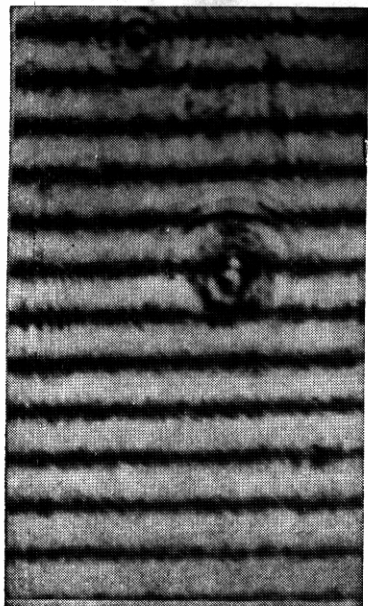


3. Интерферограмма части пограничного слоя на поверхности погружаемого цилиндра.
4. Интерферограмма части турбулентного следа свободно падающего шарика.

ренционной картине. При неоднократном осторожном перемешивании удавалось добиться равномерного изменения плотности жидкости в исследуемом объеме (рис. 5) по высоте. Затем в кювету помещали животное, и в момент появления его в просвечиваемом объеме производили фотосъемку. В эксперименте фиксировали только одну проекцию трехмерной траектории движения животного, поэтому для количественного анализа полученные интерферограммы использовать нель-

зя. Это ограничение вызвано недостаточной мощностью используемого лазера, в дальнейшем предусмотрено получение интерферограмм в двух проекциях.

Предварительный анализ интерферограмм показывает возможность получения количественных данных визуализируемых потоков по изменению формы интерференционной полосы. Это изменение связано с перемешиванием слоев жидкости разной плотности (и разным пока-



6. Схема голографической установки: 1 — He — Ne лазер; 2 — система расширения, коллимации и очистки лазерного излучения от дифракционных помех; 3, 6 — зеркала; 4 — светоделитель; 5 — кювета с жидкостью; 7 — голограмма.

5. Полосы настройки.

зателем преломления) вследствие возмущения локомоциями животного. На основании закона молекулярного трения Ньютона распределение поля скоростей

$$u = \int_0^{\delta} \tau/\mu \cdot dy,$$

где δ — толщина возмущенного слоя; τ — напряжение в этом слое; μ — кинематическая вязкость жидкости.

Все указанные величины измеримы. В случае течения чистого сдвига (рис. 3)

$$\partial u / \partial y = du / dy = \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{const} t,$$

где α — угол наклона интерференционной полосы, тогда $u = \int_0^{\delta} \operatorname{tg} \alpha dy = \delta \operatorname{tg} \alpha$, т. е. наклон полосы определяет распределение поля скоростей в просвечиваемом участке.

Небольшой погрешностью, вызванной изменением плотности и вязкости жидкости по высоте, можно пренебречь, так как в просвечиваемом малом участке плотность и вязкость можно считать постоянными. При турбулентных потоках обтекания применение киносъемки даст возможность определить траекторию выделенного элементарного объема. Интерферограмма на рис. 4, кроме того, даст полную объективную картину области турбулентности.

Анализ интерферограмм потоков обтекания в предварительных экспериментах показывает, что метод голографической интерферометрии позволяет получить объективную информацию о потоках обтекания исследуемых объектов, как качественную, так и количественную.

Возможности метода ограничиваются только требованиями соблюдения геометрии записи и восстановления голограммы, необходимостью строгой виброизоляции установки от внешних помех и использованием высококогерентных источников излучения.

*

Interferograms of flow streams obtained by the method of holographic interferometry permit quantitatively evaluating distribution of velocity field in the boundary layer. The method is advantageous over the known techniques of visualization by introduction of different additions and is restricted only by the demand to observe geometry of the recording and restoration of the hologram as well as by necessity to use high-coherent radiation sources.

*

1. Алев Ю. Г. Нектон.— Киев : Наук. думка, 1976.—178 с.
2. Вест Ч. Голографическая интерферометрия.— М. : Мир, 1982.—164 с.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя.— Пер. с нем. М. : Наука, 1974.—711 с.
4. Strikler I. R. Observation of swimming performance of planktonic copepods // *Limnol. and Oceanography*.—1977.—22, N 1.—P. 165—166.

Институт биологии южных морей АН УССР,
Севастополь

Поступила 15.03.83

УДК (581.526.325:574.583:556.591.4) (08+28)

**Д. Н. Маторин, И. Р. Васильев,
П. С. Венедиктов, С. П. Захарков**

МЕТОД НЕПРЕРЫВНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АКТИВНОГО ФИТОПЛАНКТОНА В ВОДОЕМАХ ПУТЕМ РЕГИСТРАЦИИ ЗАМЕДЛЕННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ

Распределение фитопланктона в водоемах обычно определяют микроскопически или спектрофотометрически по концентрации входящих в клетки микроводорослей пигментов [7]. В последнее время все большее распространение приобретают также флуориметрические методы [6, 10]. В настоящей работе показано, что в качестве высокочувствительного метода оценки содержания активных микроводорослей в природных водоемах может служить регистрация миллисекундной замедленной флуоресценции (ЗФ), которая генерируется в реакции рекомбинации фотоокисленных и фотовосстановленных переносчиков электрона в фотосинтетических реакционных центрах [9]. В отличие от быстрой флуоресценции хлорофилла, интенсивность ЗФ определяется не общей концентрацией пигмента, а количеством активно функционирующих реакционных центров фотосинтеза [3, 10, 11]. В целом ряде работ показывается корреляция между параметрами ЗФ и фотосинтетической активностью водорослей [8, 11].

Для регистрации ЗФ фитопланктона в природных водах собрана высокочувствительная установка (рисунок), принцип работы которой был описан ранее [1]. Она создана на основе цилиндрического фосфороскопа с темновым интервалом между освещением объекта и измерением свечения, составляющим 3 мс. Конструкция фосфороскопа позволяет располагать объект на расстоянии до 2,5 мм от светоприемника и снизить уровень побочных подсветок. В качестве светоприемника используется фотоумножитель ФЭУ-79 с низким уровнем шумов, сигналы которого регистрируются через усилитель постоянного тока на самописце. Освещение образцов производится от диапроектора с 250 Вт галогенной лампой через светофильтр КС-11.