

УДК 535.3 : 536.42

ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СТРУКТУРЫ И ЭВОЛЮЦИИ ПЛАВУЧИХ СТРУЙ В СИЛЬНОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ*

В. А. Арбузов^{1,2}, Э. В. Арбузов^{2,3}, В. С. Бердников^{1,2},
Н. С. Буфетов¹, Ю. Н. Дубнищев^{1,2}, Е. О. Шлапакова²

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1

²Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

³Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 4
E-mail: dubnistchev@itp.nsc.ru

Методами гильберт-оптики и интерферометрии исследованы структура и эволюция термогравитационных плавучих струй в сильновязкой жидкости над внезапно включённым линейным источником тепла. Такие струи могут быть моделью подъёмного течения в зоне спрединга в задачах геодинамики, связанных с поведением мантии Земли на больших глубинах. По структуре интерферограммы выполнена 3D-реконструкция температурного поля в струе. Гильберт-образ реконструированного температурного 3D-поля сопоставлен с гильберт-изображением и интерферограммой струи.

Ключевые слова: оптическая диагностика потоков, гильберт-оптика, интерферометрия, термогравитационная конвекция, плавучие струи.

Введение. Применение невозмущающей диагностики потоков в значительной мере определяет уровень исследований в экспериментальной гидро- и газодинамике, теплофизике. В первую очередь это относится к оптической диагностике, в которой традиционные теневые и шпирен-методы [1, 2] наиболее распространены. Новый импульс развития они получили под влиянием оптических информационных технологий, основанных на фурье- и гильберт-преобразованиях, фильтрации и анализе пространственно-временных фазовых структур, индуцированных исследуемой средой в световых полях [3–5]. Например, методы гильберт-оптики позволяют с высокой чувствительностью визуализировать возмущения полей фазовой оптической плотности в газах [4, 6], жидкостях [7], на свободной поверхности жидкости при рэлей-бенаровской конвекции [8]. Среди задач в исследованиях глобальной геодинамики одной из важнейших является физическое моделирование мантийных плюмов и подъёмных течений в зоне спрединга [9, 10]. В качестве такой модели термогравитационные свободно-конвективные струи над источником тепла (линейным или точечным) представляют несомненный интерес. В работе [11] измерялась скорость движения ламинарного плюма в силиконовом масле при различных числах Прандтля. Плюм визуализировался методом дифференциальной интерферометрии. Численное моделирование режимов всплытия тепловых плюмов обсуждалось в [12]. В работе [13] методом голографической интерферометрии исследовалось развитие свободно-конвективной струи в жидкости над линейным тепловым источником и источником, близким к точечному. Температура контролировалась с помощью термодпар. В качестве жидкости использовались спирт, ацетон, четырёххлористый углерод, вода. Были получены профили температур в сечениях струи над ис-

*Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-08-00818) и Министерства образования и науки РФ (проект № 2012-218-03-004).

точником. Численное моделирование плавучих струй в сильновязкой полиэтилсилоксановой жидкости (ПЭС-5) над внезапно включённым линейным источником тепла выполнялось в [7]. В этой работе визуализация струй осуществлялась методом светового ножа с добавлением в жидкость частиц-маркеров и указывалось на возможность выявления фазовых возмущений, индуцированных тепловым импульсом, методами гильберт-оптики. Предлагаемая работа мотивирована необходимостью развития комплексной оптической диагностики, сочетающей гильберт-визуализацию, интерферометрию и возможность трёхмерной реконструкции температурных полей в структуре индуцированных тепловым источником фазовых возмущений, в целях исследования плавучих струй в сильновязкой жидкости.

Метод исследования. Упрощённая схема экспериментальной установки, на которой выполнялись исследования структуры и эволюции термогравитационных плавучих струй, показана на рис. 1. Схема содержит осветительный модуль, состоящий из источников света 1 и 1', линз 2 и 2', светоделительного кубика 3, линзы 4 и щелевой диафрагмы 5. Щелевая диафрагма расположена в фокальной плоскости объектива 6, формирующего зондирующее поле в исследуемой среде 7, которая представляет собой слой сильновязкой жидкости ПЭС-5, помещённой в прямоугольную полость 8 с прозрачными стенками оптического качества. Внутренние размеры полости $60 \times 190 \times 540$ мм. Высота слоя жидкости 98 мм. В центральном по длине полости сечении находится константановая проволока 9, ориентированная параллельно оси оптической системы и дну. Расстояние между проволокой и дном 6,2 мм. Управляемый нагрев проволоки осуществляется постоянным током от стабилизированного источника питания 10. В двух заданных точках исследуемой среды температура контролировалась термопарами 11. Объектив 12 формирует в частотной плоскости 13 фурье-спектр возмущённой исследуемой средой светового поля. В фурье-плоскости объектива 12 помещён квадрантный гильберт-фильтр 14. Объектив 15 выполняет обратное фурье-преобразование фильтрованного светового поля. Сформированное объективом 15

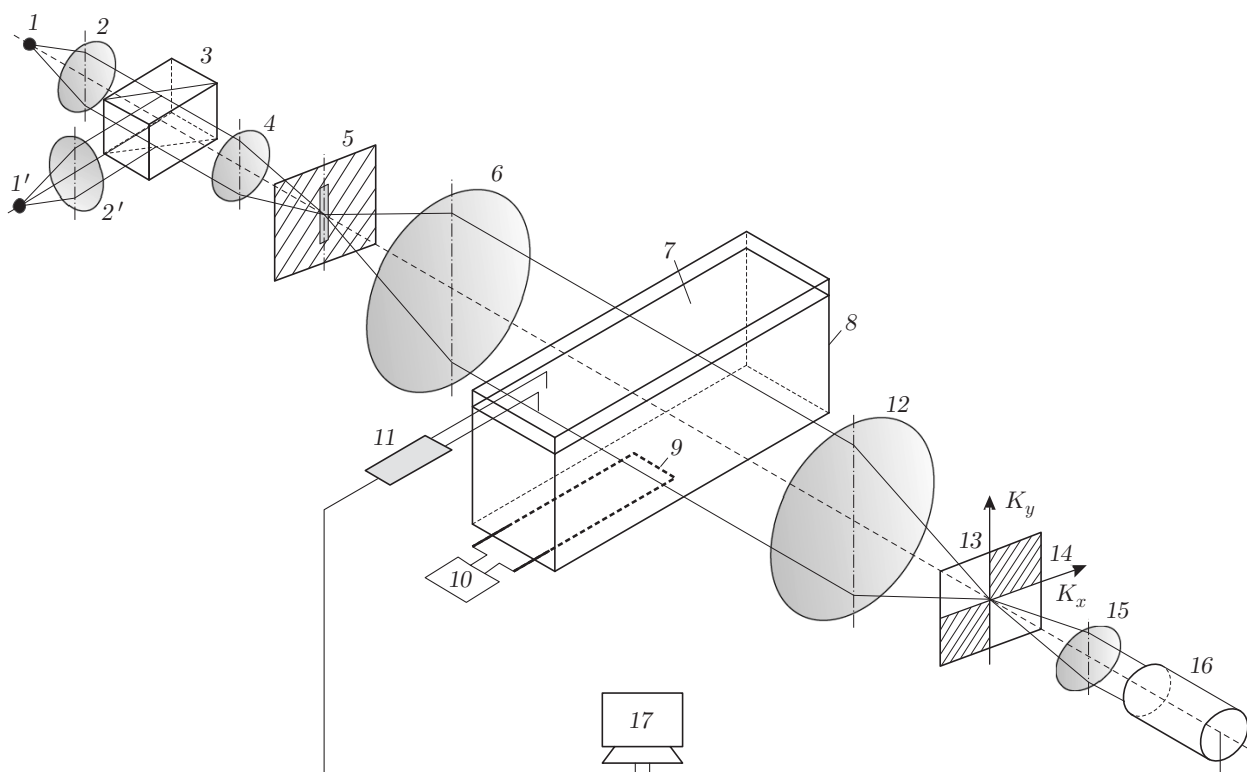


Рис. 1

фурье-сопряжённое поле регистрируется цифровой камерой 16. Выходы цифровой камеры и модуля термопар подключены к компьютеру 17, обрабатывающему результаты. Данный оптический комплекс был реализован на базе теневого прибора ИАБ-463М с модифицированным осветительным модулем, узлами фильтрации оптического сигнала и регистрации изображения.

Зондирующее поле, сформированное фурье-объективом 6 от щелевого источника 5, проходит через исследуемую среду, в которой тепловым источником 9 индуцируется термогравитационное конвективное течение в виде плавучих струй. Объектив 12 формирует в частотной плоскости $K_x K_y$ фурье-спектр $s(K_x, K_y)$ фазовых возмущений зондирующего поля, вызванных исследуемой средой. Квадрантный пространственно-частотный фазовый фильтр 14, помещённый в фурье-плоскость, описывается когерентно-передаточной функцией

$$\begin{aligned} H(K_x, K_y) &= [e^{i\varphi}\sigma(K_x) + e^{-i\varphi}\sigma(-K_x)]\sigma(K_y) + [e^{-i\varphi}\sigma(K_x) + e^{i\varphi}\sigma(-K_x)]\sigma(-K_y) = \\ &= [\cos\varphi + i\sin\varphi \cdot \operatorname{sgn}K_x]\sigma(K_y) + [\cos\varphi - i\sin\varphi \cdot \operatorname{sgn}K_x]\sigma(-K_y), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\sigma(K_x)$ и $\sigma(K_y)$ — функции включения, $\sigma(\pm K) = 1/2[1 \pm \operatorname{sgn}K]$; $\operatorname{sgn}K$ — знаковая функция. Непосредственно за фильтром формируется фурье-спектр фильтрованного оптического сигнала, выражение для которого с учётом (1) имеет вид

$$\begin{aligned} s(K_x, K_y)H(K_x, K_y) &= [\cos\varphi s(K_x, K_y) - \sin\varphi \widehat{s}_x(K_x, K_y)]\sigma(K_y) + \\ &+ [\cos\varphi s(K_x, K_y) + \sin\varphi \widehat{s}_x(K_x, K_y)]\sigma(-K_y), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\widehat{s}_x(K_x, K_y) = -i\operatorname{sgn}K_x s(K_x, K_y)$ — фурье-спектр одномерного гильберт-преобразования фазового возмущения $s(K_x, K_y)$. Пространственно-частотная ось K_x в фурье-плоскости ортогональна направлению оси K_y , задаваемой изображением щелевого источника. Объектив 15 выполняет обратное фурье-преобразование фильтрованного фурье-спектра (2).

Восстановленный сигнал представляет собой сумму изображений фазового возмущения и его одномерного гильберт-образа с весовыми коэффициентами $\cos^2\varphi$ и $\sin^2\varphi$:

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |\cos\varphi s(x, y) - \sin\varphi \widehat{s}_x(x, y)|^2 + |\cos\varphi s(x, y) + \sin\varphi \widehat{s}_x(x, y)|^2 = \\ &= 2\{\cos^2\varphi |s(x, y)|^2 + \sin^2\varphi |\widehat{s}_x(x, y)|^2\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Фазовый сдвиг φ зависит от длины волны зондирующего поля, $\varphi = \varphi(\lambda)$. Как следует из (3), при $\varphi(\lambda_0) = \pi/2$ выполняется одномерное преобразование Гильберта. В этом случае на фотоматрице камеры 16 формируется изображение одномерного гильберт-образа фазовых возмущений зондирующего поля, индуцированных исследуемой средой:

$$I(x, y) = |\widehat{s}_x(x, y)|^2.$$

В эксперименте применяется пространственно-частотный фильтр, обеспечивающий фазовый сдвиг $\varphi(\lambda_0) = \pi/2$ на длине волны $\lambda_0 = 0,63$ мкм. При использовании источника белого света на длине волны λ_0 реализуется одномерное преобразование Гильберта. На длинах волн $\lambda \neq \lambda_0$ в полосе излучения источника выполняется преобразование Фуко — Гильберта (3) и камера регистрирует суперпозицию изображений сигнала и его одномер-

ного гильберт-образа. Как видно из (3), применение квадрантного гильберт-фильтра в сочетании со щелевым источником позволяет исключить вклад перекрёстной интерференции поля фазовых возмущений и его гильберт-образа при $\varphi(\lambda) \neq \pi/2$. Если в исследуемой среде имеют место только фазовые возмущения, регистрируются изображения одномерных гильберт-образов во всей полосе излучения источника с весовыми коэффициентами $\sin^2 \varphi(\lambda)$.

На рис. 2 представлена последовательность визуализированных изображений термогравитационного течения, индуцированного внезапно включённым тепловым источником в виде константовой проволоки при токе 0,35 А. Мощность, выделяемая на проволочке, составляет 0,228 Вт. Конвективное течение имеет вид плавучих струй. На изображениях хорошо видно, как эволюционируют форма струи и структура так называемых гильберт-полос [3, 4, 6, 8]. Каждая гильберт-полоса соответствует изолинии с фазовым набегом, кратным 2π . Межкадровый интервал равен 30 с. Сравнительные исследования фазовой структуры термогравитационных струй в одних и тех же режимах выполнялись с применением методов гильберт-оптики и интерферометрии. Для этого использовалась модифицированная приставка РП-452 к прибору ИАБ-463М, выполненная по схеме зеркального интерферометра сдвига [1] (рис. 3). Она содержит объективы L_1 и L_2 , формирующие световой пучок, поступающий в интерферометр, который состоит из зеркал M_1, M_2 и светоделительных пластин M_0, M'_0 . Канал регистрации интерференционной картины содержит объектив L_3 и цифровую камеру. Для визуального контроля интерференционной картины используется другой канал, содержащий зеркало M_3 , объектив L_4 и экран Э.

Модификация заключалась во введении в оптическую схему объективов L_1 и L_2 , согласующих интерферометр с частотной плоскостью гильберт-визуализатора. В этой схеме изображение центра частотной плоскости (см. рис. 1) проектируется на поверхность зеркала M_1 . Световой пучок делится полупрозрачным зеркалом M_0 на два пучка, которые рекомбинируют на полупрозрачном зеркале M'_0 . Сдвиг между волновыми фронтами осуществляется поворотом зеркала M_1 . Интерференционная картина регистрируется цифровой камерой и наблюдается на экране непосредственно либо с помощью дополнительной зрительной трубки. Настройка на полосы необходимой ширины и ориентации выполняется независимо от направления и размера сдвига между волновыми фронтами интерферирующих пучков. Интерференционная приставка при проведении эксперимента помещается позади частотной плоскости вместо модуля, осуществляющего обратное фурье-преобразование фильтрованного сигнала и его регистрацию. В качестве источника используется лазерный диод I' (см. рис. 1), излучающий на длине волны $\lambda = 0,64$ мкм.

Гильберт-визуализированное изображение и интерферограмма плавучей струи, полученные при одинаковых режимах конвекционного течения, показаны на рис. 4 и 5. Интерферометр был настроен на полосу бесконечной ширины. Полосы на интерферограмме рис. 5 соответствуют линиям равных температур. Рис. 6 иллюстрирует сходство структур совмещённых гильберт-изображения (см. рис. 4) и интерферограммы (см. рис. 5). Параллельно с регистрацией интерферограммы выполнялось измерение температуры с применением термпар 11 (см. рис. 1) в точках, расположенных в жидкости, не возмущённой плавучей струей. Поскольку нагревательный элемент (проволочка 9, см. рис. 1), индуцирующий тепловое возмущение, ориентирован параллельно оптической оси визуализирующей системы и ортогонально оптическим окнам прямоугольной полости 8, интерференционное поле отображает фазовые возмущения, усреднённые по толщине слоя жидкости. Поэтому задачу анализа структуры интерференционной картины и определения температурного поля плавучей струи можно считать плоской. В этом случае для фазового интервала, соответствующего одной интерференционной полосе, имеем

$$\frac{\Delta n(x, y)l}{\lambda} = 2\pi,$$

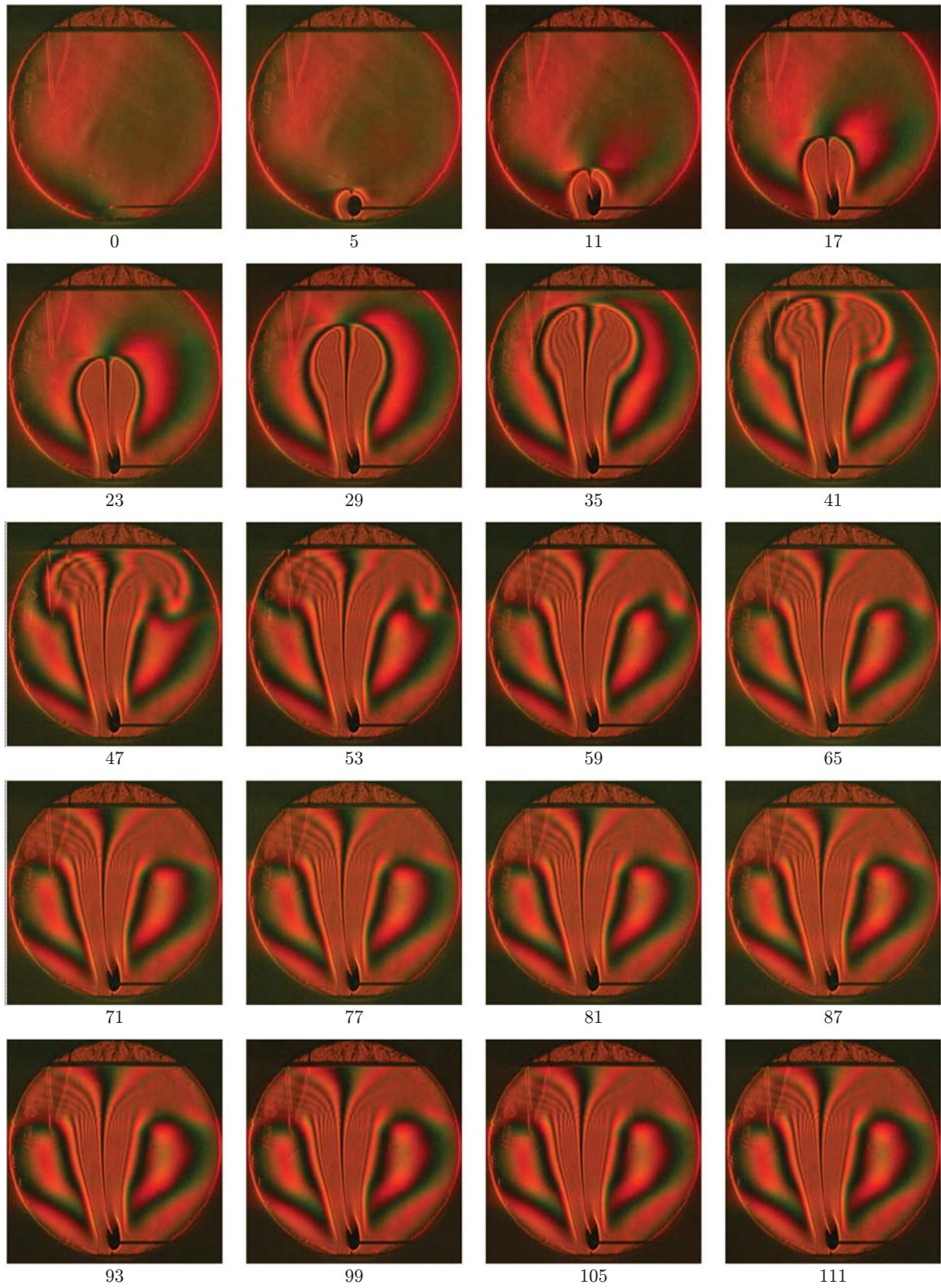


Рис. 2

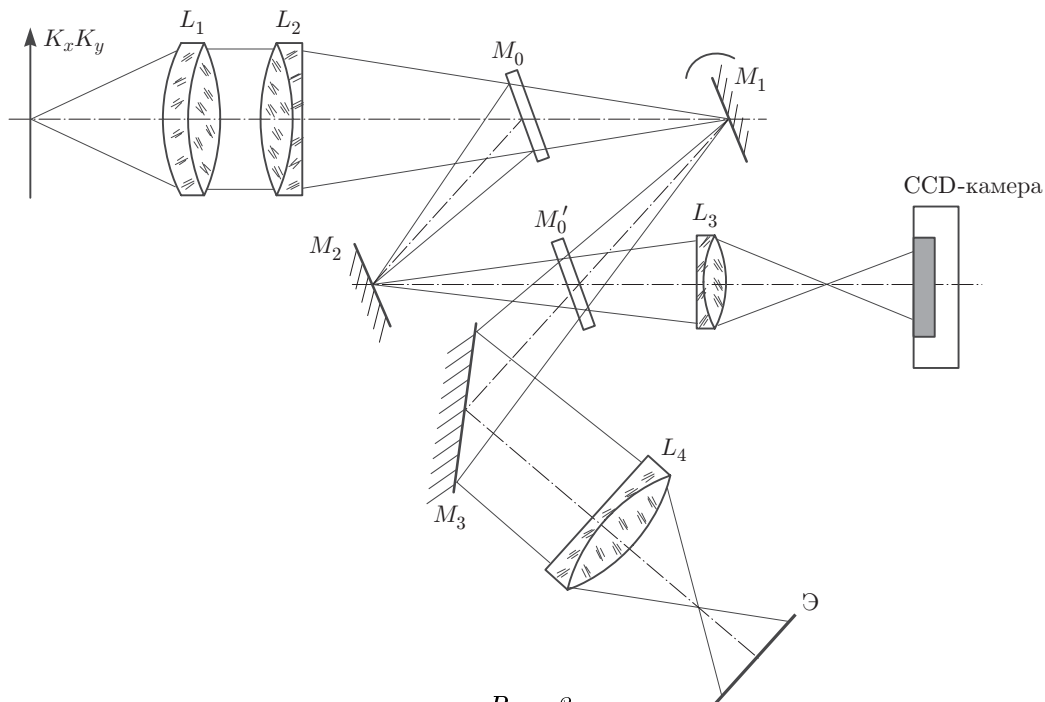


Рис. 3

где l — толщина слоя жидкости ($l = 60$ мм) и $\lambda = 0,64$ мкм — длина волны зондирующего поля. Из температурной зависимости коэффициента преломления жидкости находится интервал температур $\Delta T(x, y)$, соответствующий пространственному периоду интерференционного поля:

$$\Delta T(x, y) = \frac{1}{\gamma} \Delta n(x, y),$$

где γ — температурный коэффициент показателя преломления (для жидкости ПЭС-5 $\gamma = 1,4 \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$ [14]). По распределению интерференционных полос с учётом измеренного температурного градиента вычислялось температурное поле в выбранной реализации плавучей струи.

Пример реконструкции температурного поля плавучей струи по интерферограмме (показанной также на рис. 5) приведён на рис. 7. В целях проверки соответ-

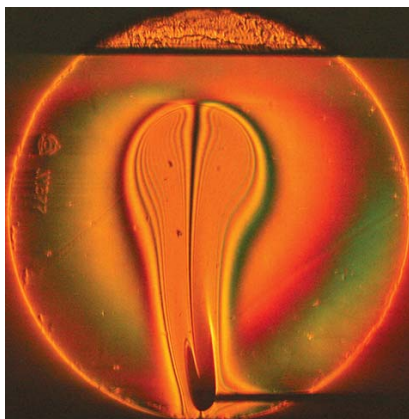


Рис. 4

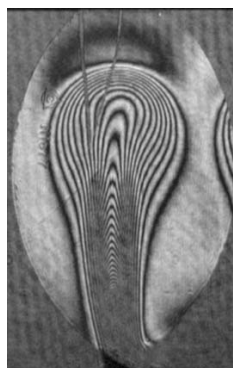


Рис. 5

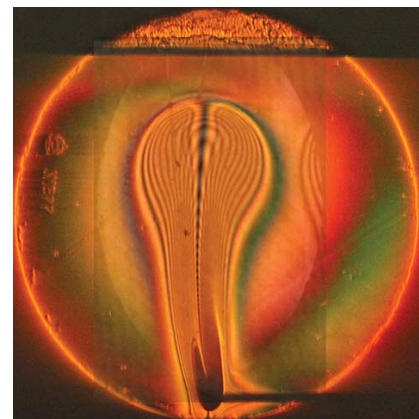


Рис. 6

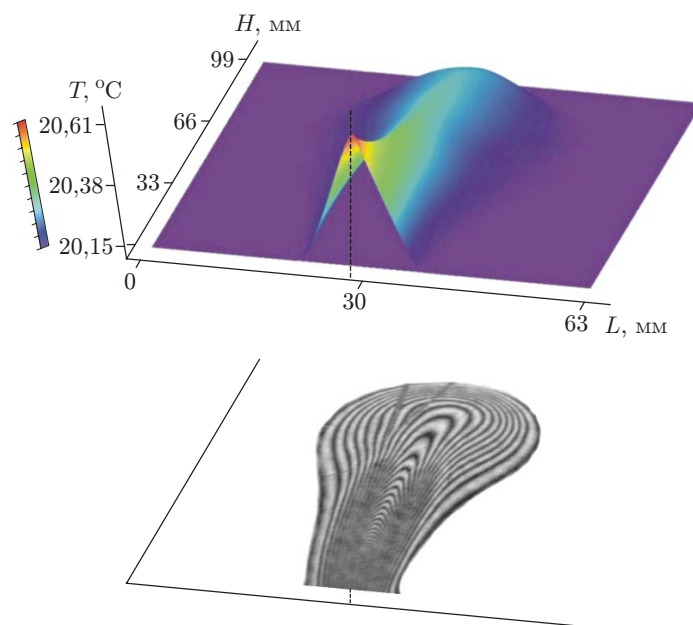


Рис. 7

вия гильберт-изображений и интерферограмм выполнено компьютерное моделирование гильберт-изображения температурного поля плавучей струи. Для этого реконструированное температурное поле (см. рис. 5) с использованием программы Mathcad 15 было подвергнуто одномерному гильберт-преобразованию с учётом конфигурации частотных осей в фурье-плоскости 13 (см. рис. 1). Синтезированное изображение одномерного гильберт-образа температурного поля показано на рис. 8. Это изображение на рис. 9 совмещено с экспериментально полученной интерферограммой (см. рис. 5). Из рисунка хорошо видно соответствие структур интерференционного поля и изображения синтезированного гильберт-образа температурного поля, реконструированного по интерферограмме, что иллюстрирует адекватность методов гильберт-оптики и интерферометрии задаче исследования структуры конвективных течений.

Из сравнения интерферограммы (см. рис. 5) с экспериментально полученным изображением гильберт-образа струи (см. рис. 4) и синтезированным изображением гильберт-

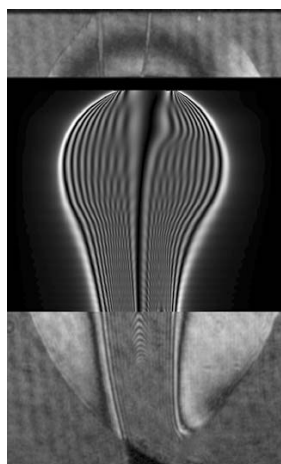


Рис. 8

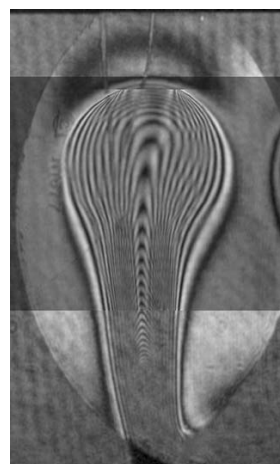


Рис. 9

образа её температурного поля (см. рис. 8) следует, что при одномерном гильберт-преобразовании в направлении оси K_x отсутствует информация о градиенте оптической фазовой плотности в направлении ортогональной оси K_y , задаваемой в частотной плоскости проекцией линейного источника зондирующего поля. Этот недостаток компенсируется простотой реализации одномерного гильберт-преобразования в оптике, а при необходимости устраняется за счёт применения двумерного или изотропного преобразования Гильберта [3, 5]. Системы гильберт-диагностики не содержат пространственно разнесённых и интерферометрически связанных оптических каналов, модулей расщепления и рекомбинации световых полей. Они могут работать как с когерентными, так и с некогерентными источниками. Этим обеспечивается надёжность эксплуатации.

Заключение. Сочетание методов гильберт-оптики и интерферометрии на примере исследования термогравитационной конвекции в сильновязкой жидкости позволяет изучать структуру полей фазовой оптической плотности и температурные поля плавучих струй. На примере исследования плавучих струй, индуцированных в сильновязкой жидкости внезапно включённым источником, показана адекватность методов гильберт-оптики и интерферометрии задаче выявления структуры полей фазовой оптической плотности и температурных полей. Такие струи могут быть моделью подъёмного течения в зоне спрединга в задачах геодинамики, связанных с поведением мантии Земли на больших глубинах. По структуре интерферограммы выполнена 3D-реконструкция температурного поля в струе. Гильберт-образ реконструированного трёхмерного температурного поля сопоставлен с гильберт-изображением и интерферограммой струи. При гильберт-фильтрации энергии оптических сигналов перераспределяется из низкочастотной области пространственно-частотного спектра в высокочастотную, за счёт чего обеспечивается высокая чувствительность [5]. Функциональные возможности оптической гильберт-диагностики и интерферометрии сопоставимы. Системы гильберт-диагностики, действующие в когерентном и некогерентном свете, не содержат пространственно разнесённых каналов, и этим обеспечивается надёжность работы. Действие этих систем хорошо описывается в рамках фурье-оптики. Развитие такого рода систем связано с применением двумерного и изотропного преобразований Гильберта в сочетании с томографическими технологиями.

Авторы выражают благодарность В. Г. Ходариной за помощь в эксперименте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белозеров А. Ф.** Оптические методы визуализации газовых потоков. Казань: Изд-во Казанск. гос. техн. ун-та, 2007. 747 с.
2. **Settles G. S.** Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media. Springer, 2001. 376 p.
3. **Арбузов В. А., Дубнищев Ю. Н.** Методы гильберт-оптики в измерительных технологиях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. 316 с.
4. **Дубнищев Ю. Н., Арбузов В. А., Белоусов П. П., Белоусов П. Я.** Оптические методы исследования потоков. Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2003. 418 с.
5. **Дубнищев Ю. Н.** Теория и преобразование сигналов в оптических системах. С.-Пб.: Изд-во «Лань», 2011. 384 с.
6. **Арбузов В. А., Дубнищев Ю. Н., Нечаев В. Г. и др.** Гильберт-диагностика фазовых возмущений светового поля, индуцированных вихревым течением // Автометрия. 2013. **49**, № 6. С. 107–114.
7. **Антонов П. В., Арбузов В. А., Бердников В. С. и др.** Экспериментальные и численные исследования нестационарных плавучих струй // Автометрия. 2012. **48**, № 3. С. 90–100.

8. **Арбузов В. А., Арбузов Э. В., Буфетов Н. С., Шлапакова Е. О.** Гильберт-диагностика рэлей-бенаровской конвекции в жидкости // Автометрия. 2012. **48**, № 3. С. 61–67.
9. **Ларра М.** Thermal Convection: Patterns, Evolution and Stability. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2010. 670 p.
10. **Добрецов Н. Л., Кирдяшкин А. Г., Кирдяшкин А. А.** Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 409 с.
11. **Kaminski E., Jaupart C.** Laminar starting plumes in high-Prandtl-number fluids // Journ. Fluid Mech. 2003. **478**. P. 287–298.
12. **Гаврилов К. А., Демин В. А., Попов Е. А.** Режимы всплытия тепловых плюмов в вертикальном слое // Вычислительная механика сплошных сред. 2013. **6**, № 3. С. 261–268.
13. **Ганжерли Н. М., Мауреч И. А., Черных Д. Ф.** Исследование свободно-конвективной струи методом голографической интерферометрии // ЖТФ. 2002. **72**, вып. 2. С. 42–46.
14. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.

Поступила в редакцию 25 апреля 2014 г.
