

**Четырнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 26 – 30 июня 2017 г.**

УДК 532.516.013.4, 536.25

Ю.Н. Дубнищев^{1,3}, В.А. Арбузов^{1,3}, Э.В. Арбузов^{2,3}, В.С. Бердников^{1,3}, О.С. Мелёхина³,
А.А. Шибяев³

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им.
С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук,

630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1. E-mail: dubnistchev@itp.nsc.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт математики им.
С.Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук,

630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 4. E-mail: arbuzov@math.nsc.ru

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Новосибирский
государственный технический университет», 630092, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20.

E-mail: oitref@nstu.ru

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ КОНВЕКТИВНЫХ СТРУКТУР И ВОЛНЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ
В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ ВОДЫ**

АННОТАЦИЯ

Методами гильберт-оптики и сдвиговой интерферометрии визуализированы конвективные структуры и волна кристаллизации, индуцированные градиентом температур в горизонтальном слое переохлаждённой воды, ограниченном термостатированными поверхностями. Полученные результаты иллюстрируют эффективность оптических методов в задачах, связанных с изучением конвекции и фазовых переходов, представляющих интерес для физического моделирования и практических приложений.

ГИЛЬБЕРТ-ОПТИКА, СДВИГОВАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ, КОНВЕКТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ, ВОЛНА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к проблемам кристаллизации в переохлаждённой жидкости и эволюции конвективных структур в системе вода–лёд обострился в последнее время в связи с интенсификацией циклических процессов таяния и образования льдов в арктических и антарктических районах, оказывающих огромное влияние на мировой океан и климат [1–3]. В частности, изучение процессов льдообразования имеет фундаментальное значение для освоения шельфовых и газоносных районов Арктики.

Исследования ограничиваются сложностью эксперимента и необходимостью адекватного уровня технологий невозмущающих измерений. В этой связи актуализируется задача исследования методами оптической диагностики динамики фронта волны кристаллизации в переохлаждённой воде на границе с твёрдой поверхностью [4–7].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД

Изучение динамики фазовых переходов в переохлаждённой жидкости и эволюции конвективных структур в системе вода–лёд требует применения невозмущающих методов диагностики, основанных на современных достижениях оптики, лазерной техники и информационных технологий. Упрощённая схема исследовательского комплекса, содержащего систему оптической диагностики и экспериментальный стенд, показана на рис. 1. Схема содержит осветительный модуль, состоящий из источника света 1, конденсорной линзы 2 и щелевой диафрагмы 3, помещённой в передней фокальной плоскости объектива 4, формирующего зондирующее поле в исследуемой среде. Такой средой является вода, заполняющая прямоугольную полость 5 с прозрачными стёклами оптического качества. Внутренние размеры полости 136×86×30 мм. Верхняя и нижняя стенки образованы охлаждаемыми плоскопараллельными медными пластинами высокого качества 6 и 7. Температура верхней пластины (T_1) регулируется и поддерживается термостатом в пределах до -17°C . Температура нижней пластины (T_2) – в диапазоне от комнатной температуры до $-8,5^\circ\text{C}$. Внутри пластин имеются полости, в которые подаётся охлаждающая жидкость из термостатов 14 и 15. Термостаты управляются компьютером 16 по заданной программе. Трубки, подающие хладагент в верхнюю и нижнюю пластины, обозначены цифрами 8, 9, 10, 11, трубки оттока – 12, 13. Расположение подающих трубок и трубок оттока может меняться в соответствии с условиями эксперимента. Расстояния между трубками – 80 мм.

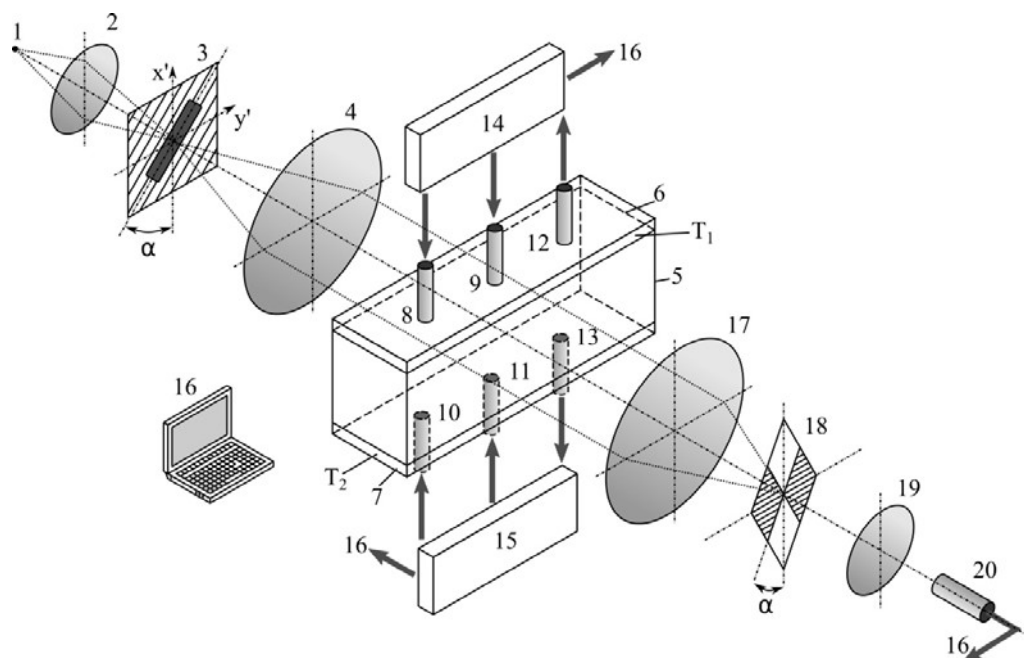


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Объектив 17 формирует в частотной плоскости фурье-спектр возмущённого исследуемой средой зондирующего светового поля. Квадрантный гильберт-фильтр 18 помещён в фурье-плоскости объектива 17. Частотная ось гильберт-фильтра K_x ортогональна направлению изображения щелевой диафрагмы светового источника ($\alpha = 45^\circ$). Частотная ось K_y задаётся изображением щелевой диафрагмы. Объектив 19 выполняет обратное фурье-преобразование фильтрованного пространственно-частотного спектра фазовой структуры светового поля, возмущённого исследуемой средой. Визуализированная фазовая структура регистрируется цифровой видеокамерой 20, подключенной к компьютеру 16.

Оптическая система диагностики реализована на базе серийного теневого прибора ИАБ-463М с модифицированными под задачи эксперимента модулями светового источника, пространственно-частотной фильтрации оптического сигнала, сдвиговой интерферометрии, а также модулем регистрации изображения визуализированных фазовых возмущений светового поля, индуцированных исследуемой средой.

Когерентная передаточная функция квадрантного пространственно-частотного фильтра $I8$, выполняющего одномерное преобразование Гильберта, описывается выражением:

$$H(K_x, K_y) = [e^{-i\varphi} \sigma(K_x) + e^{i\varphi} \sigma(-K_x)] \sigma(K_y) + [e^{i\varphi} \sigma(K_x) + e^{-i\varphi} \sigma(-K_x)] \sigma(-K_y), \quad (1)$$

где K_x и K_y – пространственные частоты; $\sigma(\pm K_x)$ и $\sigma(\pm K_y)$ – функции Хевисайда; φ – фазовый сдвиг, задаваемый соответствующим квадрантом пространственно-частотного фильтра. С учётом $\sigma(\pm K_x) = \frac{1}{2} [1 \pm \text{sgn } K_x]$ и динамического представления функций Хевисайда выражение (1) принимает вид:

$$H(K_x, K_y) = \cos \varphi - i \sin \varphi \text{sgn } K_x. \quad (2)$$

Фильтр с когерентно-передаточной функцией (2) выполняет одномерное преобразование Фуко–Гильберта и результатом фильтрации является аналитический сигнал, отображающий фазовую структуру оптического поля плотности исследуемой среды.

Соответственно, сигнал, зарегистрированный фотоматрицей, представляет собой суперпозицию изображений фазового возмущения и его гильберт-образа в системе отсчёта (x', y') , повернутой относительно системы отсчёта, заданной осями K_x, K_y пространственно-частотного фильтра, на угол $\alpha = 45^\circ$:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sum_m \left\{ |\psi_m(x', y')|^2 + |\psi_{m_x, y'}(x', y')|^2 \right\}. \quad (3)$$

Регистрируемое изображение представляет собой структуру изофазных линий, отображающих возмущения оптической фазовой плотности в исследуемой среде.

При использовании интерференционного модуля визуализация полей фазовой оптической плотности осуществляется модифицированным интерферометром Маха–Цендера в виде сдвиговой интерферограммы. Изображения гильберт-визуализированных фазовых структур и сдвиговые интерферограммы, зарегистрированные фотокамерой, подвергаются компьютерной обработке.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Вблизи поверхности верхнего термостата при росте градиента температуры вода становится переохлаждённой жидкостью, переходя в состояние неустойчивого равновесия. В такой среде возникает переход из жидкой фазы в твёрдокристаллическое состояние. Этот фазовый переход проявляется возникновением волны кристаллизации и сопровождается положительным энерговыделением, что в свою очередь влияет на динамическое распределение градиента оптической фазовой плотности в переохлаждённой воде и индуцирует фазовые возмущения в зондирующем световом поле. Рассматриваемые процессы при различной симметрии расположения подающих трубок и трубки оттока имеют свои особенности. В качестве примера на рис. 2 представлены кадры из видеофильмов, иллюстрирующие визуализацию конвективных структур методами гильберт-оптики (*a*) и сдвиговой интерферометрии (*b*) в случае асимметричного расположения подающих трубок и трубок оттока на термостатированных пластинах (рис. 1).

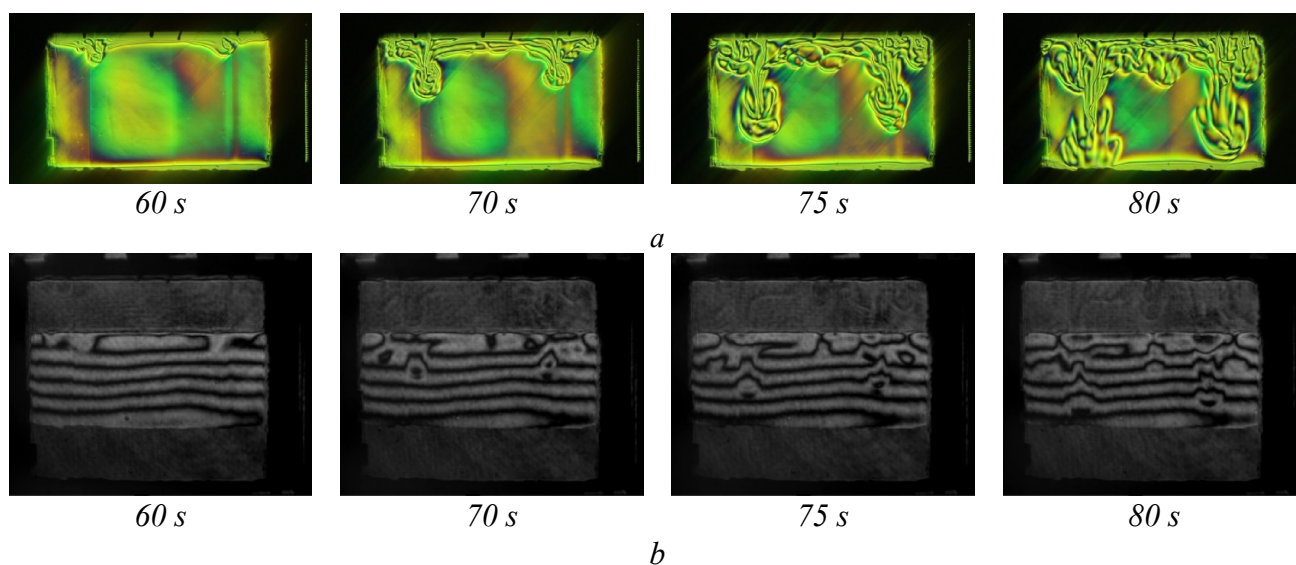


Рис. 2. Возникновение и эволюция плюмов, визуализированных методами: гильберт-оптики – *a* и сдвиговой интерферометрии – *b*.

Структура плюмов, показанных на рис. 2, соответствует начальной стадии охлаждения при небольших температурных градиентах.

Возникновение волны кристаллизации, индуцированной градиентом температуры в окрестности верхней термогравитационной поверхности, иллюстрирует рис. 3. Хорошо виден фронт волны кристаллизации, являющийся динамической межфазной границей лёд–вода в окрестности верхней термостатированной поверхности.

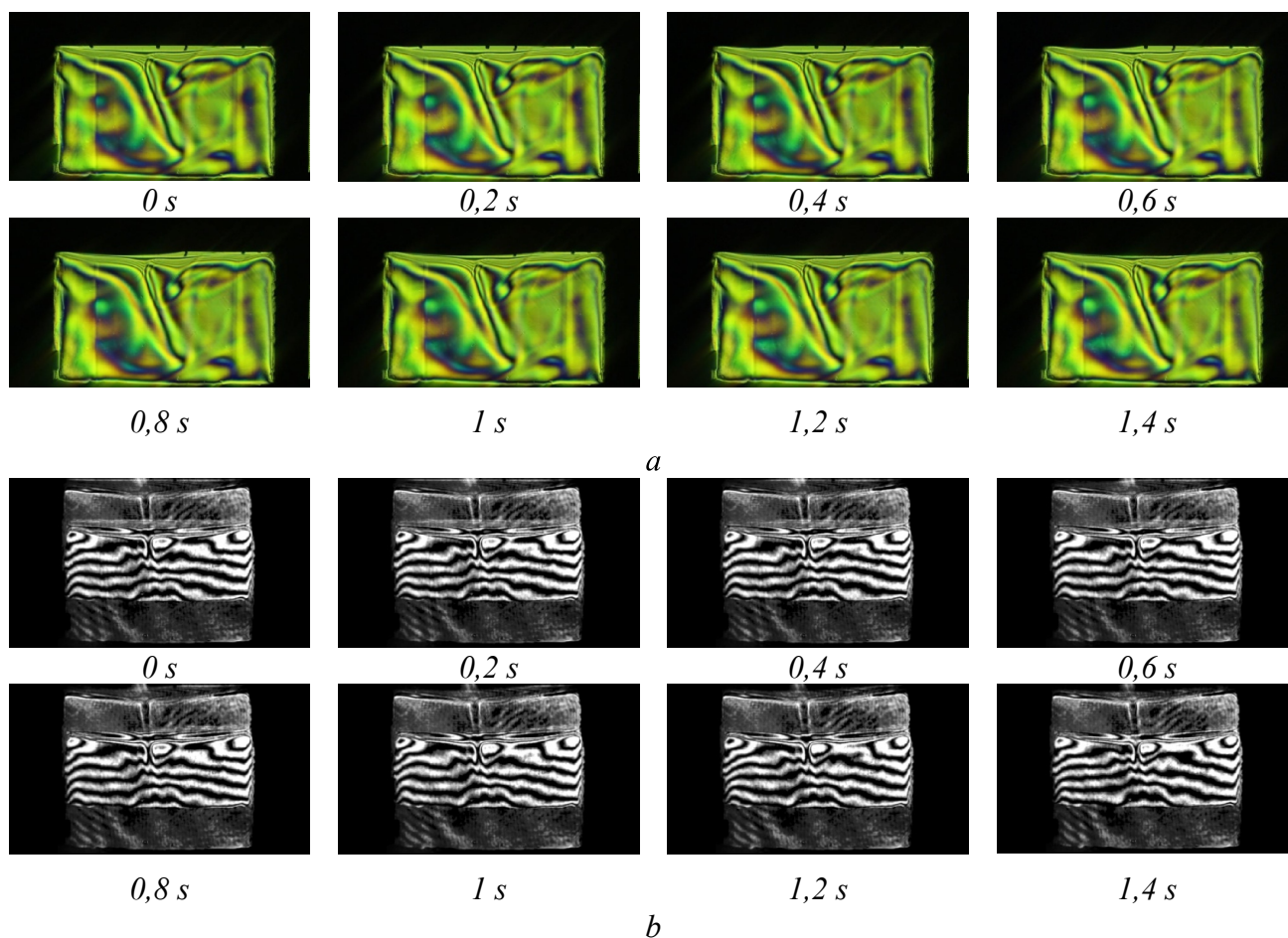


Рис. 3. Динамика фронта волны кристаллизации, визуализированной методами гильберт-оптики – *a* и сдвиговой интерферометрии – *b*.

Рисунок иллюстрирует структуру гильберт-полос, отображающих положение изотерм в окрестности границ: переохлаждённая вода–лёд и переохлаждённая вода–плоская термостатированная поверхность. В пространстве между верхней и нижней термостатированными поверхностями конвективные структуры проявляются как гильберт-визуализированные поля оптической фазовой плотности. Они индуцируются рэлей-бенаровской конвекцией, осложнённой наличием фазового перехода и аномалией плотности воды в температурном интервале $0\div 4^{\circ}\text{C}$. Аппроксимация фронта волны кристаллизации кривыми Безье позволяет исследовать эволюцию его формы и скорости в контрольных точках [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые методами гильберт-оптики и сдвиговой интерферометрии визуализирован процесс эволюции конвективных структур и волны кристаллизации, индуцированных градиентом температур в горизонтальном слое переохлаждённой воды, ограниченном термостатированными плоскими поверхностями. Визуализирован и исследован динамический профиль изотермической поверхности, ограничивающей пространственную форму межфазной границы. Полученные результаты иллюстрируют эффективность методов гильберт-оптики и сдвиговой интерферометрии в задачах, связанных с изучением конвекции и фазовых переходов в системе вода–лёд, представляющих интерес для физического моделирования и практических приложений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 14–08–00818).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gebhart B., Bendell V. S., Shaullatullah H.** Buoyancy-induced flows adjacent to horizontal surfaces in water near its density extremum // *Int. J. Heat mass Transfer*, 1979. V. **22**. P. 132–149.
2. **Lappa M.** *Thermal Convection: Patterns, Evolution and Stability*. WILEY. 2010. 670 p.
3. **Golub V. V., Ivanov M. F., Povarnotsin M. E.** Hydrodynamic instabilities during plane ice front thaw // *Proc. Intern. Conference “Stability and instabilities of stratified and/or rotating flow”*. Moscow. 1997. P. 41–43.
4. **Арбузов В. А., Арбузов Э. В., Бердников В. С., Буфетов Н. С., Дубнищев Ю. Н., Шлапакова Е. О.** Оптическая диагностика структуры и эволюции плавучих струй в сильновязкой жидкости // *Автометрия*. 2014. **50**, № 5. С. 47–55.
5. **Павлов И. Н., Ринкевичюс Б. С., Толкачёв А. В.** Визуализация процессов кристаллизации в поверхностном слое капли воды // *Метрология*. 2013. № 3. С. 11–17.
6. **Расковская И. Л.** Рефрактометрия оптически неоднородных сред на основе регистрации положения каустик при использовании структурированного лазерного излучения // *Автометрия*. 2014. **50**, № 5. С. 92–98.
7. **Скорнякова Н. М.** Теневой фоновый метод и его применения // *Современные оптические методы исследования потоков*. М.: Изд-во "Оверлей". 2011. С. 93–106.
8. **Арбузов В. А., Арбузов Э. В., Дубнищев Ю. Н., Бердников В. С., Мелёхина О. С.** Оптическая диагностика фронта кристаллизации, индуцированного температурным градиентом на верхней границе горизонтального слоя жидкости // *Автометрия*. 2017. **53**, № 2. С. 39–44.

V.A. Arbuzov^{1,3}, E.V. Arbuzov^{2,3}, V.S. Berdnikov^{1,4}, Yu.N. Dubnishchev^{1,3},
O.S. Melekhina³, A.A. Shibaev³

¹*Kutateladze Institute of Thermophysics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia 630090, Novosibirsk, Pr. Ak. Lavrentyeva, 1. E-mail: dubnistchev@itp.nsc.ru*

²*Sobolev Institute of Mathematics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,*

pr. Akademika Koptyuga 4, Novosibirsk, 630090 Russia. E-mail: arbuzov@math.nsc.ru
³ *Novosibirsk State Technical University Russia 630073, Novosibirsk, Pr. K. Marksa, 20. E-mail: oitref@nstu.ru*

VISUALIZATION OF CONVECTIVE STRUCTURES AND OF CRYSTALLIZATION WAVE IN THE HORIZONTAL WATER LAYER

ANNOTATION

With the help of Hilbert-optics and shear interferometry, convective structures and a wave of crystallization, induced by a temperature gradient in a horizontal layer of supercooled water, bounded by thermostatted surfaces, are visualized. The obtained results illustrate the effectiveness of optical methods in problems related to the study of convection and phase transitions of interest for physical modeling and practical applications.

HILBERT-OPTICS, SHEAR INTERFEROMETRY, CONVECTION STRUCTURES, WAVE OF CRYSTALLIZATION