

УДК 535.3 : 536.42

**ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ФРОНТА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ,  
ИНДУЦИРОВАННОГО ТЕМПЕРАТУРНЫМ ГРАДИЕНТОМ  
НА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕ  
ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ\***

**В. А. Арбузов<sup>1,3</sup>, Э. В. Арбузов<sup>2,3</sup>, Ю. Н. Дубнищев<sup>1,3</sup>,  
В. С. Бердников<sup>1,3</sup>, О. С. Мелехина<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1*

<sup>2</sup>*Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 4*

<sup>3</sup>*Новосибирский государственный технический университет,  
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20*

*E-mail: dubnistchev@itp.nsc.ru*

Исследована динамика фронта кристаллизации, индуцированного температурным градиентом на верхней границе горизонтального слоя воды, ограниченного плоскими термостатированными поверхностями. Формирование и эволюция конвективных структур, визуализированных методами гильберт-оптики, регистрировались цифровой видеокамерой. Разность температур верхнего ( $T_1$ ) и нижнего ( $T_2$ ) термостатов удовлетворяла условию  $T_1 < T_2$ . В этой системе температура охлаждаемой верхней поверхности является параметром порядка, критическое значение которого вызывает бифуркационный фазовый переход из жидкой фазы (переохлаждённая вода) в твердофазное (лёд) кристаллическое состояние. Определены скорость движения волны кристаллизации и эволюция её фронта. Выявлено пространственно-временное состояние волны кристаллизации, в котором форма фронта является изолинией равных скоростей. Визуализирован динамический профиль изотермической поверхности, ограничивающей пространственную форму твердотельной фазы.

*Ключевые слова:* оптическая диагностика потоков, гильберт-оптика, конвекция в системе вода—лёд, фазовый переход в переохлаждённой жидкости, волна кристаллизации.

DOI: 10.15372/AUT20170204

**Введение.** Интерес к проблемам динамики кристаллизации в переохлаждённой жидкости и эволюции конвективных структур в системе вода—лёд усилился 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. В частности, изучение процессов льдообразования имеет фундаментальное значение для освоения шельфовых и газоносных районов Арктики.

Экспериментальные и теоретические исследования конвективных процессов и динамики фазового перехода вода — лёд с учётом аномалии плотности воды в температурном интервале 0–4 °С необходимы для многочисленных технических и технологических приложений [1–5]. Процесс фазового перехода переохлаждённой жидкости в кристаллическое состояние на границе с твёрдой поверхностью может рассматриваться как распространение

---

\*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-08-00818).

самоподдерживающейся волны конденсации. В [6] обсуждается аналогия такого процесса с распространением волны горения по заряду горючей смеси. В этой связи актуализируется задача исследования динамики фронта волны кристаллизации в переохлаждённой воде на границе с твёрдой поверхностью.

Необходимостью таких исследований мотивирована предлагаемая работа. 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. В данной работе методом гильберт-оптики исследуется эволюция полей фазовой оптической плотности, возникающих в горизонтальном слое воды, ограниченном плоскими термостатированными поверхностями. По достижении критического градиента температуры в такой системе возникает фазовый переход на границе верхняя термостатированная поверхность — вода и индуцируется волна кристаллизации, определяющая динамический профиль границы раздела вода — лёд. Режим фазового перехода с появлением центров кристаллизации в объёме слоя воды не рассматривается, поскольку он связан с расширением функциональных возможностей оптической диагностики, описание которых выходит за рамки представленной работы.

**Метод исследования.** Создан оптический измерительный комплекс, позволяющий изучать формирование и эволюцию полей оптической фазовой плотности в конвективных структурах при различных начальных и граничных условиях. Упрощённая схема комплекса, состоящего из системы оптической диагностики и экспериментального стенда, показана на рис. 1. Устройство содержит осветительный модуль, состоящий из источника света 1 (галогенная лампа), коллиматора 2 и щелевой диафрагмы 3, помещённой в передней фокальной плоскости объектива 4 и ориентированной под углом  $\psi = 45^\circ$  относительно оси  $X$ . Объектив формирует зондирующее поле в исследуемой среде. Такой средой является вода, заполняющая прямоугольную полость 5 с прозрачными стёклами оптического качества. Внутренние размеры полости  $136 \times 86 \times 300$  мм. Верхняя и нижняя стенки 6 и 7 полости образованы плоскопараллельными медными пластинами высокого качества.

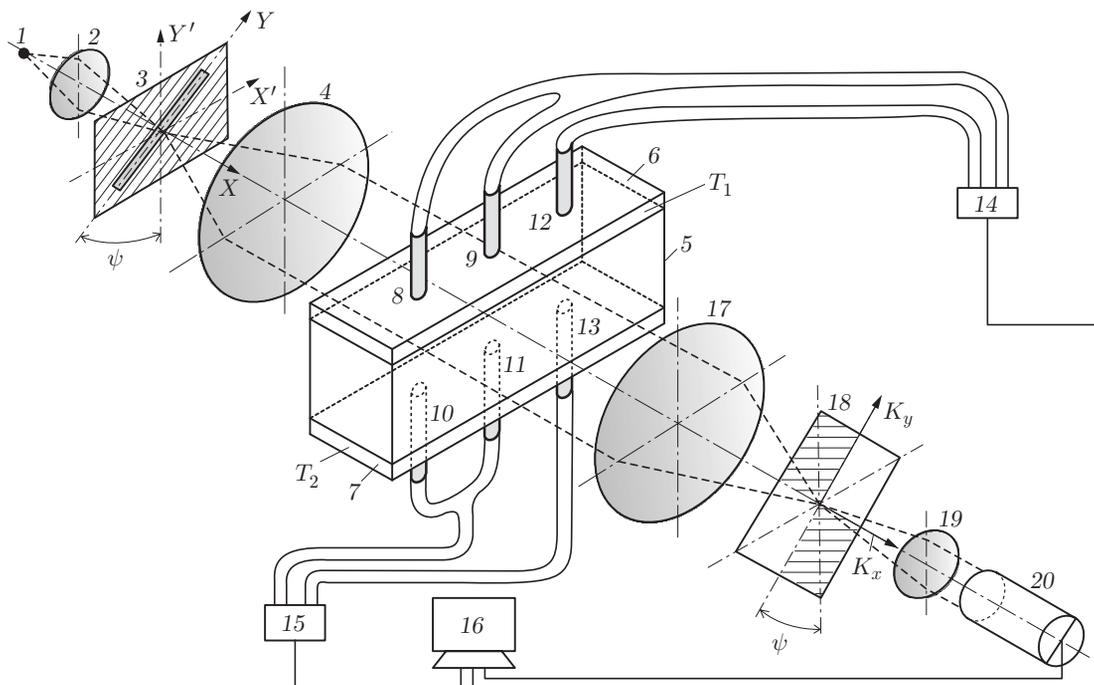


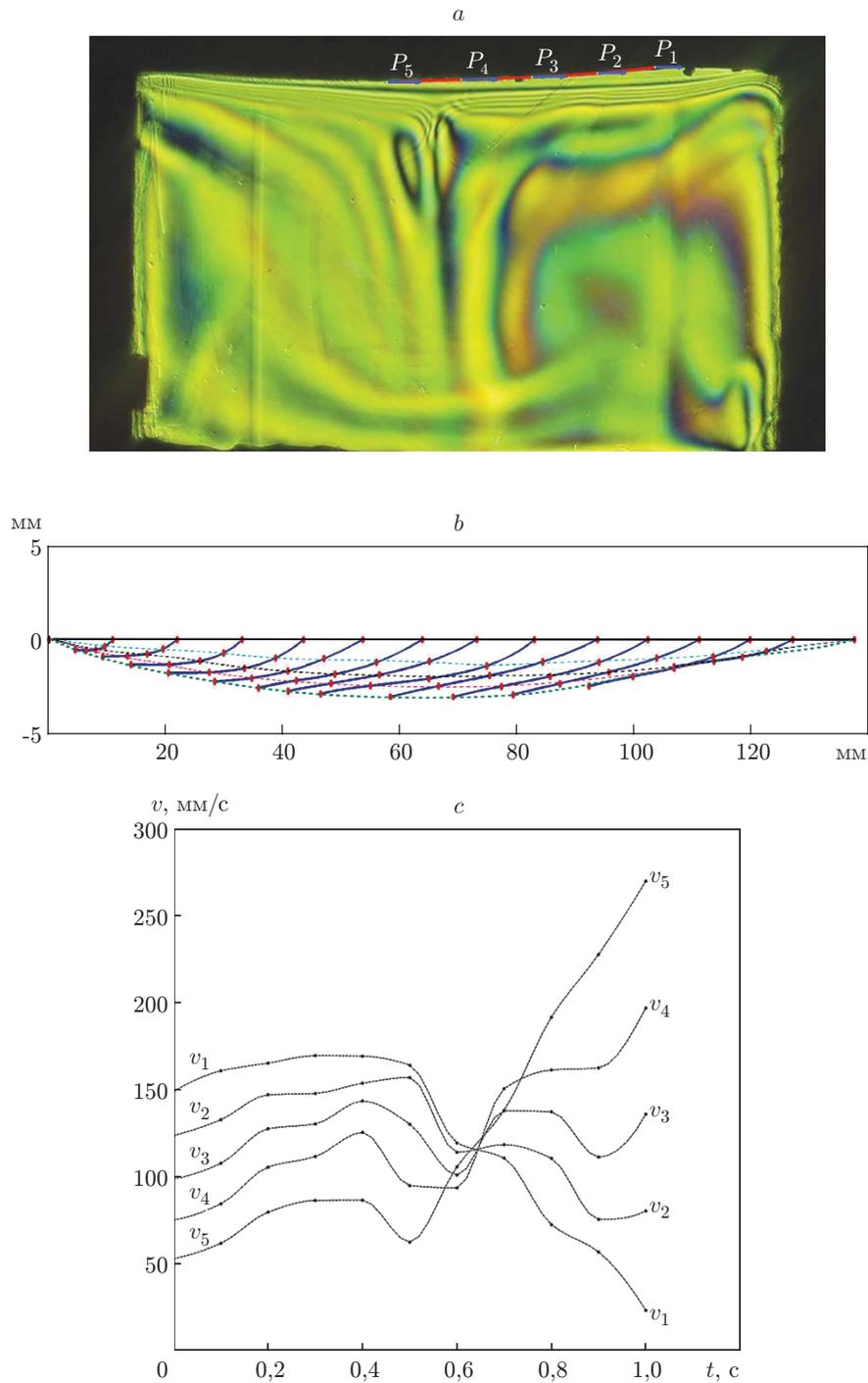
Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Температура верхней пластины регулируется и поддерживается термостатом в пределах от комнатной до  $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а нижней пластины — до  $-8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Трубки, подающие хладагент в верхний и нижний термостаты, располагаются в порядке (8, 9) и (10, 11), а (12, 13) — трубки оттока. Трубки 8, 10 и 12, 13 размещены симметрично относительно трубок 9, 11 на расстояниях 80 мм. Трубки верхней и нижней термостатированных пластин подключены соответственно к системам 14 и 15, задающим температуру охлаждающей жидкости и управляемым компьютером 16 по программе. Объектив 17 формирует в частотной плоскости фурье-спектр возмущённой исследуемой средой зондирующего светового поля. Квадратурный гильберт-фильтр 18 помещён в фурье-плоскости объектива 17. Частотная ось гильберт-фильтра ортогональна направлению изображения щелевой диафрагмы светового источника. Объектив 19 выполняет обратное фурье-преобразование фильтрованного фурье-спектра фазовых возмущений светового поля, индуцированных исследуемой средой. Гильберт-фильтрация визуализирует фазовые возмущения. Изображение гильберт-образа фазовой структуры светового поля формируется объективом 19 на фотоматрице цифровой видеокамеры 20, подключённой к компьютеру.

Оптическая система диагностики реализована на базе серийного теневого прибора ИАБ-463М [7, 8] с модифицированными под задачи эксперимента модулями светового источника, пространственно-частотной фильтрации оптического сигнала, а также с использованием модуля регистрации изображения визуализированных фазовых возмущений светового поля, индуцированных исследуемой средой.

**Экспериментальные результаты.** Зондирующее поле, сформированное объективом 4 от щелевого светового источника, проходит через исследуемую среду (воду), в которой верхним и нижним термостатами 6 и 7 по программе задаются температурные граничные условия:  $T_1$  на верхней термостатированной поверхности и  $T_2$  на нижней,  $T_1 < T_2$ . Вблизи поверхности верхнего термостата при росте градиента температуры вода становится переохлаждённой жидкостью, переходя в состояние неустойчивого равновесия. В такой среде возникает бифуркационный переход из жидкой фазы в твердокристаллическое состояние (лёд). 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.

На рис. 2, а представлен кадр видеоплёнки, фиксирующий фронт волны кристаллизации, визуализированной методами гильберт-оптики. Рисунок отражает динамический профиль изотермической поверхности раздела лёд — переохлаждённая вода, зафиксированный в момент  $t = 0,7$  с от начала кристаллизации. На фронте поверхности показаны векторы скорости волнового фронта в контрольных точках. На фотографии хорошо видна структура 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  $0-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Аппроксимация линий фронта волны кристаллизации выполнялась с использованием полиномов Берштейна, как и в случае аппроксимации изотерм [7]. Динамика фазового перехода определялась в контрольных точках, делящих каждую реализацию волнового фронта, аппроксимированную кривой Безье, на четыре части, одинаковые по длине. Первая контрольная точка находилась на линии раздела вода — термостатированная поверхность. Динамика фронта волны кристаллизации реконструировалась путём сопоставления координат контрольных точек в последовательности видеокadres с учётом межкадрового временного интервала.



*Рис. 2.* Динамика волны кристаллизации в переохлаждённой воде вблизи верхней термостатированной плоскости: *a* — кадр видеофильма с изображением гильберт-визуализированной волны фазового перехода и конвективных структур в горизонтальном слое воды между двумя термостатированными плоскостями; *b* — реконструкция фронтов волны кристаллизации, зарегистрированных последовательными кадрами видеофильма; *c* — реконструкция временной зависимости скорости распространения фронта волны кристаллизации в контрольных точках

На рис. 2, *b* приведены траектории этих контрольных точек, отображающие динамику фронтов волны кристаллизации, фиксированных через временные промежутки  $\Delta t = 0,1$ , равные пяти межкадровым интервалам.

На рис. 2, *c* показаны скорости движения контрольных точек фронта волны кристаллизации в зависимости от времени. Из рисунка видно, что существует пространственно-временное положение фронта кристаллизации, форма которого является изолинией равных скоростей. Это положение соответствует моменту времени  $t_c = 0,65$  с от начала кристаллизации. Рисунок иллюстрирует динамику изменения фронта волны кристаллизации. На временном интервале  $0 < t < t_c$  скорости движения контрольных точек фронта удовлетворяют неравенству

$$v_1 > v_2 > v_3 > v_4 > v_5. \quad (1)$$

В момент времени  $t_c = 0,65$  с это неравенство превращается в равенство:  $v_1 = v_2 = v_3 = v_4 = v_5 = v_c$ , что означает трансформацию сечения волнового фронта в изолинию равных скоростей. На временном интервале, превышающем критический момент  $t > t_c$ , происходит инверсия неравенства (1), описывающего соотношение скоростей движения контрольных точек волны кристаллизации:

$$v_1 < v_2 < v_3 < v_4 < v_5. \quad (2)$$

Такая динамика формы фронта волны кристаллизации в его контрольных точках обусловлена, по-видимому, выделением энергии при фазовом переходе переохлаждённая вода — лёд.

**Заключение.** Впервые методами гильберт-оптики исследована динамика фронта волны кристаллизации, индуцированного температурным градиентом на верхней границе горизонтального слоя воды, ограниченного плоскими термостатированными поверхностями. Визуализированы поля фазовой оптической плотности конвективных структур. В этой системе температура охлаждаемой верхней поверхности является параметром порядка, критическое значение которого вызывает бифуркационный фазовый переход из жидкой фазы (переохлаждённая вода) в лёд. Установлено, что эволюция фронта волны кристаллизации проходит через состояние, когда сечение волнового фронта плоскостью, нормальной к термостатированной поверхности, представляет собой изолинию равных скоростей. До этого момента скорости контрольных точек фронта кристаллизации уменьшаются с расстоянием от термостатированной плоскости, а после прохождения состояния изолинии равных скоростей — увеличиваются. Визуализирован динамический профиль изотермической поверхности, ограничивающей пространственную форму твердотельной фазы на границе раздела вода — лёд. Полученные результаты иллюстрируют эффективность применения оптической диагностики, основанной на методах гильберт-оптики. Они представляют интерес для развития физических моделей фазовых переходов, изучения процессов льдообразования и практических приложений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gebhart B., Bendell M. S., Shaukatullah H.** Buoyancy induced flows adjacent to horizontal surfaces in water near its density extremum // Intern. Journ. Heat and Mass Transfer. 1979. **22**, Is. 1. P. 137–149.
2. **Welander P.** Observation of oscillatory ice states in a simple convection experiment // Journ. Geophys. Res. 1977. **82**. P. 2591–2592.

3. **Golub V. V., Ivanov M. F., Povarnotsin M. E.** Hydrodynamic instabilities during plane ice front thaw // Proc. of the Intern. Conf. "Stability and Instabilities of Stratified and/or Rotating Flows". Moscow, 1997. P. 41–43.
4. **Lappa M.** Thermal Convection: Patterns, Evolution and Stability. Chichester: John Wiley & Sons, 2010. 690 p.
5. **Макашев Ю. А., Кириллов В. В.** Аномальные свойства воды и возможность их использования для получения энергии // Вестн. Международной академии холода (МАХ). 2013. № 2. С. 32–34.
6. **Васильев А. А.** Волна фазового перехода вода — лёд как волна «горения» // Вестн. НГУ. Сер. Математика. 2012. **12**, вып. 4. С. 16–20.
7. **Арбузов В. А., Арбузов Э. В., Бердников В. С. и др.** Оптическая диагностика структуры и эволюции плавучих струй в сильновязкой жидкости // Автометрия. 2014. **50**, № 5. С. 47–55.
8. **Арбузов В. А., Арбузов Э. В., Дворников Н. А. и др.** Оптическая диагностика взаимодействия кольцевых вихрей с пламенем // Автометрия. 2016. **52**, № 2. С. 66–72.

*Поступила в редакцию 8 июня 2016 г.*

---