

Краткие сообщения

09

Оптическая гильберт-диагностика конвективных структур и фазового перехода в горизонтальном слое переохлажденной воды

© В.А. Арбузов,^{1,2,4} Э.В. Арбузов,^{3,4} В.С. Бердников,^{1,4} Ю.Н. Дубнищев,^{1,2,4} О.С. Мелёхина⁴

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия

² Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
630058 Новосибирск, Россия

³ Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия

⁴ Новосибирский государственный технический университет,
630092 Новосибирск, Россия
E-mail: dubnistchev@itp.nsc.ru

(Поступило в Редакцию 6 октября 2016 г.)

Методами гильберт-оптики визуализирован процесс эволюции конвективных структур и фронта волны кристаллизации в горизонтальном слое переохлажденной воды, ограниченном термостатированными плоскими поверхностями. Представлены результаты измерения фазовой скорости и формы фронта кристаллизации, аппроксимированного кривыми Безье. Выявлена пространственно-временная квазипериодичность поля фазовых скоростей, которая может быть связана с колебательными модами фронта кристаллизации как динамической поверхности межфазового перехода вода–лед.

DOI: 10.21883/JTF.2017.10.45006.2189

Интерес к проблемам волн кристаллизации в переохлажденной жидкости и эволюции конвективных структур в системе вода–лед 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. 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–лед с учетом аномалии плотности воды в области 0–4°C необходимы для многочисленных технических и технологических приложений [1–5]. Процесс фазового перехода переохлажденной жидкости в кристаллическое состояние на границе с твердой поверхностью может рассматриваться как распространение 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 переохлажденной воде на границе с твердой поверхностью. Необходимость таких исследований мотивирована настоящая работа.

Изучение динамики фазовых переходов в переохлажденной жидкости и эволюции конвективных структур в системе вода–лед требует применения невозмущающих методов диагностики, основанных на современных достижениях оптики, лазерной техники и информационных

технологий. Упрощенная схема исследовательского комплекса, содержащего систему оптической диагностики и экспериментальный стенд, показана на рис. 1. Схема содержит осветительный модуль, состоящий из источника света 1 (ртутная лампа ДРШ–250), коллиматора 2 и щелевой диафрагмы 3, помещенной в передней фокальной плоскости объектива 4, формирующего зондирующее поле в исследуемой среде. Такой средой является вода, заполняющая прямоугольную полость 5 с прозрачными стеклами оптического качества. Внутренние размеры полости 136 × 86 × 30 mm. Верхняя и нижняя стенки полости образованы плоскопараллельными мед-

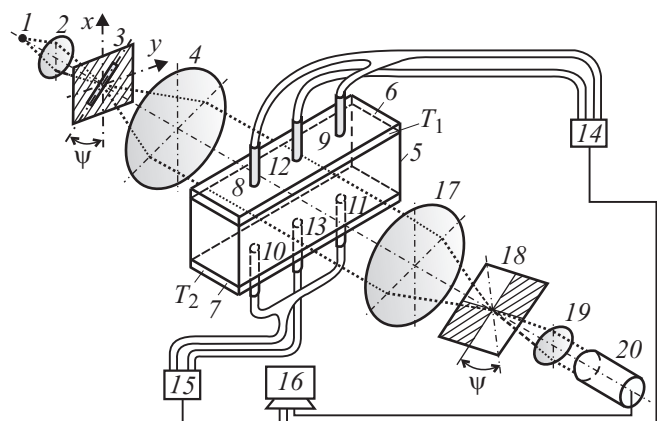


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (пояснение в тексте).

ными 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°C . Трубки, подающие хладагент в верхний и нижний термостаты, располагаются в следующем порядке: трубка оттока 12, 13 посередине, а подающие трубки 8, 10 и 9, 11 — симметрично от нее на расстояниях 80 mm.

Трубки верхнего и нижнего термостатов подключены соответственно к системам 14 и 15, задающим температуру охлаждающей жидкости и управляемым компьютером 16 по заданной программе. Объектив 17 формирует в частотной плоскости фурье-спектр возмущенного исследуемой средой зондирующего светового поля. Квадрантный гильберт-фильтр 18 помещен в фурье-плоскости объектива 17. Частотная ось гильберт-фильтра ортогональна направлению изображения щелевой диафрагмы светового источника, ориентированного под углом $\psi = 45^\circ$. Объектив 19 выполняет обратное фурье-преобразование фильтрованного фурье-спектра фазовой структуры светового поля. Восстановленное объективом 19 изображение гильберт-образа фазовой структуры светового поля, возмущенного исследуемой средой, регистрируется цифровой видеокамерой 20, подключенной к компьютеру 16.

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 модулем регистрации изображения визуализированных фазовых возмущений светового поля.

Зондирующее поле, сформированное объективом 4 от щелевого светового источника, проходит через исследуемую среду (воду), в которой верхней 6 и нижней 7 термостатированными поверхностями задаются по заданной программе температурные граничные условия: T_1 и T_2 , $T_1 < T_2$. В пространстве между верхней и нижней термостатированными поверхностями возникают конвективные структуры, которые проявляются как возмущения полей оптической фазовой плотности. Эти структуры индуцируются рэлей-бенаровской конвекцией, осложненной наличием фазового перехода и аномалией плотности воды в температурном интервале $0-4^\circ\text{C}$.

Вблизи верхней термостатированной поверхности при росте градиента температуры вода становится переохлажденной жидкостью, переходя в состояние неустойчивого равновесия. В такой среде возникает переход из жидкой фазы в твердокристаллическое состояние. Это — фазовый переход первого рода. Он проявляется возникновением волны кристаллизации и сопровождается энерговыделением, что в свою очередь влияет на динамическое распределение градиента оптической фазовой плотности в переохлажденной воде и индуцирует фазовые возмущения в зондирующем световом поле, фурье-спектр которых формируется в частотной плоскости объектива 17.

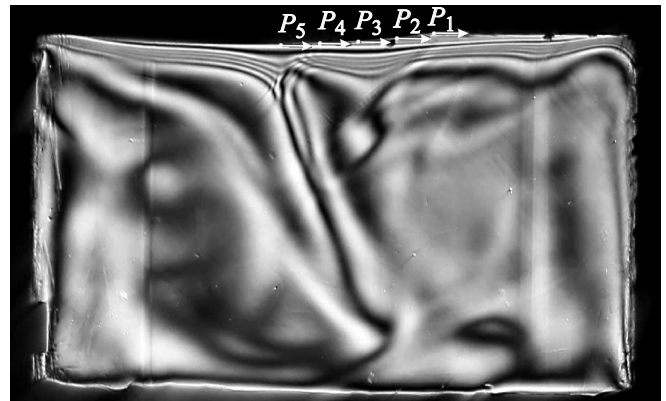


Рис. 2. Изображение гильберт-визуализированных конвективных структур и фронта волны кристаллизации в окрестности плоской термостатированной поверхности, ограничивающей сверху слой в переохлажденной воде.

Квадрантный гильберт-фильтр 18 преобразует фурье-спектр фазовых возмущений светового поля, индуцированных исследуемой средой, в фурье-спектр гильберт-сопряженного поля. Объектив 19 камкордера выполняет обратное фурье-преобразование гильберт-сопряженного фурье-спектра фазовых возмущений. В результате на фотоматрице камкордера формируется изображение гильберт-визуализированных фазовых возмущений светового поля, отображающее двумерную проекцию конвективных структур в исследуемой среде. На рис. 2 в качестве примера представлен кадр из видеофильма, иллюстрирующий гильберт-визуализированные конвективные структуры. На этом же рисунке хорошо виден фронт волны кристаллизации, отображающий динамическую межфазную границу лед—вода в окрестности плоской термостатированной поверхности, ограничивающей сверху слой переохлажденной воды. Поскольку механизм роста льда в сильно переохлажденной воде существенно определяется межфазовой поверхностной кинетикой [9], представляет интерес оценка динамической формы фронта волны кристаллизации. Для этого была выполнена аппроксимация визуализированного фронта волны кристаллизации с использованием полиномов Бернштейна. Динамика фазового перехода определялась в контрольных точках, делящих каждую реализацию волнового фронта, аппроксимированную кривой Безье, на четыре части с заданным соотношением. Первая контрольная точка находится на линии раздела вода—термостатированная поверхность. Эволюция фронта волны кристаллизации, аппроксимированного кривыми Безье, реконструировалась путем сопоставления координат контрольных точек в последовательности видеок кадров с учетом межкадрового временного интервала, как это показано на рис. 3.

Последовательность реконструированных фронтов волны кристаллизации в адаптированном для наглядности масштабе по вертикальной оси представлена на рис. 3, а. Временной интервал между соседними изобра-

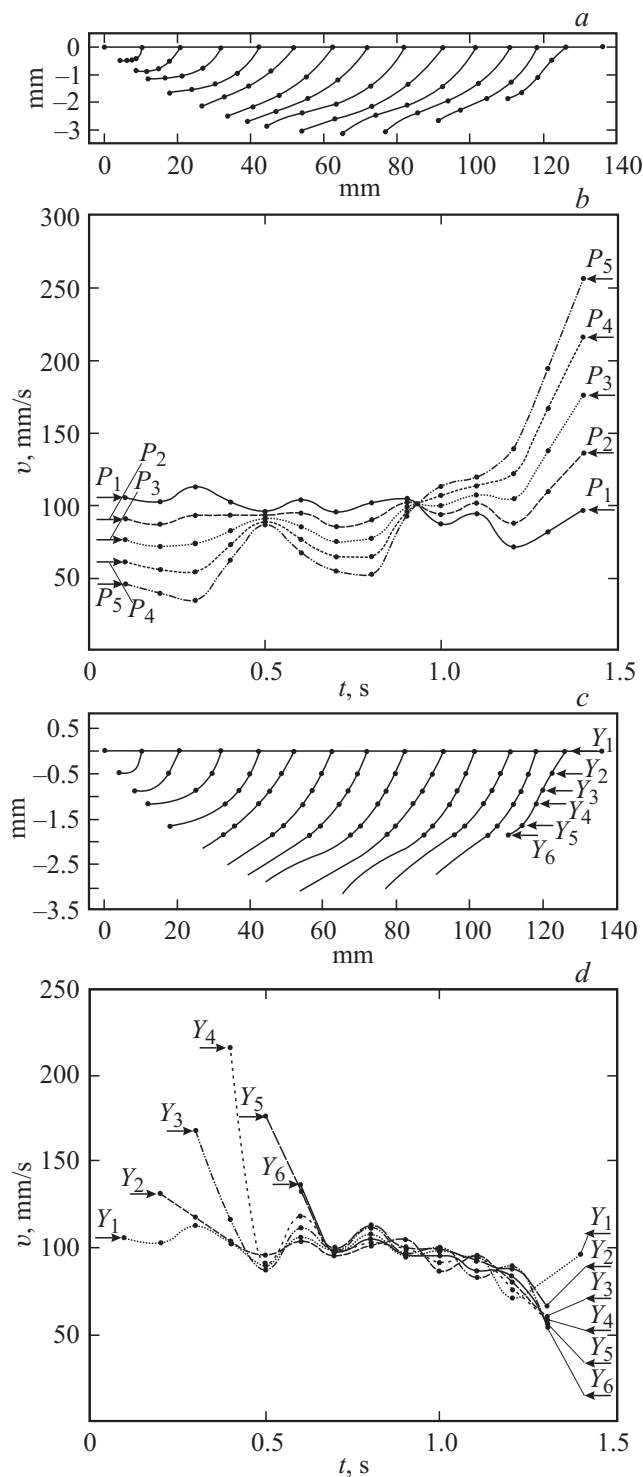


Рис. 3. Эволюция фронта волны кристаллизации (пояснение в тексте).

жениями реконструированных волновых фронтов в этой последовательности равен пяти межкадровым интервалам видеофильма и составляет 0.1 s. Хорошо видно, как форма фронта волны кристаллизации изменяется в процессе распространения. Зависимость горизонтальной компоненты фазовой скорости от времени в контрольных

точках волнового фронта показана на рис. 3, b. Из сопоставления рис. 3, a и b следует, что существует пространственно-временная реализация волнового фронта, форма которой является изолинией равных фазовых скоростей: $v_1 = v_2 = v_3 = v_4 = v_5$. На рис. 3, b эта ситуация соответствует моменту времени $t_c \approx 0.9$ s.

При $0 < t < t_c$ фазовые скорости контрольных точек волнового фронта удовлетворяют неравенству $v_1 > v_2 > v_3 > v_4 > v_5$. На временном интервале, превышающем критический момент $t_1 = t_c$, происходит инверсия неравенства, описывающего соотношение фазовых скоростей в контрольных точках фронта волны кристаллизации $v_1 < v_2 < v_3 < v_4 < v_5$.

Видеокадр, представленный на рис. 2, фиксирует фронт волны кристаллизации, соответствующий изолинии равных фазовых скоростей в момент $t = t_c$. Как видно из рис. 3, b, существует другой момент времени, $t_c \approx 0.5$ s, когда отличие фазовых скоростей в контрольных точках волнового фронта становится минимальным. При изменении времени относительно этого момента отличие значений фазовых скоростей растет при сохранении соотношения $v_1 > v_2 > v_3 > v_4 > v_5$.

На рис. 3, c представлена реконструкция фронтов кристаллизации кривыми Безье с контрольными точками, которые определяются пересечением этих фронтов, фиксированных через 0.1 s, плоскостями, параллельными термостатированной поверхности. Особенность формирования этих контрольных точек состоит в том, что каждая из параллельных плоскостей проходит через начало соответствующего фронта волны кристаллизации, аппроксимированного кривой Безье. Рис. 3, d иллюстрирует эволюцию фазовой скорости в контрольных точках волнового фронта, выбранных согласно рис. 3, c. Квазипериодический характер зависимости фазовых скоростей в контрольных точках волнового фронта указывает на присутствие в процессе кристаллизации колебательных явлений. По-видимому, это влияние колебательных мод, возникающих на межфазной границе при движении фронта кристаллизации.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 14-08-00818).

Список литературы

- [1] *Welander P.* // J. Geophys. Research. 1997. Vol. 82. P. 2591–2592.
- [2] *Golub V.V., Ivanov M.F., Povarnotsin M.E.* // Proc. Intern. Conf. Stability and Instabilities of Stratified and/or Rotating Flow. Moscow. 1977. P. 41–43.
- [3] *Lappa M.* Thermal Collection: Patterns, Evolution and Stability. WILEY, 2010. 670 p.
- [4] *Mishima O., Stanley E.* // Nature. 1998. Vol. 396. P. 329–335.
- [5] *Sibkov A.A., Golovin Yu.I., Zheltov M.A.* et al. // Physica A. 2003. Vol. 319. P. 65.
- [6] *Васильев А.А.* // Вестник НГУ. Серия: Математика, механика, информатика. 2012. 12. Вып. 4. С. 16–20.

- [7] *Арбузов В.А., Арбузов Э.В., Бердников В.С. и др. // Автометрия. 2014. Т. 50. № 5. С. 47–55.*
- [8] *Arbuzov V.A., Dubnishchev Yu.N., Dvornikov N.A. et. al. // Spray and Combustion Dynamics. 2016. P. 1–8.*
- [9] *Шибков А.А., Желтов М.А., Королёв А.А. и др. // Кристаллография. 2004. Т. 46. С. 1154.*