

УДК 535.3 : 536.42

ГИЛЬБЕРТ-ДИАГНОСТИКА РЭЛЕЙ-БЕНАРОВСКОЙ КОНВЕКЦИИ В ЖИДКОСТИ*

В. А. Арбузов^{1,2}, Э. В. Арбузов^{2,4}, Н. С. Буфетов^{1,3}, Е. О. Шлапакова²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1
E-mail: arbuzov@itp.nsc.ru

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Новосибирский государственный технический университет»,
630092, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

³ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

⁴ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт математики им. С. Л. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 4

Создан экспериментальный комбинированный оптический и тепловизионный комплекс, позволяющий исследовать рэлей-бенаровскую конвекцию жидкости в слое с двумя жёсткими изотермическими границами и со свободной верхней границей при стационарных и нестационарных температурных граничных условиях. Визуализация поверхностной структуры жидкости осуществлена методами гильберт-оптики в отражённом свете. Бесконтактный контроль толщины слоя жидкости выполнен специально разработанным дистанционным измерителем на базе микроскопа МБР-1 с узлом плавной фокусировки на основе механизма Мейера. Экспериментально исследована эволюция динамической структуры поверхности и температурного поля анализируемой жидкости и подтверждено существование течений в виде двумерных валиков с осями вращения, параллельными боковым границам (стенкам полости). Показано, что течение сильновязкой жидкости имеет тепловую гравитационную природу. Установлено соответствие эволюции термограмм и гильберт-тенеграмм поверхностных структур в различных режимах рэлей-бенаровской конвекции.

Ключевые слова: оптическая диагностика потоков, гильберт-оптика, рэлей-бенаровская конвекция, термография РБК-структур.

Введение. Экспериментальные исследования термогравитационной и тепловой гравитационно-капиллярной конвекции на открытой границе горизонтального слоя сильновязкой полиэтилсилоксановой (ПЭС-5) жидкости в термостатированной ванне при подогреве снизу [1] направлены на решение фундаментальных вопросов ламинарно-турбулентного перехода и задач, возникающих при разработке технологических процессов выращивания кристаллов. Рэлей-бенаровская конвекция (РБК) является предметом интенсивных исследований уже свыше ста лет [1, 2]. Интерес к её изучению связан с эффективностью РБК-моделей как в фундаментальных задачах гидро- и газодинамики,

*Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 09-08-00882, № 10-08-00813) и Междисциплинарного проекта «Проблемы гидродинамики, гидрофизики и экологии крупных водоёмов Сибири» (№ 132-2012).

так и в разных технических приложениях. С семидесятых годов прошлого столетия пристальное внимание к РБК связано с исследованиями синергетических процессов в диссипативных системах, что имеет мировоззренческое значение в плане изучения самоорганизации и эволюции упорядоченных структур в окружающем нас мире. В экспериментальных исследованиях РБК широко применяются оптические методы [3–5]: теневые, интерференционные и термографические. Профилометрия бенаровских структур, возникающих на свободной поверхности жидкости, обычно выполняется с помощью интерферометров [5], что усложняет эксперимент. Методы гильберт-оптики наряду с визуализацией позволяют осуществить профилометрию РБК-структур, что даёт возможность проводить пространственно-временной и частотный анализ поверхностных структур и тепловых полей для установления их взаимного соответствия при различных режимах конвекции, граничных условиях и толщинах слоя жидкости, о чём впервые сообщается в данной работе.

Описание и результаты экспериментального исследования РБК-структур.

Совместное применение методов гильберт-оптики и термографии позволяет получить качественно новые результаты, так как появляется возможность сопоставлять РБК-структуры с тепловыми полями на поверхности жидкости. С этой целью был создан экспериментальный комплекс, состоящий из гильберт-визуализатора полей фазовой оптической плотности и тепловизионной системы. Автоколлимационный визуализатор (рис. 1) содержит оптико-механический блок с полихроматическим линейным световым источником, фурье-объектив и систему оптической фильтрации с двухканальным фильтром Фуко — Гильберта. Свет от линейного источника отражается полупрозрачным диагональным зеркалом 4, коллимируется объективом и зеркалом 6 направляется в прямоугольную кювету с изучаемой жидкостью ПЭС-5.

Отражённое от поверхности исследуемой жидкости световое поле является оптиче-

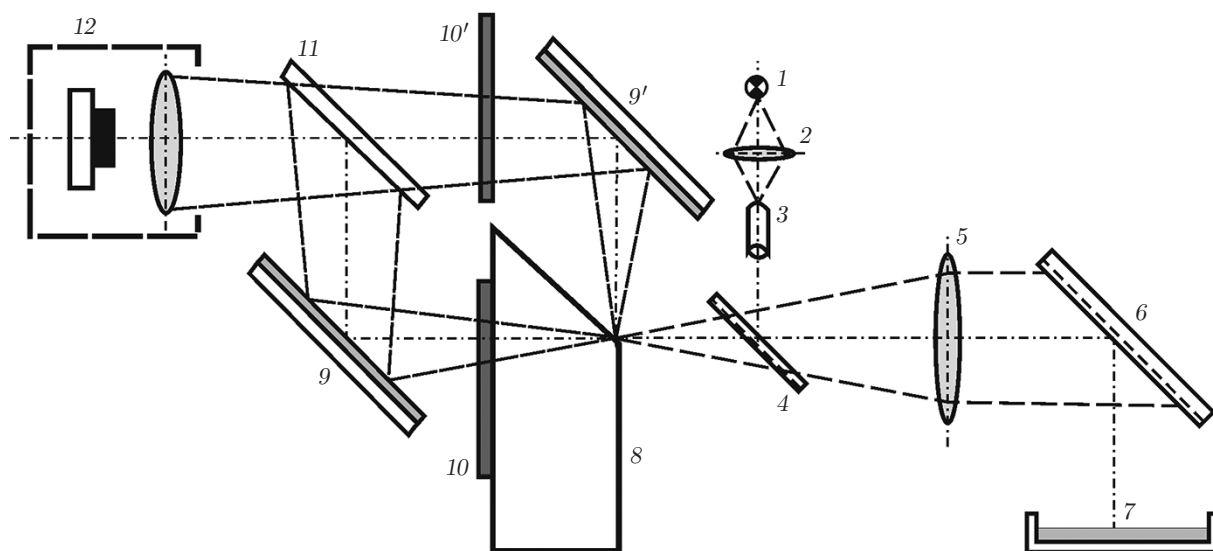


Рис. 1. Оптическая схема автоколлимационного гильберт-визуализатора с линейным полихроматическим источником света: 1 — лампа накаливания; 2 — конденсорная линза; 3 — световолоконный преобразователь; 4 — диагональное полупрозрачное зеркало; 5 — фурье-объектив; 6 — диагональное зеркало; 7 — прямоугольная кювета с теплопроводным дном; 8–11 — двухканальный фильтр Фуко — Гильберта (8 — светоделительная призма Фуко — Гильберта с зеркальной отражающей диагональной поверхностью, 9, 9' — диагональные зеркала, 10, 10' — цветные светофильтры, 11 — полупрозрачное диагональное зеркало); 12 — цифровой зеркальный фотоаппарат с длиннофокусным объективом

ким сигналом, амплитуда и фаза которого несут информацию о динамических возмущениях поверхности. Объектив 5 формирует фурье-спектр этого сигнала в частотной плоскости, где помещён двухканальный фильтр Фуко — Гильберта. Нагрев нижней границы слоя осуществляется через дно ванны, температура которого регулируется термостатом. Верхняя поверхность слоя жидкости граничит с воздухом. При нагреве дна ванны возникает и поддерживается температурный градиент в слое жидкости. Когда величина градиента превосходит некоторый критический порог, в жидкости возникает структурированное конвективное движение в виде ячеек Бенара. Фильтрованный оптический сигнал восстанавливается с помощью длиннофокусного фотообъектива и в виде цветной гильберт-тенеграммы регистрируется цифровым фотоаппаратом.

В теоретических моделях рэлей-бенаровской конвекции обычно рассматривается бесконечный в горизонтальных направлениях слой с поворотной и трансляционной симметрией, в то время как в реальных экспериментах и в технологических процессах слой всегда ограничен и имеет боковые стенки. Для исследования влияния относительных размеров слоя на переход к многомасштабной рэлей-бенаровской конвекции жидкости в слоях с двумя жёсткими и одной свободной верхней границей при росте чисел Рэля (Ra) [2] в стационарных и нестационарных температурных граничных условиях были проведены эксперименты. Результаты визуализации рельефа поверхности представлены на рис. 2, *a—i*. Гильберт-тенеграммы (*a—c*) отражают эволюцию РБК-структуры для горизонтальных размеров слоя жидкости ПЭС-5 200×100 мм в диапазоне $Ra = 70\text{--}990$; гильберт-тенеграммы (*d—f*) — для горизонтальных размеров 100×100 мм в диапазоне $Ra = 750\text{--}960$; тенеграммы (*g—i*) — для горизонтальных размеров 80×100 мм в диапазоне

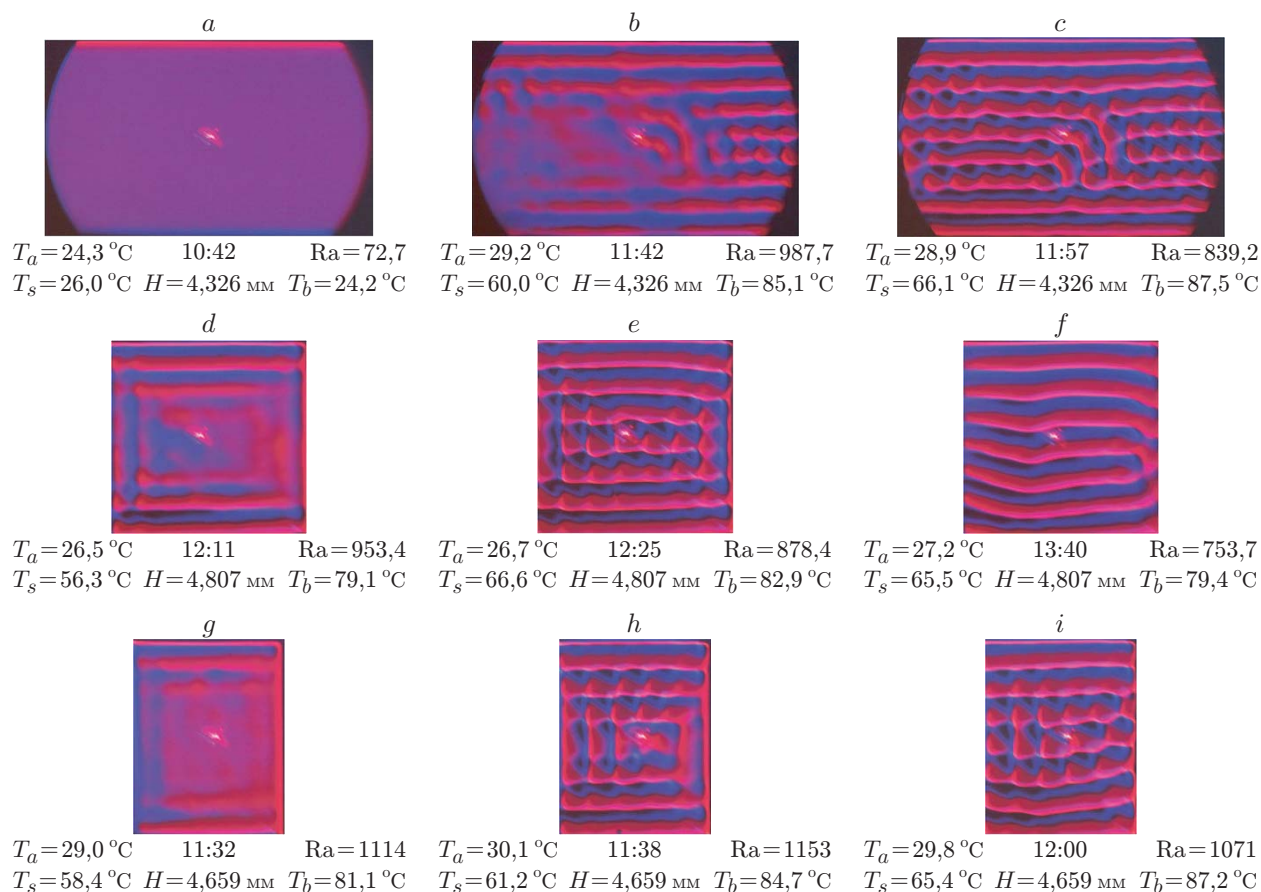


Рис. 2. Бихроматическая гильберт-визуализация РБК-структур

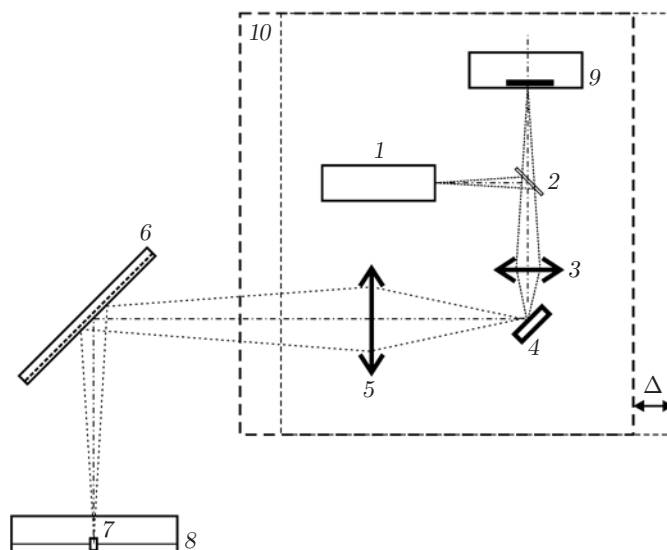


Рис. 3. Схема оптического дистанционного измерителя толщины слоя жидкости: 1 — лазерный диод; 2 — полупрозрачное тонкое диагональное зеркало; 3 — объектив микроскопа МБР-1; 4 — диагональное зеркало; 5 — длиннофокусный фотообъектив «Юпитер-6»; 6 — диагональное зеркало, входящее в оптическую схему автоколлимационного теневого прибора; 7 — тест-объект (мерный стеклянный столбик); 8 — кювета с исследуемой жидкостью; 9 — CCD-камера без штатного объектива; 10 — сканирующая платформа с микрометрическим измерителем перемещения

$R_a = 1070\text{--}1160$. На каждой гильберт-тенеграмме указаны значения R_a , температур поверхности T_s , дна T_b , окружающей среды над поверхностью T_a , а также значения толщины слоя жидкости H и текущего времени регистрации.

Получены результаты, подтверждающие существование РБК-структур, рельефная форма которых зависит от изменения температурного градиента между дном и поверхностью, от геометрических граничных условий и толщины слоя исследуемой жидкости.

РБК-структура поверхности жидкости регистрировалась цифровой камерой и тепловизором с последующей компьютерной обработкой изображений. Измерения полей температуры выполнялись в слое жидкости с использованием микротермопар, а на свободной поверхности — тепловизором.

Результаты аттестации дистанционного оптического измерителя высоты тест-объектов

$H_{(i)T}$, мкм	Δ	Дополнительные поправки										$\Delta'_{(i)}$, мкм	$H_{(i)Э}$, мкм	$\Delta_{(i)Э}$, мкм	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
8088	$\Delta_{01} = 0$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7882	$\Delta_{12} = 190$	40	20	0	20	30	-20	-10	20	10	0	11	7887	5	
6924	$\Delta_{23} = 940$	30	10	-10	20	40	40	20	10	20	20	20	6927	3	
6209	$\Delta_{34} = 710$	-20	20	20	0	20	10	0	-10	-10	10	4	6210	1	
5000	$\Delta_{45} = 1220$	0	10	10	20	-30	0	0	10	20	-40	0	4989	11	
4084	$\Delta_{56} = 920$	-20	0	10	10	10	0	0	20	0	-20	1	4079	5	
3686	$\Delta_{67} = 410$	0	-10	0	0	-10	-20	-10	-10	0	-10	-7	3681	5	
2582	$\Delta_{78} = 1100$	0	0	-10	0	-10	0	-20	-10	0	-20	-7	2593	11	
1878	$\Delta_{89} = 710$	10	0	0	-10	-10	-5	-5	0	-10	-10	-4	1876	2	

Для расчёта чисел Рэля требуется знать толщину слоя H . Измерение толщины слоя жидкости с высокой точностью весьма затруднительно, поскольку контактный метод вносит возмущения. Поэтому необходимо применять оптические измерения. Дополнительной проблемой является выполнение измерения с дистанции 0,75 м. В связи с этим разработана система дистанционного оптического измерения толщины слоя жидкости на базе биологического микроскопа МБР-1 с узлом плавной фокусировки на основе механизма Мейера и с использованием длиннофокусного фотообъектива «Юпитер-6». Схема прибора представлена на рис. 3.

Для определения точности прибора проведена его аттестация на различных тест-объектах в диапазоне высот от 1878 до 8088 мкм. Результаты аттестации по девяти тест-объектам (мерным стеклянным столбикам) приведены в таблице, где $H_{(i)T}$ — из-

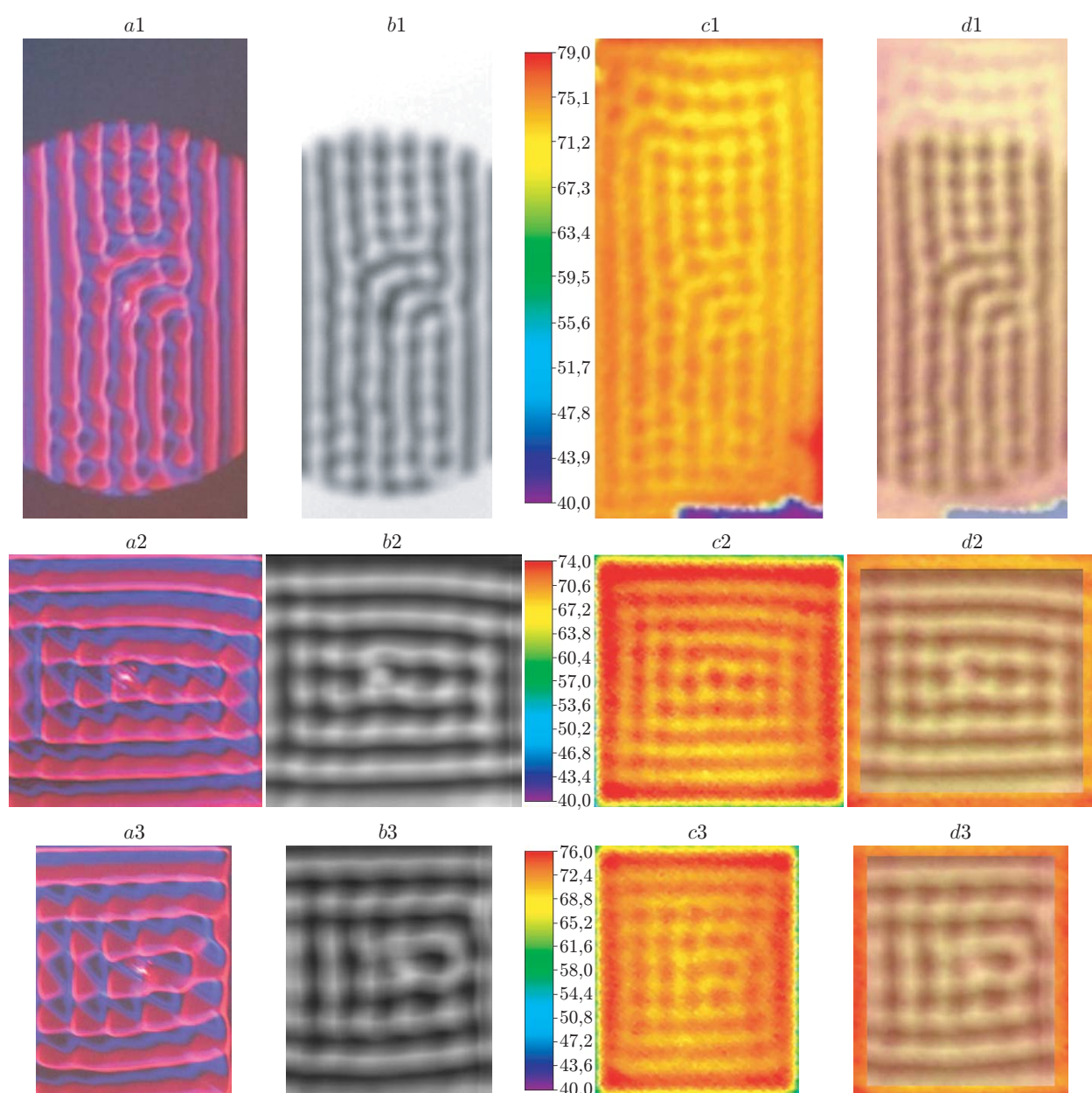


Рис. 4. Сопоставление гильберт-тенеграмм, рельефов и термограмм

вестная высота тест-объекта ($H_{(1)T}$ — максимальное значение тест-объекта 8088 мкм), $\Delta_{(i-1,i)}$ — разность высот измеряемого и известного тест-объектов, $\Delta'_{(i)}$ — дополнительная поправка, полученная методом усреднения по десяти измерениям. Экспериментально измеренная высота тест-объекта $H_{(i)Э} = H_{(i-1)T} - \Delta_{(i-1,i)} - \Delta'_{(i)}$, погрешность измерения $\Delta_{(i)Э} = H_{(i)T} - H_{(i)Э}$. Здесь $i = 2, \dots, 9$ — номер тест-объекта.

По результатам аттестации максимальная погрешность измерения высоты методом точной фокусировки не превышает 11 мкм.

Сопоставление гильберт-тенеграмм и термограмм РБК-структур показано на рис. 4, где $a1$ — $a3$ — исходные бихроматические гильберт-тенеграммы, а $c1$ — $c3$ — термограммы. Профилометрия бенаровских структур, возникающих на свободной поверхности жидкости, выполнена методом двумерного интегрирования красной хроматической составляющей гильберт-тенеграммы (рис. 4, $b1$ — $b3$). Совмещённые изображения (рис. 4, $d1$ — $d3$) иллюстрируют пространственную «идентичность» рельефов РБК-структур и распределений температуры на свободной поверхности исследуемой жидкости.

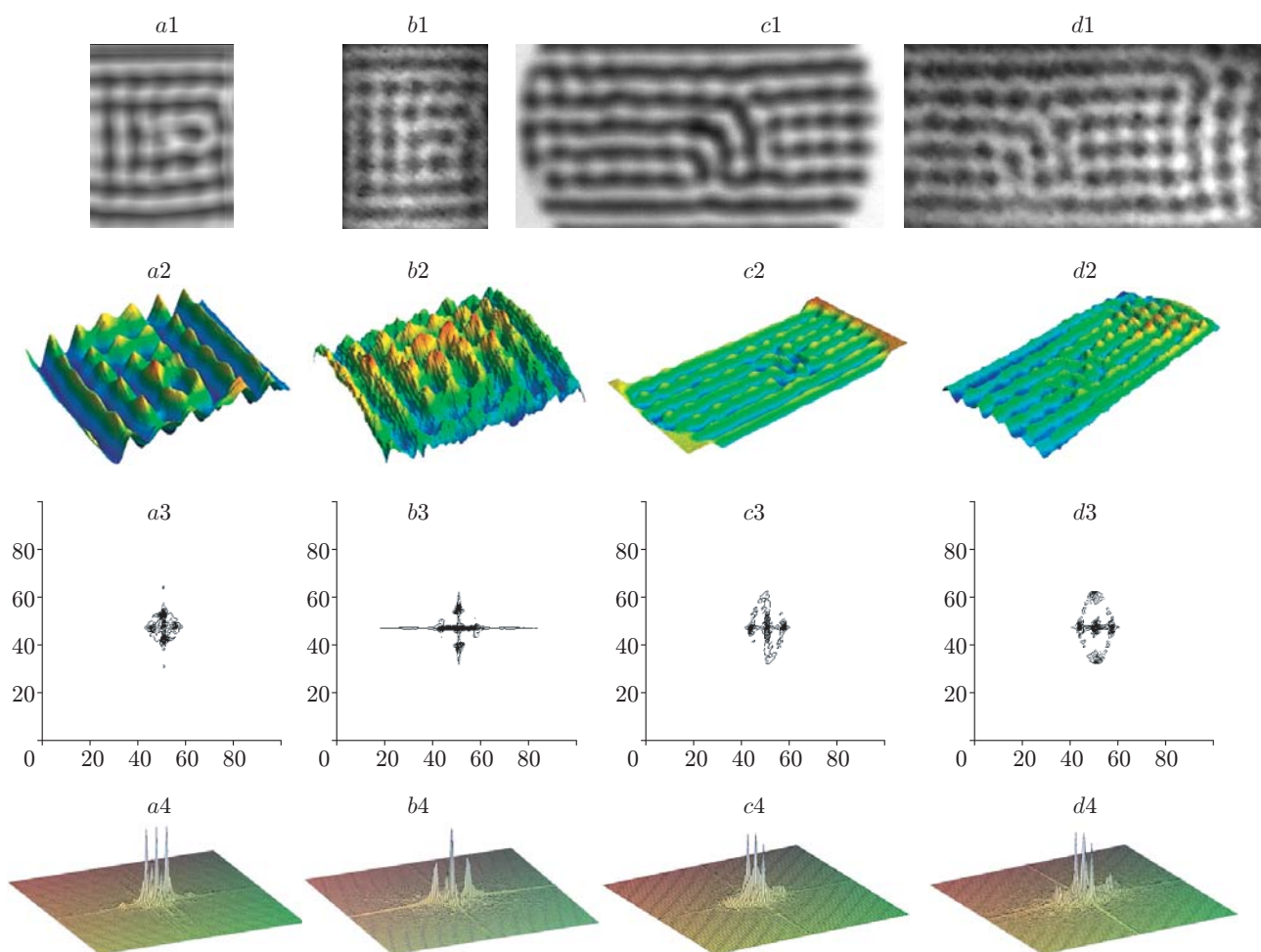


Рис. 5. Фурье-спектры изображений поверхности при различных геометрических граничных условиях: $a1, c1$ — рельефные структуры поверхности в границах 80×100 и 200×100 мм; $b1, d1$ — соответствующие термограммы поверхности в тех же границах; $a2, c2$ — 3D-реконструкция структуры поверхности жидкости; $b2, d2$ — 3D-реконструкция распределения температурного поля на поверхности жидкости; $a3, b3, c3, d3$ — фурье-спектры; $a4, b4, c4, d4$ — 3D-реконструкция фурье-спектров

Выполнена 3D-реконструкция распределения температурного поля и рельефа поверхности жидкости. Фурье-спектры и реконструированная 3D-структура поверхности приведены на рис. 5. Здесь $a1$ соответствует рис. 4, $b2$; $c1$ — рис. 4, $b1$; $b1$ — рис. 4, $c2$; $d1$ — рис. 4, $c1$.

Изображения рельефа поверхности жидкости и распределения температуры обработаны с помощью дискретного преобразования Фурье с использованием пакета MathCad 14. Фурье-спектры демонстрируют характерную форму изображений, которые состоят из прямоугольных ячеек, полученных комбинацией горизонтальных и вертикальных валов. По координатам точек максимумов определяются средние размеры ячеек на соответствующих направлениях.

Гильберт-визуализация позволила впервые решить задачу определения профилей ячейкистых структур исследуемой свободной поверхности и сравнить их с распределением температуры. Сопоставление изображений РБК-структур, их 3D-реконструкций, а также фурье-спектров и их 3D-реконструкций (см. рис. 5) подтверждает сходство этих структур в видимом и тепловом диапазонах излучения при различных граничных условиях.

Заключение. В данной работе создан экспериментальный комплекс для исследования эволюции РБК-структур свободной поверхности тяжёлой жидкости методами гильбертоптики и тепловидения в зависимости от изменения управляющего параметра (градиента температур в слое жидкости) при различных начальных и граничных условиях. Получены профили поверхности, распределения температуры и выполнена их 3D-реконструкция. Установлено соответствие РБК-структур, визуализированных в оптической и тепловой спектральных областях излучения, и сходство их пространственно-частотных спектров. Эти результаты имеют фундаментальное значение, поскольку позволяют уточнить механизмы рэлей-бенаровской конвекции и использовать их, к примеру, в моделировании геодинамических эволюционных процессов, теплофизических процессов в плёнках, а также в технологиях выращивания кристаллических структур.

Авторы выражают благодарность Ю. Н. Дубнищеву и В. С. Бердникову за полезные обсуждения и поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Арбузов В. А., Помыткина А. С.** Оптическая диагностика динамических структур течения жидкости со свободной поверхностью в режиме тепловой гравитационно-капиллярной конвекции // Тр. X Междунар. конф. «Оптические методы исследования потоков». М.: Изд-во МЭИ, 2009. С. 440–443.
2. **Бердников В. С., Марков В. А.** Ламинарно-турбулентный переход в рэлей-бенаровской конвекции // Тр. Четвертой рос. нац. конф. по теплообмену. Т. 3. Свободная конвекция. Теплообмен при химических превращениях. М.: Изд-во МЭИ, 2006. 358 с.
3. **Арбузов В. А., Дубнищев Ю. Н.** Методы гильберт-оптики в измерительных технологиях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. 316 с.
4. **Chen L., Quan C.** Fringe projection profilometry with nonparallel illumination: a last-squares approach // Opt. Lett. 2005. **30**, N 16. P. 2101–2103.
5. **Rahal S., Cerisier P., Asuma H.** Benard—Maragoni convection in a small circular container: influence of the Biot and Prandtl numbers an pattern dynamics and free surface deformation // Experiment in Fluids. 2007. **43**, N 4. P. 547–554.

Поступила в редакцию 16 апреля 2012 г.