



**Одиннадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 27 — 30 июня 2011 г.**

УДК 53.087.45:532.51

Н.С. Буфетов^{1,3}, Е.О. Шлапакова^{1,2}

¹ *Институт теплофизики СО РАН, Россия,
630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, E-mail: aleks@itp.nsc.ru*

² *Новосибирский государственный технический университет, Россия,
630092, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, E-mail: rector@nstu.ru*

³ *Новосибирский государственный университет, Россия,
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2, E-mail: poly@admin.nsu.ru*

**ГИЛЬБЕРТ-ДИАГНОСТИКА РЕЛЕЙ-БЕНАРОВСКОЙ КОНВЕКЦИИ ЖИДКОСТИ
СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Создан экспериментальный комбинированный оптический и тепловизионный комплекс, позволяющий исследовать влияние относительных размеров слоя на переход к многомасштабной рэлей-бенаровской конвекции жидкости в слоях с двумя жесткими изотермическими границами и со свободной верхней границей при стационарных и нестационарных температурных граничных условиях. Визуализация поверхностной структуры жидкости осуществляется методами гильберт-оптики в отраженном свете. Бесконтактный контроль толщины слоя жидкости выполнялся специально разработанным дистанционным измерителем на базе микроскопа МБР-1 с узлом плавной фокусировки на основе микромеханизма Мейера. Получены хронофотографии динамических изменений рельефной структуры и температурного поля исследуемой жидкости. а также результаты, подтверждающие существование течений в виде двумерных валиков с осями вращения, параллельными боковым границам (стенкам полости). Показано, что течение сильно вязкой жидкости имеет тепловую гравитационную природу. Сделаны оценки средней скорости движения ячеистой структуры. Установлена корреляция эволюции поверхностных структур термограмм и гильберт-тенеграмм в различных режимах рэлей-бенаровской конвекции.

РЭЛЕЙ-БЕНАРОВСКАЯ КОНВЕКЦИЯ ЖИДКОСТИ, ГИЛЬБЕРТ-ОПТИКА

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования термогравитационной и тепловой гравитационно-капиллярной конвекции на открытой границе горизонтального слоя сильновязкой полиэтилсилоксановой жидкости ПЭС-5 в термостатированной ванне при подогреве снизу, направлены на решение фундаментальных вопросов ламинарно-турбулентного перехода и задач, возникающих при разработке технологических процессов выращивания кристаллов.

Для изучения эволюции рельефа Релей-Бенаровских конвективных структур на поверхности жидкости а так же влияния геометрических граничных условий на формирование ячеистых структур был разработан и создан оптический измерительный комплекс, состоящий из тепловизионной системы, модифицированного автоколлимационного двухканального теневого прибора с улучшенными характеристиками качества визуализации, работающего на основе метода бихроматического оптического

преобразования Фуко-Гильберта и оптического измерителя толщины слоя жидкости на базе микроскопа МБР-1 с узлом плавной фокусировки на основе микромеханизма Мейера.

ОПТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

Совместное применение теневой и тепловизионной методики позволяет получить качественно новые результаты, так как теневой гильбер-метод визуализации создает возможность судить об изменении рельефа, а тепловизионный комплекс о распределении поля температуры на поверхности жидкости ПЭС-5 под действием Релей-Бенаровской конвекции.

Автоколлимационный теневой прибор с улучшенными характеристиками визуализации (рис. 1.) содержит оптико-механический блок с полихроматическим линейным световым источником 3, коллиматорный объектив 5 со световым диаметром 150 мм и систему оптической фильтрации с двухканальным пространственным фильтром Фуко-Гильберта (8 – 11). Свет от линейного источника отражается полупрозрачным диагональным зеркалом и коллимируется коллиматорным объективом со световым диаметром 150 мм и с помощью диагонального зеркала 6 направляется в прямоугольную кювету с исследуемой жидкостью.

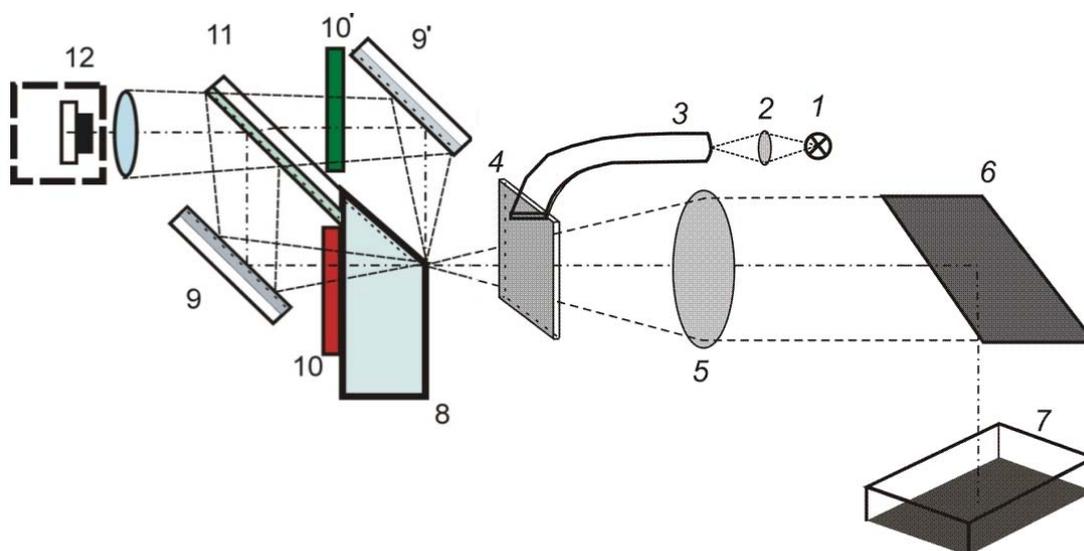


Рис. 1. Оптическая схема автоколлимационного теневго прибора с линейным полихроматическим источником света: 1 – лампа накаливания; 2 – конденсорная линза; 3 – световолоконный преобразователь; 4 – диагональное полупрозрачное зеркало; 5 – коллиматорный объектив; 6 – диагональное зеркало; 7 – прямоугольная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

Экспериментальная установка для визуализации рельефной структуры на поверхности жидкости ПЭС-5 представлена на рисунках 2 и 3. Отраженное от поверхности исследуемой жидкости световое поле является оптическим сигналом, амплитуда и фаза которого несут информацию о динамических возмущениях поверхности. Коллиматорный объектив формирует фурье-спектр этого сигнала в частотной плоскости, где помещен двухканальный фильтр Фуко-Гильберта. Нагрев нижней границы слоя осуществляется через дно ванны, подогреваемое дистиллированной водой, температура которой регулируется термостатом. Верхняя поверхность слоя жидкости граничит с воздухом. При нагреве нижней границы слоя возникает и поддерживается температурный градиент. Когда величина градиента превосходит некоторый порог, в жидкости возникает структурированное конвективное движение в виде ячеек Бенара. Фильтрованный оптический сигнал с помощью длиннофокусного фотообъектива восстанавливается и в виде цветной тенеграммы

фотографируется цифровым фотоаппаратом. С помощью разработанного бихроматического визуализатора рельефной структуры поверхности сильно вязкой жидкости ПЭС-5 (полиэтилсилоксановой жидкости) экспериментально исследовалась рэлей–бенаровская конвекция в прямоугольных полостях с различными относительными размерами в горизонтальной плоскости со свободной поверхностью в режиме тепловой гравитационно-капиллярной конвекции.



Рис.2. Осветительный блок автоколлимационного теневого прибора с двухканальным фильтром Фуко–Гильберта

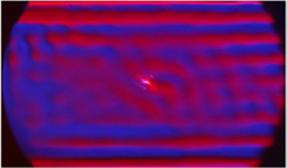
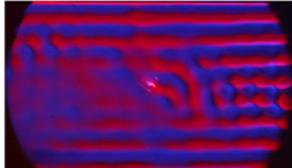
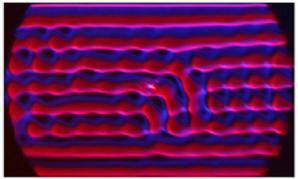
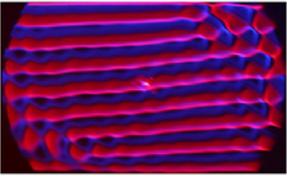
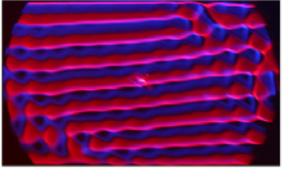
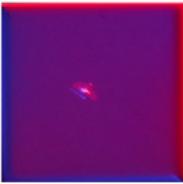
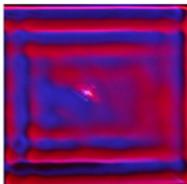
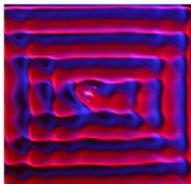
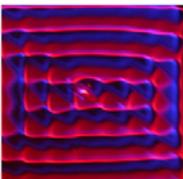
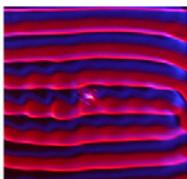
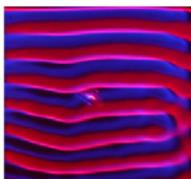
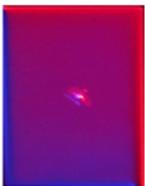
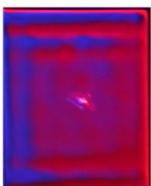
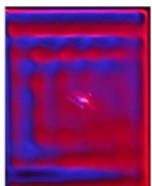
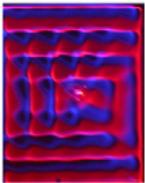
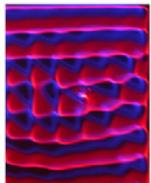
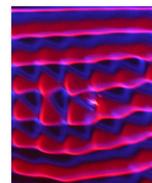


Рис.3. Коллиматорный объектив теневого прибора с диагональным зеркалом

В теоретических моделях рэлей–бенаровской конвекции (РБК) 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. С целью исследования влияния относительных размеров слоя на переход к многомасштабной рэлей–бенаровской конвекции жидкости в слоях с двумя жесткими и со свободной верхней границей при росте чисел Рэля и Марангони в стационарных и нестационарных температурных граничных условиях были проведены эксперименты. Результаты исследования рельефа поверхности представлены в табл. 1. Тенеграммы (*a-f*) отражают эволюцию рельефной структуры для горизонтальных размеров слоя жидкости ПЭС-5 – 200×100 мм, в диапазоне чисел Рэля Ra 70÷800; тенеграммы (*g - l*) отражают эволюцию рельефной структуры для горизонтальных размеров 100×100 мм, в диапазоне чисел Рэля Ra 0÷1039, тенеграммы (*m - r*) отражают эволюцию рельефной структуры для горизонтальных размеров 80×100 мм, в диапазоне чисел Рэля Ra 0÷1153.

Таким образом, в данной работе получены результаты, подтверждающие существование упорядоченных структур в открытой системе в виде простых ячеистых течений (ячеек Бенара) на поверхности жидкости, рельефная форма которых зависит от изменения температурного градиента между дном и поверхностью, а так же от геометрических граничных условий и высоты слоя исследуемой жидкости.

Табл. 1. Результаты исследования рельефа поверхности

<p>$T_a=24,3^{\circ}\text{C}$ 10:42 $Ra=72,7$</p>  <p>$T_s=26,0^{\circ}\text{C}$ $H=4,326\text{ mm}$ $T_b=24,2^{\circ}\text{C}$</p> <p><i>a</i></p>	<p>$T_a=29,4^{\circ}\text{C}$ 11:34 $Ra=845,4$</p>  <p>$T_s=63,8^{\circ}\text{C}$ $H=4,326\text{ mm}$ $T_b=85,3^{\circ}\text{C}$</p> <p><i>b</i></p>	<p>$T_a=29,2^{\circ}\text{C}$ 11:42 $Ra=987,7$</p>  <p>$T_s=60,0^{\circ}\text{C}$ $H=4,326\text{ mm}$ $T_b=85,1^{\circ}\text{C}$</p> <p><i>c</i></p>
<p>$T_a=28,9^{\circ}\text{C}$ 11:57 $Ra=839,2$</p>  <p>$T_s=66,1^{\circ}\text{C}$ $H=4,326\text{ mm}$ $T_b=87,5^{\circ}\text{C}$</p> <p><i>d</i></p>	<p>$T_a=28,9^{\circ}\text{C}$ 12:52 $Ra=755,1$</p>  <p>$T_s=67,8^{\circ}\text{C}$ $H=4,326\text{ mm}$ $T_b=87,0^{\circ}\text{C}$</p> <p><i>e</i></p>	<p>$T_a=28,8^{\circ}\text{C}$ 13:02 $Ra=748,8$</p>  <p>$T_s=67,8^{\circ}\text{C}$ $H=4,326\text{ mm}$ $T_b=86,8^{\circ}\text{C}$</p> <p><i>f</i></p>
<p>$T_a=24,9^{\circ}\text{C}$ 11:40 $Ra=-38,4$</p>  <p>$T_s=25,6^{\circ}\text{C}$ $H=4,807\text{ mm}$ $T_b=24,8^{\circ}\text{C}$</p> <p><i>g</i></p>	<p>$T_a=26,5^{\circ}\text{C}$ 12:11 $Ra=953,4$</p>  <p>$T_s=56,3^{\circ}\text{C}$ $H=4,807\text{ mm}$ $T_b=79,1^{\circ}\text{C}$</p> <p><i>h</i></p>	<p>$T_a=26,4^{\circ}\text{C}$ 12:15 $Ra=9$</p>  <p>$T_s=64,5^{\circ}\text{C}$ $H=4,807\text{ mm}$ $T_b=81$</p> <p><i>i</i></p>
<p>$T_a=26,7^{\circ}\text{C}$ 12:25 $Ra=878,4$</p>  <p>$T_s=66,6^{\circ}\text{C}$ $H=4,807\text{ mm}$ $T_b=82,9^{\circ}\text{C}$</p> <p><i>j</i></p>	<p>$T_a=28,1^{\circ}\text{C}$ 13:05 $Ra=1039$</p>  <p>$T_s=64,0^{\circ}\text{C}$ $H=4,807\text{ mm}$ $T_b=83,3^{\circ}\text{C}$</p> <p><i>k</i></p>	<p>$T_a=27,2^{\circ}\text{C}$ 13:40 $Ra=7$</p>  <p>$T_s=65,5^{\circ}\text{C}$ $H=4,807\text{ mm}$ $T_b=79$</p> <p><i>l</i></p>
<p>$T_a=25,4^{\circ}\text{C}$ 11:00 $Ra=-1,26$</p>  <p>$T_s=25,3^{\circ}\text{C}$ $H=4,659\text{ mm}$ $T_b=25,2^{\circ}\text{C}$</p> <p><i>m</i></p>	<p>$T_a=29,0^{\circ}\text{C}$ 11:32 $Ra=1114$</p>  <p>$T_s=58,4^{\circ}\text{C}$ $H=4,659\text{ mm}$ $T_b=81,1^{\circ}\text{C}$</p> <p><i>n</i></p>	<p>$T_a=29,8^{\circ}\text{C}$ 11:34 $Ra=1$</p>  <p>$T_s=60,5^{\circ}\text{C}$ $H=4,659\text{ mm}$ $T_b=82$</p> <p><i>o</i></p>
<p>$T_a=30,1^{\circ}\text{C}$ 11:38 $Ra=1153$</p>  <p>$T_s=61,2^{\circ}\text{C}$ $H=4,659\text{ mm}$ $T_b=84,7^{\circ}\text{C}$</p> <p><i>p</i></p>	<p>$T_a=29,8^{\circ}\text{C}$ 12:00 $Ra=1071$</p>  <p>$T_s=65,4^{\circ}\text{C}$ $H=4,659\text{ mm}$ $T_b=87,2^{\circ}\text{C}$</p> <p><i>q</i></p>	<p>$T_a=29,8^{\circ}\text{C}$ 12:05 $Ra=$</p>  <p>$T_s=65,8^{\circ}\text{C}$ $H=4,659\text{ mm}$ $T_b=8$</p> <p><i>r</i></p>

Пространственная форма простого ячеистого и многомодового течения исследовалась с помощью цифровой видеосъемки рельефной структуры поверхности жидкости, визуализированной с помощью созданного автоколлимационного бихроматического теневого прибора и тепловизионного сканирования свободной поверхности с последующей компьютерной обработкой видеофильмов и тепловизионных фильмов.

Тепловизионная система состоит из тепловизора и диагонального зеркала, входящего в состав оптического визуализатора. На рисунках 4 и 5 представлены принципиальная схема и фото тепловизора соответственно.

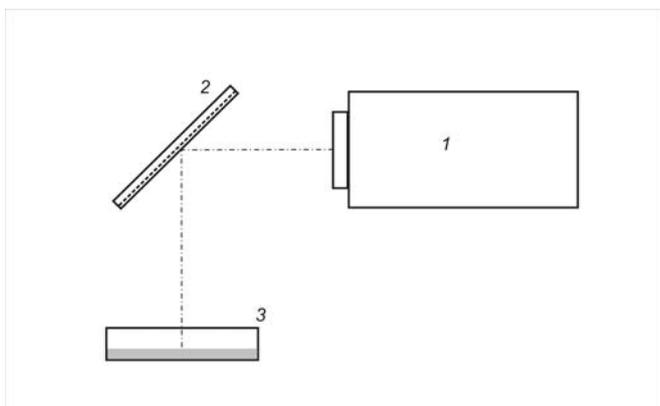


Рис.4. Оптическая схема теп-ловизионной системы: 1 – тепловизор; 2 – диагональное зеркало; 3 – кювета с исследуемой жидкостью



Рис.5. Общий вид тепловизи-онной системы, входящей в состав оптико-тепловизионного комплекса

Измерения полей температуры выполнены в объеме жидкости с использованием микротермопар и на охлаждаемой свободной границе с помощью тепловизионной методики.

Была реализована компьютерная обработка термограмм с целью установления пространственной "идентичности" рельефной структуры и распределения температуры на свободной поверхности (табл. 2): центры опускающих и поднимающих потоков ячеистых течений основных и вторичных масштабов могут быть идентифицированы при обработке тепловизионных фильмов.

Во время исследования термогравитационного перехода возникает необходимость расчета критических чисел Релея, для чего требуется знать точное значение толщины слоя исследуемой жидкости. Важно, что измерение толщины слоя жидкости с высокой точностью весьма затруднительно, для данной задачи, так как, контактный метод ее измерения влияет на распределение плотности в слое сильновязкой жидкости, а рабочая область ограничена, и составляет 750 мм.

На рисунке 6 представлена фотография дистанционного измерителя толщины слоя жидкости на базе биологического микроскопа МБР-1 с узлом плавной фокусировки на основе микромеханизма Мейера с использованием длиннофокусного фотообъектива «Юпитер-6» во время непосредственного измерения толщины слоя жидкости.

Оптическая схема прибора представлена на рисунке 7. Относительная погрешность измерения толщины слоя жидкости не превышает 15 мкм. Для увеличения точности измерения, прибор был модернизирован. Установка 2 узла плавной фокусировки на основе микромеханизма Мейера позволила перемещать светосильный объектив вдоль оси оптической системы в пределах 2 мм, с шагом 2 мкм.

Табл. 2. Установление пространственной «идентичности» рельефной структуры и распределения температуры на свободной поверхности жидкости

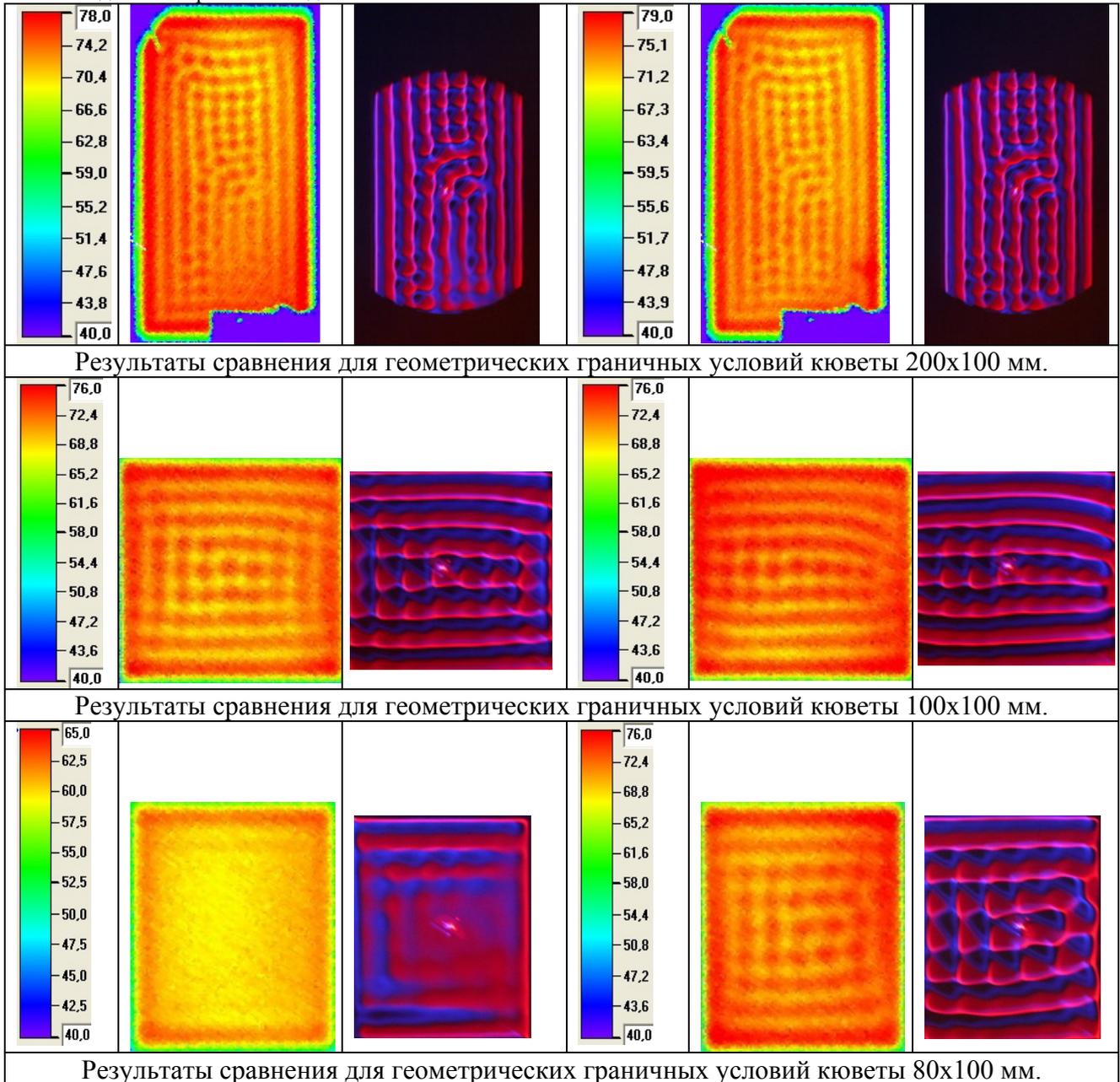




Рис. 6. Общий вид экспериментальной установки с дистанционным измерителем толщины слоя жидкости на базе микроскопа МБР-1 и длиннофокусного светосильного фотообъектива «Юпитер-6»

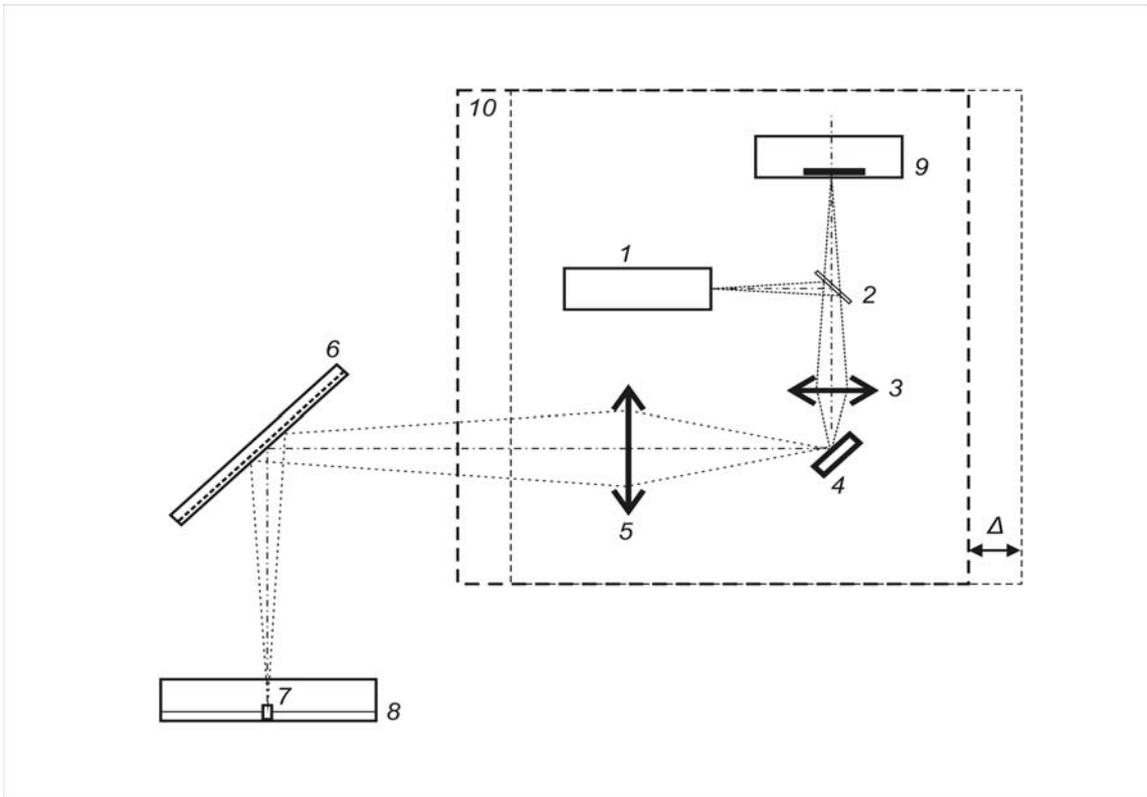


Рис. 7. Оптическая схема дистанционного измерителя толщины слоя жидкости: 1 – полупроводниковый лазерный диод; 2 – полупрозрачное тонкое диагональное зеркало; 3 – микрообъектив микроскопа МБР-1; 4 – диагональное зеркало; 5 – длиннофокусный фотообъектив «Юпитер-6»; 6 – диагональное зеркало, входящего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

С целью определения точности измерения прибора, была проведена его аттестация на различных тест-объектах, в диапазоне высот от 3050 до 5000 мкм. Результаты аттестации для трех из них приведены в табл. 3.

Табл. 3. Аттестация модифицированного измерителя толщины слоя жидкости на 3 тест-объектах (мерных стеклянных столбиках)

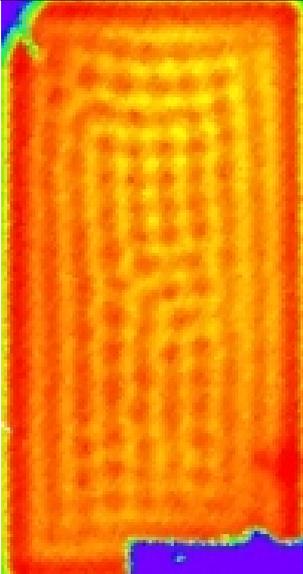
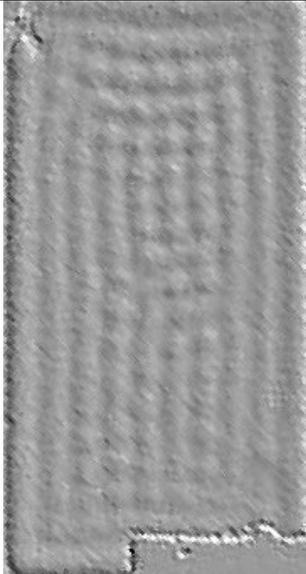
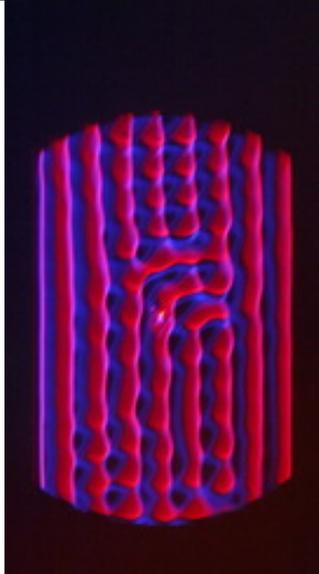
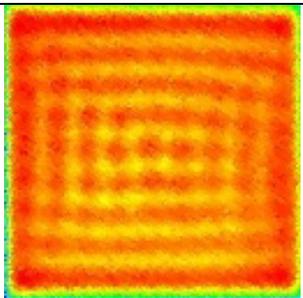
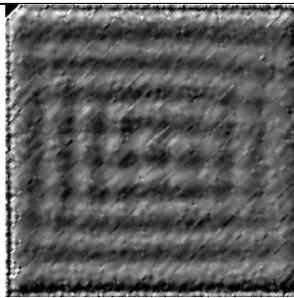
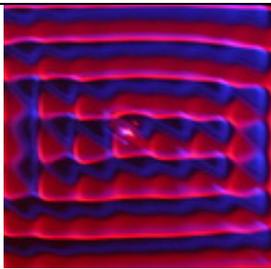
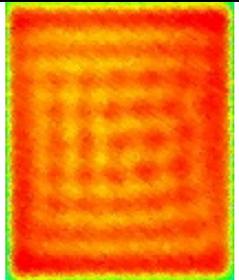
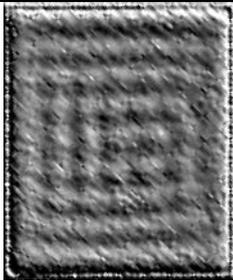
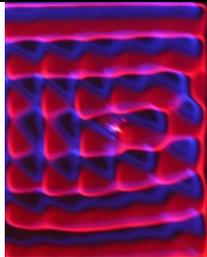
	Наименование тестового объекта		
	Тестовый объект № 1 $h_{\text{теор}} = 4070$ мкм	Тестовый объект № 2 $h_{\text{теор}} = 4530$ мкм	Тестовый объект № 3 $h_{\text{теор}} = 4060$ мкм
$H_{\text{мкм1}}$	4065	3520	4030
№	измерение с помощью микрометра 2, методом плавной фокусировки (мкм)		
1	-44	40,8	6
2	-38	44	-2
3	-46	40	4
4	-42	36	8
5	-44	39	0
6	-48	42	5
7	-42	38	-2
8	-40	44	8
9	-40	37	6
10	-38	41	2
$H_{\text{мкм2}}$	-46,2	41,8	3,5
$h_{\text{пр}} =$	$8090 - (4065 - 46,2) = 4071,2$	$8090 - (3520 + 41,8) = 4528,2$	$8090 - (4030 + 3,5) = 4056,5$
Разница	1,2 мкм	-1,8 мкм	-3,5 мкм
Относит. погрешность	0,03%	0,004%	0,09%

Оценка погрешностей показывает следующее: в исходном случае, когда погрешность измерения толщины не превышает 15 мкм, относительная погрешности при расчете чисел Релея не превышает 1 % в рабочем диапазоне толщин слоя жидкости 4–5 мм, модернизация прибора позволила уменьшить эту погрешность в три раза.

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

С целью установления идентичности с тенеграммой производится дифференцирование термограммы. Получены первые результаты, который представлены на таблице 4.

Табл. 4. Дифференцирование термограмм

		
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
		
<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
		
<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>

Далее, на рисунках 8 и 9 представлен пример обработки термограмм с помощью программы MiKroSpec, позволяющей получать распределение температуры как в сечении так и в определенном регионе термограммы. С помощью программы OriginPro (рисунок 10) была получена 3D - модель распределения температурного поля на поверхности жидкости.

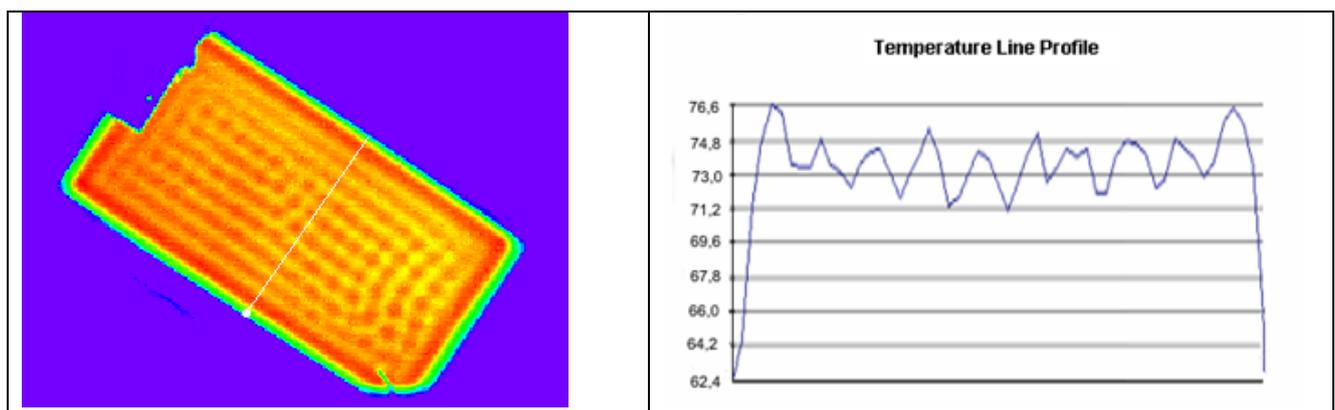


Рис. 8 Выделение сечения на термограмме в программе MiKroSpec

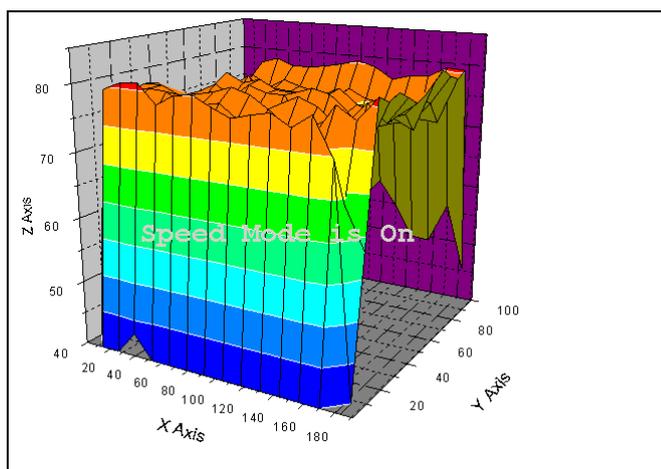


Рис. 9 Распределение поля температуры в выделенном сечении

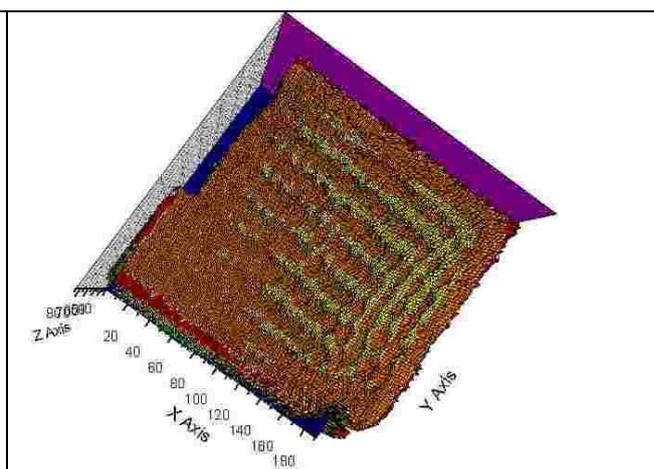


Рис. 10 Пространственная модели распределения температуры на поверхности жидкости

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методами цветной фильтрации Фуко–Гильберта и тепловизионной термографии исследована динамическая структура течения жидкости в прямоугольной полости со свободной поверхностью в режиме тепловой гравитационно–капиллярной конвекции. В синхронном режиме впервые получены хронофотографии и тепловизионные изображения структуры поверхности в режиме тепловой гравитационной конвекции при различных граничных условиях. Произведен ряд экспериментов для исследования эволюции рельефной структуры на поверхности жидкости ПЭС-5 для 3-х различных геометрических граничных условий и толщин слоя жидкости (4326; 4807 и 4659 мкм), визуализированной с помощью двухканального автоколлимационного бихроматического теневого прибора. Выполнены измерения поля температуры в объеме жидкости с использованием микротермопар и на охлаждаемой свободной границе с помощью тепловизионной методики, с последующим расчетом чисел Релея и обработкой полученных результатов с целью установления пространственной "идентичности" рельефной структуры и распределения температуры на свободной поверхности. Произведена аттестация оптического толщиномера с различными тест-объектами с целью дальнейшего его применения для измерения толщины слоя жидкости с дистанции 750 мм с относительной погрешностью не более 5 мкм.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны В.А. Арбузову, Ю.Н.Дубнищеву и В.С. Бердникову за полезные обсуждения и поддержку. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 09-08-00882).

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

Ra – число Релея;

T_s – температура на поверхности жидкости, °С;

T_b – температура жидкости на дне термостатированной ванны, °С;

T_a – температура окружающей среды над поверхностью жидкости, °С;

H – толщина слоя жидкости, мм;

$H_{мкм1}$ – толщина, измеренная с помощью микромеханизма грубой фокусировки, мкм;

$H_{мкм2}$ – толщина, измеренная с помощью микромеханизма Мейера, мкм;

$h_{теор}$ – эталонная толщина тест-объекта, мкм;

h_{np} – экспериментально-измеренная толщина тест-объекта, мкм;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Арбузов В.А., Помыткина А.С.** Оптическая диагностика динамических структур течения жидкости со свободной поверхностью в режиме тепловой гравитационно-капиллярной конвекции. ОМИП - 2009, Москва.
2. **Бердников В.С., Марков В.А.** Ламинарно–турбулентный переход в Рэлей– Бенаровской конвекции // Труды Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену, т. 3. Свободная конвекция. Теплообмен при химических превращениях. – М.: Изд-во дом МЭИ, 2006. – 358 с.
3. **Арбузов В.А., Дубнищев Ю.Н.** Методы гильберт–оптики в измерительных технологиях // Новосибирск: Издательство НГТУ, 2007. 316 с.

N.S.Bufetov^{1, 3}, E.O.Shlapakova^{1, 2}

¹ *Novosibirsk state technical university, Russia,*

630092, Novosibirsk, 20, K. Marks str., E-mail: rector@nstu.ru

² *Institute of thermophysics of S.S.Kutateladze of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Russia, 1, Acad. Lavrentyev ave., Novosibirsk, 630090, Russia,*

E-mail: aleks@itp.nsc.ru

³ *Novosibirsk state university, Russia,*

630090, Novosibirsk, 2, Pirogov str., E-mail: poly@admin.nsu.ru

HILBERT-DIAGNOSTICS OF THE RAYLEIGH- BENARD CONVECTION OF THE LIQUID WITH THE FREE SURFACE

It is created experimental combined optical and infra-red imaging complex, allowing to investigate influence of the relative sizes of a layer on transition to a multiscale Rayleigh-Bénard convection of a liquid in layers with two rigid isothermal surfaces and with free surface under stationary and non-stationary temperature boundary conditions. Visualization of superficial structure of a liquid is carried out by hilbert-optics methods in reflected light. Contactless control of a thickness of a layer of a liquid was carried out by specially developed remote measuring instrument on the basis of microscope MBR -1 with knot of smooth focusing on the basis of Meyer's micromechanism. Chronological photos dynamic changes of relief structure and a temperature field of an investigated liquid are received, besides the results confirming existence of currents in the form of two-dimensional platens with axes of rotation, parallel to lateral borders (cavity walls). It is shown that the current of strongly viscous liquid has the thermal gravitational nature. Correlation of evolution of superficial structures thermogram and hilbert shadow images in various modes of a Rayleigh-Bénard convection is established.

RAYLEIGH- BENARD CONVECTION, HILBERT OPTICS