

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Структуры на поверхности воды, наблюдаемые с помощью инфракрасной техники

Г.Р. Иваницкий, А.А. Деев, Е.П. Хижняк

Современные матричные инфракрасные камеры с температурной чувствительностью до 0,01–0,02 °C позволили по-новому взглянуть на многие процессы в физике, химии и биологии, связанные как с теплопродукцией, так и подвижностью жидкостей, возникающей под действием локальных температурных градиентов. Важной представляется подвижность воды, особенно при исследовании механизмов образования в воде структур, связанных с конвекцией Рэлея–Бенара. Инфракрасная техника дает возможность визуализировать различные структуры в воде.

PACS numbers: 07.57.-c, 42.27.Te, 68.03.-g

Содержание

1. Введение (1207).
2. Современная тепловизионная техника (1207).
3. Ячеистые макроструктуры, возникающие при конвекции воды (1209).
4. Спиральные макроструктуры, возникающие при конвекции воды (1211).
5. Подвижность перфтордекалиновой капли на поверхности воды (1213).
6. Заключение (1215).

Список литературы (1215).

1. Введение

Инфракрасное (ИК) излучение в диапазонах длин волн 3–5 и 8–12 мкм слабо поглощается и рассеивается в воздухе. В результате удается регистрировать пространственно-временное распределение температуры в различных объектах как физической, так и биологической природы.

Г.Р. Иваницкий, А.А. Деев. Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН,
142290 Пущино, Московская обл., ул. Институтская 3,
Российская Федерация
Тел. (0967) 73-24-81. Факс (0967) 79-05-53
E-mail: ivanitsky@iteb.ru
E-mail: deev@iteb.ru

Е.П. Хижняк. Институт биофизики клетки РАН,
142290 Пущино, Московская обл., ул. Институтская 3,
Российская Федерация
Тел. (0967) 73-24-81. Факс (0967) 79-05-53
E-mail: eugene@iteb.ru

Статья поступила 29 марта 2005 г.,
после доработки 26 июля 2005 г.

2. Современная тепловизионная техника

Тепловизионная техника 20–30 лет назад использовалась главным образом для военных целей. Сегодня она стала информационной технологией с обширной областью применения. В третьем поколении тепловизоров отсутствуют оптико-механические развертки изображения, поэтому они имеют большое быстродействие, сравнительно малые массу, габариты и энергопотребление, кроме того, отличаются бесшумной работой при высоком отношении сигнал/помеха. Современным тепловизорам свойственны хорошее качество изображения и возможность связи с компьютерами, что позволяет производить цифровую обработку изображения в реальном масштабе времени.

Наиболее распространенные матричные инфракрасные камеры третьего поколения с температурной чувствительностью до 0,02 °C, времененным разрешением 100–200 кадров в секунду и пространственным разрешением $(3–5) \times 10^{-5}$ м основаны на матричной регистрации сигналов. Размер матрицы составляет 320×240 пикселей, что уже позволяет по-новому взглянуть на процессы, связанные как с теплопродукцией, так и подвижностью веществ, возникающей под действием локальных температурных градиентов, а также с информационными процессами обнаружения объектов, излучающих тепло, их распознаванием и классификацией. Инфракрасные излучения возникают как результат колебаний не электронов, а атомов внутри молекул, поэтому в ряде случаев удается реализовать на основе таких измерений дистанционную ИК-спектроскопию с идентификацией молекул.

Около 20 фирм в США, Франции, Швеции, Японии, Китае и России выпускают тепловизоры третьего поколения. Лучшие образцы уже достигли температурного разрешения 0,01 °C, пространственного разрешения 640×512 пикселей и временного разрешения до 8000 кадров в секунду. В ближайшее время ожидается появление на рынке камер с матрицей до 960×1280 пикселей и

амплитудным разрешением до $0,001^{\circ}\text{C}$ с теми же временными параметрами. Современные тепловизоры имеют термоэлектрическое охлаждение, и им не нужны специальные хладоагенты.

Плоскостные матрицы из ИК-фотоприемников могут быть выполнены на основе многих материалов: халькогенидов свинца, соединения кадмий–рутуть–теллур, антимонида индия, силицида платины, примесных кремния и германия, многослойных структур с квантовыми ямами на базе так называемых детекторов QWIP (Quantum Well Infrared Photodetector). Теоретические основы создания тепловизионной техники рассмотрены в работе [1–5].

Тепловидение — это не только измерение температурного рельефа поверхности объекта. Ключевая часть термина "тепловидение" есть "видение". Терповидение — это информационный процесс, позволяющий обозреть объект целиком, выделить на нем и внутри него источники тепла, их существенные признаки, распознать и классифицировать их.

В наших экспериментах использовались термовизионные системы (тепловизоры) с матрицей из антимонида индия, работающие в диапазоне длин волн 3–5 мкм с температурной чувствительностью не хуже

$0,02^{\circ}\text{C}$ при скорости регистрации 150 кадров в секунду и в диапазоне длин волн 8–12 мкм с чувствительностью $0,04^{\circ}\text{C}$, пространственным разрешением 320×240 элементов на кадр, что с учетом оптики позволяет регистрировать события с абсолютным пространственным разрешением до 30 мкм. Уменьшая количество кадров, путем накопления сигнала можно повысить температурную чувствительность тепловизоров до $0,01$ – $0,005^{\circ}\text{C}$. Как известно, температурная чувствительность увеличивается пропорционально $t^{1/2}$, где t — время накопления сигнала.

Три приведенных ниже иллюстрации демонстрируют возможности тепловизоров третьего поколения. На рисунке 1 показана кирпичная кладка стены, которая благодаря тепловизору выявляется даже через слой штукатурки толщиной 3 см [6]. На рисунке 2 приведен один из примеров медицинской диагностики [7–9]. На рисунке 3 представлен пример, демонстрирующий пространственную разрешающую возможность техники. Удается увидеть на теле человека раскрытие одиночной потовой поры-канальца размером около 30 мкм. Темные точки на пальцах руки — потовые отверстия.



Рис. 1. Обнаружение кладки стены через слой штукатурки: (а) изображение стены в видимом свете, (б) изображение стены в тепловизоре.

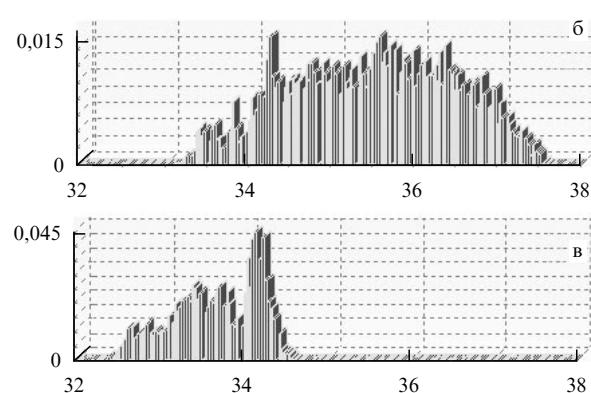


Рис. 2. Пример диагностики с помощью термографии расширения вен в области голени левой ноги: (а) термопортрет ног больного; (б, в) нормированные гистограммы распределения температур соответственно на голени левой и правой ноги. По оси абсцисс отложена температура в градусах Цельсия, по оси ординат — нормированные значения гистограммы в частях от общей площади гистограммы, принятой за единицу.

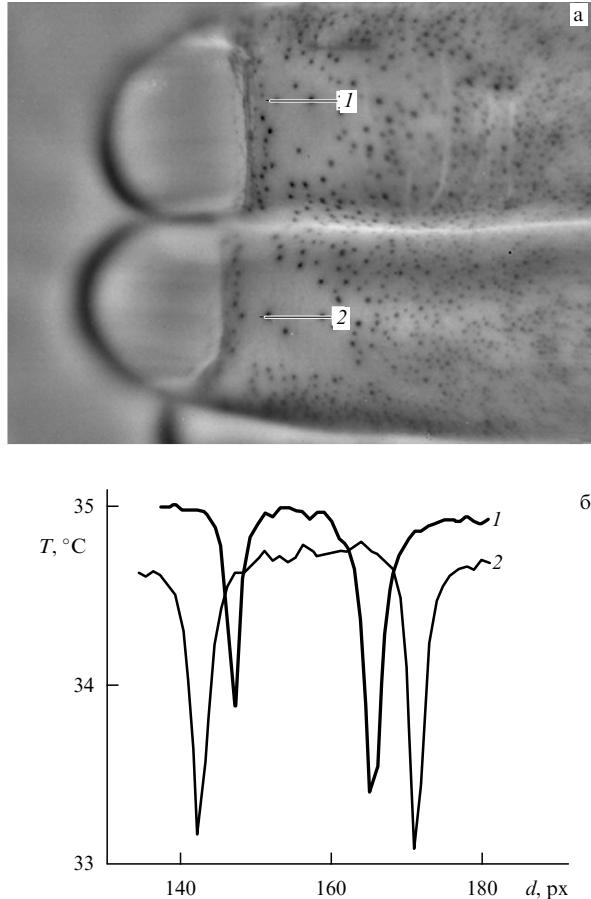


Рис. 3. Термографическая визуализация открытых каналов потовых желез на поверхности руки. Температурное разрешение 20 мК, пространственное разрешение до 30 мкм. (а) Термопортрет пальцев руки с потовыми канальцами (темные точки). (б) Температурный профиль по линиям 1 и 2 на двух пальцах, показанных на рис. а; по оси абсцисс отложено расстояние d по линиям 1 и 2 в пикселях (px); масштаб: 1 мм = 8 px.

Настоящая статья посвящена описанию наблюдений структур, возникающих на поверхности воды, с помощью тепловизора. Поскольку вода является основой всего живого, а поверхность живых организмов покрыта слоем влаги, то нам представлялось интересным с помощью инфракрасной техники увидеть тепловые макроструктуры, образующиеся в воде при ее остывании в диапазоне физиологических температур от 20 °С до 40 °С.

3. Ячеистые макроструктуры, возникающие при конвекции воды

На рисунке 4а показаны ячейки в воде, зарегистрированные нами с помощью ИК-техники в диапазоне 8–12 мкм. Невооруженным глазом в видимом диапазоне длин волн они практически не видны. На рисунке 4б–д приведены температурные профили по различным направлениям в объеме воды. Температурные градиенты приводят к возникновению ячеистой структуры воды.

До недавнего времени наиболее распространенным способом визуализации являлся так называемый теневой метод [10], который основан на температурной зависимости коэффициента преломления света. Холодные

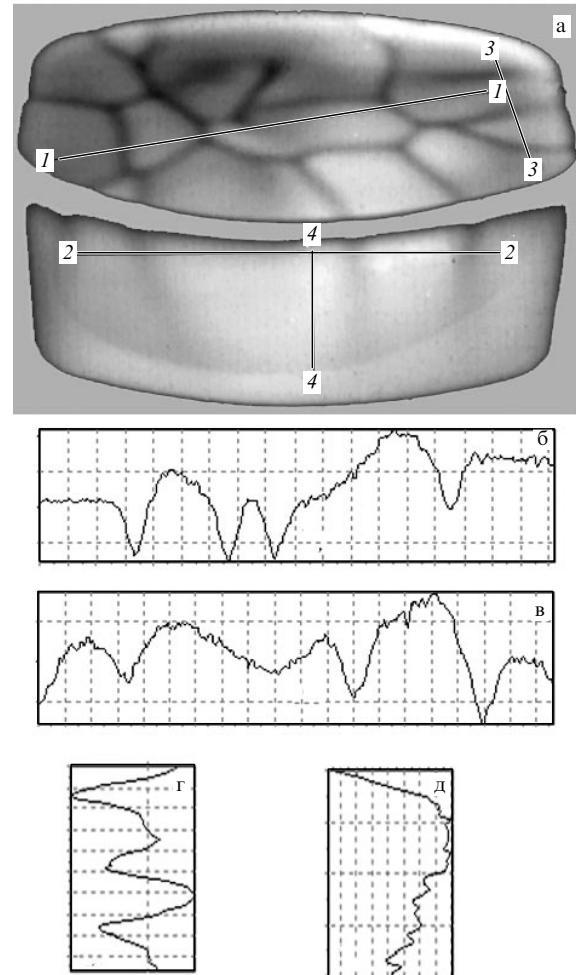


Рис. 4. Ячейки в воде, возникающие за счет ее испарения и наблюдаемые в ИК-диапазоне 8–12 мкм в сосуде диаметром 17 см. Температурные профили по выделенным направлениям — линиям, указанным на рис. а, — соответственно 1–1 (б), 2–2 (в), 3–3 (г), 4–4 (д). На всех четырех профилях температурный масштаб одинаковый, расстояние между горизонтальными штриховыми линиями соответствует 1 °С по оси ординат.

нисходящие потоки фокусируют свет и в проекции на экран выглядят светлыми, а теплые восходящие течения, рассеивающие свет, выглядят темными. Однако теневой метод имеет сравнительно низкую разрешающую способность. Для визуализации применялись также специальные добавки (пудры или красители) [11], доплеровский эффект на основе лазерного облучения образца [12] и оптическая интерферометрия [13]. Тепловидение позволяет не только наблюдать неразличимые глазом структуры воды, но и регистрировать динамику их изменения.

На математическом описании этих процессов мы останавливаться не будем. В УФН уже был опубликован обзор на эту тему [10].

Здесь мы ограничимся лишь некоторыми замечаниями по поводу механизмов образования ячеистых структур в воде. Для оценки влияния того или иного параметра на структуры в воде, как и в других жидкостях, обычно используют совокупность безразмерных показателей (числа Рэлея, Прандтля, Марангони и др.). Напомним, что число Рэлея (Ra) определяет конвекционную неустойчивость, вызываемую изменением плотности жидкости по глубине при изменении температуры.

Величина этого числа зависит от внешних условий (интенсивности нагрева) и пропорциональна разности температур ΔT между слоями жидкости.

Число Прандтля (Pr) — это отношение кинематической вязкости (v) жидкости к ее температуропроводности (α). Физический смысл числа Прандтля можно пояснить следующим примером. Период колеблющегося поверхностного слоя жидкости по порядку величины совпадает со временем диффузии тепла h^2/α , где h — вертикальный размер, т.е. толщина слоя жидкости. Одновременно имеет место и низкочастотная конвекционная неустойчивость, приводящая к перестройке структуры в целом, с периодом h^2/v . Для жидкостей с разной температуропроводностью и вязкостью эти величины будут различаться. Например, вязкость воды на несколько порядков меньше, чем масел (кинематическая вязкость воды $v_w = 1 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$, а например, силиконового масла $v = 9000 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$), поэтому запуск низкочастотных конвекционных процессов в воде требует меньших температурных перепадов от слоя к слою, чем в масле. Кроме того, вязкость масел сильно зависит от температуры. Напомним, что для воды число Прандтля изменяется в диапазоне температур от 0° до 100°C приблизительно в 8 раз (Pr = 13,5 при $T = 0^\circ\text{C}$, при $T = 100^\circ\text{C}$ Pr = 1,75), а например, в трансформаторном масле в этом же диапазоне температур Pr изменяется от 43,9 до 866, т.е. почти в 20 раз. Для жидких металлов Pr ≪ 1, причем его зависимость от температуры слабая (например, для щелочного металла натрия при изменении температуры от 100°C до 700°C число Pr изменяется от 0,0115 до 0,0039, т.е. всего в 3 раза). Таким образом, число Прандтля характеризует параметры самой жидкости.

Если число Прандтля не слишком мало, то при переходе через порог устойчивости в жидкости возникает тепловая конвекция в виде стационарного течения. Если число Рэлея превышает критическое, то могут появиться две или более продольные и поперечные моды. Первые соответствуют конвекции вдоль оси сосуда, вторые — поперечным колебанием на поверхности в плоскости перпендикулярной оси. В результате на поверхности воды появляется изрезанная структура [14–19].

На рисунке 5 показана диаграмма режимов конвекции как функция чисел Рэлея и Прандтля, в которой суммированы экспериментальные данные ряда авторов [20–23]. Ниже линии I (Ra = Ra_c) располагается область устойчивого состояния жидкости, а выше — область стационарной валиковой конвекции. Кривая II — это порог, выше которого поперечно-валиковая неустойчивость переходит в двухмодовую конвекцию. Расщепление кривой III на две ветви связано с тем, что форма структур начинает сильно зависеть от предыстории (случайно возникших неоднородностей). Неоднородности могут порождать колебания отдельных объемов жидкости (кривая IIIa). Если неоднородности попытаются убрать, то стационарная картина будет возникать при больших значениях Ra (ветвь IIIb). Кривая IV соответствует появлению высших гармоник в спектре колебаний при изменении теплового потока. Над кривой V находится область полностью турбулентной конвекции [10].

Однако в любой жидкости, в том числе и в воде, набор конвективных структур оказывается богаче представленного на диаграмме рис. 5. Точную диаграмму всех

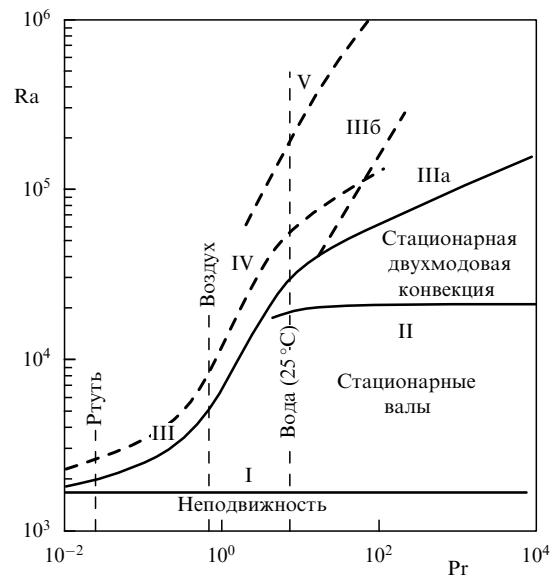


Рис. 5. Диаграмма режимов конвекции — по осям чисел Рэлея $\text{Ra} = \rho_0 \alpha g V \Delta T / (\rho_1 v \alpha)$ и Прандтля $\text{Pr} = v/\alpha$ (пояснения в тексте), где ρ_0 — начальная плотность воды (при температуре T_1), ρ_1 — ее конечная плотность (при температуре T_2), α — изобарический коэффициент теплового расширения, g — ускорение свободного падения тела, $\Delta T = T_2 - T_1$, V — выделенный единичный объем жидкости, α — коэффициент температуропроводности, $\alpha = \mu c_p / \lambda$, μ — коэффициент динамической вязкости, c_p — удельная теплоемкость среды при постоянном давлении, λ — коэффициент теплопроводности, v — кинематический коэффициент вязкости, $v = \mu / \rho$.

образующихся в жидкостях структур построить невозможно. Их разнообразие зависит не только от переходов между различными видами конвекции, но и от формы и глубины резервуара, материала его стенок (смачиваемые или не смачиваемые жидкостью), начальных условий возникновения конвекции и т.д. В реальных жидкостях встречаются не только ячейки и волны, но, как будет показано в разделе 4, могут возникать протуберанцы и спиральные структуры. Довольно подробное описание основных переходов между различными режимами можно найти в книге [24].

При испарении воды с поверхности движущая сила вертикальной конвекции в основном сосредоточена в средних слоях воды, где температура максимальна (см. рис. 4). Однако запускающий движение механизм связан с поверхностью жидкости и определяется понижением ее температуры, возникающим в результате испарения воды. Температура поверхности за счет испарения жидкости всегда ниже, чем внутренних слоев. Любопытно отметить, что наличие вертикального температурного градиента — это необходимое, но недостаточное условие крупномасштабной конвекции. Существенную роль играет величина этого градиента. Чтобы появилась подъемная сила Архимеда и началось вертикальное движение, необходимо выполнение следующего условия: *температурные изменения на поверхности не должны успевать диссилировать за счет температуропроводности, не вызывав вертикального перемещения жидкости*. Этот факт, по-видимому, был известен Рэлею [25, 26].

Таким образом, возникают два характеристических времени: τ_n — время перемещения и τ_p — время тепловой релаксации. Первое обратно пропорционально коэффи-

циенту изобарического теплового расширения, а второе — обратно пропорционально температуропроводности (теплопроводности) жидкости. Условие движения — $\tau_p > \tau_n$ [27–29].

Процесс образования макроструктур в воде при ее конвекции является хорошей иллюстрацией механизма самоорганизации при переходах хаос \leftrightarrow порядок, происходящих при появлении температурных градиентов [30, 31]. При этом молекулы воды под действием тепловых градиентов вместо случайного движения начинают демонстрировать коллективное направленное движение. Напомним, что ячеистые структуры (ячейки Бенара) — это наиболее яркий пример самоорганизации. В ставшей классической работе Бенара [11] наблюдались ячейки (позднее названные его именем), которые возникали в подогреваемом снизу жире кашалота.

Хотя ячеистая структура поддерживается за счет вертикальных перемещений жидкости, она возникает не только за счет конвекции Рэлея. В этом процессе "тонкий слой" является ключевым понятием [32]. На это впервые обратил внимание Марангони (P. Marangoni), который наблюдал, что при окрашивании достаточно горячей поверхности в слое жидкой краски возникают ячейки. Эти ячейки не перестают появляться, если окрашивающий лист поставить вертикально, при этом конвекция (силы Архимеда) отсутствует. Ячейки возникают на вертикальных листах за счет *термокапиллярного эффекта*, связанного с изменением поверхностного натяжения жидкости, при выполнении условия $Ma > 1$, где Ma — число Марангони:

$$Ma = \frac{\Delta\sigma}{\rho v \kappa} r,$$

здесь $\Delta\sigma$ — изменение коэффициента поверхностного натяжения вдоль поверхности жидкости, r — радиус ячейки, возникающей на поверхности, ρ — плотность, v — кинематический коэффициент вязкости, κ — коэффициент температуропроводности.

Итак, для образования ячеистой структуры необходимо одновременное выполнение двух условий. Во-первых, наличие градиента, т.е. двух разделенных в пространстве областей — нагретой и холодной, что обеспечивает движение жидкости вверх-вниз и задает вектор его направления. Во-вторых, необходимы взаимодействия между модами, возникающими в процессе движения. В результате конкуренции "выживает" и стабилизируется одна пространственно-временная мода, которая проявляется в виде устойчивой ячеистой структуры [10, 30].

В условиях незначительных температурных градиентов структуры, которые возникают на поверхности жидкости при естественном испарении (без нагрева), плохо видны невооруженным глазом. С помощью тепловизора их удается увидеть.

4. Спиральные макроструктуры, возникающие при конвекции воды

Наряду с ячейками при конвекции Рэлея — Бенара в жидкостях при определенных условиях можно наблюдать возникновение спиральных структур или круговых структур типа воронок. Более 10 лет назад они были обнаружены в работе [36].

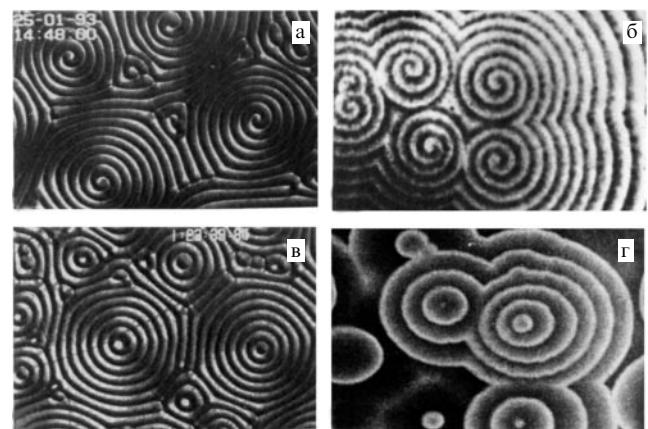


Рис. 6. Два вида похожих конвективных структур: (а) спиральные волны в жидкой фторированной сере SF₆ [36]; (б) спиральные волны в реакции Белоусова — Жаботинского [34]; (в) круговые структуры типа мишеней в жидкой фторированной сере SF₆ [36]; (г) круговые структуры типа мишеней в реакции Белоусова — Жаботинского [34].

Такие структуры наблюдали в жидкой фторированной сере SF₆ плотностью $\rho_c = 0,73 \text{ г см}^{-3}$, при температуре $T = 45,7^\circ\text{C}$ и давлении $P = 37,8$ бар в сосуде диаметром 102 см и глубиной 19 см. При числах $Pr < 3,5$ наблюдаются спиральные структуры, а при $Pr > 3,5$ вплоть до значения $Pr = 30$ возникают структуры типа круговых воронок (рис. 6а, в). Любопытно отметить, что внешне похожие структуры можно наблюдать в тонком слое воды в колебательной реакции Белоусова — Жаботинского (рис. 6б, г).

Авторы работы [36] ссылаются на эту реакцию. Однако механизм возникновения подобных структур в реакции Белоусова — Жаботинского другой, связанный не с конвекцией Рэлея — Бенара, а с автоволновыми процессами, происходящими в тонком слое жидкости при колебательной реакции окисления аналогов малоновой кислоты броматом в присутствии в качестве катализаторов металлов с переменной валентностью — церия или железа. Этот процесс был исследован нами более 20 лет назад [33–35]. Различные варианты автоволновых процессов и их математические модели были рассмотрены в обзоре [37], опубликованном в УФН.

Недавно с помощью тепловидения нам удалось наблюдать спиральные структуры при исследовании остывания воды в прямоугольном пластмассовом резервуаре площадью 35×24 см и глубиной 2,5 см. Если в такой неподвижный сосуд налить воду, нагретую до $T = 36,6^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}$, то в ней появляется спиральная структура. Две наблюдаемые спирали закручены в противоположные стороны. В данном случае появление такой структуры определяется конвекцией Рэлея — Бенара. Эти структуры возникают при атмосферном давлении в диапазоне температур от $36,6^\circ\text{C}$ до $34,8^\circ\text{C}$ при $Pr < 6,5$ и при температуре в комнате $21,5^\circ\text{C}$. Наличие этих структур можно наблюдать в течение 3 минут. На рисунке 7 показана фильмограмма этого процесса, заснятая в ИК-диапазоне (8–12 мкм). На первый взгляд может показаться, что изначальная картина, приведенная на рис. 7, связана с искусственно созданным потоком жидкости, направленным от одного края резервуара к другому. Однако это не так. Образование спиральной структуры возникает за счет конвекционных потоков.

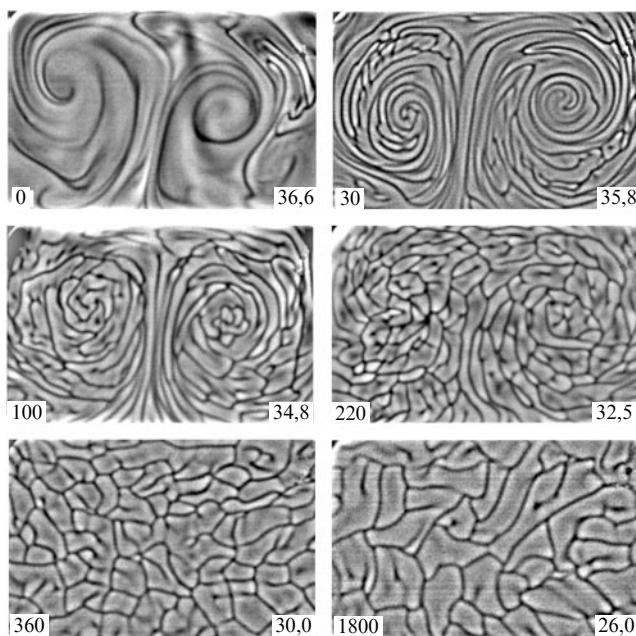


Рис. 7. Фильмограмма структур в наблюдаемом в ИК-диапазоне 8–12 мкм переходном процессе при остывании воды в прямоугольном резервуаре размером $35 \times 24 \times 2$ см. Диапазон температур от 36,6°C до 26°C. В левом нижнем углу каждого кадра указано время в секундах, в правом нижнем углу — температура воды в градусах Цельсия. Температура в комнате 21,5°C.

Хотя нельзя полностью исключить, что она не провоцируется начальными условиями — самим процессом заливания жидкости в прямоугольный резервуар.

По мере остывания воды спиральные структуры постепенно распадаются на отдельные ячейки и, когда в течение 9 минут температура воды понижается до 29°C, структура воды становится ячеистой без спиральных образований. Дальнейшее изменение этих ячеистых структур происходит медленно. Даже если вода в среднем имела температуру равную температуре окружающей среды, то за счет испарения с поверхности резервуара существует температурный градиент в ее объеме, поэтому конвекция сохраняется, что и приводит к поддержанию ячеистой структуры. Эта структура исчезает только в том случае, если испарение прекращается, например, когда резервуар закрывают крышкой.

Известно, что вид структур зависит не только от физических свойств жидкости и места нагрева, но и от формы резервуара [38]. На рисунке 8 приведена фильмо-грамма структур, возникающих в воде при ее остывании, но в отличие от случая, соответствующего рис. 7, вода наливается в круглый неподвижный сосуд диаметром 17 см. Остальные параметры такие же, как на рис. 7. В круглом пластиковом сосуде спиральные макровихри не наблюдаются, но при тех же температурах имеют место многочисленные круговые микровихри-воронки — темные точки на рис. 8. По мере остывания воды микровихри-воронки постепенно исчезают, а вся структура распадается на отдельные ячейки неправильной формы. В остывшей воде и в прямоугольном, и в круглом резервуарах ячеистые структуры практически не отличаются друг от друга.

Возможность образования структур в воде также зависит от глубины слоя жидкости. Зависимость обра-

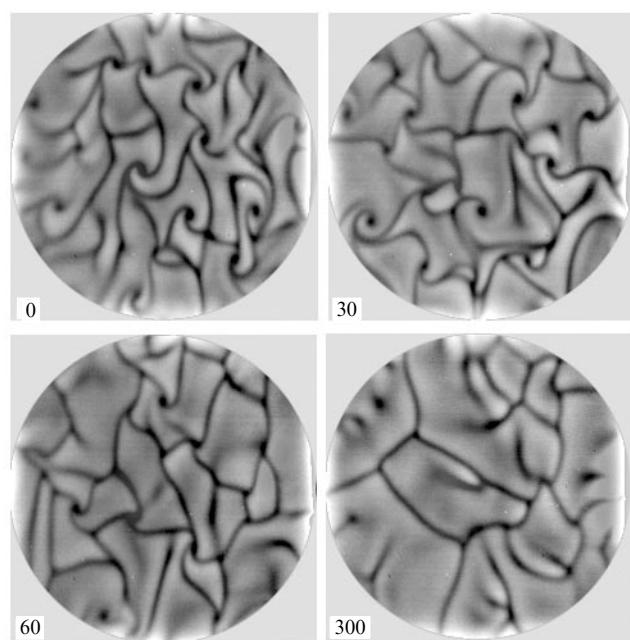


Рис. 8. Фильмограмма структур в наблюдаемом в ИК-диапазоне 8–12 мкм переходном процессе при остывании воды в круглом резервуаре диаметром 17 см. Диапазон температур от 40°C до 20°C. В левом нижнем углу каждого кадра показано время в секундах. Температура в комнате 21,5°C.

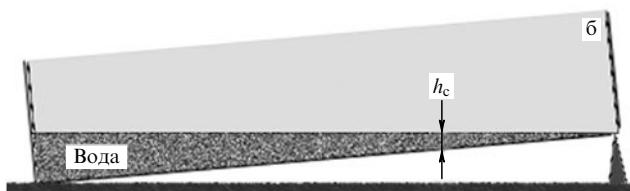
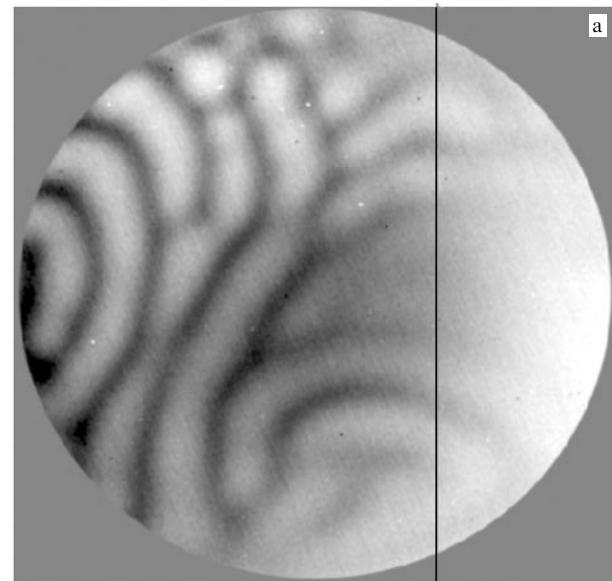


Рис. 9. (а) Структуры, образующиеся в наклоненном сосуде. (б) Изменение толщины слоя воды h с помощью наклона сосуда, h_c — критическая толщина слоя, при достижении которой прекращается формирование структуры. Диаметр сосуда 17 см. В левом нижнем углу рисунка глубина слоя воды соответствует 10 мм, $h_c = 0,2$ мм.

зования структур от глубины легко выяснить с помощью простого эксперимента (рис. 9). Период колеблющегося поверхностного слоя и низкочастотная вертикальная конвекция пропорциональны h^2 , где h — глубина слоя жидкости. При наклоненном сосуде там, где $h < h_c$, ячейки Рэлея — Бенара исчезают.

5. Подвижность перфтордекалиновой капли на поверхности воды

Известно, что, наблюдая за движением капель различных жидкостей по поверхности воды, можно исследовать как физико-химические свойства самой воды, так и веществ, образующих капли [39–43]. В нашем случае использовалась капля из перфтордекалина. Интерес биофизиков к перфторуглеродным соединениям связан с большой способностью последних растворять газы, поэтому они находят широкое применение при создании различных медицинских препаратов (газотранспортные кровезаменители, мембраномодифицирующие агенты, раневые покрытия и т.д.).

Перфтордекалин — соединение не полярное, по структуре похожее на нафталин, но все молекулы водорода в нем замещены фтором ($C_{10}F_{18}$). Для этого соединения, которое относится к группе жидких перфторуглеродов, как и для всех других перфторуглеродов, характерна химическая инертность и нерастворимость в воде [44, 45]. Молекулы перфторуглеродов по поверхностному заряду практически нейтральны. В результате межмолекулярные электрические взаимодействия в жидких перфторуглеродах ничтожно малы. По сути перфторуглеродные жидкости по своим свойствам похожи на газ. Этим и объясняется их крайне низкое поверхностное натяжение — меньше 20 дин см^{-1} (поверхностное натяжение воды порядка 70 дин см^{-1}) и высокая газорастворяющая способность (объемная растворимость O_2 до 50 об. %, CO_2 до 200 об. %).

Недавно было обнаружено, что четырехкомпонентная система вода — липид — перфторуглерод — воздух демонстрирует необычное физическое явление — самоизвольную подвижность липида [39, 41–43]. В работе [39] нами был рассмотрен механизм этого явления, который связан с различным объемным расширением, а также с изменением поверхностного натяжения и испарением этих трех веществ. Следует отметить, что в прошлом году была опубликована аналогичная работа группы японских ученых во главе с Ютака Сумино (Yutaka Sumino) из Киото [46]. Авторы работы [46] сделали систему с раствором поверхностноактивного вещества (триметиламмониум хлорид и нитробензен с натриевым иодидом), в которой капля масла совершила при определенных граничных условиях колебательное пространственное перемещение. Очевидно, что возможны и другие варианты подобных четырехкомпонентных и более чем четырехкомпонентных систем. На описании подобных многокомпонентных систем мы останавливаться не будем, поскольку при их исследовании не использовались тепловизионные системы. Читатель может ознакомиться с некоторыми из них по литературным источникам, например, обзору [43] в УФН.

Ограничимся одним примером с использованием тепловидения. Нами недавно было показано, что даже в трехкомпонентной системе капля перфтордекалина —

— поверхность воды — воздух также возникает самопроизвольная подвижность капли [41]. Был проведен следующий эксперимент. Чашка Петри диаметром 9 см заполнилась дистиллированной водой приблизительно на 5 мм при температуре около 24 °C. На поверхность воды помещалась капля перфтордекалина объемом 2 мкл (рис. 10а).

Перфтордекалин тяжелее воды почти в 2 раза, но тем не менее капля не тонет, а остается на поверхности воды. Удержанию капли на поверхности воды способствует гидрофобность поверхности капли. Растворимость перфтордекалина в воде очень мала (3×10^{-6} об. %). Другой причиной, способствующей удержанию капли, является высокое поверхностное натяжение воды. Сила, поддерживающая каплю, создается изгибом поверхности воды под тяжестью лежащей на ней капли. Схематический вид капли на поверхности воды показан на рис. 10б.

При наблюдении за поведением капли перфтордекалина были обнаружены два режима ее движения: во-первых, самопроизвольное сравнительно быстрое стохастическое движение по поверхности воды, на первый взгляд похожее на броуновское, во-вторых, медленный дрейф без выраженных изломов траектории.

Траектории движения капли в быстром и медленном режимах показаны на рис. 10в, г. При быстром движении прямолинейный пробег от 1 до 4 см чередуется со случайными изменениями направления движения, скорость движения капли при этом составляет 0,75–1 мм с^{-1} . В случае движения капли в медленном режиме скорость не превышает 0,1 мм с^{-1} , т.е. на порядок меньше (рис. 10г). Капля перфторуглерода объемом 2 мкл имеет массу 4 мг, т.е. является слишком тяжелым объектом, чтобы ее подвижность можно было объяснить случайными ударами молекул воды (как обычно объясняют броуновское движение).

Проведенные эксперименты позволили установить, что движение капли провоцируется ударами о нее пузырьков воздуха, растворенного в воде. Если дистиллированную воду налить в чашку Петри и дать воде в открытой чашке отстояться в течение суток, то содержание воздуха в ней уменьшится, и вода придет в равновесие по газовому балансу с окружающей средой. В этом случае в ней будет растворено менее 2 об. % газов воздуха (при $T = 24^\circ\text{C}$). Если на поверхность такой воды поместить каплю перфтордекалина, то капля будет или медленно дрейфовать, или оставаться практически неподвижной. Если же каплю поместить на поверхность только что налитой в чашку Петри воды, которая всосала воздух в процессе струйной заливки, то капля начнет активно двигаться.

Поверхностное натяжение воды в 3–4 раза выше, чем жидких перфторуглеродов. Эти особые свойства перфторуглеродов определяют характер их взаимодействий как с водой, так и с микропузырьками воздуха, выходящего из воды. "Бильярдная модель", которую часто используют для объяснения механизмов броуновского движения, в данном случае не применима. Взаимодействие микропузырьков газа, растворенных в воде, с перфторуглеродной каплей — это не передача энергии при столкновении упругих шаров, а процесс взаимодействия на границе двух жидкостей с разными поверхностными натяжениями и растворимостями газов.

Каждый микропузырек, выходящий из воды и контактирующий с перфторуглеродной каплей, обладает

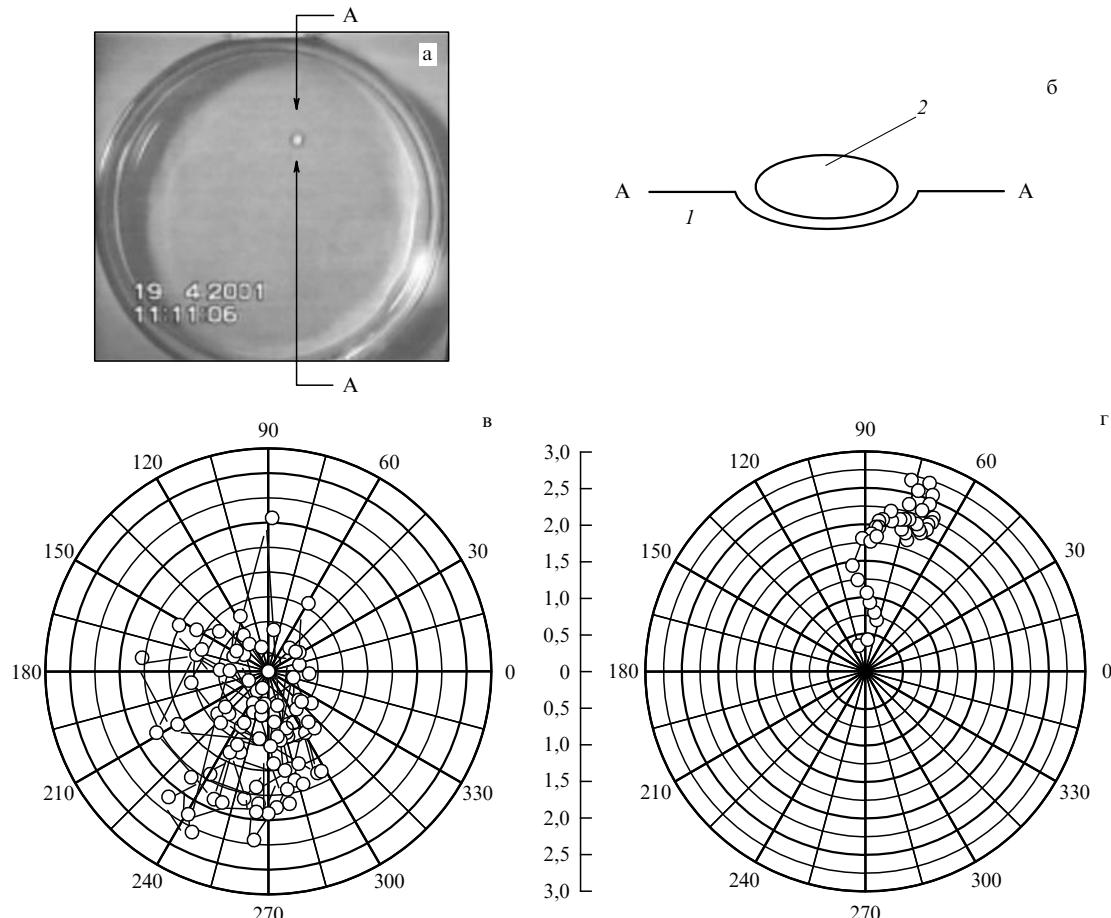


Рис. 10. Движение капли перфтордекалина по поверхности воды: (а) фотография капли в чашке Петри (диаметр чашки 9 см); (б) схема поперечного сечения капли по линии АА (см. рис. а), 1 — вода, 2 — перфтордекалиновая капля; (в) траектория движения капли при быстром движении; (г) траектория движения капли при медленном движении (начальное положение капли находится в начале координат). Временной интервал регистрации положения капли на поверхности воды 3 с.

кинетической энергией, но весьма незначительной. Элементарные расчеты показывают [41], что кинетическая энергия микропузырька воздуха размером 0,5 мм имеет порядок 10^{-11} эрг. Этой энергии недостаточно, чтобы заставить двигаться перфторуглеродную каплю массой 4 мг. Главным источником энергии является не кинетическая энергия удара, а энергия, связанная с разрушением микропузырька при его взаимодействии с каплей. Микропузырек при контакте с каплей разрушается; воздух, находящийся в нем, переходит в перфторуглеродную каплю. Этот процесс и является основным источником энергии. Выделяемая при этом энергия для микропузырька размером 0,5 мм составляет порядка 1 эрг. Таким образом, подвижность капли в основном определяется процессами разрушения микропузырьков.

При наблюдении за движением капли с помощью тепловизора выявились еще одна особенность. Движущаяся капля оставляет за собой след разогретой воды. Образование светлого следа наблюдалось только в случае быстрого движения капли (рис. 11), т.е. когда вода была насыщена газом [47]. Если газ в воде отсутствовал и капля перфтордекалина не двигалась, то на поверхности воды наблюдалось только темное, практически неподвижное пятно холодной капли.

Формирование теплового шлейфа за каплей обусловлено тем, что температура по высоте капли различна:

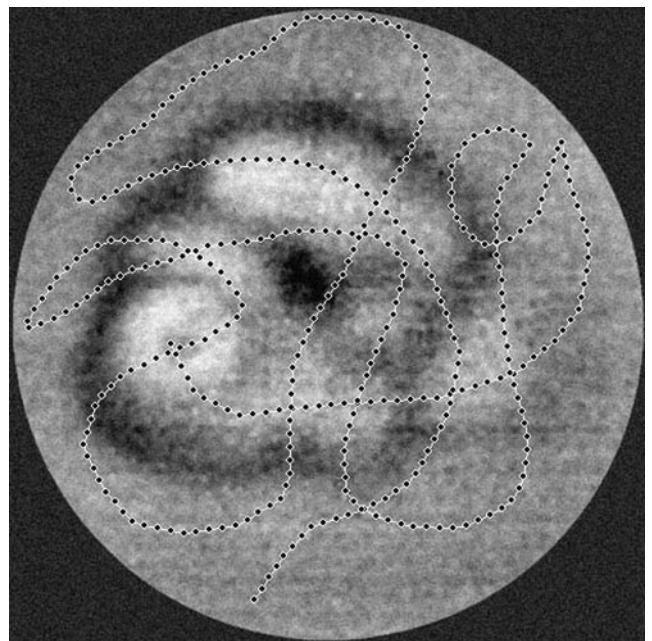


Рис. 11. Траектория движения и тепловые пятна, сформированные в воде при движении перфтордекалиновой капли, наблюдаемые в ИК-диапазоне 8–12 мкм.

верхняя часть капли из-за испарения перфтордекалина более холодная по сравнению с нижней частью капли, взаимодействующей с пузырьками воздуха. Часть перфтордекалиновой капли при разогреве переходит на поверхность воды, покрывая ее молекулярной перфтордекалиновой пленкой, препятствующей испарению. При этом поверхностная температура воды в области расположения капли повышается. Благодаря сравнительно низкой теплопроводности воды тепловой след сохраняется некоторое время, создавая тем самым тепловой рельеф на поверхности воды, который, в свою очередь, ограничивает стохастическое движение капли. Таким образом, подобная система является самоорганизующейся. Капля в процессе взаимодействия с водой сама ограничивает число степеней свободы своего движения.

6. Заключение

Сегодня для контроля чистоты воды используются десятки различных методов (химических, биохимических и биологических) [48]. Если говорить о практических приложениях тепловидения при наблюдении конвективных структур воды, то результаты дальнейшего их исследования могут найти приложение к задачам экспресс-контроля качества и состояния воды в бассейнах. Поверхностное натяжение воды на границе вода – воздух изменяется при внесении в воду различных добавок (поверхностноактивных соединений, органических соединений, солей и кислот). Все эти добавки специфически изменяют структуру ячеек Рэлея – Бенара. Возможно, что описанная нами ИК-регистрация структур в воде позволит создать экспресс-методы контроля загрязненности воды, так как образующиеся структуры связаны не только с формой сосудов и материалом их стенок, но и с составом включений, содержащихся в воде. Напомним в связи с этим, что 2003 г. по инициативе ООН был объявлен годом питьевой воды и контроля ее качества [49, 50].

Что касается тепловидения в целом, то сегодня оно имеет все основания стать одной из главных информационных технологий с обширной областью применения. В биологии — это исследование теплопродукции живых организмов и отдельных органов в зависимости от суточных и сезонных циклов. В медицине — диагностика сосудистых, воспалительных и опухолевых заболеваний, наблюдение за эффективностью лечения, экспресс-контроль при карантинных мероприятиях. Тепловизионная техника позволяет вести противопожарный мониторинг лесных массивов и торфяников, следить за состоянием вулканов, наблюдать с воздуха за смещением зон мерзлоты, степей и пустынь, миграцией животных. В технике тепловизоры позволяют контролировать работу машин и механизмов, сетей, транспортирующих энергию, теплоизоляцию зданий и сооружений.

Хотя наша работа выполнялась в рамках научной программы РАН "Фундаментальные науки — медицине" 2003–2005 гг., раздел "Разработка и усовершенствование средств и методов диагностики", но она приоткрыла возможности тепловидения для решения широкого круга не только медицинских, но и касающихся самых различных областей физики задач.

Авторы благодарны А.Б. Медвинскому и Г.Н. Саркисову за обсуждение статьи, а также рецензентам за ценные замечания.

Список литературы

1. Госсопр Ж *Инфракрасная термография. Основы, техника, применение* (М.: Мир, 1988)
2. Ковалев А В, Федчишин В Г, Щербаков М И *Специальная техника* (3) 13; (4) 19 (1999)
3. Певцов Е, Чернокожин В *Электронные компоненты* (1) 32; (2) 30; (3) 12 (2001)
4. Breen T B et al. *Proc. SPIE* **3436** 530 (1998)
5. Pengelley R, Hewish M "In the heat of the night" *Jane's Int. Defense Rev.* **34** (10) 49 (2001)
6. Иваницкий Г Р *Вестн. РАН* **76** (2006) (в печати)
7. Иваницкий Г Р и др. *Доклады РАН* **393** 419 (2003)
8. Иваницкий Г Р и др. "Исследование микроциркуляции крови с помощью современных методов термографии при введении перфторана", в сб. *Перфторуглеродные соединения в медицине и биологии* (Под ред. Г Р Иваницкого, Е Б Жибурта, Е И Маевского) (Пущино, 2004) с. 10
9. Иваницкий Г Р и др. *Доклады РАН* **398** 709 (2004)
10. Гетлинг А В *УФН* **161** (9) 1 (1991)
11. Bénard H *Rev. Gén. Sci. Pures Appl.* **11** 1261, 1309 (1900)
12. Gollub J P, McCarriar A R, Steinman J F *J. Fluid Mech.* **125** 259 (1982)
13. Wesfreid J E, Zaleski S (Eds) *Cellular Structures in Instabilities* (Berlin: Springer-Verlag, 1984) p. 33
14. Cui Q, Smith V H (Jr) *J. Chem. Phys.* **113** 10240 (2000)
15. Mishima O, Stanley H E *Nature* **396** 329 (1998)
16. Montrose C J et al. *J. Chem. Phys.* **60** 5025 (1974)
17. Busse F H *J. Fluid Mech.* **52** 97 (1972)
18. Clever R M, Busse F H *J. Fluid Mech.* **65** 625 (1974)
19. Busse F H *Rep. Prog. Phys.* **41** 1929 (1978)
20. Busse F H, Clever R M *J. Fluid Mech.* **102** 75 (1981)
21. Krishnamurti R J. *J. Fluid Mech.* **42** 295 (1970)
22. Krishnamurti R J. *J. Fluid Mech.* **60** 285 (1973)
23. Буссе Ф Г *Гидродинамические неустойчивости и переход к турбулентности* (Под ред. Х Суннери, Дж Голлаба) (М.: Мир, 1984) с. 124
24. Гетлинг А В *Конвекция Рэлея – Бенара. Структуры и динамика* (М.: Эдиториал УРСС, 1999)
25. Rayleigh, Lord *Philos. Mag.* **32** 529 (1916)
26. Rayleigh, Lord *Proc. R. Soc. London, Ser. A* **93** 148 (1916)
27. Gollub J P, McCarriar A R, Steinman J F *J. Fluid Mech.* **125** 259 (1982)
28. Heutmaker M S, Gollub J P *Phys. Rev. A* **35** 242 (1987)
29. Ahlers G, Cannell D S, Steinberg V *Phys. Rev. Lett.* **54** 1373 (1985)
30. Хакен Г *Синергетика* (М.: Мир, 1980)
31. Иваницкий Г Р, Кринский В И, Сельков Е Е *Математическая биофизика клетки* (М.: Наука, 1978)
32. Эйдельман Е Д *Соросовский образовательный журнал*. **6** (5) 94 (2000)
33. Zaikin A N, Zhabotinsky A M *Nature* **225** 535 (1964)
34. Ivanitsky G R et al. *Biol. Rev. Sec. D* **2** 279 (1981)
35. Кринский В И, Михаилов А С *Автоволны. Серия — Физика* (10) (М.: Знание, 1984) с. 28
36. Assenheimer M, Steinberg V *Nature* **367** 345 (1994)
37. Иваницкий Г Р, Медвинский А Б, Цыганов М А *УФН* **164** 1041 (1994)
38. Somerscales E F C, Dougherty T S *J. Fluid Mech.* **42** 755 (1970)
39. Иваницкий Г Р и др. *Доклады РАН* **374** 548 (2000)
40. Иваницкий Г Р и др. *Доклады РАН* **375** 685 (2000)
41. Иваницкий Г Р, Кравченко В В, Цыганов М А *Доклады РАН* **383** 263 (2002)
42. Stoilov Yu Yu *Langmuir* **14** 5685 (1998)
43. Стойлов Ю Ю *УФН* **170** 41 (2000)
44. Мацую М, Отоси С *Соединения фтора* (М.: Мир, 1990)
45. Simons J H (Ed.) *Fluorin Chemistry* (New York: Academic Press, 1964)
46. Sumino Y et al. *Phys. Rev. Lett.* **94** 068301 (2005)
47. Иваницкий Г Р и др. "Термографическое исследование динамики диссипативных структур в системе из несмешиваемых

- жидкостей", в сб. *Горизонты биофизики: от теории к практике* (Под ред. Г Р Иваницкого) (Пущино, 2003) с. 52
48. Островский В М и др. *Вода: индикаторные системы* (М.: ВИНИТИ, 2002)
49. Смирнова М *В мире науки* (11) 24 (2003)
50. Потапова Т *В мире науки* (11) 78 (2003)

Water surface structure studies using infrared techniques

G.R. Ivanitskii, A. A. Deev

*Institute of Theoretical and Experimental Biophysics, Russian Academy of Sciences,
ul. Institutskaya 3, 142290 Pushchino, Moscow Region, Russian Federation
Tel. (7-0967) 73-2481. Fax (7-0967) 79-05 53
E-mail: ivanitsky@iteb.ru
E-mail: deev@iteb.ru*

E.P. Khizhnyak

*Institute of Cell Biophysics, Russian Academy of Sciences,
ul. Institutskaya 3, 142290 Pushchino, Moscow Region, Russian Federation
Tel. (7-0967) 73-2481. Fax (7-0967) 79-05 53
E-mail: eugene@iteb.ru*

Modern focal plane array infrared cameras, with their temperature sensitivity of up to 0.01–0.02 °C, provide new insights into many physical, chemical, and biological processes involving heat production and/or dependent on liquid mobility due to local temperature gradients. A factor of great importance is the mobility of water — especially in studying how Rayleigh–Benard convective structures form in it. The use of infrared techniques allows the visualization of various structures in water.

PACS numbers: **07.57.–c, 42.27.Te, 68.03.–g**

Bibliography — 50 references

Received 29 March 2005, revised 26 July 2005

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **175** (11) 1207–1216 (2005)

Physics–Uspekhi **48** (11) (2005)