

## МЕХАНИЗМ САМООРГАНИЗАЦИИ В ПОВЕРХНОСТНОМ МИКРОСЛОЕ ВОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ КОНВЕКЦИИ

© 2016 г. М.Е. Мазуров, В.А. Твердислов\*

*Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, 117997, Москва, Стремянный пер., 36*

*E-mail: mazurov37@mail.ru*

*\*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1*

*E-mail: tverdislov@mail.ru*

Поступила в редакцию 11.07.15 г.

Проведено исследование процесса образования спиральных макроструктур в поверхностном слое воды, основанное на результатах экспериментальных работ. Впервые экспериментально установлено, что в тонком приповерхностном слое остывающей воды со свободной поверхностью существует термокапиллярная конвекция Марангони, приводящая к самоорганизации в виде спиральных и диссипативных структур. Найдены наиболее вероятные кандидаты, осуществляющие движение в базовых экспериментах. Такими кандидатами являются термокапиллярные ячейки, возникающие в результате конвекции Марангони. Приведен математический аппарат для моделирования динамики термокапиллярной диффузии Марангони в виде нелинейных уравнений тепловой диффузии и уравнений самоорганизации – нелинейных дифференциальных уравнений параболического типа. В вычислительном эксперименте получены результаты, подтверждающие механизмы самоорганизации в поверхностном слое воды.

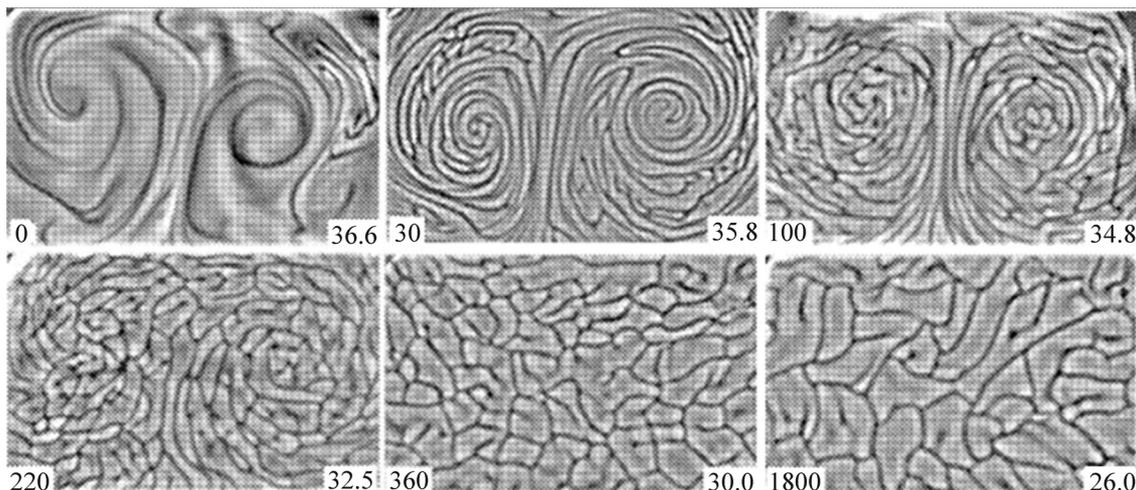
*Ключевые слова: термокапиллярная конвекция Марангони, самоорганизация поверхности воды в виде спиральных и диссипативных структур.*

Процесс образования спиральных макроструктур в воде при ее конвекции является хорошей иллюстрацией механизма самоорганизации при переходах «хаос ↔ порядок», происходящих при появлении температурных градиентов. При этом молекулы воды под действием тепловых градиентов вместо случайного движения начинают демонстрировать коллективное направленное движение. Генерация спиральных структур на поверхности жидкости (воды) экспериментально с помощью тепловизора обнаружена и исследована в работе [1]. С помощью тепловидения в ИК-диапазоне (8–12 мкм) авторы наблюдали спиральные структуры при исследовании остывания воды в прямоугольном пластмассовом сосуде. Если в такой неподвижный сосуд налить воду, нагретую до 36,6–40,0°C, то в ней появляются спиральные структуры, показанные на рис. 1.

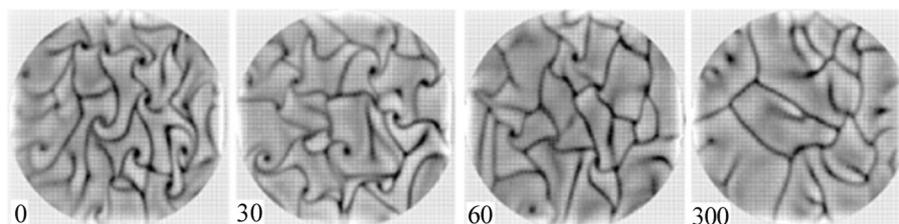
По мере остывания воды спиральные структуры постепенно распадаются на отдельные ячейки, когда температура воды понижается до 29°C, структура воды становится ячеистой без спиральных образований. Известно, что вид структур зависит не только от физических свойств жидкости и места нагрева, но и от

формы резервуара [1]. На рис. 2 приведена фильмограмма структур, возникающих в воде при ее остывании, но в отличие от случая, соответствующего рис. 1, вода наливается в круглый неподвижный сосуд диаметром 17 см. В круглом пластмассовом сосуде спиральные макровихри не наблюдаются, но при тех же температурах имеют место многочисленные круговые микровихри-воронки – темные точки на рис. 2. По мере остывания воды микровихри-воронки постепенно исчезают, а вся структура распадается на отдельные ячейки неправильной формы. В остывшей воде как в прямоугольном, так и в круглом резервуарах ячеистые структуры практически не отличаются друг от друга.

Точную картину всех 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 валы, но могут



**Рис. 1.** Фильмограмма структур в тонком поверхностном слое воды в ИК-диапазоне (по данным работы Г.Р. Иваницкого и др. [1]).



**Рис. 2.** Ячеистые структуры в тонком поверхностном слое при остывании воды (по данным работы Г.Р. Иваницкого и др. [1]).

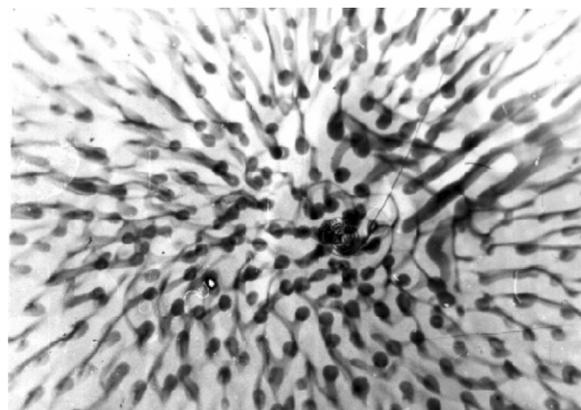
возникать протуберанцы и спиральные структуры [1–8].

Дальнейшие экспериментальные исследования выявили новые закономерности самоорганизации поверхности воды в диапазоне 36,6–40,0°C [3]. Анализ данных тепловизионных исследований свидетельствует, что в приповерхностном слое воды практически с первой секунды с момента его охлаждения возникает упорядоченная система термокапиллярных ячеек, как показано на рис. 3 [4].

Дальнейшая эволюция термокапиллярных ячеек приводит к их более равномерной структуризации, что иллюстрируется на рис. 4.

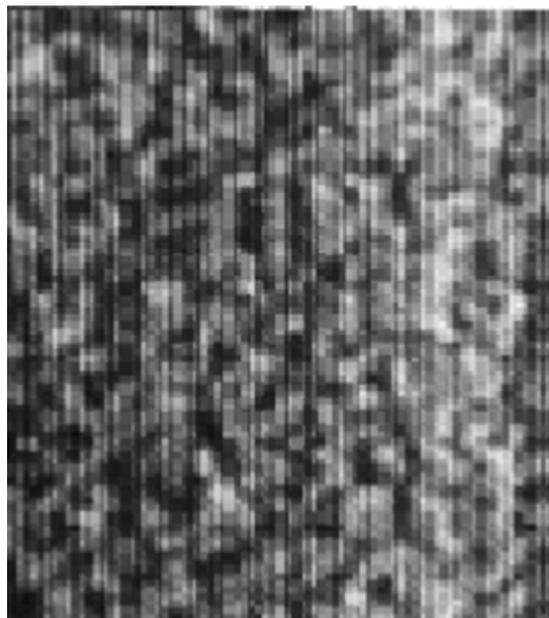
Образцы отдельных термокапиллярных ячеек, визуализированные с применением рН-индикатора (по данным работы [2]) показаны на рис. 5.

Установлено, что конвекция в миллиметровом приповерхностном слое остывающей с открытой поверхности воды является термокапиллярной конвекцией Марангони. Анализ приведенных экспериментальных методик позволил получить следующую картину возникновения



**Рис. 3.** Изображение термокапиллярных ячеек. Относительно холодным участкам соответствуют темные области, а более теплым – светлые (по данным работы [2]).

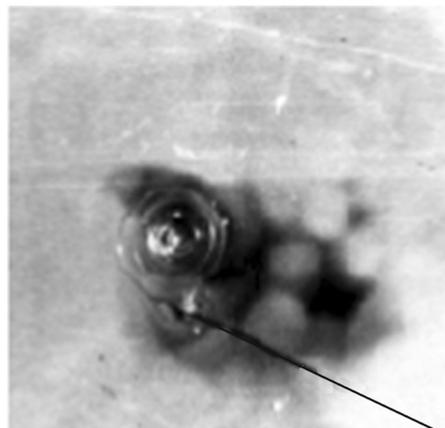
термокапиллярных конвективных ячеек. С начала охлаждения водной поверхности на ней возникают пульсации температуры, наведенные из приводного слоя воздуха. Эти наведенные из приводного слоя воздуха пульсации темпе-



**Рис. 4.** Термокапиллярные ячейки на термоизображениях водной поверхности (по данным работы [2]).

ратуры, интенсифицированные процессом испарения с водной поверхности, приводят к образованию на поверхности первоначально однородной по температуре воды участков с градиентом температуры. За счет действия сил поверхностного натяжения возникает движение участков воды от более нагретых областей к менее нагретым. В результате области водной поверхности с относительно низкой температурой сжимаются, превращаясь в линии конвергенции, которые образуют периметр термокапиллярных ячеек. Следовательно, размеры термокапиллярных ячеек задаются характерным линейным масштабом температурных неоднородностей на поверхности жидкости.

Таким образом, в областях пересечения линий конвергенции скапливается более тяжелая холодная вода, поэтому здесь будет иметь место максимальная кривизна водной поверхности, т.е. поверхность воды в этих местах как бы вспучивается. Именно в этих местах локальные вертикальные температурные градиенты будут достигать максимумов. В момент, когда в точке схождения линий конвергенции локальный вертикальный градиент температуры и вспучивание водной поверхности достигнут критического значения, в этом месте произойдет потеря гидродинамической устойчивости, которая приведет к образованию нисходящей струйки охлажденной воды – так называемого стока. Очевидно, отток охлажденной воды с поверхности происходит не непрерывно, а квазипериодиче-



Термокапиллярная  
ячейка

**Рис. 5.** Отдельные термокапиллярные ячейки, визуализированные с помощью рН-индикатора (по данным работы [2]).

ски, по мере достижения очередной локальной гидродинамической неустойчивости.

Через образовавшиеся стоки втягивается холодная вода с прилегающих участков водной поверхности, в результате образуется термокапиллярная конвективная ячейка с нисходящим движением в центре и восходящим по ее периметру. При этом охлажденная вода скапливается непосредственно под термокапиллярными ячейками на глубине ~1 мм от поверхности. Здесь охлажденная вода собирается в капли, которые со временем за счет постоянной подпитки с поверхности увеличиваются в размерах и в конце концов соединяются друг с другом перемычками, образуя систему взаимосвязанных трубопроводов, по которым охлажденная вода перераспределяется от мест ее более раннего, а значит (в силу нестационарности процесса), и более интенсивного накопления к местам, где процесс формирования капель только начался.

Со временем, по мере скопления в трубопроводах стянутой с поверхности охлажденной (окрашенной) воды, эти трубопроводы приобретают все более насыщенный малиновый цвет, а просветы между ними, наоборот, обесцвечиваются. При этом на глубине ~1 мм от водной поверхности формируется слой жидкости, характеризующийся отчетливо выраженной отрицательной ступенькой температуры по сравнению с выше- и нижерасположенными слоями.

По мере «разбухания» трубопроводов и роста плотностной неустойчивости на их нижней границе в узловых точках соединения смежных ячеек, которым соответствуют места стока с

поверхности охлажденной воды, появляются бугорки диаметром ~2 мм. Довольно быстро, в зависимости от перепада температуры в системе «вода–воздух», эти бугорки вытягиваются и приобретают форму колбочек на тонкой ножке.

При достижении плотностной неустойчивостью критического значения «колбочки» в отдельных узловых точках системы трубопроводов начинают отрываться и падать вниз, образуя отдельные капельки – термики. Этот момент является своего рода кульминационным, так как он играет роль «спускового крючка». Сразу вслед за ним очень быстро процесс трансформации бугорков в термики приобретает лавинообразный характер и практически все они почти одновременно покидают узлы соединения трубопроводов, образуя так называемый «дождь» термиков [2].

### МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ САМООРГАНИЗАЦИИ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ВОДЫ

Уравнение теплопроводности, учитывающее зависимость свойств среды от температуры и нелинейную зависимость от температуры мощности распределенных в объеме тепловых источников, является квазилинейным параболическим уравнением:

$$\rho(u)c(u)\frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}(k(u)\text{grad } u) + F(u, x, y, z, t).$$

Для математического исследования автоволновых процессов в активных средах в настоящее время принято рассматривать системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных параболического типа. Основное состояние такой системы в безразмерном виде удовлетворяет следующим уравнениям [4]

$$\frac{\partial E_i}{\partial t} = F_i(E_1, \dots, E_n) + D_i \Delta E_i \quad (i = 1, \dots, n), \tag{1}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \Delta T, \quad \frac{\partial E_i}{\partial x_j} = 0,$$

где  $E_i, T$  – переменные,  $F_i$  – нелинейные функции,  $D_i$  – коэффициенты диффузии,  $\Delta E_i = \frac{\partial^2 E_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_i}{\partial z^2}$ . Во многих исследованиях используется система из двух уравнений (1), где  $v_i$  – возмущения скорости. В качестве переменных используются горизонтальная составляющая скорости и возмущения температуры. Вертикальным возмущением температуры, приводящим к конвекции Релея–Бенара, пренебре-

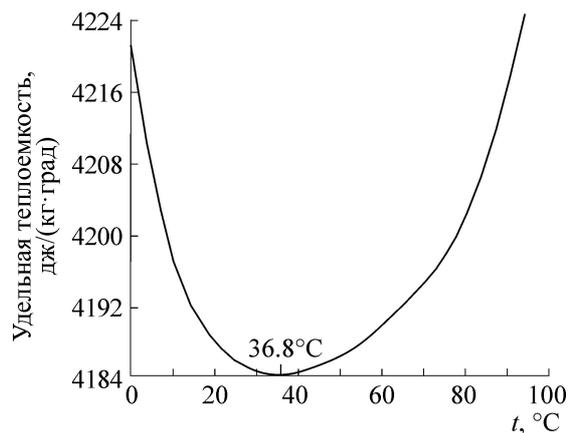


Рис. 6. Изменение величины удельной теплоемкости воды в зависимости от температуры.

гаем. Полагаем в первом приближении, что имеет место только горизонтальная конвекция Марангони. В образовании самоорганизующихся структур на поверхности жидкости определенную роль играет поверхностное натяжение.

Для исследования нелинейных волн вихревого типа используется система из двух уравнений. В данной работе были использованы уравнения Фитцхью–Нагумо:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C\varepsilon^{-1}\left(u - \frac{u^3}{3} - v\right) + \Delta u, \quad \frac{\partial v}{\partial t} = \varepsilon(u + \beta - \gamma v),$$

с параметрами  $\varepsilon = 0,03, \beta = 0,7, \gamma = 0,8$ . Эти уравнения, как известно, являются наиболее подходящими для концептуального исследования волн вихревого типа.

У воды при температурах от 0 до 37°C теплоемкость падает, а начиная с 37 до 100°C – возрастает. Таким образом, легче всего вода нагревается и быстрее всего охлаждается в своеобразной температурной «яме», показанной на рис. 6, дно которой соответствует интервалу 35–40°C.

Следует добавить и еще одно обстоятельство – наиболее интенсивно химические реакции обмена веществ идут также в интервале 35–40°C. Получается, что природа, создавая человека, мудро снабдила его оптимальным, т. е. экономически наиболее выгодным режимом работы всего организма в целом.

Для исследования нелинейных волн вихревого типа при некоторых режимах термокапиллярной диффузии, являющейся одним из режимов конвекции Марангони, используется система из двух уравнений Фитцхью–Нагумо. Результаты одного из вычислительных экспериментов показаны на рис. 7.



Рис. 7. Результаты вычислительного эксперимента.

Результаты вычислительных экспериментов показывают возможность применения уравнений Фитцхью–Нагумо для качественного исследования некоторых режимов самоорганизации в поверхностном микрослое воды с использованием термокапиллярной конвекции.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, впервые экспериментально установлено, что в тонком (~1 мм) приповерхностном слое остывающей со свободной поверхности воды существует термокапиллярная конвекция Марангони [1,2]. Найдены наиболее вероятные кандидаты на движение в базовых экспериментах, описанных в работах [1,2]. Та-

кими кандидатами являются термокапиллярные ячейки, возникающие в результате конвекции Марангони. Приведен математический аппарат для моделирования динамики термокапиллярной диффузии Марангони в виде нелинейных дифференциальных уравнений тепловой диффузии и нелинейных уравнений самоорганизации. В вычислительном эксперименте получены результаты, подтверждающие механизмы самоорганизации в поверхностном слое воды.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г. Р. Иваницкий, А. А. Деев и Е. П. Хижняк, *Успехи физ. наук* **175**, 1207 (2005).
2. В. С. Дегтярев, И. К. Локтионов, И. В. Петренко, О. А. Рубцова и М. В. Ветрова, в науч.-метод. сб. «Наука – практика» (ДонГТУ, Донецк, 2001), вып. 6, сс. 36–43.
3. А. В. Гетлинг, *Успехи физ. наук*, **161** (9), 1 (1991).
4. В. Б. Лапшин, Е. В. Караваева и А. А. Будников, *Вестн. МГУ. Сер. 3, Физика, астрономия*, № 6. 56 (2000).
5. А. Л. Зуев и К. Г. Костарев, *Докл. РАН* **399** (4), 490 (2004).
6. К. А. Бушуева, М. О. Денисова, А. Л. Зуев и К. Г. Костарев, *Коллоид. журн.* **70** (4), 457 (2008).
7. А. Л. Зуев и К. Г. Костарев, *Успехи физ. наук* **178** (10), 1065 (2008).
8. Ю. К. Братухин, В. А. Брисман, А. Л. Зуев и А. Ф. Пшеничников, в сб. *Гидромеханика и теплообмен при получении материалов* (Наука, М., 1990), сс. 273–281.

## The Mechanism of Self-Organization in Surface Microlayer of Water with the Use of Thermocapillary Convection

M.E. Mazurov\* and V.A. Tverdislov\*\*

\*Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny per. 36, Moscow, 117997 Russia

\*\*Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia

This paper presents an investigation for the process of formation of helical macrostructures in the surface water layer based on the results of experimental work. It has been, for the first time, experimentally established that in a thin subsurface layer of water being cooled with a free surface thermocapillary Marangoni convection develops leading to self-organizing helical and dissipative structures. The most likely candidates allowing for the motion in the underlying experiments were found. These candidates are thermocapillary cells appeared as a result of the Marangoni convection. The mathematical apparatus for modeling the dynamics of the Marangoni thermocapillary diffusion is shown in the form of nonlinear equations of heat diffusion and equations of self-organization – nonlinear differential equations of parabolic type. In the computational experiment the results confirm the mechanisms of self-organization in the surface layer of water.

*Key words: thermocapillary Marangoni convection, self-organization of surface water in the form of helical and dissipative structures*