

ГЕНЕРАЦИЯ СПИРАЛЬНЫХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ

Мазуров М.Е.

Московский Государственный Университет Экономики, Статистики,
Информатики
mazurov37@mail.ru

Аннотация. Приведены исследования процесса образования спиральных макроструктур в поверхностном слое воды, основанных на результатах работ [1,4]. Впервые экспериментально установлено, что в тонком приповерхностном слое остывающей со свободной поверхности воды существует термокапиллярная конвекция Марангони, приводящая к самоорганизации в виде спиральных и диссипативных структур. Найдены наиболее вероятные кандидаты, осуществляющие движение в базовых экспериментах работ [1,4]. Такими кандидатами являются термокапиллярные ячейки, возникающие в результате конвекции Марангони. Приведен математический аппарат для моделирования динамики термокапиллярной диффузии Марангони в виде нелинейных уравнений типа Навье – Стокса и тепловой диффузии. В вычислительном эксперименте получены результаты, подтверждающие механизмы самоорганизации в поверхностном слое воды.

Процесс образования спиральные макроструктуры 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) наблюдались спиральные структуры при исследовании остывания воды в прямоугольном пластмассовом сосуде. Если в такой неподвижный сосуд налить воду, нагретую до 36,6° - 40 °С, то в ней появляется спиральные структуры, показанные на рис. 1.

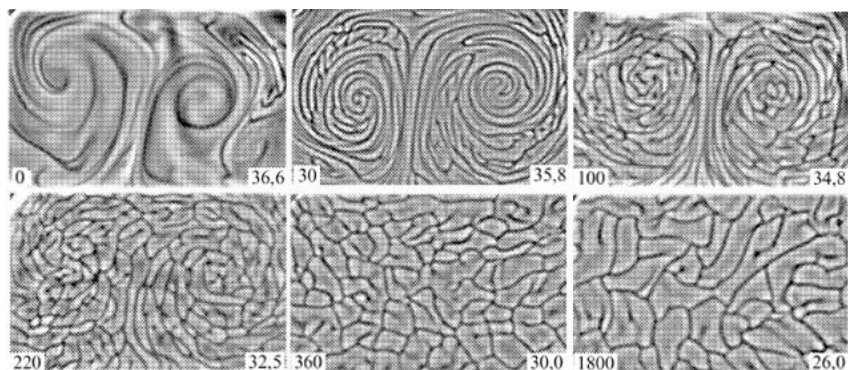


Рис. 1. Фильмограмма структур в ИК – диапазоне [4].

По мере остывания воды спиральные структуры постепенно распадаются на отдельные ячейки, затем 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 спиральных макровихрей не наблюдается, 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 и в прямоугольном, и в круглом резервуарах ячеистые структуры практически не отличаются друг от друга.

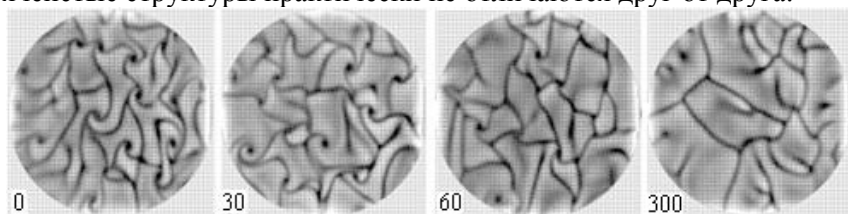


Рис 2. Ячеистые структуры при остывании воды [1].

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 возникать протуберанцы и спиральные структуры [1-4].

Анализ данных тепловизионных исследований свидетельствует, что в приповерхностном слое воды практически с первой секунды с момента его охлаждения возникает упорядоченная система термокапиллярных ячеек в виде неправильных многоугольников с числом сторон от 4 до 8, как показано на рис. 3. [4].

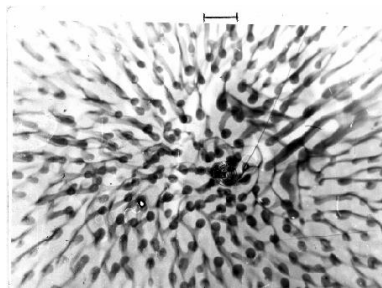


Рис. 3 Изображение термокапиллярных ячеек с помощью pH-индикатора [4].

Экспериментальные данные позволили установить, что конвекция в миллиметровом приповерхностном слое остывающей с открытой поверхности воды, является термокапиллярной конвекцией Марангони. Анализ приведенных экспериментальных методик позволил получить следующую картину возникновения 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 температуры, интенсифицированные процессом испарения с водной поверхности, приводят к образованию на поверхности первоначально однородной по температуре воды участков с градиентом температуры. В результате 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.

В этих опытах впервые экспериментально установлено, что в тонком (~1 мм) приповерхностном слое остывающей со свободной поверхности воды существует термокапиллярная конвекция Марангони.

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

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

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 удовлетворяют следующим уравнениям [2]

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_i}{\partial t} &= F_i(E_1, \dots, E_n) + D_i \Delta E_i \quad (i = 1, \dots, n), \\ \frac{\partial T}{\partial t} + v_i \frac{\partial T}{\partial x_i} &= \Delta T, \quad \frac{\partial E_i}{\partial x_j} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где E_i - 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 - возмущение скорости, θ - возмущение температуры, w - горизонтальная составляющая скорости возмущения температуры, Δ - лапласиан. Вертикальным возмущением температуры, приводящим к конвекции Релея - Бенара, пренебрегаем. 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.

Можно использовать систему уравнений, основанную на уравнении Ван дер Поля:

$$\frac{\partial E_1}{\partial t} = E_2, \quad \frac{\partial E_2}{\partial t} = E_2(1 + \alpha_2 E_1 - \alpha_3 E_1^2) + bE_1,$$

где α_2 , α_3 , b - константы.

У воды от 0 °С до +37 °С теплоемкость падает, а начиная с +37° до +100°С возрастает. Таким образом, легче всего вода нагревается и быстрее всего охлаждается в своеобразной температурной "яме", дно которой соответствует интервалу 35-40 °С, показанной на рис. 4.

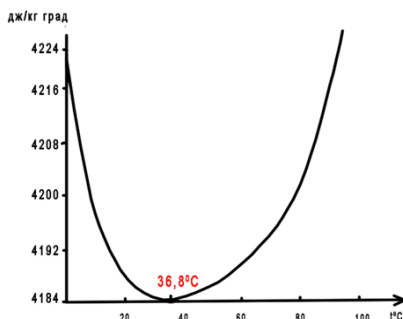


Рис 4. Изменение величины удельной теплоемкости воды в зависимости от температуры

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

Для исследования нелинейных волн вихревого типа используется система из двух уравнений. В данной работе были

использованы уравнения Фитцхью – Нагумо. Результаты одного из вычислительных экспериментов показаны на рис 5

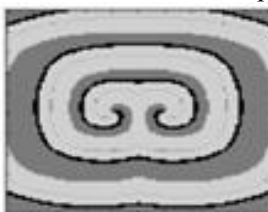


Рис. 5. Результаты вычислительного эксперимента

Заключение

Таким образом, впервые экспериментально установлено, что в тонком приповерхностном слое остывающей со свободной поверхности воды существует термокапиллярная конвекция Марангони [1,4]. Найдены наиболее вероятные кандидаты на движение в базовых экспериментах, описанных в работах [1,4]. Такими кандидатами являются термокапиллярные ячейки, возникающие в результате конвекции Марангони. Дано обоснование математического аппарата для моделирования динамики термокапиллярной диффузии Марангони в виде нелинейных дифференциальных уравнений типа Навье – Стокса и тепловой диффузии. В вычислительном эксперименте получены результаты предполагаемого механизма самоорганизации в поверхностном слое воды.

Литература

1. Иваницкий Г. Р., Деев А. А., Хижняк Е. П. Структуры на поверхности воды, наблюдаемые с помощью инфракрасной техники// УФН. 2005. № 175 . С.1207–1216
2. Гетлинг А.В. Формирование пространственных структур конвекции Рэлея-Бенара. УФН, 1991, Т. 161, №9, С. 1-80
3. Дегтярев В.С., Локтионов И.К., Петренко И.В., Рубцова О.А., Ветрова М.В. К вопросу о структуре конвективного движения в водных растворах с различными физико-химическими свойствами // Наука – практика: Науч.-метод. сб. – Донецк: ДонГТУ. – 2001. – Вып. 6. □ С. 36-43.
4. Лапшин В.Б., Караваева Е.В., Будников А.А. Теоретические и экспериментальные оценки параметров гравитационно-капиллярной конвекции в поверхностном микрослое океана //Вестник Московского университета. 2000. Сер. 3. Физика. Астрономия. № 6. С. 56-59