

А.Р. Аржаник*, Ю.П. Михайличенко**

ДЕМОНСТРАЦИИ ЯВЛЕНИЙ САМООРГАНИЗАЦИИ В КУРСЕ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

*Томский государственный педагогический университет

**Томский государственный университет

УДК 532.34

В настоящее время мы являемся свидетелями того, как социологи, юристы, экономисты, менеджеры и другие специалисты-гуманитарии начинают применять в своей работе системный подход, идеи и методы кибернетики и теории информации, знание фундаментальных законов естествознания, и в частности физики. Это является одной из причин введения в учебные планы подготовки специалистов-гуманитариев в вузах курсов естествознания. Изучение данных курсов позволяет, во первых, сознательно применять полученные знания в своей деятельности, во вторых, иметь более ясное и точное представление о современной научной картине мира, которую дает естествознание.

В основе курса естествознания лежит концепция самоорганизации. В настоящее время она получает все большее распространение не только в естествознании, но и в социально-гуманитарных разделах наук. Большинство наук изучает процессы эволюции систем и, таким образом, вынуждены анализировать механизмы их самоорганизации.

При чтении такого курса естественно возникает проблема подбора опытов, демонстрирующих основные моменты эволюции самоорганизующихся систем. Существует достаточно широкий выбор литературы, в которой описаны явления самоорганизации в различных отраслях естествознания, например образование лазерного излучения, химические автоколебательные процессы (реакции Белоусова-Жаботинского) [1], рост кристаллов [2].

Наиболее простыми для демонстрации явлений самоорганизации остаются гидродинамические системы, как, например, демонстрация дорожки Кармана при турбулентном течении. В условиях учебного заведения можно осуществить, в частности, демонстрации вихрей Тейлора и ячеек Бенара [3, 4].

Удобство заключается в том, что за достаточно короткое время, что немаловажно для проведения лекционной демонстрации, можно показать самоорганизацию структур в жидкости, показать основные закономерности эволюции этих структур. Тем более что данные эксперименты уже стали классическими в том плане, что во многих курсах естествознания объяснение явлений самоорганизации идет на описательных примерах этих экспериментов.

В физическом кабинете Томского госуниверситета и на кафедре общей физики Томского госу-

дарственного педагогического университета разработана методика постановки демонстраций ячеек Бенара и вихрей Тейлора [5].

Ячейки Бенара демонстрируются на круглой металлической кювете с внешним диаметром порядка 10 см. Дно кюветы сделано толстым для того, чтобы температура нижнего слоя жидкости в течение долгого времени оставалась постоянной без дополнительного подогрева. Демонстрация проводится следующим образом. В кювету наливается вязкая жидкость (масло), толщиной слоя 1,5–2 мм, и кювета нагревается на лабораторной плитке. Для лучшего наблюдения процесса в масло добавляется алюминиевая пудра. После соответствующего прогрева в слое масла появляются ячейки (рис. 1).

Затем кювета устанавливается на подставку с регулируемым углом наклона относительно горизонтальной плоскости. Лучше всего наблюдать ячейки индивидуально или небольшой группой непосредственно. Для показа ячеек Бенара большой группе учащихся используется стандартная схема эпипроекции или телевизионная установка.

Впервые образование структур в подогреваемом снизу слое ртути было описано Бенаром в 1900 г., оно определяется двумя безразмерными параметрами – числом Рэлея $Ra = g\beta\Delta T h^3/\nu\kappa$ и числом Прандтля $Pr = \nu/\kappa$, где g – ускорение свободного падения, $\Delta T > 0$ – разность температур на нижней и верхней границе слоя, h – толщина слоя жидкости, ν – вязкость, κ – температуропроводность среды, β – коэффициент теплового расширения. При различных соотношениях Ra и Pr реализуются различные конвективные течения [5]. Первый переход от гидродинамического равновесия к стационарной двумерной конвекции не зависит от числа Прандтля (в случае, когда изменение материальных свойств среды ν , κ , β с высотой в пределах толщины слоя пренебрежимо малы), это происходит при значениях числа Рэлея больших критического ($Ra > 1708$) [3]. В этом случае в слое жидкости возникают периодические по горизонтали двумерные ролики. Образование таких структур удобнее всего демонстрировать на трансформаторном масле. При толщине слоя 3–5 мм на нашей установке можно наблюдать образование именно таких структур. При наличии температурной зависимости вышеуказанных материальных свойств образуются шестиугольные ячейки Бенара.

В простом демонстрационном варианте устойчивые структуры данного типа удобнее все-

го наблюдать в слое касторового масла толщиной порядка 5 мм. При этом ячейки остаются устойчивыми при разности температур между верхним и нижним слоями 20–30 °С. Если кювету расположить под углом к горизонту, то образование ячеек будет определяться толщиной слоя жидкости при постоянной разности температур между слоями. Зная характеристики среды, можно, таким образом, определить критическое значение числа Рэлея, при котором образуются структуры в жидкости, что можно использовать при постановке лабораторной работы.

Вихри Тейлора образуются при определенных условиях в жидкости, налитой между двумя вращающимися коаксиальными цилиндрами. В наиболее простом варианте достаточно вращать один внутренний цилиндр (рис. 2). При вращении жидкости между цилиндрами возникает неустойчивое расслоение жидкости, так как частицы, находящиеся вблизи внутренней стенки, стремятся под действием центробежной силы переместиться в наружные слои. При постепенном увеличении скорости вращения, начиная с какого-то момента, между цилиндрами возникают правильно чередующиеся вихри в виде торов с правым и левым вращением. Условие возникновения вихрей в этом случае выражается числом

$$Ta = \frac{U_i d}{\nu} \sqrt{\frac{d}{R_i}} \geq 41,3 \quad [4], \text{ где } U_i - \text{окружающая}$$

скорость внутреннего цилиндра, d – ширина зазора между внутренним и внешним цилиндром, R_i – радиус внутреннего цилиндра, ν – кинематическая вязкость жидкости.

Демонстрация вихрей производится в вертикальной проекции с помощью дугового фонаря или в свете проектора. Чтобы сосуд не играл роль цилиндрической линзы, он выполнен нами из оргстекла в форме параллелепипеда. Визуализацию вихрей можно реализовать двумя способами. В первом случае в масло добавляется алюминиевая пудра, и тогда можно наблюдать системы двух соседствующих вихрей с правым и левым вращением, спиральное движение частиц, вихри в сечении.

Во втором случае вместо пудры сверху масла добавляется слой такого же масла с большей температурой, следовательно, с другим показателем преломления. Наличие в масле слоев с различной температурой приводит к появлению картин шпир. В этом случае можно наблюдать зарождение вихрей при достижении критического значения числа Тейлора (рис. 3).

Результаты расчетов, проведенные на нашей демонстрационной установке, практически совпали с данными, приведенными Шлихтингом [4]. При $Ta < 41,3$ наблюдалось течение Куэтта, при $41,3 < Ta < 400$ наблюдалось образование вихрей

Тэйлора на фоне ламинарного течения, при дальнейшем увеличении скорости вращения внутреннего цилиндра на вихрях Тэйлора наблюдалось волновое движение с частотой порядка 1/3 частоты вращения внутреннего цилиндра. Эксперименты проводились на трансформаторном масле, керосине, глицерине, растворе сахара. Наиболее удобным для постановки демонстрации оказалось трансформаторное масло и раствор сахара (изменяя концентрацию сахара, можно регулировать вязкость жидкости; добавляя в раствор соль, можно также изменять плотность).

При проведении экспериментов по определению оптимальных параметров демонстрационной установки нами наблюдалось образование в жидкости иной структуры.

Опыты проводились с различными диаметрами внутренних цилиндров, так как с изменением толщины слоя жидкости изменяется и диаметр вихря. При диаметре внешнего цилиндра 69 мм и толщине зазора между цилиндрами, порядка 30 мм в нашей установке может уложиться 2 вихря Тэйлора. При вращении внутреннего цилиндра с частотой 630 об/мин в касторовом масле, помещенном между цилиндрами, образуется два тороидальных вихря, причем верхний занимает примерно третью часть всего объема масла. На поверхности масла возле внутреннего цилиндра образуется воздушная воронка. При увеличении частоты вращения внутреннего цилиндра размеры вихрей постепенно сравниваются. При частоте в 1000 об/мин от воронки часть воздуха захватывается маслом и на внутреннем цилиндре точно посередине образуется воздушное кольцо. Кольцо находится на границе между вихрями Тэйлора. При увеличении частоты вращения внутреннего цилиндра можно наблюдать дальнейшее увеличение числа колец, причем в зависимости от частоты их поведение может быть устойчивым либо, при промежуточных частотах, неустойчивым (рис. 4). Экспериментальная зависимость числа колец от частоты вращения приведена в табл. 1.

Таблица 1
Образования воздушных колец в касторовом масле между коаксиальными цилиндрами в зависимости от частоты вращения внутреннего цилиндра

Частота вращения внутреннего цилиндра, Гц	Кол-во воздушных колец
8,6	2
9	2
10,5	6
12	10
12,8	6
13,8	3
14,6	9
15,1	5
15,3	9

Все кольца располагаются выше границы, разделяющей вихри Тэйлора, причем с увеличением числа колец граница между вихрями опускается вниз, нижний вихрь прижимается ко дну и затем полностью исчезает.

Данный эксперимент можно использовать в качестве демонстрации образования самоорганизованных структур, перехода от упорядоченного течения к турбулентному течению.

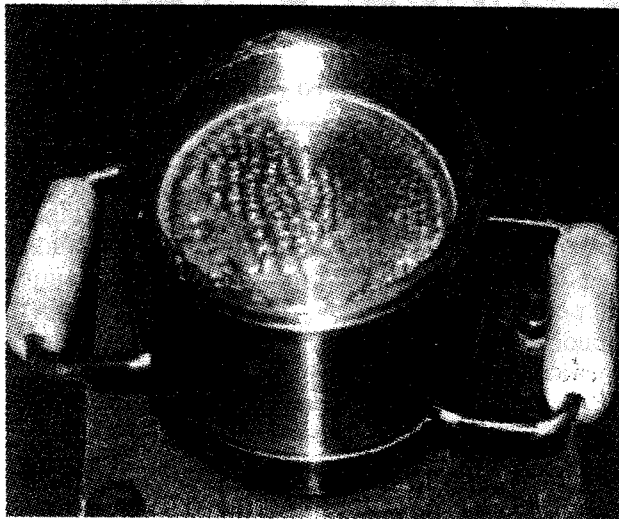


Рис. 1

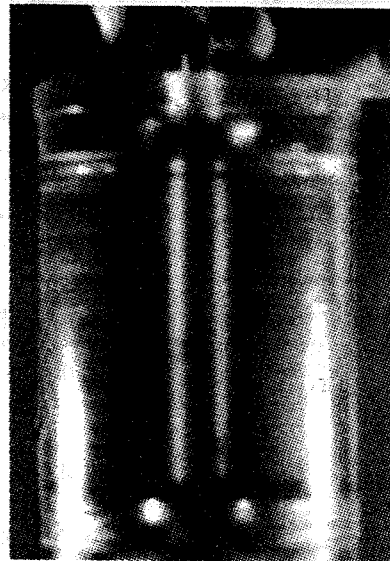


Рис. 2



Рис. 3

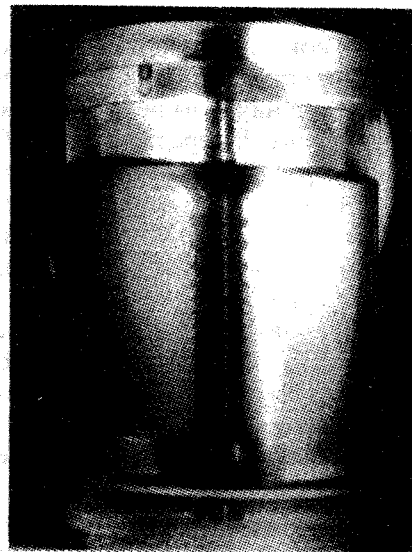


Рис. 4

Литература

1. Гарел Д., Гарел О. Колебательные химические реакции. М.: Мир, 1986. 148 с.
2. Лекционные демонстрации по физике / Под ред В.И. Ивероновой. М.: Наука, 1972. 640 с.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 6. М.: Наука, 1986. С. 311–318.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 742 с.
5. Аржаник А.Р., Ларин В.Л., Михайличенко Ю.П. и др. Демонстрация вихрей Тейлора // Физика. 1999. № 7. С. 95.
6. Krishnamurti R., Fluid J. Mech. 60, 285 (1973).