

## ВОЗБУЖДЕНИЕ ЦИКЛОНИЧЕСКОГО ВИХРЯ ИЛИ ЛАБОРАТОРНАЯ МОДЕЛЬ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА

Г.П. Богатырев

Экспериментально обнаружено явление аналогичное тропическому циклону. При локальном подогреве снизу плоского вращающегося слоя жидкости в центральной зоне формируется циклонический вихрь большой интенсивности. Найдены критериальные условия его возникновения.

Более двухсот лет за поведением тропических циклонов ведутся регистрируемые наблюдения, на основе которых создано большое количество математических моделей<sup>1</sup>. Однако, несмотря на обилие моделей до сих пор остается невыясненным физический механизм зарождения тропических циклонов<sup>2</sup>. Полученные экспериментальные результаты открывают новые возможности для аналитического и численного исследования проблемы.

Отличительной особенностью тропического циклона является взаимодействие крупномасштабного адвективного течения с силами Кориолиса при наличии в центральной области зон с восходящим потоком воздуха. Для исследования этого взаимодействия использовался плоский вращающийся слой жидкости, подогреваемый снизу в центральной зоне.

Диаметр рабочей кюветы, изготовленной из плексигласа, равнялся 300 мм, а толщина слоя жидкости  $h$  составляла 30 мм. Вращение кюветы обеспечивалось двигателем постоянного тока через понижающий редуктор. Скорость вращения  $\Omega$  в опытах изменялась от  $0,002 \text{ с}^{-1}$  до  $0,4 \text{ с}^{-1}$ . Угловая скорость  $\omega$  жидкости в центральной зоне определялась поплавковым датчиком. Датчик состоял из трех плексигласовых цилиндрических стаканчиков диаметром 10 мм, расположенных под углом  $120^\circ$  на расстоянии 15 мм от центра. Зазор между дном кюветы и датчиком составлял около 0,5 мм.

Подогрев жидкости осуществлялся латунным теплообменником, расположенным в центре кюветы заподлицо с ее дном. Диаметр теплообменника составлял 105 мм. Опыты проводились в стационарных условиях при постоянной мощности подогрева теплообменника электрическим нагревателем. Перепад температуры  $\Delta T$  между нагревателем и поверхностью жидкости измерялся с помощью терморезистивного датчика. В опытах значение  $\Delta T$  изменялось от  $2^\circ \text{C}$  до  $35^\circ \text{C}$ .

Если  $\Omega = 0$ , то при включенном подогреве выделяется три типа конвективных структур. Вследствие радиального перепада температуры возникает крупномасштабное адвективное движение: осредненный подъем жидкости над нагревателем, дивергентное течение с естественной теплоотдачей, опускание жидкости вблизи вертикальной стенки кюветы и конвергентное течение в нижних слоях к центру полости. Над нагревателем устанавливается структура, состоящая из хаотично всплывающих термиков. Вне зоны подогрева образуются конвективные валы, ось которых имеет тенденцию к ориентации в радиальном направлении.

При вращении кюветы на жидкость наряду с конвективными силами действуют силы Кориолиса. В нижних слоях, где радиальная компонента скорости направлена к центру, жидкость закручивается в направлении вращения кюветы. Напротив, поток, который течет от центра к периферии, испытывает антициклоническое закручивание. Если число Грасгофа  $G = g\beta\Delta Th^3/\nu^2$ , где  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\beta$  и  $\nu$  – коэффициенты объемного расширения и кинематической вязкости жидкости, меньше некоторого критического значения  $G^*$ , то циклоническое закручивание уравновешивается антициклоническим. В этом случае угловые скорости  $\Omega$  и  $\omega$  совпадают. Если  $G > G^*$ , то в центре полости зарождается спиральный циклонический вихрь, и относительная угловая скорость вращения поплавкового датчика  $\delta = (\omega - \Omega)/\Omega$  во вращающейся системе отсчета становится отличной от нуля. Изменение  $\delta$  с увеличением числа Грасгофа представлено на рис. 1, для двух чисел Рейнольдса  $Re = 2\Omega h^2/\nu$ ,

Спиральный вихрь представляет собой образование, обособленное от адвективной ячейки. Со стороны внешней границы области подогрева жидкость течет из нижних слоев в верхние по конической спирали. Выход ее на поверхность происходит в центральной зоне вихря. Не изменяя циклонического вращения, в обратном направлении жидкость течет по раскручивающейся спирали с постепенным опусканием. Около границы теплообменника осуществляется разворот жидкости для возвращения в центральную зону. Приведенное описание вихря следует рассматривать как обобщенное течение на фоне мелкомасштабного хаотического движения. Вид сверху на спиральный вихрь представлен на фотографии рис. 2, где  $G = 9,5 \cdot 10^5$  и  $Re = 12$ . (Визуализация движения была осуществлена путем добавления в жидкость алюминиевой пудры. Темные линии и пятна соответствуют опусканию жидкости).

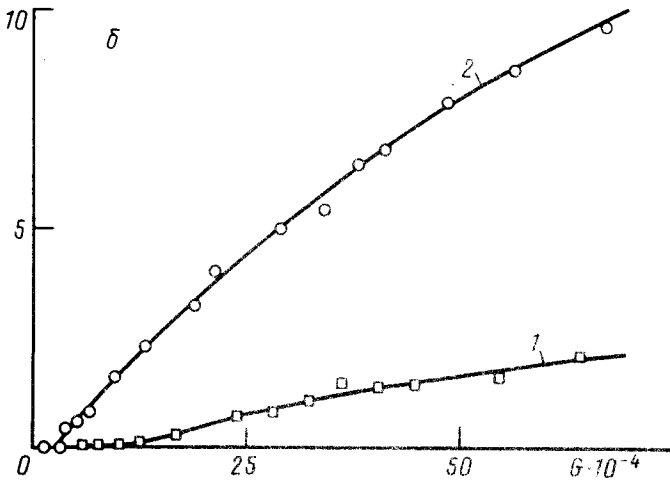


Рис. 1. Рост интенсивности вихря с увеличением числа Грасгофа: 1 -  $Re = 105$ , 2 -  $Re = 7$

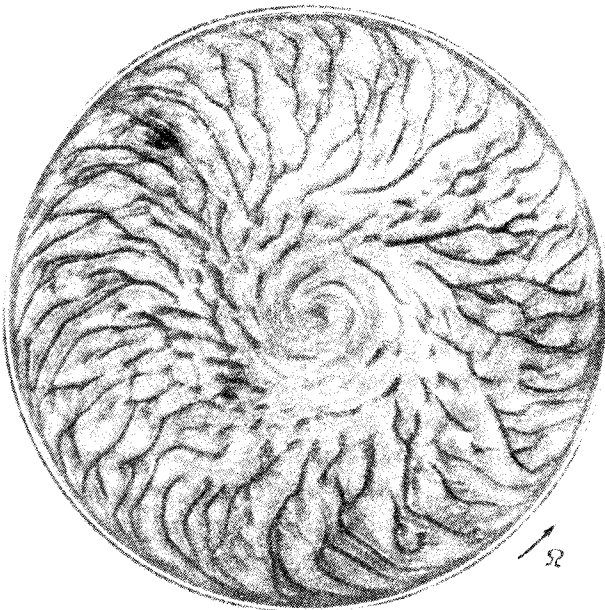


Рис.2

Из визуальных наблюдений за движением взвешенных в жидкости полистироловых шариков следует, что до кризиса граница раздела конвергентного и дивергентного потоков явля-

ется также границей циклонического и антициклонического движений. Вследствие этого при ослаблении антициклона всплывающими термиками, которыми переносится вращательный момент из нижних слоев, смещается вверх граница раздела. В результате такого смещения уменьшается конвергентная составляющая скорости, и увеличивается дивергентная, что возвращает систему к первоначальному состоянию. Таким образом, если  $G < G^*$ , система находится в динамическом равновесии.

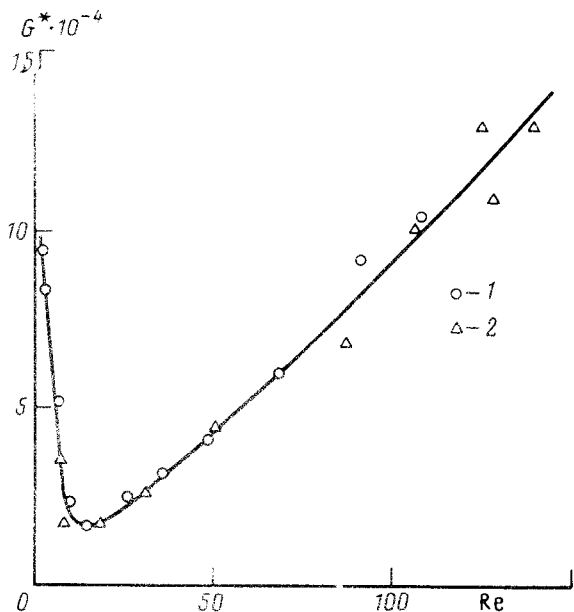


Рис. 3. Зависимость критического числа Грасгофа  $G^*$  от числа Рейнольдса  $Re$ : 1 — трансформаторное масло, 2 — смесь трансформаторного масла и керосина в пропорции 2 : 1

Исследованиями с помощью небольшого поплавкового датчика было установлено, что над теплообменником локальная завихренность жидкости является циклонической, если  $Re \neq 0$ . Когда  $G < G^*$ , конвективные термики под действием этой завихренности медленно вращаются вокруг вертикали. В условиях локального подогрева слоя над нагревателем всплывающих термиком больше, чем опускающихся, так что среднее значение циклонической спиральности конвективных движений оказывается отличным от нуля. Возможно, что мелкомасштабная спиральность всплывающих термиком, является той причиной, вследствие которой кризисным образом начинает развиваться крупномасштабное возмущение со структурой спирального циклонического вихря<sup>3</sup>.

В эксперименте использовались две жидкости, числа Прандтля которых отличались более, чем в два раза. Исследованиями было установлено, что  $G^*$  не зависит от числа Прандтля, но изменяется (рис. 3) с числом Рейнольдса.

Ход кривой на рис. 3 качественно согласуется с условиями возникновения тропических циклонов в природе. Их зарождение происходит в широтном поясе  $5-30^\circ$ , а наиболее часто — на широтах  $10-15^\circ$ <sup>1</sup>, то есть при некотором оптимальном числе Рейнольдса, для которого вертикальный перепад температуры является минимальным.

#### Литература

1. Хаин А.П. Математическое моделирование тропических циклонов. Л.: Гидрометеиздат, 1984.
2. Эволюция тайфунов. Под ред. Федорея В.Г. Л.: Гидрометеиздат. 1987, вып. 138.
3. Моисеев С.С. и др. Доклады АН СССР, 1983, 273, 549.

Поступила в редакцию  
2 апреля 1990 г.

Пермский государственный университет  
им. А.М.Горького

После переработки  
18 мая 1990 г.