

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВРАЩЕНИЯ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА*Г.П.Богатырев, Б.Л.Сморodin**Пермский государственный университет
614000 Пермь, Россия*

Поступила в редакцию 16 ноября 1995 г.

На основе экспериментальных результатов описывается физический механизм интенсивного вращения спирального циклонического вихря в лабораторной модели тропического циклона. Проводится сопоставление полученных результатов с уравнением для вертикальной компоненты вихря скорости.

PACS 47.27.Te, 47.32.Cc

Неоднократно исследователи обращали внимание на физический механизм образования и вращения крупномасштабных вихревых структур в атмосфере, таких, как тропические циклоны. Например, в [1–3] предполагается, что усиление вращения в таких структурах происходит за счет мелкомасштабной спиральной или анизотропной турбулентности. Эксперимент, в котором наблюдалось случайное во времени и пространстве возникновение мелкомасштабных вихрей во вращающейся жидкости с внутренними источниками тепла, описывается в [4]. Возникновение и взаимодействие большого количества равномерно расположенных по слою тонких вертикальных спиральных вихрей экспериментально исследуется в [5]. Однако в обоих случаях крупномасштабного вращения жидкости авторы не отмечают. Аномальный перенос тепла в центральную зону адвективным течением может служить причиной вращения вихря [6], но угловая скорость при этом оказывается невелика.

Ниже описывается физический механизм интенсивного вращения спирального вихря, для обоснования которого используется лабораторная модель тропического циклона [7, 8]. Внутренний диаметр рабочей кюветы, изготовленной из плексигласа, равнялся 30 см. В центре ее заподлицо с дном располагался латунный теплообменник, имеющий диаметр 10.5 см. Толщина слоя H составляла 3 см. В качестве рабочей жидкости использовались трансформаторное масло и смесь керосина с трансформаторным маслом в пропорции 1:2. Подробное описание установки приводится в работах [7, 8]. Система измерения вертикального распределения температуры в слое состояла из подвижной медь-константановой термопары, цифрового вольтметра и ЭВМ. При получении профилей температуры измерения, проводимые в выбранной точке, осреднялись по угловой координате φ за счет вращения модели. Осреднение по времени t производилось с помощью ЭВМ.

В эксперименте возникновение спирального циклонического вихря определяется двумя параметрами: числом Грасгофа $G = g\beta\Delta TH^3/\nu^2$ и числом Рейнольдса $Re = 2\Omega H^2/\nu$. Здесь g – ускорение силы тяжести, ΔT – осредненный вертикальный перепад температуры над нагревателем, β и ν – коэффициенты объемного расширения и кинематической вязкости жидкости, Ω – угловая скорость вращения кюветы. Если G больше некоторого критического значения G^* , в области подогрева в жидкости возникает спиральный циклонический вихрь большой интенсивности [7, 8].

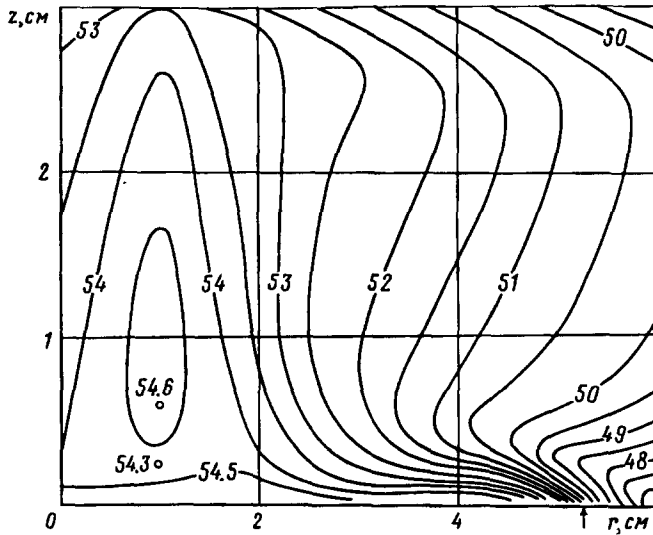


Рис.1

Поле температуры в градусах Цельсия в области подогрева, когда $G = 5.8 \cdot 10^5$ и $Re = 20$, изображено на рис.1, где z – вертикальная координата, а r – горизонтальная. Натекание на теплообменник (его внешняя граница на рис.1 отмечена стрелкой) жидкости, охлажденной сверху за счет естественной теплоотдачи, приводит к возникновению больших градиентов температуры над нагревателем в области $r > 2.5$ см в слое толщиной около 0.4 см. Вследствие неустойчивой стратификации плотности в этом слое образуются конвективные валики, подобные тем, что возникают в подогреваемом снизу плоском слое жидкости. Ось вращения конвективных валиков совпадает с направлением адвективного течения. Если $\Omega = 0$, то соседние валики вращаются вокруг своей оси в противоположных направлениях. В случае $\Omega \neq 0$ вырождение снимается за счет азимутальной составляющей скорости, максимальное значение которой находится на расстоянии 0.4–0.5 см от дна кюветы [8]. Подавление конвективной циркуляции происходит в тех валиках, у которых горизонтальная компонента скорости при $z \approx 0.2 \div 0.4$ см ослабляется циклонической скоростью. При взаимодействии вращающихся валиков с теплообменником температура их становится выше окружающей жидкости, и они отрываются от пограничного слоя. Из-за устойчивой стратификации плотности жидкости в средних слоях при $r > 2.5$ см (рис.1) всплытие валиков происходит вдоль линий тока адвективного течения, которое выносит их на поверхность в центральной зоне. Как видно на рис.2, вблизи поверхности эта зона состоит из согнутых циклоническим вращением вихря конвективных валиков. Всплытие происходит случайным образом. На кривой спектра пульсаций температуры в пограничном слое имеется размытый максимум на частоте 0.5 Гц. Всплывающие вали прогревают жидкость по всей высоте слоя, и вокруг центра образуется теплое тороидальное ядро (рис.1). В результате в окрестности $r = 0$ имеет место опускание жидкости (в тропическом циклоне так называемый "глаз" бури), что на фотографии рис.2 отмечается как темное пятно в центре вихря. У верхней

границы вала, вращающиеся вокруг своей оси, охлаждаются и, увлекаясь адвективным течением, опускаются. Возможно, что спиральные полосы облаков и дождя тропического циклона также обусловлены охлажденными в верхней атмосфере конвективными валами. При прохождении такой полосы происходит некоторое падение температуры, а в поле скорости ветра на нижнем уровне наблюдается усиление конвергенции и восходящего движения [9].



Рис.2. Вид сверху на центральную зону вихря. $G = 1.8 \cdot 10^6$, $Re = 12$. Стрелки указывают направление вращения конвективных валов и кюветы. Смесь трансформаторного масла, керосина и алюминиевой пудры

Для качественного анализа экспериментальных результатов рассмотрим вертикальную проекцию уравнения для вихря скорости:

$$\frac{\partial \omega_z}{\partial t} = \omega_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \omega_z \frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{\omega_\varphi}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \varphi} - u_r \frac{\partial \omega_z}{\partial r} - u_z \frac{\partial \omega_z}{\partial z} - \frac{u_\varphi}{r} \frac{\partial \omega_z}{\partial \varphi} + \nabla^2 \omega_z + \frac{\partial u_z}{\partial z} Re. \quad (1)$$

Здесь $\vec{\omega} = (\omega_r, \omega_\varphi, \omega_z)$ – завихренность (удвоенная локальная угловая скорость), $u = (u_r, u_\varphi, u_z)$ – скорость. Выражение (1) получено из уравнений Буссинеска для конвекции вращающейся жидкости без учета центробежных сил. Так как экспериментальные результаты осреднены по угловой координате, то роль членов, зависящих от φ , не обсуждается. Проводимый ниже анализ, справедливый для области подогрева, предполагает, что уравнение (1) осреднено по временному масштабу, значительно превышающему время всплытия конвективного вала.

Над нагревателем принесенная адвективным течением холодная жидкость прогревается, что приводит к появлению вертикальной компоненты скорости u_z , которая увеличивается с приближением к центральной зоне. Об увеличении u_z можно судить по уменьшению градиента температуры вначале в пограничном слое, а с приближением к центру – и по всей толщине жидкости (рис.1). Образующиеся в нижнем пограничном слое конвективные валики порождают радиальную завихренность ω_r . Приближение валиков к центру с одновременным всплытием увеличивает вертикальную завихренность жидкости, что описывается первым членом уравнения в правой части. Влияние второго члена, вероятно, невелико, так как $\partial u_z / \partial z$ является знакопеременной функцией от z . За счет четвертого члена уравнения происходит выравнивание завихренности в радиальном направлении. В верхних слоях это приводит к вытеснению антициклонической завихренности из центральной зоны, что отмечается в эксперименте [8] и в естественных условиях [10]. Если $G > G^*$,

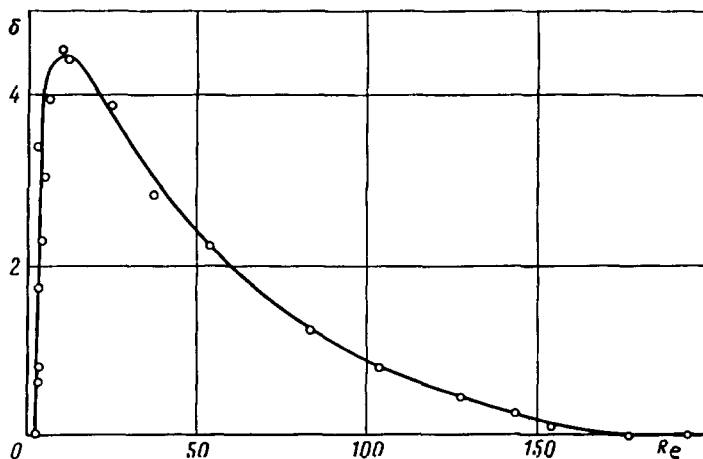


Рис.3. Зависимость интенсивности вихря от числа Рейнольдса. $G = 2.1 \cdot 10^5$. Трансформаторное масло

производная $\partial\omega_z/\partial z < 0$ [8], поэтому пятый член уравнения описывает усиление циклонического вращения в верхних слоях. Роль последнего члена двоякая. При малых значениях Re , когда $G > G^*$, происходит усиление циклонического вращения, вызванного силами Кориолиса, за счет всплывающих конвективных валов. В этом случае интегральная угловая скорость вихря δ , измеренная в единицах Ω по методике, описанной в [7], растет с увеличением Re (рис.3). Дальнейшее увеличение Re приводит к подавлению конвекции в пограничном слое и, следовательно, уменьшению ω_r , поэтому угловая скорость вихря падает.

В заключение заметим, что поле скорости лабораторного вихря аналогично полю скорости тропического циклона [8], так что на основе изложенных результатов могут быть построены аналитическая и численная модели тропического циклона.

Работа выполнена на средства, предоставленные Российским фондом фундаментальных исследований (проект 95-01-00389а).

1. С.С.Моисеев, Р.З.Сагдеев, А.В.Тур и др., ДАН СССР **273**, 549 (1983).
2. Е.А.Лупян, А.А.Мазуров, П.Б.Руткевич и др., ДАН **329**, 720 (1993).
3. П.Б.Руткевич, ЖЭТФ **104**, 4010 (1993).
4. S.S.Moiseev, V.D.Zimin, S.E.Starsev et al., Chaos. **1**, (2), 232 (1991).
5. В.Н.Вобнон and G.S.Golitsyn, J. Fluid Mech. **167**, 503 (1986).
6. В.Д.Зимин, Г.В.Левина, С.С.Моисеев и др., ДАН СССР **312**, 1372 (1990).
7. Г.П.Богатырев, Письма в ЖЭТФ **51**, 557 (1990).
8. Г.П.Богатырев, Э.В.Попова, в сб. Вестник Пермского университета (физика), **2**, 141 (1994).
9. А.П.Хаин, Математическое моделирование тропических циклонов, Л.: Гидрометеиздат, (1984), 247.
10. Эволюция тайфунов. Под. ред. В.Г.Федорея, Л.: Гидрометеиздат, **138** (1987), с.192.