

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.515.3:551.511.61

## СТРУКТУРА ИНТЕНСИВНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ВОЗДУШНЫХ ВИХРЕЙ ВЛАЖНОГО ТИПА

Е. П. Анисимова, А. М. Николаев, А. А. Сперанская, О. Н. Чернышев

(кафедра физики моря и вод суши)

На основе данных физического моделирования проводится классификация интенсивных конвективных вихрей влажного типа. Показано, что критерием, определяющим структуру вихрей

исследуемого класса, является тепловое число Фруда  $Fr^* = \frac{v_\infty^2}{Rg\Delta T/T_\infty}$ .

В течение ряда лет авторами проводятся исследования структуры интенсивных конвективных атмосферных вихрей, природным аналогом которых являются тропические циклоны. Исследования выполняются методом физического моделирования, описание экспериментальных установок и методик измерений полей скорости, температуры и влажности дано в работах [1, 2]. В установках были воспроизведены основные силы, формирующие поля физических величин в тропических циклонах: подъемная сила, обеспечивающая отвод воздушных масс от подстилающей поверхности, и сила Кориолиса, обуславливающая угловой момент на периферии вихревой системы.

Учитывая специфику реальных тропических циклонов, подъемную силу моделировали конвективным способом, для чего в качестве подстилающей поверхности использовали воду, температура которой значительно превышала температуру окружающей установку воздуха. Большие перепады температур на границе вода–воздух обуславливали высокий уровень влажности в установке, что в свою очередь усиливало плотностную неустойчивость воздушных масс в модели и позволяло оценить влияние влажности на структуру вихревой системы.

Как указывалось выше, фоновая завихренность в тропических циклонах обуславливается действием силы Кориолиса, роль которой в балансе сил, формирующих динамическую структуру вихря, в натуральных условиях уменьшается по мере приближения к центру циклона, где преобладающими становятся сила радиального градиента давления и центробежная сила. При моделировании интенсивных атмосферных вихрей типа тропического циклона действие силы Кориолиса можно учесть путем задания некоторой фоновой завихренности на периферии рассматриваемой области. Такой подход к моделированию будет правомерен для области тропического циклона, на внешней границе которой число Россби  $Ro \simeq 1$ . При этом аналогом параметра Кориолиса для лабораторной модели воздушного конвективного вихря является величина  $v_{\varphi\infty}/R$ , где  $v_{\varphi\infty}$  — циркуляционная скорость на границе установки, а  $R$  — радиус последней. В настоящей работе для моделирования фоновой завихренности была использована система тангенциальных окон, впервые примененная в

работе [3].

В процессе исследований не планировалось моделирование слоя оттока, существующего в тропических циклонах, поэтому модельная установка имела, если можно так выразиться, свободную «крышу».

Основными внешними параметрами модели являлись температура подстилающей водной поверхности  $T_s$  и угол поворота тангенциальных окон  $\alpha$ , тангенс которого характеризовал отношение тангенциальной  $v_{\varphi\infty}$  и радиальной  $v_{r\infty}$  составляющих скорости на периферии установки.

Конструкция экспериментальной установки не позволяла наблюдать временную эволюцию вихря в процессе его возникновения и развития. Удалось получать лишь стационарные вихри, соответствовавшие тем или иным значениям определяющих параметров. Однако, как показал анализ измеренных характеристик конвективных вихрей, при различных значениях внешних определяющих параметров реализовались модельные вихревые системы различной термодинамической структуры, которая отражала особенности структуры природных интенсивных конвективных вихрей на различных стадиях их временной эволюции. Таким образом, можно было судить об изменении структуры вихревых систем такого класса во времени.

Результаты экспериментального исследования основных физических полей в модельных вихрях дали возможность выявить критерий, определяющий их структуру. Из анализа имеющихся в настоящее время данных натуральных наблюдений следует, что основными силами, действующими в вихрях тропических циклонов, являются центробежная сила и сила радиального градиента давления. Исключение составляет приводный пограничный слой, где помимо этих двух сил значительную роль играет также сила трения воздушного потока о подстилающую водную поверхность. Как показал анализ материалов инструментального исследования полей скорости, температуры, влажности и интегральных характеристик турбулентности [4], эти положения целиком относятся и к рассматриваемым лабораторным моделям влажных интенсивных конвективных вихрей.

Представляет интерес провести классификацию структуры интенсивных вихрей в зависимости от определя-

ющих вихревую систему внешних параметров. Первая попытка классификации сухих интенсивных конвективных вихрей (подстилающая поверхность — сухой нагретый металлический лист) была сделана в работе [3], где в качестве критерия, характеризующего структуру вихря, был введен параметр стабильности:

$$S = \frac{\Delta T/T_\infty}{\beta^2};$$

здесь  $\Delta T/T_\infty = (T_s - T_\infty)/T_\infty$ ,  $T_s$  и  $T_\infty$  — температура жесткой подстилающей поверхности и окружающего воздуха,  $\beta = \operatorname{tg} \alpha$  — тангенс угла поворота тангенциальных окон на периферии установки. В работе [3] было выделено пять режимов вихревых структур, два из которых соответствовали одноячейному типу, а два — двухъячейному. Пятый режим представлял собой случай вырожденного вихря. Классификация сухих конвективных вихрей в работе [3] была основана практически только на материале визуальных исследований. Параметр стабильности  $S$  использовался также в работе [5] для классификации интенсивных влажных конвективных вихрей. При этом к нему добавлялся еще параметр вентиляции, представляющий собой отношение площади выходного отверстия в верхней части установки к площади ее боковой поверхности. Такой подход еще в большей степени привязывает классификацию к геометрическим параметрам экспериментальных установок.

Опираясь на данные исследований тропических циклонов и на результаты выполненных авторами настоящей статьи лабораторных экспериментов с физическими моделями вихрей, рассмотрим в качестве внешних параметров следующие величины:  $\gamma = \Delta T/T_\infty$  и динамическое число Фруда  $Fr = v_\infty^2/Rg$ , где  $g$  — ускорение силы тяжести. По величине  $\Delta T$  можно судить об изменении радиального градиента давления в вихре. Динамическое число Фруда применительно к объекту настоящего исследования можно трактовать как представленную в безразмерном виде центробежную силу на границе вихревой системы. Поскольку данных о структуре тропических циклонов пока еще недостаточно для проведения их классификации в зависимости от внешних определяющих параметров, попытаемся выполнить такую классификацию на основе данных лабораторного моделирования интенсивных конвективных вихрей. Такой подход представляется правомерным, так как в работе [4] показано, что модельные интенсивные конвективные вихри влажного типа, обсуждаемые в данной работе, по основным термодинамическим критериям подобны центральной области нижней тропосферы реальных тропических циклонов.

Эксперименты показали, что во влажных конвективных вихревых системах в исследованном диапазоне изменения внешних определяющих параметров устойчивая одноячейная структура не реализовалась. Это обстоятельство скорее всего может быть объяснено

тем, что в модельных вихрях в качестве подстилающей поверхности использовалась нагретая вода. В этом случае поле плотности в вихре определяется не только температурой, как это имело место в работе [3], но и влажностью воздуха, которая усиливает плотностную неустойчивость. Во влажной конвективной вихревой системе можно четко выделить четыре различных типа ее структуры (см. рис 1). Примеры радиальных распределений тангенциальной составляющей скорости  $v_\varphi(r)$ , соответствующих этим четырем типам структуры, приведены на рис.1. Типу 1 (см. рис. 1, и ) соответствуют вихри с четким «глазом» в центре, хорошо прослеживаемым на фотографиях поперечных сечений вихря. Тип 2 характеризует вихри, также обладающие хорошо выраженным «глазом», однако контрастность его по сравнению с окружающими районами вихря слабее. Тип 3 представляют вихри, четкий «глаз» в которых не наблюдался. Тип 4 относится к случаю, когда во всей установке имело место почти «твердотельное» вращение воздушных масс и интенсивный вихрь не реализовывался.

Из рис. 1, видно, что в координатах  $\gamma$  и  $Fr$  возможно провести прямые линии, отделяющие друг от друга различные типы структуры влажной конвективной вихревой системы. Прямые линии на рис. 1, соответствуют соотношению

$$\frac{v_\infty^2}{Rg\gamma} = \frac{Fr}{\gamma} = \text{const.}$$

Величина  $Fr/\gamma$  есть не что иное, как тепловое число Фруда, которое обозначим как  $Fr^*$ . Критерий  $Fr^*$  может рассматриваться как соотношение между центробежной силой на периферии вихревой системы и радиальным градиентом давления в последней, т. е. между основными силами, формирующими структуру вихрей рассматриваемого класса.

Основываясь на результатах критериального анализа в [4], можно предположить, что предложенная классификация будет правомерна и для реальных тропических циклонов. На рис. 2 данные рис. 1, представлены в координатах  $v_{\varphi \max}/v_{\varphi \infty}$  и  $Fr^*$  (значки 1–4). Значками 5, 6, 7, 8, 9 показаны данные, относящиеся соответственно к тайфунам Тэсс и Филлис [6], ураганам Анита [7], Инесс [8], тайфуну Трике [7]. По рис. 2 хорошо прослеживаются значения критерия  $Fr^*$ , при которых влажная конвективная вихревая система переходит от одного режима к другому.

Величину  $v_{\varphi \max}/v_{\varphi \infty}$  можно рассматривать как степень концентрированности вихря. Из рис. 2 видно, что этот параметр для вихрей рассматриваемого класса монотонно растет при уменьшении теплового числа Фруда  $Fr^*$ . Во влажных интенсивных конвективных вихрях значение скорости на радиусе максимальных скоростей может превышать скорость на периферии в 5–7 раз, что и наблюдается в мощных ураганах и тайфунах.

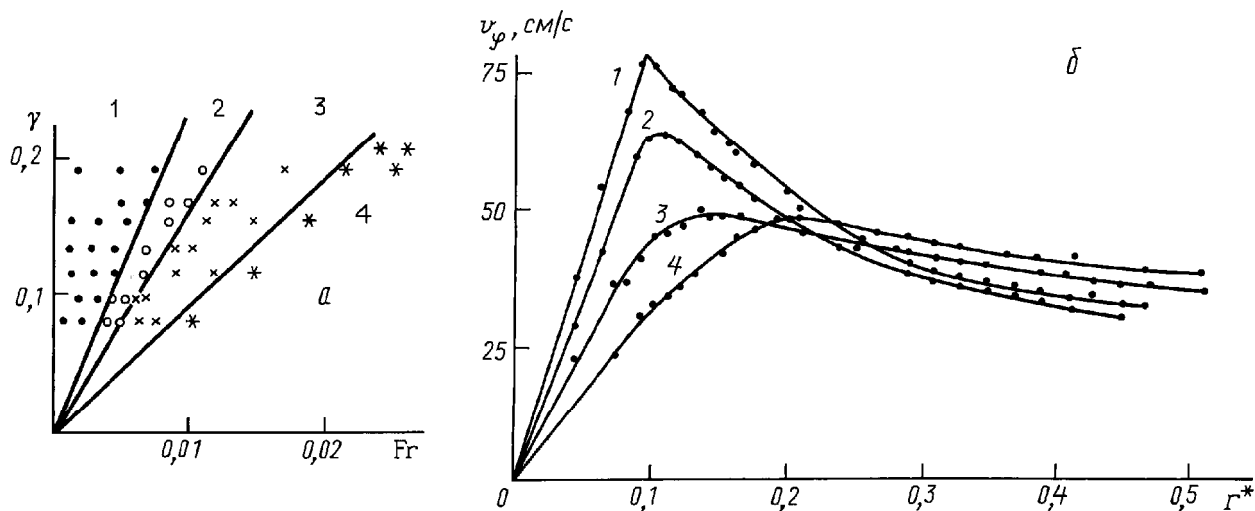


Рис. 1. Классификация влажных интенсивных конвективных вихрей в зависимости от параметра  $\gamma$  и числа Фруда  $Fr$  () и радиальные распределения тангенциальной составляющей скорости  $v_\varphi(r)$ , характерные для различных типов вихрей ()

Радиальные распределения тангенциальной составляющей скорости  $v_\varphi(r)$  в вихрях, для которых число  $Fr^*$  лежит в диапазоне значений  $Fr^* = 0,005 \div 0,063$ , характеризуются четко выраженным максимумом (профили 1 и 2 на рис.1.). В вихревых системах, для которых  $0,063 < Fr^* < 0,110$ , в распределении  $v_\varphi(r)$  максимум выражен слабо (профиль 3 на рис. 1.), а при  $Fr^* > 0,110$  почти не прослеживается (профиль 4 на рис. 1.).

Несколько по-иному по сравнению со степенью концентрированности вихрей ведет себя интенсивность конвективных вихрей с ростом теплового числа Фруда. Эту величину принято характеризовать максимальным значением горизонтальной скорости  $v_{max}$  в вихре. Как показали результаты моделирования, величина  $v_{max}$  при росте числа  $Fr^*$  изменяется немонотонно. В некотором интервале чисел  $Fr^*$  ( $0,030 < Fr^* < 0,080$ ) интенсивность конвективных вихрей наибольшая. При  $Fr^* < 0,030$  и  $Fr^* > 0,080$  интенсивность вихрей падает.

Данные о характеристиках реальных тропических циклонов, как это следует из рис.2, не противоречат предложенной классификации.

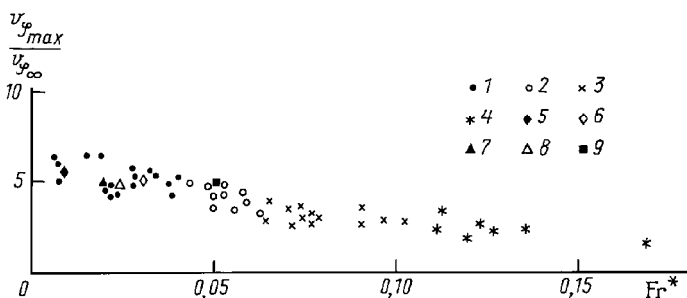


Рис. 2. Изменение безразмерной максимальной тангенциальной скорости в вихре  $v_{\varphi max}/v_{\varphi \infty}$  при переходе вихря от одного режима к другому.  $Fr^*$  — тепловое число Фруда. Значки 1–4 соответствуют рис. 1

Использованное в настоящей работе выражение для числа  $Fr^*$  учитывает влияние на радиальный градиент давления только разности температур подстилающей водной поверхности в вихре и в окружающем вихрь пространстве. Но в эволюции и энергетике реальных тропических циклонов огромную роль играет влажность. Поэтому более правильно использовать в качестве определяющего параметра не обычную температуру  $T$ , а виртуальную  $T_v = T(1 + 0,605q)$  ( $q$  — удельная влажность воздуха), что позволит учесть влияние влажности на горизонтальный перепад давления в вихревой системе. Такие расчеты дали возможность проследить трансформацию структуры интенсивных конвективных вихрей влажного типа в зависимости от числа  $Fr^{**} = \frac{v_\infty^2}{Rg\Delta T_v/T_{v\infty}}$ . Значения числа  $Fr^{**}$ , соответствующие наиболее интенсивным вихрям, лежат в диапазоне от 0,020 до 0,045.

Литература

1. Анисимова Е.П., Гусев А.М., Сперанская А.А., Шандин В.С. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1981. №3. С.98 (Moscow University Phys. Bull. №3. P.109).
2. Анисимова Е.П., Куцаев А.С., Сперанская А.А., Шандин В.С. // Изв. АН СССР, ФАО. 1982. 18, №7. С.761.
3. Fitzjarrald D. E. // J. Atmos. Sci. 1973. 30. P.894.
4. Анисимова Е.П., Милехин Л.И., Сперанская А.А., Шандин В.С. // Тропическая метеорология. Л., 1987. С.97.
5. Перес Герра Сантьяго Эрико. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Минск, 1985.
6. Иванов В.Н., Пудов В.Д. // Тайфун-75. Т.1. 1977. С.66.
7. Шитс Р.С. // Интенсивные атмосферные вихри. М., 1985. С.49.
8. Минина Л.С. // Метеорология и гидрология. 1967. №8. С.3.

Поступила в редакцию 24.06.96