

УДК 551.515.3:551.511.61

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО ВЫСОТЕ СКОРОСТИ ВЕТРА НА ПЕРИФЕРИИ ИНТЕНСИВНОГО АТМОСФЕРНОГО КОНВЕКТИВНОГО ВИХРЯ

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

(кафедра физики моря и вод суши)

Обсуждаются результаты исследования изменения по высоте горизонтальной составляющей скорости ветра на периферии атмосферных интенсивных конвективных вихрей (ИКВ) типа тропических циклонов. Исследование выполнено на модельных ИКВ, по ряду термогидродинамических критериев подобных нижней тропосфере в центральной части тропического циклона.

В течение ряда лет на физическом факультете МГУ ведутся работы по физическому моделированию атмосферных интенсивных конвективных вихрей (ИКВ) типа тропических циклонов (ТЦ). Модельные вихри реализуются на экспериментальной установке, в которой воспроизведены основные условия, необходимые для существования ТЦ: наличие водной подстилающей поверхности с достаточно высокой температурой; существование фоновой завихренности, превышающей некоторое значение; наличие эффекта конденсации с выделением тепла. Подробное описание экспериментальной установки дано в [1, 2]. В модельных вихрях были инструментально измерены тангенциальная V_φ и радиальная V_r скорости, температура T и удельная влажность q воздуха на разных расстояниях от центра вихря и на различных высотах. Выполненный на основе данных измерений критериальный анализ показал, что 1) модельные вихри можно считать физической моделью нижней тропосферы в центральной части ТЦ (без слоя оттока); 2) критерием, определяющим структуру модельных ИКВ, является тепловое число Фруда $Fr^* = \frac{V_\infty^2}{gR(\Delta T/T_\infty)}$, которое может трактоваться как отношение центробежной силы на периферии вихря к силе, обусловленной радиальным градиентом давления в нем (V_∞ — горизонтальная составляющая скорости на периферии вихревой системы, g — ускорение силы тяжести, R — радиус вихря, $\Delta T = T_0 - T_\infty$, T_0 и T_∞ — температура подстилающей поверхности в центре вихря и на его периферии).

Результаты исследования поля скорости в модельных вихрях, соответствующих различным стадиям развития природных ТЦ, изложены в работах [1, 2]. Однако в указанных публикациях не затрагивался вопрос о вертикальной структуре поля скорости на периферии ИКВ, что, безусловно, представляет определенный интерес.

Для измерения горизонтальной составляющей скорости на периферии модельного атмосферного ИКВ был использован метод термоанемометрии. Применялся термоанемометр фирмы «Диза» с одноточечным датчиком, инерция которого не превышала 100 мкс. Датчик представлял собой платиновую нить диаметром 5 мкм и длиной 3 мм. Рабочая температура нити составляла от 130 до 180 °С. Поскольку на периферии вихревой системы вертикальная ско-

рость воздушных масс была близка к нулю, датчик термоанемометра, помещенный в поток, регистрировал только горизонтальную составляющую скорости V_∞ . Датчик располагался на вертикальной штанге и устанавливался на биссектрисе угла между двумя соседними пластинами «тангенциальных окон» [1].

Изменение по высоте горизонтальной составляющей скорости на периферии воздушных ИКВ исследовалось в модельных вихрях, для которых тепловое число Фруда Fr^* менялось от 0,005 до 0,200. Обнаружено, что на некоторой высоте от подстилающей поверхности горизонтальная составляющая скорости V_∞ имеет максимум.

Для сравнения профилей, полученных в различных модельных вихрях, необходимо было представить их в безразмерном виде. С этой целью введен вертикальный линейный масштаб, связанный с протяженностью слоя втока воздуха. В выборе этого масштаба в литературе существует определенный произвол. В настоящей работе толщина слоя втока z_{in}^* на периферии вихревой системы определялась уровнем, на котором горизонтальная скорость достигает своего максимального значения. Скорость, осредненную в слое z_{in} , обозначим через V_∞^* . Как показали измерения, с ростом теплового числа Фруда Fr^* величины z_{in}^* и V_∞^* возрастают. В безразмерном виде в координатах z/z_{in}^* и V/V_∞^* вертикальные распределения горизонтальной составляющей скорости на периферии исследованных модельных ИКВ хорошо описываются одной кривой. Выше точки $z/z_{in}^* = 1$ величина V/V_∞^* сравнительно медленно спадает с ростом высоты, а ниже — быстро уменьшается с приближением к подстилающей водной поверхности. Такая асимметрия профиля скорости обусловлена действием трения о подстилающую поверхность, и, следовательно, можно считать, что толщина динамического пограничного слоя на периферии конвективной вихревой системы совпадает с z_{in}^* .

Можно ожидать, что вертикальный профиль скорости $V_\infty(z)$ в пограничном слое на периферии ИКВ будет описываться логарифмической зависимостью, так как в этом районе вихря плотностная стратификация, согласно измерениям температуры и влажности воздуха, близка к нейтральной, а вертикальное движение практически отсутствует. То есть можно

записать:

$$V_{\infty}(z) = \frac{V_*}{\chi} \ln \frac{z}{z_0}, \quad (1)$$

где V_* — динамическая скорость, или скорость трения, χ — постоянная Кармана, z_0 — параметр шероховатости.

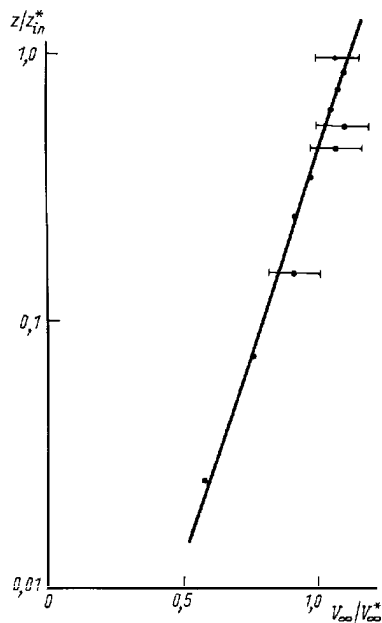


Рис. 1. Вертикальные профили горизонтальной составляющей скорости на периферии модельных ИКВ в полулогарифмическом масштабе

На рис. 1 данные измерений в модельных вихрях вертикальных распределений горизонтальной периферийной скорости представлены в полулогарифмическом масштабе в координатах V/V_{∞}^* и z/z_{in}^* . Сплошная линия на рис. 1 соответствует зависимости

$$\frac{V_{\infty}}{V_{\infty}^*} = 0,145 \ln \frac{z}{4 \cdot 10^{-4} z_{in}^*}. \quad (2)$$

Числовые коэффициенты найдены по данным измерений. Сравнивая выражения (1) и (2), при выбранном линейном вертикальном масштабе будем иметь:

$$z_0 = 4 \cdot 10^{-4} z_{in}^*; \quad V_*/\chi = 0,145 V_{\infty}^*.$$

При этом параметр шероховатости пропорционален величине z_{in}^* , а параметр V_*/χ — средней величине горизонтальной скорости V_{∞}^* в слое втока. И, следовательно, величины z_0 и V_*/χ зависят от теплового числа Фруда.

Считая, что на периферии вихревой системы величина χ равна 0,4, получим соотношение для оценки динамической скорости в этой области вихря:

$$V_* \cong 0,06 V_{\infty}^*. \quad (3)$$

На основании зависимостей (2) и (3) вертикальные распределения горизонтальной составляющей скорости на периферии вихря можно представить в общепринятых безразмерных координатах V_{∞}/V_* и z/z_0 . Соответствующие данные изображены на рис. 2.

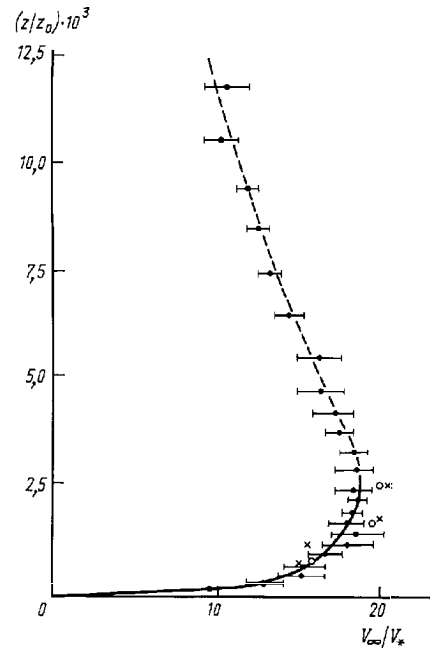


Рис. 2. Распределение по высоте горизонтальной составляющей скорости на периферии ИКВ, представленное в универсальных координатах V_{∞}/V_* и z/z_0 : модельные вихри (●), тайфун Тэсс (×, ○)

На этом же рисунке значками (○, ×) показаны результаты вертикального аэростатного зондирования, проведенного в экспедиции «Тайфун-75» на периферии тайфуна Тэсс на расстоянии 700–800 км от его центра [3]. Профили соответствуют наиболее интенсивной стадии развития тайфуна. Как видно из рис. 2, данные, соответствующие реальному ТЦ, удовлетворительно согласуются с данными, полученными в модельных вихрях.

Выполненные исследования свидетельствуют о том, что вертикальное распределение по высоте горизонтальной составляющей скорости на периферии модельных ИКВ, соответствующих различным стадиям развития природных ТЦ, подчиняется логарифмическому закону. Вертикальные профили скорости в периферийной области модельных вихрей и природных конвективных вихрей могут быть представлены в универсальном виде, если параметр шероховатости и динамическую скорость потока выразить через толщину слоя втока и скорость, осредненную в этом слое.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 99–05–64048).

Литература

1. Анисимова Е.П., Сперанская А.А. // Взаимодействие в системе литосфера–гидросфера–атмосфера. М.: Недра, 1996. С. 187.
2. Анисимова Е.П., Матхеев С.С., Милехин Л.И., Сперанская А.А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1995. № 5. С. 57 (Moscow University Phys. Bull. 1995. No. 5. P. 53).
3. Изучение особенностей мезомасштабных процессов в атмосфере в зоне прохождения, зарождения ураганов: анализ данных экспедиций «Тайфун». Отчет Ин-та эксперимент. метеорологии, № Госрегистрации 76091753. Обнинск, 1977. С. 196.