

УЗ-волны, движение частиц среды непосредственно связано с движением его поверхности. Вследствие этого вблизи излучателя поле устанавливается достаточно быстро. Вдали от излучателя амплитуда гармоник зависит от колебаний всей пузырьковой области, число же пузырьков растет по мере развития кавитационного процесса. Поэтому амплитуды гармоник сначала растут, а затем стабилизируются, что соответствует динамике числа кавитационных пузырьков. Такое объяснение механизма явления, однако, не совсем согласуется с результатами, полученными в трансформаторном масле. Для правильной трактовки явления планируется провести дополнительные теоретические и экспериментальные исследования.

Работа выполнена при поддержке программы

«Университеты России» (грант 1-5286) и РФФИ (грант 00-02-17055).

Литература

1. *Bvnnen C.E.* Cavitation and Bubble Dynamics. Oxford: Oxford University Press, 1995.
2. *Mettin R., Luther S., Ohl C.-D., Lauterborn W.* // Ultrasonics Sonochemistry. 1999. No. 6. P. 25.
3. Химия и ультразвук / Под ред. Т. Мейсона. М.: Мир, 1993.
4. *Сиротюк М.Г.* // Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л.Д. Розенберга. М.: Наука, 1968. С. 167.
5. *Акуличев В.А.* // Акуст. журн. 1968. 14, № 3. С. 337.

Поступила в редакцию
17.05.00

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.515.2

О МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛОГО ЯДРА В ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНАХ

Е. П. Анисимова, Л. И. Милехин, А. А. Сперанская

(кафедра физики моря и вод суши)

E-mail: psiwc47@phys.msu.su

Методом лабораторного моделирования исследован механизм формирования теплового ядра тропического урагана. Выявлены особенности динамической и термической структуры в центральной области вихревой системы, обуславливающие одну из существенных характеристик этого природного явления.

В динамике и энергетике атмосферных интенсивных конвективных вихрей (ИКВ), ярким представителем которых являются тропические циклоны, особую роль играет приводный пограничный слой атмосферы. В этом слое происходит преобразование внутренней и потенциальной энергии воздушных масс в кинетическую, приводящее к возникновению экстремальных ветров. Существующая в приводном слое тропического циклона конвергенция теплового влажного воздуха создает постоянный приток водяного пара в центр вихревой системы. Выделение скрытой теплоты испарения при конденсации приводит к тому, что практически на всех уровнях в центре циклона температура существенно выше, чем в окружающей атмосфере, т. е. возникает центральное теплое ядро, которое является одной из существенных характеристик зрелого урагана.

В настоящей работе приводятся результаты исследований структуры поля температуры и влажности в воздушных ИКВ методом физического моделирования. Экспериментальная установка [1] представляла собой усовершенствованную вихревую камеру Фитцджеральда [2], в которой подстилающей поверхностью служила нагретая вода. Создаваемые в лабораторных условиях влажные модельные вихри по ряду термогидродинамических критериев подоб-

ны нижней тропосфере центральной области тропического циклона [3].

Температура воздуха в вихрях измерялась с помощью медно-константановой термопары (будем называть ее сухой). Диаметр чувствительного спая термопары составлял 0.25–0.30 мм. Второй спай сухой термопары был помещен в термостат, где с точностью 0.1°C поддерживалась постоянная температура. Влажность измерялась психрометрическим методом [4]. Аналогом смоченного термометра в психрометрическом методе служила термопара, окруженная проволочной петлей диаметром 2 мм, на которой силами поверхностного натяжения удерживалась пленка воды. Второй спай смоченной термопары помещался в тот же термостат, что и сухая. Сухая и смоченная термопара располагались на расстоянии 2–3 мм друг от друга и были соединены с самописцем. Минипсихрометр на термопарах работал без аспирации. Сравнительная калибровка показала, что расхождение показаний минипсихрометра без аспирации с показаниями психрометра Асмана не превышало 2%. Для надежного определения положения термопар в горизонтальной плоскости относительно центра вихря синхронно с записью их сигналов осуществлялась фотосъемка поперечного сечения вихря, в котором велись измерения. Поперечные сечения

вихря высвечивались с помощью светового ножа толщиной 1 см [5]. Съемка производилась фотокамерой РФК-5, расположенной над установкой и срабатывающей от импульсов генератора. Эти импульсы одновременно с показаниями термопар фиксировались на одной ленте самописца. Пример записи показан на рис. 1. На каждом горизонте было получено от 600 до 1300 показаний сухой и смоченной термопар и определено столько же расстояний их от центра вихря [5]. Этот набор измеренных величин рассортировывался по радиусам и в пределах каждого интервала радиусов осреднялся. По показаниям термопар определялись температура, относительная влажность и упругость водяного пара, которая затем пересчитывалась в удельную влажность.

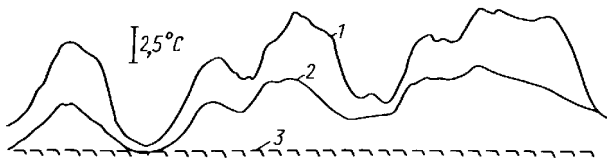


Рис. 1. Пример записей сигналов от сухой (1) и смоченной (2) термопар и импульсов, поступающих с генератора и отмечающих моменты срабатывания затвора фотокамеры (3)

Режим вихревой системы будем характеризовать значением теплового числа Фруда $Fr^* = V_\infty^2 / (Rg \frac{\Delta T}{T_\infty})$, определяющим соотношение между центробежной силой на периферии вихревой системы и силой радиального градиента давления в ней [6] (V_∞ и R — горизонтальная скорость на периферии вихревой системы и ее радиус, g — ускорение силы тяжести, $\Delta T = T_0 - T_\infty$, где T_0, T_∞ — абсолютная температура подстилающей поверхности под центром вихревой системы и в окружающем вихрь пространстве соответственно). В настоящей работе представлены результаты исследований поля температуры и влажности в ИКВ, для которых $Fr^* < 0.065$,

а степень концентрированности вихря, характеризуемая отношением V_{max}/V_∞ , меняется от 3.5 до 6.5 (V_{max} — максимальное значение тангенциальной составляющей скорости в ИКВ).

Данные измерений позволили определить как радиальную, так и вертикальную структуру поля скорости, температуры и влажности в ИКВ. Выявлено, что в вихрях, для которых $Fr^* < 0.065$, имеет место структура с нисходящим движением воздуха в центре вихревой системы. Вертикальная составляющая скорости V_z здесь отрицательна. По мере удаления от центра вихря абсолютные значения V_z падают и на некотором расстоянии от его оси (меньшем, чем радиус r_{max} , соответствующий максимальным тангенциальным составляющим скорости) скорость V_z меняет знак. Таким образом, нисходящее движение воздушных масс трансформируется в восходящее. В этой области вихря происходит столкновение двух радиальных потоков воздуха: идущего от центра к периферии вихря и направленного от периферии к центру (обусловленного радиальным градиентом давления). Из картин линий тока следует, что в обсуждаемых вихрях центральная циркуляционная ячейка с нисходящим током воздуха скорее всего не проникает до подстилающей поверхности.

Радиальные распределения температуры $t_a(r)$ характеризуются резким спадом величины $t_a(r)$ по направлению от центра вихря к его периферии.

На рис. 2, а приведены типичные для вихрей с $Fr^* < 0.065$ примеры вертикальных распределений температуры $t_a(z)$, соответствующие различным расстояниям от оси вихря.

В центральной области вихревой системы наблюдается четкий максимум, расположенный на некоторой высоте от подстилающей водной поверхности. Ниже локализуется слой инверсии температуры. При удалении от оси вихря максимум температуры уменьшается по величине и смещается вверх по оси высот. Заметим, что с ростом числа Fr^* максимальное значение температуры увеличивается.

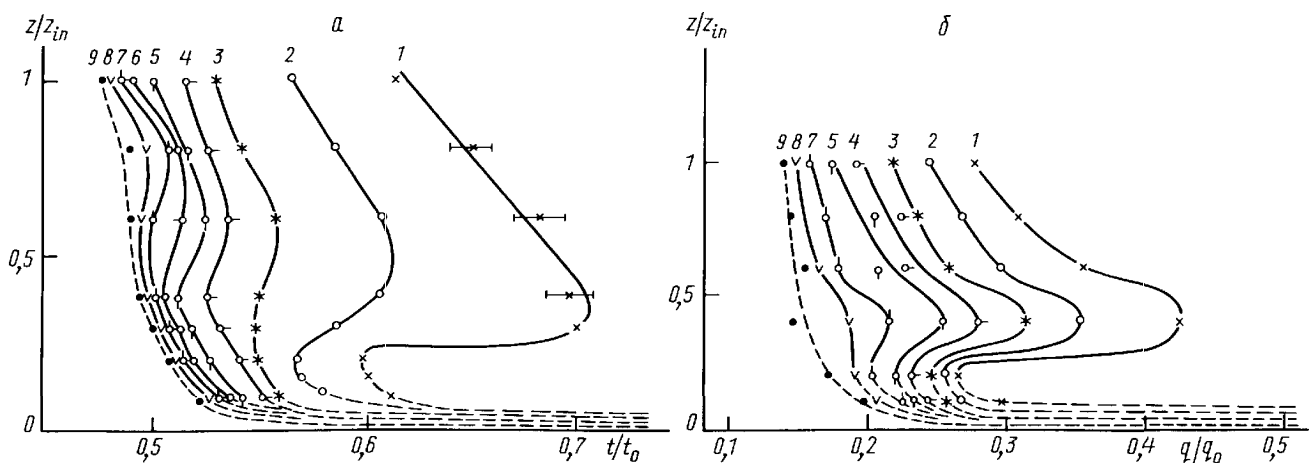


Рис. 2. Вертикальное распределение температуры (а) и удельной влажности (б) на различных расстояниях от оси влажного ИКВ при $Fr^* = 0.015$ (z_{in} — высота, на которой радиальная скорость перестает меняться и становится близкой к нулю)

Во внешнем районе вихря (при $r/r_{\max} > 3.5-4.5$) температура монотонно падает при увеличении высоты и ее вертикальное распределение хорошо описывается логарифмической зависимостью вида

$$t_a(z) = t_z^* \ln z + \text{const}, \quad (1)$$

где t_z^* — вертикальный масштаб температуры, который возрастает с ростом Fr^* .

Зависимости вида (1) удовлетворяют также и те вертикальные профили температуры на радиусах $r/r_{\max} \leq 3.5$, которые соответствуют горизонтам ниже слоя инверсии температуры (пунктирные линии на рис. 2, а).

Из рис. 2, а видно, что инверсия температуры во влажных ИКВ наблюдается в узком вертикальном слое, что свидетельствует о возможном наличии здесь локального источника тепла. Измерения показали, что во внешнем районе рассматриваемых ИКВ относительная влажность уменьшается при росте высоты и влажность, близкая к насыщению, наблюдается только у поверхности воды. По мере приближения к центру вихря характер изменения относительной влажности изменяется: на некотором горизонте ϵ начинает возрастать при увеличении z и в центре вихревой системы достигает 100%. При этом с ростом Fr^* 100%-я влажность начинает наблюдаться на более высоких горизонтах и распространяется на большие расстояния по вертикали и по радиусу. Эти результаты позволяют считать, что локальным источником тепла, интенсифицирующим слой инверсии температуры во влажных ИКВ, являются фазовые переходы воды, сопровождающиеся выделением скрытого тепла. Таким образом, в рассматриваемых модельных влажных ИКВ на некотором удалении от подстилающей поверхности формируется локальный источник тепла — теплое ядро, которое образуется в результате тех же процессов, какие наблюдаются и в природных атмосферных интенсивных вихрях типа тропических циклонов.

Распределение удельной влажности q в рассматриваемых вихрях аналогично полю температуры (рис. 2, б). Во внешнем районе вихревой системы, а также на нижних горизонтах до начала зоны инверсии в центральной части вихря (пунктирные линии на рис. 2, б) зависимость $q(z)$ монотонна и подчиняется логарифмическому закону:

$$q(z) = q_z^* \ln z + \text{const}, \quad (2)$$

q_z^* — вертикальный масштаб влажности.

Сравнивая зависимости (1) и (2), можно сказать, что механизмы тепло- и влагопереноса по вертикали во внешнем районе вихря и в приводном пограничном слое на горизонтах ниже зоны инверсии во влажных ИКВ идентичны.

Логарифмическое распределение температуры и удельной влажности в исследуемых вихрях на первый взгляд кажется неожиданным, если учесть, что в модельных вихрях температура подстилающей поверх-

ности в три раза превышала температуру воздуха в окружающем вихрь пространстве. Для оценки правдоподобности логарифмического представления для вертикального распределения температуры и влажности используем параметр Мони́на–Обухова $z/|L|$ [7], где

$$L = -\frac{u_*^3}{\chi g \alpha_a \frac{Q_a}{c_{pa} \rho_a}}, \quad (3)$$

u_* — динамическая скорость потока, Q_a — контактный поток тепла, c_{pa} , ρ_a , α_a — удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплового расширения воздуха соответственно, χ — постоянная Кармана.

Входящие в выражение (3) величины u_* и Q_a определялись следующим образом. В течение эксперимента инструментально фиксировался уровень воды в установке, и по этим данным определялась скорость изменения уровня со временем $\partial h / \partial \tau$, что позволило рассчитать интегральный поток влаги с подстилающей водной поверхности:

$$m_e = \rho_w \pi R^2 \frac{\partial h}{\partial \tau}. \quad (4)$$

Здесь R — радиус установки, ρ_w — плотность воды.

Кроме того, интегральный поток влаги с поверхности можно записать через скорость испарения M_e , а именно:

$$m_e = \int_0^{2\pi} \int_0^R r M_e(r, \varphi) dr d\varphi$$

(r — расстояние от центра вихря, φ — азимутальная координата), или в предположении осевой симметрии вихря:

$$m_e = 2\pi \int_0^R r M_e(r) dr. \quad (5)$$

Для скорости испарения M_e используем формулу

$$M_e = c_q \rho_a u_z (q_0 - q_z), \quad (6)$$

где c_q — коэффициент влагообмена или число Дальтона, u_z и q_z — скорость ветра и удельная влажность на некоторой фиксированной высоте z , q_0 — удельная влажность насыщения при температуре подстилающей поверхности. С использованием формул (4)–(6) было получено выражение для определения коэффициента $c_q(r)$, значение которого для модельных вихрей имело порядок 10^{-2} . Знание коэффициента $c_q(r)$ позволило рассчитать скорость испарения M_e как функцию радиуса вихря (пример представлен на рис. 3, а). В радиальном распределении величины M_e наблюдается максимум, который локализуется в области радиуса r_{\max} . В ядре вихря скорость испарения с подстилающей водной поверхности существенно уменьшается, при $r/r_{\max} > 1$ уменьшается моно-

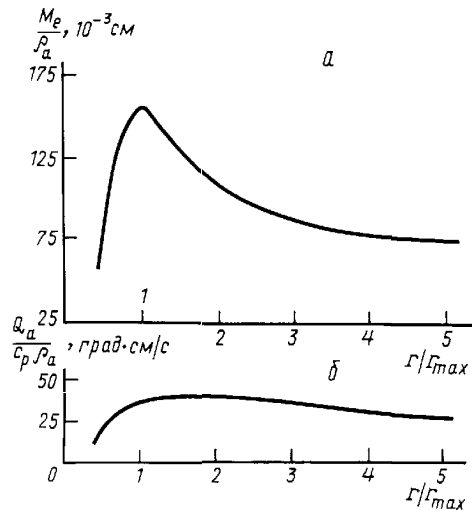


Рис. 3. Пример распределения по радиусу потока влаги M_e (а) и контактного потока тепла Q_a (б) во влажном ИКВ при $Fr^* = 0.050$

тонно и на значительном удалении от оси вихревой системы почти не меняется.

Подставляя величины M_e и q_z^* как функции радиуса вихря в формулу $q_z^* = -M_e / (\rho_a \chi u_*)$ [7], можно найти величину u_* также как функцию радиуса. Определенная таким способом величина динамической скорости потока u_* на периферии вихревых систем хорошо согласуется с u_* , найденной по характеристикам поля скорости воздушного потока в этой области вихря. Располагая данными о скорости u_* и о масштабе температуры t_z^* , можно определить и величину контактного потока тепла Q_a (пример приведен на рис. 3, б). В отличие от распределения $M_e(r)$ в радиальном профиле Q_a отсутствует четкий максимум, поток явного тепла уменьшается в ядре вихря и незначительно снижается к его периферии при $r/r_{max} > 1$.

Данные, приведенные на рис. 3, свидетельствуют о том, что поле скорости в ИКВ оказывает на поток скрытого тепла $Q_e = L^* M_e$ значительно большее влияние, нежели на поток Q_a .

Полученные изложенным выше методом величины u_* и Q_a были использованы для расчета масштаба Монино–Обухова (L) по формуле (3) и параметра

$z/|L|$. Результаты расчета параметра $z/|L|$ для влажного ИКВ при $Fr^* = 0.050$ приведены в таблице.

r/r_{max}	0.050	0.75	1.00	1.25	1.75	2.50	3.75
L (см)	-103	-148	-213	-310	-264	-185	-180
$z/ L $	0.035	0.027	0.019	0.016	0.026	0.040	0.040

При вычислении $z/|L|$ для каждого фиксированного r/r_{max} использовались значения высоты уровня, ниже которого, как показал эксперимент, имел место логарифмический закон распределения температуры по высоте. Из таблицы видно, что параметр $z/|L| \ll 1$. Следовательно, зависимости (1) и (2), выполняющиеся во внешнем районе влажных ИКВ и в центральной области вихревых систем, на нижних высотах до слоев инверсии являются закономерными [7]. Логарифмическое распределение температуры и удельной влажности по высоте реализуется и в природных тропических циклонах [8].

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. 209.
2. Fitzjarrald D.E. // J. Atm. Sci. 1973. 30. P. 894.
3. Анисимова Е.П., Милехин Л.И., Сперанская А.А., Шандин В.С. // Тропическая метеорология. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. С. 97.
4. Берлинер М.А. Измерение влажности. М.: Энергия, 1973.
5. Шандин В.С. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М. (физ. фак. МГУ), 1983.
6. Анисимова Е.П., Николаев А.М., Сперанская А.А., Чернышев О.Н. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1997. №4. С. 38 (Moscow University Phys. Bull. 1997. No. 4. P. 56).
7. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Ч. 1. М.: Наука, 1965.
8. Агренич Е.А. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М. (Гидрометцентр), 1986.

Поступила в редакцию
31.03.00