

La instalación de aspas en la modelación de torbellinos atmosféricos

VLADIMIR I. KALILEST, ALEX G. MARTINENKO,
SANTIAGO E. PÉREZ GUERRA, y ANATOLI D. SALADUJIN

RESUMEN

Se hace una breve descripción de las instalaciones de laboratorio existentes para la modelación de torbellinos atmosféricos, incluidos los aspectos fundamentales del montaje con ventilador de aspas rectangulares, desarrollado en el Instituto de Intercambio de Calor y Masa, de la Academia de Ciencias de Bielorrusia. Se muestran algunos de los resultados preliminares obtenidos, y se analizan sus posibilidades en la modelación de torbellinos atmosféricos del tipo de los tornados y ciclones tropicales; asimismo, se proponen algunas variantes para su perfeccionamiento.

1. INTRODUCCIÓN

Durante largos años los investigadores han dedicado gran parte de su potencialidad y creatividad al estudio de los regímenes turbulentos, sus particularidades, y a la comprensión de los fenómenos de transporte de calor y masa que en ellos tienen lugar, basando este interés en la alta frecuencia con que tales fenómenos se presentan en los procesos técnicos y en la misma naturaleza, con su estela de efectos beneficiosos y perjudiciales.

Particular atención se le ha brindado dentro de este conjunto de fenómenos a aquellos que, como los ciclones, tornados, trombas y otros, por sus efectos destructivos, constituyen y han constituido una verdadera calamidad para la humanidad.

En la actualidad muchos son los senderos que se encaminan al descubrimiento de la esencia de estos fenómenos, y ellos van desde los trabajos en el plano teórico hasta la modelación numérica de los mismos con ayuda de las modernas computadoras. Especialmente en el transcurso de los últimos 20 años se le ha dado gran importancia a la modelación física en los laboratorios, de torbellinos que por sus características pueden simular los elementos esenciales de los torbellinos atmosféricos.

Manuscrito aprobado el 26 de noviembre de 1983.

V. I. Kalilest, A. G. Martinenko, y A. D. Saladujin pertenecen al Instituto de Transporte de Calor y Masa, de la Academia de Ciencias de Bielorrusia. S. E. Pérez Guerra pertenece al Departamento de Física, de la Universidad de Camagüey, Cuba.

Hasta el momento ha sido creada una significativa cantidad de montajes experimentales dirigidos a este fin, en los cuales se han obtenido una serie de resultados interesantes, entre los que pueden citarse los trabajos soviéticos (KATERIN, 1949; FIEDOROV, 1979; NIKULIN, 1979, 1980; BUBNOV, 1980; SALAVIEV y JUSAINOVA, 1980), dirigidos en lo fundamental al estudio de algunas características generales de las corrientes turbulentas, y a la puesta en práctica de instalaciones experimentales para el estudio de anillos y cordones turbulentos, así como otros, también de gran relieve, dedicados a la modelación de tornados, llevados a cabo, entre otros, por YING y CHANG (1970), Hsu (1972), WAN y CHANG (1972), WARD (1972), FITZJARRALD (1973), GILIES (1974), GRANGER (1975), y CHURCH (1977, 1979a, 1979b).

En términos generales, todas las investigaciones experimentales referidas a la formación de torbellinos atmosféricos pueden dividirse convencionalmente en tres grupos:

- I. Estudio de las condiciones de formación y desintegración de los torbellinos y sus sistemas (KATERIN, 1949; WARD, 1972; FITZJARRALD, 1973; GILIES, 1974; GRANGER, 1975; y CHURCH, 1977, 1979a).
- II. Investigación de la interacción de los torbellinos atmosféricos con fronteras sólidas y con el lecho superficial (DESSENS, 1972; DAVIES-JONES, 1973; NIKULIN, 1979, 1980).
- III. Investigación de algunas características geométricas e hidrodinámicas de la formación de torbellinos atmosféricos (Hsu, 1972; DAVIES-JONES, 1973; JISCHKE y PARANG, 1974; CHURCH, 1977, 1979b; BUBNOV, 1980; SALAVIEV y JUSAINOVA, 1980).

Además de esto, la elaboración de instalaciones experimentales para la modelación de la formación de torbellinos atmosféricos puede dividirse en los tres siguientes momentos fundamentales: (a) principio de formación de intensos movimientos turbulentos; (b) metódica para la instalación de medios de medición de distintos parámetros hidrodinámicos; y (c) formas de visualización de las corrientes para la obtención de esquemas cualitativos de la estructura de los remolinos.

Las formas de creación de torbellinos existentes hasta el momento, se fundamentan en la rotación mecánica del volumen de aire, con la ayuda de pantallas giratorias centrales, toberas, ventiladores y otras adaptaciones, así como en la creación de movimientos forzados axiales y de distintos flujos adicionales, los cuales permiten en alguna medida modelar el movimiento complejo vertical de los ciclones tropicales y tornados reales. En tales instalaciones, como regla, se investigan regímenes estacionarios desarrollados a partir de corrientes turbulentas. En algunos trabajos (KATERIN, 1949; JISCHKE y PARANG, 1974; GRANGER, 1975) se pre-

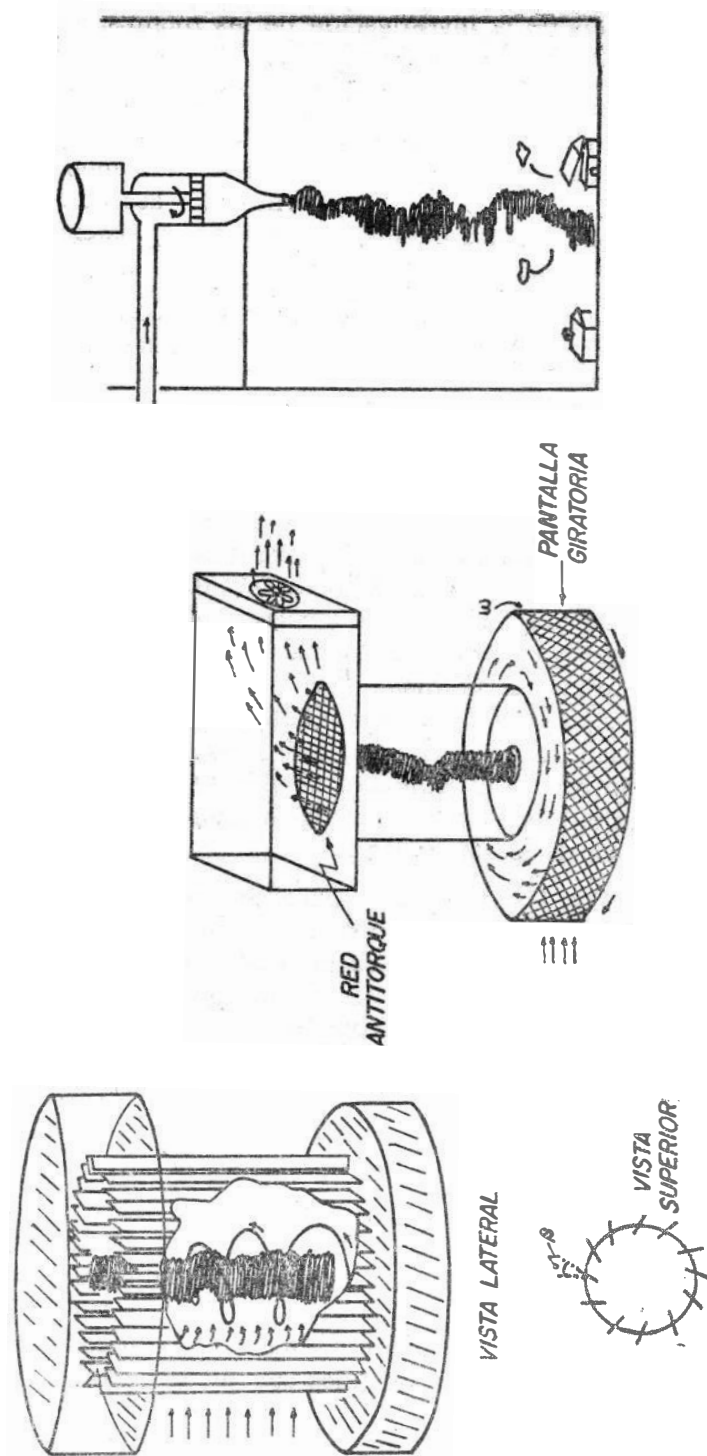


FIG. 1. Esquemas de la instalación de laboratorio de Fitzjar rald (izquierda), de la instalación de Ward para la modelación de tornados (centro), y de la instalación experimental de Hsn (derecha).

sentan los resultados de la investigación de las fuentes, condiciones de formación, y destrucción de los torbellinos.

A los problemas del surgimiento de torbellinos atmosféricos del tipo de los ciclones tropicales se dedica el trabajo de FITZJARRALD (1973). En la instalación descrita por él (Fig. 1 izquierda), el movimiento turbulento aparece en la convección libre del movimiento ascendente del aire, mediante la ayuda de algunos planos, que forman un sistema de paredes en forma de toberas tangenciales.

La mayoría de los investigadores se inclinan a considerar que el giro mecánico, de este tipo, tiene los atributos indispensables para la modelación de laboratorio de la formación de torbellinos atmosféricos, por cuanto la obtención exacta de las condiciones dinámicas y de geometría necesarias para la modelación del balance energético de los ciclones tropicales y tornados, sin presentar mecanismos exteriores de giro, resulta de gran dificultad.

En la Fig. 1 se presentan esquemáticamente los tres tipos fundamentales de instalaciones utilizadas en la formación de torbellinos en el laboratorio. La primera (Fig. 1 izquierda) corresponde al modelo de FITZJARRALD (1973), que ya mencionamos más arriba; en ella aparecen las vistas lateral y superior de la misma, que permiten apreciar las ventanas tangenciales. La siguiente ilustración (Fig. 1 centro) es el modelo de WARD (1972), basado en la rotación de una pantalla metálica giratoria inferior, la cual introduce el momento de giro necesario a la producción del torbellino. En el mismo se han obtenido interesantes resultados relativos a la dinámica de los tornados.

Finalmente (Fig. 1 derecha), se esquematiza la instalación de Hsu (1972), la cual logra la rotación mediante la instalación de una tobera en la posición superior de la maqueta; este montaje permite obtener resultados que complementan los logros mediante el modelo de WARD (1972), y los cuales son imposibles de obtener en el mismo, respondiendo a algunas evidencias experimentales que sugieren que muchos tornados son generados desde arriba como consecuencia de las turbulencias producidas por el desplazamiento del aire frío por las corrientes convectivas ascendentes de aire caliente.

La investigación cuantitativa de las características hidrodinámicas de los torbellinos atmosféricos, y precisamente la medición del campo de velocidades y presión, se obtiene en lo fundamental con los métodos de investigación de la termo-anemometría (CHURCH, 1977, 1979a; WAN y CHANG, 1972, y otros), o mediante métodos neumáticos con ayuda de sondas esféricas miniaturizadas de cinco canales (BUBNOV, 1980); aunque estos resultados, como era de esperar, presentan algunas imprecisiones e inexactitudes.

Para obtener información cualitativa sobre la estructura y geometría de la formación de torbellinos, se emplean distintos modos de visualización de la corriente, con aditamentos fotográficos o filmicos. En la elección de la forma de visualización aparecen una serie de problemas enlazados con las particularidades de la corriente, y con la obtención y elaboración de los resultados de ésta, los cuales en parte se discuten en este trabajo.

2. LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Para la modelación del laboratorio de torbellinos atmosféricos, se ha creado en el Instituto de Transporte de Masa y Calor de la Academia de Ciencias de Bielorrusia, junto con el Instituto de Investigaciones Científicas de Dalnivostok, IICD, del Comité Estatal de Hidrometeorología y Control del Medio Ambiente, de la URSS, una instalación en la cual se han obtenido algunos resultados adelantados, parte de los cuales presentamos en el actual trabajo.

En la Lám. 1 aparece la instalación experimental creada, pudiéndose apreciar la cámara de formación de los torbellinos, en la que es visible uno de los reflectores utilizados en la conformación de los mismos; igualmente puede observarse la vista trasera de ésta, en la que se aprecian parte del bloque de enrarecimiento, el puente de micromanómetros, y el sistema micrométrico de izado que permite variar la altura de la cámara y mover con suavidad y precisión la sonda de medición dentro de la misma. La formación del remolino de aire se consigue mediante un ventilador de cuatro aspas rectangulares mutuamente perpendiculares, colocados dentro de un reflector cilíndrico cambiable.

Para la modelación de la interacción del torbellino con agua o con una superficie sólida, se ha previsto en la instalación experimental el mezclado del aire, calentado en la superficie inferior, según la dirección vertical. Con este fin, además, la instalación ha sido prevista de manera que la relación de la altura del torbellino al radio de su vértice u ojo pueda variarse entre los límites de 0,2 a 2,5; lo cual permite modelar torbellinos atmosféricos del tipo de los ciclones tropicales y tornados. Desde el punto de vista de la relación de escala, el modelo de laboratorio es 10^5 veces menor que el ciclón tropical medio.

El calentamiento termostático de la superficie del lecho, con el aditamento en él de un recipiente con agua y otro líquido, permite modelar la interacción del torbellino con líquidos y también en cierta medida los procesos termodinámicos que tienen lugar en su formación real en la atmósfera.

La medición de las componentes de la velocidad y de la presión en la sección y la altura del torbellino, se lleva a cabo con la ayuda de una sonda esférica miniaturizada de cinco canales y micromanómetros de

Prandtl. La metodología de medición y fórmulas de cálculo para la elaboración de los resultados obtenidos se encuentran descritos en Povx (1959).

Las dimensiones fundamentales del montaje experimental son: diámetro del ventilador, 0,135 m; diámetro de las pantallas reflectoras cambiables, 0,2 y 0,3 m; distancia desde la superficie del lecho hasta las aspas del ventilador (altura del torbellino), cambiabile de 0,03 a 0,45 m.

La velocidad de giro del ventilador puede variarse suavemente de 500 rev./min hasta 6 000 rev./min, que permite investigar distintas estructuras de remolinos, para valores máximos de velocidad de flujo de 3 m/s hasta 20 m/s. Valores que están en correspondencia con los requeridos para una semejanza dinámica parcial correspondiente a la igualdad de los criterios de Ekman y de Reynolds del fenómeno natural y el modelo, tal como quedó analizado en las conclusiones del trabajo.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para obtener una imagen cualitativa del torbellino en la instalación preliminar de los experimentos, en la visualización de las corrientes, se empleó nitrógeno líquido. Aunque tal método no se recomienda utilizar en el estudio de las características termofísicas, es completamente empleable para la determinación de los regímenes óptimos de trabajo de la instalación, en los cuales se obtienen torbellinos de exigencias geométricas y propiedades completamente aceptables.

En la Lám. II (izquierda) se presenta la fotografía del torbellino de aire formado para giro del ventilador con velocidad de 500 rev./min. Se observa que el remolino está dotado de una estructura casi vertical y suficientemente uniforme en su longitud.

Con el aumento de la velocidad de rotación hasta 1 500 rev./min, las fronteras del torbellino se tornan más irregulares, perdiendo su aspecto de cordón turbulento, el torbellino comienza a desplazarse "pasar" por la superficie del lecho y aparece una deformación ondulatoria en la dirección del eje (Lám. II derecha).

Las investigaciones cualitativas permiten establecer que en la instalación experimental pueden obtenerse torbellinos aceptables para la modelación de la formación de los mismos dentro del diapason de velocidades del ventilador de 500 rev./min hasta 6 000 rev./min.

Las mediciones cuantitativas de la distribución radial de las componentes de la velocidad y la presión en la sección del torbellino, se dan en las Figs. 2 a la 5, para dos variantes de las dimensiones del reflector cilíndrico cambiabile, diámetros 0,2 y 0,3 m. En éstas, la sonda ha sido colocada a 0,05 m de la superficie inferior de la cámara, y se han realizado los juegos de mediciones correspondientes a las velocidades de rotación

de las aspas de 2 000, 3 000 y 4 000 rev./min; para todo el juego de mediciones la altura del torbellino era de 0,13 m.

En la Fig. 2 se presenta el perfil radial de la velocidad tangencial del torbellino para distintos regímenes de trabajo del ventilador y distintos diámetros del reflector. Correspondiendo la línea continua al diámetro del reflector de 0,2 m, en tanto que la discontinua a 0,3 m. Los perfiles tienen características parecidas en los máximos para todos los torbellinos, dependiendo sus magnitudes y situación del régimen de trabajo del ventilador y de las dimensiones del reflector. Como puede observarse, el valor de las velocidades máximas se mantiene aproximadamente en los de 8 m/s a 16 m/s. Con el aumento del diámetro del reflector, la velocidad máxima tangencial se corre en el sentido de aumento del radio,

Por otra parte, como era de esperarse, el valor máximo de esta velocidad crece con el aumento de la velocidad del ventilador; al mismo tiempo que es visible que para el reflector de 0,2 m la posición de máximo

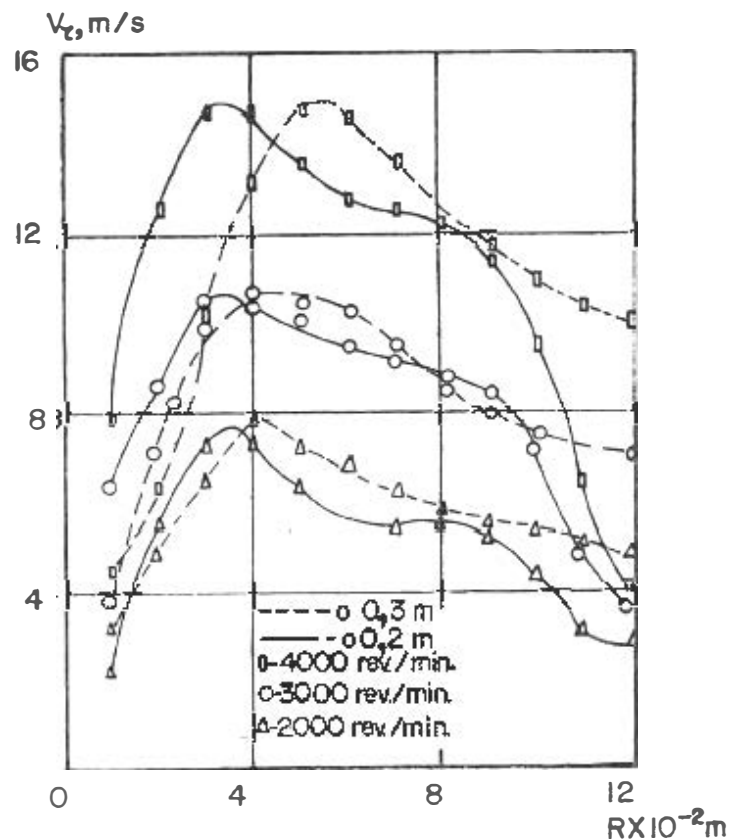


FIG. 2. Perfil radial de la velocidad tangencial del torbellino para distintos regímenes de trabajo.

no varía con la variación del régimen de trabajo del ventilador, situación esta contraria a la observada para el reflector de 0,3 m. Es claro también que el aumento del diámetro del reflector hasta 0,3 m no influye, dentro de los límites de error del experimento, en el valor de la magnitud de la máxima velocidad tangencial, no ocurriendo así con la posición del máximo, el cual cambia, lo que testimonia la influencia de las dimensiones del reflector en la estructura y geometría de la columna del torbellino, permitiendo ejercer sobre éste la exigida interacción.

La influencia del reflector también se puede encontrar en la forma de la curva de la velocidad tangencial en regiones situadas fuera del máximo. Como se ve en la Fig. 2, las curvas para un diámetro del reflector de 0,2 m no están dotadas de monotonía decreciente después del paso, hacia la derecha, del máximo, y su carácter se diferencia de la distribución de velocidad tangencial en un torbellino libre, en el cual es inversamente proporcional a su radio. Para el aumento del diámetro a 0,3 m la situación mencionada arriba se atenúa.

Como puede observarse en la propia Fig. 2, aun cuando las formas de las curvas son aceptables y los valores de las velocidades "escalas" se enmarcan en los esperados por el criterio de Ekman, los valores "escalas" para el radio correspondiente a la velocidad máxima tangencial son inferiores a los que deberían obtenerse; en lo fundamental, debido a las limitadas dimensiones del reflector, por lo cual en el futuro, para una semejanza dinámica y geométrica mayor, debe aumentarse el diámetro del mismo por lo menos a 0,6 m.

El perfil radial de la componente axial de la velocidad, para distintos regímenes del ventilador, se presenta en la Fig. 3 (izquierda: diámetro

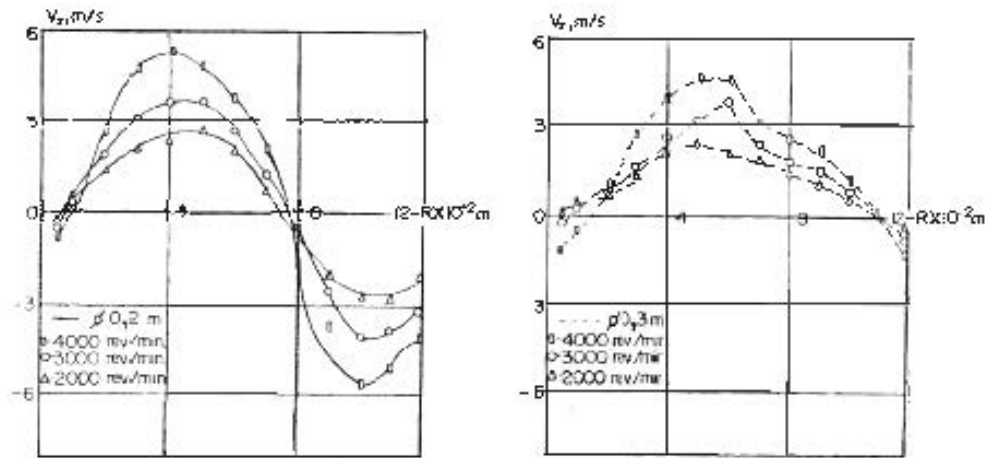


FIG. 3. Perfil radial de la componente axial de la velocidad para diámetros del reflector de 0,2 m (izquierda) y de 0,3 m (derecha).

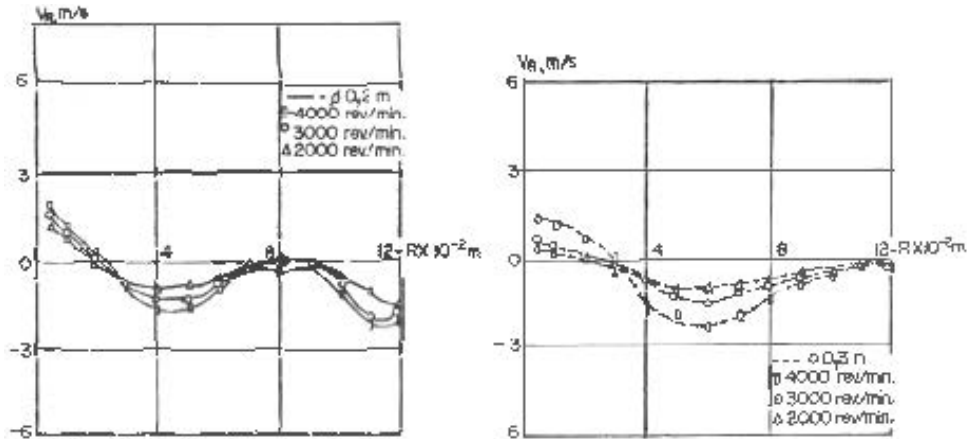


FIG. 4. Dependencia de la velocidad radial con el radio, para diámetros del reflector de 0,2 m (izquierda) y de 0,3 m (derecha).

del reflector 0,2 m; derecha: diámetro 0,3 m). El carácter de las curvas en esta figura tiene mucho de común: La velocidad axial cambia de signo; la posición del máximo de la velocidad axial, en los límites del error experimental, coincide con el máximo de la velocidad tangencial, y la magnitud del valor máximo de la componente axial de la velocidad crece con el aumento de la velocidad de giro del ventilador.

En el centro del torbellino se tiene un flujo descendente de radio no grande. Entre la zona de flujo descendente de la parte central y la de la periferia del torbellino, se extiende una región de movimiento ascendente, cuyas dimensiones crecen con el aumento del diámetro del reflector de 0,2 a 0,3 m.

En la Fig. 4 (izquierda: diámetro del reflector 0,2 m; derecha: diámetro 0,3 m) se presenta la dependencia de la velocidad radial con el radio, para distintos regímenes de trabajo del ventilador. Las curvas de la referida figura tienen carácter parecido: En la parte central del torbellino la velocidad radial se dirige a la periferia, luego cambia de signo y alcanza un valor mínimo aproximadamente en la región de máxima velocidad axial del flujo ascendente (Fig. 3).

La distribución de los cambios de presión, según el radio, se presentan en la Fig. 5. Se nota que con el aumento de la velocidad del ventilador, aumenta notablemente el enrarecimiento de la parte central del torbellino. Las dimensiones del reflector cilíndrico ejercen débil influencia sobre el carácter de la distribución de presión, aunque con el aumento del diámetro del mismo, el enrarecimiento aumenta algo.

En las Figs. 2 a la 5 se han presentado las curvas de las distribuciones radiales de las correspondientes características experimentales objetos de medición, sin ser precisamente las mismas en la región correspondien-

te al centro del torbellino. Esta situación está enlazada, en primer lugar, con las dimensiones naturales de la sonda esférica, cuyo diámetro es igual a 5 m, lo cual conlleva el aumento del error de la medición en la cercanía del centro del torbellino. En segundo lugar, la sonda esférica de cinco canales difícilmente puede ser utilizada para mediciones de velocidades menores de 2 m/s, y en la zona central del torbellino ellas son, a veces, menores. En tercer lugar, en la exactitud de la medición ejerce gran influencia el "paseo" del torbellino ya mencionado arriba, lo cual se manifiesta particularmente en la parte central.

Las dos primeras causas señaladas pueden eliminarse con la utilización de los métodos ópticos de medición, en tanto que los errores ligados al paseo del torbellino representan en sí un serio problema.

Excluyendo la parte central del torbellino, el error para la determinación de la velocidad y la presión no sobrepasa el 10% (BUBNOV, 1980).

Como ya se señaló arriba, la creación de una instalación experimental permite modelar la interacción de un torbellino atmosférico con la superficie del agua. Los procesos de investigación de esta interacción se

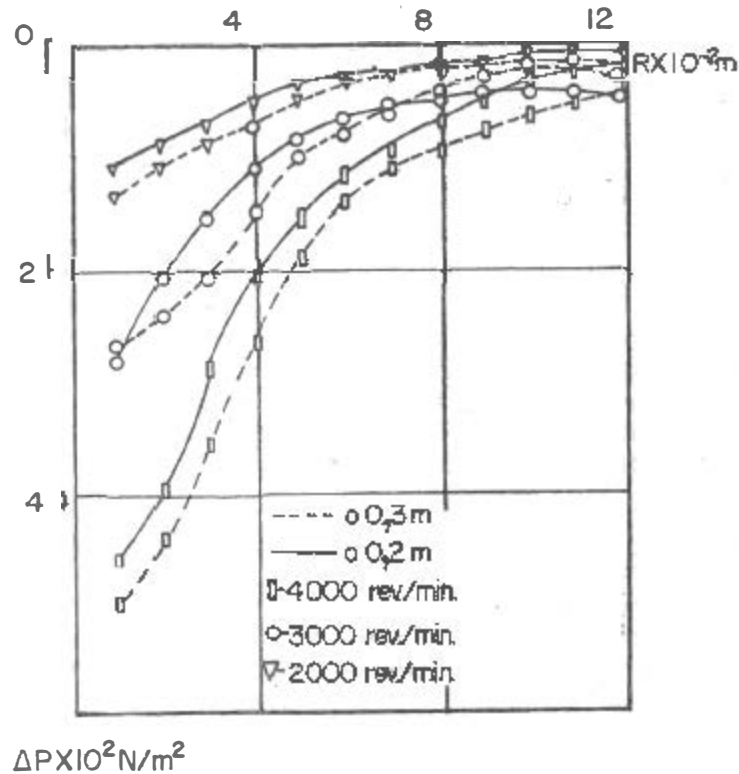


FIG. 5. Distribución de los cambios de presión con el radio.

encuentran por el momento en la etapa inicial, elaborándose metódicas cuantitativas de medición, eligiéndose los regímenes indispensables para las instalaciones y la geometría de los recipientes portadores de los líquidos. Utilizando preparados sobre la base del permanganato de potasio, se han logrado hacer visibles sobre la superficie del agua los anillos característicos de la rotación del fluido. La imagen de la interacción del torbellino de aire con la superficie del líquido es extraordinariamente compleja: Inicialmente tiene lugar una rotación general del fluido, con la formación en el centro de un embudo; después en la zona central del remolino aparece un abultamiento de la superficie del líquido y aparecen complejas corrientes secundarias en todas las capas del mismo, las cuales se asemejan grandemente a las zonas que pueden definirse en el océano después del paso de un ciclón tropical (FIEDOROV, 1979).

Aunque el proceso de interacción es estrictamente no estacionario, aparecen gradualmente en la superficie del líquido ondas estacionarias cuya formación está ligada tanto con el efecto de la geometría como con el "paseo" del torbellino por la superficie. Puede esperarse que futuras mediciones cuantitativas permitirán obtener resultados muy interesantes sobre el carácter de la interacción de los torbellinos atmosféricos con la superficie de los líquidos.

4. CONCLUSIONES

Puede decirse que la creación de la instalación de aspas para la modelación de torbellinos atmosféricos permite, en las condiciones de laboratorio, modelar con alguna aproximación torbellinos del tipo de los tornados y ciclones tropicales, con una disminución a escala de 10^5 veces su tamaño natural, observándose grandes posibilidades y perspectivas en su desarrollo futuro.

Para la consideración del parecido dinámico se tuvo en cuenta el número de Ekman $E = \nu/M_o$, donde $M_o = 2\pi\nu_o r_o$ - es la circulación, ν - viscosidad, r_o - radio del corazón del torbellino; observándose parecido para la velocidad tangencial máxima, la cual se calculó del orden $\nu_o \sim 10$ m/s; en la instalación experimental la velocidad máxima alcanzó 15 m/s.

En general, el objetivo de este trabajo preliminar lo hemos limitado a la modelación sobre la base de la semejanza parcial según el criterio de Ekman. Con este enfoque se obtienen valores "escala" de la velocidad, que están en el orden de lo esperado; no obstante, al no ser total la semejanza dinámica, existen determinadas diferencias cuantitativas entre el modelo y el objeto real modelo. En el desarrollo ulterior de nuestra instalación experimental se ha previsto, basándonos en los resultados logrados, el mejoramiento de la misma, de forma tal que pueda cumplir, si no con todas, con las más de las condiciones de parecido dinámico y se logre la máxima aproximación a escala con el fenómeno natural.

Entre las modificaciones se prevee el logro de la estratificación de temperaturas y el movimiento condicionado del torbellino por la superficie.

Debe tenerse en cuenta para el mejoramiento del montaje experimental y de los resultados de las mediciones en la cercanía del centro del torbellino, la introducción de los métodos ópticos de medición, en especial la anemometría Laser-Doppler.

Como se ha visto, el trabajo en la instalación permite llevar a cabo investigaciones cuantitativas y cualitativas de las características de la formación de torbellinos atmosféricos, dando la posibilidad de modelar la interacción de éstos con el lecho superficial.

REFERENCIAS

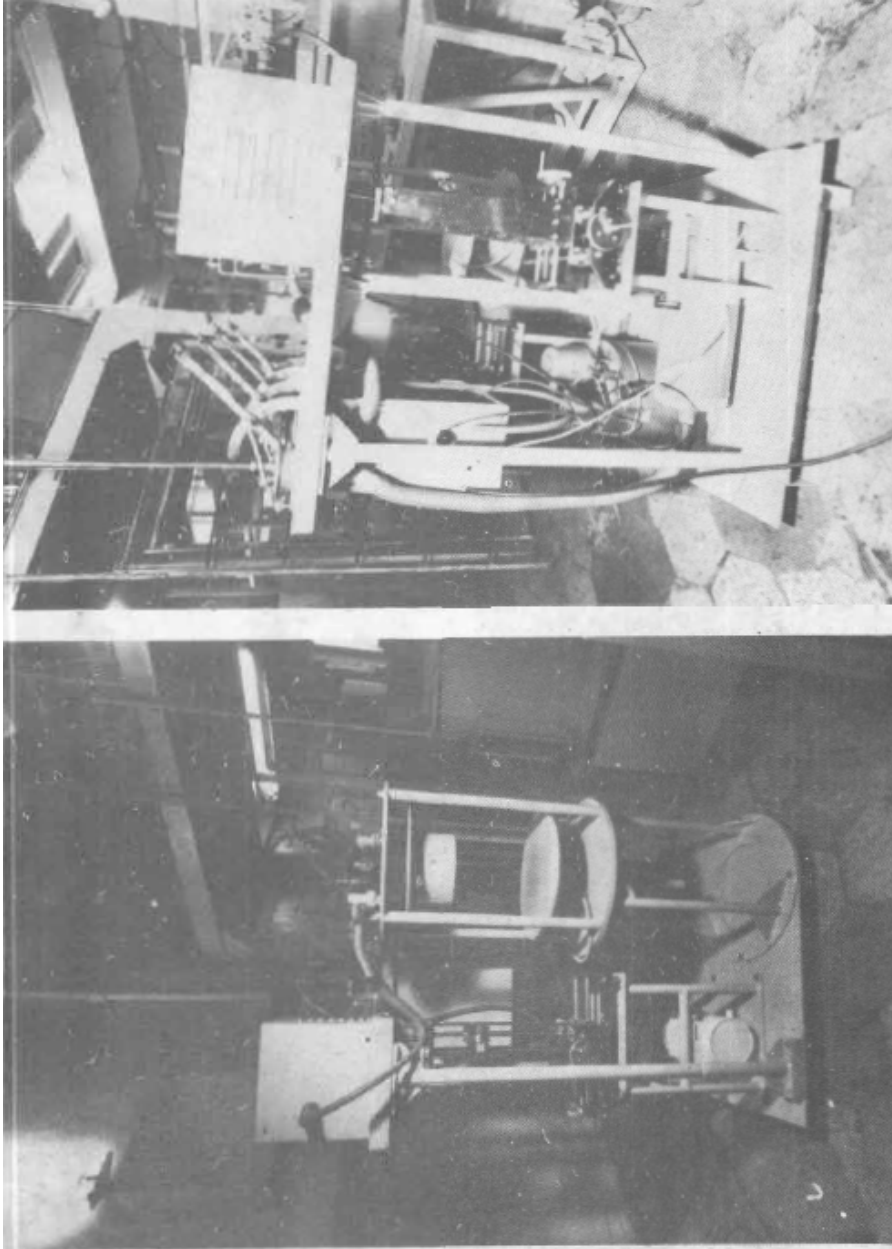
- BUBNOV, V. A. (1980): Estructura de la corriente en flujos rotados [en ruso]. *Rev. El Ingeniero Físico*, 394):611-618.
- CHANG, C. C. (1975): An experimental simulation on the structure and topographical influence of typhoon. *Sci. Sinica*, 18(3):381-395.
- CHURCH, C. R. (1977): Tornado vortex simulation at Purdue University. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 58(9):900-908.
- (1979a): The dynamics of natural tornadoes as inferred from laboratory simulations. *J. Rech. Atmos.*, 13(2):111-133.
- (1979b): Characteristics of tornado-like vortices as a function of swirl ratio: a laboratory investigation. *J. Atmos. Sci.*, 36(9):1755-1777.
- DAVIES-JONES, R. P. (1973): The dependence of core radius on swirl ratio in a tornado simulator. *J. Atmos. Sci.*, 30:1424-1430.
- DESSENS, J., Jr. (1972): Influence of ground roughness on tornadoes: a laboratory simulation. *J. Appl. Meteorol.*, 11(1):72-75.
- FIEDOROV, K. N. (1979): Sobre la relajación lenta de la huella del huracán en el océano [en ruso]. Ponencias Acad. Cien. URSS, 4:960-963.
- FITZJARRALD, D. E. (1973): A laboratory simulation of convective vortices. *J. Atmos. Sci.*, 30(5):894-902.
- GILIIES, G. (1974): Laboratory production of tornado-like vortices. *J. Atmos. Sci.*, 31(8):2231-2233.
- GRANGER, R. A. (1975): A laboratory simulation of weak strength tornadoes. *Internatl. J. Mech. Eng. Educ.*, 3(4):289-302.
- HSU, C. T. (1972): New conceptual design of the ISU tornado-simulation wind tunnel. *Proc. Iowa Acad. Sci.*, 79(3/4):127-130.
- JISCHKE, M. C., y PARANG, M. (1974): Properties of simulated tornado-like vortices. *J. Atmos. Sci.*, 31(2):506-512.
- KATERIN, N. P. (1949): Obtención experimental de una columna turbulenta de aire [en ruso]. *Bol. Univ. Estatal Moscú*, 10:53-58.
- NIKULIN, B. B. (1979): Interacción de un torbellino lineal con la superficie libre. Dinámica de los medios continuos. *Novosibirsk*, 42:3142.
- (1980): Interacción de torbellinos del tipo de los tornados con fronteras sólidas [en ruso]. *P.M.T.F.*, 1:68-75.
- POVX, I. L. (1959): *Experimentos aerodinámicos en construcción de maquinarias* [en ruso]. Moscú-Leningrado.

- SALAVIEV, A. A., y JUSAINOVA, B. N. (1980): Características dinámicas de los modelos de laboratorio de tornados. En *Lo nuevo en los enlaces terrestres-solares*, Moscú, pp. 50-53.
- TURNER, J. S., y LILLY, D. (1963): The carbonated-water tornado vortex. *J. Atmos. Sci.*, 20(2):468-471.
- WAN, C. A., y CHANG, C. C. (1972): Measurements of the velocity field in the simulated tornado-like vortex using a three-dimensional velocity probe. *J. Atmos. Sci.*, 29(3):116-127.
- WARD, N. B. (1972): The exploration of certain features of tornado dynamics using a laboratory model. *J. Atmos. Sci.*, 29:1194-1204.
- YING, S. J., y CHANG, C. C. (1970): Exploratory model study of tornado-like vortex dynamics. *J. Atmos. Sci.*, 27(1):3-14.

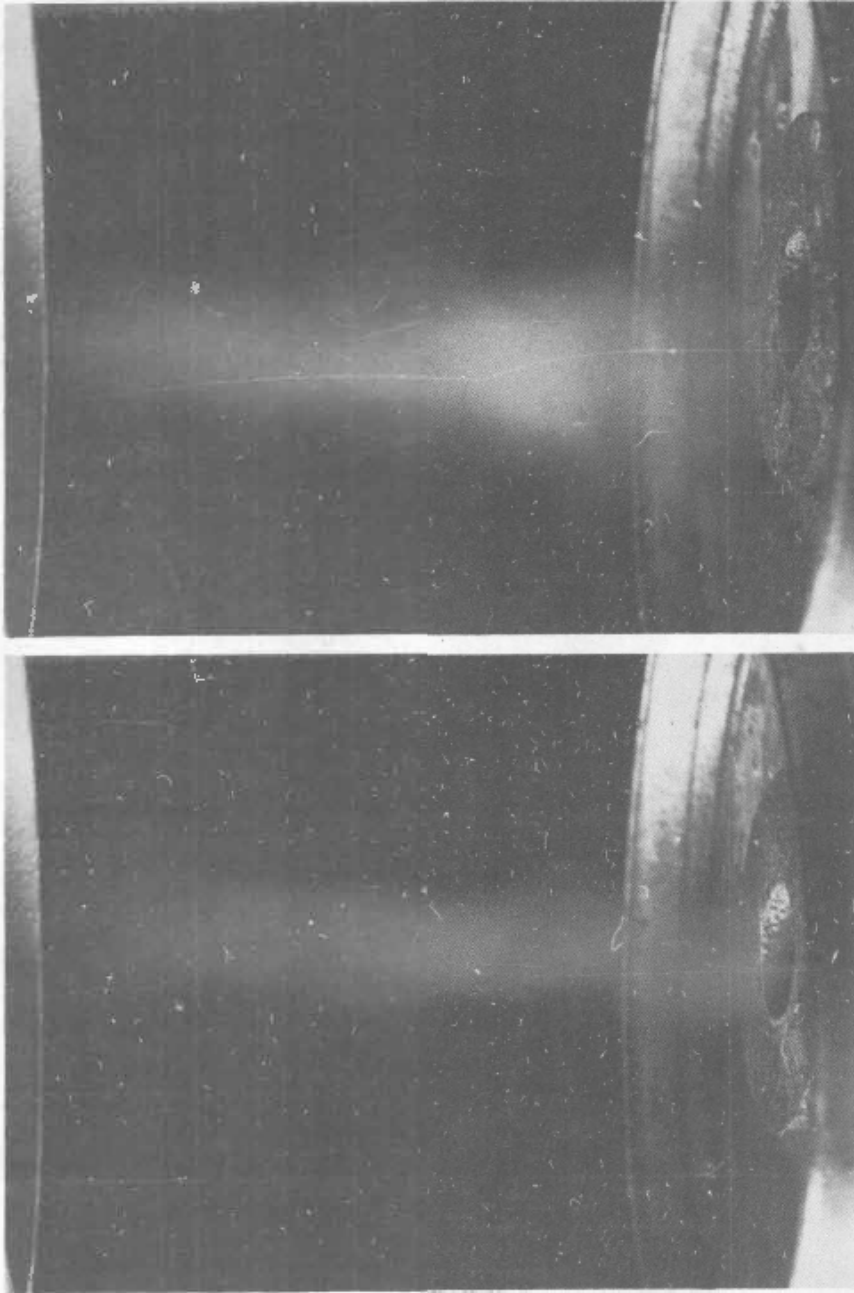
A FAN WITH RECTANGULAR VANES FOR THE MODELING OF ATMOSPHERIC SWIRLS

ABSTRACT

Existing laboratory installations for the modeling of atmospheric swirls are briefly described, delineating the main aspects of the setting of a fan with rectangular vanes developed at the Institute for Mass and Heat Exchange, of the Academy of Sciences of Bieforussia. Preliminary results are shown and their possibilities in the modeling of atmospheric swirls (tornadoes and tropical cyclones) are analyzed. Some ideas are proposed for the improvement of said installations.



Vistas anterior (izquierda) y posterior (derecha) de la instalación experimental desarrollada en el Instituto de Transporte de Calor y Masa, de la Academia de Ciencias de Bielorrusia.



Izquierda: Torbellino de aire para velocidad de giro del ventilador de 500 rev./min. Derecha: torbellino formado para velocidad del ventilador de 1 500 rev./min.