

# Notas sobre Torbellinos Termoconvectivos

Por el Ingeniero Aeronáutico

Comandante D. LUIS AZCÁRRAGA

Pretendemos desarrollar en el presente trabajo una síntesis ordenada de las más modernas investigaciones realizadas sobre los torbellinos termoconvectivos. El problema de la turbulencia tiene un interés indiscutible para la Física del Globo, y muy particularmente para el mejor conocimiento de la atmósfera desde el punto de vista de la Aeronáutica. El origen y desarrollo de los torbellinos termoconvectivos, de los cuales se trata aquí de explicar los principios fundamentales, señalando también las conclusiones de aplicación inmediata, es de decisiva importancia, tanto para el investigador en Aerodinámica como para el meteorólogo y el navegante aéreo, en orden esencialmente a lograr el mayor rendimiento posible a los medios mecánicos. No tiene, sin embargo, este trabajo otro objeto que divulgar los resultados obtenidos fuera de nuestra nación.

Partiendo de la noción más general de convección, esto es, el transporte de una forma cualquiera de energía o de materia, a través de una masa fluida por medio de movimientos que presenten una cierta organización, tomamos aquellas corrientes convectivas en que se transmite calor, de modo que la energía transmitida sirva a su propio entretenimiento.

Concretándonos a las inestabilidades verticales en la atmósfera, los trabajos hasta ahora realizados pueden clasificarse en dos categorías: los que estudian el fenómeno desde el punto de vista puramente físico, es decir, que explican la posibilidad del fenómeno y su estructura; y los que tratan de buscar la causa de fenómenos naturales realmente observados en la atmósfera, comparándolos con el mecanismo de los torbellinos experimentales.

Suponiendo una capa fluida horizontal uniformemente caldeada por debajo, las diferencias de temperatura producen inestabilidades y, como consecuencia, movimientos, que dependen de las condiciones exteriores y de las características propias del fluido. Bénard realizó un primer estudio experimental del problema, calentando una lámina líquida espolvoreada de aluminio. En la superficie libre aparece una red de polígonos exagonales que comprueban la existencia de un movimiento superficial del centro de cada polígono hacia su periferia, tal como lo representa la figura 1.<sup>a</sup>. La sección vertical de estos elementos ha sido denominada célula; y de aquí la designación de torbellinos celulares termoconvectivos, para toda organización de movimiento que consista en favorecer el transporte de calor, a través de un fluido que se divide espontánea-

mente en células poligonales, en cuyo interior se establece una circulación tórica permanente.

Dauzère ha continuado las experiencias, estudiando particularmente la solidificación de los torbellinos termoconvectivos. Partiendo, por ejemplo, de una materia amorfa, tal como la cera de abeja, se comprueba que la placa conserva la estructura celular después de la solidificación; cada torbellino deja en la superficie libre una huella circular. Así puede suponerse que los circos vistos en la superficie de la Luna son el resultado de la solidificación de torbellinos gigantes en la lava primitiva.

Idrac supuso, que las corrientes verticales atmosféricas tendrían el mismo origen que los torbellinos celulares. La experiencia fué realizada sobre una capa de aire limitada por dos placas metálicas horizontales, calentando la inferior y refrigerando la superior. Inyectando humo en el aire, se comprobaron las corrientes convectivas en forma de bandas (de sección cuadrada) y alargadas en el sentido de la corriente general. Las trayectorias resultan hélices, cambiando alternativamente el sentido de rotación; por consiguiente, si se cortan perpendicularmente los torbellinos en bandas, se pasa de una corriente ascendente a otra descendente. Se explica así particularmente la periodicidad especial de corrientes ascendentes y descendentes, tal como se observa en la atmósfera real, en forma de rodillos gigantes orientados en sentido del viento general.

Los japoneses han insistido sobre las experiencias de Idrac, obteniendo resultados parecidos; además de estudiar una nueva especie de torbellinos intermedia entre las células y las bandas, que se denominan torbellinos en cadena.

Low y Brunt han aplicado la teoría principalmente a la Meteorología, estudiando las causas originales de las inestabilidades en la atmósfera terrestre y en la formación de nubes.

S. Mal, recogiendo los estudios de Brunt, comparó la estructura de las formaciones nubosas con las organizaciones turbillonarias, recurriendo a métodos aerológicos para obtener medidas directas de la temperatura, presión y humedad.

A parte de estos trabajos experimentales, otros estudios matemáticos contribuyen a dar expresión a la teoría. Así, particularmente, Volkowsky estudia las trayectorias verticales, dando la forma de variación de la velocidad y marcando el criterio de estabilidad.

Sartory, por su parte, estudia las corrientes que se producen cuando el fluido ha sido uniformemente calentado por radiación.

Walker y Phillips han conseguido aplicar la teoría turbillonaria de origen termoconvectivo a las nubes en banda, en sentido perpendicular al del viento. Se ha deducido la conclusión, de que las nubes en bandas transversales no son siempre debidas a las olas atmosféricas de Helmholtz, sino también a causas térmicas, como las nubes en bandas longitudinales. Se define así la organización turbillonaria en bandas transversales.

Partiendo de todos los trabajos citados anteriormente, Avsec, con la ayuda del Instituto Francés de Mecánica de los Flúidos, y patrocinado por el Ministerio del Aire, ha continuado las experiencias de Bernard, resumiendo todos los datos experimentales conocidos y generalizándolos en expresiones teóricas. Por fuerza hemos, por tanto, de referirnos esencialmente a las investigaciones de Avsec.

### DEFINICION DEL TEMA

El objeto perseguido se concreta en los tres puntos siguientes: a) Referir experiencias sistemáticas en capas de aire, cuyo espesor aumente considerablemente la escala empleada en experiencias anteriores. b) Comprobar el valor práctico de los resultados numéricos deducidos de la teoría tal como ha sido desarrollada hasta ahora. c) Completar la teoría de los torbellinos termoconvectivos en la atmósfera libre, por medios experimentales.

Los resultados obtenidos se concretan así:

a) Hasta ahora, las experiencias se habían limitado a capas de aire del orden de un centímetro de espesor, lo cual era apenas suficiente para estudiar la forma geométrica de la célula en función de la velocidad de traslación. Dado que las condiciones fundamentales para la producción de grandes torbellinos son, uniformidad en la corriente general y uniformidad en el calentamiento general de la capa inferior, ha sido preciso proyectar de nuevo la cámara de experiencias, y aun así, limitar la escala del trabajo.

Conseguida la formación de torbellinos regulares en una capa de varios centímetros de espesor, ha sido posible estudiar el mecanismo por el que se desarrollan las corrientes convectivas, buscando particularmente los caracteres específicos a cada una de las tres clases de torbellinos regulares. Igualmente se han podido estudiar algunas formas de transición o algunas características particulares en las transformaciones mutuas de los torbellinos. Así, por ejemplo, en lo que atañe a los torbellinos en bandas transversales, se llega a la conclusión de que son el resultado de dos fenómenos sucesivos: 1.º Aparición de olas en la superficie de separación de las capas flúidas de distinta densidad. 2.º Formación de corrientes convectivas entre dos olas consecutivas. En lo que atañe a la ondulación de los torbellinos en bandas longitudinales, se ha llegado igualmente a conclusiones decisivas, probando que dicha ondulación puede ser debida a una de estas tres causas: aumento de la diferencia de temperaturas; disminución de la velocidad de traslación; y perturbaciones accidentales como, por ejemplo, la pre-

sencia de un perfil de ala. Finalmente, las experiencias han conseguido definir mejor los criterios que señalan las transiciones entre uno y otro tipo de torbellino.

b) En lo que concierne a la comprobación práctica de la teoría hasta aquí desarrollada, los trabajos han conducido a los resultados siguientes:

1.º La experiencia ha confirmado la apreciación del criterio de Rayleigh, comprobando que el régimen de corrientes convectivas está precedido por un régimen preconvectorio estable.

2.º El tamaño de los torbellinos estudiados ha permitido medir el reparto de temperaturas en relación con el espesor y la anchura de las bandas longitudinales, realizando un análisis matemático del campo térmico. Los estudios experimentales concuerdan con el supuesto teórico.

3.º Tomando como base los torbellinos en bandas longitudinales, dado que son los más estables, se ha estudiado la importancia de la variación de  $h/\lambda$ , respecto a las propiedades geométricas.

4.º Finalmente, se han analizado las líneas de corrientes en el interior del torbellino, comprobando que, junto a la solución simple de un solo piso de torbellinos, existen las soluciones que corresponden a varios circuitos, aunque no debe esperarse que en una capa flúida homogénea puedan establecerse movimientos permanentes de varios circuitos.

c) Se ha ampliado la teoría de las corrientes convectivas organizadas en atmósfera libre.

La base principal del estudio ha consistido en la comparación de las formas de nubes con el mecanismo turbillonario, tratando de buscar un origen convectivo a los fenómenos naturales realmente observados. Las nubes en células poligonales, así como las orientadas en sentido del viento, en general entran claramente en la teoría termoconvectiva. En cuanto a las nubes en bandas transversales, los nuevos estudios han permitido conciliar la teoría termoconvectiva con la de origen dinámico, que supone a estas nubes como resultado de olas atmosféricas producidas en la superficie de separación de dos capas de aire que tuvieran velocidades diferentes. Finalmente, se ha logrado explicar el mecanismo por el cual una nube compartimentada se transforma en una estratificada, e inversamente.

### a) I.—ESTUDIO DE LAS INESTABILIDADES VERTICALES

Consideramos inicialmente la forma más sencilla de inestabilidad vertical, o sea una capa flúida  $\rho$  (presión  $p$ , espesor  $h$ ), superpuesta a otra menos densa  $\rho'$  ( $p'$ ,  $h'$ ). Sobre la capa inferior, las componentes  $X$  e  $Y$ , producto de las fuerzas de superficie, serían nulas; sólo queda como resultante la componente  $Z = p - p' - g \rho' h'$ , y como  $p = p' + g \rho' h'$ , queda  $Z = 0$ . El sistema está en equilibrio inestable, puesto que  $\rho$  (superior)  $>$   $\rho'$  (inferior); pero podría permanecer así.

Una perturbación exterior lograría que los dos flúidos cambiaran sus posiciones, pasando a un equilibrio estable; pero el análisis matemático no nos da

medios de prever cuál sería el mecanismo cinemático que conduciría al equilibrio más estable.

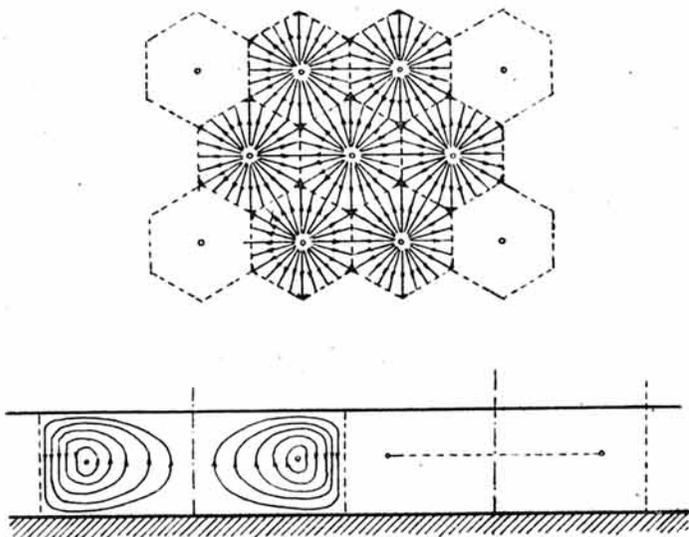


Fig. 1.—Planta y sección vertical de torbellinos celulares.

Se recurre al método experimental, que puede realizarse fácilmente con líquidos de diferentes densidades, tales como agua y aceite, respecto a los cuales la **figura 2.<sup>a</sup>** nos indica el mecanismo cinemático resultante. Sin embargo, la forma de la superficie de discontinuidad inicial depende esencialmente de la viscosidad y de la tensión superficial de los líquidos, y, por tanto, no puede ser concluyente la experiencia. Por otra parte, el caso más interesante para la Aeronáutica es aquel en que la densidad de la capa flúida varía continuamente en sentido vertical; y esto, para una atmósfera seca, como para una con cierto grado de humedad, que pueda llegar a la saturación.

Supongamos una capa flúida cuya temperatura disminuye linealmente a medida que se asciende en la vertical con el orden de densidades inverso al de estabilidad. Si las isoterma coinciden con las superficies equipotenciales, el sistema está en equilibrio inestable. Su energía total potencial es:

$$g \int_0^h z \left( \rho' + \frac{\rho - \rho'}{h} z \right) dz = g h^2 \left( \frac{1}{3} \rho + \frac{1}{6} \rho' \right)$$

siendo  $h$  el espesor de la capa con sección unitaria.

La energía potencial del régimen estable es:

$$g h^2 \left( \frac{1}{3} \rho' + \frac{1}{6} \rho \right)$$

luego

$$\frac{1}{6} g h^2 (\rho - \rho') > 0,$$

es la energía utilizable.

La energía utilizable puede transformarse en energía cinética; de hecho, una perturbación accidental provoca movimientos que aseguran el cambio de sitio

entre las masas calientes y frías. Si los límites de la capa flúida que se considera son buenos conductores y pueden considerarse uniformemente caldeados, el movimiento no se amortigua por el simple cambio de lugar de las masas, puesto que la masa fría, al descender, se recalienta, y la ascendente se enfría; así, el manantial de calor suministra la energía que entretiene el movimiento. La forma del movimiento (establecida por medios experimentales) se ha visto que depende esencialmente de las condiciones límites.

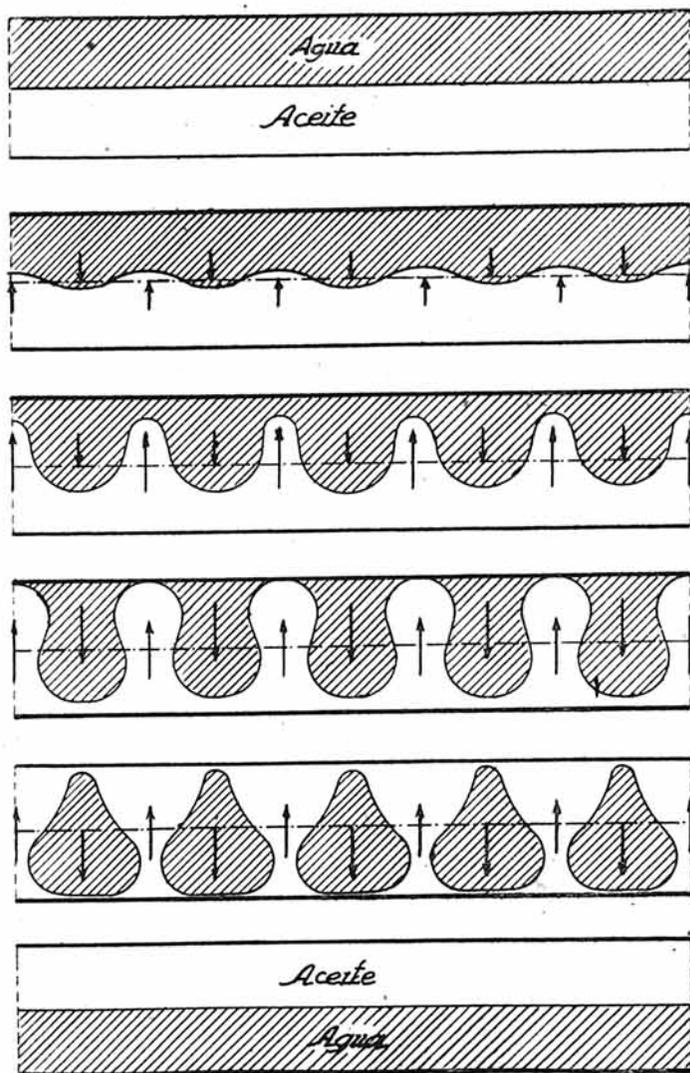


Fig. 2.—Experiencias con agua y aceite.

El torbellino de dos dimensiones es la base de todos los demás. La manera de producirse y desarrollarse los torbellinos de dos dimensiones se aprecia en la **figura 3.<sup>a</sup>**, en que se han hecho visibles por medio del humo de tabaco dentro de una cubeta, donde el aire está recalentando interiormente. Las crestas que se manifiestan en el humo indican las corrientes termoconvectivas, cuyos centros de ascensión aparecen así irregularmente distribuidos. La corriente ascendente, al llegar al límite de la capa flúida, se bifurca y desciende, formando dos torbellinos de eje horizontal y

de sentido alternativamente inverso. Queda así dividida la masa flúida en células o compartimentos ficticios, a cada uno de los cuales pertenece una corriente permanente organizada. Los centros de ascensión se mueven tratando de buscar una distribución más regular, que corresponda a corrientes más estabilizadas. Se ve en la última fase que las células son ya regulares y de las mismas dimensiones; excepto las extremas, porque las condiciones son distintas, a causa de las paredes laterales.

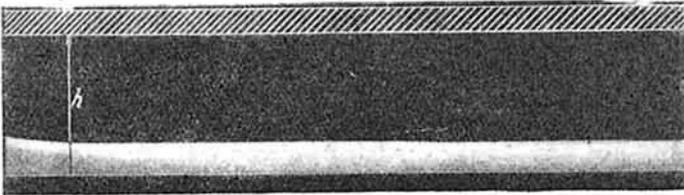


Fig. 3ª

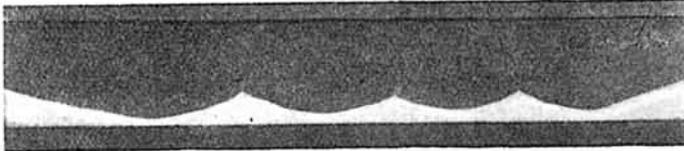


Fig. 3ª

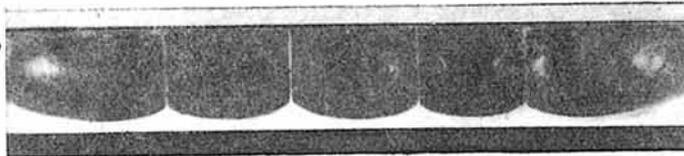


Fig. 3ª

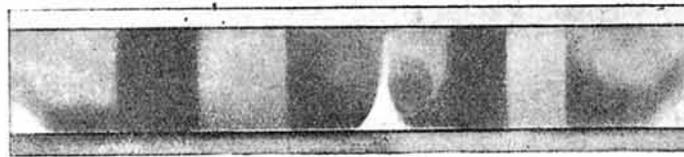


Fig. 3ª



Fig. 3ª

Fig. 3.—Desarrollo de torbellinos de dos dimensiones en una capa de aire (de "Tourbillons Thermoconvectifs". D. Avsec).

Esta experiencia es el primer paso; pero las condiciones más aproximadas a las de la atmósfera libre exigen operar con aire saturado con vapor de agua. A esto corresponde la **figura 4ª**, en la cual la visualización está conseguida por el depósito de agua condensada. La segunda fotografía de la figura corresponde a la fase final. Se ve, por tanto, que en todo el desarrollo se distinguen netamente tres elementos lenticulares. Las dos células del centro son perfectamente cuadradas ( $\lambda/h = 2$ ).

Es preciso distinguir, sin embargo, el caso de un calentamiento moderado de aquel en que el calentamiento sea muy activo, pues en este último caso los

elementos lenticulares acaban por soldarse en una sola lámina opaca.

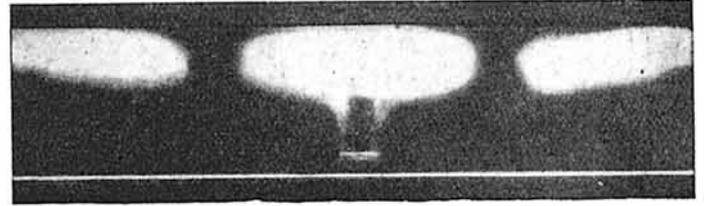


Fig. 4ª

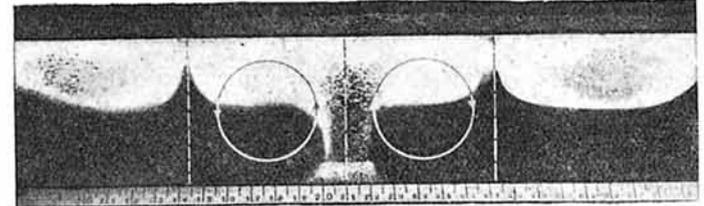
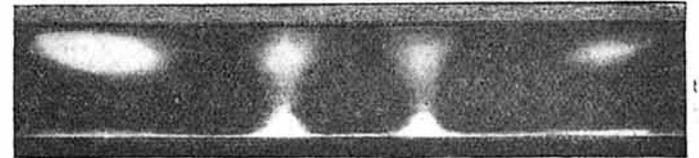


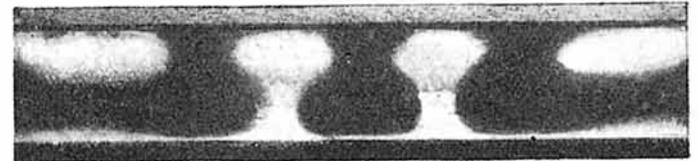
Fig. 4ª

Fig. 4.—Torbellinos de dos dimensiones en una capa de aire saturado de vapor de agua (de "Tourbillons Thermoconvectifs". D. Avsec).

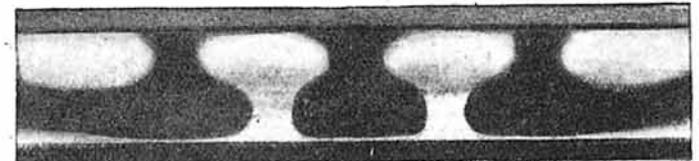
A continuación relatamos, en las figuras 5ª y 6ª, dos experiencias, cuyos datos se señalan:



Primera Fase



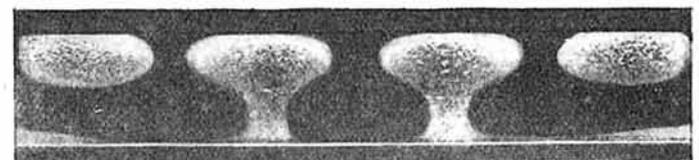
Segunda Fase



Tercera Fase



Cuarta Fase



Quinta Fase

Fig. 5.—Desarrollo de depósitos de agua condensada, bajo un calentamiento moderado (de "Tourbillons Thermoconvectifs". D. Avsec).

**Figura 5.<sup>a</sup>** Experiencia con caldeo moderado (temperaturas extremas, 38° 2 c. y 33° 6 c.). Los tiempos que se indican están referidos en cada caso a la fase anterior.

Primera fase (dos minutos del origen). Aparición de cuatro elementos. Los centrales tienen la forma de seta, porque corresponden a las corrientes ascendentes de aire más húmedo, donde las gotas son suficientemente pesadas para caer.

Segunda fase (ocho minutos).

Tercera fase (veinte minutos). Las cabezas de los elementos centrales alcanzan la misma longitud que los elementos lenticulares extremos.

Cuarta fase (veinticinco minutos). Se hace patente el cambio de estructura por el aumento del tamaño de las gotas.

Quinta fase (una hora diez minutos). Las gotas caen por su peso.

Es de notar que en las tres últimas la superficie del vapor de agua condensado es superponible a la superficie seca, salvo en los elementos extremos, perturbados por las paredes naturales.

**Figura 6.<sup>a</sup>** Calentamiento activo (temperaturas extremas 48° 5 c. y 36° 6 c.).

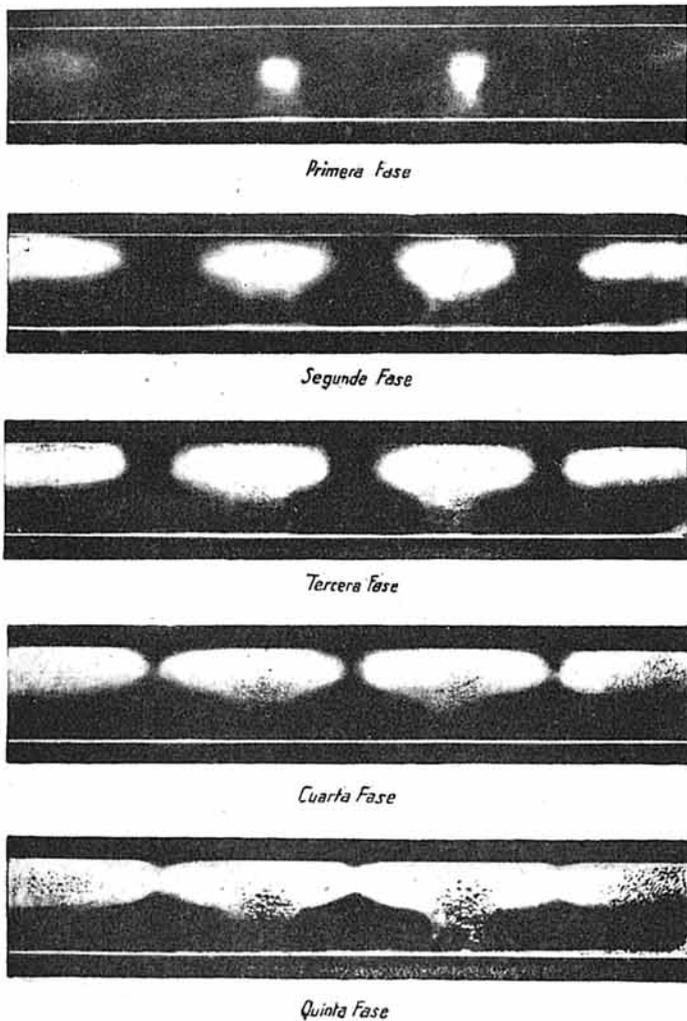


Fig. 6.—Desarrollo de depósitos de vapor de agua condensada, bajo un calentamiento activo (de "Tourbillons Thermoconvectifs", D. Avsec).

Primera fase (un minuto desde el origen). Formación de los elementos centrales.

Segunda fase (diez minutos). Formación neta de los cuatro elementos.

Tercera fase (quince minutos). Los elementos centrales tienen una forma menos acusada que en la experiencia con caldeo moderado.

Cuarta fase (veinte minutos). Empiezan a soldarse los cuatro elementos.

Quinta fase (veinte minutos). Los cuatro elementos se han unido, formando un estrato. Se advierte el cambio de estructura por el aumento de tamaño de las gotas. Una hora después de la quinta fase no se advierte cambio ninguno; debe, por tanto, ser considerada como fase final.

**a) II.—FORMAS TURBILLONARIAS**

Estudiada la aparición y desarrollo del torbellino de dos dimensiones, pueden estudiarse ahora las diversas formas principales y sus mecanismos de desarrollo.

La condición en que se toma la capa fluida es que su espesor es mucho menor que sus dimensiones horizontales. Debe, por tanto, considerarse como capa de aire horizontal, distinguiendo solamente que esté en reposo o sometida a un movimiento de traslación.

Si la capa fluida está en reposo, aparecen las células poligonales. Si el movimiento de traslación es débil, resultan las bandas transversales. Si el movimiento es grande, aparecen las bandas longitudinales. Estas son las formas principales. Su mecanismo es, en principio, el mismo. Sus caracteres específicos son los que deben examinarse separadamente; lo hacemos aquí apoyándonos principalmente en las experiencias de Avsec.

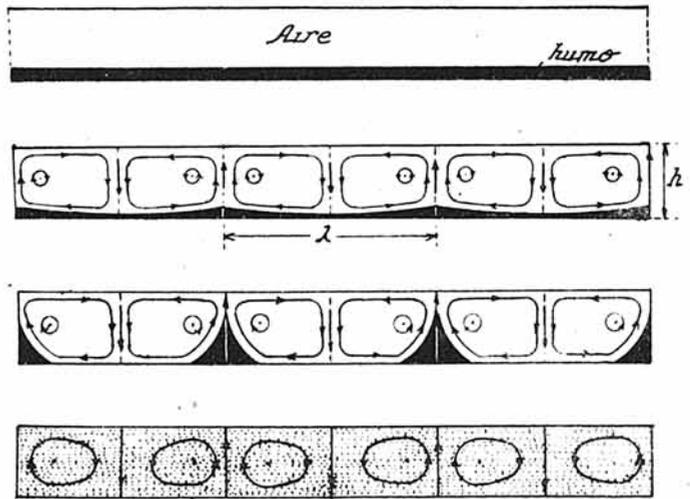
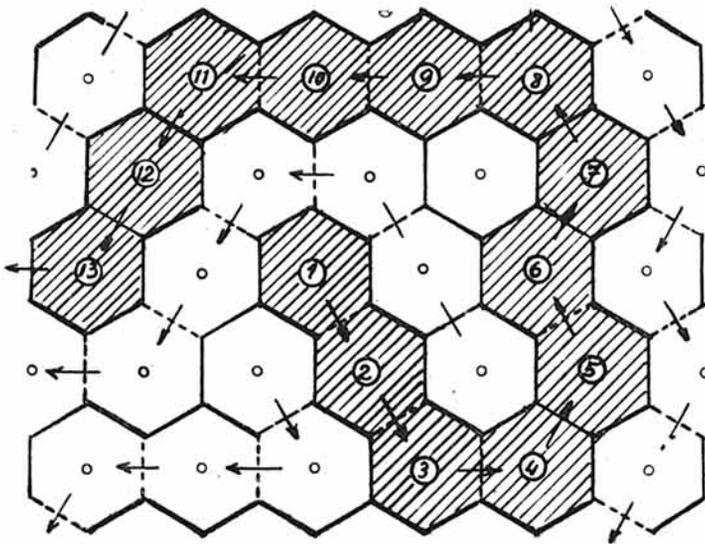


Fig. 7.—Esquema de torbellinos celulares.

**Torbellinos celulares poligonales.**—Corresponde a Bénard su estudio sobre láminas líquidas, y a Dautère el descubrimiento de un caso intermedio, en el cual las células se alargan y encadenan. Pero estas experiencias no pueden generalizarse para los gases, porque parten del hecho de que, siendo libre la superficie de la lámina líquida, no queda plana cuando aparecen los



movimientos convectivos, y las formas de las células quedan mandadas por esta deformación inicial.

Para el caso del aire el mecanismo está esquematizado en la **figura 7.<sup>a</sup>** En planta, las corrientes convectivas se manifiestan (si se visualizan por cualquier medio) por la aparición de depresiones circulares que, originadas de manera irregular, se mueven y aumentan de tamaño hasta repartirse regularmente y hacerse de forma poligonal.

En el caso de que la capa gaseosa esté limitada por paredes rígidas y planas, lo cual impide la desnivelación de la superficie de la capa flúida, la última fase no es la formación de exágonos regulares, sino que los polígonos se encadenan, formando bandas vermiculadas, tal como se indica en la **figura 8.<sup>a</sup>** El aspecto general de estos torbellinos en bandas vermiculadas es muy variado, puesto que el orden del encadenamiento de las células es accidental.

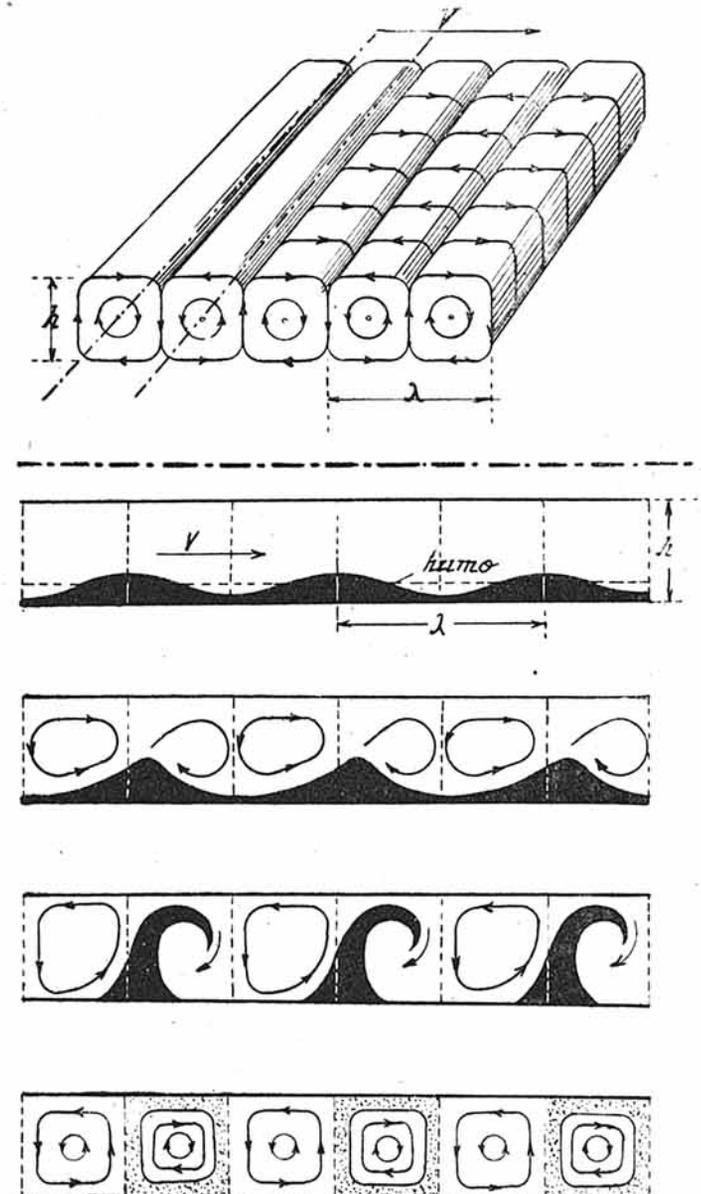
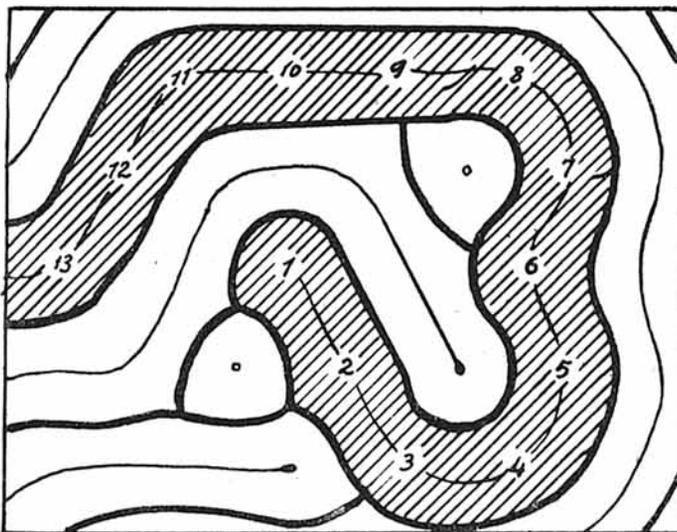
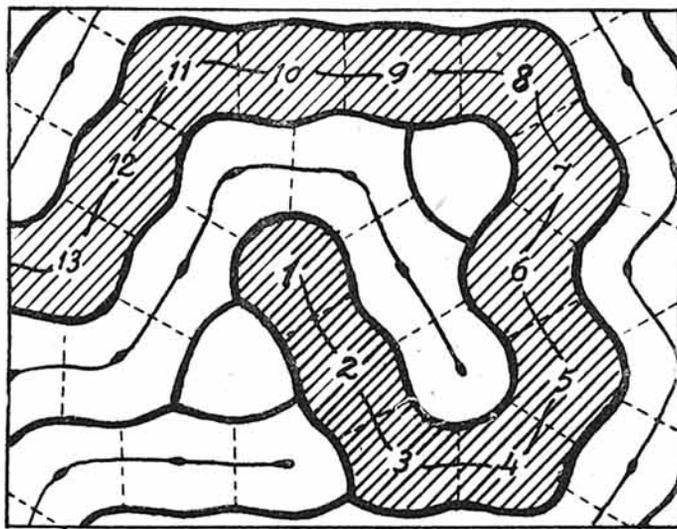


Fig. 8.—Transformación de torbellinos celulares en bandas vermiculadas.

Fig. 9.—Esquema de torbellinos transversales.

Queda, por tanto, como conclusión, que aparecerán los torbellinos poligonales cuando la capa de aire está superpuesta a una capa gaseosa más pesada, pues como la superficie de separación se adapta a los movimientos turbillonarios de la capa de aire, puede este caso ser considerado como el de la lámina fluida de superficie libre.

**Torbellinos en bandas transversales.**—Se llaman así las corrientes termoconvectivas espontáneamente organizadas cuando el eje del torbellino es perpendicular a la dirección general de traslación de toda la masa fluida. Son señalados primeramente por Phillips y Walker. Su formación exige condiciones especiales, que no han sido todavía completamente estudiadas. Sin embargo, el origen y el desarrollo de estos torbellinos parecen ser los siguientes, tal como se expresan en la **figura 9.** El origen resulta de la suma: 1.º Formación de olas transversales a la superficie de separación entre dos capas de densidades distintas y animadas de velocidades diferentes. 2.º Desarrollo de rodillos transversales de origen termoconvectivo entre las crestas de dos olas sucesivas.

El mecanismo observado se divide así: Primera fase: Ondulación en la superficie de separación entre los fluidos de distintas densidades. Segunda fase: Aparición de las corrientes termoconvectivas, girando alternativamente en sentidos inversos. Tercera fase: Las crestas de las antiguas olas coinciden con los centros de ascensión, se inclinan en la dirección de la corriente general y envuelven al torbellino inmediato. Cuarta fase: Las dos masas fluidas se separan completamente, formando cada una un torbellino.

**Torbellinos en bandas longitudinales.**—Esta es una formación muy estable y que, por tanto, puede producirse fácilmente en el laboratorio; de modo que su desarrollo ha podido estudiarse con mayor perfección que en el caso de las transversales.

Un torbellino en bandas longitudinales está constituido por un par de rodillos simétricos, orientados en el sentido de la corriente general y girando cada uno alrededor de su eje en sentidos inversos. La velocidad de traslación del conjunto debe considerarse superior a dos cm./seg; la trayectoria resultante es una hélice.

Las fases sucesivas del desarrollo se indican en la **figura 10**, que se refiere a una experiencia sobre aire con una capa de humo. Primera fase: Se inicia la ondulación en la superficie de separación de los dos gases; los torbellinos aparecen espontáneamente en la capa de aire puro. Segunda fase: Los centros de ascensión y descendencia se acusan alternativamente entre cada dos movimientos giratorios. Tercera fase: Los rodillos se hacen regularmente opacos, probando que el movimiento se ha extendido al total de las dos masas fluidas. Cuarta fase: Los centros de los rodillos se hacen transparentes, acumulando el humo en las paredes ideales que separan cada movimiento giratorio del inmediato.

**a) III.—TRANSFORMACIONES ENTRE LAS FORMAS PRINCIPALES**

Las tres formas descritas anteriormente son llamadas formas principales. Existen aparte otras formas intermedias, que se han puesto de manifiesto experimental-

mente, y que corresponden generalmente a transformaciones entre las principales.

Aquí señalamos las transformaciones más importantes:

1.º Las células poligonales sólo quedan estables si una superficie de la capa fluida es libre o fácilmente deformable. En caso contrario se transforman en torbellinos, en bandas vermiculares.

2.º Si en el caso anterior, y antes de producirse la transformación, se pone en movimiento de traslación el conjunto de las células poligonales, se encadenan éstas, desaparecen las paredes que separan las células y se transforman en bandas longitudinales.

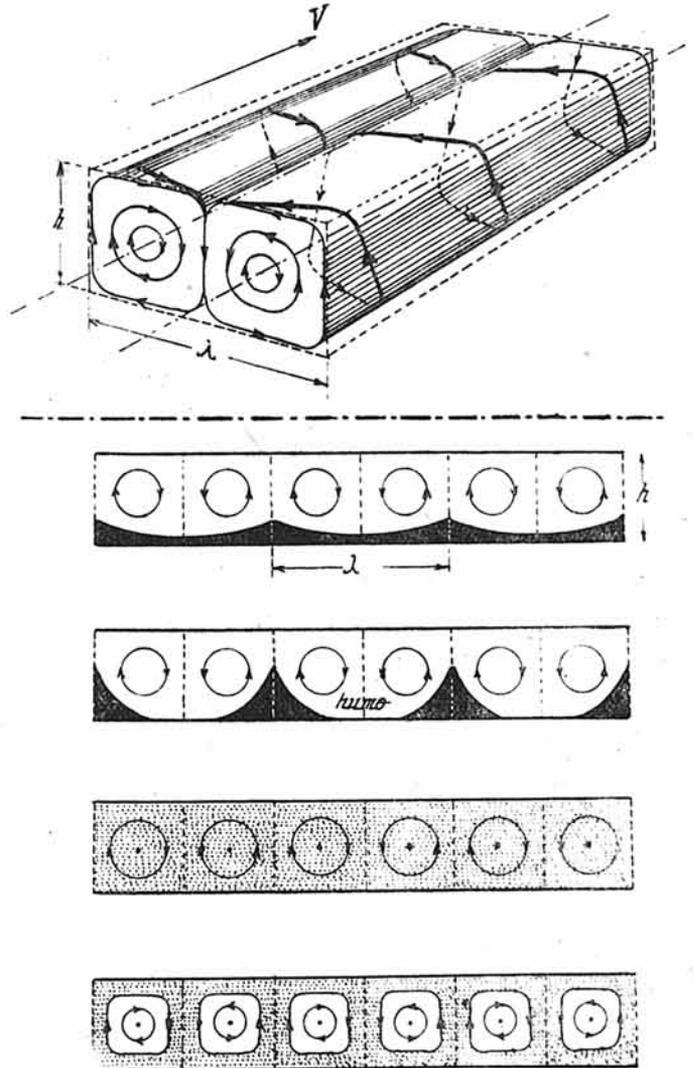


Fig. 10.—Esquema de desarrollo de torbellinos longitudinales.

El esquema de esta transformación se señala en la **figura 11**, y la relación geométrica de las dimensiones transversales está señalada en la **figura 12**, en la cual se ve que la anchura del torbellino resultante es  $\lambda_b = \sqrt{3/2} \cdot \lambda_c$ .

3.º Si en el caso anterior el movimiento de traslación es muy débil, la transformación es tal como se indica en la **figura 13**. Antes de las bandas longitudinales, que es la fase final, aparece una serie de rodillos transversales, aunque de poca duración.

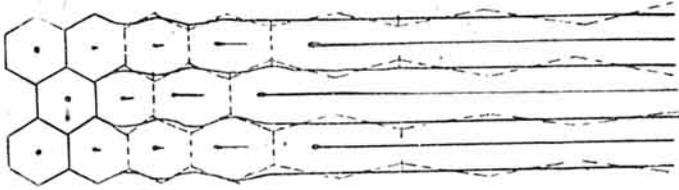


Fig. 11.—Efecto del movimiento de traslación en las células.

4.º Es posible la coexistencia de torbellinos de diferentes formas. Sin embargo, los menos estables acaban desapareciendo. Aunque los criterios de mayor o menor estabilidad en cada circunstancia no están perfectamente determinados, parece ser que las bandas vermiculadas son el estado final si la masa flúida está en reposo, mientras que las bandas longitudinales corresponden a movimientos de traslación, aun para débiles velocidades.

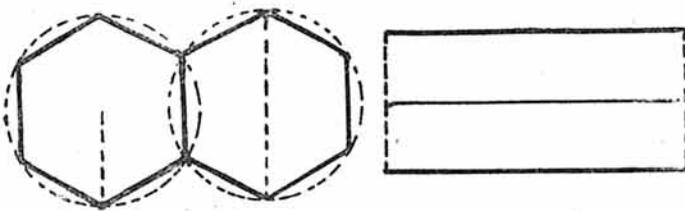


Fig. 12.—Relación de dimensiones entre las células originales y las bandas longitudinales resultantes.

5.º Vista la transformación de células en bandas longitudinales, se puede adivinar la inversa. Cuando en un régimen establecido de bandas longitudinales se disminuye o anula la velocidad de traslación del conjunto, se produce una ondulación en las paredes, primitivamente rectilíneas, que separan las bandas. Esta ondulación cesa cuando se establece el nuevo régimen, con la nueva velocidad constante de traslación, si ésta es superior a la crítica necesaria para mantener los torbellinos en bandas longitudinales. Si la velocidad se anula, las ondulaciones permanecen, transformando las bandas en células exagonales.



Fig. 13.—Transformación con movimiento de traslación lento.

La ondulación entre bandas puede producirse con dos caracteres: a) Se ondulan solamente las líneas que corresponden a las corrientes descendentes. b) Se ondulan también las de corrientes ascendentes, y las bandas quedan sinusoidales, con anchura constante.

6.º La ondulación estudiada en el caso anterior se produce también por un obstáculo colocado en la corriente general. Entonces el efecto es equivalente al de un aumento del número de torbellinos tal, que la relación  $\lambda/h$  quede por bajo del valor crítico. Se pone de manifiesto este efecto en la **figura 14**, en que un perfil de ala se ha colocado en el centro del túnel aerodinámico.

Por efecto del ala dos nuevos torbellinos han aparecido intercalados entre los primitivos, que, a su vez, son también deformados. Los dos nuevos torbellinos no pueden desarrollarse, y acaban por desaparecer, recobrando el conjunto su organización primitiva. Visto el pequeño valor resultante para la relación  $\lambda/h$  en el borde de salida del ala, el equilibrio sólo puede encontrarse por medio de las ondulaciones de las paredes, y claro está que con consumo de energía.

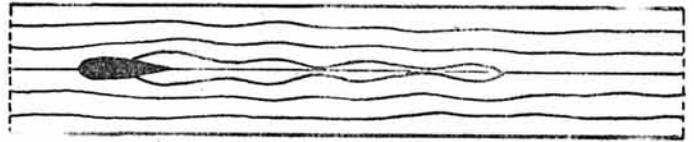


Fig. 14.—Paredes onduladas originadas por un perfil de ala.

7.º Las formas intermedias hasta ahora descritas dependen principalmente de la velocidad de traslación de la masa flúida. Pero otro factor que modifica la forma geométrica de los torbellinos termoconvectivos es la diferencia de temperaturas extremas.

Las experiencias más detalladas se han realizado sobre los torbellinos en bandas longitudinales.

El intervalo de temperaturas que puede considerarse

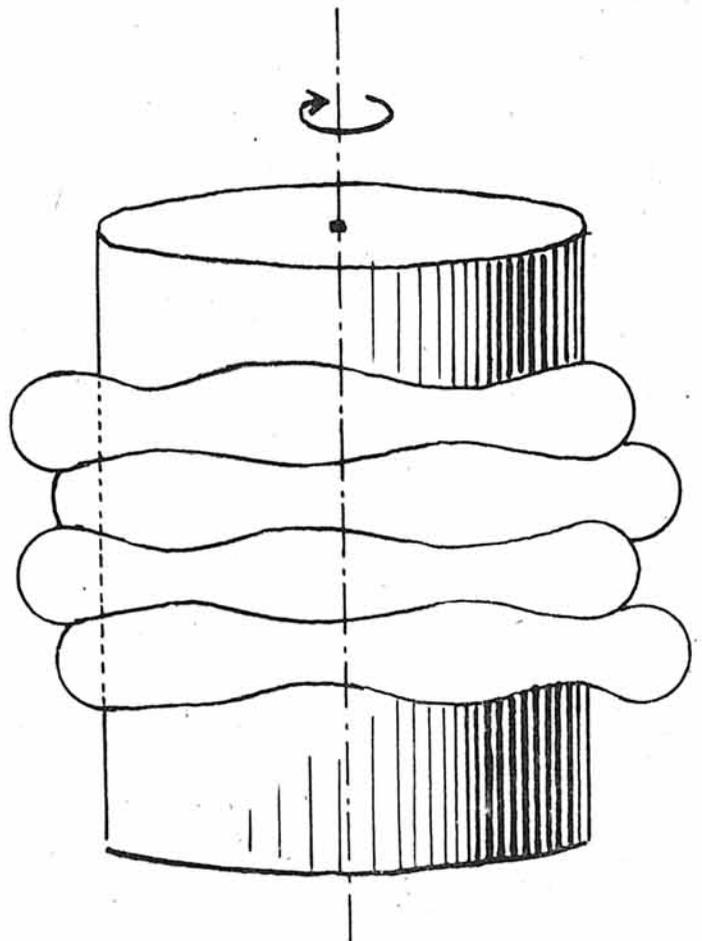


Fig. 15.—Torbellinos tóricos entre dos cilindros coaxiales de velocidades angulares diferentes.

se como moderado tiene por límites  $\Delta T_c$  y  $5 \cdot \Delta T_c$ , siendo  $\Delta T_c$  el valor crítico necesario para la aparición de las primeras corrientes termoconvectivas. Con este intervalo los torbellinos son perfectamente rectilíneos.

Si el calentamiento es más activo, el movimiento interno de rotación se hace más rápido y provoca la ondulación de las paredes verticales. Es, pues, el movimiento interno el que exige la forma ondulada. El efecto está reflejado en la **figura 15**. La longitud de onda aumenta con la velocidad de traslación, y la am-

plitud de ondulación aumenta con la diferencia de temperaturas extremas. El intervalo de temperaturas en que se observa una ondulación regular está comprendido entre  $5 \cdot \Delta T_c$  y  $15 \cdot \Delta T_c$ .

A medida que aumenta la diferencia de temperaturas extremas aumentan también las oscilaciones, y las partículas flúidas no siguen trayectorias regulares. El régimen organizado de torbellinos celulares se transforma en turbulencia desorganizada.

(Continuará.)

### NOTAS BIBLIOGRAFICAS (1.ª parte)

- C. Woronetz.—“Perturbations provoquées dans le mouvement d'un fluide par des variations de la température.” Publications Scientifiques et Techniques du Ministère de l'Air, 1934.
- A. R. Low.—“On the criterion for stability of a layer of viscous fluid heated from below.” Proceedings of the Royal Society of London, 1929.
- P. Vernotte.—“La théorie des tourbillons cellulaires de Bénard.” Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 1936.
- “Les lois générales de la convection naturelle. Conditions d'apparition du premier régime.” Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 1936.
- “La convection et les tourbillons cellulaires.” Bulletin de la Société Française de Physique, 1936.
- H. Jeffreys.—“The stability of a layer of fluid heated below.” Philosophical Magazine, 1926.
- “Some cases of stability in fluid motion.” Proceedings of the Royal Society of London, 1928.
- J. W. Strutt, baron Rayleigh.—“A convection currents in a horizontal layer of fluid, when the higher temperature is on the under side.” Philosophical Magazine, 1916.
- C. Dautère.—“Sur la stabilité des tourbillons cellulaires.” Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 1912.
- “Sur les changements qu'éprouvent les tourbillons cellulaires lorsque la température s'élève.” Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 1912.
- “Sur les tourbillons cellulaires isolés.” Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 1913.
- “Sur une nouvelle espèce de tourbillons cellulaires.” Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 1913.
- D. Avsec-M. Lunz.—“Tourbillons électroconvectifs.” Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 1936.
- “Tourbillons thermo-convectifs.” La Météorologie; Paris, 1937.
- D. Avsec.—“Sur la formation des tourbillons de convection dans une couche gazeuse, sous des épaisseurs de l'ordre de quelques centimètres.” Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 1936.
- “Sur les formes ondulées des tourbillons en bandes longitudinales.” Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 1937.
- “Les tourbillons thermo-convectifs en couches superposées.” Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 1937.
- “Tourbillons en bandes transversales dans une couche d'air chauffée par en dessous.” Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 1938.
- J. Kampe de Fériet.—“La turbulence atmosphérique.” Compte rendu des Journées techniques internationales de l'Aéronautique; Paris, 1936.
- H. von Helmholtz.—“Über diskontinuierliche Flüssigkeitsbewegungen.” Helmholtz Wissenschaftliche Abhandlungen.
- K. Chandra.—“Instability of fluids heated from below.” Proceedings of the Royal Society of London, 1938.
- H. Bénard.—“Tourbillons cellulaires dans une nappe liquide. (Première partie: Description générale des phénomènes.—Deuxième partie: Procédés mécaniques et optiques d'examen; lois numériques des phénomènes.)” Révue Générale des Sciences Pures et Appliquées, 1900.
- “Sur la formation des cirques lunaires d'après les expériences de C. Dautère.” Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 1912.
- “La photosphère solaire superficielle, est-elle une couche de tourbillons cellulaires?” Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 1935.

