

EFFECTO DE LA RUGOSIDAD DE LA SUPERFICIE SOBRE EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR DE CILINDROS CIRCULARES

G.G. Aguirre Varela, N.E. Castellano, E.E. Avila y R.G. Pereyra

Facultad de Matemática, Astronomía y Física- Universidad Nacional de Córdoba- Argentina.
e-mail: aguirre@roble.fis.uncor.edu.ar

La temperatura media de una acreción de hielo (T_s) es un parámetro que regula el crecimiento de un granizo y el signo de la carga eléctrica que adquiere la acreción cuando es sometida a interacciones con otras partículas de hielo (cristales o gotas congeladas). En la determinación de T_s , es necesario conocer la capacidad del flujo de aire, que baña al blanco, para remover calor de la acreción. Es bien conocido que el coeficiente de transferencia de calor por convección (h) de cilindros circulares, expuestos a flujos de aire perpendiculares a su eje, dependen de alguna potencia del número de Reynolds (Re). Los trabajos realizados hasta el presente muestran que la rugosidad de la superficie es un factor que influye en la determinación del valor de la potencia del Re en rangos de trabajo cercanos al Re crítico, mas allá del cual la capa límite resulta turbulenta. En problemas relacionados a granizos, los Re de interés resultan mucho menores que Re crítico y no se conoce si las rugosidades típicas de una acreción influyen en la determinación del coeficiente de transferencia. El objetivo principal de este trabajo es estudiar la dependencia del h con el Re para modelos de acreciones cilíndricas. Los resultados muestran que en estos rangos de Re la relación funcional entre h y Re cambia según la rugosidad.

The mean temperature of an ice accretion (T_s) is a parameter that regulates the development of hailstones and the sign of the electric charge that they acquire when collide with other ice particles (crystals or frozen drops). In the determination of T_s , it is necessary to know how the fluid removes heat when it pass through a body. It is well known that the heat transfer coefficient (h) of circular cylinders, exposed to perpendicular air flows, depends on some power of the Reynolds number (Re). Studies carried out until the present show that ventilation coefficient depends on the surface roughness, those studies have been performed for Re values where boundary layer becomes turbulent (critical Re). But, the values of Re concerning with hailstones in atmospheric process are smaller than critical Re one, and it is interesting to know if typical roughness of hailstones has influence on the heat transfer coefficient. The main objective of this work is to study the dependence of the h with the Re for models of cylindrical accretions. The results show that in these Re 's ranges the functional relationship between h and Re changes according to the roughness.

I. Introducción

La temperatura de la superficie (T_s) de una acreción de hielo en crecimiento (pequeñas gotas de nube impactan y congelan sobre un blanco) es un parámetro que interviene en un gran número procesos meteorológicos. Entre los procesos en los que la T_s es importante, se encuentran aquellos relacionados con crecimiento de granizo, formación de hielo sobre alas de aviones o rotores de helicópteros en vuelo, formación de hielo sobre estructuras en regiones frías, electrificación de nubes, etc. En el proceso de acreción, la T_s es siempre mayor que la temperatura del aire del entorno (T_a). El blanco recibe calor a través del congelamiento de las gotas de nube que impactan sobre él y pierde calor a través del mecanismo de conducción y convección forzada (ventilación) y de la sublimación del hielo. En general la pérdida de calor por unidad de tiempo y área por ventilación se parametriza a través de la expresión:

$$Q = h_m (T_s - T_a) \quad (1)$$

Donde h_m , llamado coeficiente de ventilación media, depende del número de Reynolds (Re) y de la geometría del blanco respectivamente y representa la efectividad del flujo que lo baña en remover calor. Generalmente

$$h_m = Nu_{medio} k_f / D \quad (2)$$

donde: k_f es el coeficiente de conductividad térmica del fluido, D es la dimensión característica del blanco y Nu_{medio} , es el número de Nusselt medio. Nu_{medio} , es un número adimensional el cual depende de la geometría y del Re del cuerpo.

Para poder determinar la T_s , es necesario conocer Nu_{medio} . Hasta el presente, en los problemas relacionados con acreciones en nubes de tormenta, se utilizaron Nu_{medio} correspondientes a blancos de superficies lisas. En trabajos experimentales recientes [1], [2] se ha observado que en igualdad de condiciones atmosféricas, la T_s de una acreción cilíndrica depende del espectro de tamaños de gotas de nubes involucrado en el proceso. Los resultados de estos trabajos muestran que gotitas de nube más pequeñas favorecen la ventilación. Los autores sugieren que este

comportamiento podría deberse a las imperfecciones de la superficie generada por los diferentes tipos de espectro de tamaños de gotas de nube. Acembach^[3] estudia la influencia de pequeñas protuberancias sobre la superficie en el Nu_{medio} . Los resultados de este trabajo muestran que este tipo de superficie aumenta la efectividad de la ventilación. Los resultados de Acembach son válidos para $Re > 100000$ y no abarcan el rango de Re de interés para la microfísica de nubes ($500 < Re < 20000$). Además, el tipo de protuberancias estudiadas por este autor, podrían no corresponderse con las típicas de una acreción de hielo.

Levi et al.^[4], realizan estudios sobre la morfología y la densidad de las acreciones y muestran que las acreciones en general, presentan lóbulos en su superficie, cuando las mismas se originan en regímenes de crecimiento con bajo número de Stokes. Asumiendo que la forma de una acreción cilíndrica es la encontrada por estos autores, en el presente trabajo se realizan estudios experimentales, dirigidos a medir el Nu_{medio} de este tipo de cuerpos en el rango de Re típico de nubes de tormentas.

II. Desarrollo Experimental

Cuando un cuerpo con una temperatura inicial T_s , es bañado por un flujo de aire, a temperatura T_a y velocidad V ($T_a < T_s$), se enfría a través del proceso de conducción y convección forzada. Incropera and De Witt^[5], muestran que en las condiciones supuestas, la temperatura del cuerpo decae de manera exponencial en el tiempo, con un tiempo de relajación $\tau = h_m A / m C_c$, donde A , D , m y C_c son respectivamente: el área lateral, el diámetro, la masa y el calor específico del cuerpo. En base a estos conceptos teóricos, se desarrolló el arreglo experimental.

Los experimentos consistieron básicamente en la medición de la variación temporal de la temperatura de un cuerpo cilíndrico de aluminio, inmerso en un flujo de aire de velocidad determinada. El dispositivo experimental se esquematiza en la Figura 1.

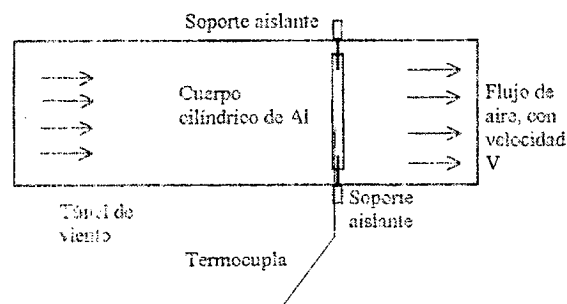


Figura 1: Esquema del arreglo experimental utilizado en el desarrollo del presente estudio

Las mediciones se realizaron elevando la temperatura del cuerpo cilíndrico de aluminio mediante un calefactor eléctrico alojado en el interior del cuerpo.

Luego de que el cuerpo hubiera alcanzado una temperatura predeterminada (T_s), se procedía a extraer el calefactor e inmediatamente se comenzaba a realizar la medición de la temperatura del cuerpo cilíndrico en función del tiempo, mientras el cuerpo cilíndrico era bañado por el flujo de aire. La temperatura del cuerpo se registró hasta que la misma coincidiera prácticamente con la del flujo de aire (T_a). Estas mediciones se repitieron entre 5 y 7 veces para diferentes valores de velocidad. Para cada velocidad, se realizaron mediciones en las que se cambió la forma en la que el flujo incidía sobre el cilindro (efectuando rotaciones del mismo en torno a su eje). Los cuerpos cilíndricos utilizados en los experimentos tienen 10 cm de largo y 11 mm de diámetro máximo (D); las secciones correspondientes a cada uno de ellos son las que se muestran en la Figura 2. Los cilindros son nombrados según el número de "protuberancias" y según la profundidad de los valles expresada en milímetros. La velocidad del flujo de aire se midió con un anemómetro del tipo Pitot, con un error de 0.4 m/s.

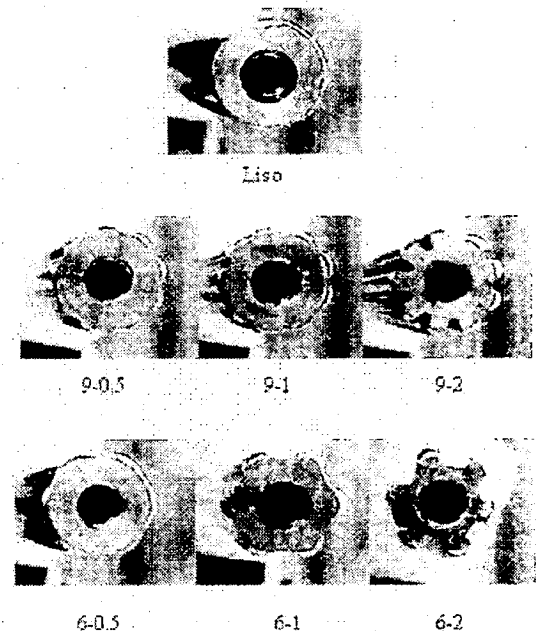


Figura 2: En la imagen se muestran las secciones transversales de los cuerpos cilíndricos utilizados. Todos tienen el mismo diámetro externo, D . El primer número en la identificación, indica el número de lóbulos y el segundo indica la profundidad de los valles, medida en milímetros.

III. Resultados y Comentarios

De los registros de temperatura en función del tiempo, se pudo observar que estas variables están relacionadas de manera exponencial, tal como se espera a partir de consideraciones teóricas^[5]. Mediciones típicas de temperatura en función del tiempo se muestran en la figura 3. En la figura 3.a se muestra una medición típica para un cilindro liso y en la figura 3.b

la correspondiente medición para un cilindro del tipo 9-2. De una comparación de estos dos resultados es posible advertir que la constante de decaimiento es mayor en el cilindro con lóbulos que en el fijo. Las constantes de decaimiento se obtuvieron del ajuste empírico de las mediciones; a partir de este valor y utilizando las expresiones teóricas antes mencionadas, se determinó h_m para cada cuerpo cilíndrico y Nu_{medio} correspondiente.

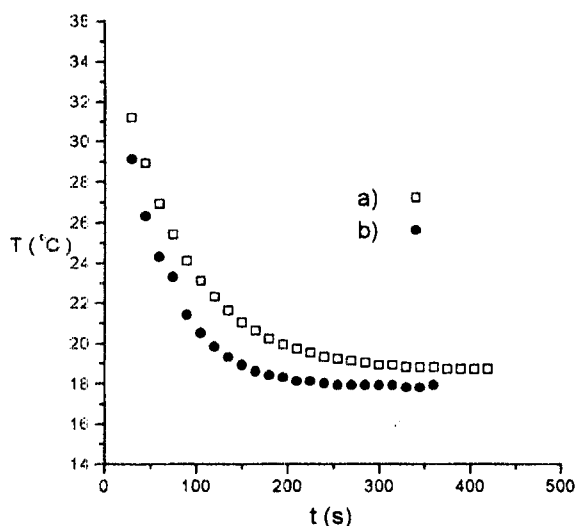


Figura 3: Mediciones de T vs t para cilindros: a) liso y b) del tipo 9-2, con una velocidad del flujo de aire de $V=5.6$ m/s

Para el mismo cuerpo y el mismo Re , se determinó Nu_{medio} para diferentes orientaciones del cuerpo respecto a la dirección del flujo de aire y éstos resultaron indistinguibles. En la Figura 4 se presentan los valores de Nu_{medio} en función de Re correspondiente a cada uno de los cilindros, junto con las expresiones empíricas obtenidas por otros autores [5]. En esta figura se puede observar que las mediciones realizadas para cilindros de superficies lisas coinciden, dentro del error experimental, con las predichas por los otros autores. La ecuación de ajuste utilizada es

$$Nu_{medio} = C * Pr^{1/3} * Re^m \quad (3)$$

Donde C y m son constantes. Estas constantes cambian de acuerdo a la sección transversal del cilindro y al rango de Re en los que se trabaje. En la Tabla 1 se dan los valores de C y m para cilindros de superficie lisa, obtenidos por diferentes autores.

La Figura 4, muestra que todos los casos estudiados, a excepción del correspondiente al caso 9-2, resultan indistinguibles dentro del error experimental. El 9-2, en cambio, presenta un Nu_{medio} menor que el resto de los cilindros estudiados, en todo el rango de Re de interés. Cabe hacer notar, sin embargo, que para cilindros con igual número de lóbulos, aquellos con

mayor altura de los lóbulos son menos eficientes para remover el calor que los que se asemejan más al cilindro liso.

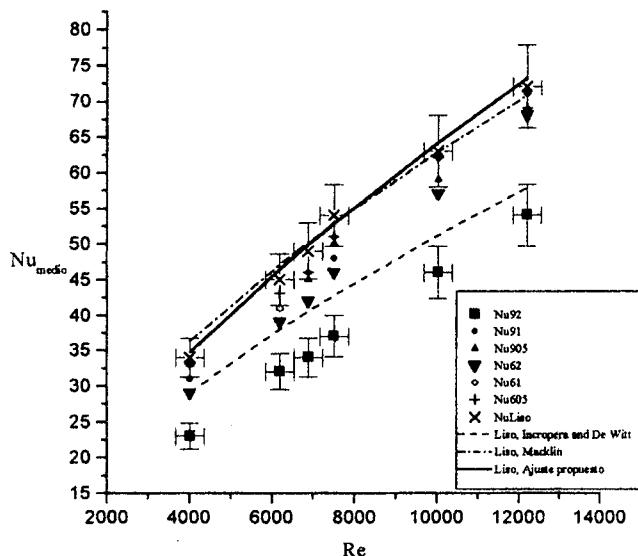


Figura 4: Resultados de Nu_{medio} vs Re . Se presentan además las diferentes parametrizaciones de estas variables obtenidas por diferentes autores para cilindros de superficie lisa.

	Incropera and De Witt	Macklin	Presente Estudio
m	0.618	0.600	0.67 ± 0.02
C	0.193	0.280	0.15 ± 0.03

Tabla 1: Constantes correspondientes a la ecuación de ajuste según diferentes autores.

Cómo es bien conocido, cuando un flujo baña a un cuerpo, el fluido forma sobre el cuerpo una capa con altos gradientes de velocidad, llamada capa límite. Esta capa se desprende de la superficie del cuerpo, a un determinado ángulo θ_0 (este ángulo es el formado entre la dirección del fluido incidente y el radio vector correspondiente al punto sobre la superficie que se observa). Para ángulos mayores que θ_0 , el flujo da lugar a la llamada "estela", la cual se forma en la parte posterior del cuerpo. La capa límite y la estela son las responsables de la remoción del calor del cuerpo. Para Re , donde la capa límite es laminar, la remoción de calor en la parte anterior del cilindro es más efectiva que en la estela [6]. En el rango de Re de interés, la capa límite para el cilindro de superficie lisa es laminar. La efectividad de remover calor por parte del aire depende del espesor de la capa límite (δ), el cual decrece cuando Re aumenta ($\delta \propto Re^{-0.5}$), siendo el mecanismo de extracción de calor del cuerpo más eficiente cuando menor es el espesor de capa límite. En lo que respecta a la estela, ésta resulta menos eficiente como extractora

de calor que la capa límite en el rango de Re de trabajo. Sobre las base de estas consideraciones, existen dos posibles caminos para poder explicar los resultados encontrados:

- 1) Los lóbulos favorecen el crecimiento del espesor de la capa límite (δ), en consecuencia los cilindros con lóbulos ventilan como cilindros lisos de menor Re .
- 2) Los lóbulos favorecen el desprendimiento de la capa límite a ángulos menores que θ_0 , y en consecuencia más superficie está bañada por la estela, disminuyendo la efectividad de la ventilación.

Para poder discernir cuál de estos posibles mecanismos es el responsable de la disminución de la ventilación en cilindros con lóbulos, se están diseñando nuevas experiencias con el fin de medir el ángulo θ_0 .

A pesar que aún no se tiene una respuesta fehaciente respecto de cual es el mecanismo que opera en la disminución de la ventilación, en lo que respecta a la microfísica de acreciones, estos resultados muestran que en superficies con lóbulos la ventilación es menos efectiva que en blancos con superficie lisa. Sobre la base de los resultados de Avila et al ^[1] y de Castellano et al ^[2], es posible pensar entonces que el aumento de la ventilación en las acreciones no es debido a la estructura macroscópica que ellas exhiben (lóbulos), sino que podría ser debida a las rugosidades de pequeña escala que fabrican las gotas más pequeñas al congelar^[6]. Esta última suposición será objeto de futuros estudios.

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por SECYT-UNC, CONICOR y CONICET. Queremos agradecer al Sr José Barcelona por su colaboración en la realización del presente trabajo.

Referencias

- 1 - Avila, E.E; Castellano, N.E. and Saunders, C.P.R.. Q.J.R. Meteorol. Soc 125, pp. 1059-1074. (1999).
- 2 - Castellano, N. E.; Avila, E. E. and Saunders, C. P. R. Journal of Geophysical Research-Atmospheres. 104, p.p (1999).
- 3 - Achenbach, E. International Journal of Heat Mass Transfer 20, pp. 359-369 (1976).
- 4 - Levi, L., Nasello, O.B., and Prodi, F. Q.J.R. Meteorol. Soc. 117, pp. 761-782. (1991).
- 5 - Incropera, F.-P. and De Witt, D.P. Introduction to Heat Transfer, Third Edition, John Wiley & Sons
- 6 - Eckert, E. R. G. and Drake, R. M. Heat and Mass Transfer. Second Edition, Tata McGraw-Hill.

CEILAP
CITEFA - CONICET
ZUFRIATEGUI Y VARELA
1003 VILLA MARTELLI
REPUBLICA ARGENTINA