

¿QUE ES Y COMO MEDIR AL EFECTO LEIDENFROST?

Nadia Barreiro, Cecilia Laborde

Facultad de ciencias Exactas y Naturales
Universidad de Buenos Aires,
Abril de 2009

El objetivo de este trabajo fue estudiar un fenómeno que se da al intercambiarse calor entre un cuerpo sumergido en un líquido cuya temperatura de ebullición es mucho menor a la temperatura inicial del objeto. Esta característica del líquido hace que el mismo comience a evaporarse al ponerlos en contacto. Este efecto es conocido como Efecto Leidenfrost y se manifiesta como un importante aumento de la intensidad de ebullición un instante anterior a que decaiga casi completamente la evaporación del líquido. En esta instancia se llega al equilibrio térmico.

La experiencia realizada consistió en cubrir un cilindro de cobre con nitrógeno líquido y dejar evolucionar el sistema midiéndose la diferencia de temperatura en función del tiempo haciendo uso de una termocupla.

La experiencia se repitió aplicando una película de aceite en la superficie del cilindro antes de cubrirlo con nitrógeno líquido. En este caso, se observó que el fenómeno ocurre en un lapso de tiempo más breve que en el caso previo.

Introducción

El objetivo de este trabajo fue estudiar el intercambio de calor entre un cuerpo sumergido en un líquido a temperatura mucho menor que la del objeto.

Cuando un cuerpo caliente es introducido en un líquido frío, éste puede comenzar a hervir si el objeto tiene una temperatura mayor a la temperatura de ebullición del líquido. El cuerpo queda envuelto en una capa de vapor y, a medida que se va enfriando, la intensidad de la ebullición disminuye con el gradiente de la temperatura. Esto quiere decir que, cuando la variación de temperatura en función del tiempo es menor, se entrega menos calor por unidad de tiempo del objeto al líquido, por lo que hay menor cantidad de líquido que entra en ebullición (disminuyendo el burbujeo que se observa en la superficie). Al ocurrir esto la capa de vapor en el exterior se vuelve inestable y desaparece. El cuerpo

deja de estar aislado por el vapor del exterior y se enfría rápidamente aumentando el gradiente de temperatura. Finalmente la transferencia de energía se produce por convección natural y se llega al equilibrio. Este fenómeno se conoce como efecto Leidenfrost.^[1]

El calor siempre es transferido cuando existe una diferencia de temperatura entre 2 cuerpos. Hay 3 modos básicos de transferencia de calor:

Conducción implica la transferencia de calor por interacciones entre moléculas adyacentes en un material

Convección implica la transferencia de calor cuando hay desplazamiento de la masa del fluido o gas. La convección natural se da cuando al aumentar la temperatura de una porción del fluido, ésta disminuye su densidad y se eleva siendo reemplazado por una porción más fría.

Radiación implica la transferencia de calor por radiación electromagnética y crece con la temperatura del cuerpo.

La transferencia de calor por radiación no necesita un medio para producirse. Cualquier material que tiene una temperatura por encima del cero absoluto emite energía por radiación.^[2]

El efecto Leidenfrost para un alambre de platino caliente en agua se puede dividir en 6 etapas analizándolo en un gráfico de la potencia (que debe transferir el cuerpo para variar su temperatura) en función de la diferencia entre la temperatura del cuerpo y la temperatura de saturación del líquido (donde la temperatura de saturación es aquella en la cual coexisten el estado líquido y gaseoso del agua).

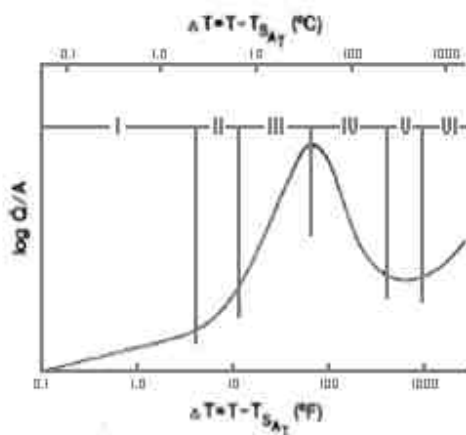


Figura 1: Potencia en función de la diferencia de temperatura entre el alambre y el nitrógeno líquido.

Al introducir el alambre a una temperatura elevada éste emite radiación transfiriendo gran cantidad de energía calórica a gran velocidad (6ta etapa). El líquido entra en ebullición produciendo gran cantidad de vapor en torno al alambre. A medida que se entrega calor disminuye la temperatura del cuerpo y se forma una capa estable de vapor de agua que lo aísla del líquido (5ta etapa). Esto

ocurre porque el vapor de agua no es un buen conductor de calor.

En la 4ta etapa la capa de vapor se vuelve inestable y delgada por lo que aumentan en gran medida la conducción de calor y el burbujeo que se ve en la superficie del agua. Al disminuir la temperatura del agua aún más, el vapor generado ya no es suficiente para formar una capa aislante y se limita a salir hacia la superficie del líquido (3era etapa).

Cuando disminuye la temperatura del alambre, el calor entregado es suficiente para generar burbujas de vapor pero estas no llegan a la superficie. Esto ocurre porque cuando éstas entran en contacto con el líquido que está a menor temperatura colapsan. Esta etapa se conoce como evaporación de núcleo.

En la 1era etapa la transferencia de calor ocurre por convección natural. Ya no se producen burbujas de vapor y se llega finalmente a un estado de equilibrio térmico entre el alambre y el agua.

En esta experiencia se propone estudiar el efecto Leidenfrost entre un cilindro de cobre a temperatura ambiente y nitrógeno líquido cuyo punto de ebullición es mucho menor que la temperatura del cuerpo (77k). También se pretende observar como varía este efecto cuando se coloca una capa de aceite en torno al material.

Marco teórico

Se estudió la potencia necesaria para mantener el cilindro a diferentes temperaturas en las distintas etapas del proceso. Dicha potencia por unidad de área se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{Q}{A} = \frac{(n)}{A} C_p(T) \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

Donde C_p es el calor específico del cobre, A la superficie del mismo, n el número de moles y T su temperatura.

Puesto que para utilizar esta fórmula es necesario considerar que no hay gradientes de temperatura en el cuerpo es importante utilizar un material como el cobre que es un buen conductor térmico.

En el rango de temperaturas de interés, C_v y C_p se diferencian solo en un 3 por ciento. Dado que C_v se puede calcular más fácilmente, se trabajó con dicho parámetro en la ecuación (1).

C_v está formado por una contribución electrónica y una fonónica; ya que la primera es pequeña frente a la segunda, se puede despreciar introduciendo un error del 2,5 por ciento.

Para calcular C_v se pueden utilizar 2 métodos:

El método de Debye y el de Einstein. El segundo es más fácil de utilizar pero más inexacto.

$$C_v \approx 3R \left(\frac{\theta_E}{T} \right)^2 \frac{\exp(\theta_D/T)}{[\exp(\theta_D/T) - 1]^2} \quad (2)$$

Con R la constante de los gases ideales, θ_E la temperatura de Einstein, $\theta_D = 315$ K para el cobre y T la temperatura.

Para tener una mejor aproximación al modelo de Debye utilizamos

$$\theta_E = \theta_D [a + b \exp(-cT/\theta_D)] \quad (3)$$

Con $a = 0.77 \text{ K}^{-1}$, $b = 0.26 \text{ K}^{-1}$ y $c = 9.17$

Conociendo (1), (2), (3) y la temperatura en función del tiempo se puede obtener la curva deseada.^[3]

Para conocer la temperatura del cuerpo se utilizó una termocupla pues ésta permite tomar mediciones en el rango de interés (77K hasta 300K). La termocupla

consiste en dos alambres de distinto material (en este caso chromel y alumel) soldados en un extremo. Al modificar la temperatura de la unión se genera un voltaje del orden de los milivolts (efecto Seebeck). El valor de esta diferencia de potencial se incrementa al producirse un aumento de la temperatura.

Arreglo experimental

Como se explicó en la introducción, para estudiar el efecto Leidenfrost es necesario observar como varía la temperatura del cuerpo en función del tiempo. En este caso, el cuerpo que se sumergió en el líquido fue un cilindro de cobre (de 3.8 ± 0.1 cm de diámetro y 10.2 ± 0.1 cm de largo). Se utilizó este material ya que al ser tan masivo el proceso se efectúa más lentamente. La sustancia en la cual se estudió el fenómeno fue nitrógeno líquido cuya temperatura de saturación es aproximadamente 77 K. La temperatura inicial del cilindro fue aproximadamente 300K.

El montaje del experimento consistió en colocar el cilindro de cobre en un recipiente apto para estar en contacto con bajas temperaturas, en este caso de telgopor (Ver figura 2). Dicho recinto debe tener dimensiones tales que permitan sumergir completamente el cuerpo en el líquido para que no se generen en él gradientes de temperatura.

El terminal eléctrico de la termocupla se encontraba soldada con estaño a la barra de cobre. El otro extremo estaba en contacto con una temperatura de referencia. Que en este caso, se colocó dentro de un termo con hielo y agua, de tal modo que la temperatura de referencia fue 0°C , (se utilizó hielo y agua porque sabemos que la temperatura de coexistencia de dichas fases para el agua corresponde con los 0°C)

La diferencia de voltaje medida por la termocupla se adquirió con un multímetro (Multímetro Hewlet Packard modelo 34401 A). A través de una conexión RS232 y un programa de adquisición realizado en Basic fue posible ingresar los datos a una PC. Esto permitió obtener la evolución temporal de la tensión en la termocupla. No fue posible especificar la velocidad de muestreo (aproximadamente 10 s/seg) ya que el software no lo permite. Por esto se adquirió una cantidad de datos excesiva lo cual dificultó su posterior análisis.

Es posible también utilizar la placa de adquisición Multipurpose Lab Interface para obtener estos valores. Sin embargo, es necesario amplificar la señal entregada por la termocupla ya que ésta es del orden de los milivolts.

Para conocer la temperatura se utilizó la tabla de calibración del fabricante para la termocupla de chromel-alumel.

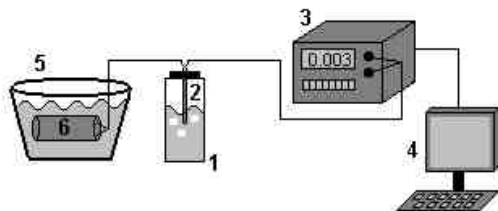


Figura 2: Montaje de la experiencia: 1) Termo con agua y hielo; 2) Termocupla; 3) Multímetro; 4) PC; 5) Recipiente de telgopor; 6) Cilindro de bronce soldado a un extremo de la termocupla

Una vez preparado el dispositivo se procedió a colocar el nitrógeno líquido (NL) en el recipiente hasta cubrir completamente el cilindro, midiendo su temperatura desde segundos previos a transferir el NL.

A continuación se realizó una segunda experiencia análoga pero antes de cubrir el cilindro con nitrógeno se le aplicó una película de aceite con el objetivo de

estudiar como afecta la propiedad aislante de este material al efecto Leidenfrost.

Resultados y discusión

Como los datos fueron obtenidos con un error apreciable, antes de analizarlos, se realizó un suavizado de la curva mediante el método “adjacent averaging” que promedia los puntos contiguos. Puesto que la velocidad de muestreo fue muy alta se adquirió una gran cantidad de datos en intervalos de tiempo muy breves. El fenómeno estudiado no presentaba una variación sustancial en dichos intervalos. Entonces, se consideró apropiado promediar estos valores pues esto no implicó una pérdida de información relevante.

Se determinó que la cantidad de puntos que se promediara fuera 80.

Utilizando la calibración de la termocupla se pudo obtener la evolución en el tiempo de la temperatura del cilindro de cobre en ambas experiencias.

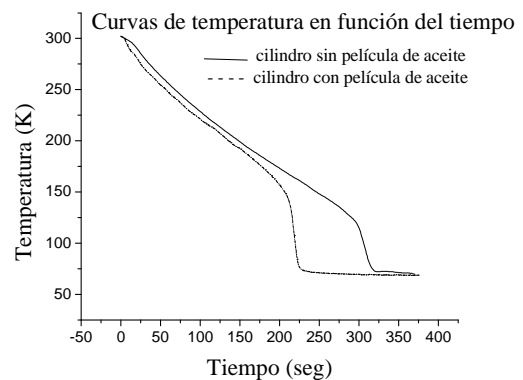


Figura 3: Se puede observar las dos curvas de la temperatura en función del tiempo. La curva punteada corresponde a la variación de temperatura del cilindro de cobre cubierto por aceite. La curva negra corresponde al cilindro sin aceite.

La figura muestra el decaimiento de la temperatura en función del tiempo. Se observa que en un determinado instante hay una variación pronunciada la cual corresponde a la ruptura de la capa de vapor que recubre el cilindro. A continuación se aprecia como la curva toma un valor casi constante pues la temperatura del cilindro se acerca a la del NL.

En la figura 3 se observa que la caída final sucede en un lapso más breve cuando el cilindro de cobre esta recubierto por aceite. Esto se debe a que el aceite dificulta la formación de la capa de vapor ya que actúa como aislante. Por eso es más fácil romperla y que se produzca el incremento en la transferencia de calor en un tiempo menor al correspondiente al cilindro sin aceite.^[4]

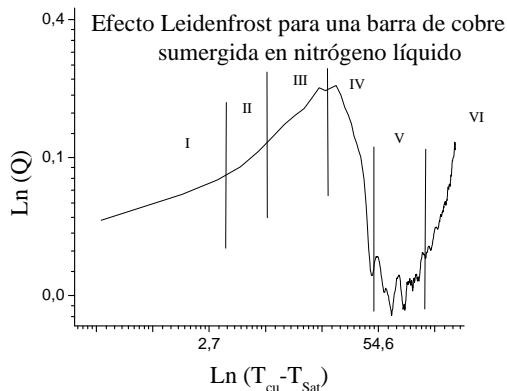


Figura 4: Se observa el gráfico de potencia en función de la diferencia de temperatura entre el cilindro de cobre y la temperatura de saturación del nitrógeno líquido (77 K). Este gráfico se asemeja al observado en la introducción y en él se pueden observar las distintas etapas del efecto.

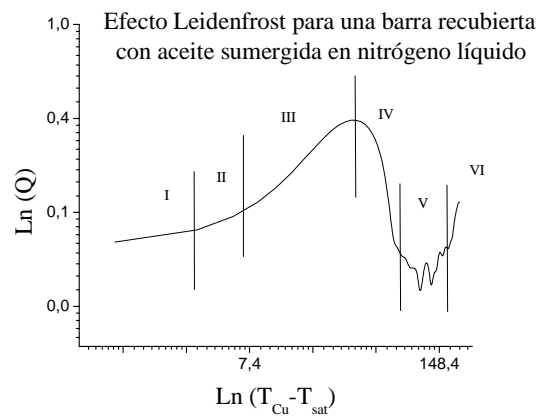


Figura 5: Se observa el gráfico de potencia en función de la diferencia de temperatura entre el cilindro de cobre recubierto en aceite y la temperatura de saturación del nitrógeno líquido (77 K). Se pueden diferenciar las distintas etapas del efecto.

Se observa en los gráficos que el máximo en la transferencia de calor ocurre para mayor diferencia de temperatura cuando el cilindro está recubierto con aceite que en el otro caso.

También en ambos gráficos se pueden apreciar claramente la etapa VI donde se produce la entrega de calor inicial; la etapa V cuando la capa de vapor es estable y la entrega de calor varía poco; la etapa IV en que la capa de vapor se vuelve inestable y la entrega de calor comienza a aumentar hasta llegar a un máximo; y las últimas tres etapas en que el calor entregado disminuye hasta que la diferencia de temperatura entre el cobre y el nitrógeno líquido sea mínima.

No se colocan errores en las curvas pues el método de medición fue muy impreciso ya que no se dispuso de los materiales necesarios para hacerla correctamente. La colocación de las barras de error impide apreciar cualitativamente la forma de las curvas para poder compararlas entre si y con la figura 1 para poder observar las diferentes etapas del efecto Leidenfrost.

Una medición más precisa se podría realizar utilizando un amplificador para la señal de la termocupla y una placa adquisidora de datos. De esta forma se evitaría utilizar el programa realizado en Basic, el cual introduce error a la medición.

Conclusión

Se observó el efecto Leidenfrost en los dos casos estudiados (cilindro de cobre con y sin el recubrimiento de una película de aceite), pudiéndose hallar la curva de potencia en función de la diferencia de temperatura.

Se encontró que para el cilindro recubierto en aceite el fenómeno ocurría antes que para el otro caso pues el paso de calor a través del aceite era menor y la capa de vapor formada era más inestable. Por esta razón la capa desaparece antes y la temperatura disminuye más rápidamente.

Referencias bibliográficas

[1]“Dos experimentos para estudiar el efecto Leidenfrost”, J Romani, P Quiroga, M Larreguy y M Paz Frigerio, Laboratorio de Física III, Facultad de Ingeniería, Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Favaloro, Buenos Aires, Argentina, 2002.

[2] “Doe fundamentals handbook THERMODYNAMICS, HEAT TRANSFER, AND FLUID FLOW” ,Volumen 2 , U.S. Department of Energy , Washington, D.C, junio 1992.

[3] “Efecto Leidenfrost” (apunte de clase), Laboratorio 4, Facultad de ciencias exactas y naturales, Universidad de Buenos Aires

[4] “Una Paradoja a Bajas Temperaturas-Efecto Leidenfrost”,G. R. Bengochea y H. Della Torre, Laboratorio 5, Facultad de ciencias exactas y naturales, Universidad de Buenos Aires, noviembre de 2000.