



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

DIVISION DE GRADUADOS

CURSOS DE TITULACION

REPORTE DE LA INVESTIGACION UMIQ/08/95

**“Determinación del Espesor Optimo de un
Aislante Térmico”.**

REALIZADO POR:

Martín Aguilar Pérez

Ernesto Pérez Reyes

Alejandro Cázarez Báez

Moisés Cisneros Maciel

ASESOR: DR. JOSE LUIS RICO CERDA

MORELIA, MICH. MARZO 2015

CONTENIDO

	pag.
Generalidades y conceptos Básicos	
Sobre Transferencia de Calor	1
Sobre Aislantes Térmicos	2
Superficies Planas y Curvas	3
Gráficas y Diagramas	4
Optimización Económica del espesor del Aislante	10
Gastos fijos, Gastos de Operación y Gastos Totales	11
Listado del Programa	12
Presentación de Resultados	16
Conclusiones	20
Bibliografía	21

RESUMEN

El presente trabajo fue hecho para determinar de una forma sencilla, y rápida, el Espesor Optimo de un Aislante Térmico; para lo cual se hizo uso del Lenguaje de Programación Pascal. Este programa permite hacer cálculos rápidos utilizando las variables del sistema y consideraciones económicas, que permiten hacer evaluaciones para seleccionar un Aislante Térmico adecuado

ABSTRACT

This work was done to determine in a simple, and quick, the optimum thickness of thermal insulation; for which we done use of the Pascal Programming Language. This program allows you to make quick calculations using the system variables and economic considerations, that allow to do assessments to select a thermal insulator.

PROLOGO

Dentro de la industria química un renglón muy importante desde el punto de vista económico y operacional es el correspondiente a los servicios auxiliares. Dentro de estos podemos considerar los servicios de calentamiento y enfriamiento, los primeros representados principalmente por el vapor de agua y los segundos por agua de temperatura menor a la ambiental.

El calentamiento dentro de los procesos químicos se realiza en un alto porcentaje mediante la utilización de vapor de agua procedente de equipos de generación de vapor llamados calderas, desde donde el vapor a altas temperaturas debe de circular a través de tuberías hasta llegar al equipo o equipos en los que se requiere su potencial energético para calentamiento; sin embargo en todo este trayecto por tuberías y equipos un porcentaje del contenido energético del vapor, o en su defecto del fluido de calentamiento, se escapa hacia la atmosfera a través de la pared del tubo, o del equipo. Esto implica que la inversión económica hecha para la producción de esa parte de energía liberada hacia la atmosfera también se pierde junto con ella, con la consecuente repercusión en el balance económico final.

Debido a esta situación se ha estudiado la forma de disminuir considerablemente estas pérdidas de calor, lo cual se ha logrado con el uso de materiales especiales de baja conductividad térmica empleados en el recubrimiento de tuberías, y equipos, y a los cuales se les denomina aislantes térmicos; pero ahora surge un nuevo problema: El tipo de aislante, el costo de este, y la eficiencia del mismo para evitar las pérdidas de calor. Un parámetro íntimamente relacionado con estos tres factores es el espesor óptimo del aislante térmico utilizado en el recubrimiento de tubería y equipo de proceso.

GENERALIDADES Y CONCEPTOS BASICOS

Transferencia de Calor: Tomando en cuenta que el calor es una forma de energía en transición, no se puede almacenar, sin embargo, es factible ofrecer resistencia a su flujo, con el objeto de aprovecharla más eficientemente en las partes del proceso en que es necesario minimizar las pérdidas de dicha energía del equipo, o tubería, al medio ambiente. La transferencia de calor permite establecer las leyes que gobiernan el comportamiento de dicha resistencia, y establece los mecanismos adecuados para su aplicación a las necesidades de aislamiento térmico. Los mecanismos de transferencia de calor son los siguientes:

A.- Conducción: Se manifiesta en fase sólida y es básicamente un flujo de calor a nivel molecular dentro de la estructura de la materia.

B.- Convección: Se manifiesta en fase líquida o gaseosa y opera a nivel macromolecular por el desplazamiento de paquetes de moléculas debido al cambio de su densidad por efecto del calor transferido.

C.- Radiación: Se manifiesta sin que exista un medio de contacto entre el emisor y el receptor de la energía térmica. Existen dos teorías que pretenden explicar el fenómeno, la teoría ondulatoria que explica que la energía se transmite mediante ondas electromagnéticas entre dos puntos distantes de diferente nivel energético y la teoría cuántica que expresa que la energía es transportada en partículas discontinuas llamadas quantums.

En un sistema de aislamiento térmico se presentan los tres mecanismos de transferencia de calor y el considerarlas en el modelo de transferencia permite efectuar la optimización de manera confiable además de dar la flexibilidad de aplicarlo a paredes compuestas, en las que se incluyen un aislante o refractario. Los modelos empleados se ilustran en las Figs. 2 y 3. Y permiten cubrir los aspectos de diseño para sistemas de aislamiento de equipo y tubería. En estas figuras se puede apreciar que por la parte interna del equipo se tiene el mecanismo de convección del fluido manejado; en la pared del recipiente y en el aislante se tiene el mecanismo de conducción y en la superficie externa del sistema se presenta un mecanismo combinado de convección radiación a la atmósfera.

Aislantes térmicos:

Un material aislante es aquel que ofrece básicamente una gran resistencia al flujo de calor a través de él, sin embargo, las condiciones a que está sometido dicho material en las instalaciones industriales, requiere de otras propiedades, como son: Resistencia mecánica, estabilidad dimensional, no corrosivo, que no propicie microorganismos, que no sea combustible, que no desprenda gases tóxicos, etcétera. La resistencia al flujo de calor es inversamente proporcional a la densidad del material, esto se constituye en una limitante para obtener mejores aislantes, ya que serían necesariamente materiales muy frágiles y no llenarían los requisitos físicos mencionados anteriormente.

Físicamente los aislantes térmicos son soportes mecánicos de pequeñas celdas de aire el cual tiene muy baja conductividad térmica, siendo por consiguiente un excelente aislante; dependiendo de su estructura se pueden clasificar en granulares, fibrosos, espumosos, monolíticos y reflectivos; por su presentación se clasifican en rígidos, semirrígidos y flexibles. Existe una amplia gama de materiales entre los cuales se puede seleccionar el más adecuado al servicio y al tipo de superficie por recubrir ya sea equipo o tubería. Existen tres razones fundamentales que justifican el uso de sistemas de aislamiento térmico en instalaciones industriales, el entenderlas permitirá identificar su importancia actual; dichas razones son:

Seguridad Industrial : las plantas de proceso constan de una serie de operaciones y procesos internos que transforman materias primas en productos, lo que implica necesariamente la creación de medios artificiales requeridos por el proceso, que involucran cambios de presión, temperatura y composición de los materiales entre otras variables, incluyendo una generación, transformación y transferencia de energía y por consiguiente una serie de riesgos potenciales a los operadores que requieran moverse en el área y que deberán ser eliminados. En el aspecto térmico los sistemas de aislamiento son el medio más importante para dar protección al personal.

Condiciones de Proceso: En la mayoría de los procesos industriales, existen secciones críticas en las que es necesario tener un control riguroso de la temperatura, ya que de eso pueden depender tanto la calidad del producto como las mismas condiciones del proceso, razón por la cual se debe diseñar un sistema sofisticado de control o bien diseñar un sistema de aislamiento térmico que garantice que dichas secciones estén libres de pérdidas de energía.

Administración de Energía: Debido a que el combustible como principal energético era barato hasta hace pocos años, este renglón tuvo una importancia secundaria para la especificación del aislamiento térmico. Actualmente el precio del petróleo del mercado intencional, su indiscutible lugar en el desarrollo tecnológico de nuestra época tanto como fuente de energía como materia prima de infinidad de productos, aunado a esto a su condición de recurso no renovable, resalta la importancia que se le pueda prestar a esta tercera razón.

En programas recientes de conservación de energía que se han aplicado en plantas de refinación y petroquímica en los estados unidos, se reportan datos estadísticos que es interesante mencionar: El 70 % de energía requerida en este tipo de industria, se consume en equipos de transferencia de calor, el ahorro de energía total reportado durante un año de aplicación de los programas fue de 8.9 % del cual el 44 % se logró en dichos equipos en las áreas que se indican en la Fig. 4, en la que se puede apreciar que por concepto de aislamiento y fugas de vapor se tiene un ahorro del 22 %, siendo esto un indicador de la importancia de diseñar los sistemas de aislamiento térmico de un espesor tal, que redunde en un ahorro de energía rentable a la empresa.

Las superficies que requieren aislamiento pueden ser de dos tipos generales los cuales se describen a continuación:

1.- Superficies Planas: El modelo de superficies planas mostrado en la Fig. 1 cubre los casos de equipos en que sus paredes son muros planos, incluyendo los recipientes cilíndricos con diámetro no menor de 24, en cuyo caso se empleará el modelo de superficies curvas. Debido a que las variaciones en el espesor del aislante no modifica la superficie externa del sistema y considerando que la transferencia de calor se efectúa en régimen permanente el flujo de calor por el área permanece constante. El modelo matemático no se presenta en este trabajo ya que está enfocado principalmente al análisis de superficies curvas.

2.- Superficies Curvas: A diferencia de las superficies planas, cuando se pretende aislar una superficie curva, cualquier variación en el espesor del aislante implica una variación logarítmica de la superficie de la cara externa, de manera que en este caso no es posible establecer que el flujo de calor por el área es constante, sin embargo, es posible definir una longitud unitaria que permita simplificar el establecimiento de las ecuaciones para este caso como se ilustra en la Fig. 3.

En este caso las ecuaciones de transferencia de calor de acuerdo con la ley de Fourier son:

$$Q = \frac{\pi (T_1 - T_5)}{\frac{1}{D_i h_i} + \frac{e_1}{k_1 D_{LM}} + \frac{1}{2} k_2 \ln DE'/DE + \frac{1}{h_e DE}} \quad (1)$$

$$D_{LM} = \frac{e_1}{\ln DE/DI} \quad (2)$$

$$Q' = \pi h_e DE' (T_4 - T_5) \quad (3)$$

$$h_r = \frac{0.173 [(T_4 / 100)^4 - (T_5 / 100)^4]}{T_4 - T_5} \quad (4)$$

$$h_c = \alpha [(T_4 + T_5) / 2]^{-0.181} (T_4 - T_5)^{0.266} \beta \quad (5)$$

$$h_e = h_c + h_r \quad (6)$$

Siendo α el factor geométrico, toma los siguientes valores:

$$\text{Tubería Vertical con } DE < 24'' \quad \alpha = 1.239 (DE)^{-0.2}$$

$$\text{Tubería Horizontal con } DE < 24'' \quad \alpha = 1.56 (DE)^{-0.198}$$

Y β es el factor que considera la velocidad del viento y toma los siguientes valores:

$$\text{Convección natural} \quad \beta = 1$$

$$\text{Velocidad } > 1 \text{ pie/seg} \quad \beta = (60 V + 68.9)^{0.5} / 68.9$$

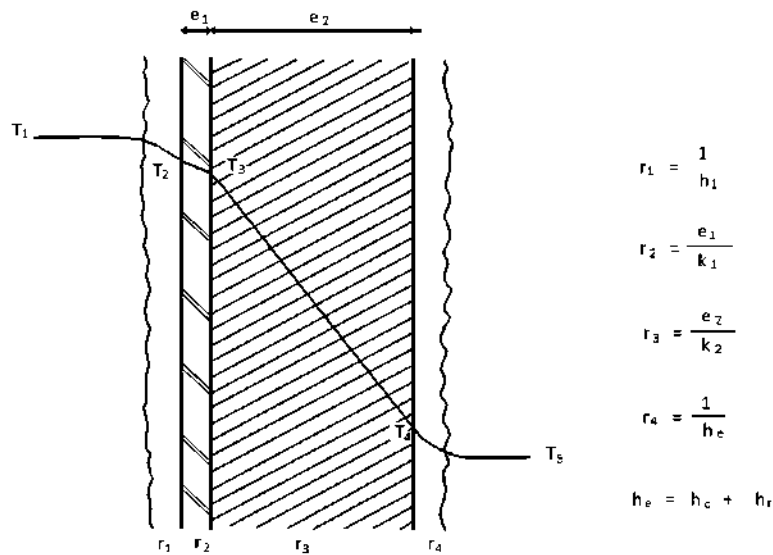


Fig. 1.— Modelo del sistema para superficies planas en que se muestra el perfil de temperaturas y las resistencias que se presentan a la transferencia de calor.

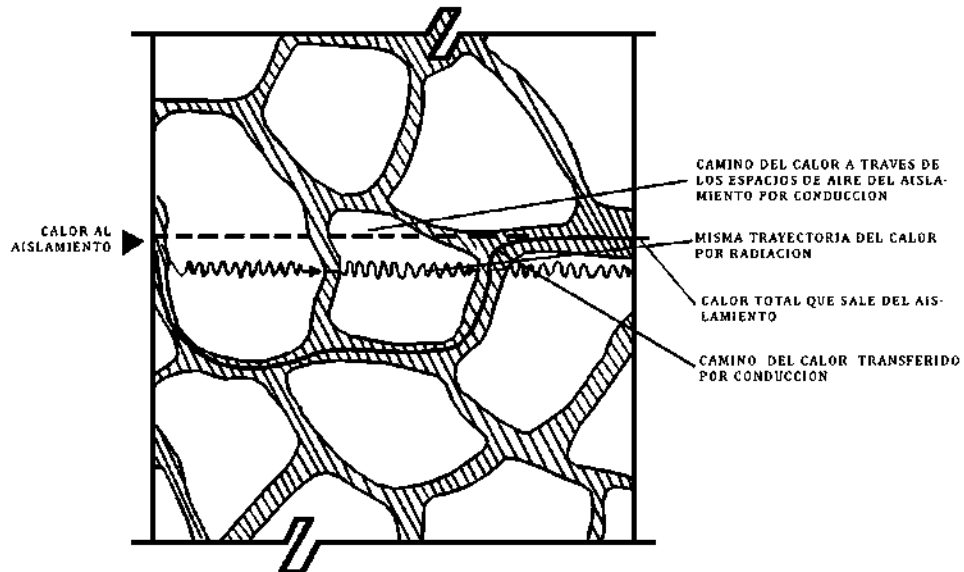


Fig. 2.— Esquema del flujo del calor a través del aislamiento corte amplificado.

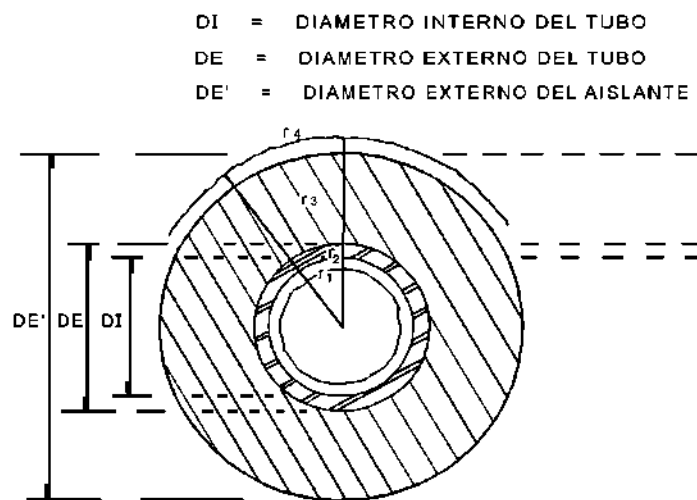


Fig. 3.– Modelo del sistema para superficies curvas en las que Aumento de superficie es logarítmico.

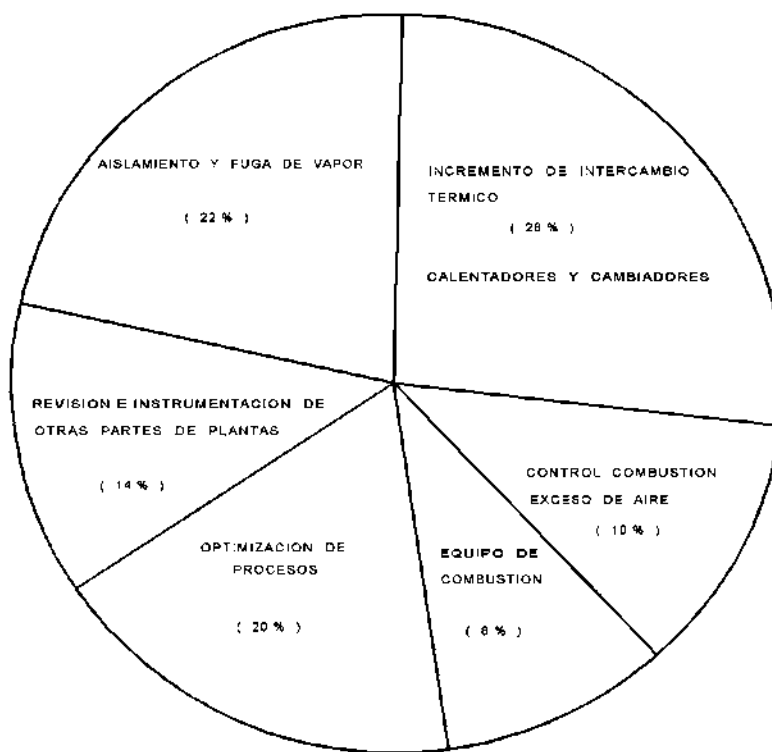


Fig. 4.– Áreas de conservación.

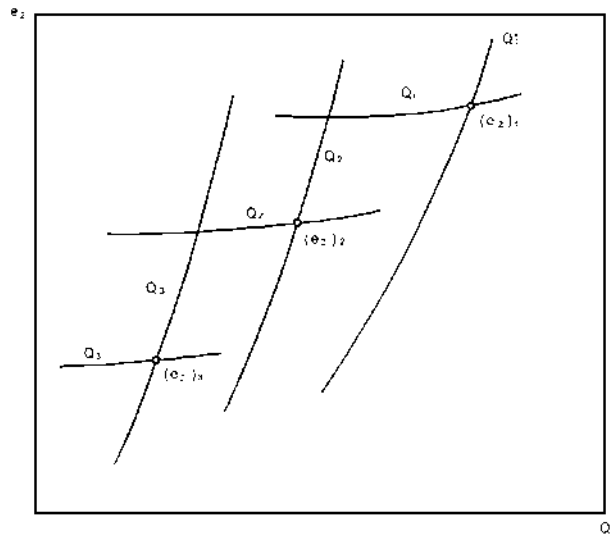
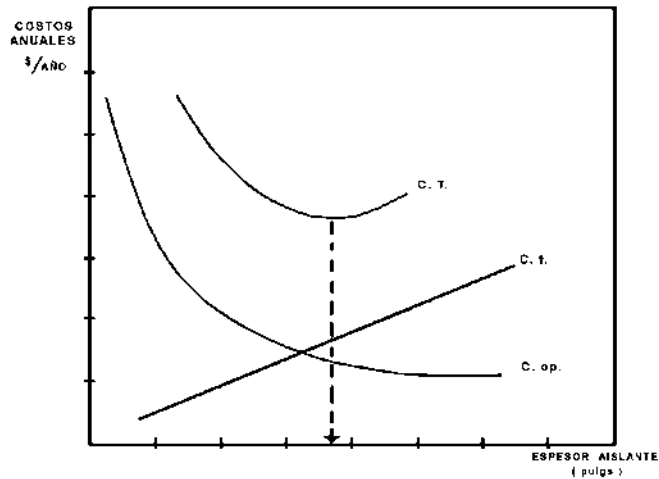


Fig. 5.— Determinación de la temperatura externa del Aislante y el calor transferido para varios espesores en Superficies curvas.



$$Ct = f(e)$$

$$C_{op} = f'(1/e)$$

$$CT = f(e) + f'(1/e)$$

Fig. 6.— Balance económico, costos ascendentes y descendentes con respecto a la variable común (espesor aislante).

ALGORITMO
CALCULO ESPESOR OPTIMO
AISLANTE TERMICO

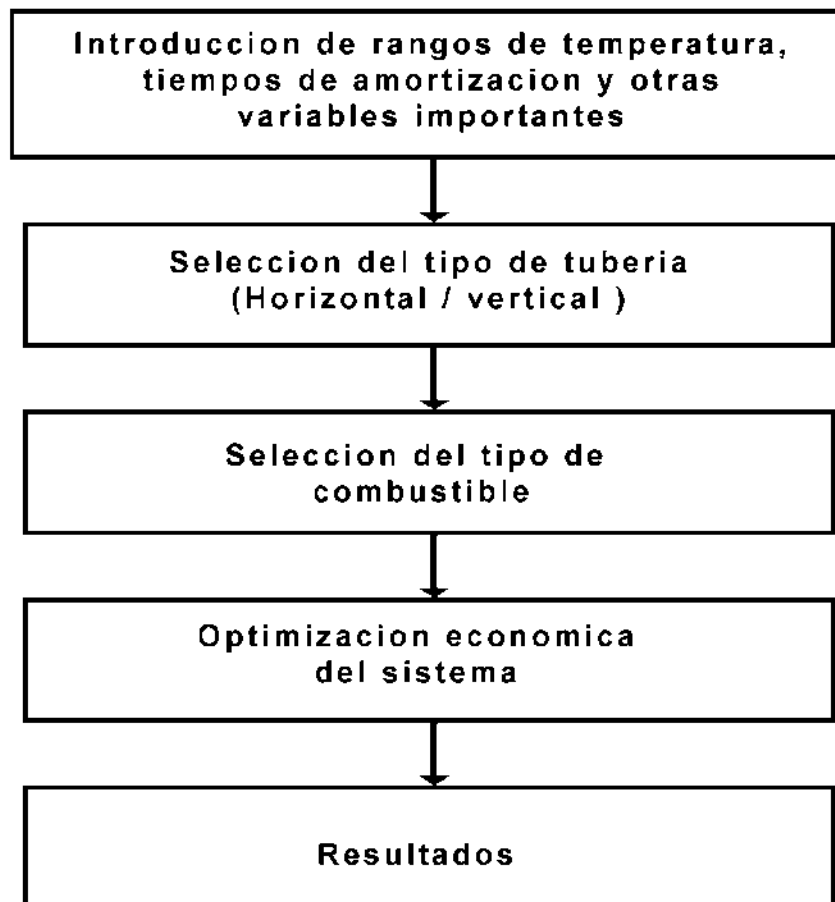


Fig. 7. Algoritmo utilizado para calcular el espesor optimo de un aislante

Funciones del Aislamiento térmico:

- 1) Incrementar la eficiencia en la operación de calentamiento/ventilación/enfriamiento, sistemas de tubería y de proceso.
- 2) Prevenir o reducir daños a los equipos expuestos al fuego o atmosferas corrosivas
- 3) Reducir pérdidas de calor, o ganancias de calor, para lograr una conservación de la energía.
- 4) Proteger al ambiente a través de la reducción de CO₂, NO_x y gases de invernadero.
- 5) Controlar la temperatura de procesos industriales.
- 6) Reducir el ruido en los sistemas mecánicos.
- 7) Controlar la temperatura de las superficies para proteger al personal y a los equipos.

Para el cálculo del coeficiente de radiación h_r , se emplea la ec. (4) y para el cálculo del coeficiente de convección se usa la ec. (5) .

Se puede apreciar en las ecuaciones (1) Y (3) que el espesor del aislante se encuentra involucrado tanto en Q como en Q' a diferencia de superficies planas. Esto implica mayor número de cálculos para la construcción como se muestra en la Fig. 5. Es conveniente tabular los siguientes valores:

T_4 (° F), h_8 , Q' y Q .

OPTIMIZACION ECONOMICA DEL SISTEMA.

Se han establecido los modelos y se ha descrito brevemente el procedimiento de cálculo la determinación de los parámetros Q y T_4 para ciertos espesores considerados; la determinación del espesor económico se efectúa básicamente empleando técnicas de balance económico.

El requisito indispensable para poder realizar un balance económico es que existan costos que tengan variación ascendente y costos que tengan una variación descendente con respecto a una o más variables comunes.

Para la optimización de sistemas de aislamiento térmico se tiene como variable común el espesor del aislante, los costos ascendentes son los costos fijos que se incrementan al aumentar espesor y los costos descendentes son los costos de operación (calentamiento o enfriamiento) ya que al aumentar el espesor del aislante disminuirán las pérdidas de energía del sistema al ambiente, esto se muestra en la Fig. 6.

En la gráfica de costos la curva de operación muestra que las primeras pulgadas de espesor retienen la mayor parte del calor, y si el espesor aumenta la curva se hace asintótica. Por otro lado, cada incremento de espesor significa mayor inversión y el balance entre estos aspectos implica un costo total mínimo en el cual se puede ahorrar la mayor energía.

La manera de determinar los costos fijos y de operación es como sigue:

Costos fijos.-Para expresar los costos fijos en función de la inversión de adquisición se aplica la siguiente ecuación:

$$C_f = I_a (1 + F) B \quad (7)$$

En donde F es un factor que involucra todos los costos de flete, instalación, acabado e indirectos como un porcentaje del costo del aislante, y B es un factor que involucra la amortización del capital (R) Y el deterioro del aislamiento ocasionado por el mantenimiento del equipo o tubería aislada (M), “ la” es la inversión de adquisición del material aislante.

$$B = R + M \quad (8)$$

$$R = r / [1 - (1 + R)^{-n}] \quad (9)$$

Se considera (M) como un 3% de la inversión de adquisición para mantenimiento, “ r “ en interés anual capitalizable semestral o anualmente y “ n “ periodo considerado para amortizar la inversión.

Costos de operación.- Los costos de operación se pueden determinar con la siguiente expresión:

$$C_{op} = q \theta N \quad (10)$$

Siendo q el calor cedido por el sistema al ambiente.

$$N = (1 + r')^n F_e \quad (11)$$

$$F_e = 1 / \text{eficiencia}$$

Las tablas de resultados en las que se aprecian las tendencias de las variables T_4 , q, Cf, Cop y CT totales. Con respecto a la variación del espesor del aislante se muestran en las corridas que son resultado del programa de computadora elaborado con el método propuesto. El diagrama de bloques del programa de computadora implementado con base a este algoritmo de cálculo se muestra en la Fig. 7.

```

Programam Trasferencia;
Uses Portada, Crt, Graph, Perry;
Const
    pi=3.1415927 ;
Var
    de,di,el,e2,t1,t2,t3,t4,t5,k1,k2,v,e,q,qp,r,b,m,fe,e3      : real ;
    rmin,al,teta,n,alfa,hc,hr,he,dlm,dep,denom,beta,rp,cf,ef    : real ;
    cop,ctf,Nmay,hi,GasTot,EspOp,f,ct,Re,Pr,delta              : real ;
    TipoConvex,TipoComb,posicion                                : char ;
    i                                                            : byte ;
    nombre                                                        :array[1..3] of string ;
    Calor,Espesor,Cfijos,Coper,Ctotales,Tsuperf                :array[1..15] of real ;
    co                                                            :integer;
ProCedure EntraDatos;
begin
    clrscr;cuadro ;
    gotoxy(4,3) ;
    Write('Diámetro Externo del tubo'           [pulg]:  ');ReadLn(de) ;
    gotoxy(4,4) ;
    Write('Diámetro Interno del tubo'           [pulg]:  ');ReadLn(di) ;
    gotoxy(4,5) ;
    Write('Espesor máximo del aislante'         [pulg]:  ');ReadLn(e3) ;
    gotoxy(4,6) ;
    Write('Temp. Operación'                     [°F]:  ');ReadLn(t1) ;
    gotoxy(4,7) ;
    Write('Temp.de pared'                       [°F]:  ');ReadLn(t2) ;
    gotoxy(4,8) ;
    Write('Temp. De Intefase pared-aislante'     [°F]:  ');ReadLn(t3) ;
    gotoxy(4,9) ;
    Write('Temp. Exter. Del aislante'            [°F]:  ');ReadLn(t4) ;
    gotoxy(4,10) ;
    Write('Temp. Ambiente'                      [°F]:  ');ReadLn(t5) ;
    gotoxy(4,11) ;
    Write('Conduct. Term. Tubería'               [BTU*pulg/h*pie2*°F]:  ');ReadLn(k1) ;
    gotoxy(4,12) ;
    Write('Conduct. Term. Aislante'              [BTU*pulg/h*pie2*°F]:  ');ReadLn(k2) ;
    gotoxy(4,13) ;
    Write('Velocidad del viento'                 [pie/seg]:  ');ReadLn(v) ;
    gotoxy(4,14) ;
    Write('Emisividad del aislante'              ');ReadLn(e) ;
    gotoxy(4,15) ;
    Write('Convección natural'                   [s / n]:  ');
    gotoxy(4,16) ;
    Write('Tasa de interes anual'                [fracción]:  ');ReadLn(rmin) ;
    gotoxy(4,17) ;
    Write('Inver. De adquisición Aislante'       [$ / pie2*pulg]:  ');ReadLn(al) ;
    gotoxy(4,18) ;
    Write('Horas de op. anual del sistema'        [Hr/año]:  ');ReadLn(teta) ;
    gotoxy(4,19) ;
    Write('Periodo de amortización'              [Años/Sem.]:  ');ReadLn(n) ;
    gotoxy(4,20) ;
    Write('Re'                                   ');ReadLn(Re) ;
    gotoxy(4,21) ;
    Write('Pr'                                   ');ReadLn(Pr) ;
    gotoxy(4,22) ;
    Write('Mantenimiento del sistema'            [fracción]:  ');ReadLn(M) ;

```

```

gotoxy(4,23) ;
Write('Eficiencia                                [fracción]: ');ReadLn(ef) ;
clrscr; cuadro;
gotoxy(4,4); Write('1)Tubo Horizontal. ');
gotoxy(4,5); Write('2)Tubo Vertical. ');
gotoxy(4,7); Write('Teclea tu opción. '); ReadLn(posición);
gotoxy(4,12); Write('Tipo de combustible ');
gotoxy(4,13); Write('          1) Aceite Combustible. ');
gotoxy(4,14); Write('          2) HC-Ligeros-Comb. ');
gotoxy(4,15); Write('          3) Gas-Combustible ');
gotoxy(4,16); Write('          4) #/BL. Crudo x 0.10 ');
gotoxy(4,18); Write('Teclea tu opción: '); ReadLn(TipoComb);

clrscr;
t1:=450;t2:=440;t3:=400;t5:=77;de:=3;di:=2.75;
k1:=314.516;k2:=0.338;v:=2.7262;e:=0.96;rmin:=0.6;al:=40;teta:=0.51;M:=0.4;
n:=3;Re:=20000;Pr:=0.5;posicion:= '2';Tipocomb:= '2';TipoConvex:= 'n';
e3:=10;ef:=0.6;

t1:=450;t2:=440;t3:=400;t5:=77;de:=3;di:=2.75;
k1:=314.516;k2:=0.338;v:=2.7262;e:=0.96;rmin:=0.6;al:=30;teta:=0.51;M:=0.4;
n:=3;Re:=20000;Pr:=0.5;posicion:= '2';Tipocomb:= '1';TipoConvex:= 'n';
e3:=10;ef:=0.7;

t1:=450;t2:=440;t3:=400;t5:=77;de:=3;di:=2.75;
k1:=314.516;k2:=0.2821;v:=2;e:=0.96;rmin:=0.15;al:=24;teta:=0.51;M:=0.28;
n:=3;Re:=20000;Pr:=0.5;posicion:= '1';Tipocomb:= '1';TipoConvex:= 's';
e3:=10;ef:=0.6;

end;

Procedure calculos;
begin
e3:=de-di;
if TipoComb='1' then rp:=0.08;
if TipoComb='2' then rp:=0.08;
if TipoComb='3' then rp:=0.3833;
if TipoComb='4' then rp:=0.3833;
if de<24 then
begin
if posicion='1' then alfa:=1.56*exp((-0.198)*ln(de));{horizontal}
if posicion='2' then alfa:=1.239*exp((-0.2)*ln(de));{vertical}
end;
if (TipoConvex='s')or(TipoConvex='S')then beta:=1;{si es conveccion natural}
if V>1 then beta:=sqrt(60*V+68.9;{si la vel>1 ft/seg}
hc:=alfa*exp((-0.181)*ln(t4+t5))*exp((0.266)*ln(t4-t5)*beta;
hr:=(0.173)*E*exp(4*ln(t4/100))*beta-exp(4*ln(t5/100)))/(t4-t5);
he:=hc+hr;
hi:=k1*(7+0.025*exp(0.08*ln(Re*Pr)))/di;
dim:=e1/ln(de/di);{ojo con el di utilizado aqui y abajo del renglon}
dep:= de+2*e2;
denom:=1/(di*hi))+e1/(k1*dim)+ln(dep/de)/(2*k2)+1(he*dep);
Q:=pi*(t1-t5)/denom;
Qp:=pi*he*dep*(t4-t5);
R:=rmin/(1-exp((-n)*ln(1+rmin)));
B:=R+M;
Cf:=al*(1+F)*B*e2;
Fe:=1/Ef;

```

```

Nmay:=Fe*exp(n*ln(1+rp));
Cop:=q*Nmay;
Ct:=Cf+Cop;
end;
{
Procedure Nombres;
begin
    nombre[1]=    'Costos Fijos';
    nombre[2]=    'Costos de Operación';
    nombre[3]=    'Costos Totales';
end;
}

Procedure PrintResultados;
begin
{
    Writeln('Cf=  ',cf:5:4);
    Writeln('Co=  ',cop:5:4);
    Writeln('Ct=  ',ct:5:4);
    Writeln('Q=   ',Q:5:4);
    Writeln('Qp=  ',Qp:5:4);
    Readln;
    clrscr ;cuadro ;{Writeln;Writeln;Writeln;Writeln;Writeln}
    highvideo;
    gotoxy(4,4);
    write('Espesor(plg)      T°F          Calor          G. fijos          G. Op          G. Totales      ');
    gotoxy(5,5);
    write('Aislante          superf      Btu/Hr          $/Año          $/Año          $/Año          ');lowvideo;
    for i:=1 to 15 do
    begin
        gotoxy(5,5+i);write(espesor[i]:3:4);
        gotoxy(17,5+i);write(tsuperf[i]:3:4);
        gotoxy(29,5+i);write(Calor[i]:3:4);
        gotoxy(41,5+i);write(Cfijos[i]:3:4);
        gotoxy(53,5+i);write(Coper[i]:3:4);
        gotoxy(65,5+i);write(Ctotales[i]:3:4);
    end;
    gotoxy(6,22);write(' Espesor Optimo: ',EspOp:5:4,' plg;
    gotoxy(55,24);write(' CONTINUA CON <<ENTER>> ')readln;
    end ;

Procedure Repetir;
begin
{EntraDatos}
    t4:=t5+1;
    repeat
        Calculos ;
        if (abs(q-qp)<1000) and (abs(q-qp)>=1000) then t4:=t4+(q-qp)/1000;
        if (abs(q-qp)<1000) and (abs(q-qp)>=100) then t4:=t4+(q-qp)/100;
        if (abs(q-qp)<100) and (abs(q-qp)>=10) then t4:=t4+(q-qp)/10;
        if (abs(q-qp)<10) and (abs(q-qp)>=1) then t4:=t4+(q-qp)/5;
        if (abs(q-qp)<1) and (abs(q-qp)>=0.1) then t4:=t4+(q-qp);
        if (abs(q-qp)<0.1) and (abs(q-qp)>=0.01) then t4:=t4+(q-qp)*5;
        if (abs(q-qp)<0.01) and (abs(q-qp)>=0.001) then t4:=t4+(q-qp)*10;
        if (abs(q-qp)<0.001) and (abs(q-qp)>=0.0001) then t4:=t4+(q-qp)*20;
    {
        Writeln('Q = ',q:5:4);
        Writeln('Qp = ',Qp:5:4);
        Writeln('t = ',t4:5:4);
        Readln; }
    until (abs(q-qp)/qp)<=1;
end;

```

```

Procedure Intervalo ;
begin
    clrscr ; Gotoxy(10,10) ;Write('Calculando. . . . .');
    delta:=e3/15;
    e2:=0;
    co:=0;
    for i:=1 to 15 do begin
        co:=co+1;
        e2:=e2+delta;
        repetir;
        Calor[co]:=Q;
        Espesor[co]:=e2;
        Cfijos[co]:=Cf;
        Coper[co]:=Cop;
        Ctotaes[co]:=Ct;
        Tsuper[co]:=t4;
        if (Ctotaes[co]>Ctotaes[co-1]) and (Ctotaes[co-1]<Ctotaes[co-2]) then
            begin
                EspOp:=Espesor[co-1];GasTot:=Ctotaes[co-1];
            end;
        { Writeln('co = ',co:5:4);}
    end;

BEGIN
    EntreDatos;
    Intervalo;
    PrintResultados;
END

```

Diametro Externo del tubo	[pulg]:	3
Diametro Interno del tubo	[pulg]:	2.75
Espesor máximo del aislante	[pulg]:	10
Temp. Operación	[°F]:	450
Temp. de pared	[°F]:	440
Temp. de interfase pared-aislante	[°F]:	400
Temp. Ambiente	[°F]:	77
Conduct. Term. Tubería	[BTU•pulg/h•pie ² •°F]:	314.561
Conduct. Term. Aislante	[BTU•pulg/h•pie ² •°F]:	0.338
Velocidad del viento	[pie/seg]:	2.7262
Emisividad del aislante	:	.96
Convección natural	[s/n]:	n
Tasa de interés anual	[fracción]:	.6
Inver. De adquisición aislante	[\$/pie ² •pulg]:	30
Horas de op. anual del sistema	[Hr/Año]:	8600
Periodo de amortización	[Años o semestres]:	3
Re	:	20000
Pr	:	.5
Mantenimiento del sistema	[fracción]:	.4
Eficiencia	[fracción]:	.7

- 1) Tubo horizontal.
- 2) Tubo Vertical

Teclea tu opción: 2

Tipo de Combustible :

- 1) Aceite Combustible
- 2) HC-Ligeros-Comb.
- 3) Gas- Combustible.
- 4) #/BL. Crudo x 0.10.

Teclea tu opción: 1

Espesor (plg) Aislante	T °F superf	Calor BTU/Hr	G. Fijos \$/Año	G. Op. \$/Año	G. Totales \$/Año
0.6667	193.9333	891.9192	23.8760	1605.0877	1628.9363
1.3333	159.4161	739.1704	47.7519	1330.2026	1377.9546
2.0000	138.7490	645.9371	71.6279	1162.4211	1234.0490
2.6667	128.8319	585.1225	95.5039	1052.9798	1148.4837
3.3333	118.8082	537.9829	119.3798	968.1479	1087.5277
4.0000	112.9430	502.8556	143.2558	904.9333	1048.1891
4.6667	108.0819	474.5495	167.1318	853.0039	1021.1257
5.3333	106.0054	452.4782	191.0078	814.2747	1005.2824
6.0000	102.3456	432.6810	214.8837	778.6479	993.5316
6.6667	100.9515	416.7996	238.7597	750.0679	988.8275
7.3333	97.9951	401.9821	262.6357	723.4023	986.0380
8.0000	97.0342	389.9340	286.5116	701.7208	988.2324
8.6667	96.1621	379.2126	310.3876	682.4267	992.8143
9.3333	93.8242	368.7677	334.2636	663.6302	1006.3248
10.0000	93.2093	360.1853	358.1395	648.1853	

Espesor Optimo: 7.3333 plg

Gastos Totales: 986.0380 \$/AÑO

CONTINUA CON <<ENTER>>

Diametro Externo del tubo	[pulg]:	3
Diametro Interno del tubo	[pulg]:	2.75
Espesor máximo del aislante	[pulg]:	10
Temp. Operación	[°F]:	450
Temp. de pared	[°F]:	440
Temp. de interfase pared-aislante	[°F]:	400
Temp. Ambiente	[°F]:	77
Conduct. Term. Tubería	[BTU•pulg/h•pie ² •°F]:	314.561
Conduct. Term. Aislante	[BTU•pulg/h•pie ² •°F]:	0.338
Velocidad del viento	[pie/seg]:	2.7262
Emisividad del aislante	:	0.96
Convección natural	[s/n]:	n
Tasa de interés anual	[fracción]:	0.6
Inver. De adquisición aislante	[\$/pie ² •pulg]:	40
Horas de op. anual del sistema	[Hr/Año]:	8600
Periodo de amortización	[Años o semestres]:	3
Re	:	20000
Pr	:	0.5
Mantenimiento del sistema	[fracción]:	0.4
Eficiencia	[fracción]:	0.7

- 1) Tubo horizontal.
- 2) Tubo Vertical

Teclea tu opción: 2

Tipo de Combustible :

- 1) Aceite Combustible
- 2) HC-Ligeros-Comb.
- 3) Gas- Combustible.
- 4) #/BL. Crudo x 0.10.

Teclea tu opción: 2

Espesor(plg)	T °F	Calor	G. Fijos	G. Op.	G. Totales
Aislante	superf	BTU/Hr	\$/Año	\$/Año	\$/Año
0.6667	193.9333	891.9192	31.8346	1605.0877	1636.9223
1.3333	159.4161	739.1704	63.6693	1330.2026	1393.8719
2.0000	138.7490	645.9371	95.5039	1162.4211	1257.9249
2.6667	128.8319	585.1225	127.3385	1052.9798	1180.3183
3.3333	118.8082	537.9829	159.1731	968.1479	1127.3210
4.0000	112.9430	502.8556	191.0078	904.9333	1095.9410
4.6667	108.0819	474.5495	222.8424	853.0039	1076.8363
5.3333	106.0054	452.4782	254.6770	814.2747	1068.9517
6.0000	102.3456	432.6810	286.5116	778.6479	1065.1595
6.6667	100.9515	416.7996	318.3463	750.0679	1068.4141
7.3333	97.9951	401.9821	350.1809	723.4023	1073.5832
8.0000	97.0342	389.9340	382.0155	701.7208	1083.7363
8.6667	96.1621	379.2126	413.8501	682.4267	1096.2769
9.3333	93.8242	368.7677	445.6848	663.6302	1109.3149
10.0000	93.2093	360.1853	477.5194	648.1853	1125.7047

Espesor Optimo: 6.0000 plg

Gastos Totales: 1065.1595 \$/AÑO

CONTINUA CON <<ENTER>>

CONCLUSIONES

El procedimiento mostrado aunado al programa de computadora, es una herramienta que permite efectuar revisiones periódicas a las tablas de recomendaciones de aislamiento térmico de las especificaciones generales para servicios de alta temperatura, ya que, tanto los precios de los materiales, el interés del capital amortizable y el precio del petróleo, son variables impredecibles.

NOMENCLATURA.

T_1	Temperatura de operación de la tubería (° F).
T_2	Temperatura de pared de la tubería (° F).
T_3	Temperatura de interface pared-aislante (° F).
T_4	Temperatura de la cara externa del aislante (° F).
T_5	Temperatura ambiente (° F).
e_1	Espesor de la resistencia solida 1 (pulg.).
e_2	Espesor de la resistencia solida 2 (pulg.).
k	Conductividad térmica del material (BTU-pulg/Hr- pie ² -°F)
h_i	Coeficiente de convección interna de la tubería (BTU-pulg/Hr- pie ² -°F)
h_e	Coeficiente externo del sistema (BTU / Hr- pie ² -°F)
h_c	Coeficiente de convección del aire (BTU / Hr- pie ² -°F)
h_r	Coeficiente de radiación a la atmósfera (BTU / Hr- pie ² -°F)
Q	Calor transferido a través del sistema (BTU / Hr)
Q'	Calor transferido en la resistencia externa (BTU / Hr)
A	Área de transferencia (pie ²)
q	Flujo unitario de calor en el sistema (BTU / Hr- pie ²)
q'	Flujo unitario en la resistencia externa (BTU / Hr- pie ²)
V	Velocidad del viento (pie / seg.)
E	Emisividad del material de acabado
DI	Diámetro interno de la tubería (pulg)
DE	Diámetro externo de la tubería (pulg)
DE'	Diámetro externo del sistema de aislamiento (pulg)
CT	Costos totales (\$ / año)
Cf	Costos fijos (\$ / año)

Cop	Costos de operación (\$ / año)
Eop	Espesor optimo del aislamiento (pulg)
la	Inversión de adquisición del aislante (\$ / pie ² - pulg)
F	Factor para cálculo de la inversión del sistema instalado (fracción).
B	Factor de conversión a costos anuales (fracción).
R	Amortización de la inversión total (fracción)
r	Tasa de interés anual (fracción)
n	Periodo de amortización (años o semestres)
M	Mantenimiento al sistema (fracción)
θ	Horas de operación anual del sistema (hrs / año)
N	Costo indirecto de energía para una corriente de proceso, vapor o combustible (\$ / MM BTU - aprovechados)
a	Costo de energía liberada por el combustible (\$ / MM BTU - Liberados)
r'	Tendencia de incremento de costos de combustible (fracción)
Fe	Factor de eficiencia del sistema de generación de energía térmica.

BIBLIOGRAFIA.

- 1.- William c. Turner, John F. Malloy. Thermal Insulation Handbook. McGraw-Hill, Florida 1981
- 2.- R. B. Bird, W. E. Stewart, E. N. Lightfoot. Fenomenos de transporte. Barcelona 1987
- 3.- Thermal insulation Systems. National Aeronautics and Space Agency
- 4.- How To Determine Economic Thickness of Insulation. National Insulation Manufactures Association. AAI. Lexington Avenue N. Y. 10017.

APENDICES

Table 49 Thermal Conductivities of Insulations —

English Units

Btu. in./ft., hr., °F

		Identification No. 1	Identification No. 2	Identification No. 3	Identification No. 4	Identification No. 5	Identification No. 6	Identification No. 7
Mean Temp.		Generic Type: Alumina-silica fiber and binder Form: Block	Generic Type: Alumina-silica fiber and binder Form: Block	Generic Type: Alumina-silica fiber and binder Form: Board	Generic Type: Alumina-silica fiber and binder Form: Board	Generic Type: Calcium-silicate Type 1 Form: Block and Pipe Cov	Generic Type: Calcium-silicate Type 2 Form: Block and Pipe Cov	Generic Type: Diatomaceous-silica Type 4 Form: Block and Pipe Cov
°R	°F	Density lbs/ft. ³ 15 to 17	Density lbs/ft. ³ 18 to 22	Density lbs/ft. ³ 10 to 16	Density lbs/ft. ³ 21 to 40	Density lbs/ft. ³ 14 (max.)	Density lbs/ft. ³ 15 (max.)	Density lbs/ft. ³ 24 (max.)
260	– 200							
360	– 100							
460	0							
560	100					0.35		
660	200					0.43		
760	300					0.50		
860	400	0.45	0.55	0.40	0.65	0.55	0.66	
960	500	0.50	0.60	0.46	0.70	0.60	0.70	0.70
1060	600	0.56	0.65	0.52	0.75	0.66	0.76	0.72
1160	700	0.62	0.70	0.58	0.80	0.72	0.82	0.75
1260	800	0.68	0.75	0.64	0.85		0.94	0.77
1360	900	0.74	0.80	0.70	0.90		1.01	0.80
1460	1000	0.81	0.85	0.76	0.95		1.08	0.83
1560	1100	0.88	0.91	0.83	1.00		1.16	0.87
1660	1200	0.96	0.97	0.90	1.05		1.25	0.91

Metric Units

w/mK

°K	°C	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17
173	– 100							
223	– 50							
273	0							
323	50							
373	100					0.065		
423	150					0.072		
473	200	0.065	0.079	0.058		0.079	0.095	
523	250	0.073	0.085	0.066		0.085	0.100	0.100
573	300	0.081	0.091	0.074	0.106	0.093	0.109	0.103
623	350	0.089	0.098	0.082	0.114	0.100	0.118	0.106
673	400	0.097	0.105	0.090	0.120		0.128	0.109
723	450	0.107	0.112	0.098	0.126		0.136	0.112
773	500	0.116	0.119	0.106	0.132		0.144	0.115
823	550	0.126	0.126	0.114	0.138		0.152	0.118
873	600	0.137	0.133	0.122	0.144		0.161	0.122
923	650	0.138	0.140	0.130	0.151		0.170	0.125

Table 49 Thermal Conductivities of Insulations —

English Units

Btu. in./ft., hr., °F

		Identification No. 8	Identification No. 9	Identification No. 10	Identification No. 11	Identification No. 12	Identification No. 13	Identification No. 14
Mean Temp.		Generic Type: Diatomaceous-silica Type 2 Form: Block and Pipe Cov	Generic Type: Cork, vegetable Form: Board	Generic Type: Cork, vegetable Form: Pipe Cov.	Generic Type: Cellular Glass Form:	Generic Type: Cellular Glass between layers of felt Roof Form: Board	Generic Type: Diatomaceous-silica Type 1 Class I Form: Block and Pipe Cov	Generic Type: Diatomaceous-silica Type 2 Class II Form: Block and Pipe Cov
°R	°F	Density lbs/ft. ³ 26 (max.)	Density lbs/ft. ³ 6 to 8	Density lbs/ft. ³ 7 to 14	Density lbs/ft. ³ 7.5 to 9.5	Density lbs/ft. ³ 7.5 to 9.5	Density lbs/ft. ³ 17 to 24	Density lbs/ft. ³ 26
260	– 200				0.22			
360	– 100				0.28			
460	0		0.31	0.35	0.35	0.35		
560	100		0.35	0.39	0.43	0.43		
660	200				0.51	0.51		
760	300				0.58			
860	400				0.69			
960	500	0.78			0.81		0.72	0.80
1060	600	0.80					0.74	0.82
1160	700	0.82					0.76	0.84
1260	800	0.84					0.78	0.87
1360	900	0.87					0.80	0.90
1460	1000	0.90					0.83	0.93
1560	1100	0.93					0.86	0.96
1660	1200	0.96					0.90	0.99

Metric Units

w/mK

°K	°C	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17
173	– 100				0.031			
223	– 50				0.039	0.039		
273	0		0.046	0.051	0.047	0.047		
323	50		0.051	0.056	0.055	0.055		
373	100				0.063	0.063		
423	150				0.073			
473	200				0.085			
523	250	0.112			0.098		0.103	0.115
573	300	0.115					0.105	0.117
623	350	0.118					0.108	0.119
673	400	0.121					0.111	0.123
723	450	0.124					0.114	0.127
773	500	0.127					0.116	0.131
823	550	0.130					0.121	0.135
873	600	0.133					0.125	0.140
923	650	0.136					0.130	0.143

Table 49 Thermal Conductivities of Insulations —

English Units

Btu. in./ft., hr., °F

		Identification No. 15	Identification No. 16	Identification No. 17	Identification No. 18	Identification No. 19	Identification No. 20	Identification No. 21
Mean Temp.		Generic Type: Glass fiber with organic binder Form: Board	Generic Type: Glass fiber with organic binder Form: Board	Generic Type: Glass fiber with organic binder Form: Board	Generic Type: Glass fiber with organic binder foil reinforced Form: Board	Generic Type: Glass fiber with organic binder Form: Pipe Cov	Generic Type: Glass fiber with organic binder Form: Pipe Cov	Generic Type: Mineral fiber (rock, slag, or glass Form: Block or Board
°R	°F	Density lbs/ft. ³ 15 to 17	Density lbs/ft. ³ 18 to 22	Density lbs/ft. ³ 10 to 16	Density lbs/ft. ³ 21 to 40	Density lbs/ft. ³ 14 (max.)	Density lbs/ft. ³ 15 (max.)	Density lbs/ft. ³ 24 (max.)
260	– 200							
360	– 100							
460	0	0.22						
560	100	0.29	0.28	0.27	0.30	0.28	0.28	0.28
660	200	0.36	0.32	0.30	0.34	0.32	0.32	0.35
760	300	0.47	0.39	0.35	0.	0.39	0.39	0.43
860	400	0.62	0.50	0.46	0.	0.48	0.48	0.54
960	500							
1060	600							
1160	700							
1260	800							
1360	900							
1460	1000							
1560	1100							
1660	1200							

Metric Units

w/mK

°K	°C	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17
173	– 100							
223	– 50							
273	0	0.033			0.030			
323	50	0.040	0.039	0.038	0.043	0.040	0.040	0.040
373	100	0.053	0.047	0.045	0.	0.047	0.047	0.052
423	150	0.068	0.056	0.051	0.	0.056	0.059	0.062
473	200	0.089	0.072	0.066	0.	0.069	0.071	0.078
523	250							
573	300							
623	350							
673	400							
723	450							
773	500							
823	550							
873	600							
923	650							

Table 49 Thermal Conductivities of Insulations —

English Units

Btu. in./ft., hr., °F

		Identification No. 22	Identification No. 23	Identification No. 24	Identification No. 25	Identification No. 26	Identification No. 27	Identification No. 28
Mean Temp.		Generic Type: Mineral fiber (rock, slag, or glass Form: Block or Board	Generic Type: Mineral fiber Class 3 Form: Block and Board	Generic Type: Mineral fiber Class 4 Form: Block and Board	Generic Type: Mineral fiber Class 5 Form: Block and Board	Generic Type: Mineral fiber Class 1 Form: Pipe Cov.	Generic Type: Mineral fiber Class 2 Form: Pipe Cov.	Generic Type: Mineral fiber Class 3 Form: Pipe Cov.
°R	°F	Density lbs/ft. ³ 11 to 13	Density lbs/ft. ³ 7 to 12	Density lbs/ft. ³ 8 to 13	Density lbs/ft. ³ 12 to 25	Density lbs/ft. ³ 9 to 11	Density lbs/ft. ³ 11 to 14	Density lbs/ft. ³ 16 to 20
260	– 200							
360	– 100							
460	0					0.24		
560	100	0.28	0.30	0.36		0.27	0.33	0.36
660	200	0.35	0.36	0.42	0.40	0.33	0.39	0.42
760	300	0.43	0.42	0.50	0.46	0.42	0.46	0.49
860	400	0.54	0.49	0.57	0.51		0.53	0.56
960	500			0.64	0.57			0.64
1060	600				0.62			
1160	700				0.68			
1260	800				0.75			
1360	900				0.82			
1460	1000				0.90			
1560	1100				0.98			
1660	1200				1.07			

Metric Units

w/mK

°K	°C	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17
173	– 100							
223	– 50							
273	0							
323	50	0.040	0.046	0.054		0.036	0.046	
373	100	0.052	0.053	0.062		0.049	0.056	0.061
423	150	0.062	0.060	0.072	0.066	0.060	0.066	0.071
473	200	0.078	0.072	0.082	0.073		0.076	0.081
523	250			0.091	0.082			0.099
573	300				0.087			
623	350				0.095			
673	400				0.105			
723	450				0.111			
773	500				0.121			
823	550				0.132			
873	600				0.140			
923	650				0.154			

Table 49 Thermal Conductivities of Insulations —

English Units

Btu. in./ft., hr., °F

		Identification No. 29 Generic Type: Perlite expanded and water repellent binder Form: Block and Pipe Cov.	Identification No. 30 Generic Type: Perlite expanded with binders Form: Block and Pipe Cov.	Identification No. 31 Generic Type: Perlite expanded with binder and fibers Form: Roof Board	Identification No. 32 Generic Type: Expanded Phenolic foam Form: Block and Pipe Cov.	Identification No. 33 Generic Type: Poly- strene expanded beads molded to shape Form: Block, Board Pipe Cov.	Identification No. 34 Generic Type: Poly- styrone expanded foam-cut shapes Form: Board and Pipe Cov.	Identification No. 35 Generic Type: Poly- styrone expanded foam-molded shapes Form: Board and Pipe Cov.
Mean Temp.		Density lbs/ft. ³ 13 to 15	Density lbs/ft. ³ 13 to 15	Density lbs/ft. ³ 10	Density lbs/ft. ³ 2 to 3	Density lbs/ft. ³ 1.0 to 1.5	Density lbs/ft. ³ 1.75 to 2.0	Density lbs/ft. ³ 2.0 to 2.2
°R	°F							
260	– 200							
360	– 100							
460	0			0.36	0.22	0.24	0.20	0.20
560	100	0.40	0.40	0.40	0.26	0.28	0.24	0.24
660	200	0.45	0.45					
760	300	0.50	0.50					
860	400	0.55	0.55					
960	500	0.60	0.60					
1060	600	0.65	0.65					
1160	700	0.71	0.71					
1260	800	0.77	0.77					
1360	900	0.83	0.83					
1460	1000	0.90	0.90					
1560	1100							
1660	1200							

Metric Units

w/mK

°K	°C	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17
173	– 100							
223	– 50							
273	0			0.053	0.032	0.035	0.026	0.026
323	50			0.057	0.058	0.041	0.032	0.032
373	100	0.068	0.068					
423	150	0.072	0.072					
473	200	0.078	0.078					
523	250	0.085	0.085					
573	300	0.091	0.091					
623	350	0.098	0.098					
673	400	0.105	0.105					
723	450	0.112	0.112					
773	500							
823	550							
873	600							
923	650							

Table 49 Thermal Conductivities of Insulations —

English Units

Btu. in./ft., hr., °F

		Identification No. 36	Identification No. 37	Identification No. 38	Identification No. 39	Identification No. 40	Identification No. 41	Identification No. 42
Mean Temp.		Generic Type: Polystyrene expanded foam- mpled into shapes Form: Board	Generic Type: Polystyrene foam mpled into shapes Form: Roof Board	Generic Type: Polyurethane expanded foam Form: Block, Board Pipe Cov.	Generic Type: Polyurethane expanded foam Form: Block, Board Pipe Cov.	Generic Type: Polyurethane expanded foam Form: Block, Board Pipe Cov.	Generic Type: Expanded rubber Form: Rigid Board	Generic Type: Expanded silica and binders Form: Block and Pipe Cov.
°R	°F	Density lbs/ft. ³ 2.25 to 2.5	Density lbs/ft. ³ 2.5 to 2.7	Density lbs/ft. ³ Up to 1.7	Density lbs/ft. ³ 1.7 to 2.5	Density lbs/ft. ³ 2.5 to 5.0	Density lbs/ft. ³ 4 to 6	Density lbs/ft. ³ 13
260	– 200							
360	– 100	0.20	0.20	0.23	0.22	0.20	0.26	
460	0	0.24	0.24	0.27	0.26	0.24	0.28	
560	100							0.40
660	200							0.42
760	300							0.45
860	400							0.50
960	500							0.55
1060	600							0.60
1160	700							0.65
1260	800							0.70
1360	900							0.76
1460	1000							0.82
1560	1100							
1660	1200							

Metric Units

w/mK

°K	°C	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17
173	– 100							
223	– 50							
273	0	0.026	0.026	0.033	0.032	0.028	0.037	
323	50	0.032	0.032	0.039	0.038	0.034	0.041	0.057
373	100							0.061
423	150							0.065
473	200							0.072
523	250							0.078
573	300							0.085
623	350							0.091
673	400							0.098
723	450							0.105
773	500							0.113
823	550							
873	600							
923	650							

Table 49 Thermal Conductivities of Insulations —

English Units

Btu. in./ft., hr., °F

		Identification No. 43	Identification No. 44	Identification No. 45	Identification No. 46	Identification No. 47	Identification No. 48	Identification No. 49
Mean Temp.		Generic Type: Wood fibers and binders Form: Board	Generic Type: Borosilica closed cell inorganic foam Form: Block	Generic Type: Elastomeric Flexible Form: Sheet and Pipe Cov.	Generic Type: Glass fiber, flexible with various facings Form: Roll and Sheets	Generic Type: Glass fiber, flexible with various facings** Form: Sheets	Generic Type: Glass fiber, semi-rigid with various facings** Form: Sheets	Generic Type: Kaolin ceramic fiber in stainless steel metal mesh Form: Strip & Shaped
°R	°F	Density lbs/ft. ³ 15 to 18	Density lbs/ft. ³ 12	Density lbs/ft. ³ 9.5 to 8.5	Density lbs/ft. ³ 0.6 to 3.0	Density lbs/ft. ³ 3 to 4.5	Density lbs/ft. ³ 4.5 (min.)	Density lbs/ft. ³ 3 to 4
260	– 200							
360	– 100							
460	0	0.40		0.29	0.30	0.28	0.27	
560	100	0.42	0.58	0.32	0.40	0.36	0.33	
660	200		0.64		0.54	0.46	0.40	
760	300		0.69		0.68	0.60	0.50	
860	400		0.75					0.45
960	500		0.82					0.57
1060	600							0.70
1160	700							0.82
1260	800							0.96
1360	900							1.11
1460	1000							1.30
1560	1100							1.47
1660	1200							1.65

Metric Units

w/mK

°K	°C	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17
173	– 100							
223	– 50							
273	0			0.0425	0.044	0.042	0.040	
323	50	0.059	0.085	0.0476	0.059	0.053	0.049	
373	100	0.062	0.0937		0.079	0.067	0.059	
423	150		0.0995		0.101	0.082	0.071	
473	200		0.1082					0.065
523	250		0.1168					0.084
573	300							0.099
623	350							0.114
673	400							0.128
723	450							0.146
773	500							0.170
823	550							0.194
873	600							0.211
923	650							0.232

Table 49 Thermal Conductivities of Insulations —

English Units

Btu. in./ft., hr., °F

		Identification No. 50	Identification No. 51	Identification No. 52	Identification No. 53	Identification No. 54	Identification No. 55	Identification No. 56
Mean Temp.		Generic Type: Kaolin ceramic fiber in stainless steel metal mesh Form: Strip & Shaped	Generic Type: Mineral wool-spun glass-stainless steel metal mesh Form: Various Shapes	Generic Type: Mineral fibers with metal mesh facings** Class I Form: Sheets	Generic Type: Mineral fibers with metal mesh facings** Class II Form: Sheets	Generic Type: Urethane foam Form: Block, Pipe Cov.	Generic Type: Urethane foam Form: Block, Pipe Cov.	Generic Type: Alumina fibers Form: Blanket and Felts
°R	°F	Density lbs/ft. ³ 6 to 8	Density lbs/ft. ³ 10 to 14	Density lbs/ft. ³ 6 (ave. max.)	Density lbs/ft. ³ 12 (ave. max.)	Density lbs/ft. ³ Up to 1.5	Density lbs/ft. ³ Over 1.5	Density lbs/ft. ³ 3 to 4
260	– 200							
360	– 100							
460	0		0.26			0.29	0.27	
560	100		0.30		0.31	0.31	0.29	
660	200		0.34	0.29	0.37			
760	300		0.40	0.36	0.44			
860	400	0.35	0.47	0.46	0.51			0.40
960	500	0.40	0.55	0.56	0.59			0.49
1060	600	0.47	0.62	0.67				0.60
1160	700	0.56	0.76	0.67				0.74
1260	800	0.68	0.87					0.90
1360	900	0.81	0.98					1.05
1460	1000	0.95	1.10					1.25
1560	1100	1.07						1.42
1660	1200	1.20						1.65

Metric Units

w/mK

°K	°C	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17
173	– 100							
223	– 50							
273	0		0.039			0.043	0.040	
323	50		0.044	0.036	0.039	0.046	0.043	
373	100		0.050	0.044	0.046			
423	150		0.057	0.057	0.054			
473	200	0.051	0.067	0.069	0.063			0.058
523	250	0.059	0.078	0.082	0.072			0.069
573	300	0.066	0.088					0.084
623	350	0.077	0.103					0.097
673	400	0.089	0.118					0.118
723	450	0.106	0.132					0.140
773	500	0.125	0.150					0.163
823	550	0.142	0.162					0.187
873	600	0.157						0.209
923	650	0.173						0.238

Table 49 Thermal Conductivities of Insulations —

English Units

Btu. in./ft., hr., °F

		Identification No. 57	Identification No. 58	Identification No. 59	Identification No. 60	Identification No. 61	Identification No. 62	Identification No. 63
Mean Temp.		Generic Type: Alumina fibers Form: Blanket and Felts	Generic Type: Alumina fibers Form: Blanket and Felts	Generic Type: Alumina fibers Form: Rope cord, yarn	Generic Type: Glass fiber, fine fiber (no binder) Form: Blanket and Batt.	Generic Type: Glass fiber, fine fiber with binder Form: Blanket	Generic Type: Glass fiber, with binder Form: Blanket	Generic Type: Glass fiber, with binder Form: Blanket
°R	°F	Density lbs/ft. ³ 6 to 8	Density lbs/ft. ³ 12	Density lbs/ft. ³ 25	Density lbs/ft. ³ 11 to 12	Density lbs/ft. ³ ½ to 2	Density lbs/ft. ³ 1 to 2	Density lbs/ft. ³ 2.5 to 3.5
260	– 200							
360	– 100							
460	0				0.26	0.23		
560	100				0.30	0.24	0.38	0.35
660	200				0.34	0.30	0.54	0.48
760	300				0.40	0.38		
860	400	0.33	0.30	0.40	0.47			
960	500	0.38	0.36	0.49	0.55			
1060	600	0.44	0.42	0.60	0.62			
1160	700	0.53	0.49	0.74	0.76			
1260	800	0.62	0.57	0.90	0.87			
1360	900	0.72	0.65	1.05	0.98			
1460	1000	0.83	0.72	1.25	1.10			
1560	1100	0.94	0.82	1.42				
1660	1200	1.06	0.92	1.65				

Metric Units

w/mK

°K	°C	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17
173	– 100							
223	– 50							
273	0				0.039	0.033		
323	50				0.044	0.037	0.060	0.055
373	100				0.050	0.044	0.079	0.071
423	150				0.057	0.054		
473	200	0.047	0.043	0.058	0.067			
523	250	0.053	0.050	0.069	0.078			
573	300	0.061	0.058	0.084	0.088			
623	350	0.072	0.066	0.097	0.103			
673	400	0.083	0.077	0.118	0.118			
723	450	0.095	0.086	0.140	0.132			
773	500	0.104	0.099	0.163	0.150			
823	550	0.123	0.104	0.187	0.162			
873	600	0.140	0.121	0.209				
923	650	0.153	0.133	0.228				

Table 49 Thermal Conductivities of Insulations —

English Units

Btu. in./ft., hr., °F

		Identification No. 64	Identification No. 65	Identification No. 66	Identification No. 67	Identification No. 68	Identification No. 69	Identification No. 70
Mean Temp.		Generic Type: Mineral fibers Form: Blanket and Batt..	Generic Type: Mineral fibers with binders Form: Blankets	Generic Type: Silica fibers Form: Blanket, Felt	Generic Type: Alumina-silica, semi refractory hydraulic setting Form: Cement	Generic Type: Alumina-silica, ceramic fiber air setting cement Form: Ready-mix	Generic Type: Alumina-silica-ceramic Form: Spray mix cement	Generic Type: Diatomaceous-silica and binder Form: Water mix cement
°R	°F	Density lbs/ft. ³ 8 to 12	Density lbs/ft. ³ 7 to 9	Density lbs/ft. ³ 6 to 9.5	Density lbs/ft. ³ 48 to 70	Density lbs/ft. ³ 115 to 122	Density lbs/ft. ³ 12 to 13	Density lbs/ft. ³ 23 to 32
260	– 200							
360	– 100							
460	0							
560	100		0.30					
660	200		0.34					0.75
760	300	0.49	0.38					0.80
860	400	0.57	0.44				0.40	0.85
960	500	0.68	0.52	0.47			0.46	0.90
1060	600	0.82		0.50	1.42		0.52	0.95
1160	700			0.56	1.47		0.58	1.00
1260	800			0.67	1.52		0.65	1.06
1360	900			0.77	1.58		0.71	1.12
1460	1000			0.90	1.64	3.5	0.78	1.19
1560	1100			1.02	1.70	4.2	0.86	
1660	1200			1.20	1.76	5.0	0.94	

Metric Units

w/mK

°K	°C	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17
173	– 100							
223	– 50							
273	0							
323	50		0.045					
373	100		0.051					0.109
423	150	0.071	0.055					0.115
473	200	0.082	0.063				0.058	0.123
523	250	0.097	0.076	0.067			0.064	0.129
573	300	0.121		0.071	0.203		0.073	0.135
623	350			0.078	0.210		0.081	0.140
673	400			0.086	0.216		0.088	0.146
723	450			0.102	0.223		0.097	0.153
773	500			0.120	0.231		0.107	0.162
823	550			0.133	0.239	0.505	0.115	0.174
873	600			0.152	0.248	0.510	0.125	
923	650			0.173	0.254	0.721	0.136	

Table 49 Thermal Conductivities of Insulations —

English Units

Btu. in./ft., hr., °F

		Identification No. 71	Identification No. 72	Identification No. 73	Identification No. 74	Identification No. 75	Identification No. 76	Identification No. 77
Mean Temp.		Generic Type: Kaowool ceramic fiber and inorganic binders Form: Spray cement	Generic Type: Kaowool fiber and mineral fiber blend Form: Spray cement	Generic Type: Mineral fiber, binder and hydraulic setting cement Form: Cement	Generic Type: Mineral fiber, Form: Cement	Generic Type: Vermiculite expands, with binders Form: Water mix- air setting	Generic Type: Polyurethane 2 part mix Form: Foamed or sprayed	Generic Type: Ureaformaldehyde 2 part mix Form: Foamed in place
°R	°F	Density lbs/ft. ³ 12 to 13	Density lbs/ft. ³ 7 to 15	Density lbs/ft. ³ 22 to 30	Density lbs/ft. ³ 27 to 44	Density lbs/ft. ³ 18 to 19	Density lbs/ft. ³ 1.6 to 3.0	Density lbs/ft. ³ 0.6 to 1.0
260	– 200							
360	– 100							
460	0						0.22	0.25
560	100						0.26	0.29
660	200		0.48	0.93	0.73	0.98		
760	300		0.52	0.98	0.78	1.03		
860	400		0.57	1.03	0.84	1.08		
960	500		0.65	1.08	0.90	1.15		
1060	600	0.61	0.70	1.10	0.96	1.22		
1160	700	0.67	0.76	0.	1.02	1.29		
1260	800	0.73	0.83					
1360	900	0.80	0.91					
1460	1000	0.86						
1560	1100	0.93						
1660	1200	0.99						

Metric Units

w/mK

°K	°C	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17
173	– 100							
223	– 50							
273	0						0.032	0.035
323	50						0.038	0.042
373	100		0.071	0.134	0.103	0.140		
423	150		0.075	0.139	0.109	0.147		
473	200		0.082	0.144	0.115	0.154		
523	250		0.092	0.148	0.123	0.162		
573	300	0.086	0.099	0.153	0.129	0.170		
623	350	0.094	0.108					
673	400	0.101	0.115					
723	450	0.109	0.124					
773	500	0.118	0.134					
823	550	0.125						
873	600	0.136						
923	650	0.143						

Table 49 Thermal Conductivities of Insulations —

English Units

Btu. in./ft., hr., °F

		Identification No. 78	Identification No. 79	Identification No. 80	Identification No. 81	Identification No. 82	Identification No. 83	Identification No. 84
Mean Temp.		Generic Type: Poly-vinyl cork filled mastic Form: Sprayed or trowelled	Generic Type: Alumina-silica fibers Form: Bulk	Generic Type: Alumina-silica fiber Form: Chopped and milled	Generic Type: Alumina-silica fiber-long fiber Form: Bulk	Generic Type: Cork, vegetable granulated Form: Suitable for pouring	Generic Type: Cellulose fibers Form: Loose-Fill	Generic Type: Diatomaceous silica Form: Fine powder
°R	°F	Density lbs/ft. ³ 53	Density lbs/ft. ³ 6	Density lbs/ft. ³ 7.5	Density lbs/ft. ³ 6	Density lbs/ft. ³ 12 to 14	Density lbs/ft. ³ 10 to 15	Density lbs/ft. ³ 13 to 17
260	– 200							
360	– 100							
460	0	0.96				0.31	0.42	
560	100					0.34	0.46	
660	200							0.42
760	300							0.45
860	400							0.48
960	500				0.50			0.51
1060	600				0.61			0.55
1160	700		0.85	0.55	0.75			0.58
1260	800		0.97	0.65	0.90			0.62
1360	900		1.09	0.75	1.05			0.65
1460	1000		1.22	0.85	1.20			0.69
1560	1100		1.35	0.95	1.35			0.74
1660	1200		1.55	1.05	1.52			0.80

Metric Units

w/mK

°K	°C	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17
173	– 100							
223	– 50							
273	0					0.046		
323	50	0.138				0.047	0.059	
373	100							0.062
423	150							0.064
473	200							0.069
523	250				0.071			0.073
573	300				0.085			0.078
623	350		0.121	0.078	0.107			0.082
673	400		0.133	0.088	0.120			0.087
723	450		0.147	0.099	0.139			0.091
773	500		0.166	0.114	0.161			0.097
823	550		0.180	0.125	0.177			0.101
873	600		0.200	0.139	0.200			0.108
923	650		0.224	0.151	0.219			0.115

Table 49 Thermal Conductivities of Insulations —

English Units

Btu. in./ft., hr., °F

		Identification No. 85	Identification No. 86	Identification No. 87	Identification No. 88	Identification No. 89	Identification No. 90	Identification No. 91
Mean Temp.		Generic Type: Diatomaceous silica calcined Form: Powder	Generic Type: Diatomaceous silica Form: Course Powder	Generic Type: Gilsomite granules for packing around underground pipe Form:	Generic Type: Glass fibers, unbonded Form: Loose fibers	Generic Type: Glass fibers Form: Loose and Blowing Wool	Generic Type: Gypsum pellets Form: Bulk	Generic Type: Mineral fiber, with small amounts of oil Form: Loose
°R	°F	Density lbs/ft. ³ 15 to 17	Density lbs/ft. ³ 18 to 22	Density lbs/ft. ³ 10 to 16	Density lbs/ft. ³ 21 to 40	Density lbs/ft. ³ 14 (max.)	Density lbs/ft. ³ 15 (max.)	Density lbs/ft. ³ 24 (max.)
260	– 200							
360	– 100							
460	0				0.25			
560	100			0.75	0.26	0.35	0.45 to 0.95	0.30
660	200	0.92	0.63	0.85	0.31			0.35
760	300	0.97	0.68	1.00	0.36			0.44
860	400	1.03	0.77		0.45			0.54
960	500	1.08	0.84					0.65
1060	600	1.13	0.92					0.75
1160	700	1.18	0.99					0.86
1260	800	1.25	1.06					0.97
1360	900	1.31	1.14					
1460	1000	1.37	1.22					
1560	1100	1.43	1.32					
1660	1200	1.49	1.42					

Metric Units

w/mK

°K	°C	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17
173	– 100							
223	– 50							
273	0							
323	50			0.111	0.038	0.052	0.67 to 0.143	0.045
373	100	0.134	0.092	0.124	0.046			0.052
423	150	0.140	0.098	0.144	0.052			0.063
473	200	0.148	0.111		0.064			0.078
523	250	0.155	0.120					0.092
573	300	0.162	0.131					0.105
623	350	0.169	0.141					0.120
673	400	0.177	0.150					0.134
723	450	0.184	0.158					
773	500	0.192	0.168					
823	550	0.200	0.183					
873	600	0.207	0.193					
923	650	0.215	0.204					

Table 49 Thermal Conductivities of Insulations —

English Units

Btu. in./ft., hr., °F

		Identification No. 92	Identification No. 93	Identification No. 94	Identification No. 95	Identification No. 96	Identification No. 97	Identification No. 98
Mean Temp.		Generic Type: Mineral fiber, oil free Form: Loose	Generic Type: Mineral fiber, granulated Form: Loose	Generic Type: Perlite expanded Form: Loose powder	Generic Type: Quartz fiber Form: Loose	Generic Type: Silica fibers Form: Loose	Generic Type: Silica aerogel granules Form: Loose	Generic Type: Vermiculite flakes Form: Loose
°R	°F	Density lbs/ft. ³ 15 to 17	Density lbs/ft. ³ 18 to 22	Density lbs/ft. ³ 10 to 16	Density lbs/ft. ³ 21 to 40	Density lbs/ft. ³ 14 (max.)	Density lbs/ft. ³ 15 (max.)	Density lbs/ft. ³ 24 (max.)
260	– 200							
360	– 100							
460	0							
560	100		0.30	0.29			0.21	0.47
660	200	0.53	0.35	0.35	0.35		0.23	0.57
760	300	0.58	0.44		0.41		0.24	0.63
860	400	0.64	0.54		0.47			0.74
960	500	0.70	0.65		0.53			0.84
1060	600	0.76	0.75		0.59	0.45		0.94
1160	700	0.83	0.86		0.66	0.52		1.05
1260	800	0.91	0.97		0.73	0.60		1.15
1360	900				0.80	0.71		1.25
1460	1000				0.87	0.81		1.36
1560	1100				0.95	0.92		
1660	1200				1.04	1.02		

Metric Units

w/mK

°K	°C	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17	Density kgs/m ³ 15 to 17
173	– 100							
223	– 50							
273	0							
323	50		0.045	0.042			0.032	0.069
373	100	0.078	0.052	0.049	0.049		0.034	0.079
423	150	0.084	0.063		0.059		0.036	0.091
473	200	0.092	0.078		0.067			0.106
523	250	0.099	0.092		0.073			0.119
573	300	0.108	0.105		0.083	0.063		0.133
623	350	0.117	0.120		0.093	0.072		0.146
673	400	0.131	0.134		0.103	0.082		0.160
723	450				0.113	0.094		0.173
773	500				0.123	0.106		0.186
823	550				0.133	0.119		0.200
873	600				0.142	0.133		
923	650				0.150	0.148		

Table 50. Thermal Conductances of Reflective Insulation —

English Units

Material identification number	Generic type and class of description of insulating material	Form
99	Aluminium Sheet	Various Thickness
100	Aluminium Foil	Various Thickness
101	Aluminium foil, both sides, or membrane paper or other reinforcement	Laminate
102	Aluminium foil accordion formed roll insulation-Opened in place	Expandable roll for cavities

Position	Direction of Heat Flow	Conductance in BTU/ft ² hr °F 75° Mean Temperature Air spaces ¾" ε = 0.05 (Aluminium) Air spaces enclosed* and separated by reflective shield									
		Number of spaces									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vertical	Across	0.35	0.18	0.12	0.09	0.07	0.06	0.05	0.045	0.04	0.035
Horizontal	Upward	0.48	0.25	0.17	0.12	0.10	0.08	0.07	0.06	0.055	0.05
Horizontal	Downward	0.35	0.18	0.12	0.09	0.08	0.07	0.055	0.055	0.04	0.035

Metric Units

Position	Direction of Heat Flow	Conductance in BTU/ft ² hr °F 75° Mean Temperature Air spaces ¾" ε = 0.05 (Aluminium) Air spaces enclosed* and separated by reflective shield									
		Number of spaces									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vertical	Across	1.987	1.022	0.681	0.511	0.397	0.341	0.284	0.256	0.227	0.159
Horizontal	Upward	2.725	1.419	0.965	0.681	0.568	0.454	0.397	0.341	0.312	0.284
Horizontal	Downward	1.997	1.022	0.681	0.511	0.454	0.397	0.312	0.256	0.277	0.189

*All spaces constructed to prevent air movement from space to another.

Note: Heat transfer is given in conductance not conductivity.