



3-1- انتقال حرارت Heat Transfer

گرما همیشه از محیط گرم به محیط سرد جریان پیدا می کند که این انتقال حرارتی بصورت هدایت (conduction) یا جابجائی (convection) و یا تابشی (Radiation) و یا ترکیبی از آنها انجام می گیرد.

Conduction انتقال حرارت بصورت هدایت

این عمل از طریق انتقال انرژی بصورت انرژی جنبشی (kinetic) از ملکول به ملکول و اتم به اتم در دو جسم که با هم تماس دارند صورت می گیرد.

Convection انتقال حرارت بصورت جابجائی

این عمل در هوا (یا گاز) بصورت جابجا شدن هوا بطور طبیعی یا تحت وزش (توسط fan) انجام می گیرد جابجائی طبیعی هوا بصورت سیرکولاسیون انجام می شود یعنی هوای گرم می خواهد به بالا برود و هوای سرد به پائین و در نتیجه یک گردش چرخشی دارد.

Radiation انتقال حرارت بصورت تابشی

در این حالت انتقال انرژی بصورت موج (امواج مغناطیسی با طول موج بسیار بلند) از یک جسم گرم به جسم سرد بدون آن که تماس مستقیم داشته باشند منتقل می شود. برخورد این امواج بلند با هر جسم سبب می شود که انرژی تابشی به حرارت تبدیل گردد (مثل زمین و خورشید).

انتقال حرارت از طریق هدایت (conduction) بصورت یک جریان گرمائی است که از واحد سطح (یک فوت مربع یا...) یک جسم به واحد سطح جسم دیگر وارد می شود بطوریکه اختلاف درجه حرارت دو جسم را یک درجه افزایش دهد. مقدار جریان گرمائی که از واحد سطح یک صفحه به ضخامت واحد (1") عبور می کند (از یک طرف صفحه به طرف دیگر صفحه) لذا ارتباطی به هوا ندارد از رابطه زیر بدست می آید:

$$Q = KA(t_2 - t_1)$$



مجاور سطح (سقف و دیوار) از طریق همین فیلم هوا صورت می گیرد. این فیلم هوا خود دارای ضریب انتقال حرارت است که در محاسبات تهویه مورد استفاده قرار می گیرد. f_i برای فیلم هوا در سمت داخل و f_o برای فیلم هوا در سمت خارج است که در اینجا نیز:

$$R_i = \frac{1}{f_i}$$

$$R_o = \frac{1}{f_o}$$

انتقال حرارت از هوا به هوا Air to air Heat Transfer

انتقال حرارت از فیلم هوا در مجاور هر سطح به هوای مجاور فیلم هوا از رابطه زیر حساب می شود.

$$Q = UA (t_2 - t_1)$$

که در اینجا با ضریب انتقال حرارت است که جریان گرما را از هوا در یک طرف مصالح به هوا در طرف دیگر مصالح انتقال می دهد (در اختلاف درجه حرارت ثابت بین دو طرف مصالح)

f_i در هوای ساکن	Btu/hr.ft. ² .°F
f_i جریان گرما به بالا	1.5
f_i جریان گرما به پایین	1.6
f_o برای زمستان (سرعت باد 15mil/h)	1.1
f_o برای تابستان (سرعت باد 7mil/h)	6
C فاصله هوایی $\frac{3}{4}$ (بیشتر (بین دو لایه مصالح)	4
C فاصله هوایی $\frac{3}{4}$ (بیشتر (جریان رو به بالا)	1.1
C فاصله هوایی $\frac{3}{4}$ (بیشتر (جریان رو به پایین)	1.2
	1

جدول (3)

نکته مهم:

در مباحث مربوط به ضرایب هدایت حرارت باید توجه کرد که K ضریب انتقال حرارت بین یک طرف مصالح با طرف دیگر آن است (تعریف C مثل K است ولی K برای ضخامت واحد (1") و C برای مجموع ضخامت های چند مصالح مجاور هم می باشد) ولی U ضریب انتقال حرارت بین فیلم هوای مجاور یک طرف سطح به

جریان گرما Q = Btu/h

ضریب هدایت حرارت K =

سطح عبور گرما A = ft²

درجه حرارت سمت گرم صفحه $t_2 = ^\circ\text{F}$

درجه حرارت سمت سرد صفحه $t_1 = ^\circ\text{F}$

ضریب K بستگی به جنس مصالح جدا دارد. جداولی برای تعیین ضریب K برای هر نوع مصالح با ضخامت واحد تهیه شده است.

ضریب هدایت حرارت C Thermal conductance

ضریب K برای مصالح با ضخامت واحد است برای مصالح با ضخامت های گوناگون در جداول ضریب انتقال حرارت (هدایت) C داده شده است. باید توجه کرد که K هرگز از تقسیم C به ضخامت مصالح بدست نمی آید چون انتقال حرارت از لایه های داخلی مصالح در مجموع C را بدست می دهد که تناسبی با K که از واحد ضخامت عبور می کند بصورت کامل ندارد.

$$Q = CA (t_2 - t_1)$$

که C در اینجا ضریب هدایت حرارت مصالح با ضخامت معین می باشد (نه یک اینچ ضخامت) واحد آن Btu/h.ft².°F است.

ضریب مقاومت حرارتی R Thermal Resistance

مصالح در مقابل عبور جریان گرما مقاومت می کند که عدد آن عکس عدد C می باشد.

$$R = \frac{1}{C}$$

ضریب R در تهویه برای محاسبه افت حرارت از طریق چندین لایه مصالح مختلف که در کنار هم قرار دارند، بکار می رود.

Air film

فیلم هوا

همیشه یک لایه بسیار نازک در مجاور دو طرف هر سطح که حرارت از آن عبور می کند وجود دارد که تبادل حرارت به هوای



$$0.17 + 0.2 + 1.11 + 0.91 + 0.13 + 0.67$$

$$R_1 = 3.19$$

$$U = \frac{1}{3.19} = 0.313$$

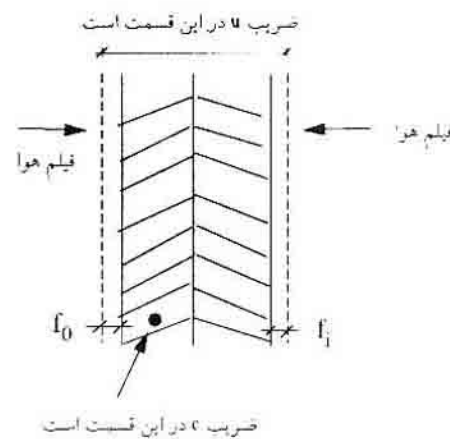
$$Q = UA(t_i - t_o) = 0.313 \times (8.5 \times 12) (68-10)$$

$$= 1854.5 \text{ Btu/hr}$$

شکل (1) نمونه‌هایی را در تعیین مقاومت حرارت (R) نشان می‌دهد.

شکل (2) انتقال حرارت را در حالت‌های گوناگون نشان می‌دهد، همچنین جدول (5) واحدهای حرارتی را در دو سیستم BS و متریک (Si) توضیح می‌دهد. جداول (6) و (7) مقاومت حرارتی هوا را نشان می‌دهد.

مصالص و از طرف دیگر مصالص به فیلم هوای مجاور می‌باشد.



ضرب انتقال حرارت U

Coefficient of Thermal Transmittance U

ضرب انتقال حرارت از هوا در یک سمت مصالص به هوا در سمت دیگر مصالص است یعنی از فیلم هوا به مصالص در یک سمت و از مصالص به فیلم هوا در سمت دیگر. U برای چندین مصالص در مجاور هم (دیوار یا آجر و گچ‌کاری و غایق و...) برابر است با

$$U = \frac{1}{R_t}$$

$$R_t = \frac{1}{f_i} + R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n + \frac{1}{f_o}$$

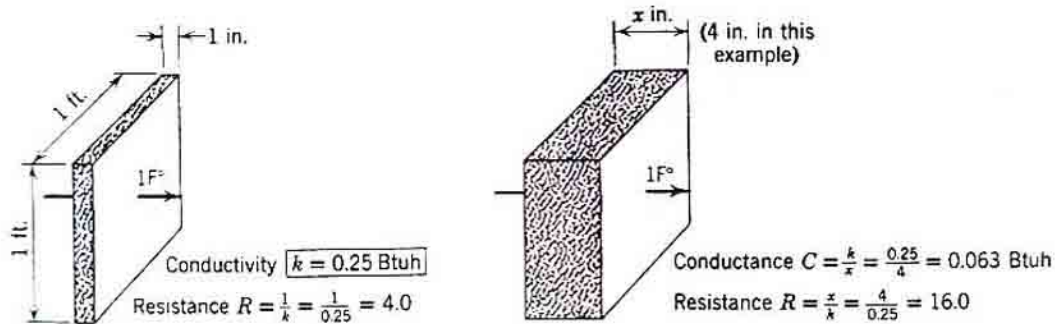
(f_i برای فیلم داخل هوا و f_o برای فیلم خارجی هوا)

مثال:

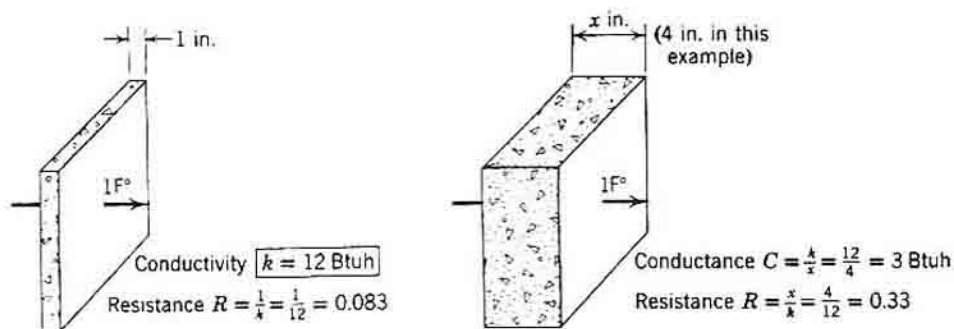
یک دیوار خارجی از یک لایه آجر به ضخامت 4" و یک لایه بلوک به ضخامت 4" و $\frac{3}{4}$ " فاصله هوایی و $\frac{3}{4}$ " پلاستر سبک تشکیل شده، ارتفاع دیوار 8 فوت و 16 اینچ و طول دیوار 12 فوت می‌باشد. درجه حرارت هوای داخل 68°F و درجه حرارت هوای خارج 10°F و سرعت باد 15 مایل در ساعت می‌باشد افت حرارتی دیوار چقدر می‌باشد.

از جدول (3) برای فیلم هوا در داخل داریم $f_i = 1.5$ و برای فیلم هوا در خارج دیوار با سرعت باد 15 mil/h داریم $f_o = 6$ ضریب هدایت حرارت آجر به ضریب 4" از جداول مربوطه 5 و برای بلوک 0.9 و برای فاصله هوایی $\frac{3}{4}$ " از جدول 1.1 (3) و پلاستر $\frac{3}{4}$ " برابر 7.7 پس:

$$R_1 = \frac{1}{6} + \frac{1}{0.9} + \frac{1}{1.1} + \frac{1}{7.7} + \frac{1}{1.5} =$$

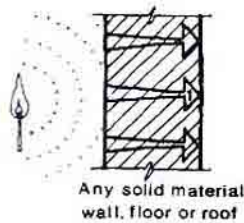


Glass Fiber Insulation Board

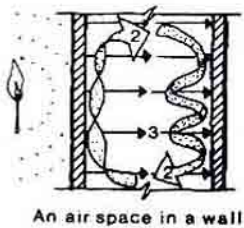


Sand and Gravel Concrete

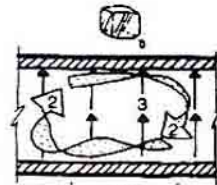
Fig 1 Sample conductivities (k) for 1-in. thickness, conductances (C) for any thickness (4 in. in this example), and resistance (R) for two materials. Glass fiber is a material of low conductivity; concrete is a material of high conductivity. Note: Standard unit of area is 1 square foot; standard unit temperature differential is 1 degree Fahrenheit (shown as $1F^\circ$).



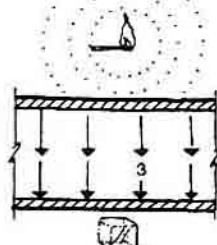
A single solid material illustrates the transfer of heat from the warmer to the cooler particles by conduction (1).



As air is warmed by the warmer side of the air space it rises. As it falls along the cooler side it transfers heat to this surface (2). Radiant energy (3) is transferred from the warmer to the cooler surface. The rate depends upon the relative temperature of the surfaces and upon their emissive and absorptive qualities. Direction is always from the warmer to the cooler surface.

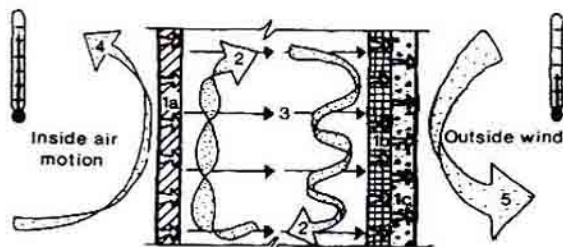


The convective action (2) in the air space of a roof is similar to that in a wall although the height through which the air rises and falls is usually less. The radiant transfer is up in this case because its direction is always to the cooler surface.



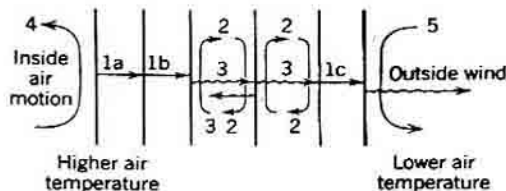
An air space in a roof or floor

When the higher temperature is at the top of a horizontal air space the warm air is trapped at the top and, being less dense than the cooler air at the bottom, will not flow down to transfer its heat to the cooler surface. This results in little flow by convection. The radiant transfer in this case is down because that is the direction from the warmer surface to the cooler.



A composite assembly of building materials in place at the site

This example of a wall in place illustrates the several methods by which heat is lost through a composite assembly of materials. Conduction at varying rates in different materials is accounted for in 1a, 1b, 1c. Convection currents (2) and radiation (3) carry the heat across the air space.



Heat is conducted from the room air by warm air currents that strike the inside wall. Heat is conducted away from the exterior surface of the wall by the action of the wind.

Fig 2 Nature of heat flow through materials, air spaces, and assembled structures. Thermal action is identified by the following numbers: 1, conduction; 2, convection; 3, radiation; 4, inside surface conductance; and 5, outside surface conductance.



Table 4 Typical Thermal Properties of Common Building and Insulating Materials—Design Values^a

Description	Density, lb/ft ³	Conduc- tivity ^b (k), Btu·in. h·ft ² ·°F	Conduc- tance (C), Btu h·ft ² ·°F	Resistance ^c (R)		Specific Heat, Btu lb·°F
				Per inch thickness (1/k), °F·ft ² ·h Btu·in.	For thick- ness listed (1/C), °F·ft ² ·h Btu	
BUILDING BOARD						
Asbestos-cement board	120	4.0	—	0.25	—	0.24
Asbestos-cement board 0.125 in.	120	—	33.00	—	0.03	—
Asbestos-cement board 0.25 in.	120	—	16.50	—	0.06	—
Gypsum or plaster board 0.375 in.	50	—	3.10	—	0.32	0.26
Gypsum or plaster board 0.5 in.	50	—	2.22	—	0.45	—
Gypsum or plaster board 0.625 in.	50	—	1.78	—	0.56	—
Plywood (Douglas Fir) ^d 3/4 in.	34	0.80	—	1.25	—	0.29
Plywood (Douglas Fir) 0.25 in.	34	—	3.20	—	0.31	—
Plywood (Douglas Fir) 0.375 in.	34	—	2.13	—	0.47	—
Plywood (Douglas Fir) 0.5 in.	34	—	1.60	—	0.62	—
Plywood (Douglas Fir) 0.625 in.	34	—	1.29	—	0.77	—
Plywood or wood panels 0.75 in.	34	—	1.07	—	0.93	0.29
Vegetable Fiber Board						
Sheathing, regular density ^e 0.5 in.	18	—	0.76	—	1.32	0.31
Sheathing, regular density ^e 0.78125 in.	18	—	0.49	—	2.06	—
Sheathing intermediate density ^e 0.5 in.	22	—	0.92	—	1.09	0.31
Nail-base sheathing ^e 0.5 in.	25	—	0.94	—	1.06	0.31
Shingle backer 0.375 in.	18	—	1.06	—	0.94	0.31
Shingle backer 0.3125 in.	18	—	1.28	—	0.78	—
Sound deadening board 0.5 in.	15	—	0.74	—	1.35	0.30
Tile and lay-in panels, plain or acoustic 0.5 in.	18	0.40	—	2.50	—	0.14
Tile and lay-in panels, plain or acoustic 0.75 in.	18	—	0.80	—	1.25	—
Laminated paperboard 3/8 in.	30	0.50	—	2.00	1.89	—
Homogeneous board from recycled paper 3/8 in.	30	0.50	—	2.00	—	0.33
Hardboard ^f						
Medium density 5/8 in.	50	0.73	—	1.37	—	0.28
High density, service temp. service underlay 5/8 in.	55	0.82	—	1.22	—	0.32
High density, std. tempered 5/8 in.	63	1.00	—	1.00	—	0.32
Particleboard ^g						
Low density 3/4 in.	37	0.71	—	1.41	—	0.32
Medium density 3/4 in.	50	0.94	—	1.06	—	0.32
High density 3/4 in.	62.5	1.18	—	0.85	—	0.32
Underlayment 0.625 in.	40	—	1.22	—	0.82	0.29
Waferboard 3/4 in.	37	0.63	—	1.59	—	—
Wood subfloor 0.75 in.	—	—	1.06	—	0.94	0.33
BUILDING MEMBRANE						
Vapor—permeable felt	—	—	16.70	—	0.06	—
Vapor—seal, 2 layers of mopped 15-lb felt	—	—	8.35	—	0.12	—
Vapor—seal, plastic film	—	—	—	—	Negl.	—
FINISH FLOORING MATERIALS						
Carpet and fibrous pad	—	—	0.48	—	2.08	0.34
Carpet and rubber pad	—	—	0.81	—	1.23	0.33
Cork tile 0.125 in.	—	—	3.60	—	0.28	0.48
Terrazzo 1 in.	—	—	12.50	—	0.08	0.19
Tile—asphalt, linoleum, vinyl, rubber vinyl asbestos	—	—	20.00	—	0.05	0.30
ceramic	—	—	—	—	—	0.24
Wood, hardwood finish 0.75 in.	—	—	1.47	—	0.68	0.14
INSULATING MATERIALS						
<i>Blanket and Batt^h</i>						
Mineral Fiber, fibrous form processed from rock, slag, or glass						
approx. 3–4 in.	0.3–2.0	—	0.091	—	11	—
approx. 3.5 in.	0.3–2.0	—	0.077	—	13	—
approx. 5.5–6.5 in.	0.3–2.0	—	0.053	—	19	—
approx. 6–7.5 in.	0.3–2.0	—	0.045	—	22	—
approx. 9–10 in.	0.3–2.0	—	0.033	—	30	—
approx. 12–13 in.	0.3–2.0	—	0.026	—	38	—
<i>Board and Slabs</i>						
Cellular glass	8.5	0.35	—	2.86	—	0.18
Glass fiber, organic bonded	4.0–9.0	0.25	—	4.00	—	0.23
Expanded perlite, organic bonded	1.0	0.36	—	2.78	—	0.30
Expanded rubber (rigid)	4.5	0.22	—	4.55	—	0.40



Table 4 Typical Thermal Properties of Common Building and Insulating Materials—Design Values* (Continued)

Description	Density, lb/ft ³	Conduc- tivity ^b (k), Btu·in. h·ft ² ·°F	Conduc- tance (C), Btu h·ft ² ·°F	Resistance ^c (R)		Specific Heat, Btu lb·°F
				Per inch thickness (1/k), °F·ft ² ·h Btu·in.	For thick- ness listed (1/C), °F·ft ² ·h Btu	
Expanded polystyrene, extruded (smooth skin surface) (CFC-12 exp.)	1.8-3.5	0.20	—	5.00	—	0.29
Expanded polystyrene, molded beads	1.0	0.26	—	3.85	—	—
	1.25	0.25	—	4.00	—	—
	1.5	0.24	—	4.17	—	—
	1.75	0.24	—	4.17	—	—
	2.0	0.23	—	4.35	—	—
Cellular polyurethane/polyisocyanurate ^h (CFC-11 exp.) (unfaced)	1.5	0.16-0.18	—	6.25-5.56	—	0.38
Cellular polyisocyanurate ^h (CFC-11 exp.) (gas-permeable facers)	1.5-2.5	0.16-0.18	—	6.25-5.56	—	0.22
Cellular polyisocyanurate ⁱ (CFC-11 exp.) (gas-impermeable facers)	2.0	0.14	—	7.20	—	0.22
Cellular phenolic (closed cell) (CFC-11, CFC-113 exp.)	3.0	0.12	—	8.20	—	—
Cellular phenolic (open cell)	1.8-2.2	0.23	—	4.40	—	—
Mineral fiber with resin binder	15.0	0.29	—	3.45	—	0.17
Mineral fiberboard, wet felted						
Core or roof insulation	16-17	0.34	—	2.94	—	—
Acoustical tile	18.0	0.35	—	2.86	—	0.19
Acoustical tile	21.0	0.37	—	2.70	—	—
Mineral fiberboard, wet molded						
Acoustical tile ^j	23.0	0.42	—	2.38	—	0.14
Wood or cane fiberboard						
Acoustical tile ^j 0.5 in.	—	—	0.80	—	1.25	0.31
Acoustical tile ^j 0.75 in.	—	—	0.53	—	1.89	—
Interior finish (plank, tile)	15.0	0.35	—	2.86	—	0.32
Cement fiber slabs (shredded wood with Portland cement binder)	25-27.0	0.50-0.53	—	2.0-1.89	—	—
Cement fiber slabs (shredded wood with magnesia oxysulfide binder)	22.0	0.57	—	1.75	—	0.31
Loose Fill						
Cellulosic insulation (milled paper or wood pulp)	2.3-3.2	0.27-0.32	—	3.70-3.13	—	0.33
Perlite, expanded	2.0-4.1	0.27-0.31	—	3.7-3.3	—	0.26
	4.1-7.4	0.31-0.36	—	3.3-2.8	—	—
	7.4-11.0	0.36-0.42	—	2.8-2.4	—	—
Mineral fiber (rock, slag, or glass) ^g						
approx. 3.75-5 in.	0.6-2.0	—	—	—	11.0	0.17
approx. 6.5-8.75 in.	0.6-2.0	—	—	—	19.0	—
approx. 7.5-10 in.	0.6-2.0	—	—	—	22.0	—
approx. 10.25-13.75 in.	0.6-2.0	—	—	—	30.0	—
Mineral fiber (rock, slag, or glass) ^g						
approx. 3.5 in. (closed sidewall application)	2.0-3.5	—	—	—	12.0-14.0	—
Vermiculite, exfoliated	7.0-8.2	0.47	—	2.13	—	0.32
	4.0-6.0	0.44	—	2.27	—	—
Masonry Units						
Brick, common	80	2.2-3.2	—	0.45-0.31	—	—
	90	2.7-3.7	—	0.37-0.27	—	—
	100	3.3-4.3	—	0.30-0.23	—	—
	110	3.5-5.5	—	0.29-0.18	—	—
	120	4.4-6.4	—	0.23-0.16	—	0.19
	130	5.4-9.0	—	0.19-0.11	—	—
Clay tile, hollow						
1 cell deep 3 in.	—	—	1.25	—	0.80	0.21
1 cell deep 4 in.	—	—	0.90	—	1.11	—
2 cells deep 6 in.	—	—	0.66	—	1.52	—
2 cells deep 8 in.	—	—	0.54	—	1.85	—
2 cells deep 10 in.	—	—	0.45	—	2.22	—
3 cells deep 12 in.	—	—	0.40	—	2.50	—
Concrete blocks^k						
Limestone aggregate						
8 in., 36 lb, 138 lb/ft ³ concrete, 2 cores	—	—	—	—	—	—
Same with perlite filled cores	—	—	0.48	—	2.1	—
12 in., 55 lb, 138 lb/ft ³ concrete, 2 cores	—	—	—	—	—	—
Same with perlite filled cores	—	—	0.27	—	3.7	—



Table 5 Heat Symbols, Terms, and Definitions^a

Conventional Units			SI (Système International) Units		
Symbol	Term	Definition or Usage; Conversions	Symbol	Term	Definition or Usage; Conversions
Part A. Energy					
Btu	British thermal unit	The amount of heat required to raise 1 pound of water by 1F°. (It roughly corresponds to the energy released in burning an ordinary wooden match.) 1 Btu = 1.055 kilojoules	J	joule	Newton-meter or a force of one newton (1 N) acting through a distance of one meter. In terms of heat, a joule is 1/4.184 of the amount of heat required to raise a gram of water by 1C°. 1000 joules; 1 kJ = 0.9478 Btu
			kJ	kilojoule	
Part B. Power					
Btu/h	British thermal units per hour	Commonly used to express the total heat loss or gain of a building, and to express the size of heating or cooling equipment. 1 Btu/h = 0.2929 W	W	watt	The power required to produce energy at the rate of one joule per second. Commonly used to specify size for light bulbs, furnaces, air conditioners, and other heat producers. 1 W = 3.412 Btu/h
hp	horsepower	1 hp = 746 W			
Part C. Rate of Heat Flow					
Btu/h ft ² F		1 Btu/h ft ² F × 5.67 = 1 W/m ² K 1 W/m ² K × 0.176 = 1 Btu/h ft ² F These are the units of conductance and of overall heat transmission for the following terms: C (conductance). The rate of heat flow through a homogeneous material (or combination of materials) of a stated thickness. a (air space conductance). The rate of heat flow through an air space bounded by two surfaces. h (film or surface conductance coefficient). The rate of heat flow from a surface due to air (or other fluid) motion against the surface. (Identical to <i>f</i> , the film conductance.) U (overall coefficient of heat transmission). The overall rate of heat flow through any combination of materials, air layers, and air spaces. It is equal to the reciprocal of the sum of all resistances <i>R</i> (see below) that are involved in this combination. This is the term used directly in building envelope heat loss or gain calculations.			W/m ² K (or W/m ² °C)
Btu-in./h-ft ² -F	<i>k</i>	(conductivity). The rate of heat flow through a homogeneous material, per unit of thickness.			W/m K (or W/m °C)



Table 5 Heat Symbols, Terms, and Definitions^a (Continued)

<i>Conventional Units</i>	<i>Definitions or Usage; Conversions</i>		<i>SI Units</i>
<i>Part C. Rate of Heat Flow (Continued)</i>			
h ft ² F/Btu	<i>R</i>	(resistance). A measure of resistance to the passage of heat; the reciprocal of conductance.	m ² K/W
	<i>ε</i>	(emittance). The ratio of the radiant flux from a given surface to that of a blackbody (a "perfect" emitter) at the same temperature.	
	<i>E</i>	(effective emittance). The combined effect of the emittance of parallel surfaces bounding an air space.	

^aA more complete listing of conventional-SI conversion units is found in Appendix I.



Table 6 Thermal Resistances of Plane^a Air Spaces

SECTION A

All resistance values expressed in $\text{ft}^2 \cdot \text{F} \cdot \text{h} / \text{Btu}$

Values apply only to air spaces of uniform thickness bounded by plane, smooth, parallel surfaces with no leakage of air to or from the space. These conditions are not normally present in standard building construction. When accurate values are required, use overall U -factors determined for your particular construction through calibrated hot box (ASTM C976) or guarded hot box (ASTM C-236) testing. Thermal resistance values for multiple air spaces must be based on careful estimates of mean temperature differences for each air space.

Position of Air Space	Direction of Heat Flow	Air Space		0.5-in. Air Space ^d					0.75-in. Air Space ^d				
		Mean Temp. ^b (F)	Temp Diff. ^b (deg F)	Value of $E^{b,c}$					Value of $E^{b,c}$				
				0.03	0.05	0.2	0.5	0.82	0.03	0.05	0.2	0.5	0.82
Horiz.	Up 	90	10	2.13	2.03	1.51	0.99	0.73	2.34	2.22	1.61	1.04	0.75
		50	30	1.62	1.57	1.29	0.96	0.75	1.71	1.66	1.35	0.99	0.77
		50	10	2.13	2.05	1.60	1.11	0.84	2.30	2.21	1.70	1.16	0.87
		0	20	1.73	1.70	1.45	1.12	0.91	1.83	1.79	1.52	1.16	0.93
		0	10	2.10	2.04	1.70	1.27	1.00	2.23	2.16	1.78	1.31	1.02
		-50	20	1.69	1.66	1.49	1.23	1.04	1.77	1.74	1.55	1.27	1.07
45° Slope	Up 	-50	10	2.04	2.00	1.75	1.40	1.16	2.16	2.11	1.84	1.46	1.20
		90	10	2.44	2.31	1.65	1.06	0.76	2.96	2.78	1.88	1.15	0.81
		50	30	2.06	1.98	1.56	1.10	0.83	1.99	1.92	1.52	1.08	0.82
		50	10	2.55	2.44	1.83	1.22	0.90	2.90	2.75	2.00	1.29	0.94
		0	20	2.20	2.14	1.76	1.30	1.02	2.13	2.07	1.72	1.28	1.00
		0	10	2.63	2.54	2.03	1.44	1.10	2.72	2.62	2.08	1.47	1.12
Vertical	Horiz. 	-50	20	2.08	2.04	1.78	1.42	1.17	2.05	2.01	1.76	1.41	1.16
		-50	10	2.62	2.56	2.17	1.66	1.33	2.53	2.47	2.10	1.62	1.30
		90	10	2.47	2.34	1.67	1.06	0.77	3.50	3.24	2.08	1.22	0.84
		50	30	2.57	2.46	1.84	1.23	0.90	2.91	2.77	2.01	1.30	0.94
		50	10	2.66	2.54	1.88	1.24	0.91	3.70	3.46	2.35	1.43	1.01
		0	20	2.82	2.72	2.14	1.50	1.13	3.14	3.02	2.32	1.58	1.18
45° Slope	Down 	0	10	2.93	2.82	2.20	1.53	1.15	3.77	3.59	2.64	1.73	1.26
		-50	20	2.90	2.82	2.35	1.76	1.39	2.90	2.83	2.36	1.77	1.39
		-50	10	3.20	3.10	2.54	1.87	1.46	3.72	3.60	2.87	2.04	1.56
		90	10	2.48	2.34	1.67	1.06	0.77	3.53	3.27	2.10	1.22	0.84
		50	30	2.64	2.52	1.87	1.24	0.91	3.43	3.23	2.24	1.39	0.99
		50	10	2.67	2.55	1.89	1.25	0.92	3.81	3.57	2.40	1.45	1.02
Horiz.	Down 	0	20	2.91	2.80	2.19	1.52	1.15	3.75	3.57	2.63	1.72	1.26
		0	10	2.94	2.83	2.21	1.53	1.15	4.12	3.91	2.81	1.80	1.30
		-50	20	3.16	3.07	2.52	1.86	1.45	3.78	3.65	2.90	2.05	1.57
		-50	10	3.26	3.16	2.58	1.89	1.47	4.35	4.18	3.22	2.21	1.66
		90	10	2.48	2.34	1.67	1.06	0.77	3.55	3.29	2.10	1.22	0.85
		50	30	2.66	2.54	1.88	1.24	0.91	3.77	3.52	2.38	1.44	1.02
Horiz.	Up 	50	10	2.67	2.55	1.89	1.25	0.92	3.84	3.59	2.41	1.45	1.02
		0	20	2.94	2.83	2.20	1.53	1.15	4.18	3.96	2.83	1.81	1.30
		0	10	2.96	2.85	2.22	1.53	1.16	4.25	4.02	2.87	1.82	1.31
		-50	20	3.25	3.15	2.58	1.89	1.47	4.60	4.41	3.36	2.28	1.69
		-50	10	3.28	3.18	2.60	1.90	1.47	4.71	4.51	3.42	2.30	1.71
		90	10	2.55	2.41	1.71	1.08	0.77	2.84	2.66	1.83	1.13	0.80
45° Slope	Up 	50	30	1.87	1.81	1.45	1.04	0.80	2.09	2.01	1.58	1.10	0.84
		50	10	2.50	2.40	1.81	1.21	0.89	2.80	2.66	1.95	1.28	0.93
		0	20	2.01	1.95	1.63	1.23	0.97	2.25	2.18	1.79	1.32	1.03
		0	10	2.43	2.35	1.90	1.38	1.06	2.71	2.62	2.07	1.47	1.12
		-50	20	1.94	1.91	1.68	1.36	1.13	2.19	2.14	1.86	1.47	1.20
		-50	10	2.37	2.31	1.99	1.55	1.26	2.65	2.58	2.18	1.67	1.33
Vertical	Horiz. 	90	10	2.92	2.73	1.86	1.14	0.80	3.18	2.96	1.97	1.18	0.82
		50	30	2.14	2.06	1.61	1.12	0.84	2.26	2.17	1.67	1.15	0.86
		50	10	2.88	2.74	1.99	1.29	0.94	3.12	2.95	2.10	1.34	0.96
		0	20	2.30	2.23	1.82	1.34	1.04	2.42	2.35	1.90	1.38	1.06
		0	10	2.79	2.69	2.12	1.49	1.13	2.98	2.87	2.23	1.54	1.16
		-50	20	2.22	2.17	1.88	1.49	1.21	2.34	2.29	1.97	1.54	1.25
45° Slope	Down 	-50	10	2.71	2.64	2.23	1.69	1.35	2.87	2.79	2.33	1.75	1.39
		90	10	3.99	3.66	2.25	1.27	0.87	3.69	3.40	2.15	1.24	0.85
		50	30	2.58	2.46	1.84	1.23	0.90	2.67	2.55	1.89	1.25	0.91
		50	10	3.79	3.55	2.39	1.45	1.02	3.63	3.40	2.32	1.42	1.01
		0	20	2.76	2.66	2.10	1.48	1.12	2.88	2.78	2.17	1.51	1.14
		0	10	3.51	3.35	2.51	1.67	1.23	3.49	3.33	2.50	1.67	1.23
Horiz.	Down 	-50	20	2.64	2.58	2.18	1.66	1.33	2.82	2.75	2.30	1.73	1.37
		-50	10	3.31	3.21	2.62	1.91	1.48	3.40	3.30	2.67	1.94	1.50
		90	10	5.07	4.55	2.56	1.36	0.91	4.81	4.33	2.49	1.34	0.90
		50	30	3.58	3.36	2.31	1.42	1.00	3.51	3.30	2.28	1.40	1.00
		50	10	5.10	4.66	2.85	1.60	1.09	4.74	4.36	2.73	1.57	1.08
		0	20	3.85	3.66	2.68	1.74	1.27	3.81	3.63	2.66	1.74	1.27
45° Slope	Up 	0	10	4.92	4.62	3.16	1.94	1.37	4.59	4.32	3.02	1.88	1.34
		-50	20	3.62	3.50	2.80	2.01	1.54	3.77	3.64	2.90	2.05	1.57
		-50	10	4.67	4.47	3.40	2.29	1.70	4.50	4.32	3.31	2.25	1.68
		90	10	6.09	5.35	2.79	1.43	0.94	10.07	8.19	3.41	1.57	1.00
		50	30	6.27	5.63	3.18	1.70	1.14	9.60	8.17	3.86	1.88	1.22
		50	10	6.61	5.90	3.27	1.73	1.15	11.15	9.27	4.09	1.93	1.24
Horiz.	Down 	0	20	7.03	6.43	3.91	2.19	1.49	10.90	9.52	4.87	2.47	1.62
		0	10	7.31	6.66	4.00	2.22	1.51	11.97	10.32	5.08	2.52	1.64
		-50	20	7.73	7.20	4.77	2.85	1.64	12.49	10.49	5.41	2.85	1.88
		-50	10	8.09	7.52	4.91	2.89	2.01	12.98	11.56	6.36	3.34	2.22



Table 6 Thermal Resistance of Plane^a Air Spaces (Continued)

Section B. Reflectivity and Emittance Values of Various Surfaces and Effective Emittances of Airspaces^f

Surface	Average Emittance ϵ	Effective Emittance E of Airspace	
		One Surface Emittance ϵ ; the Other 0.90	Both Surfaces Emittances ϵ
Aluminum foil, bright	0.05	0.05	0.03
Aluminum foil, with condensate just visible (>0.7 gr/ft ²)	0.30 ^g	0.29	—
Aluminum foil, with condensate clearly visible (>2.9 gr/ft ²)	0.70 ^g	0.65	—
Aluminum sheet	0.12	0.12	0.06
Aluminum coated paper, polished	0.20	0.20	0.11
Steel, galvanized, bright	0.25	0.24	0.15
Aluminum paint	0.50	0.47	0.35
Building materials: wood, paper, masonry, nonmetallic paints	0.90	0.82	0.82
Regular glass	0.84	0.77	0.72

Source: Copyright © by the American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, Ga. Reprinted by permission from 1989 *Handbook of Fundamentals*.

^a Thermal resistance values were determined from the relation $R = 1/C$, where $C = h_c + Eh_r$, h_c is the conduction-convection coefficient, Eh_r is the radiation coefficient $\approx 0.00686E [(t_m + 460)/100]^3$, and t_m is the mean temperature of the airspace. Values for h_c were determined from research data (National Bureau of Standards), such as those presented in 1954 in Housing Research Paper 32 (HRP No. 32) by the Housing and Home Finance Agency (Government Printing Office, Washington, D.C.). For interpolation from Table 4.4 to airspace thicknesses less than 0.5 in. (as in insulating window glass), assume that

$$h_c = 0.159(1 + 0.0016t_m)/l$$

where l is the thickness in inches, and h_c is assumed to represent heat transfer by conduction alone through air.

^b Interpolation is permissible for other values of mean temperature, temperature differences, and effective emittance E . Interpolation and moderate extrapolation for airspaces greater than 3.5 in. are also permissible.

^c Effective emittance of the space E is given by $1/E = 1/e_1 + 1/e_2 - 1$, where e_1 and e_2 are the emittances of the surfaces of the airspace.

^d Credit for an airspace resistance value cannot be taken more than once and only for the boundary conditions established.

^e Resistances of horizontal spaces with heat flow downward are substantially independent of temperature difference.

These values apply in the 4- to 40- μ m range of the electromagnetic spectrum.

^f From M. R. Bassett, and H. A. Trethowen, 1984, "Effect of Condensation on Emittance of Reflective Insulation," *Journal of Thermal Insulation*, Vol. 8, October, p. 127.



Table 7 Surface Conductances, h (Btu/h-ft²-F), and Resistances, R , for Air^a

Position of Surface	Direction of Heat Flow	Surface Emittance					
		Non-reflective		Reflective			
		$\epsilon = 0.90$		$\epsilon = 0.20$		$\epsilon = 0.05$	
		h_i	R	h_i	R	h_i	R
Still air							
Horizontal.....	Upward	1.63	0.61	0.91	1.10	0.76	1.32
Sloping (45°)	Upward	1.60	0.62	0.88	1.14	0.73	1.37
Vertical.....	Horizontal	1.46	0.68	0.74	1.35	0.59	1.70
Sloping (45°)	Downward	1.32	0.76	0.60	1.67	0.45	2.22
Horizontal.....	Downward	1.08	0.92	0.37	2.70	0.22	4.55
		h_o	R	h_o	R	h_o	R
Moving air							
(any position)							
15-mph wind	Any	6.00	0.17				
(for winter)							
7.5-mph wind	Any	4.00	0.25				
(for summer)							

NOTE: A surface cannot take credit for both an air space resistance value and a surface resistance value. No credit for an air space value can be taken for any surface facing an air space of less than 0.5 in.

Source: Copyright © by the American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA. Reprinted by permission, from 1989 *Handbook of Fundamentals*.

^aConductances are for surfaces of the stated emittance facing virtual blackbody surroundings at the same temperature as ambient air. Values are based on a surface-air temperature difference of 10 F° and for surface temperature of 70 F.