مقدمة:

تعلمنا من دراسة الترموديناميك بأن الطاقة تنتقل من خلال تفاعل الجملة مع الوسط المحيط. وينتج عن هذه التفاعلات عمل وحرارة، وعلى كل حال فإن علم الترموديناميك تتفاعل مع نهاية إجراءات (عمليات) التفاعل الذي تحدث ولا تزودنا بمعلومات عن طبيعة هذه التفاعلات ولا المعدل الزمني الذي تتم فيه.

بينما انتقال الحرارة يربط بين التحليل الترموديناميكي للإجراء وآليته وطبيعته.

ويمكن طرح عدة أسئلة: ما هو الانتقال الحراري؟ كيف يتم الانتقال الحراري؟ وما أهمية علم الانتقال الحراري؟ من خلال الأجوبة على هذه الأسئلة يمكن أن نبدأ بإدراك الآلية الفيزيائية لإجراءات الانتقال الحراري وربط هذه الإجراءات بالصناعة ومشاكل البيئة.

الانتقال الحراري (الحرارة) عبارة عن انتقال الطاقة أثناء وجود فارق في درجات الحرارة.أي عندما يكون هناك فارق في درجات الحرارة بالوسط أو بين وسطين يحدث الانتقال الحراري.

أشكال الانتقال الحراري: كما في الشكل(1-1):

- **الانتقال بالموصلية:** عندما يوجد grad T بجسم صلب أو سائل فإن الانتقال الحراري يتم بالموصلية.
- **الانتقال بالحمل:** يتم بين السطح والسائل المتحرك عند درجات حرارة مختلفة.
- **الانتقال بالإشعاع الحراري:** كل جسم ودرجة حرارة يصدر طاقة على شكل أمواج كهرومغناطيسية.

وعندما يكون الوسط الفاصل شفاف هناك انتقال حراري بالإشعاع بين السطحين ذو درجتي حرارة مختلفتين.

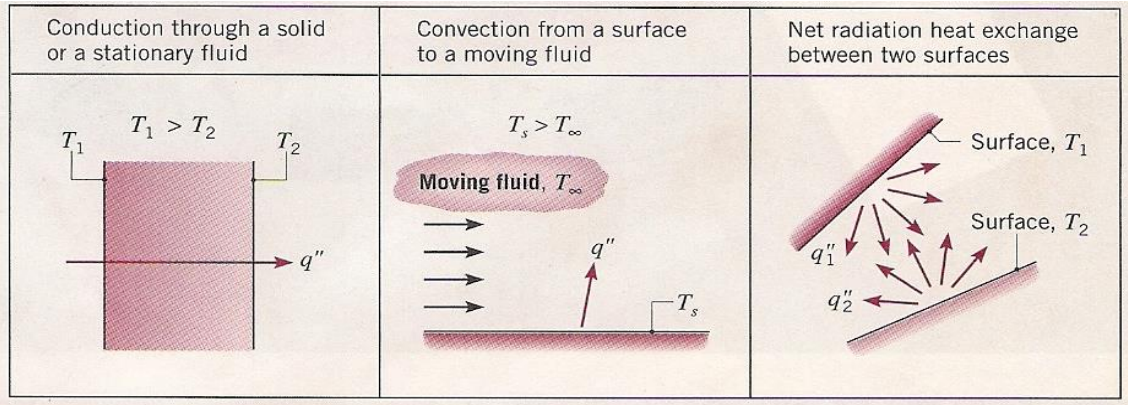


FIGURE (1- 1) Conduction, convection, and radiation heat transfer modes.

الموصلية:

الأسس الفيزيائية والمعادلات المناسبة يجب أن تفهم الميكانيزم الفيزيائي لانتقال الحرارة وبعدها وضع المعادلة المناسبة لحساب كمية الحرارة (الطاقة) التي تنتقل خلال واحدة الزمن.

ندرس غاز متوضع بين سطحين ذو درجتي حرارة مختلفتين الشكل(2-1):

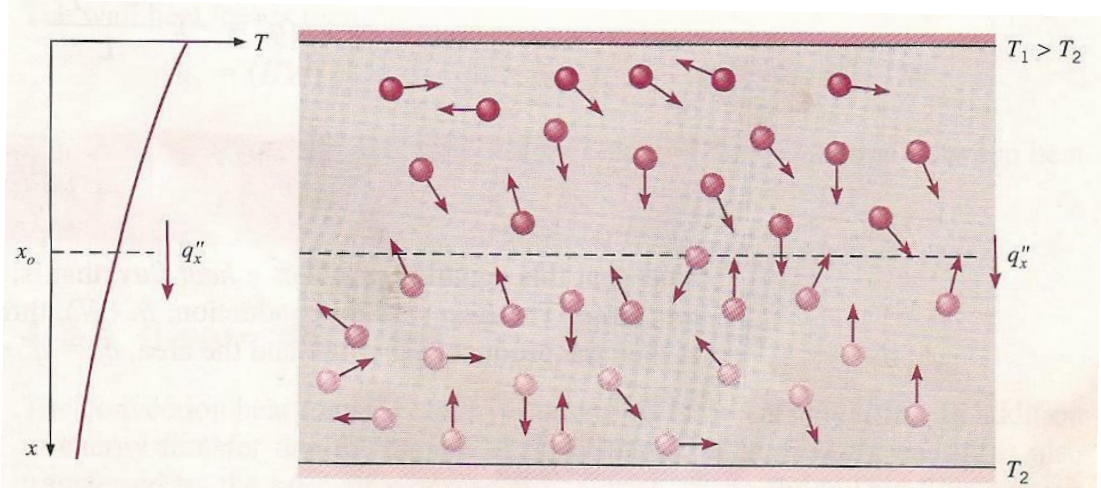


FIGURE (2- 1) Association of conduction heat transfer with diffusion of energy due to molecular activity.

نتيجة للحركة العشوائية للجزيئات فإن الجزيئات ذات درجة الحرارة الأعلى تنتقل إلى الأسفل بالاتجاه الموجب للمحور x فيكون الانتقال الحراري الكلي للحرارة أو للطاقة من خلال الحركة العشوائية للجزيئات ونسميه انتشار الطاقة.

ونفس الحالة بالنسبة للسوائل، لكن حركة الجزيئات بشكل منتظم أكثر منها في الغازات.

ولكن في الأجسام الصلبة الموصلية تتم من خلال حركة الالكترونات على شكل اهتزازات شبكية (شعرية) lattice vibrations.

في المواد الصلبة العازلة تنتقل الحرارة بواسطة الأمواج الشبكية (الشعرية)، أما في المواد الصلبة الناقلة تنتقل بواسطة الحركة الحرة للالكترونات.

وهناك أمثلة كثيرة على انتقال الحرارة بالموصلية:

- إذا وضعنا ملعقة في فنجان قهوة ساخن...
- في فصل الشتاء هناك ضياع حراري من الغرفة إلى الوسط الخارجي ويتم الضياع بشكل رئيسي من خلال الموصلية عبر الجدران إلى الوسط الخارجي.

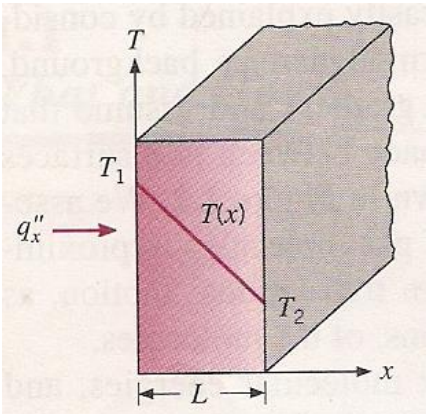


FIGURE (3- 1)
One-dimensional heat transfer by conduction (diffusion of energy).

تقييم إجراءات الانتقال الحراري من خلال المعادلة المناسبة. وتستخدم هذه المعادلة لحساب الطاقة (الحرارة) الكلية التي تنتقل في واحدة الزمن أثناء الانتقال الحراري بالموصلية تستخدم المعادلة التالية والمعروفة باسم قانون فوريه. لجدار أحادي البعد كما في الشكل(3-1): والذي يحوي توزع درجة الحرارة T(x) فالمعادلة المناسبة:

$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

حيث:

q_x : شدة التدفق الحراري

W/m^2 : معدل انتقال الحرارة باتجاه x لواحدة المساحة والعمودي على اتجاه الانتقال.

وهو يتناسب طرداً مع تدرج درجة الحرارة grad T أي dT/dx بنفس الاتجاه.

λ : ثابت تناسب يسمى معامل الموصلية الحرارية $W/m.K$ وهو من إحدى المواصفات الفيزيائية للجدار.

وإشارة (-) تدل على حقيقة أن الانتقال الحراري في اتجاه تناقص درجة الحرارة.

عند شروط نظام مستقر كما في الشكل(3-1) حيث توزع درجة الحرارة خطي.

يمكن حساب تدرج درجة الحرارة grad T بالعلاقة:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L}$$

وشدة التدفق الحراري بالعلاقة:

$$q_x = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{L}$$

أو:

$$q_x = \lambda \frac{T_1 - T_2}{L} = \lambda \frac{\Delta T}{L}$$

لاحظ بأن المعادلة السابقة تُعبِّر عن شدة التدفق الحراري (heat flux) أي معدل الحرارة التي تنتقل بالنسبة لواحدة المساحة. ومعدل كمية الحرارة بالموصلية (the heat rate by conduction) من خلال الجدار المستوي ذو مساحة A:

$$Q = q_x.A$$

<u>التبادل الحراري بالحمل Convection:</u>

يتضمن التبادل الحراري بالحمل انتقال الطاقة من خلال الحركة العشوائية للجزيئات (الانتشار diffusion) وكذلك تنتقل الطاقة من خلال الحجم (bulk) أو من خلال الحركة المرئية للسائل (macroscopic, motion of the fluid) .

ترتبط حركة السائل هذه بالحقيقة التالية: يتحرك العدد الكبير من الجزيئات في أي لحظة زمنية على شكل مجموعات، ومثل هذه الحركة وبوجود تدرج درجة الحرارة grad T يُسهم في الانتقال الحراري. ذلك لأن الجزيئات التي على شكل مجموعات تحتفظ بالحركة العشوائية ويتم الانتقال الحراري الكلي من خلال تطابق

الطاقة التي تنتقل من خلال الحركة العشوائية للجزيئات والطاقة المنقولة من خلال حركة حجم السائل (macroscopic, motion of the fluid).

ويستخدم عادة مصطلح التبادل الحراري بالحمل (Convection) عندما يكون الانتقال متراكم. والمصطلح انتقال الحرارة بشكل أفقي (advection) عندما يكون الانتقال الحراري من خلال حركة حجم السائل.

سوف نهتم بدراستنا بالتبادل الحراري بالحمل عند حركة السائل فوق سطح ذو درجة حرارة مختلفة عن درجة حرارة السائل.

ندرس تدفق السائل على سطح مسخن كما في الشكل(4-1):

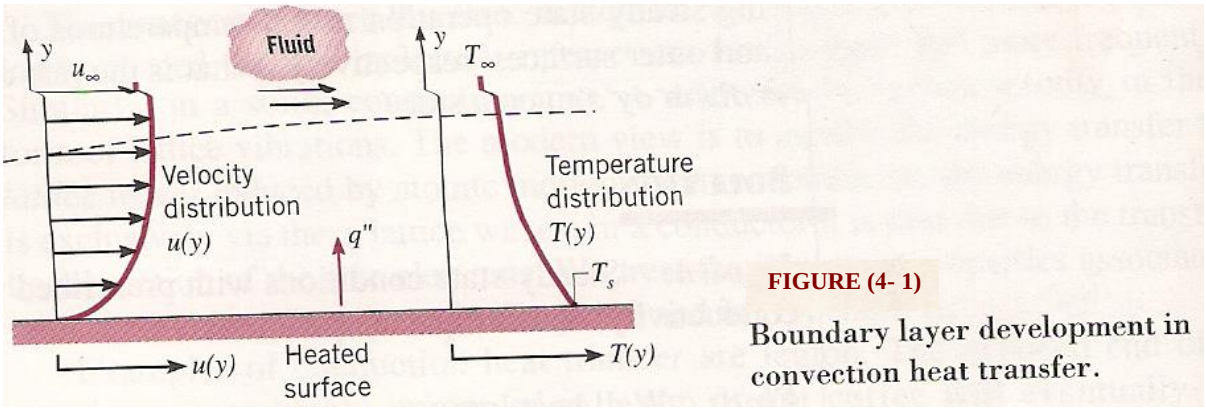


FIGURE (4- 1)

Boundary layer development in convection heat transfer.

نتيجة للتفاعلات بين السطح المسخن والسائل تتشكل وتتطور منطقة، حيث تتغير السرعة من الصفر عن السطح حتى قيمة W_∞ مرتبطة بالتدفق, وتسمى هذه المنطقة بالطبقة الحدية الهيدروديناميكية.

وكذلك عندما تكون درجة حرارة السائل والسطح مختلفتين فإن درجة الحرارة تتغير من درجة حرارة السطح T_s عند $y = 0$ حتى T_∞ خارج التدفق وتسمى هذه المنطقة بالطبقة الحدية الحرارية ويمكن أن تساوي أو تكون أكبر أو أصغر من الطبقة الحدية الهيدروديناميكية. وعندما تكون $T_s > T_\infty$ فإن الانتقال الحراري بالحمل (Convetion) سوف يحدث.

تكون مساهمة الانتقال الحراري بالحمل من خلال الحركة العشوائية للجزيئات (diffusion) بالقرب من السطح حيث سرعة السائل منخفضة أي $y = 0$ و $W = 0$. ومن ثم تنمو الطبقة الحدية وتظهر ويبدأ الانتقال الحراري بالحمل من خلال حركة الجسم.

إن تقدير قيمة الطبقة الحدية شيء ضروري لفهم آلية الانتقال الحراري بالحمل ولهذا السبب فإن ميكانيك السوائل يلعب دور كبير ومهم في تحليل آلية الانتقال الحراري بالحمل.

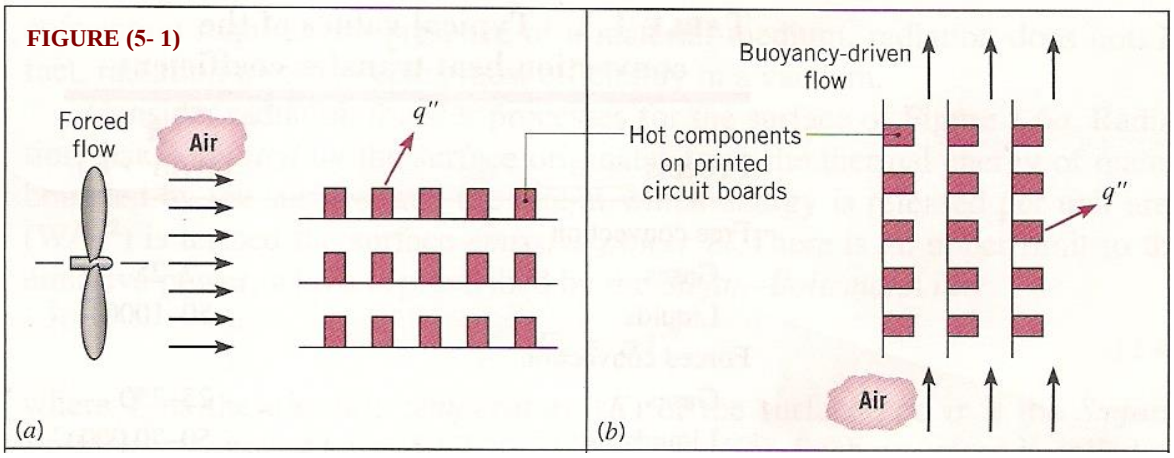
<u>أشكال الانتقال الحراري بالحمل حسب طبيعة الجريان:</u>

1- انتقال الحرارة بالحمل الطبيعي (الحر):

مكثف البراد المنزلي: حيث يتم جريان الهواء بقوة الطفو الناتج عن فرق كثافة الهواء.

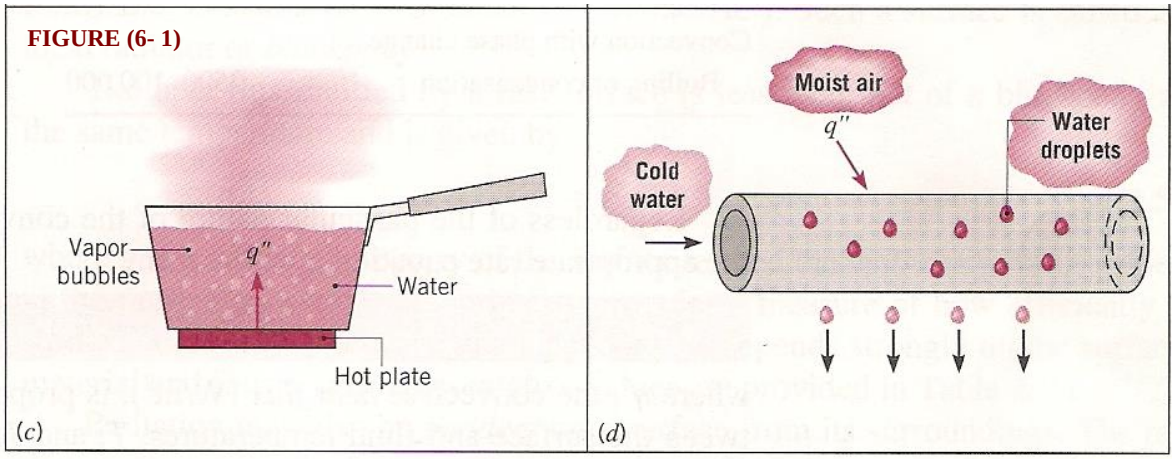
2- الحمل القسري:

حيث يتم الجريان بواسطة مروحة أو مضخة شكل(5-1):



3- انتقال الحرارة بالحمل الناتج عن التحول الطوري من سائل إلى بخار.

الغليان والتكاثف شكل(6-1):



يمكن حساب شدة التدفق الحراري بالحمل من خلال قانون نيوتن للتبريد:

$$q = \alpha(T_s - T_\infty)$$

حيث:

q : شدة التدفق الحراري بالحمل W/m^2.

α : معامل الانتقال الحراري بالحمل $W/m^2.K$.

T_s : درجة حرارة السطح.

T_∞ : درجة حرارة السائل أو الوسط.

يعتمد α على ظروف الطبقة الحدية المرتبطة بشكل السطح وطبيعة السائل والخواص الترموديناميكية للسائل.

أثناء دراستنا لظاهرة الحمل الحراري نحتاج لإيجاد قيمة α أثناء الانتقال الحراري بالحمل وبشكل مفصل:

القيم النموذجية لمعامل الانتقال الحراري بالحمل α TABLE (1-1)

الإجـــراء	$\alpha(W/m^2.K)$
الحمل الحر:	
غازات	2-25
سوائل	50-1000
الحمل القسري:	
غازات	25-250
سوائل	50-20.000
الانتقال الحراري بالحمل الناتج عن التحول الطوري:	
غليان أو تكاثف	2500-100.000

عندما نستخدم قانون نيوتن للتبريد لحساب شدة التدفق الحراري (heat flux) أثناء الحمل نعتبر q موجبة إذا انتقلت الحرارة من السطح $T_s > T_\infty$ وq سالبة إذا انتقلت الحرارة إلى السطح $T_\infty > T_s$. وإذا كانت $T_\infty > T_s$ لا مانع من استخدام قانون نيوتن على الشكل التالي:

$$q = \alpha(T_\infty - T_s)$$

وفي هذه الحالة انتقال الحرارة موجب إذا كان باتجاه السطح.

الانتقال الحراري بالإشعاع Radiation heat transfer:

ينبعث الإشعاع الحراري من الجسم ذو درجة حرارة محددة، وسوف نركز على الإشعاع من سطوح الأجسام الصلبة، والإشعاع يمكن أن يصدر عن السوائل والغازات.

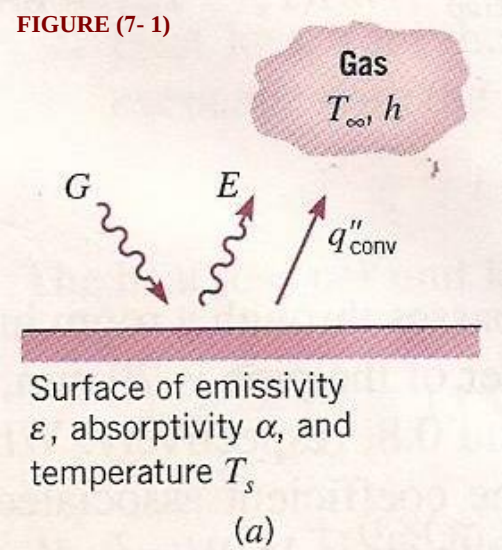
تنقل طاقة حقل الإشعاع بواسطة الأمواج الكهرومغناطيسية ولا تحتاج إلى وسط مادي لكي تنتقل هذه الطاقة، بينما أثناء الانتقال بالحمل والموصلية تحتاج إلى وسط مادي.

إن الأجسام التي درجة حرارتها أعلى من الصفر المطلق تُصدر أمواج كهرومغناطيسية بطول يتراوح ما بين (0.8-40mm) تشبه التدفقات الطاقية المشابهة لموجات الضوء، مسببة تغير في كمية الطاقة المختزنة للجسم، وإن هذا التدفق الطاقي نسميه الإشعاع الحراري.

ندرس الإشعاع الحراري المنبعث من السطح كما في الشكل(1-7):

الإشعاع المنبعث من السطح ينشأ من الطاقة الحرارية للمادة ومعدل الطاقة المنبعثة من واحدة مساحة السطح W/m^2 تسمى قوة إصدارية السطح E.

FIGURE (7- 1)



وهناك حد أعلى لقوة الإصدار والتي يتم إيجادها من خلال قانون ستيفان – بولتسمان (Stefan-Boltzmann):

$$E_b = \sigma T_s^4$$

حيث:

T_s : درجة الحرارة المطلقة (K) للسطح.

σ : ثابت (Stefan-Boltzmann) $(\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\ W/m^2.K^4)$

نسمي مثل هذا السطح بالمشع المثالي أو الجسم الأسود.

شدة التدفق الحراري المنبعث (الصادر) من السطح الحقيقي أقل منه من الجسم الأسود عند نفس درجة الحرارة وتعطى بالعلاقة:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4$$

حيث:

ε : خاصة إشعاعية للسطح وتسمى معامل الإصدارية.

عند $0 \le \varepsilon \le 1$ تزودنا عن مدى فعالية الجسم لإصدار الأشعة بالنسبة للجسم الأسود، وهذا المعامل يعتمد على مادة السطح.

يمكن أن يحدث الإشعاع من الوسط المحيط (الغاز) إلى السطح، والإشعاع الوارد من مصدر معين (الشمس) أو من مصادر أخرى (سطح مقابل آخر) إلى السطح المعرض نسميه الأشعة الواردة (Irradiation) (G).

يمكن للسطح المعرض للأشعة الواردة أن يمتص جزء من هذه الأشعة أو يمتصها بالكامل مما يزيد من الطاقة الحرارية للمادة.

معدل الطاقة الإشعاعية التي يتم امتصاصها من قبل واحدة مساحة السطح يتم حسابها من خلال معرفة الخاصية الامتصاصية لهذا السطح (α`)

حيث:

α` : معامل الامتصاص.

$0 \le \alpha` \le 1$ عندما تكون $\alpha < 1$ والسطح غير شفاف فإن قسم من الأشعة الواردة ينعكس.

وإذا كان السطح نصف نافذ (semitransparent) فإن جزء من الأشعة الواردة سوف تنفذ إلى الجسم.

عندما تزداد الامتصاصية وتقل الإصدارية فإن الطاقة الحرارية للمادة تتأثر بذلك ولا يوجد فعالية للطاقة الإشعاعية في هذه الحالة.

α` : يعتمد على طبيعة الأشعة الواردة وعلى نوعية السطح (امتصاصية السطح للأشعة الشمسية تختلف عن امتصاصيته للأشعة الواردة من فرن صناعي).

حالة خاصة تحدث عندما يكون التبادل بالإشعاع بين سطح صغير ذو درجة حرارة T_s وسطح كبير معزول محيط بالصغير ذو درجة حرارة T_{sur}.

يمكن أن يكون السطح الكبير جدران غرفة أو فرن كما في الشكل(8-1):

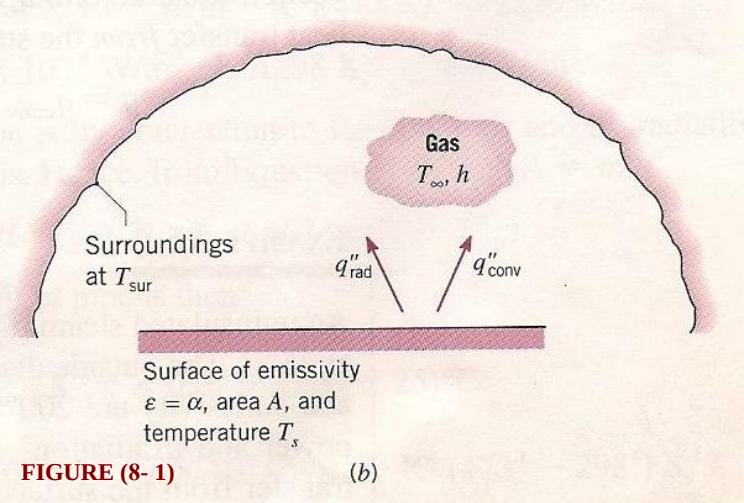


FIGURE (8- 1) (*b*)

سوف نرى أثناء دراستنا لقسم الإشعاع بالتفصيل.

عندما تكون $T_{sur} \neq T_s$ يمكن مساواة شدة الأشعة الواردة بشدة الإصدارية من الجسم الأسود عند T_{sur} أي:

$$G = \sigma T_{sur}^4$$

إذا افترضنا أن السطح رمادي (gray surface) أي $\varepsilon = \alpha$` فإن معدل الانتقال الحراري الكلي بالإشعاع من واحدة مساحة السطح:

$$q_{rad} = \frac{Q}{A} = \varepsilon E_b - \alpha G = \varepsilon \sigma T_s^4 - \alpha \sigma T_{sur}^4$$

وبما أن $\alpha = \varepsilon$

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4)$$

هذه العلاقة تزودنا بالفرق بين الطاقة الحرارية المتحولة إلى قوة إشعاعية (أشعة إصدارية) والمكتسبة والمتحولة إلى أشعة امتصاصية.

يمكن التعبير عن التبادل الحراري بالإشعاع من خلال العلاقة التالية:

$$Q_{rad} = \alpha_{rad} A(T_s - T_{sur})$$

ويُعبَّر عن α_{rad} : معامل الانتقال الحراري بالإشعاع بشكل تقريبي بالعلاقة:

$$\alpha_{rad} \equiv \varepsilon\sigma(T_s - T_{sur})(T_s^2 + T_{sur}^2)$$

لاحظ بأن α_{rad} يعتمد بشكل كبير على T بينما α بالحمل يعتمد بشكل أقل.

معدل الانتقال الحراري الكلي من السطح إلى الوسط المحيط بالحمل وبالإشعاع:

$$Q = Q_{conv} + Q_{rad} = \alpha A(T_s - T_\infty) + \varepsilon A\sigma(T_s^4 - T_{sur}^4)$$