

النقل الحراري داخل المفاعل

- مقدمة • مبادئ النقل الحراري • الإنتاج الحراري للمفاعل • انتشار حرارة الوقود • انتقال الحرارة إلى المبرد (الحالة السائلة) • انتقال الحرارة إلى المبرد (مرحلة الغليان) • التصميم الحراري للمفاعلات • تمارين

(١٠,١) مقدمة

يعتمد التصميم الهندسي للمفاعلات النووية على الاختيار الأمثل للمواد من الناحية الميكانيكية، والخصائص النووية، والاقتصادية. ويعتمد كذلك على توزيع تلك المواد بشكل يوفي بالأهداف التي صُمم من أجلها المفاعل مع المحافظة على سلامة المحطة والبيئة. ويؤدي توزيع الوقود وخصائصه دوراً مهماً في تصميم المفاعلات، أما دور المواد الناقلة للحرارة فهو يصبح أساسياً بالنسبة لمفاعلات القدرة الكهربائية؛ لأن ما يميز به الوقود النووي عن الوقود الأحفوري هو أن الطاقة الحرارية الناتجة عن الانشطارات النووية غير محدودة، مما يسبب ذوبان الوقود وإتلافه إذا لم يُبرَد بطريقة مناسبة. وتتأثر كذلك الخصائص النووية للوقود والمواد الأخرى بتغيير درجة الحرارة، مما يحتم أخذ ذلك في الحسبان أثناء التصميم؛ ولهذا فإن طريقة تبريد الوقود ونوعية المادة الماصة للحرارة هما اللذان يحددان في الواقع نوع المفاعل وحجمه وخصائصه.

يؤدي التحليل الحراري للمفاعل أثناء التصميم إلى التعرف على توزيع درجة الحرارة من خلال الحسابات النووية لقيض النيوترونات، والتفاعلات داخل المفاعل. وتساعد هذه الحسابات الأولية في ضبط الحدود والقيود الحرارية التي يجب عدم تجاوزها لسلامة المحطة في كل حالات تشغيل المفاعل. ومن بين هذه القيود درجة حرارة الوقود التي يجب أن تكون دائماً أقل من درجة حرارة ذوبانه، وتحديد الكثافة القصوى للقدرة الحرارية التي يمكن أن يمتصها نظام التبريد، والعمل على تشغيل المفاعل ما دون ذلك. توضع هذه القيود الحرارية وأخرى ميكانيكية وإشعاعية للمحافظة على مكونات المفاعل طوال عمره لسلامة المحطة والبيئة. وسنتناول في هذا الفصل التحليل الحراري للمفاعلات وكيفية نقل حرارة قلب المفاعل والاستفادة منها لإنتاج القدرة الكهربائية عن طريق تشغيل التربينات البخارية.

(١٠,٢) مبادئ النقل الحراري

نذكر في بداية هذا الفصل القوانين الأساسية للنقل الحراري وحساب عدم وجود مصدر داخلي للحرارة في المادة أولاً. وسنتناول موضوع الانتقال الحراري المهم مع وجود مصدر حراري كما هو الحال بالنسبة لفضبان الوقود فيما بعد. تنتقل الحرارة من نقطة إلى أخرى في المادة عن طريق التوصيل، أو الحمل، أو كليهما، وأيضاً عن طريق الإشعاع لكن بمستوى أقل خاصة بالنسبة للمفاعلات النووية.

(١٠,٢,١) النقل الحراري بالتوصيل

تنتقل الحرارة بالتوصيل من نقطة إلى أخرى في المواد الصلبة عن طريق تفاعل جزيئات والإلكترونات المادة دون حدوث انتقال ظاهر لها. ويُعرف التدفق الحراري بالتوصيل، بقانون "فوريي"، الذي يعبر عنه بالمعادلة الآتية:

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (١٠,١)$$

حيث إن :

q : المعدل الزمني لتدفق الحرارة (W) أو (J/sec).

A : المساحة المتعامدة لاتجاه انتقال الحرارة (m^2).

$\frac{dT}{dx}$: فرق الحرارة في النقطة والاتجاه المحدد ($^{\circ}C/m$) أو ($^{\circ}K/m$).

k : معامل التوصيل الحراري للمادة ($W/m^{\circ}K$).

يُعدُّ معامل التوصيل الحراري k من أحد الخصائص الفيزيائية المهمة للمادة، وهو أيضاً مرتبط بدرجة الحرارة، إلا أنه غالباً ما يُعدُّ ثابتاً لكل مادة لأن تغيرات الحرارة تكون صغيرة نسبياً في أكثر المواد استعمالاً.

يوجد تطابق كبير بين دوائر التوصيل الحراري ودوائر التوصيل الكهربائي، بحيث يمكن كتابة معادلة التوصيل الحراري السابقة على شكل قانون أوم المعروف للتوصيل الكهربائي الآتي :

$$q = kA \left(\frac{T_1 - T_2}{x_1 - x_2} \right) = \frac{\Delta T}{(L/k.A)}$$

(١٠،٢)

$$I = \frac{E}{R}$$

حيث إن :

ΔT : فرق درجة الحرارة بين النقطة x_1 والنقطة x_2 في المادة المحددة (مماثل لفرق

الجهد الكهربائي E).

$x_1 - x_2 = L$: معدل طول المسافة في المادة بين النقطتين.

$\frac{L}{kA}$: المقاومة الحرارية للمادة (مماثل للمقاومة الكهربائية R).

q : معدل تدفق الحرارة في الثانية (مماثل للتيار الكهربائي I)

(١٠,٢,٢) النقل الحراري بالحمل

تنتقل الحرارة بالحمل عند تلامس سائل أو غاز بسطح ساخن، وذلك عن طريق التحرك الطبيعي للسائل، أو الغاز بسبب اختلاف الكثافة الناتجة عن اختلاف درجة الحرارة. وتستهمل أحياناً مضخة لدفع السائل، أو الغاز، لزيادة سرعة جريانه تحسیناً لكفاءة نقل الحرارة. وتتزايد كفاءة انتقال الحرارة بالحمل الجبري هذا كلما زادت قدرة مضخة الدفع. ويعرف الانتقال الحراري بالحمل الطبيعي، أو الجبري، بقانون نيوتن، الذي يُعبر عنه بالمعادلة الآتية:

$$(١٠,٣) \quad q = h A (T_s - T_f)$$

حيث إن:

q: معدل التدفق الحراري بالحمل من أو إلى مساحة السطح A (W).

(T_s-T_f): فرق درجتي حرارة السطح الساخن (T_s) وسائل التبريد (T_f).

h: معامل الانتقال الحراري للمادة (W/m²°K).

تجدر الإشارة إلى أن معامل الانتقال الحراري h مرتبط بعوامل كثيرة منها نوعية السائل، ودرجة حرارته، وسرعة جريانه، وشكل السطح الفاصل، ومساحته؛ ولهذا فإن معامل الانتقال الحراري h في الواقع خاص بنظام محدد، ويصعب حساب قيمته نظرياً، إلا أن وجود عدة معادلات شبه تجريبية تُسهل هذه العملية كما سنرى لاحقاً. وكذلك من الأمور المهمة لحساب h تعريف واضح لدرجة حرارة سائل التبريد، T_f التي عادة ما تعادل المتوسط العام لدرجة حرارة سائل التبريد، الذي يحسب حسب المعادلة الآتية:

$$(١٠,٤) \quad T_f = \frac{\int_A \rho \cdot C_p \cdot T \cdot dA}{\int_A \rho \cdot C_p \cdot dA}$$

حيث إن :

C_p و T و ρ : تمثل معامل الحرارة النوعي ودرجة الحرارة وكثافة السائل تتالياً.

dA : مساحة المقطع العرضي للقناة التي يسري فيها السائل.

يلاحظ أيضاً إمكانية كتابة معادلة انتقال الحرارة بالحمل السابقة (١٠,٣) على

شكل معادلة قانون أوم الآتية :

$$(10,5) \quad q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{hA}} \approx \frac{E}{R}$$

حيث إن :

ΔT : فرق درجة الحرارة (مماثل لفرق الجهد E).

$\frac{1}{hA}$: مقاومة انتقال الحرارة بالحمل (مماثل للمقاومة الكهربائية R).

مثال لدائرة حرارية :

أوجد المعامل الحراري الإجمالي لنظام يحتوي على أنبوب يمر داخله سائل ساخن. علماً أن نصف قطر الأنبوب الداخلي والخارجي يساوي كل منهما a و b تتالياً، أما المعامل الحراري للسطح الداخلي A_i والخارجي A_o فيساوي كل منهما h_i و h_o تتالياً.
الحل :

تحتوي دائرة هذا المثال على ثلاث مقاومات حرارية، اثنتين منها ناتجتين عن انتقال الحرارة بالحمل، والثالثة ناتجة عن انتقال الحرارة بالتوصيل خلال جدار الأنبوب؛ ولهذا يمكن كتابة المعادلات الآتية :

$$\bullet \quad q_t = \left(\frac{T_a - T_b}{R_t} \right) = H_b \cdot A_b (T_a - T_b)$$

$$\Rightarrow H_b = \frac{1}{A_b R_t} \quad \text{المعامل الحراري الإجمالي}$$

مجموع المقاومات الثلاث: $R_t = R_a + R_w + R_b$

$$\bullet q_w = -K(2\pi rl) \frac{dt}{dr} = \frac{\Delta T}{R_w}$$

$$\Rightarrow R_w = \frac{\text{Ln}(b/a)}{2\pi l.K} \text{ : مقاومة جدار الأنبوب}$$

$$R_a = \frac{1}{h_a.A_a} \text{ ; } R_b = \frac{1}{h_b.A_b} \text{ : مقاومة الوسط الداخلي والخارجي}$$

وأخيراً، نحسب المعامل الحراري الإجمالي للنظام كما يلي:

$$H_b = \frac{1}{A_b.R_t} = \left[\frac{1}{\frac{b}{a.h_a} + \frac{b.\text{Ln}(b/a)}{K} + \frac{1}{h_b}} \right]$$

(١٠، ٢، ٣) النقل الحراري بالإشعاع

تصدر وتمتص كل الأجسام شعاعاً حرارياً على شكل موجات إلكترومغناطيسية، وتختلف قوة الإشعاع والامتصاص الحراري للأجسام حسب نوعية المادة ودرجة حرارتها، وكذلك حالتها الفيزيائية (ناعمة، خشنة إلى آخره). فمثلاً عند وضع جسمين متقابلين يفصلهما وسط غير ماص للحرارة مثل الفراغ، أو قليل الامتصاص مثل الهواء الجاف، يحصل تبادل حراري بينهما من خلال إصدار الإشعاعات الحرارية وامتصاصها لكل منهما. وتحسب محصلة معدل التدفق الحراري في هذه الحالة من الجسم الساخن إلى الجسم البارد وفق المعادلة الآتية:

$$(١٠، ٦) \quad q = A_1 \cdot \sum \epsilon_{1,2} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

حيث إن:

q: معدل التدفق الحراري (W).

A₁: مساحة الجسم الساخن (m²).

$\epsilon_{1,2}$: معامل التبادل الحراري للجسم الساخن والبارد.

($\epsilon_{1,2}=1$) ، إذا كان الجسمان أسودين (أي يمتصان كل الإشعاعات الحرارية).

$$\sigma = 5.68 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \text{ ثابت.}$$

T_2 و T_1 درجة حرارة الجسم الساخن والجسم البارد تتالياً.

تجدر الإشارة إلى أن نقل الحرارة بالإشعاع لا يستعمل إلا نادراً في المفاعلات النووية ، وذلك لنقله كميات بسيطة لحرارة غازات التبريد إلى الجرافيت ، كما هو الحال في المفاعلات النووية الغازية (HGPR). أما نقل الحرارة في المفاعلات الأخرى فيُستعمل الحمل والتوصيل الحراري فقط.

(١٠,٣) الإنتاج الحراري للمفاعل

يرتكز التحليل الحراري للمفاعل على حساب توزيع الحرارة الناتجة عن الانشطارات النووية داخل قلب المفاعل. وكما سبق شرحه في الفصول السابقة ، فإن الطاقة الإجمالية لكل انشطار تساوي حوالي 200 MeV ، وتظهر هذه الطاقة على شكل طاقة حركية لشظايا الانشطار وجسيمات النظائر المشعة ، والنيوترونات ، وأشعة جاما ، وإشعاع النيوترونو. وباستثناء طاقة النيوترونو (حوالي ٥%) التي تخرج من المفاعل ، فإن بقية طاقة الانشطار يتم امتصاصها داخل المفاعل. تتوزع هذه الطاقة في مختلف أنحاء قلب المفاعل خاصة ، ويتركز أهمها في قضبان الوقود ، ثم المهديئ ، ثم بقية مكونات المفاعل.

(١٠,٣,١) الإنتاج الحراري لقضبان الوقود

تُعد قضبان الوقود المصدر الأساسي لإنتاج الطاقة الحرارية في قلب المفاعل ؛ لأنها تستحوذ على حوالي تسعين في المئة من طاقة الانشطار ، وذلك لأن مسافة اختراق شظايا الانشطار وجسيمات النظائر المشعة قصير جداً ، ويتم امتصاص طاقتها

الحرارية في مكان الانشطار. وتمتص قضبان الوقود أيضاً جزءاً من طاقة أشعة جاما والنيوترونات، أما الجزء المتبقي لهذه الإشعاعات فيمتص في المهدئ والمبرد ثم العواكس ومكونات المفاعل الأخرى؛ ولهذا فإن إنتاج الحرارة له ارتباط وثيق بالانشطارات النووية التي بدورها مرتبطة بفيض النيوترونات. وبما أن هذا الفيض يختلف حسب موقع قضبان الوقود فكذلك يكون الحال بالنسبة لإنتاج الحرارة؛ ولهذا يحسب معدل الإنتاج الحراري لوحدة الحجم حسب الموقع داخل قلب المفاعل وطاقة النيوترونات وفق المعادلة الآتية:

$$(١٠,٧) \quad q'''(r) = E_d \int \sum_f E \cdot \phi(r, E) dE = E_d \bar{\sum}_f \phi_T(r)$$

حيث إن:

E_d : الطاقة الممتصة في قضبان الوقود لكل انشطار (180 MeV).

$\bar{\sum}_f$: متوسط المقطع العرضي المجهاري لانشطار الوقود.

$\phi_T(r)$: فيض النيوترونات الحرارية حسب الموقع.

لقد شرحنا في الفصل السادس أن فيض النيوترونات الحرارية داخل قلب المفاعلات الأسطوانية غير المتجانسة والأكثر استعمالاً يختلف حسب الموقع وبحسب وفق المعادلة الآتية:

$$(١٠,٨) \quad \phi_T(r, Z) = \frac{1.16 \times P}{E_R \bar{\sum}_f H a^2 n} J_0\left(\frac{2.405 \cdot r}{R}\right) \cos\left(\frac{\pi \cdot Z}{H}\right)$$

حيث إن:

H و R : نصف قطر وارتفاع المفاعل الأسطواني تتالياً.

E_R : الطاقة الممتصة بقضبان الوقود لكل انشطار بوحدة الجول.

a : نصف قطر قضبان الوقود و n عدد القضبان داخل قلب المفاعل.

J_0 : دالة بيسال لدرجة الصفر.

P : قدرة المفاعل.

وعند تعويض فيض النيوترونات الحرارية بهذه القيمة في المعادلة السابقة

(١٠,٧) نحصل على تغير معدل الإنتاج الحراري لوحدة الحجم وفق المعادلة الآتية:

$$(10,9) \quad q'''(rZ) = \frac{1.16 \times P.E_d}{H.a^2.n.E_R} J_0 \left(\frac{2.405.r}{R} \right) \cos\left(\frac{\pi.Z}{H}\right)$$

يتضح من هذه المعادلة أن أكبر إنتاج حراري يكون وسط قلب المفاعل ($z=0$)

وسط القضيب المركزي ($r=0$)، وتعدُّ القيمة القصوى للإنتاج الحراري هذه q'''_{\max} أحد الحدود الحرارية المذكورة سابقاً.

$$(10,10) \quad q'''_{\max} = \frac{1.16 \times P.E_d}{H.a^2.n.E_R}$$

(١٠,٣,٢) الإنتاج الحراري للإشعاعات (n,γ)

يُمتص حوالي عشرة في المئة من طاقة كل انشطار خارج قضبان الوقود، ويتركز ذلك خاصة في المهدئ، والمبرد، ومكونات المفاعل الأخرى. وتحمل النيوترونات حوالي اثنين في المئة من طاقة كل انشطار خارج قضبان الوقود، ويتوزع امتصاصها بالتساوي تقريباً في كل أنحاء المفاعل. أما الباقي الذي يمثل حوالي ثمانية في المئة فتحمله أشعة جاما ويصعب تحديد مواقع امتصاصها بدقة، إلا أنه يمكن تقدير معدل إنتاجها الحراري وفق المعادلة الآتية:

$$(10,11) \quad q'''(r) = \int \phi_\gamma(r, E_\gamma) . E_\gamma . \mu(E_\gamma) dE_\gamma$$

حيث إن:

$\phi_\gamma(r, E_\gamma)$: فيض أشعة جاما بدلالة الموقع والطاقة.

$\mu(E\gamma)$: معامل الامتصاص الخطي لأشعة جاما حسب طاقتها.

$E\gamma$: طاقة أشعة جاما.

(١٠,٣,٣) الإنتاج الحراري للنظائر المشعة

تصل كمية الطاقة المنتجة بسبب تفكيك النظائر المشعة إلى حوالي سبعة في المئة من قدرة المفاعل الأصلية، إذا تم تشغيل هذا المفاعل بضعة أيام فما فوق. ويتواصل إنتاج الطاقة بهذه الطريقة حتى بعد إطفاء المفاعل تماماً، مما يحتم مواصلة تبريده لمدة معينة بعد إخماد التفاعلات الانشطارية، وذلك لمنع ارتفاع درجة حرارة الوقود وربما ذوبانه وإتلافه.

عند إخماد التفاعلات الانشطارية بإدخال كل قضبان التحكم في قلب المفاعل لا تنزل قدرته إلى الصفر، بل تصل إلى حوالي أربعة في المئة من قدرته الأصلية مباشرة، ثم تتناقص تدريجياً مع الزمن وفق ثوابت تفكك النظائر المشعة. وتحسب نسبة قدرتي المفاعل وكذلك معدلي الإنتاج الحراري بعد وقبل إخماد المفاعل وفق المعادلة شبه التجريبية الآتية :

$$(١٠,١٢) \quad \frac{P}{P_0}(t_s) = \frac{q}{q_0}(t_s) = 0.95 \times t_s^{-0.26} \times [1 - (1 + \frac{t_0}{t_s})^{-0.2}]$$

حيث إن :

P_0 و P : قدرة المفاعل قبل وبعد الإخماد.

t_s : المدة الزمنية منذ إخماد المفاعل.

t_0 : المدة الزمنية لتشغيل المفاعل قبل إخماده.

(١٠,٤) انتشار حرارة الوقود

لقد تناولنا في بداية هذا الفصل موضوع انتقال الحرارة بالتوصيل في مادة صلبة خالية من مصدر داخلي للحرارة. وهذه الحالة تتناسب مثلاً مع انتقال الحرارة داخل

غلاف الوقود، لكنها لا تتناسب مع انتشار الحرارة داخل قضبان الوقود التي تحتوي على مصادر حرارية ناتجة عن التفاعلات النووية. وحساب انتشار الحرارة لهذه الحالة الأخيرة نفرض أن لدينا حجماً مادياً، v يحتوي على مصدر داخلي للحرارة في حالة مستقرة، مما يحتم تساوي كل من الحرارة المنتجة داخل الحجم v والحرارة المتدفقة خارجه. وهذا ما يُعبر عنه بالمعادلة الآتية:

$$\int_v \text{div } q'' \, dv = \int_v q''' \, dv \quad (10, 13)$$

$$\Rightarrow \text{div } q'' - q''' = 0$$

حيث إن:

$$-K \text{grad}(T) = \frac{q}{A} = q'' \quad (\text{W/sec.cm}^2) \text{ فيض التدفق الحراري}$$

$$q''' : \text{معدل الإنتاج الحراري لوحدة الحجم } (\text{W/sec.cm}^3)$$

عند تعويض فيض التدفق الحراري بقيمته السابقة تصبح معادلة انتشار الحرارة في وسط مادي يحتوي على مصدر داخلي للحرارة كما يلي:

$$\nabla^2 T + \frac{q'''}{K} = 0 \quad (10, 14)$$

حيث إن:

$$\nabla^2 T : \text{لبلاسيان درجة الحرارة، } (\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2})$$

$$K : \text{معامل التوصيل الحراري للمادة } (\text{W/m}^0\text{K}).$$

تُعرف هذه المعادلة بقانون "بواسون" وتستعمل لحساب توزيع الحرارة داخل قضبان الوقود المختلفة. وبشكل عام، فإن الحرارة المنتجة داخل الوقود تنتقل نحو الخارج في اتجاه طول نصف القطر سواء كانت القضبان على شكل ألواح، أو أسطوانية، وذلك بسبب ارتفاع درجة الحرارة كلما اقتربنا من مركز قضيب الوقود.

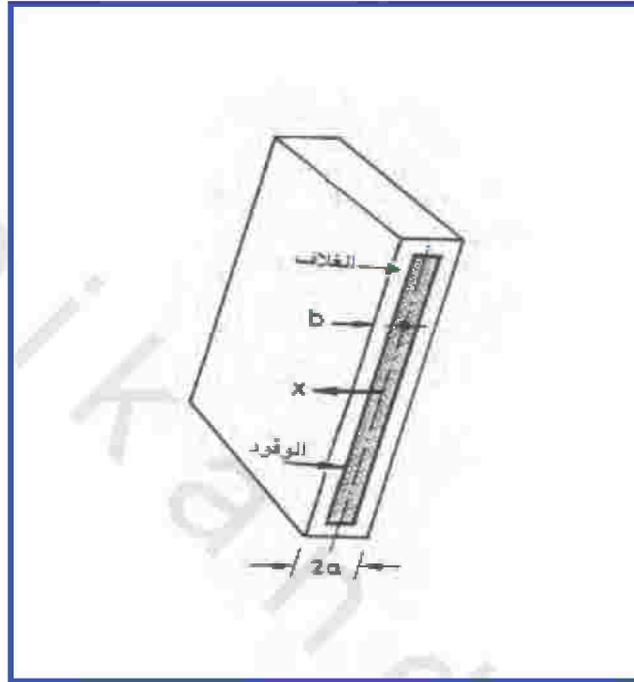
أما انتقال الحرارة من سطح القضيب وخلال الغلاف فتكون عن طريق التوصيل، الذي يحسب وفق قانون (فورير)، الذي سبق ذكره. ويوضح الجدول رقم (١٠،١) الخصائص الفيزيائية لبعض المواد المهمة التي تستخدم في صناعة الوقود النووي وسوائل التبريد في المفاعلات النووية.

الجدول رقم (١٠،١). الخصائص الفيزيائية لبعض المواد المهمة للمفاعلات النووية.

المادة	درجة الحرارة °C	الكثافة g/cm ³	معامل التوصيل الحراري w/cm ² K	ثابت التمدد m/m ³ K	السعة الحرارية J/Kg
ثاني أكسيد اليورانيوم-UO ₂	540-2700	10.4	.024	1.75x10 ⁻⁵	221
اليورانيوم الجرافيت-UC	540-1400	12.6	.130	1.08x10 ⁻⁵	140
الحديد غير قابل للصدأ-SST(304)	340	8.0	.163	1.73x10 ⁻⁵	325
الزركونيوم-Zr	340	6.44	.107	6.10x10 ⁻⁶	183
الماء عند ضغط ١٥٥ bars	300	0.72	.004	-	2930
الصدويوم	540	0.81	.542	-	698
الهيليوم	540	-	.002	-	-
غاز الانشطار-(Xe+Kr)	340	-	1.3x10 ⁻⁴	-	-

(١٠،٤،١) قضبان الوقود على شكل ألواح

إذا كان قضيب الوقود على شكل لوح سمكه يساوي 2a كما هو موضح في الشكل رقم (١٠،١)، فإن تدفق الحرارة يكون على حسب الاتجاه العمودي على المحور x، ويختلف انتشار الحرارة داخل الوقود عن انتشار الحرارة داخل الغلاف.



الشكل رقم (١٠،١). قضيب وقود نووي على شكل لوح [١٣].

(١٠،٤،١،١) توزيع الحرارة داخل الوقود

تتوزع الحرارة داخل لوح الوقود وفق قانون بواسون، الذي يكتب في هذه

الحالة على النحو الآتي:

$$(١٠،١٥) \quad \frac{d^2T}{dx^2} + \frac{q'''}{K_f} = 0$$

حيث إن:

K_f : معامل التوصيل الحراري للوقود.

الشروط الحدودية:

- أعلى درجة حرارة تكون في المركز $T(0) = T_m$

- نتيجة التماثل، حيث إن $\frac{dT}{dx} = 0$ عند $x = 0$

يؤدي تفاضل المعادلة السابقة (١٥، ١٥) مرتين واستعمال الشروط الحدودية

السابقة إلى الحصول على توزيع درجة الحرارة داخل الوقود على النحو الآتي:

$$(10, 16) \quad T = T_m - \frac{q'''}{2K_f} x^2$$

وعند تعويض المتغير x بنصف سمك اللوح a نحصل على درجة حرارة سطح

الوقود الآتية:

$$(10, 17) \quad T_s = T_m - \frac{q'''}{2K_f} a^2$$

يُفضل عادة كتابة هذه المعادلة على شكل تظهر فيه المقاومة الحرارية للوقود،

وذلك باستعمال العلاقة بين q و q''' الآتية:

$$q = q''' \cdot A \cdot a$$

(١٥، ١٨)

$$= \frac{T_m - T_s}{R_f} = \frac{T_m - T_s}{\left(\frac{a}{2K_f A}\right)}$$

حيث إن:

A و a : نصف مساحة وسمك لوح الوقود تتالياً.

$$: \frac{a}{2K_f A} = R_f \text{ المقاومة الحرارية للوقود.}$$

(١٠,٤,١,٢) توزيع الحرارة في الغلاف

يُصنع غلاف الوقود النووي عادة من مادة الزيركونيوم أو الحديد غير قابل الصدأ لما لهما من مواصفات حرارية جيدة بالإضافة إلى عدم التآكل. ويعمل الغلاف على حفظ المواد المشعة داخل الوقود ونقل الحرارة بالتوصيل. ولهذا تتوزع الحرارة في الغلاف وفق الحالة الخاصة لقانون بواسون ($q''' = 0$) الذي يكتب في هذه الحالة على النحو الآتي:

$$(10,19) \quad \frac{d^2T}{dt} = 0$$

بالشروط الحدودية الآتية:

- تساوي درجة الحرارة عند السطح الفاصل بين الوقود والغلاف $T(a) = T(s)$

- درجة حرارة السطح الخارجي لغلاف سمكه b تساوي $T_e = T(a+b)$

يؤدي تفاضل هذه المعادلة مرتين واستعمال الشروط الحدودية السابقة إلى

الحصول على توزيع درجة الحرارة في الغلاف على النحو الآتي:

$$(10,20) \quad T_{clad} = T_s - \frac{x-a}{b}(T_s - T_c)$$

يُفضل غالباً كتابة هذه المعادلة على شكل تظهر فيه المقامات الحرارية للوقود

والغلاف، وذلك باستعمال فرق درجات الحرارة وقانون فوريي على النحو الآتي:

$$(10,21) \quad q = \frac{T_m - T_c}{R_f} = \frac{T_m - T_c}{R_f + R_c}$$

حيث إن:

$$\frac{a}{2K_f A} = R_f$$

التوصيل الحراري ومساحة أحد جوانب الوقود تتالياً.

التوصيل الحراري للغلاف، $R_c = \frac{b}{K_c \cdot A}$: مقاومة التوصيل الحراري للغلاف، علماً أن K_c معامل

التوصيل الحراري للغلاف.

تجدر الإشارة إلى وجود فراغ صغير مملوء بغاز الهليوم بين الوقود والغلاف أحياناً؛ وذلك لاحتواء انتفاخ بعض أنواع الوقود تحت تأثير النيوترونات. وفي هذه الحالة تحتوي المقاومة الحرارية الإجمالية R_g السابقة على مقاومة إضافية ناتجة عن الغاز بين الوقود والغلاف.

$$(10, 22) \quad R_g = \frac{C}{K_g \cdot A}$$

حيث إن :

C : سمك الفراغ بين الوقود والغلاف.

K_g : معامل التوصيل الحراري للغاز.

(١٠، ٤، ٢) قضبان الوقود الأسطوانية

إذا كان لدينا قضيب وقود طويل أسطواناني الشكل نصف قطره يساوي a وحوله غلاف سمكه يساوي b كما هو موضح في الشكل رقم (١٠، ٢)، فإن تدفق الحرارة يكون في اتجاهات نصف القطر.

(١٠، ٤، ٢، ١) توزيع الحرارة في الوقود

تتوزع الحرارة داخل قضيب الوقود الذي له إنتاج حراري داخلي ثابت وفق قانون بواسون، الذي يكتب في هذه الحالة على النحو الآتي :

$$(10, 23) \quad \frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{q'''}{K_f} = 0$$

وبالشروط الحدودية السابقة نفسها (مثل الوقود على شكل لوح ...)

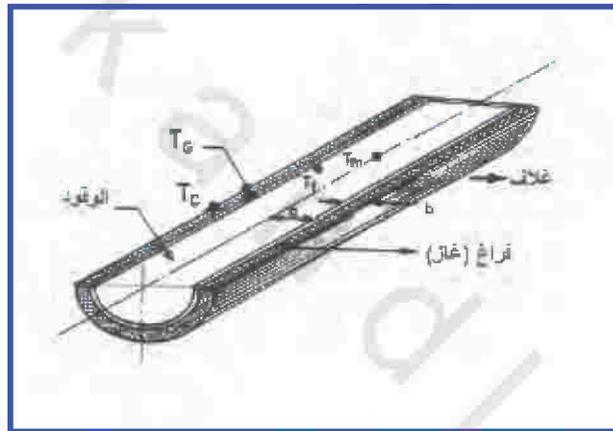
$$T(0) = T_m \quad \bullet$$

$$x=0 \quad ; \quad \frac{dT}{dx} = 0 \quad \bullet$$

وعند تكامل هذه المعادلة واستعمال هذه الشروط الحدودية نحصل على الحل

النهائي الذي يمثل توزيع الحرارة في الوقود:

$$(١٠,٢٤) \quad T_{fuel} = T_m - \frac{q''' r^2}{4K_f}$$



الشكل رقم (١٠,٢). قضيب وقود نووي أسطواني الشكل.

يمكن أيضاً كتابة هذه المعادلة على شكل تظهر فيه المقاومة الحرارية للوقود،

وذلك باستعمال درجة حرارة سطح الوقود T_c عند $r=a$ والعلاقة بين q''' و q الآتية:

$$(١٠,٢٥) \quad q = \pi a^2 H q'''$$

$$= \frac{T_m - T_S}{R_f} = \frac{T_m - T_S}{\left(\frac{1}{4K_f \pi H}\right)}$$

حيث إن :

K_f : معامل التوصيل الحراري للوقود.

H : طول قضيب الوقود (ارتفاع المفاعل).

(٢, ٢, ٤, ١٠) توزيع الحرارة في الغلاف

تتوزع الحرارة داخل الغلاف (cladding) حسب قانون بواسون الخاص ($q''' = 0$)، الذي يكتب في هذه الحالة وفق الإحداثيات الأسطوانية على النحو الآتي :

$$(10, 26) \quad \frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = 0 \Rightarrow T_{clad} = C_1 L_n(r) + C_2$$

تُحدد قيم الثابتين C_1 و C_2 باستعمال الشروط الحدودية، كما هو الحال بالنسبة للوقود على شكل لوح، فنحصل على الحل النهائي للمعادلة السابقة، الذي يمثل توزيع الحرارة في الغلاف على النحو التالي :

$$(10, 27) \quad T_{clad} = (T_s - T_c) [L_n(a) - L_n(r)] \frac{b}{a} + T_s$$

حيث إن :

$$L_n\left(1 - \frac{b}{a}\right) \approx \frac{b}{a}$$

T_s و T_c : درجة حرارة سطح الوقود والغلاف تتالياً.

يمكن أيضاً كتابة هذه المعادلة بشكل تظهر فيه المقاومات الحرارية للوقود والفراغ

والغلاف باستعمال فرق درجات الحرارة وقانون فورييه على النحو الآتي :

$$(10, 28) \quad q = \frac{T_m - T_c}{R_f} = \frac{T_m - T_c}{R_f + R_G + R_c}$$

حيث إن :

$$R_f = \frac{1}{4\pi K_f} \text{ : مقاومة التوصيل الحراري للوقود.}$$

$$R_G = \frac{c}{2\pi H K_c} \text{ : مقاومة التوصيل الحراري لغاز الفراغ الذي سمكه}$$

يساوي c بين الغلاف والوقود.

$$R_c = \frac{b}{2\pi a H K_c} \text{ : مقاومة التوصيل الحراري للغلاف.}$$

(٣، ٤، ١٠) تغير تدفق حرارة قضبان الوقود

لقد افترضنا في الحسابات السابقة أن تدفق الحرارة الصادرة في قضيب الوقود ثابت، لكن في واقع الأمر أن هذا التدفق يتغير حسب الموقع العمودي لأجزاء الوقود بسبب تغير فيض النيوترونات. وبما أن فيض النيوترونات الأفقي ثابت تقريبا خلال قطر قضيب الوقود، فيمكن كتابة معادلة التدفق الحراري (٩، ١٠) على النحو الآتي :

$$q'''(Z) = q'''_{\max} \cos\left(\frac{\pi Z}{H}\right) \quad (١٠، ٢٩)$$

يُمكن الحصول على فيض تدفق الحرارة حسب الموقع لقضبان الوقود الأسطوانية. واستعمال العلاقة الآتية :

$$q''(Z) = \frac{V}{A} q'''(Z) \\ = \frac{a^2}{2(a+b)} q'''(Z) \quad (١٠، ٣٠)$$

يُفضل أحيانا كتابة معادلة فيض تدفق الحرارة بدلالة فرق درجات الحرارة السابقة حسب الموقع على النحو الآتي :

$$q'''(Z) = \frac{q}{A} = \frac{T_m(Z) - T_c(Z)}{2\pi(a+b)H.R_f} \quad (١٠، ٣١)$$

حيث إن:

A و H : الارتفاع والمساحة الخارجية لقضيب الوقود الأسطواني.
 $R_c + R_f = R_r$: المقاومة الإجمالية للوقود والغلاف.

(١٠,٥) انتقال الحرارة إلى المبرد (الحالة السائلة)

تنتقل الحرارة من سطح غلاف الوقود الساخن إلى سائل التبريد عن طريق الحمل الحراري الذي يخضع لقانون نيوتن، الذي سبق شرحه في بداية هذا الفصل. ويتطبيق هذا القانون يمكن كتابة معدل تدفق الفيض الحراري على سائل التبريد على النحو الآتي:

$$(10,32) \quad q'' = h(T_c - T_l)$$

حيث إن:

h : معامل الانتقال الحراري لسائل التبريد.

T_c و T_l : درجة حرارة غلاف الوقود وسائل التبريد تتالياً.

(١٠,٥,١) التوزيع العرضي للحرارة

تتناقص درجة الحرارة من القيمة القصوى في وسط قضبان الوقود تجاهاً إلى المبرد تحت تأثير المقاومة الحرارية لمختلف طبقات الوقود. وباستعمال فرق درجة حرارة الغلاف والمبرد والمقاومات الحرارية نحصل على معادلة فرق درجات الحرارة الآتية:

$$(10,33) \quad q = \frac{T_m - T_l}{R_r} = \frac{t_m - t_l}{R_f + R_c + R_l}$$

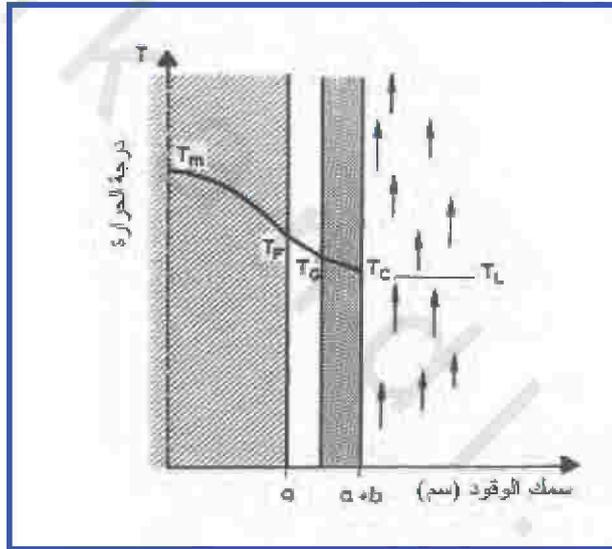
حيث إن:

مقاومة التوصيل الحراري للوقود الأسطواني الشكل: $\frac{1}{4\pi H K_f} = R_f$

مقاومة التوصيل الحراري للغلاف: $\frac{b}{2\pi a H K_c} = R_c$.

مقاومة التوصيل الحراري للمبرد: $\frac{1}{2\pi(a+b)Hh} = R_l$.

يُوضح الشكل رقم (١٠،٣) توزيع درجة الحرارة خلال مختلف طبقات الوقود الأسطواناني الشكل وخلال الغلاف والمبرد، وذلك برسم دوال المعادلات السابقة (١٠،٢٦)، (١٠،٢٨) و(١٠،٣٣).



الشكل رقم (١٠،٣). توزيع درجة الحرارة خلال مختلف طبقات الوقود والمبرد [١٦].

(١٠،٥،٢) معامل الانتقال الحراري

تعتمد قيمة معامل الانتقال الحراري على الخصائص الفيزيائية لسائل التبريد ومعدل الجريان والقطر المكافئ للقناة التي ينتقل فيها السائل. وعندما يحافظ السائل على حالته الأصلية ولا يصل إلى مرحلة الغليان أثناء امتصاص الحرارة من السطح

الساخن تُختصر حينئذ أنواع الجريان إلى نوعين فقط. ويعرف الأول بالجريان الصفحي الذي يتميز بتحرك منتظم للسائل في اتجاه موازٍ للسطح وتنتقل الحرارة حينذاك بالتوصيل خاصة. ويُعرف الثاني بالجريان المضطرب الذي يتميز بتحرك مضطرب للسائل ليس في الاتجاه الموازي فقط، بل في الاتجاهات نصف القطرية أيضاً. أما النقل الحراري في هذه الحالة وبالنسبة للسوائل غير المعدنية فيكون خاصة بالحمل وذا كفاءة عالية كلما زادت قدرة ضخ السائل في القناة.

يمكن معرفة نوع جريان السائل بمجرد تحديد قيمة ما يُسمى بعدد (رينولس) "Reynolds" الخاص به، الذي يُعبر عنه بالمعادلة الآتية:

$$R_e = \frac{D_e \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad (10,34)$$

حيث إن:

v: معدل سرعة السائل في القناة.

ρ : كثافة السائل.

μ : لزوجة السائل.

$\frac{4.S}{W} = D_e$: القطر المكافئ للقناة، علماً بأن s و w يمثلان مساحة المقطع

العرضي والمحيط الفعلي للقناة تتالياً.

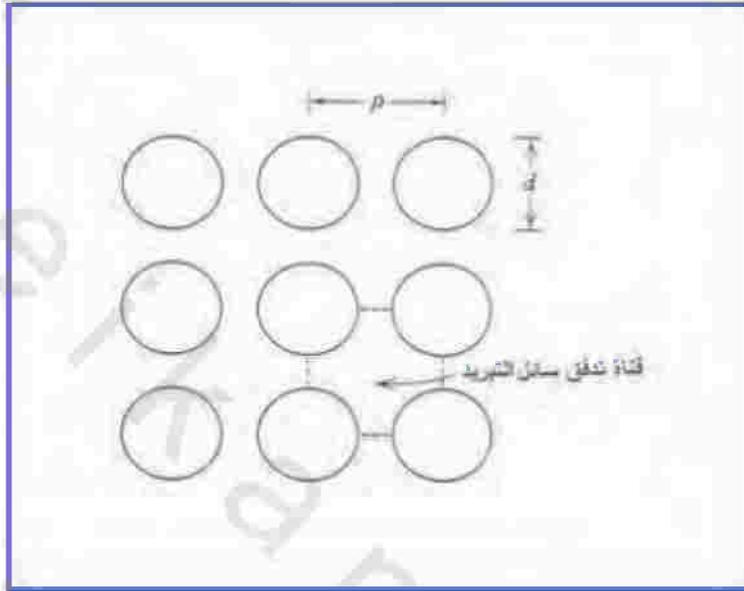
تجدر الإشارة إلى أن القطر المكافئ لقناة على شكل أنبوب أسطواني نصف

قطره a يساوي $D_e = 2a$. لكن عندما تكون القناة على شكل مربع في أركانه قضبان

وقود أسطوانية، كما هو موضح في الشكل رقم (١٠،٤)، فإن القطر المكافئ له

المعادلة الآتية:

$$D_e = d \times \left[\frac{4}{\pi} \times \left(\frac{P}{d} \right)^2 - 1 \right] \quad (10,35)$$



الشكل رقم (١٠،٤). شبكة مربعة لقضبان الوقود.

لقد تبين عملياً أن جريان جل السوائل يمكن تعريفه وفق قيم عدد رينولس

الآتية :

أولاً: $2100 \geq R_e$: جريان صفيحي.

ثانياً: $10^4 < 2100$: خليط من الجريان الصفيحي والمضطرب.

ثالثاً: $10^4 \leq R_e$: جريان مضطرب فقط.

يستخدم نظام التبريد لجل مفاعلات الماء مضخات ذات قدرة عالية لتدوير سائل

التبريد والحصول على كفاءة عالية لنقل الحرارة من قلب المفاعل. ولهذا؛ فإن جريان

السائل يكون مضطرباً في أغلب الأحيان، كما هو الحال في مفاعلات الماء المضغوط

(PWR). ويحسب معامل الانتقال الحراري بالحمل h في هذه الحالة وفق المعادلة الآتية :

$$(١٠,٣٦) \quad h = \frac{D_e}{K} \cdot Nu$$

حيث إن:

D_e و K : القطر المكافئ للقناة ومعامل التوصيل للمبرد تتالياً.

Nu : عدد "نيوسلت" (Nussle)، الذي يبين الخصائص الفيزيائية، وحركة

جريان سائل التبريد.

وهكذا نلاحظ أن عدد "نيوسلت" (Nu) مرتبط بعدد "رينولس" (Re)، الذي

يحدد نوع الجريان. أما عدد "برانتل" (Prandtl)، فهو يبين الخصائص الفيزيائية فقط

للسائل، ويعرف هذا الأخير بالمعادلة الآتية:

$$(١٠,٣٧) \quad P_r = \frac{(\mu \cdot C_p)}{K}$$

حيث إن:

μ و C_p : اللزوجة والحرارة النوعية للسائل تتالياً.

K : معامل التوصيل الحراري لسائل التبريد.

تجدر الإشارة إلى اختلاف معادلتين عدد "نيوسلت" حسب السوائل المستعملة:

أولاً: السوائل المعدنية

$$(١٠,٣٨) \quad N_u = a + b(R_e \cdot P_r)^m$$

ثانياً: السوائل الأخرى

$$(١٠,٣٩) \quad N_u = C \cdot R_e^m \cdot P_r^n$$

علماً أن a و b و c و m و n ثوابت تحددها خصائص السائل وظروفه التجريبية، كما هو

موضح في الجدول رقم (١٠,٢) الآتي:

الجدول رقم (١٠،٢). ارتباط الأعداد الفلانة الأساسية لانتقال الحرارة [١٢].

الحالة	عدد نيوست (Nu)	المادة (عدد برانتل: Pr)
فيض الحرارة ثابت	$6.3+0.03(Re.Pr)^{0.8}$	المعادن السائلة ($Pr < 0.1$)
الحرارة ثابتة	$4.8+0.03(Re.Pr)^{0.8}$	
فيض الحرارة ثابت	$0.022Pr^{0.6}.Re^{0.3}$	($0.5 < Pr < 0.1$)
الحرارة ثابتة	$0.021Pr^{0.6}.Re^{0.2}$	
-	$0.023Pr^{0.4}.Re^{0.3}$	الماء والسوائل الخفيفة ($1.0 < Pr < 20$)
-	$0.0118Pr^{0.3}.Re^{0.9}$	الزيوت والمواد اللزجة ($Pr > 20$)

(١٠،٥،٣) التوزيع الطولي لحرارة قناة التبريد

يدخل سائل التبريد قناة التبريد في أسفل قلب المفاعل ثم يبدأ في امتصاص الحرارة أثناء الصعود حتى يصل إلى مخرج قناة التبريد في أعلى المفاعل. ولحساب التوزيع الطولي لحرارة قناة التبريد نكتب أولاً معادلة التناسب بين ارتفاع درجة حرارة المبرد dT_n وكمية الحرارة الناتجة طوال الجزء dz لقضيب الوقود الآتية:

$$dq = w.C_p.dT_f = q'' A_f dZ \quad (10, 40)$$

حيث إن:

$$W = \rho.A_c.v : \text{معدل جريان السائل في القناة.}$$

$$C_p : \text{الحرارة النوعية لسائل التبريد.}$$

$$A_f : \text{مساحة المقطع العرضي للوقود } (V_f = A_f dZ).$$

يُمكن الآن تكامل المعادلة السابقة (١٠،٤٠) للحصول على التوزيع الطولي لحرارة أسخن قناة، التي توجد في وسط قلب المفاعل، وذلك على النحو الآتي:

$$(١٠,٤١) \quad T_{\beta}(z) = \int_{\frac{z}{2}}^{\frac{H}{2}} \frac{q''' \cdot A_f}{W \cdot C_p} dz = \frac{A_f}{W \cdot C_p} q'''_{\max} \int_{\frac{z}{2}}^{\frac{H}{2}} \cos\left(\frac{\pi Z}{H}\right) dz$$

يُحدد ثابت هذا التكامل وفق الشرط الحدودي، وذلك بحساب أن درجة حرارة دخول المبرد في القناة ثابتة، وتساوي T_0 وعند استعمال هذا الشرط نحصل على الحل النهائي الآتي:

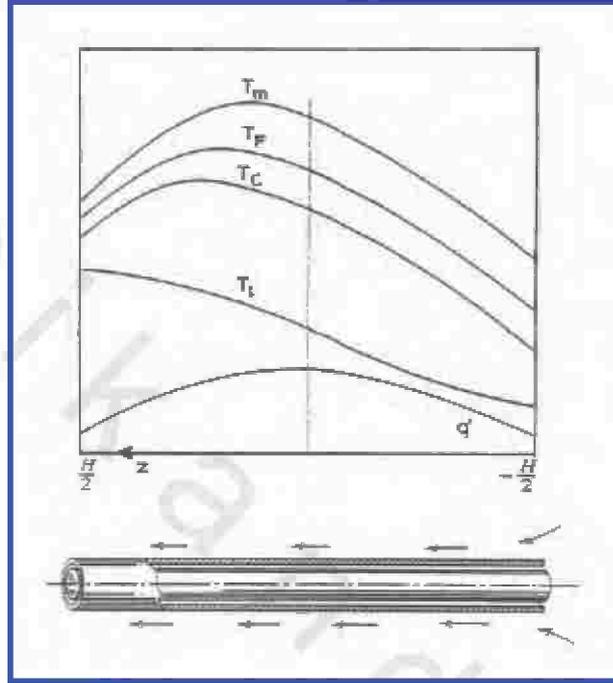
$$(١٠,٤٢) \quad T_{\beta}(Z) = T_0 + \frac{q'''_{\max} \cdot V_f}{\pi \cdot W \cdot C_p} \times [1 + \sin\left(\frac{\pi \cdot Z}{H}\right)]$$

تُظهر المعادلة السابقة أن أعلى درجة حرارة يصلها المبرد تكون في أعلى قناة الوسط ($z = H$ و $r = 0$). وكذلك الحالة بالنسبة للقنوات الأخرى حيث إن أعلى درجة حرارة تكون أيضاً في أعلى القناة، وتختلف عن درجة الحرارة القصوى التي في الوسط ($r = 0$) بقيمة عامل الضرب $J_0 (2.405 r/R)$ التي تتناسب مع مسافة بعد القناة في وسط المفاعل.

تجدر الإشارة إلى إمكانية استنتاج فرق درجات حرارة سطح الغلاف T_c ووسط الوقود T حسب الموقع، وذلك باستعمال معادلة درجة الحرارة الوقود (١٠,٤٢) والمقاومات الحرارية. وعلى سبيل المثال، فإن تغيير درجة حرارة الغلاف تُحسب وفق المعادلة الآتية:

$$(١٠,٤٣) \quad (T_c - T_{\beta}) = \frac{q'''_{\max}}{h} \cdot \frac{A_f}{A_c} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot Z}{H}\right)$$

يُوضح الشكل رقم (١٠,٥) التوزيع الطولي لدرجات حرارة كل من الوقود والغلاف وسائل التبريد.



الشكل رقم (١٠،٥). التوزيع الطولي لدرجات حرارة الوقود والمبرد [١٦].

(١٠،٦) انتقال الحرارة إلى المبرد (مرحلة الغليان)

عندما يسمح ماء تبريد المفاعلات النووية بالوصول إلى مرحلة الغليان تتحقق بعض المزايا أهمها الكفاءة العالية في نقل درجة حرارة الوقود إلى المبرد، ثم عدم الحاجة للضغط العالي للمحافظة على الحالة السائلة للمبرد. ويستخدم الماء العادي بكثرة لتبريد المفاعلات لما له من وفرة في العديد من الأماكن وخصائص فيزيائية مميزة في نقل الحرارة إلى آخره. ويكون ماء التبريد في أغلب الأحيان في الحالة السائلة حتى لو اقتضى الأمر إلى ضغطه، كما هو الحال بالنسبة لمفاعلات الماء المضغوط (PWR). كذلك

يسمح أحياناً لماء التبريد بالغليان في أعلى المفاعل ، كما هو الحال بالنسبة لمفاعلات الماء المغلي (BWR). ولا يُسمح في كل المفاعلات أن يصل فيض التدفق الحراري في أي نقطة إلى مستوى تكوين غشاء من البخار حول سطح غلاف الوقود؛ ذلك لأن هذا الغشاء يصبح حاجزاً لامتناهات الحرارة، مما يؤدي إلى ارتفاع شديد في حرارة الغلاف وربما إلى إتلاف الوقود. وتسمى هذه الحالة بأزمة الغليان (DNB)، التي يجب تجنبها في كل مراحل التشغيل لسلامة المحطة والبيئة.

(١٠, ٦, ١) مراحل الغليان

يُوضح الشكل رقم (١٠, ٦) الرسم البياني لتغير فيض تدفق الحرارة من سطح ساخن بدلالة فرق درجة حرارة السطح ومعدل درجة حرارة السائل. ونلاحظ في هذا الرسم مناطق مختلفة للانتقال الحراري، يمكن تصنيفها كما يلي:

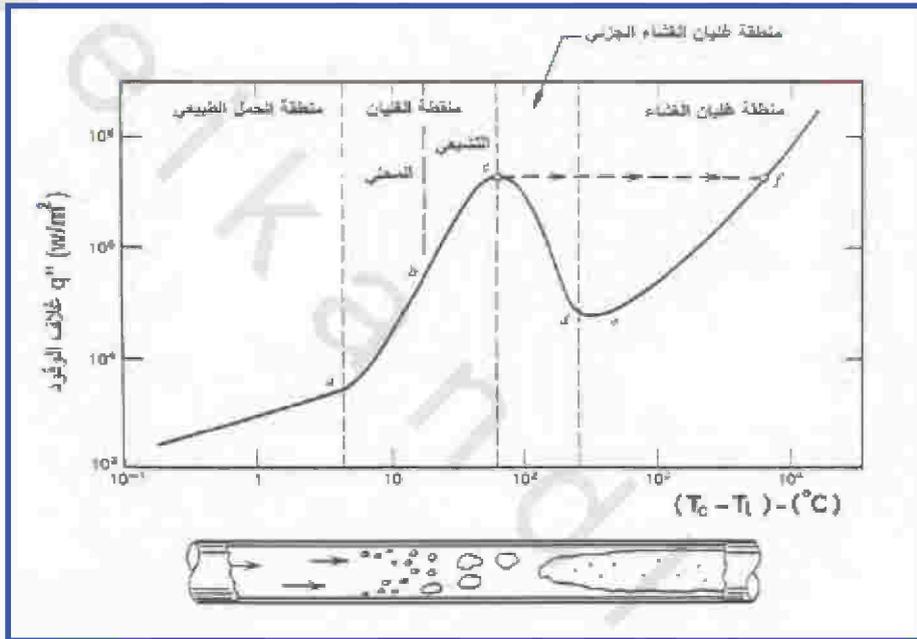
أولاً: منطقة الحمل الطبيعي: يحافظ المبرد فيها على الحالة السائلة، وتنتقل حرارة السطح الساخن إلى المبرد عن طريق الحمل الطبيعي.

ثانياً: منطقة الغليان المحلي: تتكون محلياً حول السطح الساخن فقاعات من البخار سرعان ما تغادره بسبب الاضطرابات فتختفي وتنتقل داخل المبرد. هذه المنطقة لها كفاءة عالية في نقل الحرارة وهي منطقة تشغيل مفاعلات الماء المضغوط (PWR).

ثالثاً: منطقة الغليان الحقيقي (التشبعي): تتكاثر وتكبر الفقاعات مغادرة السطح الساخن، لكنها لا تتكثف بسرعة هذه المرة لرفع درجة حرارة السائل بل تتصاعد لتكوين البخار. هذه المنطقة لها كفاءة أيضاً لنقل الحرارة، وهي منطقة تشغيل مفاعلات الماء المغلي (BWR).

رابعاً: منطقة غليان الغشاء الجزئي: تتكاثر الفقاعات بسرعة وتلتصق بالسطح الساخن، وتبدأ في تكوين غشاء (فيلم) من البخار حول السطح. ويعمل هذا الغشاء كحاجز لنقل الحرارة مما يسبب انخفاضاً كبيراً في كفاءة النقل الحراري.

خامساً: منطقة غليان الغشاء: يتكون غشاء كامل من البخار حول السطح الساخن، وعلى الرغم من أن هذا الغشاء موصل غير جيد للحرارة، إلا أن فيض التدفق الحراري يبدأ في التزايد من جديد بسبب انتقال حرارة السطح بالإشعاع.



الشكل رقم (١٠,٦). تغير فيض التدفق الحراري حسب فرق درجات حرارة السطح الساخن وسائل التبريد [١٦].

(١٠,٦,٢) أزمة الغليان

تُعرف أزمة الغليان أو الاحتراق (DNB) بوصول فيض التدفق الحراري إلى النقطة c في الشكل رقم (١٠,٦)، أو القيمة q_c'' المخرجة بسبب ارتفاع حرارة السطح الساخن. وتتميز هذه الحالة بانخفاض مفاجئ في كفاءة النقل الحراري بسبب تكاثر

فقاعات البخار حول السطح واندماجها، وبداية تكوين غشاء يعمل كحاجز لنقل الحرارة. وترتفع حينذاك درجة حرارة غلاف الوقود إلى مستوى عالٍ جداً مما يسبب ربما إتلافه وذوبانه جزئياً للوقود؛ ولهذا يجب تفادي حدوث أزمة الغليان هذه في كل مناطق المفاعل وفي كل مراحل تشغيله.

تجدر الإشارة إلى أن أزمة الغليان لا تقتصر على مرحلة الغليان الحقيقي فقط الخاص بمفاعلات الماء المغلي (BWR) بل تشمل أيضاً مفاعل الماء المضغوط (PWR) أيضاً. ذلك؛ لأن تصاعد الفقاعات عند غلاف الوقود وتغير الضغط الناتج في بعض الأماكن يؤدي إلى أزمة غليان عندما يقترب فيض التدفق الحراري من القيمة الحرجة q_c ، وتوجد عدة حسابات تقريبية لتقدير q_c ، إلا أنه من الصعب اختزال هذه الحسابات في معادلة واحدة لاختلاف الظروف التجريبية.

(١٠،٦،٣) فرق درجات حرارة الغلاف والمبرد

يُحسب فرق درجات حرارة غلاف الوقود والمبرد للمنطقة الأولى في الشكل رقم (١٠،٦) وفق قانون (نيوتن)، واستعمال عدد (نوسلت) المناسب لنمط جريان المبرد. ونحصل عندئذٍ على المعادلة الآتية:

$$(10, 44) \quad (T_c - T_{fi}) = \frac{q'''}{h} = q''' \frac{K}{D_e \cdot Nu}$$

حيث إن:

q''' و K : فيض التدفق الحراري ومعامل التوصيل الحراري للمبرد تتالياً.

De و Nu : القطر المكافئ للقناة وعدد نوسلت للجريان تتالياً.

عندما تصل درجة حرارة سطح الغلاف إلى درجة حرارة تشبع المبرد يصبح قانون نيوتن غير صحيح؛ لأن العلاقة بين تدفق الفيض الحراري وفرق درجات الحرارة لم تعد خطية، كما هو الحال للمناطق ١ و ٢ في الشكل رقم (١٠،٦).

ولهذا تُستعمل معادلة (جينس ولوتس)، (Jens & Lottes) شبه التجريبية الآتية لحساب فرق درجات حرارة سطح غلاف الوقود والمبرد لكل من مفاعلات الماء المضغوط والمغلي.

$$(10, 45) \quad (T_c - T_{fl}) = 45 \times \exp\left(-\frac{P}{62}\right) (q'')^{0.25}$$

حيث إن:

P: ضغط المبرد في القناة بوحدة البار.

q'': فيض التدفق الحراري بوحدة MW/m².

(10, 6, 4) درجة حرارة الغليان المحلي

يمكن حساب درجة حرارة المبرد التي تبدأ منها مرحلة الغليان المحلي، T_{LB} ثم حساب درجة حرارة سطح غلاف الوقود، ومن ثم تحديد موقف هذه المرحلة في القناة. وذلك باستنتاج درجة حرارة المبرد في العلاقة (10, 40) كما يلي:

$$(10, 46) \quad T_{fl} = T_c - \frac{q''}{h}$$

نعوض بعد ذلك T_c بقيمتها المستنتجة من المعادلة (10, 46) واعتبار درجة حرارة المبرد تساوي درجة حرارة التشبع (T_{fl} = T_{sat})، وعند التعويض في المعادلة السابقة نحصل على النتيجة الآتية:

$$(10, 47) \quad T_{LB} = T_{sat} + 45 \times \exp\left(-\frac{P}{62}\right) (q'')^{0.25} - \frac{q''}{h}$$

حيث إن:

T_{LB}: درجة حرارة المبرد الذي تبدأ منه مرحلة الغليان المحلي.

S_{sat}: درجة حرارة تشبع المبرد.

تجدر الإشارة إلى أن مرحلة الغليان الحقيقي في آخر القناة تتميز بثبوت درجة حرارة المبرد عند درجة حرارة التشبع ، وكل حرارة إضافية تساهم في زيادة إنتاج كمية البخار فقط.

(١٠،٧) التصميم الحراري للمفاعلات

لقد شرحنا في الفصول السابقة بعض المعايير والقوانين الفيزيائية والنووية والاقتصادية في اختيار المواد اللازمة عند تصميم المفاعلات النووية. وسندرس الآن بعض المعايير الحرارية للمحافظة على سلامة المحطة الخاصة. ومن بين هذه المعايير ألا تتجاوز درجة حرارة الوقود في أي نقطة في قلب المفاعل درجة حرارة انصهار الوقود مما يسبب إتلافه وإتلاف الغلاف ثم التلوث الإشعاعي. كذلك ألا يتجاوز فيض التدفق الحراري القيمة التي تسبب تمدداً كبيراً للوقود أو الحصول على أزمة الغليان (DNB) مما يسبب تشقق الغلاف ثم التلوث الإشعاعي للمبرد. هذه المعايير يمكن التعبير عنها بطرائق مختلفة ، وبشكل عام لا يسمح لوقود ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2) أن تتجاوز درجة حرارته $2482^{\circ}C$ ، علماً أن درجة حرارة انصهاره تتراوح بين 2770 و 2815 . أما وقود معدن اليورانيوم ، فلا يسمح أن تتجاوز درجة حرارته $399^{\circ}C$ على الرغم من أن درجة حرارة انصهاره تساوي $788^{\circ}C$ وذلك ؛ لأنه يفقد بعض خصائصه ابتداءً من 668 درجة. وعند استعمال قيم التدفق الحراري يمكن التعبير عن هذه المعايير أو الحدود كما يلي :

- وقود ثاني أكسيد اليورانيوم UO_2

$$q'(r) < q'_{\max} [= 660 \text{ W/cm}]$$

- سطح غلاف الوقود (مفاعلات PWR)

$$q''(r) < q''_{DNB} [= 300 \text{ W/cm}^2]$$

(١٠,٧,١) نسبة أزمة الغليان

يُفضل أثناء التصميم عدم الدخول في الحسابات التفصيلية لتحليل الحراري للمفاعلات والاكتفاء ببعض المعايير الحرارية العامة، ومن بين هذه المعايير البسيطة ما يسمى بنسبة أزمة الغليان التي تُعرف بالمعادلة الآتية:

$$DNBR = \frac{q''_{DNB}(Z)}{q''(Z)} \quad (١٠,٤٨)$$

حيث إن:

$q''_{DNB}(Z)$: فيض التدفق الحراري الحرج الذي يسبب احتراق غلاف الوقود، وذلك عند تكوين غشاء بخاري حوله مما يحد من كفاءة التبريد في تلك المنطقة.

$q''(Z)$: فيض التدفق الحراري في القناة نفسها وعند الموقع نفسه.

يُستعمل معيار نسبة أزمة الغليان للحفاظ على سلامة غلاف الوقود، وذلك بالحد من فيض التدفق الحراري وعدم الوصول على منطقة الاحتراق. ولتحقيق ذلك يجب ألا تقل نسبة أزمة الغليان عن أي قيمة يصلها فيض التدفق الحراري طوال القناة وفي كل ظروف تشغيل المفاعل. ولسلامة مفاعلات الماء يُنصح أن تكون قيمة نسبة أزمة الغليان $DNBR > 1.3$ بالنسبة لمفاعلات PWR و $DNBR > 1.9$ بالنسبة لمفاعلات BWR. يوضح الشكل رقم (١٠,٧) الرسم البياني لنسبة أزمة الغليان وفيض التدفق الحراري لمفاعل تتوافر فيه شروط السلامة.

(١٠,٧,٢) عامل القناة الساخنة

يُعدُّ عامل القناة الساخنة أحد الحدود المهمة الذي يُحسب أثناء التصميم ويجب أخذه في الحسبان لسلامة المحطة. ويشير هذا العامل إلى وجود قناة وسط قلب المفاعل المبرد بالماء أو الغاز يصل فيها فيض التدفق الحراري القيمة القصوى نتيجة مؤثرات عديدة. ومن بين هذه المؤثرات توزيع فيض النيوترونات، وأبعاد قضبان الوقود، ونسبة الخصوبة، والخصائص النووية والفيزيائية للمواد المُستعملة في قلب المفاعل إلى آخره. ويُعرف عامل القناة الساخنة بما يسمى أحياناً بالنقطة الساخنة التي تُعرف بالمعادلة الآتية:

$$F = q \frac{q''_{\max}}{q''_{av}} \quad (١٠,٤٩)$$

حيث إن:

q''_{\max} : فيض التدفق الحراري الأكبر في قلب المفاعل.

$\frac{P}{A} = q''_{av}$: متوسط فيض التدفق الحراري، علماً أن P تمثل القدرة الحرارية

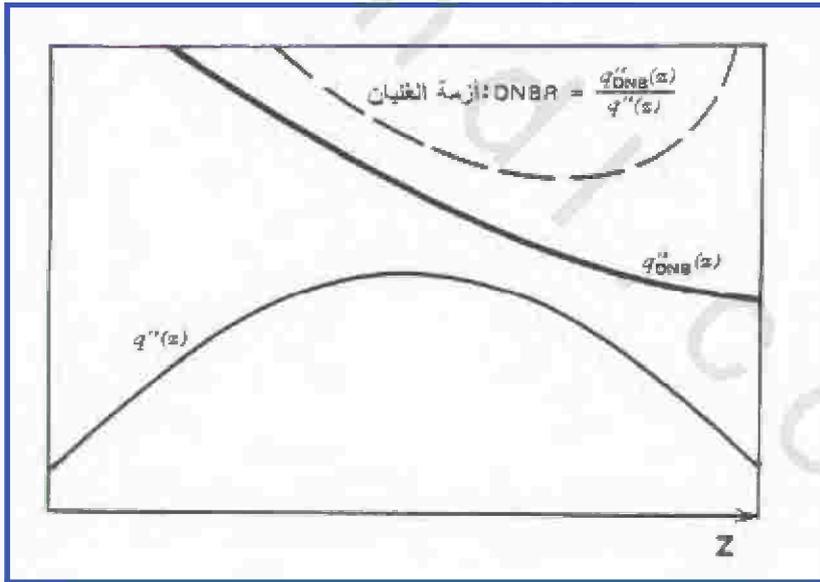
للمفاعل، و A تمثل المساحة الإجمالية للتبادل الحراري (المساحة الإجمالية لغلاف الوقود).

ينقسم عامل القناة الساخنة إلى عوامل فرعية حسب المؤثرات، لكن أهمها

العامل النووي Fq''^N الناتج عن توزيع فيض النيوترونات داخل المفاعل، وكذلك

العامل الهندسي Fq''^E الناتج عن المواد المستعملة والتغيرات الإحصائية المسموح بها

صناعياً لأبعاد تلك المواد وخصائصها.



الشكل رقم (١٠,٧). نسبة أزمة الغليان وفيض التدفق الحراري [١٦].

(١٠,٧,٢,١) عامل القناة الساخنة النووي (F_q^N)

يتناسب عامل القناة الساخنة النووي مع نسبة أفياض النيوترونات مما يسمح بتقسيم هذا العامل إلى جزء أفقي وجزء عمودي وفق المعادلة الآتية:

$$(١٠,٥٠) \quad F_q^N = F_q^N(r) \cdot F_q^N(Z) \approx \frac{\phi_{\max}}{\phi_{av}}$$

لقد سبق أن حسبنا نسبة أفياض النيوترونات بالتفصيل لمفاعل أسطواناني متجانس في الفصل الخامس ووجد أن هذه النسبة تساوي 3.64، لكن عندما يكون المفاعل غير متجانس تماماً كما هو الحال في الواقع بسبب وجود قضبان التحكم والعاكس إلى آخره، نجد أن تلك النسبة تساوي 2.6 فقط. ولهذا؛ فإننا نعد عامل القناة الساخنة النووي بالنسبة لمفاعلات الماء المضغوط (PWR) يساوي أيضاً هذه القيمة الأخيرة ($F_q^N = 2.6$).

(١٠,٧,٢,٢) عامل القناة الساخنة الهندسي

يحتوي عامل القناة الساخنة الهندسي على مجموعة من العوامل الفرعية الناتجة عن التغيرات الإحصائية التي تسمح بها مراقبة الجودة الصناعية للمواد المكونة للمفاعل. هذه التغيرات البسيطة في الكثافة، ونسبة خصوبة أقراص الوقود، وأبعاد قضبان الوقود، والتحكم، وقنوات التبريد، إلى آخره، لها تأثير في حساب القيمة القصوى لفيض التدفق الحراري. ولهذا؛ فإن حساب هذا العامل الهندسي يعتمد خاصة على قياسات تجريبية باعتبار مستوى الثقة يساوي 99% ($\pm 3\sigma$). ولقد تبين تجريبياً أن عامل القناة الساخنة الهندسي لمفاعلات القدرة (PWR) الحديثة يساوي حوالي 1.03 مما يجعل عامل القناة الساخنة لهذا النوع من المفاعلات يساوي ما يلي:

$$(١٠,٥١) \quad F = F_q^N \times F_q^E = 2.6 \times 1.03 \approx 2.68$$

حيث إن :

F_q^N : عامل القناة الساخنة النووي.

F_q^E : عامل القناة الساخنة الهندسي.

(١٠,٧,٣) التصميم الحراري للمفاعل

يؤدي التداخل الطبيعي بين العوامل النووية والحرارية أثناء تصميم المفاعل إلى البحث عن توافق بين هذه العوامل بحيث تتحقق سلامة المحطة والفائدة الاقتصادية في وقت واحد. وتستدعي الحسابات المعقدة لفيض النيوترونات، وتوزيع القدرة، وديناميكا المفاعل، ونقل الحرارة إلى استعمال أكثر من كود ومساعدة الحاسب الآلي. وعادة ما يبدأ التصميم باختيار نوع المفاعل والقدرة الحرارية المنتجة، ومن ثم اختيار نوع الوقود والمكونات الأخرى للمفاعل. وبعد ذلك تُختار أبعاد خلايا عناقيد قضبان الوقود ثم بداية الحسابات المبسطة لفيض النيوترونات وفيض التدفق الحراري وقدرة المفاعل. ثم تُدخل نتيجة هذه الحسابات في الكود الذي يعيد الحسابات من جديد للحصول على نتائج أكثر دقة، وتتكرر هذه الحسابات لمختلف المستويات النووي والحراري. وعندما تتضح معالم تصميم المفاعل تدخل ضوابط السلامة، مثل نسبة أزمة الغليان (DNBR)، وعامل القناة الساخنة في الحسابات، واستنتاج أبعاد المفاعل، وكمية الوقود الأفضل اقتصادياً من خلال حسابات العوامل النووية والحرارية. فمثلاً يمكن حساب عدد قضبان الوقود اللازمة لتشغيل مفاعل نووي بمجرد تحديد أبعاد تلك القضبان والقدرة الحرارية للمفاعل والقيمة القصوى لفيض التدفق الحراري وعامل القناة الساخنة، وذلك باستعمال المعادلة الآتية :

$$N = \frac{P_{(wf)} \cdot F}{a \cdot q_{\max} \cdot C} \quad (10,52)$$

حيث إن :

N : عدد قضبان الوقود.

$P(wt)$: القدرة الحرارية للمفاعل بوحدة الواط.

F : عامل القناة الساخنة.

a : المساحة الخارجية لغلاف قضبان الوقود.

q''_{max} : القيمة القصوى لفيض التدفق الحراري للمفاعل.

C : نسبة القدرة المنتجة لقضبان الوقود ($\approx 97\%$).

(١٠,٨) تمارين

- ١- عرّف أنواع النقل الحراري بشكل عام ، ثم في المفاعلات النووية خاصة.
 - ٢- اذكر مراكز الإنتاج الحراري في المفاعلات النووية ، موضحاً أهمية كل منها في إنتاج الطاقة الحرارية.
 - ٣- يعتمد انتقال الحرارة على نوع جريان سوائل التبريد ، فما العدد الأساسي الذي يحدد نوع الجريان؟
 - ٤- اذكر أهم مراحل الغليان لسائل التبريد ثم اشرح ما المقصود بأزمة الغليان.
 - ٥- اشرح مفهوم عامل القناة الساخنة وأهميته أثناء تصميم المفاعلات النووية.
 - ٦- يحتوي مفاعل نووي أسطواني الشكل للماء المضغوط (PWR) على ١٨٠٠ حزمة وقود ثاني أكسيد اليورانيوم UO_2 وتتكون كل حزمة من ٢٠٠ قلم وقود نصف قطر كل واحد يساوي ١,٥ سم. وعندما تكون القدرة الحرارية للمفاعل تساوي MW 1500 علماً أن نصف قطر وارتفاع المفاعل يساوي 3.5 و2 متراً تالياً ، فاحسب عند محور المفاعل ($r = 0$) ما يلي :
- (أ) معدل التدفق الحراري $q(0)$ ومستوى التدفق الحراري الطولي للقضيب المركزي.

(ب) فيض التدفق الحراري $q''(0)$.

(ج) القيمة القصوى لمعدل الإنتاج الحراري $q'''(0)$.

٧- إذا كان قضيب الوقود النووي المصنع من ثاني أكسيد اليورانيوم UO_2

موجود في مركز مفاعل تجريبي على شكل لوح سمكه يساوي ٣ سم، وسمك

الغلاف من الحديد غير قابل للصدأ يساوي 0.2 سم علماً أن:

$$K_c = 0.1903 \text{ W/cm}^\circ\text{C}, K_f = 1.904 \times 10^{-2}$$

$$q'' = 110 \text{ W/cm}^2 \quad T_m = 2000^\circ\text{C}$$

فأوجد ما يلي:

(أ) اكتب المعادلة المناسبة، ثم حلها للحصول على درجة حرارة سطح الوقود.

(ب) اكتب المعادلة المناسبة، ثم حلها للحصول على درجة حرارة الغلاف الخارجي.

٨- إذا كان قضيب الوقود الذي وضع في مركز مفاعل نووي للماء المغلي

(BWR) له شكل أسطواني نصف قطره يساوي 1.0 سم، وغلافه من الزيركونيوم سمكه

0.2 سم وارتفاعه يساوي ٣ أمتار علماً أن:

$$T_m = 2000^\circ\text{C}, K_f = 1.904 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^\circ\text{C}$$

$$q'''_{\max} = 350 \text{ W/cm}^3$$

فأوجد ما يلي:

(أ) درجة حرارة سطح الوقود.

(ب) درجة حرارة الغلاف الخارجي.

(ج) أقصى فيض تدفق الحرارة لهذا القضيب المركزي.

٩- لنفرض أن قناة التبريد في مركز قلب مفاعل نووي للماء المضغوط (PWR) يدخلها ماء التبريد عند درجة حرارة 280°C بمعدل $W = 1500 \text{ Kg/hr}$. وإذا كان قضيب الوقود داخل هذه القناة طوله 2.0 متراً ونصف قطره 1.0 سم وسمك الغلاف 0.2 سم، ثم معدل أقصى التدفق الحراري له يساوي $q''_{\text{max}} = 480 \text{ Kw/litre}$.
 علماً أن القناة مربعة والمساحة بين قضبان الوقود تساوي 1.5 سم وخصائص ماء التبريد داخل القناة $\rho = 0.687 \text{ g/cm}^3$

$$\mu = 0.876 \times 10^{-4} \text{ kg/m sec}, \nu = 4.75 \text{ m}^2/\text{sec}, T_{\text{fl}} = 310 \text{ oc}$$

فاحسب ما يلي :

- أ) درجة حرارة الماء عند الخروج من أعلى القناة.
 - ب) درجة الحرارة القصوى للوقود والغلاف في هذه القناة.
 - ج) نوعية جريان ماء التبريد في هذه القناة.
- ١٠- إذا أخذنا معطيات تمرين رقم ٩ السابق وافترضنا أن القدرة الحرارية للمفاعل تساوي 3000 MW ومعامل القناة الساخنة $F = 2.68$ فاحسب ما يلي :
- أ) معامل الانتقال الحراري h وفرق درجات الحرارة بين المبرد وسطح غلاف الوقود في منتصف قضيب الوقود.
 - ب) متوسط معدل التدفق الحراري q''_{av} .
 - ج) عدد قضبان الوقود في قلب المفاعل.