وقاية مفاعلات محطات الطاقة النووية *PWR* من التآكل باستخدام جزيئات الهيدروجين لأسر جزيئات الأكسجين

ماجدة نحيلي

قسم الفيزياء – كلية العلوم ـ جامعة دمشق

تاريــخ الإيداع 2004/04/03

قبل للنشــر في 2004/08/03

الملخص

يدرس هذا العمل إمكانية وقاية معادن دارات محطات الطاقة النووية من التآكل بإضافة الهيدروجين، المأخوذ مباشرة من محال كهربائي، وذلك بهدف إزالة الأكسجين المنحل فـي ميـاه المبـرد الحـراري (primary coolant) والناتج عن تحلله الإشعاعي (radiolysis) في أثناء عبوره إلـى قلـب المفاعـل (reactor core). استعرض فيه الشكل الرئيس والظرف الترموديناميكي اللازم لحدوث التآكـل وطرائـق الوقاية منه. واقترح استخدام طرائق التحليل الكهربائي لمج الهيدروجين بتمرير مياه التغذية عبر منطقـة مصعد محال كهربائي لإنتاج الهيدروجين وقورنت مع الطرائق الحالية المتبعة. ثم قدرت كمية الهيدروجين المستهلكة اللازمة لإزالة الأكسجين بشكل كامل من مياه التغذية في حالتين: الأولـى دون تمريـر ميـاه التغذية عبر جهاز طرد الأكسجين، والثانية بعد تمرير مياه التغذية عبره. بـشكل خـاص قـدرت كميـة الهيدروجين المستهلكة اللازمة للإزالة الكاملة للأكسجين من المبرد الحـراري لـدارة المفاعـل الأوليـة لمفاعلات الماء المضغوط VVER(Russia type PWR)، وعليـه بينـت نتيجـة الحـساب أن كميـة الهيدروجين المحسوبة أقل من الحدود المسموحة المعيرة للمبرد الحراري لهذا النوع من المفاعلات.

كما درست آلية التأثير المتبادل بين الهيدروجين والأكسجين المنحل في ماء يتدفق في أنبـوب عنـد درجات حرارة مختلفة مشابهة لدرجات حرارة المبرد الحراري وعند قيم مختلفة لمعدل التدفق. ووصـفت مراحل التأثير المتبادل بين الهيدروجين والأكسجين وحددت مرحلة انتشار الغازات نحـو سـطح الأنبـوب كمرحلة محددة لآلية هذا التأثير. وانتهى البحث باستنتاج معادلتين رياضيتين تصف إحداهما تغير تركيـز الأكسجين في الأنبوب، والأخرى لحساب طول الأنبوب الذي ينقص عنده تركيز الأكسجين بمرات عديدة.

الكلمات المفتاحية: محطات الطاقة النووية، دارة المفاعل الأولية، المبرد الحـراري، تآكل، إزالة الأكسجين، هيدروجين.

Protrotection of a *PWR* nuclear power station against corrosion using hydrogen molecules to capture oxygen molecules

M. Nahili

Department of Physics, Faculty of Science, Damascus University

Received 03/04/2004
Accepted 03/08/2004

ABSTRACT

A protection Method for the primary loops metals of nuclear power plant from corrosion was investigated. Hydrogen molecules were added to the primary circuit to eliminate oxygen molecules produced by radiolysis of coolant at the reactor core. The hydrogen molecules were produced by electrolyses of water and then added when the coolant water was passing through the primary coolant circuit.

Thermodynamical process and the protection methods from corrosion were discussed, the discussion emphasized on the removal of oxygen molecules as one of the protection methods, and compared with other methods .The amount of hydrogen molecules needed for complete removal of oxygen was estimated in two cases: in the case without passing the water through the oxygen removal system, and in the case of passing water through the system. A pressurized water reactor *VVER* was chosen to be investigated in this study. The amount of hydrogen molecules was estimated so as to eliminate completely the oxygen molecules from coolant water. The estimated value was found to be less than the permissible range for coolant water for such type of reactors.

A simulation study for interaction mechanism between hydrogen and oxygen molecules as water flowing in a tube similar to that of coolant water was performed with different water flow velocities. The interaction between the molecules of hydrogen and oxygen was described. The gas diffusion at the surface of the tube was found to play a major role in the interaction. A mathematical model was found to give full description of the change of oxygen concentration through the tube, as well as, to calculate the length of the tube where the concentration of oxygen reduced to few order of magnitude.

Keywords: Nuclear energy plant, Reactor primary circuit, Primary coolant, Corrosion, Oxygen elimination, Hydrogen.

المقـدمـة

تشمل المواد التركيبية لمفاعلات الماء كلاً من المعادن والخلائط التي يـصنع منهـا هيكل المفاعل، والأنابيب الرئيسة وأجزاء مولد البخار والمـضخات الرئيـسة للـدارات, وموازن حجم ماء المفاعل (compensator of volume) والتجهيزات الأخرى المتعلقـة بدارة المفاعل الأولية primary circuit. تعد الخواص الميكانيكية ومقاومة التآكل المقياس الرئيس لاختيار هذه المواد, ويملي وجود التأثير الإشعاعي متطلبات إضافية عالية علـى اختيار المواد التركيبية للمفاعل، حيث يجب أن يضمن وعاء المفاعل إحكاماً آمناً لمنطقـة الوقود الفعالة خلال كامل فترة الاستثمار التي تزيد على 30 سنة [1]. لذلك لابد أن تظهر المواد التركيبية خصائص المقاومة العالية للصدأ في الوسط المائي, المقاومة العالية لتأثير الإشعاع وقلة التصدعات الهشة. يجب أن يحقق الماء الدائر في دارة المفاعل الأولية مـا يسمى بمواصفة النظام المائي-الكيميائي لهذه الدارة الذي يتعلق اختياره بضرورة ضـمان مقاومة عالية للتآكل لجميع العناصر المركبة لدارة المفاعل الأولية. ولا يقـل عـن ذلـك أهمية، ضرورة عدم وجود كمية محسوسة من نواتج التآكـل corrosion products (CP) المترسبة على عناصر الوقود الناشرة للحـرارة fuel bundles وأنابيـب مولـد البخـار والتجهيزات الأخرى للدارة. يفضي تراكم الترسبات إلى استياء عمليات النقل الحـراري وإلى التسخين غير المسموح به للوقود النووي وانخفاض قيمة معامل تضاعف النترونات وضعف احتراق الوقود النووي.

تتنشط نواتج التآكل بنتيجة عبورها إلى قلب المفاعل بتيار النترونات، ويؤدي تراكمها على السطوح الداخلية لأجزاء دارة المفاعل الأولية المتوضعة خارج المنطقة الفعالة إلـى التلويث الإشعاعي للتجهيزات، مما يعقد أعمال الصيانة ويزيد كلفة عمليات إزالة التلوث. تؤدي ترسبات نواتج التآكل على أنابيب مولد البخار إلى إضعاف النقـل الحـراري مـن الدارة الأولية مع انخفاض مرافق لإنتاج البخار، أو إلى ارتفاع متوسط درجـة حـرارة الدارة الأولية. لذلك يجب أن يكون تركيز نواتج التآكل في الماء محدوداً جداً، كما تملـي التفاعلات الكيميائية الجارية تحت تأثير النترونات وأشعة γ فـي مـاء الـدارة الأوليـة متطلبات إضافية على النظام المائي-الكيميائي المستخدم في حلقة المفاعل، حيـث يـؤدي وجود أشعة γ وجسيمات β وعمليات تهدئة النترونات السريعة بواسطة جزيئـات المـاء إلى تحللها بالإشعاع وتكون الأكسجين الحر وفق التفاعل:

$$2H_2O \Leftrightarrow 2H_2 + O_2 \qquad (1)$$

يتميز هذا التفاعل بعكوسيته حيث تعيد الجذور الحرة اتحادها ثانية، وهذا يضع حـداً لعمليات تراكم الأكسجين الحر في المبرد الحراري. ولكن ومع ذلك فـإن عـدم اتخـاذ

الإجراءات اللازمة وخاصة بوجود الملوثات في المبرد الحراري يؤدي إلى تجاوز الحد المسموح المحدد بسرعة التآكل الآمنة.

تدور نواتج التآكل الواصلة إلى المبرد الحراري خلال فترة زمنية محددة في دارة المفاعل، وتترسب من جديد بالتدريج على السطوح الداخلية مشكلة ترسبات جديدة فوق الأولى. يتعلق توزع هذه الترسبات بعوامل هيدرو ديناميكية وأخرى فيزيائية-كيميائية. تسعى نواتج التآكل في تشكيل ترسبات محسوسة القيمة على السطوح الساخنة وخاصة على سطوح عناصر الوقود الناشرة للحرارة، وقد سجلت عدة كوارث ناتجة عن تصدع عناصر الوقود نتجت عن $200\ g/m^2$ [1] من الترسبات. وكانت شدة تشكل الرواسب على السطوح الساخنة لعناصر الوقود السبب الرئيس في تصدع أغلفة هذه العناصر في بعض المفاعلات [1]، وأدت الكمية الكبيرة منها إلى التصدع الشامل في بعض الأحيان, ففي المحطة النووية Big Rock Point (USA) تصدع زهاء 20 % من عناصر وقود مفاعل الماء الغالي [1] boiling water reactor (BWR)، كما لوحظ تصدع مماثل في المفاعل BR3 (وهو من مفاعلات الماء المضغوط pressurized water reactor (PWR)) في بلجيكا [1]، ولوحظ أن التصدع أصاب عناصر الوقود التي كان فيها كل من احتراق الوقود ($35\text{-}37.10^3$ MW.d/t) والتدفق الحراري ($170\ W/cm^2$) أعظمياً.

تحمل العواقب السلبية لوجود نواتج التآكل CP في الدارة الأولية طابعاً خاصاً بمقياس محدد، ومع ذلك فإن هناك بعض النقاط السلبية العامة للمفاعلات المبردة بالماء BWR وPWR نذكر منها:

1- انخفاض أمان استثمار عناصر الوقود بنتيجة تشكل كميات محسوسة من CP على السطوح الساخنة.

2- خطورة الوضع الإشعاعي في أثناء عمليات الصيانة والإصلاح في الدارة الأولية.

3- نمو المقاومة الهيدروديناميكية لقلب المفاعل.

4- انخفاض تفاعلية المفاعل reactor reactivity.

ونظراً لأن عناصر الوقود الناشرة للحرارة هي البنى الحساسة في مفاعلات الطاقة النووية، لذلك تحظى دراسة العوامل المؤدية إلى وجود الطبقة الأكسيدية المؤثرة في مقدرة عمل هذه العناصر باهتمام كبير. ولما كانت أغلفة الوقود المصنعة من الزركونيوم أكثر خمولاً كيميائياً من خلائط الفولاذ، لذلك فإن تشكل طبقات أكسيدية يحدث فقط على حساب ترسب CP من الناقل الحراري. ولهذا السبب يجب تحقيق عدة شروط لتقليل تآكل المواد البنائية ومنها الحد من وجود الأكسجين الحر في المبرد الحراري للمفاعل، ويكون ذلك بإزاحة التوازن في التفاعل (1) باتجاه تشكل الهدروجين، ويتحقق ذلك بإحداث فائض في تركيز الهيدروجين في دارة المفاعل الأولية.

منهجية البحث

1 ـ مراجعة علمية للمسألة المطروحة:

من المعروف أن الشكل الرئيس لتآكل معادن دارات المحطات النووية هو التآكل الكهروكيميائي الأكسجيني الذي يتأكسد المعدن فيه [2]:

$$M - ne^- \Leftrightarrow M^{n+} \quad (2)$$

ويرجع الأكسجين المنحل في الماء:

$$O_2 + 4e^- + 2H_2O \Leftrightarrow 4OH^- \quad (3)$$

ويمكن في بعض الظروف حدوث التآكل الهيدروجيني [3]:

$$2H^+ + 2e^- \Leftrightarrow H_2 \quad (4)$$

ويؤدي وجود Fe^{3+} إلى مشاركتها أيضاً في عمليات التآكل.

$$Fe^{3+} + e^- \Leftrightarrow Fe^{2+} \quad (5)$$

وإن الشرط الترموديناميكي لإمكانية حدوث التآكل هو تحقيق منظومة (المعدن ـ ماء) للمتراجحة الآتية:

$$E_{ox/R} > E_{M^{n+}} / M \quad (6)$$

حيث $E_{M^{n+}} / M$ يمثل كمون المعدن وفق التفاعل (1) و $E_{ox/R}$ يمثل كمون المؤكسد وفق التفاعلات (2 أو 3 أو 4). وبنتيجة حدوث التفاعلات الثانوية في منظومة (المعدن – الوسط المائي) تتشكل نواتج التآكل مختلفة التراكيب [2]. وللوقاية من التآكل هناك عدة طرائق متبعة [2]: استخدام خلائط تتميز بمقاومة التآكل وتنظيم تركيب الوسط المائي وإزالة الأكسجين من الماء واستخدام مثبطات التآكل.

ولإزالة الأكسجين من الماء لدينا طريقتان: الأولى النفخ الهوائي، والثانية الإرجاع الكيميائي. وطريقة النفخ الهوائي تعتمد على استخدام قانون هنري [4]:

$$C_{O2} = k.P_{O2} \quad (7)$$

حيث C_{O2} تركيز الأكسجين المنحل في الماء وk معامل التناسب وP_{O2} الضغط الجزئي للأكسجين فوق الماء.

تشير العلاقة (7) إلى أن تقليل الضغط الجزئي للأكسجين، مثلاً بالنفخ (blowing through) ببخار الماء، يمكن من تخفيض تركيز الأكسجين، ولكن زمن النفخ غير كافٍ للوصول إلى حالة التوازن بين الطورين السائل والغازي، ولذلك لايمكن

الحصول على إزالة عميقة للأكسجين. وللحصول على نقاوة أعلى يعالج الماء بعد النفخ الهوائي بمواد مرجعة مثل سلفات الصوديوم [2]:

$$2Na_2SO_3 + O \Leftrightarrow 2Na_2SO_4 \qquad (8)$$

ولكن يتميز هذا التفاعل بآثاره السلبية كرفعه لنسبة الأملاح في الماء من جهة، ومن جهة أخرى تفكك الملح عند درجات الحرارة العالية، وتشكل نواتج إضافية غير مرغوب فيها مثل:

$$Na_2SO_3 + 2H_2O \Leftrightarrow 2NaOH + H_2SO_3 \qquad (9)$$

$$H_2SO_3 \Leftrightarrow SO_2 + H_2O \qquad (10)$$

ولذلك يستخدم الهيدرازين في محطات الطاقة النووية المتميزة بارتفاع قيم وسطائها بدلاً عن سلفات الصوديوم [5] وينتج عن تفاعله مع الأكسجين الآزوت والماء:

$$N_2H_4 + O_2 \Leftrightarrow N_2 + 2H_2O \qquad (11)$$

فضلاً عن إمكانية تفكك الهيدرازين مثلاً وفق التفاعل:

$$2N_2H_4 \Leftrightarrow 2NH_3 + N_2 + H_2 \qquad (12)$$

ولكن الهيدرازين يتصف بسميته الكيميائية وارتفاع ثمنه، وهو ما يجعلنا نفكر في ضرورة البحث عن طرائق أخرى اقتصادية سليمة وأكثر ملاءمة.

لتقليل تركيز الأكسجين في مياه تغذية المحطات الحرارية إلى قيمة أقل من (20 mg/kg)، اقترحت في الأعمال [5,6,7] طرائق التحليل الكهربائي لمج الهيدروجين بتمرير مياه التغذية عبر منطقة مصعد محال كهربائي معزولة الغشاء وكان استهلاك الهيدروجين ($2.66.10^{-2}$ - $4.66.10^{-2}$ mg/kg) عند درجة حرارة الغرفة [5]، أو بالنفخ بالهدروجين بواسطة محال كهربائي خارجي وكان استهلاك الهيدروجين ($2.91.10^{-2}$ - $4.98.10^{-2}$ mg/kg) عند درجة حرارة الغرفة [7]. وكان استهلاك الهدروجين ($2.5.10^{-3}$-$5.6.10^{-3}$mg/kg) وفق الطريقة المتبعة في العمل [6] أقل مما هو عليه في العملين الآخرين، وتتلخص هذه الطريقة بإدخال الهيدروجين في دارات المحطات الكهربائية الحرارية بكميات كافية لعمليات إرجاع الأكسجين:

$$O_2 + 2H_2 \Leftrightarrow 2H_2O \qquad (1)'$$

يمكن استخدام هذه الطريقة أيضاً لوقاية معادن دارات المحطات النووية من التآكل, أي إحداث فائض في تركيز الهيدروجين في دارة المفاعل الأولية للحد من وجود الأكسجين

الحر فيها بإزاحة التوازن في تفاعل تفكك الماء باتجاه تشكل الهدروجين. لذلك فإن هذا العمل مخصص لدراسة هذه المسألة .

2 ـ دراسة التأثير المتبادل بين الأكسجين والهدروجين في ماء يتدفق في أنبوب:

يلزم بعد دراسة طرائق وقاية معادن دارات المحطات النووية من التآكل بإضافة الهيدروجين لإزالة الأكسجين, وللتحكم بعملية التآكل, دراسة آلية التأثير المتبادل بين الهيدروجين والأكسجين المنحل في ماء يتدفق في أنبوب.وتكون سرعة تفاعل الهيدروجين مع الأكسجين في المحلول, مباشرة كما في $(1)'$، أقل بشكل ملموس من سرعته عند سطح المعدن، الذي يبدي تأثيراً محفزاً للتفاعل. لذلك يمكن الافتراض أن هذا التفاعل سيجري وفق مراحل عدة:

أ– انتشار الغاز باتجاه سطح الأنبوب.

ب– امتصاص الجسيمات على سطح المعدن، مثل: $H_2 \to 2H_{ads}\ \ ,\ \ O_2 \to O_{2ads}$

ج- التأثير المتبادل بين الجسيمات الممتصة، مثل:

$$O_2 + 4H_{ads} \to 2H_2O\,,\ O_{2ads} + 2H_2 \to 2H_2O$$

وبنتيجة الانحلالية الضئيلة للهدروجين وللأكسجين في الماء، فإن المرحلة المحددة لهذه العمليات هي مرحلة انتشار الغازات باتجاه سطح الأنبوب.

2-1 تقدير كمية الهيدروجين المستهلكة:

يبين التفاعل (1) أن مولاً واحداً من الأكسجين يتفاعل مع مولين من الهدروجين, أي أن ثمانية غرامات من الأكسجين تستهلك غراماً واحداً من الهدروجين، وعليه فإن كتلة الهيدروجين المستهلكة لإزالة كامل الأكسجين من مياه التغذية يمكن تحديدها من المعادلة:

$$\overline{m}_{H2} = C_{O2}.G/8 \qquad (13)$$

حيث $\overline{m}_{H2}(g/h)$ الاستهلاك الساعي الكتلي للهدروجين و $C_{O2}(g/m^3)$ تركيز الأكسجين في الماء و $G(m^3/h)$ تدفق مياه التغذية في المنظومة.

يمكن إيجاد الاستهلاك الحجمي للهدروجين عند الشرطين النظاميين من المعادلة:

$$V_{H2} = \overline{m}_{H2}.22{,}4.10^{-3}(m^3)/2\ (g)$$

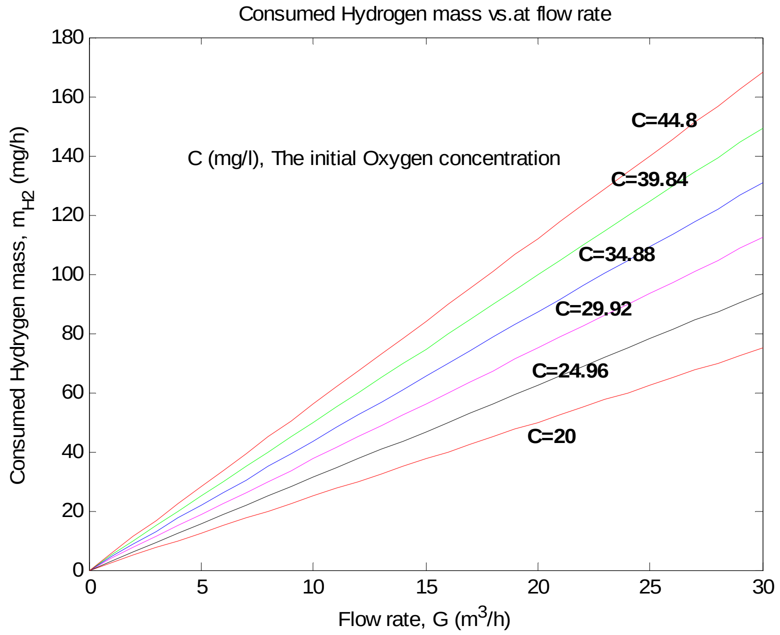
ومن ثم:

$$V_{H2} = \overline{m}_{H2}.(11{,}2.10^{-3}) \qquad (14)$$

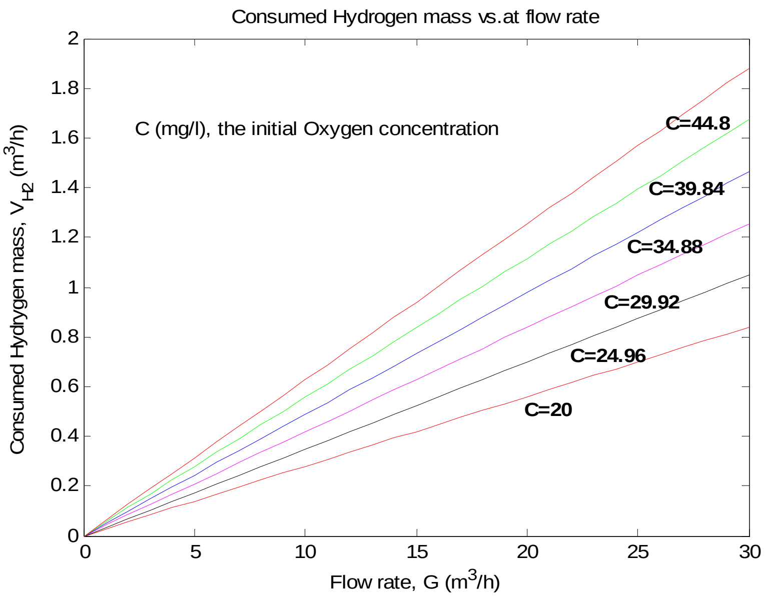
حيث V_{H2} الاستهلاك الحجمي الساعي للهدروجين (m^3/h).

وتم حساب كمية الهيدروجين المستهلكة عند درجات حرارة ومعدلات تـدفق مختلفـة باستخدام برمجة لغة *MATLAB* وكتابة برنامج بلغة هـذا البرنـامج لحـل المعـادلتين (13 و14).

توضح المعادلتان (13 و14) والشكلان (1 و2) أن كمية الهيدروجين المستهلكة لإزالة الأكسجين تزداد بازدياد التدفق والقيمة الابتدائية لتركيز الأكسجين.



الشكل (1)



الشكل (2)

يعطي الجدول (1) قيم الهيدروجين المستهلكة اللازمة لإزالة الأكسجين بشكل كامـل، محسوبة من المعادلتين (13 و14) من أجل قيم مختلفة لسرعة تدفق مياه التغذيـة خـلال المنظومة ومن أجل تركيزين ابتدائيين مختلفين للأكسجين:

الأول $(C_{O2} = 44{,}8\, mg/l)$ ودون تمرير مياه التغذية عبر جهاز طرد الأكـسجين، والثاني $(C_{O2} = 20\, mg/L)$ بعد تمرير مياه التغذية عبر جهاز طرد الأكسجين، الـذي يوجد بطبيعة الحال في كل محطة نووية.

الجدول (1) قيم الهيدروجين المستهلكة $\overline{m}_{H2}\ (g/L)$ وسطي كتلة الهيدروجين المستهلكة، الاستهلاك الحجمي الساعي للهدروجين $V_{H2}\ (m^3/h)$.

C_{o2} = 20 (mg / l) بعد مرور مياه التغذية عبر جهاز طرد الأكسجين		C_{o2} = 44.8 (mg / l) قبل مرور مياه التغذية عبر جهاز طرد الأكسجين		G (m^3 / h) معدل تدفق مياه التغذية عبر المنظومة
$V_{H2}\ (m^3/h)$	$\overline{m}_{H2}\ (mg/h)$	$V_{H2}\ (m^3/h)$	$\overline{m}_{H2}\ (mg/h)$	
0.280	25	0.267	56.0	10
0.336	30	0.753	67.2	12
0.392	35	0.878	78.4	14
0.448	40	1.003	89.6	16
0.504	45	1.129	100.8	18
0.560	50	1.254	112.0	20
0.616	55	1.379	123.2	22
0.672	60	1.505	134.4	24
0.728	65	1.631	145.6	26
0.784	70	1.756	156.8	28
0.840	75	1.882	168.0	30

كما هو واضح من الجدول (1) تتطلب إزالة الأكسجين من المياه المارة عبر جهاز طرد الأكسجين كميات غير كبيرة نسبياً من الهيدروجين($0.224\ l/m^3$) .

2-2 إيجاد كمية الهيدروجين اللازمة لإزالة الأكسجين من مياه دارة المفاعل الأولية :*VVER*

من المعروف أن تركيز الأكسجين المعياري في المبرد الحراري للدارات الأولية لمفاعلات الماء المضغوط يجب أن لا يزيد على ($5\mu g/kg$) [9] أي ($5.10^{-3}\ g/m^3$)، وعليه بواسطة المعادلتين (13 و14) والمرجعين [9 و8] يمكن إيجاد كمية الهيدروجين اللازمة لإزالة الأكسجين من المبرد الحراري لمفاعلات الماء المضغوط :($VVER - 440\ MW$)

$$m_{H2} = (42000\ m^3/h).(5.10^{-3}\ g/m^3)/8 = 26.25\ g/h$$
$$v_{H2} = 26.25.10^{-3}.11.2 = 0.294\ m^3/h = 0.294.10^9\ ml/h$$
$$42000\ m^3/10^{-3} = 42.10^6\ kg$$
$$0.294.10^9\ ml/42.10^6 kg = 7\ ml/kg$$

حيث m^3/h 42000 يمثل تدفق المبرد الحراري خلال المفاعل. تبـين نتـائج هـذا الحساب أن كمية الهيدروجين اللازمة لإزالة الأكسجين أقل من الحدود المسموح بوجودها في المبرد الحراري لمفاعلات الماء المضغوط *VVER* وهي ($30 - 60\ ml/kg$) [8].

ج ـ إيجاد معادلة تغير تركيز الأكسجين:

تتميز عملية انتشار الغاز في التيار الصفيحي المتدفق في الأنبوب بطابعها المعقد جداً، وتعطى لأجزاء الأنبوب بمعادلات مختلفة [10]، ونظراً لأن إدخال الهيدروجين لن يتم في الجزء الأول من الأنبوب، ولن يتم حينئذ وصول الماء المتدفق إلـى النظـام التـوازني (poiseuille) [10]، لذلك يمكن استخدام معادلة الجزء الأوسط من الأنبوب، وفيها تعطى كثافة تيار الغاز المنتشر نحو السطح الداخلي للأنبوب بالمعادلة الآتية:

$$J_{dif} = 0{,}67.C.D.(V_0 / D.R.X)^{1/3} \qquad (15)$$

حيث C تركيز الغاز في المحلول وD معامل انتشار جزيئات الغاز و V_O سرعة تيار الماء وفق محور الأنبوب (السرعة العظمى للتيار) وR نصف قطر الأنبوب وX الإحداثي وفق محور الأنبوب. يمكن من المعادلة (15) استنتاج معادلة تدرج تركيز الغـاز علـى طول الأنبوب. لذلك نكتب التركيز المختزل للغاز بالنسبة للإحداثيات X على الشكل:

$$-dC/dX = J_{dif}.2\pi.(R/V_\tau) \qquad (16)$$

حيث V_τ السرعة الحجمية لتدفق الماء في الأنبوب (m^3/s).

بالتعويض عن قيمة J_{dif} من المعادلة (15) في المعادلة (16) نجد أن:

$$-dC/dX = [1{,}34.\pi.R.D.C(V_0/D.R.X)^{1/3}]/V_\tau$$

يمكن كتابة هذه المعادلة على الشكل:

$$-dC/C = k.X^{-1/3}.dX \qquad (17)$$

حيث إن:

$$k = [2\pi.(R.D)^{2/3}.(V_0)^{1/3}]/V_\tau \qquad (18)$$

يعبر حل المعادلة التفاضلية (17) من أجل الشروط الحدية $C=C_0$ عنـد $X=0$ عـن تدرج تركيز الغاز على طول محور الأنبوب، وهو يتعلق بالموضع (بعـد النقطـة عـن موضع ضخ الغاز) بعلاقة من الشكل:

$$\ln C = \ln C_0 - k.(X)^{2/3} \qquad (19)$$

تبين المعادلة (19) أن تدرج تركيز الأكسجين يتعلق بنفوذية الوسط وبدرجة حرارته وتدفقه خلال النظام المدروس.

يمكن ربط السرعة العظمى لتدفق الماء وفق محور الأنبوب V_0 بالسرعة الوسطية للتدفق $\overline{V}$ بالمعادلة:

$$V_0 = \gamma.\overline{V}$$

حيث γ هو معامل $(\gamma \le 2)$، كما يمكن إيجاد السرعة الوسطية للتدفق من المعادلة:

$$\overline{V} = (V_\tau / \pi.R^2) \qquad (20)$$

وبتعويض المعادلة (20) في المعادلة (18) نجد أن:

$$k = 2.(\gamma)^{1/3}.(\pi.D / V_\tau)^{2/3} \qquad (21)$$

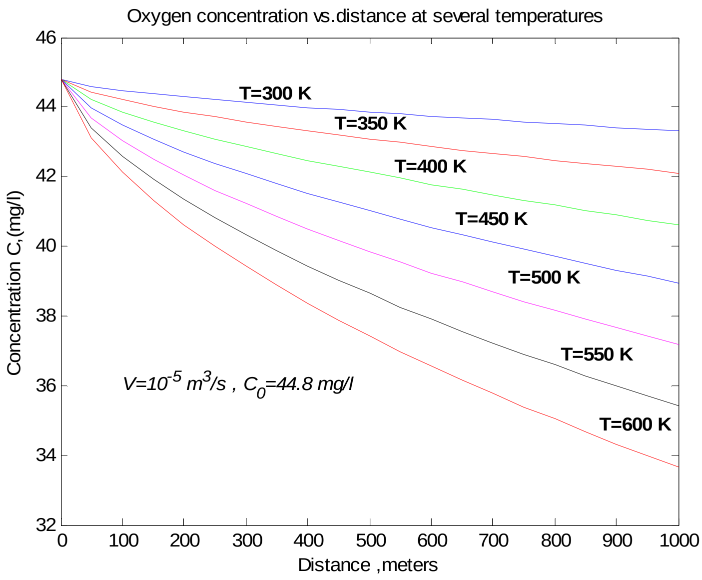
باعتبار أن معامل انتشار الأكسجين عن الدرجة T=298 K^0 هو $D_{298} = 3.10^{-9} m^2 / s$ [10]، وبأخذ قيمة γ تساوي 2، ومن معادلة أرينوس المحددة لعلاقة معامل انتشار الأكسجين بدرجة الحرارة:

$$D_T = D_{298}.e^{-(W_a / R.T)} \qquad (22)$$

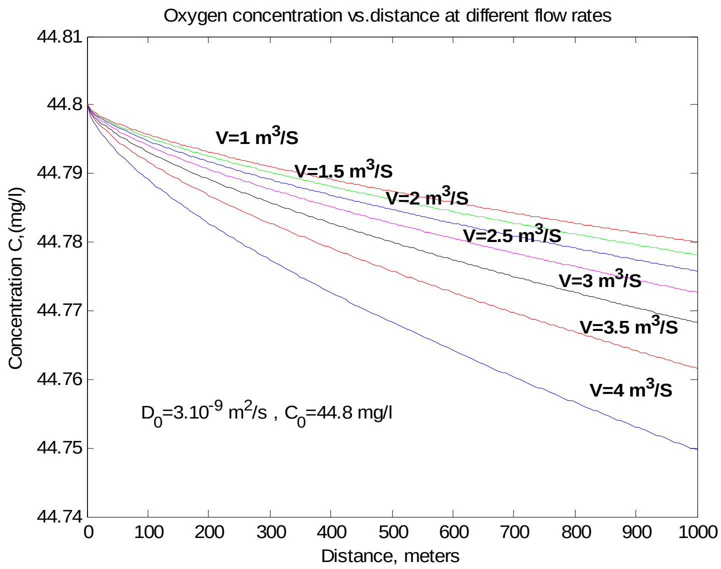
حيث D_T وD_{298} معاملات انتشار الأكسجين عند درجتي الحرارة T و T=298 K^0 على الترتيب وR ثابتة الغازات العامة وW_a طاقة التنشيط $(W_a = 16\ kJ / mol)$[10].

يمكن من المعادلات (22 و21 و19) إيجاد تدرج تركيز الأكسجين في الأنبوب عند درجات حرارة مختلفة وسرعة تدفق ثابتة للماء خلال المنظومة. وقد تم باستخدام برمجة لغة *MATLAB* كتابة برنامج بلغة هذا البرنامج لحل المعادلات (19 و21 و22).

توضح المعادلة (19) والشكلان (3 و4) أن طابع تناقص تركيز الأكسجين على طول الأنبوب يتحدد بشكل رئيس من السرعة الحجمية لتدفق الماء V_t، ومن درجة حرارته (T)، أي $-dC / C = f(V_t , T)$.



الشكل (3)



الشكل (4)

د ـ إيجاد طول العملية المميز:

يمكن إيجاد طول الأنبوب (طول العملية المميز) L_n الذي من أجلـه يـنقص تركيـز الأكسجين بمقدار n مرة. من المعادلة (19) يمكن كتابة:

$$C = (C_0 / n) \Rightarrow \ln(C / C_0) = \ln(1/n) = -k.(L_n)^{2/3}$$

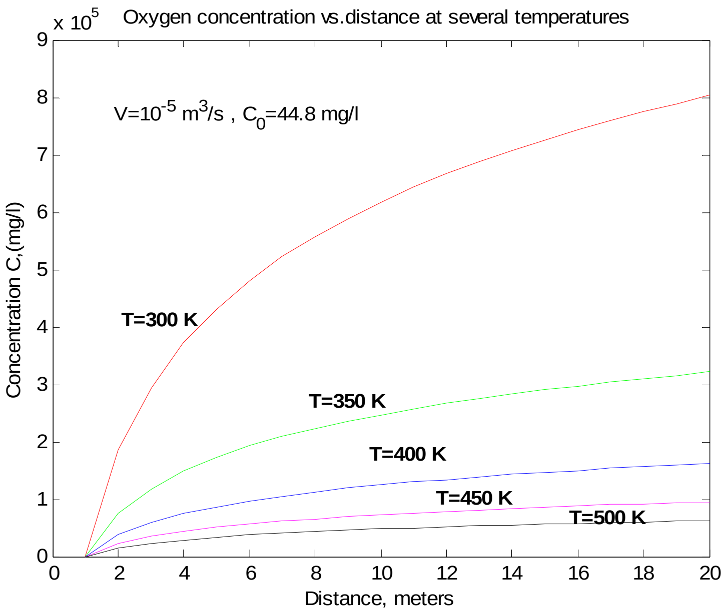
ومنه:
$$\ln n = k.(L_n)^{2/3}$$

أي أن:
$$L_n = (\ln n)^{3/2} / (k)^{3/2}$$

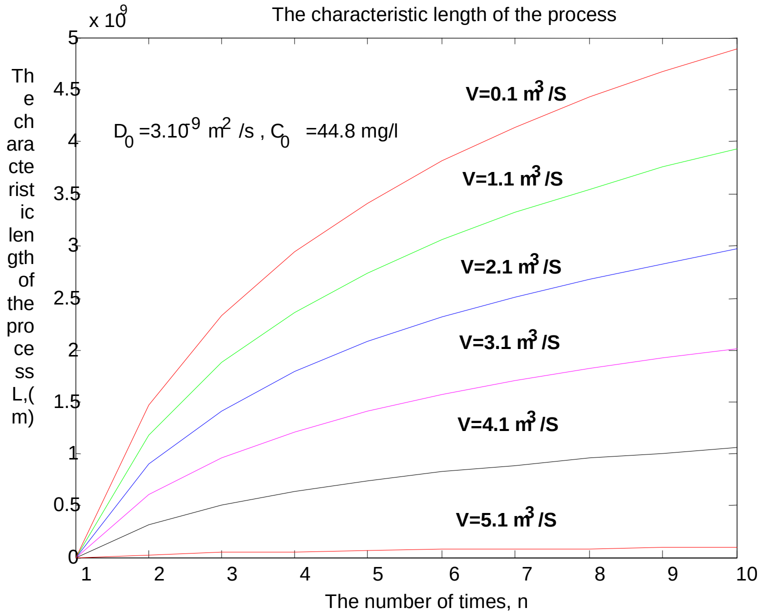
وبالتعويض عن قيمة k من المعادلة (21) نجد أن:

$$L_n = (\ln n)^{3/2}.V_\tau / [(2)^{3/2}.(\gamma)^{1/2}.\pi.D] \qquad (23)$$

تبين المعادلة (23) والشكلان (5 و6) أن قيمة L_n تنقص مع ارتفاع درجة الحـرارة وانخفاض معدل التدفق, فعندما $D = 3.10^{-9}\ m^2/s$ و $V_\tau = 10^{-5}\ m^3/S$ و $\gamma = 2$ نجد أن طول العملية المميز يساوي L_n=153.07 *m* من أجل *n=2* و L_n=926.8 *m* من أجل *n=10*، ومع ارتفاع درجة الحرارة من 300 K^0 إلى 400 K^0 نجد أن طـول العمليـة المميز ينقص بنحو خمس مرات.



الشكل (5)



الشكل (6)

ومن المناسب استخدام طرائق التحليل الكهربائي للحصول على الهيـدروجين الـلازم لإزالة الأكسجين لأنها تؤمن هدروجيناً عالي النقاوة وتسمح بأتمتة عمليات إضافة جرعات الهيدروجين المطلوبة إلى الدارات العاملة. فضلاً عن أن جميع أنواع المحطـات تحـوي محللات كهربائية لإنتاج الهيدروجين اللازم لتبريد المولدات الكهربائية [2]، وهكذا يمكـن الحصول على الهيدروجين من المحطة نفسها مباشرة دون الحاجة إلى إضافة أية تجهيزات أخرى جديدة مما يزيد من اقتصادية الطريقة المقترحة.

النتـائـج

1. حسبت كمية الهيدروجين اللازمة لإزالة الأكسجين المنحـل فـي المبـرد الحـراري للمفاعلات *VVER*.
2. استخرجت معادلة رياضية تصف تغير تركيز الأكسجين في أثناء تبادله التـأثير مـع الهدروجين، لنظام الانتشار لسائل يتدفق في أنبوب على شكل تيار صفائحي.
3. وضح أن نقص تركيز الأكسجين على طول الأنبوب يتبع قانوناً أسـياً، وأن التـأثير الرئيس في ذلك يكون لسرعة حركة الماء ولمعامل انتشار الأكسجين.
4. استنتجت معادلة لإيجاد طول العملية المميز.

REFERENCES

1. **Krytikov, P.G., Osminin, B. S., Shekmarev, A. M., Prodykti korrozi v kontyrak atomnik stantsi,Moskva .Energoatomizdat,168s, 1998.**
2. **Margylova, T. K., Martinova, O. I., Vodnie rejimi teplovik i atomnik elektrostantsi. Moskva: Vichia chkola. 1981.**
3. **Kaesche, H., Die Korrosion der Metalle, Springer-Verlage. Berlin. Heidelberg. New York. Perevod na Roskom iazike, 1979.**
4. **Martinova, O. I., Petrovna, T. I., Nasova, N. P. i Nazarova, N. I. O vozmognastiak priminenie vostanavitelnovo vodno-chimiskovo rejima. Trydi MEI, N°130. 1987.**
5. **Korovin, N. V., Gidrazin, Moskva: Chimi. 1980.**
6. **Kodiakov, S. V., Korovin, N. V., i Rodakov, S.V., Elektroliznie metodi podgatofka podpitochnoe vodi // Teploenergetika. N°11.s.68-70, 1991.**
7. **Kodiakov S. V., Korovin N. V., Rodakov S. V. i Nahili Majida. Elektrochemiskie sbosoby ochiski vodi // Tezesi dokladov na Mendelevskom seezde .Minsk. s.15, 1993.**
8. **Ovchinikov, F.IA., Cemenov, V. V. Explatotsionoe pejimi Vodno-Vodianik energeticheskik peaktorof -3-e izdanie, Energoatomizdat -359 s, 1988.**
9. **Kritsky, V. G., Water chemistry and corrosion of nuclear power plant structural materials, American Nuclear Society (USA) Translation from the Russian. 1999.**
10. **Levich, V.G., fiziko-kimicheskia gidrodinamik, Moskva.fizmatgiz,1959.**