

تحديد أنظمة الغليان والجريان للتيار ثنائي الطور في أنبوب شاقولي متجانس التسخين

الدكتور حسان حلواني*

الدكتور فاروق العبود**

(تاريخ الإيداع 20 / 5 / 2013. قُبِلَ للنشر في 20 / 10 / 2013)

▽ ملخص ▽

تم في هذا البحث دراسة أنظمة الغليان والجريان ثنائي الطور القسري داخل الأنابيب الشاقولية، بهدف تحديد نظام الغليان والجريان السائد في أي منطقة من الأنبوب. مجالات الدراسة للمتغيرات التي تم وفقها البحث كانت كالتالي: الضغط $P = 3 \text{ MPa}$ ، الكثافة الحرارية $Q = (500 - 2400) \text{ kW} / \text{m}^2$ ، السرعة الكتلية $\rho_w = (400 - 1800) \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ، إنتالبي الدخول $h_{in} = (300 - 1700) \text{ kJ/kg}$ ، طول الأنبوب $L = 3 \text{ m}$ ، وقطر الأنبوب $d_{in} = 8 \text{ mm}$ ، ونظراً لغياب طريقة دقيقة للتنبؤ بنظام الغليان والجريان السائد في الأنابيب تم الاستفادة من بعض الدراسات التجريبية التي أجريت على الجريان ثنائي الطور (سائل - بخار) لتحديد أنظمة الغليان والجريان ثنائي الطور القسري السائدة في الأنابيب الشاقولية، حيث تم إنشاء لوغاريتم توصف هذه الأنظمة كتب في بيئة الـ Matlab. أجريت دراسة تحليلية للمخططات الناتجة، وتم اقتراح توجهات الأبحاث اللاحقة.

الكلمات المفتاحية: نظام الجريان، نظام الغليان، جريان ثنائي الطور، السرعة الكتلية، الغليان السطحي، الغليان النووي، محتوى البخار الحقيقي، محتوى البخار الكلي، الإنتالبي النسبي.

* مدرس - قسم الهندسة النووية - كلية الهندسة الميكانيكية - جامعة حلب - حلب - سورية.
** أستاذ مساعد - قسم هندسة الطاقة - كلية الهندسة الميكانيكية - جامعة حلب - حلب - سورية.

Determination of Two Phase Flow Boiling Regimes in Vertical Uniformly Heated Tube

Dr. Hassan Halwani*
Dr. Farouk Alaboud**

(Received 20 / 5 / 2013. Accepted 20 / 10 / 2013)

▽ ABSTRACT ▽

In this paper, we studied flow and boiling regimes of two-phase forced flow in vertical tubes to determine the dominated flow and boiling regime at any region of tube. Studied Ranges of main parameters were: Pressure $P = 3 \text{ MPa}$, Heat flux $Q' = (500 - 2400) \text{ kW} / \text{m}^2$, Mass velocity, $\rho w = (400 - 1800) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, Inlet Enthalpy $h_{in} = (300 - 1700) \text{ kJ/kg}$, Tube length $L = 3 \text{ m}$, and Tube diameter $d_{in} = 8 \text{ mm}$. Because of absence an accurate method of flow and boiling regimes prediction, some of experimental equations of two phase flow (liquid-steam) had been used to determine the dominated flow and boiling regime in vertical tubes and build algorithm written by Matlab environment describes these regimes. An analytical study was provided of the resulted diagrams and suggestions were given for next studies.

Keywords: Flow regime, boiling regime, Two phase flow, mass velocity, surface boiling, nucleate boiling, actual steam content, mass steam content, relative enthalpy.

*Assistant Professor, Department Of Nuclear Engineering, Faculty Of Mechanical Engineering, Aleppo University, Syria.

**Associate Professor, Department Of Power Engineering, Faculty Of Mechanical Engineering, Aleppo University, Syria.

مقدمة:

تعتبر معرفة أنظمة الغليان والجريان ثنائي الطور بالغة الأهمية، فهي تختلف عن قرينتها في الجريان أحادي الطور، وهي السبب الأهم للمساعدة في فهم هذا النوع من الجريان. يتضمن سلوك مزيج السائل- البخار العديد من العلاقات الأساسية اللازمة لحل معادلات حفظ الكتلة والطاقة للجريان ثنائي الطور، التي تعتمد بقوة على أنظمة الجريان والغليان ثنائي الطور، لهذا تعتبر معرفة هذه الأنظمة مفيدة وغالباً ما نحتاجها في التحليل والنمذجة [1].

أنظمة الغليان والجريان ثنائي الطور من أكثر المواضيع غموضاً وصعوبة وقد استمرت دراستها لعدة عقود، وطرق التنبؤ الحالية لا تصف بدقة الأنظمة السائدة، وتتبع الصعوبة من ظهور تغيرات متنوعة للغاية في بنية وتشكيل مزيج السائل- البخار تقود إلى تغيرات بنيوية مرتبطة بظهور الطور البخاري والتأثير المتبادل بين الأطوار من جهة وسطح التبادل الحراري من جهة أخرى، واختلاف الانضغاطية بين الطورين البخاري والسائل.

بسبب ارتفاع معامل انتقال الحرارة وخصائص سحب الحرارة، فقد درست الجريانات ثنائية الطور وطبقت في: المفاعلات النووية BWR، RPMK (الروسية ذات القنوات)، مولدات البخار لمنشآت الطاقة، مبخرات أنظمة التبريد، أجهزة تكييف الهواء، العمليات الصناعية [2]، المجمعات الشمسية [3]، المبادلات الحرارية وفي أنظمة التبريد الإلكترونية وذلك داخل القنوات الصغيرة والدقيقة [4].

إن غالبية الدراسات السابقة هي تجريبية أو تستخدم طريقة التكامل العددي [5,6] حيث يتم تطوير النموذج الأحادي لجريان أحادي البعد متعدد الموائع، المنسجمة للتنبؤ بالجريانات ثنائية الطور في الأنابيب الشاقولية، يستند النموذج على معادلات توازن الكتلة، كمية الحركة والطاقة من أجل كل خط تيار للمائع يشارك في نمط الجريان ثنائي الطور المنظور، وعلى القوانين الموافقة لعمليات التحويل البيئي. يتم تحويل معادلات التوازن في الحالة المستقرة إلى شكل مناسب من أجل التطبيق المباشر لطريقة التكامل العددية لجملة المعادلات التفاضلية العادية. يتم محاكاة العمليات الحرارية الهيدروليكية على طول قناة الغليان للسائل غير المشبع من التدفق والتسخين بدءاً من مدخل القناة حتى جفاف طبقة السائل وبلوغ الجريان الضبابي ذي القطرات عند مخرج الأنبوب. يترافق التحول من نمط جريان أحادي إلى آخر تغير في عدد خطوط التيار. توصف أنماط الجريان الفقاعية والارتجاجية بخطي تيار لمائعين: السائل والبخار، يتميز التحول إلى نمط جريان حلقي بخطوط تيار لثلاث موائع: طبقة سائلة على الجدار، قلب بخاري وقطرات موزعة في تيار البخار، لذلك يوصف الجريان ثنائي الطور في قناة الجريان عادة بمناطق تحتوي على خطوط تيار لموائع متعددة، كل واحد منها يتدفق على طول القناة .

يكون الجريان ثنائي الطور متجانساً، عندما تكون الأطوار مفصولة بشكل منتظم حجماً، وفي الحالة المعاكسة يكون الجريان غير متجانس. يكون الجريان ثنائي الطور أدبياتياً إذا انعدم التبادل الحراري بين الجريان وسطح القناة وكذلك بين الأطوار. يكون الجريان ترموديناميكياً متوازناً، إذا كانت درجة الحرارة متماثلة للأطوار، بينما يكون غير متوازن، كما هو الحال في نظام غليان السائل غير المشبع حيث $x \approx 0$ " ونظام تجفيف البخار الرطب $x \approx 1$ ، حيث تكون درجة حرارة الأطوار غير متماثلة.

تدل التحليلات على أنه من أجل قطر أنبوب معطى، فإن نظام جريان (البخار- السائل) الأدبياتي، يحدد كتابع وحيد لثلاثة متغيرات هي: الضغط P ، السرعة الكتلية ρw ، ومحتوى البخار الكلي x ، ويضاف متغير رابع " قيمة الكثافة الحرارية (q) " في حالة الأنابيب المسخنة.

2- طرق تحديد أنظمة الجريان تجريبياً:

يمكن تحديد بنية الجريان بشكل مرئي (بالعين) أو بمساعدة التصوير الضوئي أو السينمائي، وهذه الطرق ضرورية لكنها غير كافية، حيث إنها لا تعطي معلومات كمية. و تستكمل ببحث الخصائص الستاتيكية للقيم الموضعية لمحتوى البخار الموضعي، توابع كثافة الأطوار والمحتوى البخاري اللحظي أو الضغط اللحظي على طول الأنبوب [7] وهذه الطرق هي:

1- الطرق التكاملية:

إذا كانت جدران الأنبوب شفافة فإن أنظمة الجريان تحدد بمساعدة التصوير الضوئي أو السينمائي . في حالة جدران الأنبوب غير الشفافة من الممكن استخدام تصوير رينتجن الضوئي. إن أنظمة الجريان عند الغليان في ظروف الحمل القسري من الممكن ملاحظتها باستخدام أشكال هندسية خاصة للأنبوب أو أنابيب شفافة مسخنة . إذا كانت الأنابيب غير شفافة من الممكن استخدام إشعاع رينتجن أو الطريقة النترونية في التشخيص . في حالة الملاحظة بالعين المجردة لبنية الجريان، يمكن تحديد الانتقال فقط بين شكلين للجريان نوعياً بحسب قدرة الملاحظ، لذلك تستخدم طرق أخرى مبنية على الخصائص الستاتيكية للمتغيرات الموضعية.

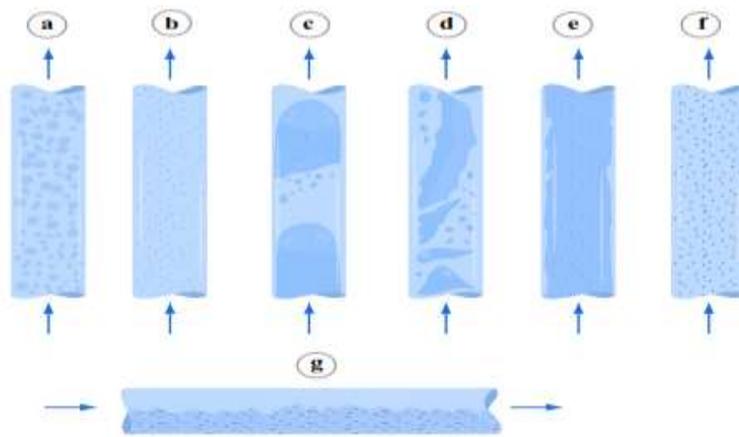
2- الطرق الموضعية:

يمكن تصنيف بدقة أكثر أنظمة الجريان بوساطة توابع الكثافة الاحتمالية أو بوساطة التوزع الطيفي لكثافة الطاقة لبعض المتغيرات. تقاس توابع كثافة الأطوار في نقطة ما بوساطة مجس يتم وضعه في هذه النقطة . يجب أن يتحسس المجس بالطور المحيط به وبالتالي تغير الخاصية الفيزيائية بين الطورين. إذا كان الطور السائل ناقلاً للكهرباء فمن الممكن الاستفادة من تغير الناقلية الكهربائية. في حالة السائل غير الناقل للكهرباء (على سبيل المثال الفريون) يمكن الاستفادة من تغير معامل التبادل الحراري أو معامل الانكسار الضوئي . من الممكن قياس امتداد الطور الغازي بطريقة توهن اشعاع γ .

من الممكن أيضاً تحديد أنظمة الجريان بوساطة نبضات الضغط على جدار الأنبوب .

3- أنظمة الجريان ثنائي الطور للجريان الأديباتي في الأنابيب الشاقولية باتجاه الأعلى:

يمكن تحديد عدة أنظمة جريان أو أنماط في الجريان القسري في الأنابيب الشاقولية نحو الأعلى التي تحدث



Typical configuration of (a) bubbly flow, (b) dispersed bubbly (i.e. fine bubbles dispersed in the continuous liquid phase), (c) plug/slug flow, (d) churn flow, (e) annular flow, (f) mist flow (i.e. fine droplets dispersed in the continuous vapor phase) and (g) stratified flow. Note: mist flow is possible only in a heated channel; stratified flow is possible only in a horizontal channel.

الشكل (1) - أنظمة الجريان الرئيسية في الأنابيب الشاقولية للأعلى : (a) - جريان فقاعي، (b) - فقاعي مشتمت (فقاعات دقيقة موزعة في طور سائل مستمر) ، (c) - قذائفي، (d) - ارتجاجي، (e) - حلقي، (f) - ضبابي (قطرات دقيقة موزعة في طور بخاري مستمر) ، (g) - طبقي. لاحظ الجريان الضبابي ممكن فقط في القناة المسخنة ، الجريان الطبقي ممكن فقط في القناة الأفقية [8]

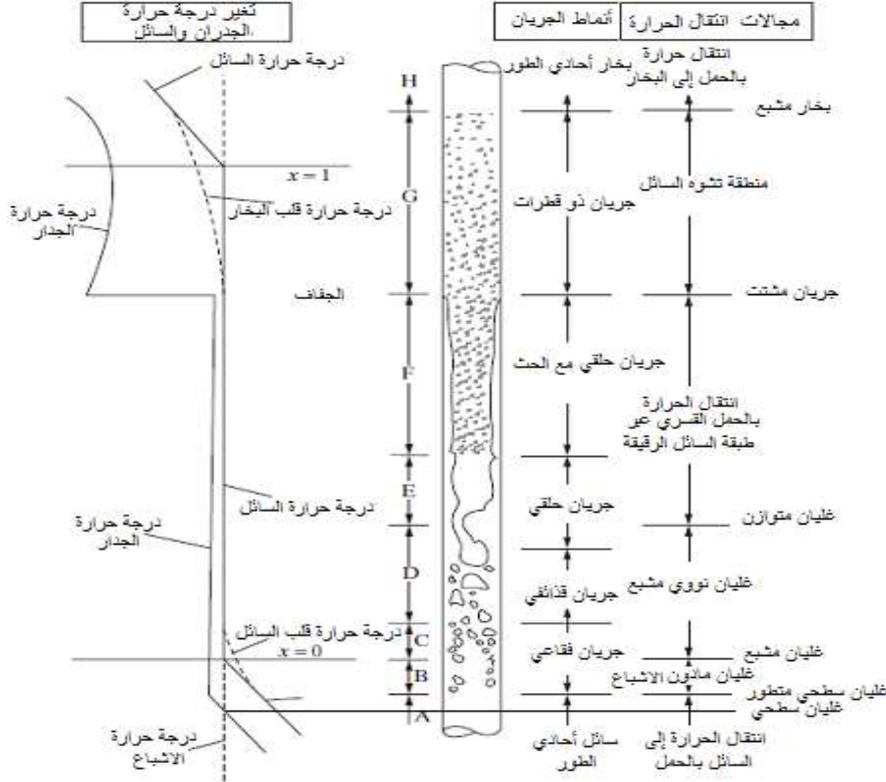
من أجل: مائع معين، ضغط وأبعاد هندسية للقناة ، و بالاعتماد على حالة التدفق ومعدل التدفق، ترتب أنظمة الجريان الرئيسية في الجدول (1) وتبين كما في الشكل (1) [8]. تعتمد حالة التدفق وقيم معدل التدفق "منخفض"، "متوسط" ، "مرتفع" على المائع والضغط . بالإضافة إلى أنظمة الجريان المشار إليها أعلاه، في الجريانات الأفقية، يمكن تمييز الجريان الطبقي الموافق لمعدلات التدفق المنخفضة والتي عندها تكون الأطوار منفصلة تحت تأثير الجاذبية. إن أنظمة الجريان المبينة على الشكل (1) هي أنظمة الجريان الرئيسية [3,8, 9,10,11]، ومن السهولة التمييز فيما بينها، حيث إن الانتقال من نظام جريان رئيسي إلى آخر لا يحدث فجأة وكل نظامي جريان متجاورين يفصل بينهما منطقة انتقالية واسعة نسبياً.

جدول (1) التصنيف النوعي لأنظمة الجريان ثنائية الطور [8]

حالة التدفق	معدل التدفق	نظام الجريان
منخفض	منخفض ومتوسط	فقاعي
	مرتفع	فقاعي مشتمت
متوسط	منخفض ومتوسط	قذائفي
	مرتفع	ارتجاجي
مرتفع	مرتفع	حلقي
	مرتفع	ضبابي

4- أنظمة الغليان في الجريان القسري:

تعتبر عملية الغليان في الأنابيب بالجريان القسري أكثر صعوبة من الغليان الحر، نظراً للعلاقة الوثيقة بين العمليات الهيدروديناميكية وعمليات انتقال الحرارة بالغليان. يحدث التأثير المتبادل بين الطورين وأنظمة انتقال الحرارة



بالغليان، على طول القنوات المسخنة خلال الغليان القسري كنتيجة لارتفاع نسبة البخار. تتطور أنظمة الغليان ثنائي الطور من حيث البنية على امتداد قنوات التسخين بشكل مختلف عما هو في نظام الجريان ثنائي الطور الأديباتي.

الشكل المفضل للغليان في الأنابيب، هو الغليان في القنوات الشاقولية ذات الجريان للأعلى. في هذا الشكل من القنوات تساعد قوة الطفو على جريان المزيج، والسرعة النسبية بين الطورين، الناتجة عن فرق الكثافة، تحسن فعلياً عملية انتقال الحرارة.

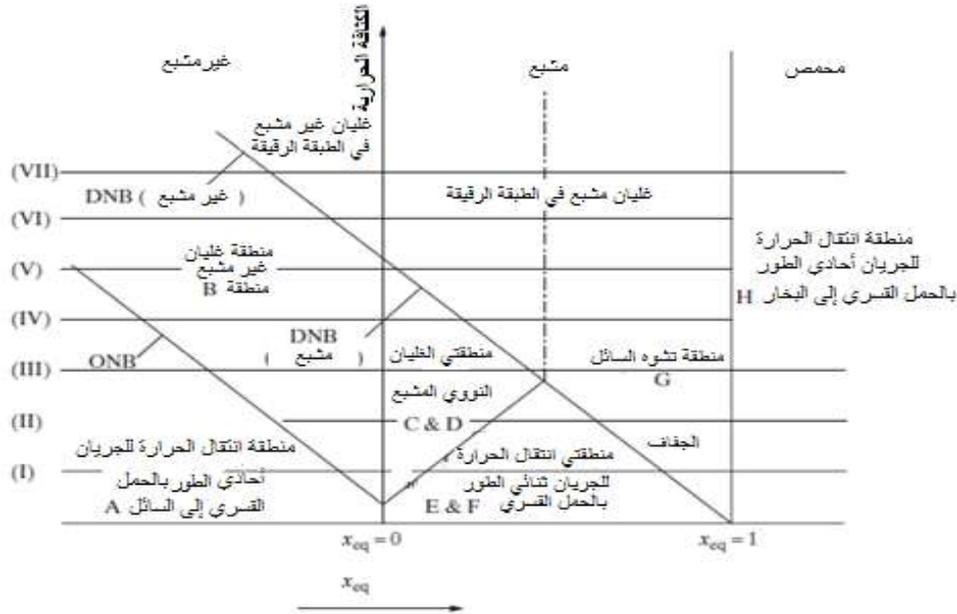
الشكل (2) - أنظمة الغليان والجريان ثنائي الطور في أنبوب شاقولي ذي كثافة حرارية على الجدران معتدلة (Collier & Thome, 1994) [1]

يظهر الشكل (2) تفصيلاً لأنظمة الجريان ولأنظمة انتقال الحرارة في أنبوب شاقولي منتظم التسخين ذي جريان للأعلى، ومعرض لكثافة تيار حراري معتدلة، حيث المائع على المدخل سائل غير مشبع [1].

كذلك يبين نفس الشكل تغيرات درجات الحرارة لكل من الجدار والسائل. بالقرب من مدخل الأنبوب، حيث درجة حرارة السائل أدنى بكثير من الإشباع، ولا يسمح بنشوء فقاعات، يكون نظام الجريان سائل أحادي الطور ونظام انتقال الحرارة بالحمل القسري. بمتابعة بداية الغليان تتسلسل أنظمة الجريان، التي تشمل الفقاعي، القذائفي، والحلقي، ويليه الجريان القطري المشنت، وأخيراً نظام جريان أحادي الطور لبخار محمص [1,3,6,8,9]. يختلف نظام الجريان ثنائي الطور الحقيقي بعض الشيء من حيث الشكل عن نظيره في الجريان ثنائي الطور الأديباتي.

من أجل أية قناة شاقولية متعادلة التسخين ذات جريان للأعلى، تشكل مختلف أنظمة انتقال الحرارة سطح توازن المحاور الإحداثية للمتغيرات (التدفق الكتلي - الكثافة الحرارية - نسبة البخار) (G, q, x_{eq}) المبينة نوعياً على الشكل (3) [1] وذلك من أجل $G = const$. ما يميز الشكل (3) أنه يظهر أنظمة انتقال الحرارة كحدود على طول القناة الشاقولية متماثلة التسخين من أجل تدفق كتلي ثابت $G = const$. يتعلق تسلسل أنظمة انتقال الحرارة بقيمة الكثافة الحرارية q . عند كثافة حرارية معتدلة، فإن تسلسل

الأنظمة سيتبع الخط الأفقي (II) وسيضمن، بالترتيب، حملاً قسرياً خلال السائل، غلياناً غير مشبع، غلياناً مشبعاً، تبخراً بالحمل القسري، انتقال الحرارة لحالة الجفاف، وانتقال الحرارة لحالة الجفاف المسبق (أزمة تبادل حراري، تشوه طبقة السائل). عندما يكون التيار الحراري مرتفعاً جداً فإن تسلسل الأنظمة سيتبع الخط (IV).



الشكل (3)-مخطط أنظمة الغليان من أجل $G = const$ كتابع لكل من x_{eq} و q [1]

يحدث الغليان النووي، بينما قلب التيار السائل بعيداً عن الإشباع، وبدلاً من الجفاف يحدث الابتعاد عن الغليان النووي.

عند قيمة كثافة حرارية أعلى، يتبع تسلسل الأنظمة الخط (VI) أو (VII) حيث يحدث كل من بداية الغليان النووي والانفصال عن الغليان النووي وقلب التيار السائل بعيداً جداً دون الإشباع.

أهمية البحث وأهدافه:

نظراً لغياب نموذج واضح يصف الجريان ثنائي الطور بسبب تنوع أنماطه وأنظمة غليانه وحدود تواجدهما واعتماد الباحثين في غالبية أبحاثهم على التجارب العملية، إما في صياغة معادلات تجريبية لتحديد نقاط الفصل لمختلف الأنظمة وتحديد خصائص كل نظام من خلال فهم العمليات الترموهيدروليكية لكل نظام، أو من خلال إدخال معاملات تصحيح تجريبية لمعادلات نظرية للاقترب من حقيقة ما يحدث في هذه الأنظمة، كان لابد من الاستفادة من الكم الهائل الذي تكسب خلال العقود الماضية السابقة من المعادلات ومعاملات التصحيح التجريبية، والتي يصلح كل منها ضمن المجال الذي تم إجراء التجارب فيه من: ضغط، سرعة كتلية، كثافات حرارية، إنتالبي الدخول، أقطار وأطوال خشونة نسبية للأنايب، ومحتوى بخار متغير، بالإضافة إلى الأوضاع المختلفة للأنايب (شاقولية، مائلة، أفقية)، أو على شكل حزم من الأنايب، ذات توضعات مختلفة: شطرنجية أو دائرية.. إلخ، وذلك كل في مجال صلاحية عمل المعادلات بغية تسخيرها لمعرفة أنماط الجريان وأنظمة الغليان السائدة في الأنايب الشاقولية متجانسة التسخين ذات جريان قسري للأعلى بمعرفة كل من: ضغط، إنتالبي الدخول، الكثافة الحرارية، السرعة الكتلية وقطر وطول

الأنبوب عن طريق الاستفادة من بعض هذه المعادلات التجريبية، وإنشاء لوغاريتم يحقق الحسابات لعدد كبير من المتغيرات وهو ما يهدف إليه البحث.

طرائق البحث ومواده:

يعتمد البحث مبدأ الدراسة التحليلية للجريان القسري ثنائي الطور في الأنابيب الشاقولية متجانسة التسخين لتحديد أنماط الجريان وأنظمة الغليان السائدة في الأنابيب بهدف تشخيص حالة الناقل الحراري ثنائي الطور بالاستفادة من الدراسات التجريبية التي أجريت للتنبؤ بحدوث بداية الغليان: السطحي، السطحي المتقدم، الحجمي، المتوازن، والتحول من الجريان الحلقي المشتمت إلى المشتمت والتي يمكن من خلالها التعرف على مميزات أنظمة الغليان وأنماط الجريان (عامل انتقال الحرارة، محتوى البخار، تغيرات الضغط، استقرار الجريان، والتيار الحراري الحرج، الموافق لحدوث أزمة التبادل الحراري... إلخ) من خلال إنشاء لوغاريتم في بيئة Matlab يحقق ذلك.

7- الدراسة التحليلية لأنظمة الجريان والغليان باستخدام العلاقات التجريبية:

تعتمد دراسة أنظمة الجريان والغليان ثنائي الطور في الأنابيب الشاقولية على تقسيم قناة الجريان إلى ثلاث مناطق [1,12] وفق الآتي الشكل (2):

(a) منطقة الجريان أحادي الطور (سائل):

$$h < h_{st} \quad ; \quad T_w < T_s$$

حيث: T_w - درجة حرارة جدار الأنبوب، T_s - درجة حرارة الإشباع للسائل، h_{st} - إنتالبي السائل المشبع، h - الإنتالبي للجريان ثنائي الطور في المقطع المدروس من القناة.

(b) منطقة غليان السائل غير المشبع (منطقة الغليان السطحي):

$$h < h_{st} \quad ; \quad T_w \geq T_s$$

وتقسم هذه المنطقة إلى قسمين:

1. يبدأ هذا القسم من النقطة X_{GK} (الإنتالبي النسبي)، أي من نهاية منطقة الجريان أحادي الطور (حيث $T_w = T_s$ شكل (2) بداية الغليان السطحي غير المتطور) وينتهي عند النقطة X_{HK} التي توافق نقطة بداية الغليان السطحي المتطور.

2. يبدأ هذا القسم من النقطة الموافقة لبداية الغليان السطحي المتطور X_{HK} وينتهي عند النقطة الموافقة لقيمة إنتالبي نسبي $X_o = 0$ (بداية الغليان الحجمي).

(c) منطقة الغليان الحجمي للسائل:

$$h > h_{st} \quad ; \quad T_w > T_s$$

تقسم هذه المنطقة إلى أربعة أقسام:

1. يبدأ من $X_o = 0$ وينتهي عند النقطة X_{PB} الموافقة للنقطة، حيث يمكن اعتبار التيار ترموديناميكياً متوازناً.

2. يبدأ من النقطة X_{PB} وينتهي بالنقطة X_{GP} ، حيث X_{GP} تمثل الإنتالبي النسبي عند نقطة الانتقال من نظام الجريان الحلقي المشنت إلى نظام الجريان المشنت.

3. يبدأ من النقطة X_{GP} وينتهي بالنقطة $X_I = I$ ، حيث $X_I = I$ تمثل الإنتالبي النسبي للبخار المشبع.

4. يبدأ من النقطة X_I وينتهي بمخرج الأنبوب حيث البخار محمصاً *sup* .
يحدد الإنتالبي النسبي لنقطة بداية الغليان للتيار غير المشبع أو بداية الغليان غير المتطور [13] بالعلاقة التالية:

$$X_{Gk} = \frac{-q \times 43.5 \times Re^{0.2} \times Pr^{0.6}}{\rho w \times r} \quad (1)$$

من أجل تحديد نقطة حدوث بداية الغليان المتطور للسائل غير المشبع (الإنتالبي النسبي X_{HK}) تستخدم العلاقة التالية [13]:

$$X_{HK} = -7.5 \times \frac{q}{\rho w \times r} \times \left(\frac{q \times d_G}{r \times \rho_{sg} \times v_{sL}} \right)^{0.08} \left(\frac{W_0 \times d}{v_{sL}} \right)^{0.2} \quad (2)$$

حيث: Re - رقم رينولدز ، Pr - رقم برانتل ، v_{sL} - الحجم النوعي للسائل المشبع (m^3/kg)
 ρ_{sg} - الكتلة النوعية للبخار المشبع (kg/m^3) ، W_0 - سرعة تدوير التيار ثنائي الطور (m/s)
 r - الحرارة الكامنة للتبخير (kJ/kg) ، ρw - السرعة الكتلية للجريان ثنائي الطور ($kg/(m^2.s)$)
 q - الكثافة الحرارية (kW/m^2).

من أجل الجريان ثنائي الطور المتوازن [14] عندما يكون :

$$h_{sL} = h_L \quad ; \quad h_{sg} = h_g \Rightarrow x = X$$

حيث: h_g ، h_L - إنتالبي البخار و إنتالبي السائل

h_{sg} ، h_{sL} - إنتالبي البخار المشبع و إنتالبي السائل المشبع

x - محتوى البخار الكتلي ، X - الإنتالبي النسبي للجريان ثنائي الطور

تحدد معادلة الإنتالبي النسبي بالعلاقة:

$$X = \frac{h - h_{sL}}{r} \quad (3)$$

حيث: h - إنتالبي الجريان ثنائي الطور في المقطع المدروس من القناة.

عند غليان الماء غير المشبع ضمن مجال الضغوط $P = 3 - 15 \text{ MPa}$ ، السرعة الكتلية الحقيقية ϕ للجريان ثنائي الطور في الأنابيب الشاقولية حسب [12] بالعلاقة:

$$\text{حيث: } \varphi = \left[1 + \frac{W_{u\ sg}}{W_{u\ sL}} \times \frac{\rho_{sg}}{\rho_{sL}} \times \frac{1-x}{x} \right]^{-1} \quad (4)$$

$$\frac{W_{u\ sg}}{W_{u\ sL}} = \left[1 + (0.6 + 1.5 \times \beta^2) \frac{1 - \frac{P}{P_{cr}}}{Fr^{0.25}} \times \sqrt{1 - \exp(-20\beta)} \right]$$

$$Fr = \frac{W_0^2}{g \times d} \text{ - رقم فرود}$$

β - محتوى البخار الحجمي التدفقي

p_{cr} - الضغط الحرج

x - محتوى البخار الكتلي الحقيقي للتيار، والذي يساوي نسبة التدفق الكتلي للبخار إلى التدفق الكتلي

للمزيج.

لتحديد x ، اقترحت العلاقة التجريبية التالية [12]:

$$\frac{x - X}{(-X_{HV})} = \exp[-(Y - \lambda Y^3)] \quad (5)$$

حيث:

$$Y = 1 + \frac{X}{(-X_{HV})} ; \quad \lambda = 1 - \ln \frac{x_0}{(-X_{HV})}$$

X_{HV} - الإنتالبي النسبي، الموافق لبداية التبخر الفعال. X - الإنتالبي النسبي

x_0 - محتوى البخار الكتلي عند المقطع حيث $X = 0$ ، المحددة بواسطة العلاقة:

$$X_{HV} = -17 \times \frac{q}{\rho w \times r} \times \left(\frac{\overline{\rho w} \times d}{\mu_{sL}} \right)^{0.2} \quad (6)$$

$$x_0 = -0.2 X_{HV}$$

مع استمرار حركة التيار عبر القناة المسخنة، يسخن السائل وتتساوى درجة حرارة الأطوار في مقطع

القناة، وتقترب قيم x و X_{HV} .

تحدد قيمة محتوى البخار، التي يمكن عندها اعتبار التيار ترموديناميكياً متوازناً ($X_{pB} \cong x$)

بالاستعانة بالعلاقة:

$$\frac{X_{pB}}{(-X_{HV})} = \frac{1.6}{\sqrt[3]{\lambda}} - \frac{1}{4.8 \times \sqrt[3]{\lambda^2}} - 1 \quad (7)$$

هذه الطريقة صالحة من أجل القنوات ذات التسخين المتماثل عبر طول القناة، وذلك عند الشرط:

$$x_{in} < X_{HV} \text{ (محتوى البخار عند مدخل الأنبوب).}$$

حيث:

$W_{u\ sg}$, $W_{u\ sL}$ - السرعة الحقيقية لكل من طوري السائل والبخار على الترتيب (m/s)

$\bar{\rho w}$ - السرعة الوسطية الكتلية ($kg/m^2 \cdot s$)

q - كثافة التيار الحراري kW/m^2

X - الإنتالبي النسبي.

لتحديد المحتوى الحدي الكتلي للبخار x_{GP} ، المقيس عند نقطة التحول من نظام الحلقي المشتت إلى نظام المشتت، تستخدم الصيغة [15] :

$$x_{GP} = 1 - 0.86 \times \exp \left(- \frac{19}{\rho w} \times \sqrt{\frac{\sigma \times \rho_{sL}}{d_{eq}}} \right) \quad (8)$$

حيث: σ - معامل الشد السطحي (N/m).

تعتبر العلاقة (8) إلى حد ما عامة وعند استنتاجها لم توضع أي من القيود الخاصة على نوع السائل، ومجال المتغيرات باستثناء (انخفاض اللزوجة للسائل، $\rho_{sg} < \rho_{sL}$ ، $\sigma \ll d$) [15].

النتائج والمناقشة:

1. اعتمد في إنشاء اللوغاريتم " تحديد أنظمة الغليان والجريان في القناة المولدة للبخار " على تحديد النقاط التالية في الأنبوب والتي تفصل المناطق المختلفة في الأنبوب:

GK بداية الغليان السطحي

HK بداية الغليان السطحي المتقدم

XO بداية الغليان الحجمي

PB بداية الغليان المتوازن

GP بداية الجريان المشتت (نقطة تحول الجريان الحلقي المشتت إلى مشتت)

X1 بخار مشبع

sup بخار محمص

تم تحديد الأنظمة في الأنبوب المولد للبخار بالاعتماد على المعطيات التالية: الضغط، إنتالبي الدخول، السرعة الكتلية، الكثافة الحرارية، طول الأنبوب، قطر الأنبوب .

2. في هذا اللوغاريتم يتم تقسيم البرنامج إلى برامج جزئية، كل برنامج جزئي مخصص لنظام محدد ، مسمى باسم الجزء الأول عند مدخل الأنبوب، بحيث تتكون لدينا الأنظمة الرئيسية التالية:

- A. O-LI نظام يبدأ فيه الأنبوب بالجزء LI، الذي يمثل السائل.
- B. O-GK نظام يبدأ فيه الأنبوب بالجزء LGK ، ويمثل بداية الغليان السطحي.
- C. O-HK نظام يبدأ فيه الأنبوب بالجزء LHK ، الذي يمثل بداية الغليان السطحي المتقدم.
- D. O-XO نظام يبدأ فيه الأنبوب بالجزء LXO ، الذي يمثل بداية الغليان الحجمي
- E. O-PB نظام يبدأ فيه الأنبوب بالجزء LPB ، الذي يمثل بداية الغليان المتوازن.
- F. O-GP نظام يبدأ فيه الأنبوب بالجزء L_{GP} ، الذي يمثل بداية نقطة تحول الجريان الحلقي

المشتت إلى مشتت.

G. O-X1 نظام يبدأ فيه الأنبوب بالجزء L_{SUP} ، الذي يمثل بداية البخار المحمص.

3. تتضمن البرامج الجزئية تقسيمات فرعية، يتم من خلالها تقسيم كل نظام رئيسي إلى عدة أنظمة

فرعية كل منها يبدأ بنفس اسم النظام المنبثق عنه.

4. الأنظمة الرئيسية :

I. نظام السائل أحادي الطور O-LI :

➤ الأنظمة الفرعية:

(1) LI_21

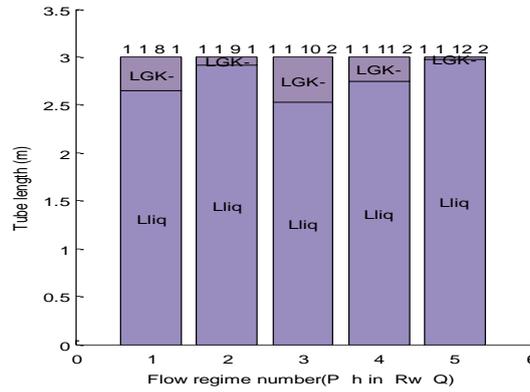
يحتوي على جزأين: LI (البداية مدخل الأنبوب والنهاية GK) و 21(LGK-) يبدأ بـ GK وينتهي بين GK و HK

. يوضح الشكل (4) وجود نظامين سائدين في كل أنبوب، الأول يمثل الجزء السائل L_{liq} والثاني يمثل جزء الغليان

السطحي LGK-. تختلف كل من مجموعتي الأنبوب " (1 1 8 1) ، (1 1 9 1) " و " (1 1 10 2) ، (1 1 11 2) ، (1 1 1 1 1 2)

" (12 2) " بالسرعة الكتلية بثبات بقية المتحولات (الضغط، إنتالبي الدخول، الكثافة الحرارية) ، يلاحظ أنه يزداد طول

الجزء السائل L_{liq} بزيادة السرعة الكتلية ويتناقص طول جزء الغليان السطحي LGK-

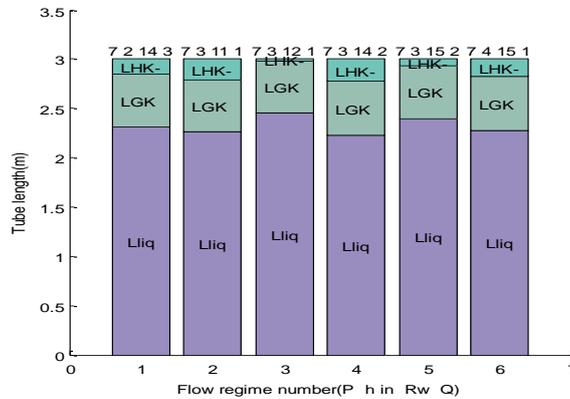


الشكل (4) - تغير أنظمة الغليان والجريان على طول الأنبوب

(2) LI_GK_22

يحتوي على ثلاثة أجزاء: LI ، GK (البداية GK والنهاية HK) ، و 22 (أو LHK-) (البداية HK والنهاية

تقع بين HK و XO) ، كما يبين الشكل (5).



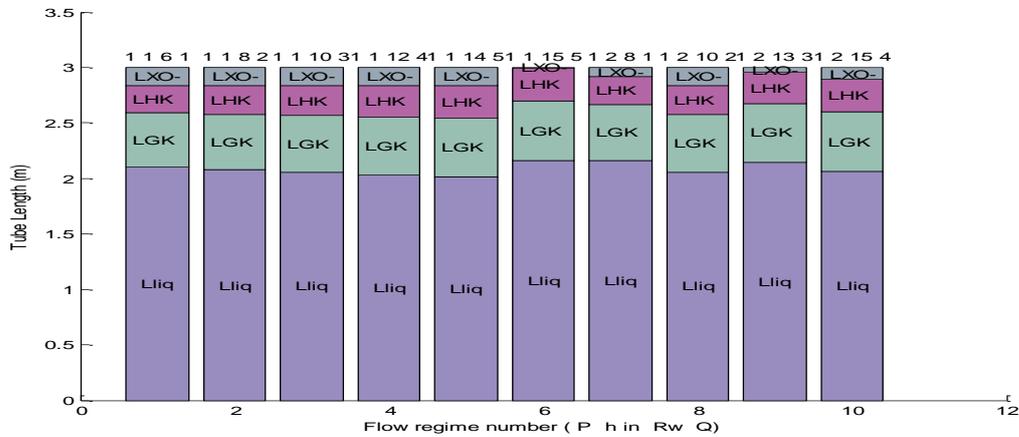
الشكل (5) - تغير أنظمة الغليان و الجريان على طول الأنبوب

تختلف مجموعتي الأنابيب " (7 3 11 1) ، (7 3 12 1) ، (7 3 14 2) ، (7 3 15 2) " فيما بينها بالسرعة الكتلية، يتضح أنه بزيادة السرعة الكتلية يزداد طول الجزء السائل L_{liq} على حساب تناقص طول الجزء L_{HK} بشكل رئيسي .

LI_GK_HK_3 (3)

يحتوي على أربعة أجزاء: LI ، GK ، HK (البداية HK والنهاية XO) ، 3 (أو L_{XO}) (البداية XO والنهاية تقع بين XO و PB)، كما يبين الشكل (6).

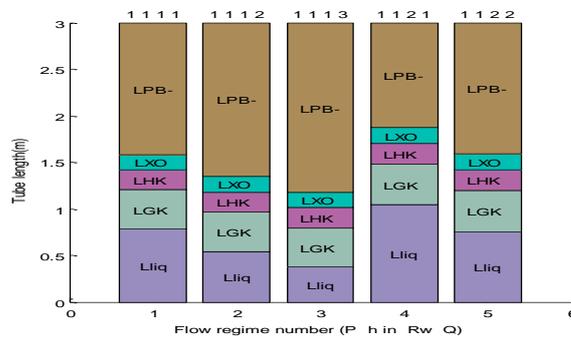
الشكل (6) يبين وجود الأجزاء الأربعة، كما أن مجموعة الأنابيب " (1 1 14 5) ، (1 1 15 5) " تختلف بالسرعة الكتلية، حيث زيادة السرعة الكتلية بثبات باقي المتحولات تؤدي إلى زيادة طول الجزء السائل L_{liq} على حساب تناقص الجزء L_{XO} بشكل رئيسي.



الشكل (6) - تغير أنظمة الغليان و الجريان على طول الأنابيب

LI_GK_HK_XO_4 (4)

يحتوي على خمسة أجزاء: LI ، GK ، HK ، XO (البداية XO والنهاية PB) ، 4 (أو L_{PB}) (البداية PB والنهاية تقع بين PB و GP)، كما يبين الشكل (7).



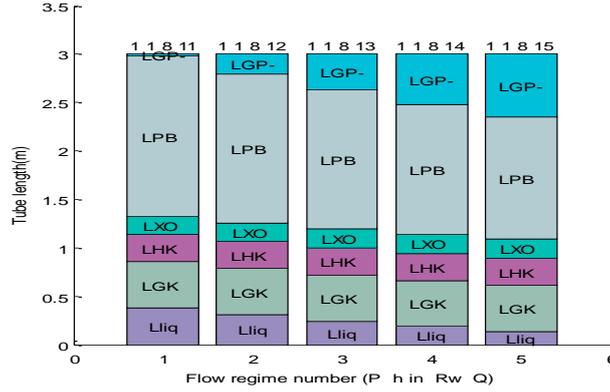
الشكل (7) - تغير أنظمة الغليان و الجريان على طول الأنابيب

يتضح أنه بزيادة الكثافة الحرارية، يتناقص طول الجزء السائل L_{liq} على حساب تزايد طول الجزء المتوازن PB بشكل رئيسي، كما تبين مجموعتي الأنابيب " (1 1 1 1) ، (1 1 1 2) ، (1 1 1 3) ، (1 1 2 1) ، (1 1 2 2) " بينما

تغير أطوال الأجزاء الأخرى يكون ضئيلاً، الأطوال " (L_{XO}) ، " (L_{HK}) ، " (L_{GK}) "، أما مجموعتا الأنايبب " $(1 1 1 1)$ ، " $(1 1 2 1)$ "، " $(1 1 2 2)$ " تختلف فيما بينها بالسرعة الكتلية، يتضح أنه بزيادة السرعة الكتلية يزداد طول الجزء السائل L_{liq} على حساب تناقص طول الجزء L_{PB} بشكل رئيسي، بينما يكون تغير باقي الأجزاء ضئيلاً .

LI_GK_HK_XO_PB_5 (5)

يحتوي على ستة أجزاء: LI ، GK ، HK ، XO ، PB (البداية PB والنهائية GP)، 5 (أو L_{GP}) (البداية GP والنهائية تقع بين GP و X1)، كما يوضح الشكل (8).



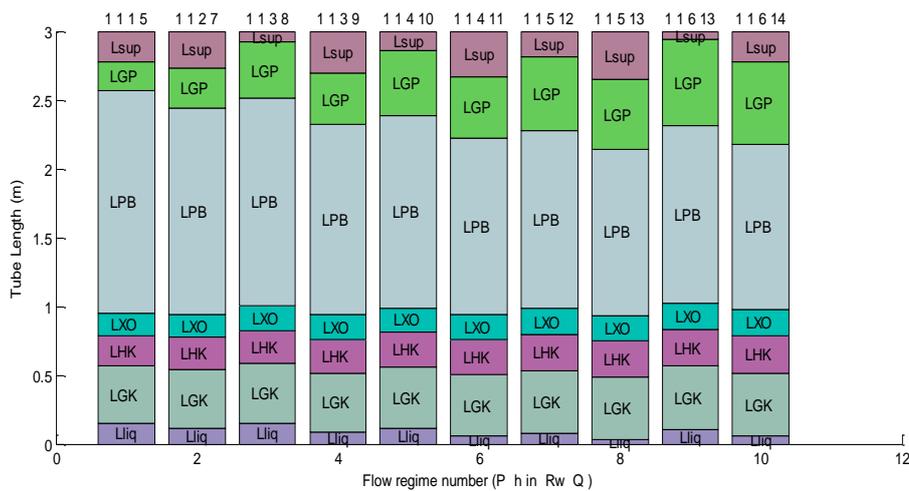
الشكل (8) - تغير أنظمة الغليان و الجريان على طول الأنابيب

تختلف الأنايبب " $(1 1 8 11)$ ، " $(1 1 8 12)$ ، " $(1 1 8 13)$ ، " $(1 1 8 14)$ ، " $(1 1 8 15)$ " فيما بينها بالكثافة الحرارية، ويتضح أنه مع زيادة الكثافة الحرارية يتناقص طول الجزء السائل L_{liq} والجزء L_{PB} ، على حساب تزايد طول الجزء L_{GP} ، بينما يكون تغير باقي الأجزاء ضئيلاً .

LI_GK_HK_XO_PB_GP_6 (6)

يحتوي على ستة أجزاء: LI ، GK ، HK ، PB ، XO ، GP (البداية GP والنهائية X1)، 6 (أو L_{SUP}) (البداية X1 والنهائية تقع بين X1 ونهاية الأنبوب حيث البخار محمص)، كما يبين الشكل (9).

يتضح أنه بزيادة الكثافة الحرارية، بثبات باقي المتحولات، يتناقص طول الجزء السائل L_{liq} وطول الجزء المتوازن L_{PB} وكذلك طول الجزء L_{GP} ، وذلك على حساب تزايد طول الجزء L_{SUP} ، بينما تكون تغيرات الأطوال " (L_{XO}) ، " (L_{HK}) ، " (L_{GK}) " ضئيلاً، مجموعات الأنايبب " $(1 1 3 8)$ ، " $(1 1 3 9)$ "، " $(1 1 4 10)$ ، " $(1 1 4 11)$ "، " $(1 1 5 12)$ ، " $(1 1 5 13)$ "، " $(1 1 6 13)$ ، " $(1 1 6 14)$ "



الشكل(9)- تغير أنظمة الغليان والجريان على طول الأنابيب

II. النظام O-GK :

➤ الأنظمة الفرعية

(1) GK_22

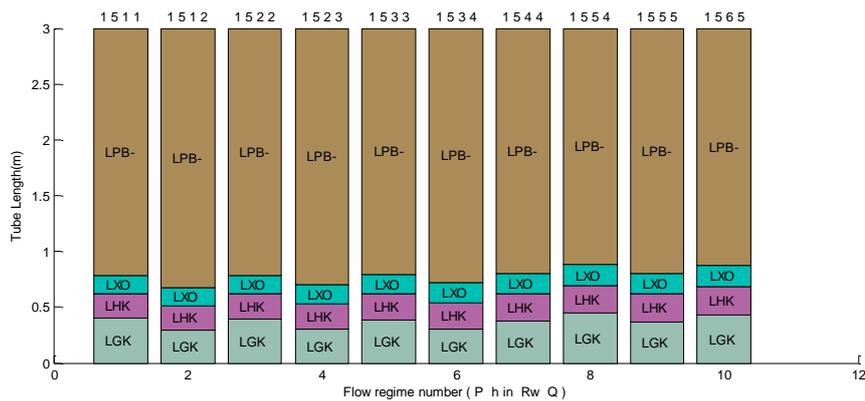
يحتوي على جزأين: GK (البداية إنتالبي الدخول والنهاية HK)، 22 (أو L_{HK}) (البداية HK والنهاية تقع بين HK و XO).

(2) GK_HK_3

يحتوي على ثلاثة أجزاء: GK ، HK (البداية HK والنهاية XO)، 3 (أو L_{XO}) (البداية XO والنهاية تقع بين XO و PB).

(3) GK_HK_XO_4

يحتوي على أربعة أجزاء: GK ، HK ، XO (البداية XO والنهاية PB) ، والرابع 4 (أو L_{PB}) (البداية PB والنهاية بين PB و GP). كما يبين الشكل (10).



الشكل(10)- تغير أنظمة الغليان والجريان على طول الأنابيب

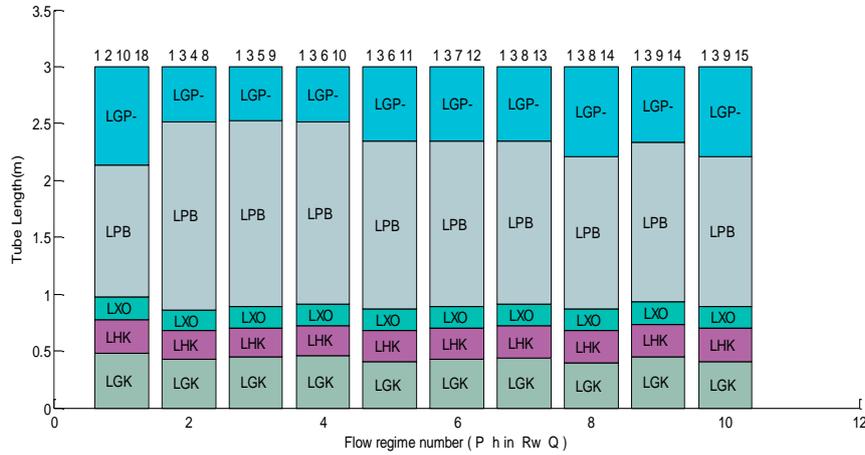
يتضح أنه بزيادة الكثافة الحرارية، بثبات باقي المتحولات، يتناقص طول جزء الغليان السطحي LGK على حساب تزايد طول جزء الغليان المتوازن L_{PB}، كما تشير مجموعة الأنابيب " (1 5 1 1)، (1 5 1 2)، "، (1 5 2 1)، (2)، " (1 5 2 3)، (1 5 3 3)، (1 5 3 4)، "، بينما مجموعات الأنابيب " (1 5 1 2)، (1 5 2 2)، "، (1 5 2 3)، (1 5 3 3)، (1 5 3 4)، (1 5 4 4)، (1 5 4 4)، (1 5 4 4)، (1 5 5 4)، " تختلف بالسرعة الكتلية. يتضح أنه بزيادة السرعة

الكتلية، يزداد طول جزء الغليان السطحي L_{GK} ، على حساب تناقص طول جزء الغليان المتوازن L_{PB} ، بينما تتغير باقي الأطوال بشكل ضئيل .

GK_HK_XO_PB_5 (4)

يحتوي على خمسة أجزاء: GK ، HK ، XO ، PB (البداية PB والنهاية GP) ، 5 (أو L_{GP}) (البداية GP والنهاية بين GP و $X1$)، كما يبين الشكل (11).

تختلف مجموعات الأنابيب " (1 3 6 10)، (1 3 6 11)، (1 3 8 13)، (1 3 8 14)، (1 3 8 14)، (1 3 9 14)، (1 3 9 15) " فيما بينها بالكثافة الحرارية، يتضح أنه بزيادة الكثافة الحرارية، يتناقص طول جزء الغليان السطحي L_{GK} وطول جزء الغليان المتوازن L_{PB} ، على حساب تزايد طول الجزء L_{GP} ، بينما تتغير أطوال باقي الأجزاء ضئيل. يظهر تأثير السرعة الكتلية، من خلال الأنابيب " (1 3 8 14)، (1 3 9 14) "، التي تختلف بالسرعة الكتلية، ويتضح أنه بزيادة السرعة الكتلية يزداد طول جزء الغليان السطحي L_{GK} وطول جزء الغليان المتوازن L_{PB} على حساب تناقص طول الجزء L_{GP} ، بينما تتغير باقي الأجزاء ضئيل .

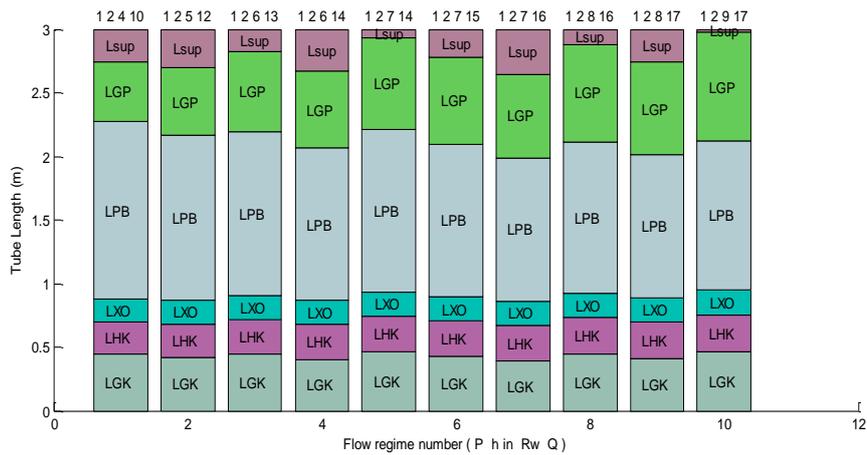


الشكل(11)- تغير أنظمة الغليان والجريان على طول الأنبوب

GK_HK_XO_PB_GP_6 (5)

يحتوي على ستة أجزاء: GK ، HK ، XO ، PB ، GP (البداية GP والنهاية $X1$) ، و 6 (أو L_{SUP}) (البداية $X1$ والنهاية تقع بين $X1$ ونهاية الأنبوب حيث البخار محمص)، كما يبين الشكل (12).

يتضح أنه بزيادة الكثافة الحرارية يتناقص طول جزء الغليان السطحي L_{GK} وطول جزء الغليان المتوازن L_{PB} وكذلك طول الجزء المشتمت L_{GP} على حساب تزايد طول جزء البخار المحمص L_{SUP} ، بينما تتغير باقي الأجزاء بشكل طفيف، تختلف مجموعات الأنابيب " (1 2 6 13)، (1 2 6 14)، (1 2 7 14)، (1 2 7 15)، (1 2 7 16)، (1 2 7 16) "، إلى تزايد الأطوال (8 16)، (1 2 8 17) " فيما بينها بالكثافة الحرارية بثبات بقية المتحولات. تؤدي زيادة السرعة الكتلية، إلى تزايد الأطوال L_{GP} ، L_{PB} ، L_{GK} على حساب تناقص طول الجزء L_{SUP} ، بينما تتغير باقي الأجزاء بشكل ضئيل، انظر مجموعات الأنابيب " (1 2 6 14)، (1 2 7 14)، (1 2 7 16)، (1 2 8 16) "



الشكل (12)- تغير أنظمة الغليان والجريان على طول الأنابيب

GK_HK_XO_PB_GP_7 (6)

ويتكون من نفس أجزاء النظام الفرعي السابق 5

.III النظام O-HK :

➤ الأنظمة الفرعية :

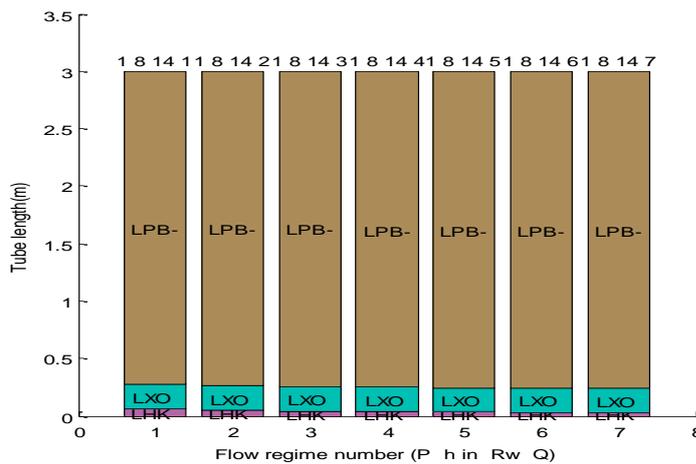
HK_3 (1)

يحتوي على جزأين: HK (البداية إنتالي الدخول والنهاية XO)، الثاني 3 (أو LXO) (البداية XO والنهاية تقع بين XO و PB).

HK_XO_4 (2)

يحتوي على ثلاثة أجزاء: HK ، XO (البداية XO والنهاية PB) ، و 4 (أو LPB) (البداية PB والنهاية تقع بين GP و PB).

يبين الشكل (13) أنه بزيادة الكثافة الحرارية يتناقص الطول L_{HK} قليلاً على حساب تزايد طول الجزء L_{PB} ، علماً أن الأنابيب تختلف بالكثافة الحرارية فقط، أما تغير L_{XO} فيكون ضئيلاً .



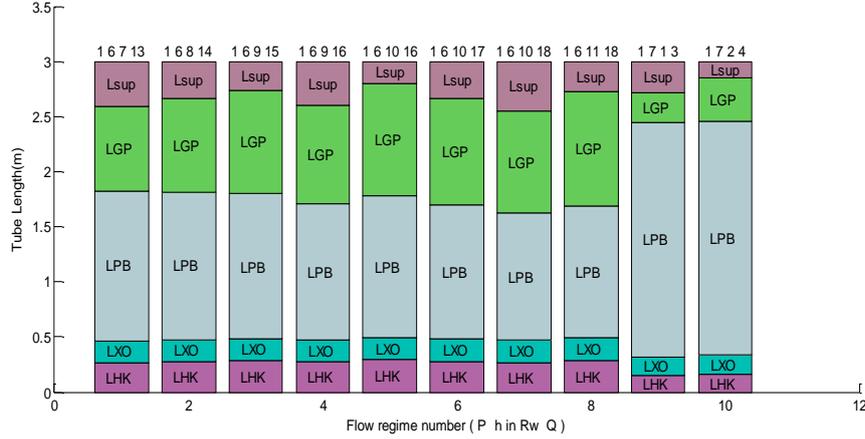
الشكل (13)- تغير أنظمة الغليان و الجريان على طول الأنابيب

HK_XO_PB_5 (3)

يحتوي على أربعة أجزاء : HK ، XO ، PB (البداية PB والنهاية GP)، و 5 (أو L_{GP}) (البداية GP والنهاية تقع بين GP و X1).

4 HK_XO_PB_GP_6 :

يحتوي على خمسة أجزاء: HK ، XO ، PB ، GP (البداية GP والنهاية X1) ، و 6 (أو L_{SUP}) (البداية X1 والنهاية تقع بين X1 ونهاية الأنبوب حيث البخار محمص)، كما يبين الشكل (14).



الشكل (14)- تغير أنظمة الغليان والجريان على طول الأنبوب

بزيادة الكثافة الحرارية يتناقص طول جزء الغليان المتوازن L_{PB} والجزء L_{GP} على حساب تزايد طول جزء البخار المحمص L_{SUP} ، بينما تغير الأطوال L_{XO} ، L_{HK} ، والأنابيب " (1 6 9 15) ، (1 6 9 16) ، " ، " (1 6 10 16) ، (1 6 10 17) ، (1 6 10 18) ، تختلف بالكثافة الحرارية ، وبزيادة السرعة الكتلية يزداد طول L_{PB} والطول L_{GP} على حساب تناقص طول L_{SUP} ، " (1 6 9 16) ، (1 6 10 16) ، " ، " (1 6 10 18) ، (1 6 11 18) ، بينما تغير بقية الأجزاء ضئيل .

IV. النظام O-XO :

➤ الأنظمة الفرعية:

1 XO_4

يحتوي على جزأين XO (البداية إنتالبي الدخول والنهاية PB) ، 4 (L_{PB}) (البداية PB والنهاية تقع بين PB و GP).

2 XO_PB_5

يحتوي على ثلاثة أجزاء: XO ، PB (البداية PB والنهاية GP) ، 5 (L_{GP}) (البداية GP والنهاية تقع بين GP و X1)

3 XO_PB_GP_6

يحتوي على أربعة أجزاء: XO ، PB ، GP (البداية GP والنهاية X1) ، 6 (L_{SUP}) (البداية X1 والنهاية تقع بين X1 ونهاية الأنبوب حيث البخار محمص).

4 XO_PB_GP_7

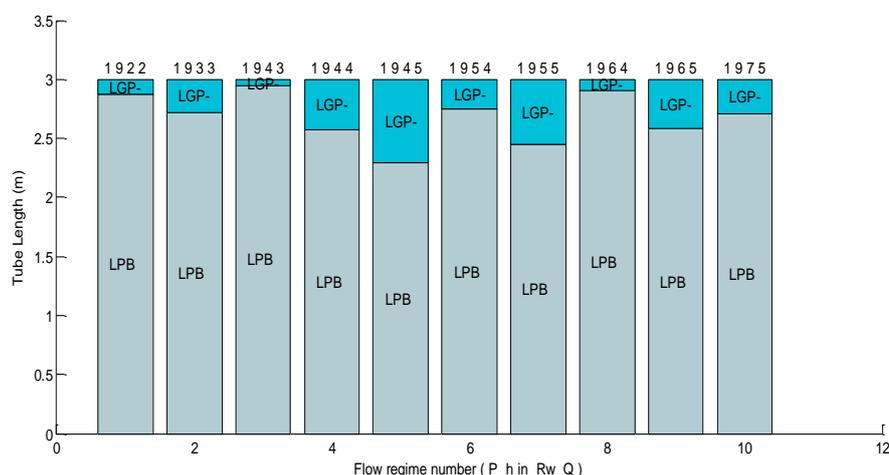
ويتكون من نفس أجزاء النظام الفرعي السابق 3.

V. النظام O-PB :

➤ الأنظمة الفرعية:

(1) PB_5

يحتوي على جزأين: PB (البداية إنتالبي الدخول والنهاية GP)، 5 (LGP-) (البداية GP والنهاية تقع بين GP و X1)، كما يبين الشكل (15).

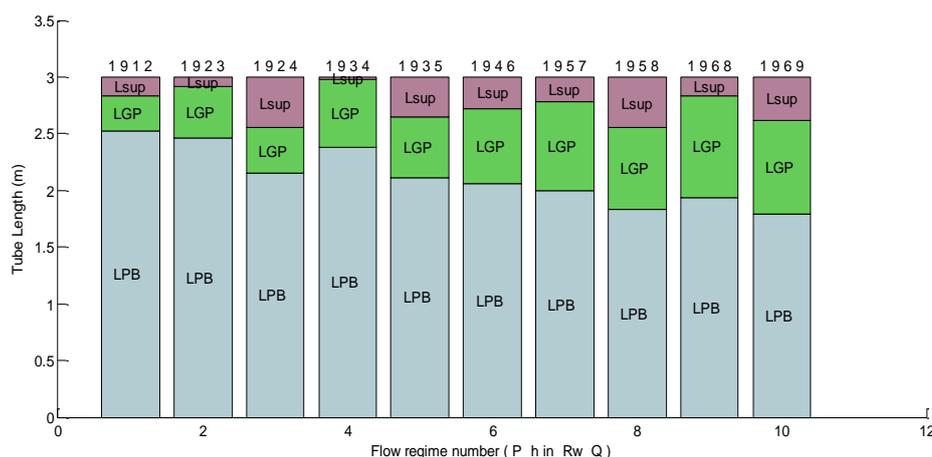


الشكل(15)- تغير أنظمة الغليان و الجريان على طول الأنابيب

يتضح أنه بزيادة الكثافة الحرارية يتناقص الطول L_{PB} على حساب تزايد الطول L_{GP-} ، انظر الأنابيب " (1 9 1) ، (4 3) ، (1 9 4 4) ، (1 9 4 5)"، وبزيادة السرعة الكتلية يزداد الطول L_{PB} على حساب تناقص الطول L_{GP-} ، الأنابيب " (1 9 6 5) ، (1 9 7 5)".

(2) PB_GP_6

يحتوي على ثلاثة أجزاء: GP ، PB: (البداية GP والنهاية X1) ، 6 (L_{SUP}) (البداية X1 والنهاية تقع بين X1 ونهاية الأنبوب حيث البخار محمص SUP)، كما يبين الشكل(16).



الشكل(16)- تغير أنظمة الغليان و الجريان على طول الأنابيب

يلاحظ أنه بزيادة الكثافة الحرارية، يتناقص طول جزء الغليان المتوازن L_{PB} وطول الجزء L_{GP} على حساب تزايد طول جزء البخار المحمص L_{SUP} . تختلف مجموعات الأنابيب " (1 9 2 3) ، (1 9 2 4) ، (1 9 3 4) ، (1 9 3)

(5)، "(1 9 5 7)، (1 9 5 8)"، "(1 9 6 8)، (1 9 6 9)" فيما بينها بالكثافة الحرارية. بزيادة السرعة الكتلية، يزداد طول جزء الغليان المتوازن L_{PB} والجزء L_{GP} وينحسر طول الجزء L_{SUP} ، الأنابيب "(1 9 2 4)، (1 9 3 4)"، "(1 9 1 9)"، "(1 9 6 8)، (5 8)".

PB_GP_7 (3)

ويتكون من نفس أجزاء النظام الفرعي السابق 2.

VI. النظام O-GP :

➤ الأنظمة الفرعية:

GP_6 (1)

يحتوي على جزأين: GP (البداية إنتالبي الدخول والنهاية X1)، $L_{SUP}6$ (البداية X1 والنهاية تقع بين X1 ونهاية الأنبوب حيث البخار محمص).

GP_7 (2)

ويتكون من نفس أجزاء النظام الفرعي السابق 1.

الاستنتاجات والتوصيات:

1. تم تحديد أنظمة الغليان والجريان السائدة في الأنبوب المولد للبخار بالاستعانة بالمعادلات التجريبية لتحديد بداية الغليان: السطحي، السطحي المتطور، الحجمي، المتوازن، ونقطة تحول الجريان الحلقي المشتت إلى مشتت، البخار المشبع، بدلالة المعطيات: الضغط، إنتالبي الدخول للناقل الحراري، السرعة الكتلية، الكثافة الحرارية، طول وقطر الأنبوب.

2. إنشاء لوغاريتم بلغة Matlab، حيث قسم البرنامج إلى برامج جزئية، كل برنامج جزئي مخصص لنظام محدد، مسمى باسم الجزء الأول عند مدخل الأنبوب، بحيث تتكون لدينا الأنظمة الرئيسية التالية: O-X1، O-GP، O-PB، O-XO، O-HK، O-GK، O-LI.

3. تبين أنه مع زيادة الكثافة الحرارية تتناقص أطوال الأنظمة: L_{liq} ، L_{GK} ، L_{HK} ، L_{PB} ، عندما يكون أحد هذه الأنظمة عند مدخل الأنبوب، وذلك على حساب تزايد أطوال الأنظمة L_{PB} ، L_{GP} ، L_{SUP} ، إذا كان أحد هذه الأنظمة موجود عند نهاية الأنبوب، بينما تكون تغيرات أطوال الأنظمة L_{GK} ، L_{HK} ، L_{XO} ، ضئيلة عندما لا تكون هي الأنظمة السائدة الأولى عند مدخل الأنبوب.

4. تبين أنه مع زيادة الكثافة الحرارية تتناقص أطوال الأنظمة: L_{liq} ، L_{GK} ، L_{HK} ، L_{PB} ، عندما يكون أحد هذه الأنظمة عند مدخل الأنبوب، وكذلك تتناقص أطوال الأنظمة: L_{PB} ، L_{GP} ، إذا لم تكن هذه الأنظمة هي الأخيرة في الأنبوب، هذا التناقص يتم على حساب ازدياد طول النظام السائد الأخير عند مخرج الأنبوب.

5. تبين أنه مع زيادة السرعة الكتلية تزايد أطوال الأنظمة: L_{liq} ، L_{GK} ، L_{HK} ، L_{PB} ، عندما يكون أحد هذه الأنظمة عند مدخل الأنبوب وذلك على حساب تناقص أطوال الأنظمة L_{PB} ، L_{GP} ، L_{SUP} ، إذا كانت إحداها موجودة عند نهاية الأنبوب، بينما تكون تغيرات أطوال L_{GK} ، L_{HK} ، L_{XO} ، ضئيلة عندما لا تكون هي الأنظمة الأولى السائدة في الأنبوب وخاصة L_{XO} .

6. تبين أنه مع زيادة السرعة الكتلية تتزايد أطوال الأنظمة: L_{PB} ، L_{HK} ، L_{GK} ، L_{liq} ، عندما يكون أحد هذه الأنظمة عند مدخل الأنبوب، وكذلك تتزايد أطوال الأنظمة: L_{GP} ، L_{PB} ، إذا لم يكن أحد هذه الأنظمة هو الأخير في الأنبوب، هذا التزايد يتم على حساب تناقص طول النظام السائد الأخير عند مخرج الأنبوب.
7. تتيح البرامج المنشأة إمكانية تمثيل كافة المتحولات ضمن كل نظام فرعي، أو المتحولات ضمن كل نظام رئيسي، عن طريق تخزين كافة المعطيات والنتائج ضمن مصفوفات، بحيث تخصص مصفوفة لكل نظام فرعي لتخزين المعطيات والنتائج الخاصة به، وبحيث تملك هذه المصفوفات نفس عدد الأعمدة (تمثل المعطيات والنتائج) وينفس التسلسل لكافة المصفوفات، مما يسهل عملية التمثيل ودقتها ولعدد ضخم من المتحولات تصل إلى خمسة وستين متحولاً لكل مصفوفة، وعدد غير محدود في العمود الواحد (عدد الأسطر في المصفوفة) .
8. نقترح إجراء أبحاث تجريبية لتغطية مجالات أوسع من: الضغوط والسرع الكتلية والكثافات الحرارية وأقطار أخرى للأنايبب للحصول على تصنيف دقيق لأنظمة الغليان والجريان ثنائي الطور.
9. نوصي بإنشاء نظام كامل للتحكم بكافة أنظمة الغليان والجريان في الأنايبب الشاقولية مستقبلاً ، بحسب الطلب ، ولكن ضمن حدود موضوعة بعناية للاستفادة من ميزات كل نظام غليان أو جريان في تحقيق أغراض متعددة لتطبيقات مختلفة .

المراجع:

1. GHIAASIAAN, M. S.; Two-Phase Flow Boiling and Condensation in Conventional and Miniature Systems. First ed., Cambridge University Press-2008, 613.
2. SAFFARI, H. , GHOBADI, M. ; Calculation of Convective Boiling in a Vertical Tube at Sub- atmospheric Pressures, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 4(2010), 687-697.
3. ABEDINI, S. H.; A Thesis Presented to the Faculty of The Graduate College at the University of Nebraska In Partial Fulfillment of Requirements For the Degree of Master of Science ,A Numerical Investigation of Two Phase Solar-Collector Pipe, Lincoln, Nebraska, May, 2012, 87.
4. International Journal of Chem Tech Research CODEN(USA): IJCRGG ISSN : 0974-4290, Flow Boiling Heat Transfer in Mini and Micro Channels - A State of the Art Review V. Alagesan School of Chemical and Biotechnology, Sastra University, Thanjavur - 613401 Tamil Nadu, India, Oct-Dec 2012, Vol.4, No.4, pp 1247-1259.
5. TU, J.Y. , YEOH, G.H.; Development of A numerical Model for Sub cooled Boiling Flow ,Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO,Melbourne,Australia,10-12 December 2003, 559-568.
6. STEVANVIC, V. Professor Sanja Prica Research Assistant MASLOVIĆ B. Research Assistant University of Belgrade Faculty of Mechanical Engineering, Multi-Fluid Model Predictions of Gas- Liquid Two-Phase Flows in Vertical Tubes , VOL. 35, No 4, FME Transactions, 2007, 173-181.
7. DELHAYE, J.M.,GIOT, M.,RIETHMULLER, M.L.; Thermo Hydraulics of Two-Phase Systems for Industrial Design and Nuclear Engineering- Hemisphere publishing corporation, McGraw-Hill Book Company, 1981, 421.
8. BUONGIORNO, J. Associate Professor of Nuclear Science and Engineering 22.06 Engineering of Nuclear Systems MIT Department of Nuclear Science and Engineering Notes on Two-Phase Flow, Boiling Heat Transfer, and Boiling Crisis in PWRs and BWRs JB / Fall 2010, 34.
9. GONZALEZ, J. Z.; Thesis Doctoral ,Water Evaporation in Tubes: Analytical Approach For The Sub cooled Flow Boiling Region and Development of A Method For Evaluation and Sizing Evaporators ,Madrid, December 2009, 190.
10. ABDEL AZIM, A. Y., HANAFI, S. A., and KHALIL E. E; Sub cooled Flow Boiling of Water Enhancement by Using Internal Surface Coating, Int. J. of Thermal & Environmental Engineering, Department of Mechanical Engineering, Cairo University, Cairo, Egypt, 2011, Volume 2, No. 2, 83-90.
11. KUMAR, R. Prof.; Two phase Flow Patterns and Flow Maps, Indo-German academy, Animesh A grawal , Indian institute technology, Delhi, 2010,39.
12. PETUKHOV, B.S., GENIN,L.G.,GOVALIOV,S.A.; Heat Transfer of Nuclear Power Units; second ed. Power Atom Press Moscow. 1986,472.
13. GRIGORIEV, V.A., ZORIN V.M.; Atomic Thermal Electric Stations; Handbook, Energy Press ,Moscow, 1982, 624.
14. POLYANIN, L.N.,IBRAHIMOV, M.X.,SOBILOV,G.E.; Heat Transfer in Nuclear Reactors. Energy Press ,Moscow,1982, 88.
15. GALCHENCO,E.F.,CERGEIEV,V.V.; Generalized Data of Boundary Steam Content ,Teploenergetica vol.3-Moscow 1983, p158-159.

الرموز والمصطلحات:

- GK - غليان سطحي HK - غليان سطحي متقدم XO - غليان حجمي
 PB - غليان متوازن GP - جريان مشنتت (تحول الجريان الحلقي المشنتت إلى مشنتت)
 X_1 - بخار مشبع sup - بخار محمص O-LI - نظام يبدأ فيه الأنبوب بالسائل بالليق
 O-GK - نظام يبدأ فيه الأنبوب بالجزء L_{GK} ، "الغليان السطحي".
 O-HK - نظام يبدأ فيه الأنبوب بالجزء L_{HK} "الغليان السطحي المتقدم".
 O-XO - نظام يبدأ فيه الأنبوب بالجزء L_{XO} "الغليان الحجمي"
 O-PB - نظام يبدأ فيه الأنبوب بالجزء L_{PB} "الغليان المتوازن".
 O-GP - نظام يبدأ فيه الأنبوب بالجزء L_{GP} "نقطة تحول الجريان الحلقي المشنتت إلى مشنتت".
 O-X1 - نظام يبدأ فيه الأنبوب بالجزء L_{SUP} "البخار المحمص".
 DNB - الابتعاد عن الغليان النووي.
 ONB - بداية الغليان النووي.

الأقواس في نص البحث وفي الأشكال المختلفة والتي تحوي على أربعة أرقام (تشير إلى ما يلي:

الرقم الأول(1): ضغط الدخول وقيمته ثابتة $P = 3 \text{ MPa}$

الرقم الثاني(1÷15): إنتالبي الدخول وقيمته تتراوح ما بين $h_{in} = (300 - 1700) \text{ kJ/kg}$ بقفزة 100

الرقم الثالث(1÷15): السرعة الكتلية وقيمته تتراوح ما بين $\rho_w = (400 - 1800) \text{ kg/ (m}^2 \cdot \text{sec)}$ بقفزة 100

الرقم الرابع(1÷20): الكثافة الحرارية وقيمته تتراوح ما بين $Q = (500 - 2400) \text{ kW/m}^2$ بقفزة 100