

## فعالية تنظيف نواتج الاحتراق من SO<sub>2</sub> باستخدام أجهزة الامتصاص الرغوية دراسة تجريبية ومحاكاة رقمية

الدكتورة عواطف وحيد نصره\*

(تاريخ الإيداع 24 / 8 / 2015. قُبل للنشر في 6 / 12 / 2015)

### □ ملخص □

يهدف البحث إلى إيجاد طريقة لحساب المميزات الهيدروديناميكية والحرارية لأجهزة الامتصاص الرغوية المستخدمة في الطرق الرطبة لتنظيف نواتج الاحتراق من SO<sub>2</sub> من أجل زيادة فعالية واقتصادية هذه الطرق. لذلك تمت دراسة التبادل الحراري والهيدروديناميكي لجهاز الامتصاص ذو الطبقة المتحركة الثنائية الطور (الرغوية) مع نماذج مختلفة من أجهزة التلامس، وعلى أساس المعطيات التجريبية والتحليل الرياضي لها تم الحصول على المعادلات التي تسمح بتقييم تأثير العوامل الظرفية في المتغيرات الأساسية لطبقة الرغوة. كما تمّ التأكيد على أن التبادل الحراري في مجال طبقة الرغوة يتميز بفعالية عالية للتبادل الحراري بين الغاز والسائل في طبقة الرغوة، وبين طبقة الرغوة والسطح المغمور. وأن معامل انتقال (تبادل) الحرارة بالحمل يتوقف على الشروط الابتدائية للطور الغازي والسائل وعلى فرق درجات حرارة نقطة الندى للغازات والسائل عند مدخل جهاز الامتصاص. بالنسبة لفعالية تنظيف غازات الاحتراق من SO<sub>2</sub> فإن درجة التنظيف في الحدود العليا للنظام الرغوي تصل إلى (95,95%) خلال مرحلة تلامس واحدة. سمحت الدراسة أيضاً بزيادة الوثوقية لنظام التنظيف الرطب عن طريق اختيار التصميم الأمثل وذلك على أساس النتائج التي تمّ الحصول عليها.

**الكلمات المفتاحية:** أجهزة الامتصاص الرغوية، فعالية، وثوقية، تنظيف نواتج الاحتراق، الطرق الرطبة، أجهزة رغوية.

\* مدرسة - قسم البحرية - كلية الهندسة الكهربائية والميكانيكية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

## The effectiveness of cleaning the combustion products of SO<sub>2</sub> using scrubbers foam Experimental study and numerical simulation

Dr. Awatef Wahid Nasra \*

(Received 24 / 8 / 2015. Accepted 6 / 12 / 2015)

### □ ABSTRACT □

The research aims to find a way to calculate the hydrodynamic and thermal characteristics of devices absorption foam used in the wet roads to clean the combustion products of SO<sub>2</sub> to increase the effectiveness of these methods and economic. For it has been studied heat exchange and hydrodynamic device absorption with bilateral phase moving layer (foam) with different models of contact devices, and on the basis of experimental data and mathematical analysis have been obtained equations that allow assessment of the impact of contextual factors in the core layer foam variables.

It was also stressed that the heat exchange in the field of foam layer is characterized by high efficiency heat exchange between the gas and the liquid in the foam layer and between the foam layer and the surface submerged, and give the temperature coefficient depends on the initial conditions of gaseous and liquid phase and the temperatures of the dew point of the gas and liquid teams at the entrance device absorption. As for the effectiveness of cleaning the combustion gases from the cleaning degree of SO<sub>2</sub> in the upper border of the foam system up to (95,95%) on stage touches one.

The study also allowed increase reliability for wet cleaning system by selecting the optimum poisoning and on the basis of data obtained.

**Keywords:** scrubbers foam, effectiveness, reliability, cleaning products, wet roads, foam devices.

---

\*Assistant Professor, Marine Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**مقدمة:**

إنَّ سوء حالة الوسط المحيط المترافقة بالزيادة المستمرة للنواتج التي يخلِّقها الإنسان يسترعي الاهتمام الكبير من قبل جميع الدول المتطورة صناعياً، وذلك لما له من انعكاسات سلبية على البيئة بجميع مكوناتها، ويُعتبر ثاني أكسيد الكبريت  $SO_2$  أحد أكثر ملوثات البيئة خطورة [1].

تُعتبر وحدات الطاقة الحرارية المصدر الرئيس لطرح غاز  $SO_2$  وخاصة العاملة على الوقود الحاوي على نسبة كبريت عالية حيث يتبع الطرح النوعي لـ  $SO_2$  لنسبة تواجد الكبريت في الوقود وتتراوح  $(\frac{g}{MWatt})$  (1,5 – 3,4)، وهذا يزيد بمرات عديدة عن المعايير المتواجدة في الوقت الحاضر والتي تُمثل  $(\frac{g}{MWatt})$  (0,175 – 0,250)، وذلك بالنسبة للمراحل المصمَّمة حديثاً وحوالي (0,85) غرام/ميغا واط للمراحل العاملة حالياً [2، 3].

نجد من هنا أن تخفيض انبعاث الـ  $SO_2$  من منشآت الطاقة الحرارية يُعتبر مسألة هامة يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار نحو التخفيض السريع لتلوث الغلاف الجوي بالمواد السامة. تمَّ حل هذه المشكلة في الكثير من الدول المتطورة صناعياً عن طريق تنظيف نواتج الاحتراق من  $SO_2$  وذلك بطرق عديدة يمكن حصرها في ثلاث طرق:

- 1 - الجافة،
- 2 - الرطبة،
- 3 - المختلطة (رطبة + جافة) [4، 5].

تتميز هذه الطرق بفعالية عالية لامتناس  $SO_2$ ، ولكنها ذات نفقات تشغيلية كبيرة [6، 7]. وتُعتبر الطرق الرطبة الأكثر استخداماً والأوسع انتشاراً في هذا المجال حيث يتم امتصاص  $SO_2$  بوساطة سائل امتصاص مختلفة. ومن أجل زيادة وثوقية واقتصادية الطرق الرطبة فإنه من الضروري استخدام أجهزة امتصاص ذات فعالية عالية لعمليات التبادل الحراري والكتلي وبتكلفة أقل. يُعتبر جهاز الامتناس ذو الطبقة الرغوية ثنائية الطور ومن أهم الأجهزة المُقترحة في هذا المجال، فهو يتميز بفعالية عالية لعمليات التبادل الحراري والكتلي وبمصاريف أقل للطاقة. إلا أن تطبيق هذا النموذج في أنظمة تنقية غازات الاحتراق من الكبريت محدود، وذلك بسبب غياب المعطيات ذات الوثوقية التي تساعد في حساباتها، حيث يوجد معلومات ومعطيات كثيرة لحساب المميزات الهيدروديناميكية والحرارية ولكنها متضاربة ومتناقضة فيما بينها [8، 9]. من هنا تأتي أهمية الدراسة والبحث من أجل الوصول إلى طريقة دقيقة لحساب هذه المميزات وبالتالي وثوقية التصميم.

**أهمية البحث وأهدافه:**

يهدف البحث إلى الدراسة الكمية والنوعية للتبادل الكتلي والحراري في أجهزة الامتناس الرغوية (المؤلفة من طبقة ديناميكية ثنائية الطور)، حيث تمَّ بالاعتماد على النتائج التجريبية من أجل نماذج مختلفة من الأجهزة الرغوية. سمح ذلك بالحصول على علاقة المميزات الهيدروديناميكية والحرارية مع البارامترات الهندسية والظرفية (أو الشرطية) الأساسية، وبالتالي التوصل إلى طريقة لحساب الأجهزة الرغوية لتنظيف نواتج الاحتراق من الكبريت، وكذلك زيادة وثوقية الاستثمار من خلال التصميم المناسب لهذه الأجهزة.

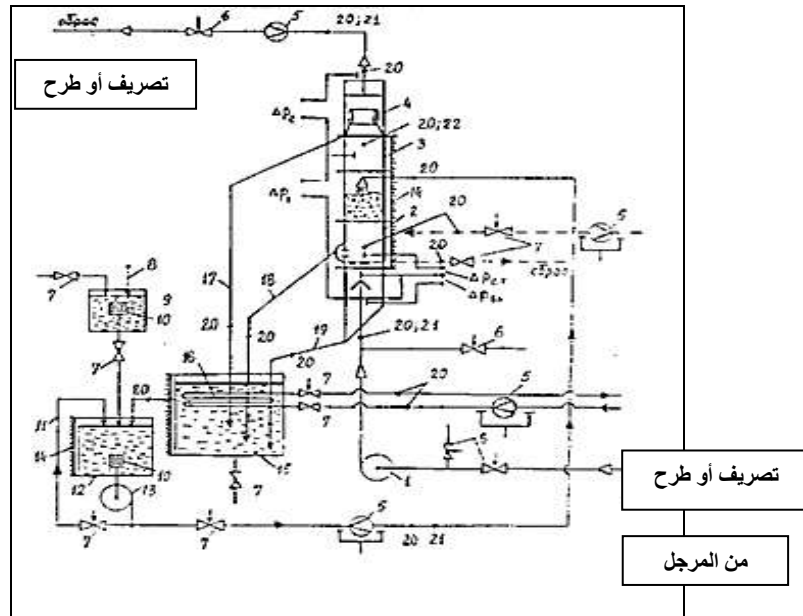
## طرائق البحث ومواده:

قمنا بإجراء دراسة رقمية وتحليلية حسابية ومعيارية لنتائج التجربة التي أنجزت على أحد المراحل العاملة وذلك باستخدام طريقة الترابيع التنازلية (طريقة التشتت والانتشار لكثير الحدود) للطبقة الرغوية والتي تم الحصول عليها بمساعدة أربعة نماذج من وسائل التلامس. يُعطي الجدول (1) المواصفات الهندسية لأجهزة التلامس.

جدول (1): المواصفات الهندسية لأجهزة التلامس [7].

نموذج جهاز التلامس	سماكة الشبكة قطر الفوهة (mm)	ارتفاع عتبة الصب (mm)	قطر الثقوب أو عرض شقوق الشبكة (mm)	المقطع الحر للشبكة (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
الطبق المثقب مع تفريغ	5	60	4	0,206
الطبق المثقب متعكس التيار	5	-	4	0,206
الطبق الأنبوبي متعكس التيار	16	-	4	0,136
النافوري	5	-	(1,5)	(0,24)

يتم استخلاص الغاز من قاعدة أنبوب الدخان لأحد المراجل الذي يستعمل وقود سائل عالي نسبة الكبريت، انظر الشكل (1). ومن أجل قياس القيم الفيزيائية المختلفة: تدفق الغاز، وفروقات الضغط، وتدفق السائل العامل وسائل التبريد، ودرجة حرارة الغاز والسائل في مقاطع الجريان المختلفة. فقد تم استخدام طرق وأجهزة قياس معروفة ومستخدمة في هذا المجال.



شكل (1): يُبين مخطط محطة التجريب.

كما تمَّ قياس محتوى الغاز من  $(CO, O_2, CO_2, SO_2)$  قبل البرج وبعده بواسطة بجهاز: RICCARDO – SPACIANI S.P.A. حيث تمَّ تحديد قطرات السائل المحمولة باستخدام نترات الصوديوم باعتباره السائل العامل ودرجة حرارة نقطة الندى للأبخرة المائية بالنسبة للسائل العامل، واستخدام الماء كمحلول كلسي بنسبة (11%) من  $[Ca(OH)_2]$ ، ونسبة محلول مائي لهيدروكسيد الصوديوم  $(NaOH)$  بنسبة (10%). قمنا باستخدام نموذج رياضي على شكل كثير حدود من الدرجة الثانية. كما تمَّ اختيار النموذج المتمائل بمعيار فيشر عند اختيار الشكل العام للمعادلات المعيارية؛ انطلقنا من أنه في النظام الاضطرابي الحر (الدوامي) (النظام الرغوي) لا تبدي المميزات الجزئية للتيارات المتبادلة لا تبدي تأثيراً ملحوظاً على ديناميك الموائع والتبادل الحراري. يتمَّ تحديد سير العمليات في هذا النظام بسرعة تدفقات الأطوار وفق معيار ومقياس فرود – ستينتان، ومرغوليس وهي المعايير التي تدرس الحالة الديناميكية للنظام الرغوي ثنائي الطور أو متعدد المراحل. عامل الحالة الديناميكية للنظام ثنائي الطور:

$$f = \frac{\Delta P_{gas} - \Delta P_{c.p}}{\Delta P_{c.p}} \quad (1)$$

حيث إنَّ:  $\Delta P_{gas}$  مقاومة الغاز،  
 $\Delta P_{c.p}$  مقاومة جهاز التلامس الجاف.

$$E = \left(\frac{L}{G}\right)^2 \cdot \frac{\rho_{gas}}{\rho_{liquid}} \quad (2)$$

حيث إنَّ:  $\rho$  الكتلة الحجمية الغاز،  $L$  تدفق السائل، و  $G$  تدفق الغاز.  
تمَّ استخدام المعادلات المعيارية من أجل ارتفاع طبقة مزيج غاز/سائل:

$$\varphi_H = \left[ F_{rH}, E, \frac{L}{L_{ct}} \right] = 0 \quad (3)$$

حيث إنَّ:  $\varphi_H$  معامل المقاومة الهيدروليكية خلال التغير المفاجئ لمقطع النافورة، و  $F_{rH} = \frac{W_0^2}{g.H}$

نظير مماثل لمعيار فرود الذي فيه أخذنا مقياس خطي ارتفاع طبقة الرغوة.  
ومن أجل مقاومة الأطباق المسقاة:

$$\varnothing_f = \left[ 1 + f, E, \frac{L}{L_{ct}} \right] = 0 \quad (4)$$

حيث إنَّ  $\varnothing_f$  معيار.

ومن أجل القطرات المحمولة:

$$\varnothing_l = \left[ \frac{1}{G} + F_{rs}, E, \frac{L}{L_{ct}} \right] = 0 \quad (5)$$

حيث  $F_{rs} = \frac{W_0^2}{g.s}$  نظير مماثل لمعيار فرود الذي فيه تمَّ استعمال مقياس خطي هو ارتفاع الفرز (الفصل).

من أجل السرعة النهائية (الحدية) لتيار الغاز في النظام الرغوي:

$$\varnothing_m = \left[ F_{rm}, E, \frac{L}{L_{st}} \right] = 0 \quad (6)$$

حيث  $F_{rm} = \frac{W_0^2}{g.de.SO_2}$  نظير مماثل لمعيار فرود، والذي يُستخدم فيه سرعة الغازات على حدود النظام الرغوي

والمقولة (المنسوبة) إلى المقطع الحر للطبق.

التوازن الحراري للنظام تم اختياره وفقاً لـ  $de$  القطر المكافئ لتقريب الطبقة.

### النتائج والمناقشة:

نتائج البحث التجريبي للمميزات الهيدروديناميكية لجهاز الامتصاص الرغوي مع أجهزة التلامس المختلفة: لقد تمت دراسة تأثير نموذج التلامس والعوامل المختلفة على المميزات الهيدروديناميكية الأساسية: المقاومة الهيدروليكية لجهاز التلامس، ارتفاع طبقة الرغوة (مزيج الغاز مع السائل)، قطرات الماء المحمولة مع الهواء (الجو المحيط)، حدود النظام الرغوي.

تُعطى المقاومة العامة أو الإجمالية لجهاز الامتصاص كما يلي على شكل مجموعات:

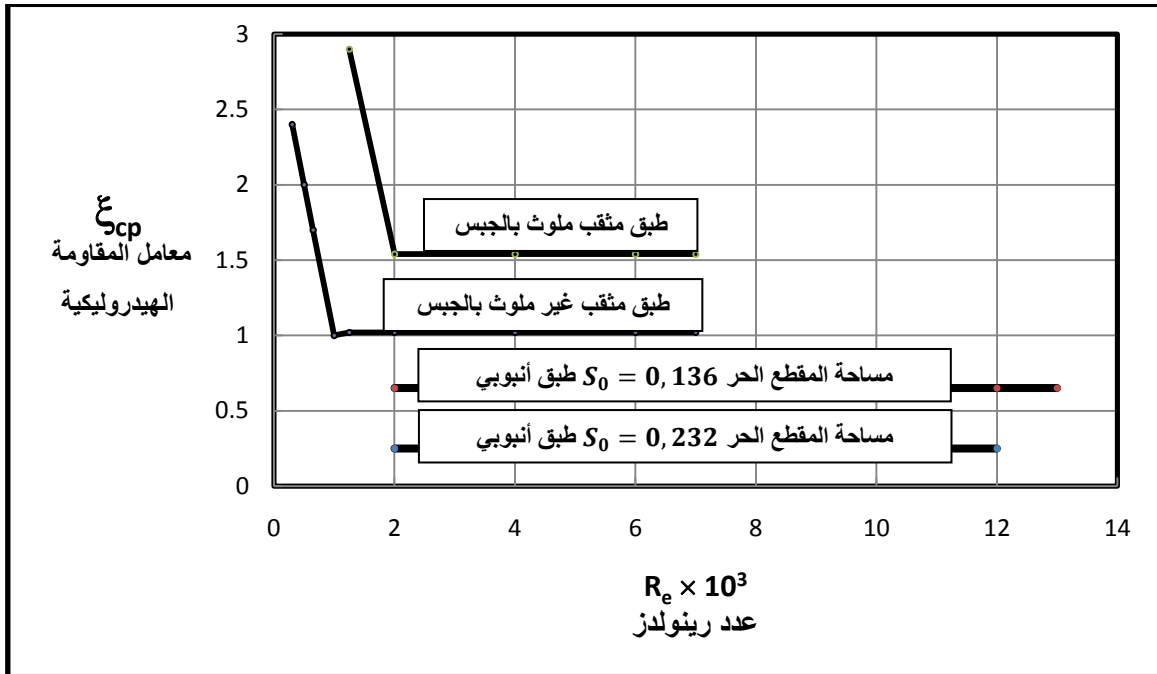
$$\Delta P_T = \Delta P_{cp} + \Delta P_{ct} + \Delta P_{\sigma} \quad (7)$$

حيث:  $\Delta P_{cp}$  مقاومة جهاز التلامس الجاف،

$\Delta P_{ct}$  المقاومة الستاتيكية لطبقة الرغوة (مقاومة طبقة الغاز مع السائل)،

$\Delta P_{\sigma}$  المقاومة المرافقة للتوتر السطحي للسائل، ويتم حسابها بعلاقات معروفة [7].

يتم تحديد معاملات المقاومة الهيدروليكية لأجهزة التلامس الجافة (الأطباق الجافة)  $\xi_{cp}$  بالنسبة لسرعة الطور الغازي في مقطع الجريان، من خلال إيجاد العلاقة بين معامل المقاومة ورقم رينولدز كما هو موضح على الشكل (2)، مرجع [7]، حيث تم التوصل إلى أن عامل المقاومة لا يتعلق بعدد رينولدز عند القيم ( $Re > 1200$ ) في حالة الطبقة المثقبة، وفي الطبقة الأنبوبي عند القيم ( $Re > 1500$ ).

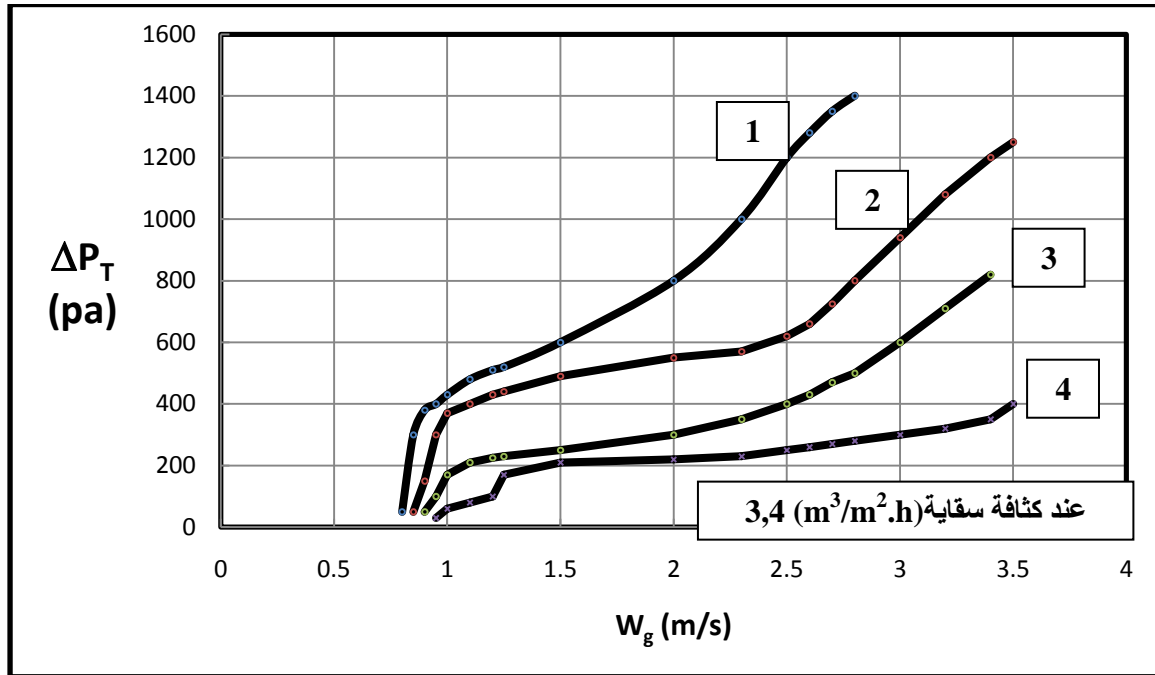


شكل (2): يُبين علاقة معامل المقاومة الهيدروليكية للأطباق لأجهزة التلامس الجافة مع عدد رينولدز.

بينما تبين أنه في المنطقة المستقلة يساوي الواحد في حال الأطباق المثقبة و (0.65) في حال الطبقة الأنبوبي. تبين أيضاً أن  $\xi_{cp}$  في حال الطبقة المثقبة يتغير بشكل واضح في حالات تنظيف غازات الاحتراق من SO<sub>2</sub> بمحلول

الكلس الحي، وذلك بسبب التلوث والصدأ حيث نجد أن حدود المنطقة المستقلة قد انزاحت باتجاه زيادة قيم رينولدز حتى 2100، وأن قيمة معامل  $\xi_{cp}$  قد ازداد حتى 1.5، وإن هذه القيم تتطابق جيداً مع نتائج الحسابات المتواجدة في المصادر الأخرى [7].

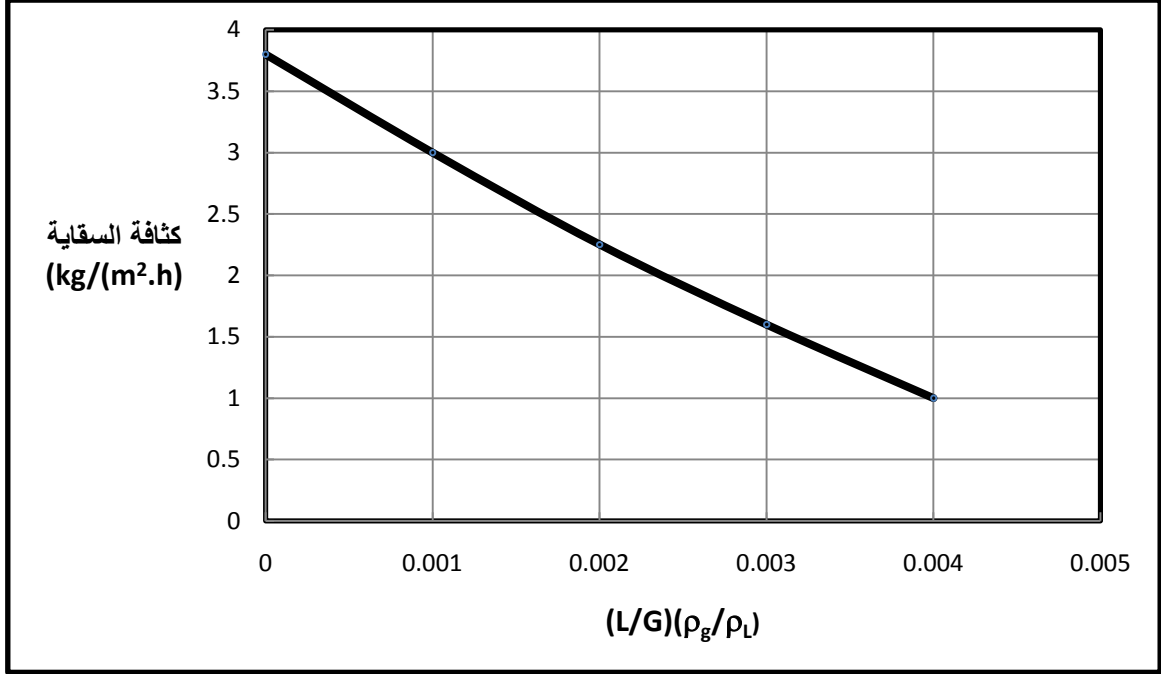
بالنسبة لمقاومة أجهزة التلامس الرطبة (المسقاة) فقد مكّنت التجارب التي أنجزت على الشبكة متصالبة التيار (هواء - ماء) من تحديد صفات وميزات علاقة المقاومة الهيدروليكية للأطباق المسقاة مع السرعة المنقولة للغازات وكثافة السقاية كما هو موضح على الشكل (3) الذي يبيّن العلاقة  $\Delta P_T$  مع غاز  $W_g$  للشبكة المثقبة المتصالبة.



17,4 ( $m^3/m^2.h$ ) عند كثافة سقاية (2)	24,5 ( $m^3/m^2.h$ ) عند كثافة سقاية (1)
3,4 ( $m^3/m^2.h$ ) عند كثافة سقاية (4)	6,5 ( $m^3/m^2.h$ ) عند كثافة سقاية (3)

شكل (3): يبيّن العلاقة بين  $\Delta P_T$  و  $W_g$  للشبكة المثقبة المتصالبة.

أما العلاقات التي تمّ التوصل إليها فتثبت وجود ثلاثة أنظمة لعمل أجهزة الامتصاص الرغوية وهي النظام الفقاعي - النظام الرغوي - الموجي (النبضي). يُبين الشكل (4) نتائج المقاومة الهيدروليكية من أجل الشبكة الأنبوبية.



شكل (4): قيم المقاومة الهيدروليكية من أجل الشبكة الأنبوبية.

نلاحظ التغيرات الفجائية في المنحنيات تُحدّد حدود النظام الرغوي (غزارة التدفق للسائل أو للمحلول)، حيث وجدنا أن هذه الحدود تتزاح باتجاه السرعات المنخفضة الغازات عند زيادة كثافة السقاية، أما نتائج التجارب التي أنجزت حول الحدود العليا للنظام الرغوي (حدود إنتهاء النظام الرغوي وبدء النظام الموجي) بالنسبة للأطباق المثقبة والأنبوبية فيتم تقريبها بمعادلة معيارية من الشكل:

$$\frac{W_{max}^2}{g \cdot de \cdot S_0^2} = 1,8 * 10^3 * \left[ \left( \frac{L}{G} \right) * \frac{\rho_g}{\rho_l} \right]^{-0.111} \quad (8)$$

حيث:

$W_{max}^2$  سرعة الغازات على حدود النظام الرغوي والنبضي منسوبة للمقطع الحر للطبق،  
 $\left[ \left( \frac{L}{G} \right) * \frac{\rho_g}{\rho_l} \right]^{-0.111}$  الحدود العليا للنظام الرغوي على الأطباق المثقبة والأنبوبية،  
 $de$  القطر المكافئ لتقوّب الطبق،  $L$  و  $G$  تدفق كل من السائل والغاز على الترتيب مقدراً بوحدة الـ (kg./s)،  
 $\rho_g$  كثافة الغاز بوحدة الـ (kg/m<sup>3</sup>)،  
 $\rho_l$  كثافة السائل بوحدة الـ (kg/m<sup>3</sup>)،  
 $S_0$  المقطع الحر للطبق المثقّب (الشبكة).

الحدود السفلى للنظام الرغوي بالنسبة للطبق المثقّب متصالب التيار، فنُعطى بالعلاقة:



$$\frac{W_{min}^2}{g \cdot de \cdot S_0^2} = 0,353 * 10^3 * + \left[ \left( \frac{L}{G} \right) * \frac{\rho_g}{\rho_l} \right]^{-0.111} \quad (9)$$

حيث  $W_{min}$  سرعة الغاز عند الحدود الدنيا للنظام الرغوي.  
 أما بالنسبة لجهاز التلامس النافوري فإنه لم يتم تحديد النظام الرغوي.  
 بمعالجة نتائج التجارب رياضياً، لكن الحصول على معادلة التشتت (الانتشار) للمقاومة الهيدروليكية في الطبقة المتقبة متعكس (متصالب) التيار كما يلي:

$$\begin{aligned} \Delta P_T = & a_0 + a_1 L_0 + a_2 w_g + a_3 w_p + a_4 \sigma_l + a_5 L_0^2 + a_6 w_g^2 + a_7 \rho_l^2 \\ & + a_8 \rho_l^2 + a_9 w_g + a_{10} L_0 \sigma_l + a_{11} L_0 \sigma_l + a_{12} w_g \sigma_l \\ & + a_{13} w_g \sigma_l + a_{14} \sigma_l \sigma_l \end{aligned} \quad (10)$$

حيث إن:

$a_1 \dots a_{14}$  حدود كثير الحدود،

$L_0$  السقاية البدائية،

$w_g, w_p$  سرعة الغاز والسائل على الترتيب،

$\sigma_l$  معامل التشتت.

بينما في الأطباق المتقبة والأنبوبية متعكسة الجريان، وكذلك جهاز التلامس النافوري نجد:

$$\Delta P_T(H) = a_0 + a_1 L_0 + a_2 w_g + a_3 L_0^2 + a_4 w_g^2 + a_5 L_0 w_g \dots \quad (11)$$

بيّن الجدول (2) قيم العوامل  $a_i$ . إن وهذه المعادلات (10) و (11) تسمح بتحديد تأثير كل عامل من هذه العوامل على المقاومة الهيدروليكية للطبق.

جدول (2): قيم معاملات المعادلة (10).

المعاملات	نموذج جهاز التلامس							
	الطبقة المتقبة ذو الجريان المتصالب		الطبقة المتقبة ذو الجريان المتعكس		الطبقة الأنبوبية ذو الجريان المتعكس		النافوري	
$a_0$	410.13	100.051	423.97	209.91	230.46	134.41	359.30	331.96
$a_1$	80.80	24.32	161.35	43.01	53.38	8.97	116.6	66.05
$a_2$	201.96	95.31	901.82	85.94	204.97	65.34	187.79	177.78
$a_3$	70.88	-23.96	123.99	23.17	4.37	2.68	0.73	-4.84
$a_4$	87.21	26.83	19.33	-19.75	23.07	-8.16	14.02	14.25
$a_5$	85.84	16.25	74.80	19.70	45.93	6.76	77.83	48.65
$a_6$	16.63	7.76						
$a_7$	0.75	7.76						

$a_8$	-0.45	-29.08						
$a_9$	43.51	28.67						
$a_{10}$	109.97	-15.06						
$a_{11}$	-165.31	10.59						
$a_{12}$	-36.51	-8.59						
$a_{13}$	25.48	2.56						
$a_{14}$	70.96	-22.93						

نتائج التجارب المتعلقة بالمقاومة الهيدروديناميكية لأجهزة التلامس فتُعطى بالمعادلة المعيارية الآتية:

$$\frac{\Delta P_t}{\Delta P_{cky}} = 1 + A \cdot \left[ \left( \frac{L}{G} \right)^2 \cdot \frac{\rho_g}{\rho_l} \right]^n \cdot \left( \frac{L}{L_{CT}} \right)^m \quad (12)$$

حيث إن:  $A$  ثابت،  $L$  تدفق السائل،  $L_{CT}$  كثافة السقاية القياسية،  $m$  و  $n$  ثابت في التجربة.

يُعطى الجدول (3) قيم المعاملات ومتوسط الخطأ التربيعي للمعادلة (12).

جدول (3): قيم معاملات المعادلة (12).

نموذج جهاز التلامس (التبادل)	$A$	$m$	$n$	$\sigma\%$
الطبق المثقب المتصالب التيار غير الملوث	766.43	-0.126	0.671	2.62
الطبق المثقب المتصالب التيار الملوث	422.58	-0.459	0.655	10.28
الطبق المثقب المتعاكس التيار (الجريان)	178.83	0.674	0.548	4.27
الطبق الأنبوبي المتعاكس التيار والجريان	34.16	0.022	0.323	4.04
النافوري	1.30	1.624	-0.533	2.37

يُبين الشكل (3) العلاقة المتبادلة لنتائج التجارب المنجزة من أجل حساب بالنسبة لمقاومة جهاز التلامس للطبق

الأنبوبي.

بما أن مقاومة جهاز التلامس النافوري الجاف ضعيفة:  $\Delta P_{cky} = (1 \div 2)\pi a$  فإنه تمّ تقريب النتائج

التجريبية لحساب المقاومة من خلال المعادلة:

$$\frac{\Delta P_c}{(w_g^2 \cdot \rho_g)_2} = 18.6 * \left[ \frac{w_g^2 \cdot \rho_g}{g \cdot l \cdot \rho_l} \right]^{-0.564} \cdot \left( \frac{L}{L_{CT}} \right)^{-0.482} \quad (13)$$

تمّ تقريب النتائج التجريبية المتعلقة بارتفاع طبقة الرغوة من خلال المعادلة المعيارية التالية:

$$\frac{w_0^2}{g.H} = A_1 18.6 * \left[ \left( \frac{L}{G} \right)^2 \frac{\rho_g}{\rho_l} \right]^{m_1} \cdot \left( \frac{L}{L_{CT}} \right)^{n_1} \quad (14)$$

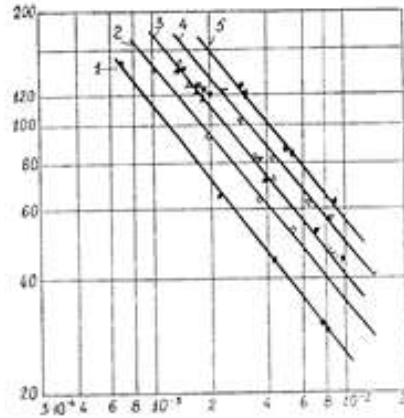
يُبيّن الجدول (4) قيم المعاملات المستخدمة في المعادلة (14).

جدول (4): قيم معاملات المعادلة (14).  $\sigma$  معامل التشتت يتعلق بالتوتر السطحي للسائل.

نموذج جهاز التلامس (التبادل)	$A_1$	$m_1$	$n_1$	$\sigma\%$
الطبق المثقب المتصالب الجريان (التيار)	1.962	-0.478	0.74	5.79
الطبق المثقب المتعكس الجريان (التيار)	0.389	-0.704	0.44	1.94
الطبق الأنبوبي المتعكس الجريان	1.829	-0.629	1.015	2.75
النافوري	1.142	-0.279	-0.138	3.45

يُبين الشكل (5) العلاقة التبادلية لنتائج التجارب الخاصة بارتفاع طبقة الرغوة في الجهاز الأنبوبي حيث نلاحظ أن ارتفاع طبقة الرغوة يتناسب طردياً مع كثافة السقاية.

$$\frac{w_0^2}{g.H}$$

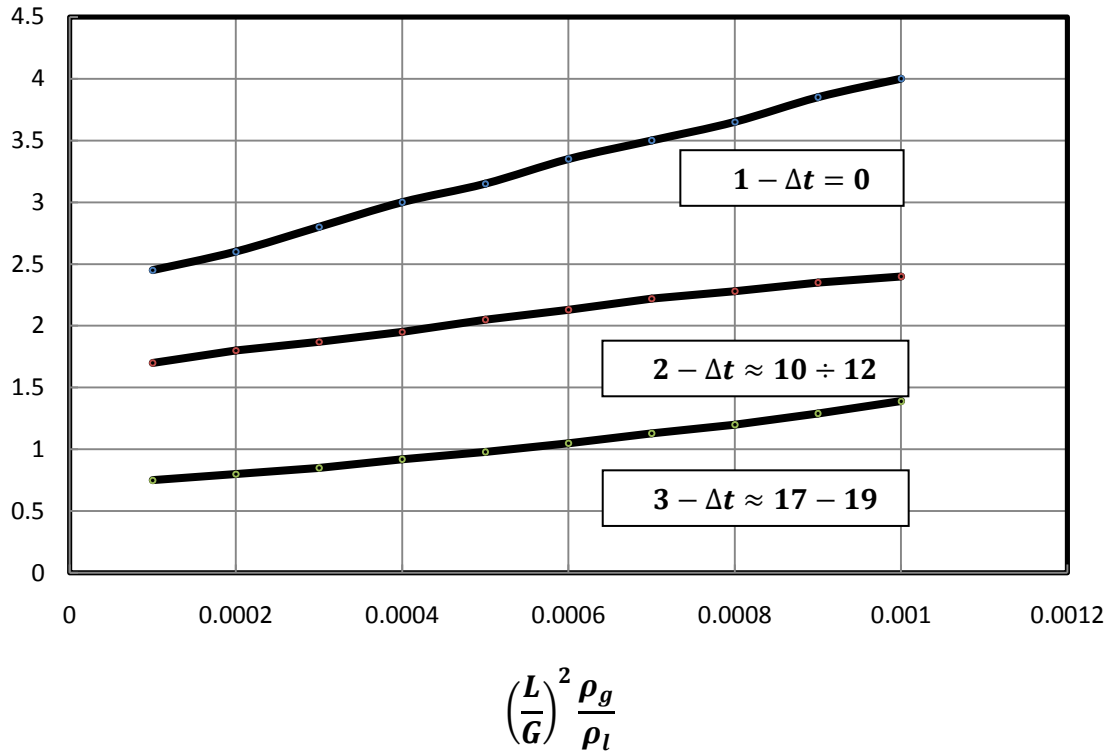


- 1- 8300
- 2-10200
- 3-12300
- 4-14700
- 5-17200

شكل (5): يبيّن ارتفاع طبقة الرغوة في الجهاز الأنبوبي تبعاً لكثافة السقاية.

يُبين الشكل (6) النتائج التجريبية التي تعطي انتقال معامل الحرارة من الغاز إلى طبقة الرغوة  $\alpha_{g-l}$ .

$$\frac{\alpha_{g-l}}{w_g \cdot \rho_g \cdot C_g}$$



شكل (6): النتائج التجريبية لمعامل انتقال الحرارة من الغاز إلى طبقة الرغوة بدلالة كثافة السقاية وسرعة الغاز.

نتائج التجربة التي تعطي قطرات السائل المحمولة مع غازات الاحتراق تبين بأن كمية قطرات السائل تتأثر بشكل كبير بسرعة الغاز، وارتفاع حجم الفرز (الفصل) المحدد بارتفاع طبقة الرغوة، أما تأثير كثافة السقاية فهو غير ملحوظ. بينما بالنسبة للقطرات المحمولة إلى الخارج فيمكن تقريب النتائج التجريبية بواسطة المعادلة المعيارية الآتية:

$$\frac{I_\sigma}{G} = B \cdot \left[ \frac{w_g^2}{g \cdot h_{effect}} \right]^k \left[ \left( \frac{L}{G} \right)^2 \frac{\rho_g}{\rho_l} \right]^1 \quad (15)$$

حيث  $h_{effect}$  هو الارتفاع الفعّال لحجم القطرات المتطايرة (حجم الفراغ العامل).

يُعطي الجدول (5) قيم معاملات المعادلة (15).

جدول (5): قيم معاملات المعادلة (15).  $\sigma$  معامل التشتت يتعلق بالتوتر السطحي للسائل.

نموذج جهاز التلامس (التبادل)	$B$	$k$	$L$	$\sigma\%$
الطبق المثقب المتصالب الجريان (التيار)	$1.11 \cdot 10^{-2}$	4.69	0.172	3.02
الطبق المثقب المتعكس الجريان (التيار)	$5.31 \cdot 10^{-3}$	1.45	0.089	4.25
الطبق الأنبوبي المتعكس الجريان	$3.02 \cdot 10^{-3}$	1.35	0.020	1.26
النافوري	$5.41 \cdot 10^{-4}$	1.72	0.120	11.20

نتائج البحث التجريبي للتبادل الحراري في جهاز الامتصاص الرغوي ذو الطبق الأنبوبي المتعكس الجريان في نظام ماء/غازات الاحتراق:

ملاحظة: في تجارب التبادل الحراري بين الغاز والسائل، تمّ معايرة: سرعة الغازات المنقولة، كثافة السقاية، درجة حرارة السائل العامل على مدخل الجهاز.

تبيّن التجربة أن سرعة الغازات المنقولة تغيرت بشكل أسي في حوالي  $(0.8; 2.6) \text{ m/s}$  بالنسبة للأطباق المثقبة والأنبوبية وحتى  $(3.2; 7) \text{ m/s}$  بالنسبة لجهاز التلامس النافوري. أما كثافة السقاية فقد تغيرت من:  $(5.5; 17.1) \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$  أي  $(14.4; 35.1) \text{ m/s}$  بشكل مرافق للحرارة البدائية للسائل العامل من  $(44.9; 49) \text{ C}^\circ$ . ولقد تراوحت درجة حرارة الغازات على مدخل جهاز الامتصاص بين  $(94; 104) \text{ C}^\circ$ ، أما درجة حرارة نقطة الندى فقد تراوحت بين  $(44.9; 49) \text{ C}^\circ$ .

إنّ تحليل نتائج التجربة التي تمّ الحصول عليها يبيّن تأثير كل من غزارة السائل والغاز، وفرق درجات حرارة نقطة الندى للغاز والسائل العامل، عند مدخل جهاز الامتصاص على قيمة معامل انتقال الحرارة من الغاز إلى السائل  $\alpha_{g-l}$  حيث وجدنا أن تغير  $\alpha_{g-l}$  يتناسب طردياً مع تغير سرعة الغاز بمعدل 0.56 مرة، وأن زيادة كثافة السقاية بمعدل 1.4 يؤدي إلى زيادة  $\alpha_{g-l}$  بمعدل 1.2 مرة.

أما بالنسبة لتأثير فرق درجات الحرارة البدائية لنقطة ندى كل من الغازات والسائل العامل فإنه يظهر بشكل واضح عند زيادة سرعة الغاز المنقولة، وقد يصل هذا التأثير قد يصل إلى درجة كبيرة جداً. بينما لم يتم ملاحظة أي تأثير لنموذج جهاز التلامس وأبعاده ومواصفاته الهندسية وللخواص الفيزيائية الحرارية للسائل على  $\alpha_{g-l}$ .

يمكن تقريب النتائج التجريبية مع خطأ متوسط تربيعي مقداره 12% بوساطة عادلة معيارية تجمع معيار ستينتان مع مركبات جميع العوامل المؤثرة كما يلي:

$$\frac{\alpha_{g-l}}{w_g \cdot C_g \cdot \rho_g} = 12.44 \cdot \left[ \left( \frac{L}{G} \right)^2 \frac{\rho_g}{\rho_l} \right]^{-0.3} \cdot \left( 1 - \frac{\Delta T_p}{t_g} \right)^{2.52} \cdot \left( \frac{L}{L_{CT}} \right)^{-0.5} \quad (16)$$

حيث:

$\Delta T_p$  فرق درجات الحرارة (فرق درجة حرارة نقطة الندى لغازات الاحتراق والسائل العامل على مدخل

جهاز الامتصاص،

$t_g$  درجة حرارة الغاز،

$C_g$  السعة الحرارية للغاز.

أما بالنسبة للتجارب الخاصة بدراسة التبادل الحراري بين طبقة الرغوة والسطح المغمور فقد تمت معايرة كثافة السقاية وسرعة الغاز، وتمّ التوصل إلى أن معامل انتقال الحرارة من الرغوة إلى السطح المغمور  $\alpha_n$  يزداد مع زيادة سرعة الغاز. بينما لم يظهر أي تأثير ملحوظ لكثافة السقاية على  $\alpha_n$  حيث إنَّ ( $\alpha_n$  معامل انتقال الحرارة من طبقة الرغوة إلى السطح الخارجي لأنابيب المبادل الحراري).

وقد تمّ تقريب النتائج بمعادلة تجريبية معروفة (معامل ستينتان):

$$S_t = 0.108 \cdot R_w^{-0.26} \cdot R_r^{-0.52} \quad (17)$$

**النتائج الأساسية للبحث التجريبي لفعالية تنظيف غازات الاحتراق من أكسيد الكبريت في أجهزة الامتصاص**

**ذات الطبقة المتحركة ثنائية الطور:**

العوامل التي تمت معايرتها هي: نموذج التلامس (التبادل)، وسرعة الغاز المنقولة، وكثافة السقاية. في التجارب التي أجريت على جهاز الامتصاص مع أجهزة التلامس المثقبة والأنبوبية فقد تمّ تغيير سرعة الغاز ضمن المجال (0.37; 2.5)m/s أي شملت حدود سرعة الغاز في كل أنظمة الانتقال والعبور من النظام الفقاعي إلى الرغوي والنظام الرغوي الكامل حيث تغيرت كثافة السقاية من (6.8; 17.1)m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·h. في حالة التلامس النافوري فقد بيّنت التجربة أن سرعة الغاز تتغير بحدود (3.2; 7.15)m/s، أما كثافة السقاية فتتغير بحدود (14.4; 34)m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·h. تتأثر درجة التنظيف بشكل واضح بالسرعة المنقولة للغاز وخاصة منطقة التحول من النظام الفقاعي إلى النظام الرغوي حيث يتناقص هذا التأثير بمعدل الاقتراب من الحدود العليا للنظام الرغوي. ويكون تأثير كثافة السقاية عليها أقل ملاحظة، ويظهر تأثيرها خلال تغير ارتفاع طبقة الرغوة. ولا يبدي نموذج جهاز التلامس وخواصه الهندسية أي تأثير على درجة التنظيف. إنَّ القيم المطلقة لدرجة تنظيف غازات الاحتراق من SO<sub>2</sub> تكون في جميع نماذج أجهزة التلامس متقاربة جداً. تصل درجة التنظيف عند استخدام محلول ماءات الكالسيوم Ca(OH)<sub>2</sub> إلى (40; 97.3%) (خلال لمرحلة تلامس واحدة). وتصل عند استخدام ماءات الصوديوم (NaOH) إلى (40; 95.3%)، ويظهر تلوث واضح للأطباق المثقبة ببلورات (CaSO<sub>4</sub>)، وبالصدأ خلال العمل بمحلول الكلس. تمّ، في أجهزة الامتصاص الرغوية، ملاحظة حدوث امتصاص تلقائي لـ NO<sub>x</sub> المتواجد في غازات الاحتراق، وتصل درجة التنظيف إلى (39; 53%).

### الاستنتاجات والتوصيات:

**قمنا في هذه الدراسة بـ:**

- تحديد المواصفات الهيدروديناميكية الأساسية لأجهزة الامتصاص ذات الطبقة الرغوية (ثنائية الطور) وهي: المقاومة الهيدروليكية وارتفاع طبقة مزيج السائل مع الغاز، القطرات المحمولة إلى الوسط المحيط مع نواتج الاحتراق، حدود النظام الرغوي. كما تمّ تحديد تأثير العوامل الهندسية والتشغيلية: نموذج جهاز التلامس، السرعة المنقولة وللطور الغازي، كثافة السقاية، الكثافة والتوتر السطحي لطور السائل.

- الحصول على معادلات التشتت المحددة للمواصفات الهيدروديناميكية مع العوامل التشغيلية لأجهزة الامتصاص مع أربعة نماذج من أجهزة التلامس.
  - الحصول على المعادلات المعيارية التي تسمح بحساب المميزات الهيدروديناميكية الأساسية كتابع للعوامل التشغيلية والتصميمية.
  - تحديد العوامل الأساسية المؤثرة على شدة التبادل الحراري بين الغاز والسائل العامل: المواصفات الابتدائية للطور الغازي وطور السائل، فرق درجات حرارة نقطة الندى للغازات والسائل العامل على مدخل جهاز الامتصاص.
  - الحصول على المعادلة المعيارية المعممة لحساب معامل الانتقال الحراري بالحمل من الغاز إلى السائل في الطبقة الرغوية.
  - إثبات إمكانية تطبيق المعادلة المعممة لحساب معامل انتقال الحرارة مع طبقة الرغوة إلى السطح المغمور للمبادل الحراري.
  - اقتراح معادلة مماثلة لحساب معامل انتقال الحرارة بالحمل من مزيج غاز/سائل إلى سطح الشبكة الأنبوبية.
  - الحصول على معطيات جديدة حول فعالية تنظيف غازات الاحتراق من الكبريت بالطرق الرطبة مع استعمال أجهزة الامتصاص ذات النموذج الرغوي. تصل درجة التنظيف في الحدود العليا للنظام الرغوي إلى (90; 95%) خلال مرحلة تلامس واحدة.
  - حساب المميزات الهيدروديناميكية والحرارية للأجهزة الرغوية في ظروف تنظيف غازات الاحتراق من الكبريت على أساس المعادلات المعيارية الحاصلة.
- ونتيجة هذه الدراسة يُنصح بما يلي:**
- استخدام أجهزة التلامس الرغوية لأن طبقة الرغوة تسمح بزيادة فعالية التبادل الحراري بين الغاز والسائل، وبين طبقة الرغوة والسطح المغمور. كما تمّ استنتاج أن معامل انتقال الحرارة بالحمل يتوقف على الشروط الابتدائية للطور غاز/سائل، وعلى فرق درجات حرارة نقطة الندى للغاز والسائل عند مدخل جهاز الامتصاص.
  - استخدام أجهزة التلامس الرطبة في مجال تنظيف غازات الاحتراق لأنها تمتاز بفعالية عالية تصل حتى 95,95% خلال مرحلة تلامس واحدة.
  - استخدام أجهزة التلامس الرطبة لإمتيازها بوثوقية عالية وذلك عن طريق اختيار التصميم الأمثل لهذه الأجهزة.
  - استخدام المعادلة المعيارية المقترحة لحساب معامل انتقال الحرارة بالحمل في مزيج غاز/سائل (الرغوة) إلى سطح الشبكة الأنبوبية. وكذلك استخدام معادلة مماثلة لحساب معامل انتقال الحرارة من طبقة الرغوة إلى السطح المغمور للمبادل الحراري.
- تجدر الإشارة هنا إلى أن النتائج التي تمّ التوصل إليها تتطابق مع المعطيات الدراسية للباحثين المثبتة في المراجع وذلك من أجل نفس ظروف التجربة [6].
- تمّ إجراء التجارب والقياسات العملية في الشركة السورية لمصفاة بانياس والمحطة الحرارية، وذلك بالاعتماد على أجهزة قياس رغوية ومنقية لغازات الاحتراق وذلك من قبل شركة إيطالية، أي بالاعتماد على شركة جايا المسؤولة عن تطوير قياس التلوث الجوي: RICCARDO – SPACIANI S.P.A.

## المراجع

- [1] Мадоян А.А., Базаянц Г.В. Сероулавливание наТЭС., К.: Техника. 1992-160с.
- [2] БазаянцГ.В., Сетличный В.А. Десльфризация Дымоыих газов наТЭС США//Энергохозяйство за рубежом, 1986, N2, С 11-14.
- [3] ШмигольИ. Н., НекрасовБ. А. Применение Сероулавливающих установоквросии. Материалы международного семинара “Сжигание топлива с минимальным воздействием на кружающую среду”.21-25 июня 1993, Москва.
- [4] СкалкинФ. В., Канаев А.А., КоппИ. З. Энргетика и окружающаясреда. Д. Энергоиздат. 1981. С. 280.
- [5] БродскийЮ. Н.,Балычев К.В., Современные методы очитки дымовых газов от сернистого ангидрида и их экномика. Тематически обзоры. М.: ЦИИТЭнеФтехим. 1973. Серия: ПромыШленная и санитарная очистка газов. С. 88.
- [6] Новоселев С.С, Гаврилов А.Р., Чмовж В.Е. Озоновый способ очитки Дымоыоых газов на ТЭС от SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub> ./Мухленов И. П., Тартат Э. Я., Туболкин А. Р. Л.: Химия. 1977, С. 303.
- [7] Пенный режим и пенные аппараты. / Мухленов И. П.,Тартат Э. Я., Туболкин А. Р. Л.: Химия. 1977, С. 303.
- [8] Agrusa, R. and Singers, R. R. 1999. Control Your World in a Glance. *Building Systems Innovation, Heating*.
- [9] Chattopadhyay, P. 2001. Boiler Operation Engineering.Second Edition – McGraw- Hill, New York. 1337p.