

## دراسة خصائص الطبقات الحدية في الدولاب الدائر للضاغط النابذي

الدكتور المهندس حسين علي تينة<sup>1</sup>

### الملخص

بهدف تدقيق قانونية شكل الطبقات الحدية وتطورها في الدولاب الدائر للضاغط النابذي، فقد أُجريت دراسة حسابية وتجريبية مفصلة لتلك الطبقات على سطوح ريش الدولاب الدائر وأقراصه العلوية والسفلية.

عُزّزت تلك الدراسة بترئية للجريان والحصول على لوحة لتوزيع خطوط التيار على الجهة الخلفية لريش الدولاب. تم الحصول على خصائص إضافية؛ من أبرزها أن سرعة التيار الثانوي على القرص ليست متجهة من الجهة الأمامية إلى الخلفية دائماً، كما أن التيارات الثانوية على الأقراص لا تؤدي دوراً سلبياً دائماً.

الكلمات المفتاحية: الطبقات الحدية - دولاب دائر - ترئية الجريان - التيار الثانوي.

<sup>1</sup> كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

**الرموز المستخدمة في البحث:**

$D_2$ : القطر الخارجي للدولاب الدائر.

$D_4$ : القطر الخارجي للناشر.

$\frac{b_3}{b_2}$ : النسبة بين اتساع الناشر على المدخل إلى

اتساع الدولاب الدائر على المخرج.

$n_w = \frac{w_1}{w_2}$  نسبة سرعة الدخول إلى سرعة

الخروج للدولاب الدائر.

$h_{w4}, h_{wk}$ : الضياعات الهيدروليكية.

$h_{fr}$ : ضياعات احتكاك القرص.

$h_{np}$ : ضياعات الانسياب.

$\zeta_{pk}, \zeta_{\delta L.g}$ : معاملات الفقد في الدولاب الدائر

والناشر على التوالي.

$C$ : السرعة المطلقة

$C_u$ : المركبة المحيطة للسرعة المطلقة.

$w$ : السرعة النسبية.

$u$ : السرعة المحيطة.

$\delta^*$  و  $\delta^{**}$  و  $\delta^{***}$  - السماكات اللابعدية للطبقة الحدية.

$x, y$ : إحداثيات متعلقة بالسطوح.

$w_x, w_y$ : مساقط مركبات شعاع السرعة.

$W$ : السرعة وفي مركز الجريان غير اللزج.

$\rho$ : الكثافة.

$\omega$ : السرعة الزاوية للدوران.

$\gamma$ : الزاوية بين مماس خط التيار ومحور الدوران.

$H = 1 - \delta\gamma$ : معامل لامي.

$\delta$ : تقوس سطح الريشة.

$M$ : حد مرجعي، يعبر عن تأثيرات التيارات

الثانوية.

$$\tau = \mu_e \frac{\partial(w_x / H)}{\partial y} \quad \text{الإجهاد المماسي.}$$

$\mu_e$ : اللزوجة الفعالة.

$U^*$ : السرعة الديناميكية.

$\delta_L$ : سماكة الريشة.

$b$ : عرض الريشة.

**أهمية البحث:**

عند معالجة أجزاء إمرار التيار للضاغط النابذة يمكن وبنجاح استخدام حسابات التيار اللزج كما هو موضح في البحث [1].

فمن أجل حل هذه المسائل تم عمل برنامج حسابي منظور في الأبحاث [2-4]، حيث يسمح هذا البرنامج حساب بارامترات التيارات اللزجة والضياعات في أجزاء مرحلة الضاغط وذلك باستخدام الإحداثيات الفراغية.

لذلك وبهدف تدقيق قانونية شكل وتطور الطبقات الحدية في الدولاب الدائر نفذت دراسة مفصلة للقيم الفيزيائية والحسابية لبارامترات الطبقة الحدية ومقارنتها مع المعطيات التجريبية.

تمت الدراسة النظرية في جامعة دمشق أما الأبحاث التجريبية فنفذت على منصة التجارب التابعة لقسم بناء الضواغط في جامعة سانت بطرسبورغ الحكومية التقنية ونفذت على دولاب دائر قطره الخارجي  $D_2 = 0.6m$ ،  $\overline{D_4} = 1.8$ ،  $\frac{b_3}{b_2} = 1.0$  عند  $M_u = 0.77$

وقيم مختلفة لمعامل التدفق  $\phi_p = 0.03 - 0.05 - 0.085$  وأيضاً قيم مختلفة

للنسبة  $n_w = \frac{w_1}{w_2} = 0.6 \dots 1.8$ ، و الشكل (1) رسم

توضيحي للدولاب المستخدم.

w: السرعة النسبية.

u: السرعة المحيطة.

الدليل 1 يشير إلى المدخل، والدليل 2 يشير إلى المخرج.

سوف نعدُّ أن الضياعات في الدولاب والتمثلة بمعامل الضياع  $\zeta_{pk}$  تتكون من الضياع على حافات السطوح والضياعات البروفيلية  $\zeta_{np\phi}$ ، وهذه الضياعات بدورها تتألف من فقد الاحتكاك  $\zeta_{fr}$  وفقد المزج  $\zeta_{mix}$  المتعلقين بدورهم بقطع التيار على مخرج الدولاب الدائر عند الجهة الخلفية للريش.

نسب وبصورة شرطية إلى ضياعات الاحتكاك كلاً من الضياعات في الطبقة الحديدية المرتبطة بالجريانات الثانوية في القنوات، والضياعات بسبب انسياب الجريان في الشق المتكون بين أقراص الريش والأجسام الثابتة.

كما هو واضح في البحث [4] إن معاملات الضياع يمكن أن يعبر عنها من خلال السماكات المميزة للطبقة الحديدية على مخرج الدولاب الدائر على النحو الآتي:

$$\zeta_{np\phi} = \frac{w_2^2}{w_1^2} \cdot \frac{2\overline{\delta^{**}} + \overline{\delta^{*2}}}{(1 - \overline{\delta^*})^2} \quad (2)$$

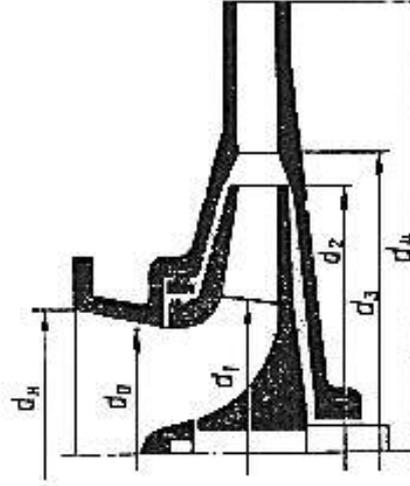
$$\zeta_{fr} = \frac{w_2^2}{w_1^2} \cdot \frac{\overline{\delta^{***}}}{(1 - \overline{\delta^*})^2} \quad (3)$$

إذ:

$\overline{\delta^*}$  و  $\overline{\delta^{**}}$  و  $\overline{\delta^{***}}$  - السماكات اللابعدية للطبقة الحديدية.

لنبحث وبتفصيل أكبر حساب الطبقة الحديدية على ريش الدولاب الدائر:

معادلات الطبقة الحديدية المضطربة على سطوح



الشكل (1) رسم توضيحي للدولاب المستخدم

نفذت القياسات في مركز التيار بواسطة خمس قنوات كروية أما في الطبقة الحديدية فنفذت القياسات بواسطة ثلاث قنوات مفلحة وقطر فتحة دخول 0.2mm إضافة إلى ذلك تم قياس توزع الضغط على سطوح الريش والأقراص، أما الترتيب فنفذت باستخدام الدخان.

#### الأساس النظري للبحث:

سوف نستخدم نموذج الضياع في مرحلة ضاغط نابدي ذي دولاب دائر محوري وناشر دون ريش كما في البحث [4]:

$$\eta_n^* = 1 - \frac{h_{wk} + h_{fr} + h_{np} + h_{w4}}{h_i} = 1 - \frac{0.5(\zeta_{pk} w_1^2 + \zeta_{a.g} \cdot c_2^2) + h_{fr}}{2(c_{u2} u_2 - c_{u1} u_1 + h_{fr} + h_{np})} \quad (1)$$

إذ:

$h_{wk}$ ,  $h_{w4}$ : الضياعات الهيدروليكية.

$h_{fr}$ : ضياعات احتكاك القرص محسوبة وفق طريقة البحث [1].

$h_{np}$ : ضياعات الانسياب.

$\zeta_{pk}$ ,  $\zeta_{L.g}$ : معاملات الضياع في الدولاب

الدائر والناشر على التوالي.

C: السرعة المطلقة

$C_u$ : المركبة المحيطة للسرعة المطلقة.

يحسب طول طريق المزج L بالعلاقة الآتية:

$$L = 0.4y(1 - \beta R_i) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\rho v^* y}{A \mu_L}\right) \right] \quad (6)$$

إذ:

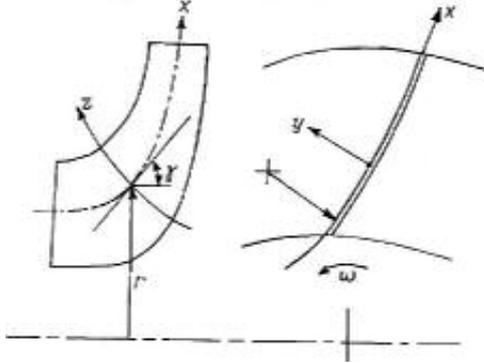
$U^*$ : السرعة الديناميكية.

$$\beta = 6 \dots 8$$

$$R_i = \frac{2\omega - w_x \sigma}{H \partial \left( \frac{W_x}{H} \right) \partial y}$$

$$A = \frac{1}{26 \left[ \exp\left(11.8 \frac{W_w}{v^*}\right) - 11.8 \frac{\mu_w W_w}{\rho v^{*3}} \cdot \frac{dW}{dx} \right]^{0.5}}$$

$W_w$ : سرعة الامتصاص العرضية.



الشكل (2) جملة الإحداثيات من أجل حساب الطبقة الحدية على ريش الدوالب الدائر

يتم حل المعادلات (4) و (5) من أجل الشروط الحدية التالية:

$$w_x = 0 \text{ و } w_y = U_w \text{ عندما } y = 0$$

$$w_x \neq W \text{ عندما } y = \delta$$

أما مركبة السرعة  $U_w$  فتحسب ومن أجل لزوجة دوامية ثابتة بالعلاقة التالية [5]:

$$u_w = \frac{\Delta S}{4b} \left\{ r_H \omega + \left[ \frac{(r_H \omega)^2 + (W_n + W_z)(W_z - W_n) \Delta S}{4 \delta_L} \right]^{0.5} \right\} \quad (7)$$

إذ:

$\Delta S$ : اتساع الريشة.

$\delta_L$ : سماكة الريشة.

$r_H$ : نصف القطر الخارجي.

الخطوط المنحنية الدوارة في مقدار ضئيل جداً مفترض للتيارات الثانوية تأخذ الشكل التالي لمعادلتي الحركة والاستمرار:

$$w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y H \frac{\partial w_x}{\partial y} + w_z \frac{\partial H}{\partial y} = W \frac{dW}{dx} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial (\rho H)}{\partial y} + \frac{\tau}{\rho H} \frac{\partial H}{\partial y} - 2H \omega_y \sin \gamma \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho w_x h) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho H h w_y) + \dot{M} = 0 \quad (5)$$

إذ:

$x, y$ : إحداثيات متعلقة بالسطوح موضحة على الشكل (2).

$w_x, w_y$ : مساقط مركبات شعاع السرعة.

$W$ : السرعة وفي مركز الجريان غير اللزج.

$\rho$ : الكثافة.

$\omega$ : السرعة الزاوية للدوران.

$\gamma$ : الزاوية بين مماس خط التيار ومحور الدوران

كما في الشكل (2).

$H = 1 - \delta y$ : معامل لامي.

$\delta$ : تقوس سطح الريشة.

$\dot{M}$ : حد مرجعي، يعبر عن تأثيرات التيارات الثانوية.

$$\tau = \mu_e \frac{\partial (w_x / H)}{\partial y}$$

$\mu_e$ : اللزوجة الفعالة وهي مجموع لزوجتين:

اللزوجة الذرية  $\mu_L$ ،

واللزوجة الاضطرابية  $\mu_T$

و  $\mu_T$  تعطى وفق البحث [5] كما يأتي:

(صيغة براندل)

$$\mu_T = \rho L^2 H \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{w_x}{H} \right)$$

وهي في المجال الخارجي للطبقة الحدية:

(صيغة كلاوزرا)

$$\mu_T = \rho K W \delta^*$$

b: عرض الريشة.

الدليل z للجهة الخلفية و n دليل الجهة الأمامية.  
K=0.0168: ثابت كلاوزرا.

الحد المرجعي  $M^*$  في معادلة الاستمرار [5] يصف تأثير الجريانات الثانوية، وذلك عن طريق امتصاص السائل في اتجاه السطح الموازي والمتعامد مع التيار الرئيسي [6].

سوف نعدُّ أن منحنيات سرعة الجريانات الثانوية على الريشة وعلى السطوح الحدية متشابهة، أما سرعة الجريان الثانوي على الريشة فيمكن أن يكون معبراً عنها من خلال سرعة التيار الرئيسي:

$$w_{FTOP} = W \cdot \text{tg} \Delta\beta \left[ 1 - \left( \frac{w_x}{W} \right)^3 \right] \frac{w_x}{W} \quad (8)$$

إذ:

$\Delta\beta$ : زاوية ميول أبعاد خط تيار على السطح الخارجي عن اتجاه التيار الرئيسي وعليه:

$$M = \frac{\partial(w_{FTOP} \rho H)}{\partial Z}$$

ومن أجل الحصول على دقة مقبولة لحل المعادلتين (4) و (5) سننفيذ شبكة كثيفة قرب السطح بمساعدة إدخال جملة محاور إحداثية جديدة:

$$n = \frac{y}{\delta(x)g(y)} ; \quad \xi = \frac{x}{x_i}$$

إذ:

$g(y)$ : دالة التكتيف والمبنية حسب قانون تناقص الخطوط العرضية للشبكة عند الاقتراب من الجدار:

$$\Delta y_i = \Delta y_{\max} \left( \frac{\Delta y_{\min}}{\Delta y_{\max}} \right)^{\frac{i-1}{N}}$$

إذ:

N: عدد فواصل (مسافات) الشبكة.

i: رقم ترتيب المسافة.

تؤدي ضياعات المزج المتعلقة بقطع التيار دوراً جوهرياً في ميزان الضياعات العام لذلك فإن ضبط موقع نقطة القطع يمتلك أهمية كبيرة، فمن أجل ذلك سوف نأخذ بالحسبان تأثير عدم تساوي ثقل الطبقة الحدية [5]، ونستفيد من صيغة البحث [7] المعدل لثابت كلاوزرا:

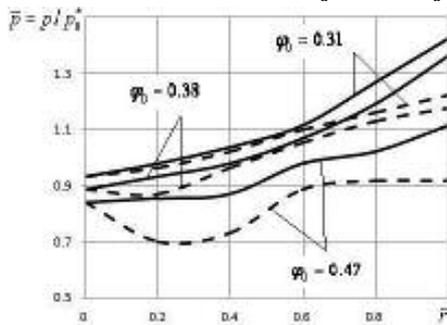
$$K = 0.0168 \exp \left( -0.177\beta + 7 \frac{d\beta}{dx} \delta^* \right)$$

إذ:

$\beta = -\frac{\delta^*}{v^{*2}} W \frac{dW}{dx}$  وهو بارامتر عدم تساوي ثقل الطبقة الحدية.

#### مناقشة النتائج:

بمقارنة نتائج الحسابات بالمعطيات التجريبية نلاحظ من الشكل (3) تطابقاً مقبولاً للضغط الاستاتيكي الحسابي والتجريبي.



الشكل (3): توزيع الضغط الاستاتيكي عند القرص العلوي

للدولاب الدائر من أجل قيم مختلفة لمعامل التدفق

( الخط متصل: حسابي والخط المنقط: تجريبي )

يلاحظ التباين عند قيم عالية لمعاملات التدفق  $\varphi_0$ ، ويلاحظ أيضاً أنه في الجريان الحقيقي وعند قيم سالبة كبيرة لزاويا الهجوم يتشكل على المدخل إلى شبكة الريش منطقة قطع محلية، الأمر الذي يؤدي إلى تضيق التيار؛ وهذا بدوره يؤدي إلى زيادة السرعة.

يتضح من المنحنيات أن المردود الحسابي للدولاب الدائر والمرحلة له قيمة عظمى عند قيم نفسها  $\phi_p$  و  $n_w$ ، وأن هذه القيمة العظمى تتناقص مع تناقص  $\phi_p$ ، كما يظهر أيضاً أن أفضل قيم  $n_w$  تقع في المجال [1.15.....1.34].

إن تناقص  $\eta_n^*$  عند انخفاض  $n_w$  في منطقة  $n_w < n_{w-ont}$  يتعلق بازدياد الضياع على السطوح الحديدية (الطرفية)، وذلك بسبب تناقص الاتساع النسبي للقنوات. أما في منطقة  $n_w > n_{w-ont}$  فمع زيادة

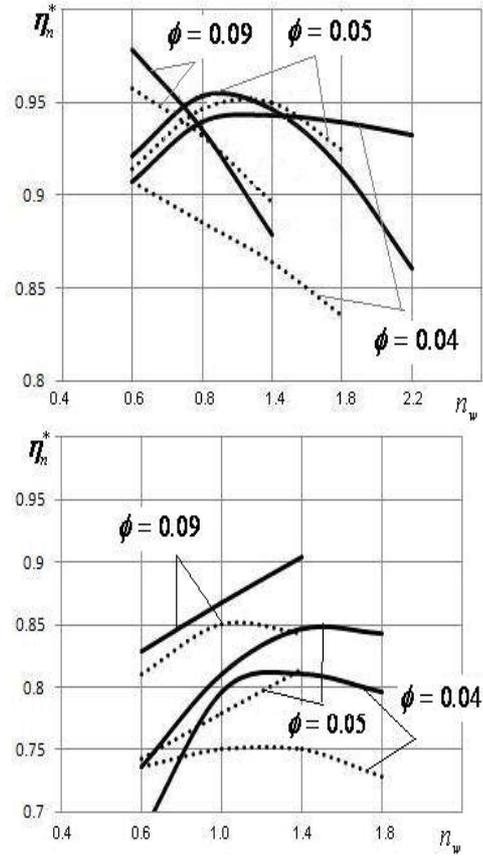
$n_w$  يهبط المردود  $\eta_n^*$  بسبب زيادة ضياعات انتشار التيار. أما في المنحنيات التجريبية فقيم المردود المثلى تقع في مجال قيم  $n_w$  الصغيرة. الشق الأيمن للمنحنيات الواقعة في المجال  $n_w > n_{w-ont}$  يمتلك طابعاً يشبه- وبشكل نوعي- المعطيات الحسابية. وهذه المنحنيات تظهر تناقص المردود  $\eta_n^*$  مع زيادة

$n_w$  بسبب زيادة ضياعات الانتشار في الدولاب. فضلاً عما تقدم فقد تم تدقيق التصورات الفيزيائية عن جريان الأوساط اللزجة في الدواليب النابضة، وظهرت سلسلة ميزات إضافية، من أهمها: هو أن سرعة التيار الثانوي على القرص ليس مؤكداً أنها متجهة من الجهة الأمامية إلى الجهة الخلفية دائماً، وإنما هناك إمكانية لأن يكون اتجاه هذا التيار معاكساً تماماً. إن هذا الكلام غير مألوف للنظرة الأولى؛ إلا أن هذه الظاهرة واضحة على القرص العلوي، وعلى الجزء الابتدائي للقنوات بين الريش. ويحدث ذلك أثناء التدفق الأعظمي خلال الدولاب، ويمكن شرح هذه الظاهرة على الشكل الآتي:

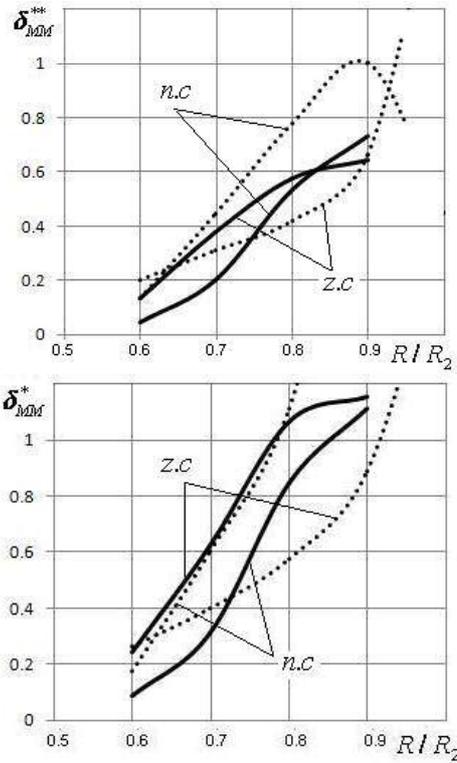
ويفسر هذا بوجود منطقة ضغط منخفض على المدخل إلى الدولاب، الأمر الذي لم يلاحظ حسابياً، وعليه فإن مقارنة نتائج الحسابات بالتجارب تظهر إمكانية تقييم تقريبي لبارامترات التيار الحقيقي بمساعدة نماذج الجريانات المدروسة عند أنظمة العمل القريبة من النظام الأمثل. وعلى الشكل (4) منحنيات القيم الحسابية والتجريبية لمردود الدولاب الدائر ومردود

$$n_w = \frac{W_1}{W_2}$$

مرحلة ذات ناشر دون ريش، وعند قيم مختلفة وخلال  $\phi_p = 0.03 \dots \dots \dots 0.1$  و  $M_u = 0.77$ .

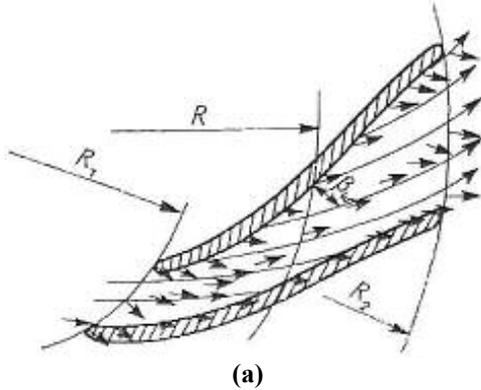


الشكل (4): خصائص الدولاب الدائر والمرحلة عند قيم مختلفة لمعامل التدفق ( الخط المتصل: حسابي والخط المنقط: تجريبي )



الشكل (5): تطور الطبقة الحديدية في الدوالب الدائر  
( الخط المتصل: تجريبي والخط المنقط: حسابي )

فضلاً عما سبق فإن لوحة الترنئية على الشكل (6) تبين أنه عندما يكون التدفق قليلاً جداً يجب أن يكون هناك قطع كبير للطبقة الحديدية يشغل طول الريشة كلها؛ وذلك على الجهة الخلفية للريشة، وفي المنطقة الملاصقة للقرص العلوي.



في أثناء التدفق الكبير جداً للتيار، وفي حالة زوايا هجوم كبيرة سالبة وبسبب أن الضغط على الجهة الخلفية من الجزء الابتدائي للريشة  $P_Z$  يفوق الضغط على الجهة الأمامية  $P^n$ ؛ لهذا السبب يتوجه التيار الثانوي على الجزء المدروس من القرص العلوي من الجهة الخلفية للريشة إلى الجهة الأمامية.

كما تبين أيضاً وفقاً لقياساتنا وللترنئية الدقيقة أن التيارات الثانوية على القرص العلوي هي دائماً أكبر شدة مما هي عليه على القرص السفلي، وذلك في الحالة التي تكون فيها نسبة السرعة  $\frac{w_2}{w_1}$  غير كبيرة، والسبب الرئيسي في ذلك هو وجود سماكات مختلفة للطبقات الحديدية  $\delta$  على الأقراص، فعلى القرص العلوي تكون الطبقة الحديدية سميكة بسبب كبر تشتت (تباعد) الجريان على النصف الثاني من نصف قطر القرص العلوي، أمّا على القرص السفلي فإن الطبقة الحديدية على العكس تماماً، فهي رقيقة بسبب الطابع الكنفوزري (تقارب) للجريان على الجزء المماثل له في القرص العلوي.

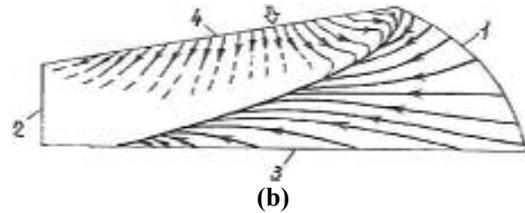
سمح تحليل توزيع بارمترات الطبقات الحديدية على الأقراص تبعاً للخطوة  $t$  في القنوات بين الريش بالقول: إن السماكات  $\delta^*$  و  $\delta^{**}$  للطبقة الحديدية تزداد من الجهة الأمامية للريشة باتجاه الخلف، كما هو موضح على الشكل (5)، وذلك بالتوافق مع اتجاه التيارات الثانوية.

الدوائر الدائرية والناشر المستخدم؛ وذلك لأن هذا التباين يكون قليلاً بالنسبة إلى الدوائر الدائرية وحده.

المراجع حسب تسلسل ورودها في المقالة وجميعها باللغة الروسية:

1. Селезнев К. П., Галеркин Ю.Б. Центробежные компрессоры.- Л.:Машиностроение,1982. – 271 с.
2. Селезнев К. П., Биба Ю. И., Савин Б. Н., Симонов А. М. Расчет вязкого потока в проточной части осерадиальных ступеней центробежных компрессоров // Труды ЛПИ.—1989.- N<sub>0</sub>414.-С.11-14.
3. Селезнев К. П., Биба Ю. И., Савин Б. Н., Симонов А. М. Расчет невязкого безотрывного течения в межлопаточном канале центробежного компрессора // Алгоритмы и программы.- ВНИИЦ, 1996.- N<sub>0</sub>2.-с.43.
4. Селезнев К. П., Савин Б. Н., Симонов А. М., Сергеев С. Е. Некоторые рекомендации по профилированию проточной части центробежных компрессорных ступеней с осерадиальными рабочими колесами // Совершенствование холодильных и компрессорных машин.- Омск: ОмПИ, 1994.- С.28 -33.
5. Лапин Ю. В. Турбулентный пограничный слой в сверхзвуковых потоках газа. – М. Наука. 2003. – 312 с.
6. Жарковский А. А., Шкарбуль С. Н. Метод оценки гидравлических качеств проектируемого рабочего колеса турбомашин на основе расчета пространственного пограничного слоя // Изв. Вузов. Энергетика.- 2004.- N<sub>0</sub>2.- с. 96-100.
7. Лапин Ю. В., Стрелец М. Х. Модификация гипотезы Клаузера для равновесных и неравновесных турбулентных пограничных слоев // Теплофизика высоких температур.- 2005.- N<sub>0</sub>3.- с. 522-530.

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق: 2010/11/2.



الشكل (6): لوحة الترتيبية: (a) للجريان في القناة بين الريش عند القرص السفلي

(b) على الجهة الخلفية لريشة الدوائر الدائرية

إذ: 1 و 2: مدخل حافة الريشة ومخرجها، 3 و 4: جهة القرص السفلي والعلوي.

#### الاستنتاجات:

- تقارب قيم بارمترات التيار الحقيقي التجريبي من القيم الحسابية عند أنظمة العمل القريبة من النظام الأمثل.
- القيمة العظمى لمردود الدوائر ومردود المرحلة تتناقص مع تناقص  $\phi_p$ .
- أفضل قيم  $n_w = \frac{w_1}{w_2}$  تقع في المجال  $n_w = 1.15 \dots 1.35$ .
- في المنطقة  $n_w < n_{w-ont}$  يتناقص المردود  $\eta$  عند انخفاض  $n_w$  أما في المنطقة  $n_w > n_{w-ont}$  فمع زيادة  $n_w$  يهبط المردود.
- التيارات الثانوية على القرص العلوي هي دائماً أكبر شدة مما هي على القرص السفلي؛ وذلك عندما تكون نسبة السرعة  $\frac{w_2}{w_1}$  غير كبيرة.
- سماكات الطبقة الحدية  $\delta^*$  و  $\delta^{**}$  تزداد ابتداءً من الجهة الأمامية للريشة باتجاه الخلف؛ وذلك بالتوافق مع اتجاه التيارات الثانوية.
- التباين الكبير بين القيم الحسابية والتجريبية بالنسبة إلى المرحلة قد يعود إلى عدم التوافق بين عمل