

الماكينات الاهراجة الموجبة

المعادلة الأساسية / أسامة
محور للمرفق
94

6/ ماكينات الاهراجة الموجبة (positive displacement m/cs) وظيفة الضاغط هي سحب كمية محددة من مائع (عادة غاز ، وغالبا هواء) وتصريفها عند ضغط مطلوب . الماكينة الأكثر كفاءة هي تلك التي ستكمل هذا بأدنى شغل ميكانيكي مدخل . تستخدم كل من ماكينات الاهراجة الموجبة الترددية والدوارة لأغراض متنوعة . يمكن التمييز بينهما على أساس الاداء بتعريف النوع الترددى كذلك الذى يمتلك معدل سريان كتلة منخفض ونسب ضغط عالية ، والنوع الدوار كذلك الذى يمتلك معدل سريان كتلة عالى ونسب ضغط منخفضة . يكون مدى الضغط من الجوى الى حوالى 9bar مشتركا لكلا النوعين .

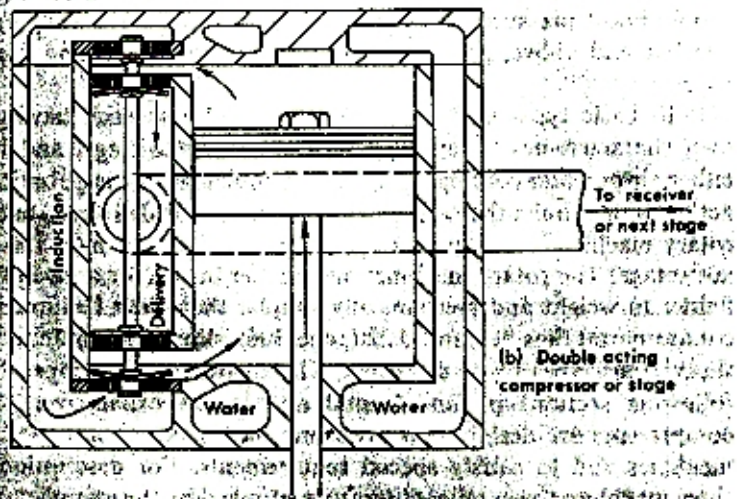
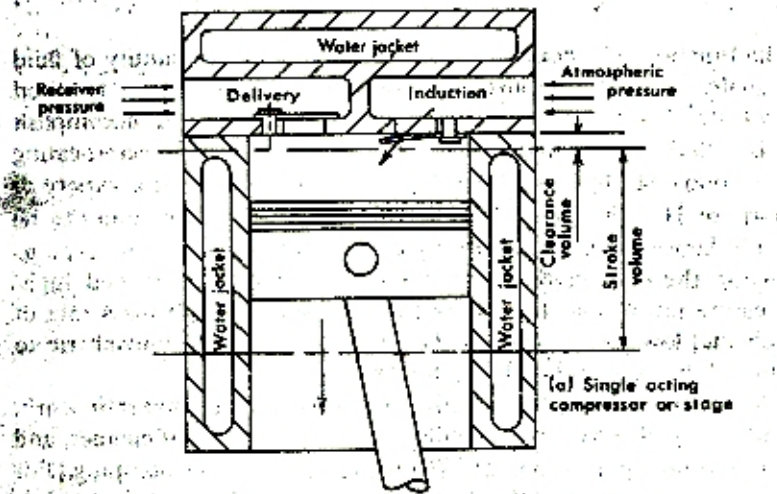
تكون بعض الماكينات الدوارة مناسبة فقط لشغل ذو نسبة ضغط منخفضة ويتم تطبيقها للنظافة (الكسور) والشحن الفوقى للمحركات، والتطبيقات المتنوعة للاستنفاد (العادم) والضخ الفراعى. لضغوط فوق 9bar يمكن استخدام الماكينة الدوارة ذات الريشة (vane-type rotary m/c) لامتداد ضغوط تغريزية ، لكن لشغل ذو ضغط عال محتمل حتى 485bar فما فوق ، لأغراض خاصة ، يتم استخدام النوع الترددى .

كلا النوعين أساسيان يوجد فى اشكال مختلفة كل بمميزاته الخاصة . يمكن أن يكونا مفردى او متعددى المرحلة ، واما أن يملكا تبريدا هوائيا أو مائيا . تكون الماكينة الترددية نبضية فى حركتها مما يحد من معدل تصريف المائع خلالها ، بينما تكون الماكينة الدوارة متصلة فى حركتها . تكون الماكينات الدوارة أصغر فى حجمها لسريان معطى، أخف فى وزنها وأبسط ميكانيكيا من رصيفتها الترددية يوضح الشكل رقم (1) تخطيطيا الانواع المتباينة التى سيتم مناقشتها .

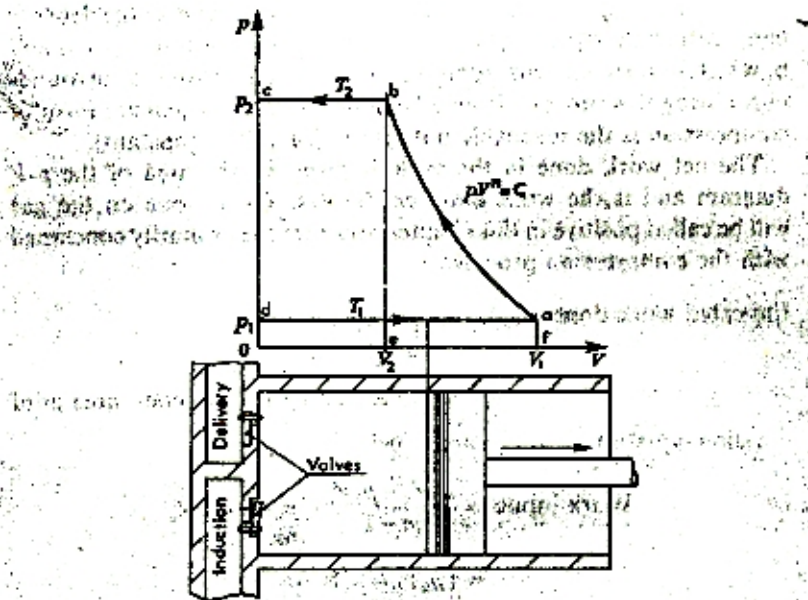
لضاغط يشغل بأسلوب دورى أو نبضى ، مثل الضاغط الترددى ، فان الخواص عند المدخل والمخرج هي القيم المتوسطة المأخوذة فى الدورة يتم اختبار حد حجم التحكم بحيث تكون الحالات 2.1 ثابتة مع الزمن وتكون الاوضاع المنتخبة بعيدة عن اضطراب التنبيض (pulsating disturbance).

الماكينات الترددية (reciprocating m/cs)

تشتمل الآلية على الكباس ، ذراع التوصيل ، المرفق ، وترتبية الاسطوانة. ابتدائيا سيتم تجاهل حجم الخلوص فى الاسطوانة . أيضا سيتم افتراض أن مائع التشغيل هو غاز مثاليا . تأخذ الدورة لفة واحدة للعمود المرفقى لتكتمل ويتم توضيح المخطط البياني الاساسى فى الشكل رقم (2) يتم تصميم الصمامات المستخدمة فى معظم ضواغط الهواء بحيث تعطى فعل ذاتى وتكون من النوع المحمل باليايات التى تشغل بفرق ضغط صغير غيرها ، يعطى ضغط الباي الخفيف فعل اغلاق سريع .



(1) الشكل



(2) الشكل

يجب أن يكون صعود الصمام لأعطاء سريان الهواء المطلوب أصغر ما يمكن ويجب أن يشغل بدون صدمة .

في الشكل رقم (2) يمثل الخط d-a شوط السحب . تزداد الكتلة في الاسطوانة من صفر عند d الى تلك المطلوبة لمل الاسطوانة عند a . تكون درجة الحرارة ثابتة عند T_1 لهذا الاجراء ولا يكون هنالك تبادل حرارة مع البيئة المحيطة في الحالة المثالية . يبدأ السحب عندما يكون فرق الضغط بين الصمام كاف لفتح الخط a-b-c الانضغاط وشوط التصريف عندما يبدأ الكباس شوط رجوعه يرتفع الضغط في الاسطوانة ويغلق صمام الدخول . يستمر صعود الضغط بالكباس الراجع كما موضح بالخط a-b حتى يتم الوصول الى الضغط الذي يفتح عنده صمام التصريف (قيمة يتم تحديدها بالصمام والضغط في المستقبل (receiver)).

يحدث التصريف كما موضح بالخط b-c ، الذي يكون اجراءا عند درجة حرارة ثابتة T_2 ، ضغط ثابت P_2 ، تبادل حرارة صفري وكتلة متناقصة . تعاد الدورة عند نهاية هذا الشوط . تعتمد قيمة درجة حرارة التصريف على قانون الانضغاط بين b,a الذي بدوره يعتمد على تبادل الحرارة مع البيئة المحيطة اثناء هذا الاجراء . يمكن افتراض أن الشكل العام للانضغاط هو متعدد الانتحاء انعكاسي (reversible polytropic) . (i.e. $PV^n = \text{constant}$)

يعطى صافي الشغل المبذول في الدورة بمساحة مخطط $P-V$ ويكون الشغل المبذول على الغاز . سيكون الشغل المبذول على الغاز موجبا في هذا الفصل ، بما أننا سنهتم أساسيا باجراء الانضغاط . الشغل المبذول البياني على الهواء للدورة = المساحة abcd = المساحة abef + المساحة bcde - المساحة adcf باستخدام المعادلة التالية ، للمساحة abef ،

شغل الدخول i-e (الشغل المبذول البياني على الهواء في الدورة)

$$\frac{P_2 V_b - P_1 V_a}{n-1} + P_2 V_b - P_1 V_a$$

$$= (P_2 V_b - P_1 V_a) \left(\frac{1}{n-1} + 1 \right)$$

$$= (P_2 V_b - P_1 V_a) \left(\frac{1+n-1}{n-1} \right)$$

$$= \frac{n}{n-1} (P_2 V_b - P_1 V_a) \dots \dots \dots (1)$$

من المعادلة التالية يمكن كتابة

$$P_1 V_a = \dot{m} R T_1 \quad , \quad P_2 V_b = \dot{m} R T_2$$

(حيث \dot{m} هي الكتلة السحوبة والمصرفة في الدورة) وبالتالي :-

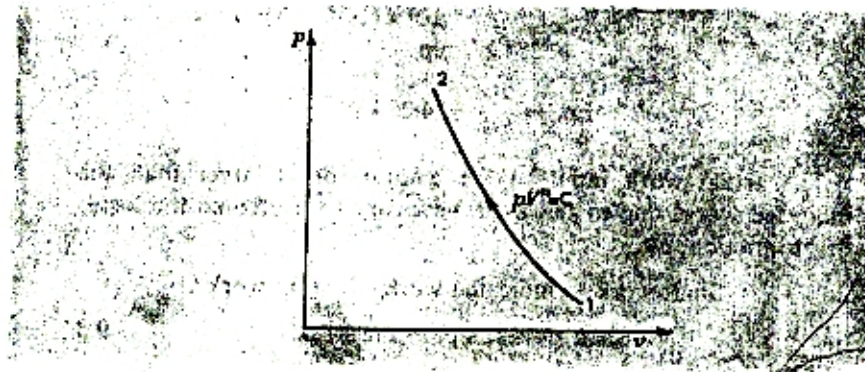
$$\text{شغل الدخول للدورة} = \frac{n}{n-1} \dot{m} R (T_2 - T_1) \quad (2)$$

يكون الشغل المبذول على الهواء لوخدة زمن مساويا للشغل المبذول بالدورة مضروباً في

عدد الدورات لوخدة زمن . يستخدم معدل سريان الكتلة اكثر تكراراً من الكتلة في الدورة .

تغيير صائع التشغيل حالته بين a,b في الشكل رقم (2) ، من P_1 و T_1 الى P_2 و T_2 ، يسم

توضيح التغير في الشكل رقم (3) الذي هو مخطط خواص (p ضد v)



شكل رقم (3)

$$i.e. \quad T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n}{n-1}}$$

تعطي درجة حرارة التصريف بالمعادلة التالية

مثال (1) :-

ضغوط ترددي مفرده المرحلة يسحب $1m^3$ من الهواء في الدقيقة عند 1.013bar

و $15^\circ C$ ويصرفه عند 7bar . مفترضا أن قانون الانضغاط يكون $p v^{1.35} = const$ ، وأن

الخلوص يتم تجاهله ، أحسب القدرة البيانية .

الحل :-

$$\dot{m} = \frac{P_1 V_a}{R T_1} = \frac{1.013 \times 1 \times 10^5}{287 \times 288} = 1.226 \text{ kg/min}$$

الكتلة المصروفة في الدقيقة

(حيث $T_1 = 15 + 273 = 288$)

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} = 288 \left(\frac{7}{1.013} \right)^{0.35/1.35}$$

$$= 288 \times 6.91^{0.259} = 288 \times 1.65 = 475.2k$$

من المعادلة (2)

$$\text{الشغل البياني (حيث } m \text{ هو سريان الكتلة بالـ } \frac{kg}{min}) = \frac{n}{n-1} m R (T_2 - T_1) \text{ kJ/min}$$

$$\text{i.e. الشغل البياني} = \frac{1.35 \times 1.226 \times 287 \times (475.2 - 288)}{10^3 \times (1.35 - 1)} = 254 \text{ kJ/min}$$

$$\text{i.e. القدرة البيانية } i.p.p = \frac{254}{60} = 4.23 \text{ kW}$$

يكون شغل الدخل الفعلي للضاغط اكبر من الشغل البياني * نتيجة للتشغيل الضروري لتخطي الفقدان الناشئة من الاحتكاك ، etc ، الشغل الاحتكاكي + الشغل البياني = شغل

العمود

$$S.P = i.p + f.p \quad (3)$$

تعطي الكفاءة الميكانيكية للماكينة بـ

$$\text{الشغل البياني أو القدرة البيانية} = \text{الكفاءة الميكانيكية للضاغط} \quad (4)$$

شغل العمود أو قدرة العمود

تحديد قدرة الدخل المطلوبة يجب اعتبار كفاءة محرك الادارة بالإضافة لكفاءة الميكانيكية .

بالتالي،

$$S.P. = \frac{\text{القدرة الدخل للعمود}}{\text{كفاءة المحرك والادارة}} \quad (5)$$

مثال (2) :-

إذا تمت ادارة الضاغط للمثال (1) بسرعة 300 rev/min لماكينة مفردة التشغيل ، مفردة الاسطوانة ، احسب قطر الاسطوانة المطلوب ، مفترضاً نسبة طول شوط الى قطر اسطوانة مقداره 1.5/1 . احسب قدرة المحرك المطلوبة لادارة الضاغط اذا كانت الكفاءة الميكانيكية للضاغط تعادل 85% وتلك لنقل قدرة المحرك 90%.

$$\frac{\text{الحجم المسحوب في الدقيقة}}{\text{سرعة الضاغط بالـ rev/min}} = \frac{\text{الحجم المسحوب في الدقيقة}}{\text{rev/min}} = \frac{\text{m}^3/\text{rev}}{\text{rev/min}} = \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \text{ or } \frac{\text{m}^3}{\text{cycle}}$$

الحل:-

$$\text{الحجم المسحوب في الدقيقة عند المدخل} = 1 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\therefore \text{الحجم المسحوب في الدورة} = \frac{1}{300} = 0.00333 \text{ m}^3/\text{cycle}$$

$$\text{i.e. حجم الاسطوانة} = 0.00333 \text{ m}^3$$

$$\therefore \frac{\pi}{4} d^2 L = 0.00333$$

(حيث d = قطر الاسطوانة ; L = طول الشوط)

$$\text{i.e. } \frac{\pi}{4} d^2 (1.5 \times d) = 0.00333$$

$$\therefore d^3 = 0.00283 \text{ m}^3$$

$$\text{i.e. قطر الاسطوانة } d = \underline{\underline{141.5 \text{ mm}}}$$

$$\text{قدرة الدخل للضاغط} = \frac{4.23}{0.85} = \underline{\underline{4.98 \text{ kW}}}$$

$$\therefore \text{قدرة المحرك} = \frac{4.98}{0.9} = \underline{\underline{5.53 \text{ kW}}}$$

مبتدئاً بالمعادلة (2)، يمكن اشتقاق تعبيرات أخرى للشغل البياني

$$\text{القدرة البيانية، أيضاً من} = \frac{n}{n-1} m \cdot R (T_2 - T_1) = \frac{n}{n-1} m \cdot R T_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right)$$

المعادلة التالية، (6) هي

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n}$$

عليه

$$\frac{\text{القدرة}}{\text{البيانية}} = \frac{n}{n-1} m \cdot R T_1 \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right\} \quad (6)$$

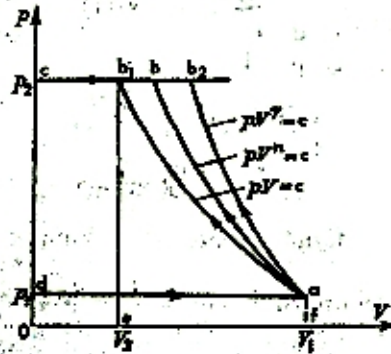
القدرة البيانية

$$W = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left\{ \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right\} \quad (7)$$

(حيث V^* هو الحجم المسحوب لوحدة زمن)

شروط الحصول على ادنى شغل (The condition for minimum work)

يعطي الشغل المبذول على الهواء بمساحة المخطط البياني ، وسيكون الشغل المبذول ادنى عندما تكون مساحة المخطط ادنى . يتم تثبيت ارتفاع المخطط بنسبة الضغط المطلوبة (عندما تكون p_2 مثبتة) ، ويتم تثبيت طول الخط da بحجم الاسطوانة الذي يتم تثبيته بالسحب المطلوب من الغاز . الاجراء الوحيد الذي يمكن ان يؤثر على مساحة المخطط هو الخط ab . يتم تحديد موضع هذا الخط بقيمة الاس n ; الشكل رقم (4) لانه يوضح المحددات للاجراءات الممكنة .



شكل رقم (4)

يكون الخط ab_1 طبقاً للقانون $PV = \text{const}$ (i.e. ثابت درجة الحرارة) . يكون الخط ab_2 طبقاً لقانون $PV^n = \text{const}$ (i.e. ثابت القصور الحراري) حيث يكون كلا الاجراءات انعكاسيان .

يكون الانضغاط ثابت درجة الحرارة هو الاجراء الاكثر تفضيلاً بين b, a ، معطياً الشغل الادنى المبذول على الهواء . هذا يعني انه في ضاغط فعلي يجب الحفاظ على درجة حرارة الغاز بحيث تكون اقرب ما يمكن لقيمتها الاولى وهذا يتطلب توفير وسيلة لتبريد الغاز اما بالهواء او بالماء . يعطي الشغل المبذول البياني عندما يتم انضغاط الغاز بثبات درجة الحرارة بالمساحة ab_1cd .

المساحة $adof$ - المساحة بالمساحة b_1cde + المساحة ab_1ef = المساحة ab_1cd

$$\text{المساحة } ab_1ef = p_2 V_2 \log_e \frac{p_2}{p_1}$$

$$\text{i.e. الشغل البياني في الدورة} = P_2 V_2 \log_e \frac{P_3}{P_1} + P_2 V_2 - P_1 V_2$$

أيضاً $P_1 V_1 = P_2 V_2$ ، بما ان الاجراء ab_1 ثابت درجة الحرارة .

$$\therefore \text{الشغل البياني في الدورة} = P_2 V_2 \log_e \frac{P_2}{P_1} \quad (8)$$

$$= P_1 V_1 \log_e \frac{P_2}{P_1} \quad (9)$$

$$= m \cdot RT \log_e \frac{P_2}{P_1} \quad (10)$$

كفاءة ثابت درجة الحرارة : (Isothermal efficiency)

بالتعريف المؤسس على مخطط البيان ،

$$(11) \quad \frac{\text{الشغل ثابت درجة الحرارة}}{\text{الشغل البياني}} = \text{كفاءة ثابت درجة الحرارة}$$

مثال (3) :-

مستخدماً البيانات للمثال (1) احسب كفاءة ثابت درجة الحرارة للضاغط .

الحل :-

من المعادلة (10) ،

$$\text{الشغل البياني} = m \cdot RT \log_e \frac{P_2}{P_1} = 1.226 \times 0.287 \times 288 \times \log_e \frac{7}{1.013} = 196 \text{ kJ/min}$$

من المثال (1) ، $\text{الشغل البياني} = 254 \text{ kJ/min}$

بالتالي مستخدماً المعادلة (11) عالياً ،

$$77.2\% \text{ او } 0.772 = \frac{196}{254} = \text{كفاءة ثابت درجة الحرارة}$$

الصورة الاقل تفصيلاً للانضغاط في الضواغط الترددية هي تلك التي تعطي بالاجراء

ثابت القصور الحراري (انظر الشكل (4)) . ستكون الصورة الفعلية للانضغاط عادة بين

هذين الحدين . يتم تمثيل الاجراءات الثلاث على مخطط T-S في الشكل (5) .

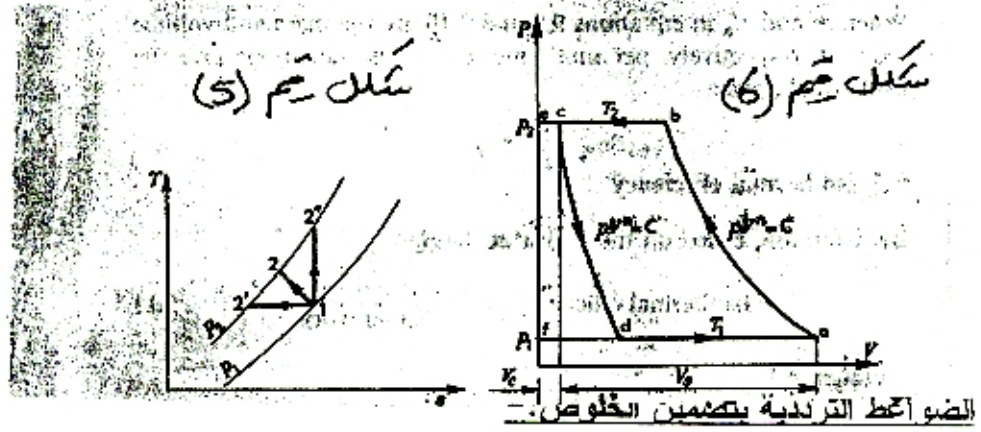
1-2' يمثل انضغاطاً ثابت درجة الحرارة

2-2'' يمثل انضغاطاً ثابت القصور الحراري

2-1 يمثل انضغاطاً طبقاً لقانون $PV^n = \text{const}$

عادة ما تقع n بين 1.0 و 1.3 لضغط هواء ترددي.

يكون الاسلوب الرئيسي المستخدم لتبريد الهواء باحاطة الاسطوانة بغلاف ماء (Water jacket). والتصميم للنسبة الافضل لمساحة السطح الى حجم الاسطوانة .



(Reciprocating compressors including clearance)

يكون الخلوص ضرورياً في ضاغط لاعطاء حرية ميكانيكية لاجزاء التشغيل ويسمح بالفراغ الضروري لتشغيل الصمامات .

يوضح الشكل (6) مخطط البيان المثالي بتضمين حجم الخلوص . لماكينات ذات جودة عالية يكون حجم الخلوص حوالي 6% من الحجم المكتسح ، وللماكينات ذات الصمام الكمي (Sleeve valve m/cs) يمكن ان يصبح حوالي 2% ، لكن هنالك ايضاً ماكينات شائعة بخلوصات 30-35% .

عندما يكتمل شوط التصريف bc يكون حجم الخلوص V_c ممثلنا بالغاز عند ضغط P_2 ودرجة حرارة T_2 . كلما واصل الكباس مسيرته على شوط السحب التالي يتمدد الهواء خلفه حتى يتم الوصول للضغط P_1 . مثالياً حالما يصل الضغط الى P_1 ، سيبدأ سحب غاز طازج ويستمر لنهاية هذا الشوط عند a . من بعد يتم انضغاط الغاز طبقاً للقانون $PV^n = \text{const}$ (عموماً) ، ويبدأ التصريف عند b حسب تحكم الصمامات . يكون تأثير الخلوص هو خفض الحجم المسحوب عند P_1 و T_1 من V_a الى $(V_a - V_c)$. تكون كتل الغاز عند النقاط الاربع الرئيسية بحيث ان $\dot{m}_c = \dot{m}_a$ ، $\dot{m}_d = \dot{m}_b$. تعطي الكتلة المصروفة في الدورة بـ $(\dot{m}_b - \dot{m}_c)$ ، والتي تكون مساوية لتلك المسحوبة المعطاة بـ $(\dot{m}_a - \dot{m}_d)$. تتغير خواص مائع التشغيل في الاجراءات a-b ، c-d كما موضح في الشكل (7) ، بالرجوع للشكل رقم (6) يعطي الشغل المبذول البياني بمساحة المخطط p-v .

المساحة abcd = الشغل البياني

المساحة cefd - المساحة abef

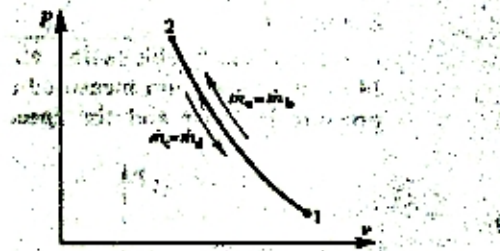
بالتالي ، مستخدماً المعادلة (2) ،

$$C \quad \text{القدرة البيانية} = \frac{n}{n-1} \dot{m}_a R (T_2 - T_1) - \frac{n}{n-1} \dot{m}_d R (T_2 - T_1)$$

$$\text{i.e. القدرة البيانية} = \frac{n}{n-1} R (\dot{m}_a - \dot{m}_d) (T_2 - T_1)$$

$$= \frac{n}{n-1} R m^* (T_2 - T_1) \quad (12)$$

(حيث m^* هي الكتلة المسحوبة لوحدة زمن $(\dot{m}_a - \dot{m}_d)$)



الشكل (7)

توضح المقارنة بين المعادلات (12) و (2) انهما متطابقتان : الشغل المبذول لانضغاط كتلة الغاز \dot{m}_a (أو \dot{m}_d) على الانضغاط a-b ، يتم ارجاعه عندما يتمدد الغاز من C الى d . بالتالي فان الشغل المبذول لوحدة كتلة من الهواء المصروف لا يتأثر بمقياس حجم الخلوص .

يمكن اشتقاق تعبيرات اخرى كما في سابقه . من المعادلة (7)

$$\text{القدرة البيانية} = \frac{n}{n-1} p_1 v_1^* \left\{ \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right\}$$

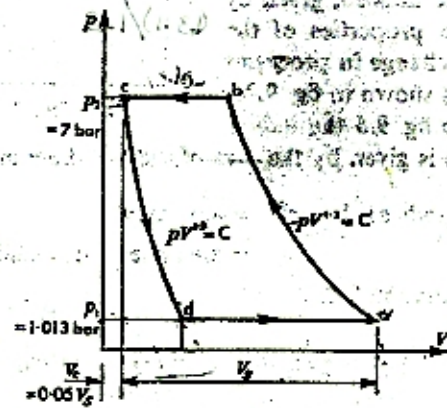
$$\therefore \text{القدرة البيانية} = \frac{n}{n-1} p_1 (v_a - v_d) \left\{ \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right\} \quad (13)$$

يمكن زيادة الكتلة المصروفة لوحدة زمن لتصميم الماكينة بحيث تصبح مزدوجة التشغيل (double-acting) ، i.e. يتم التفاعل مع الغاز على كلا جانبي الكباس . شوط السحب لأخذ الجانبين يكون شوطاً للانضغاط للجانب الآخر (انظر الشكل رقم (1)).

مثال (4) :-

ضماغط هواء مفرد المرحلة مزدوج التشغيل مطلوب منه تصريف $14 m^3$ من الهواء في الدقيقة مقاساً عند 1.013 bar و 15°C . يكون ضغط التصريف 7 bar والسرعة

300 rev/min . خذ الحجم الخلوصي كـ 5% من الحجم المكتسح بأس انضغاط مقاداره $n=1.3$. احسب الحجم المكتسح للأسطوانة ، درجة حرارة التصريف والقدرة البيانية .



شكل (8)

بالرجوع للشكل (8)

$$\text{الحجم المكتسح} = (V_a - V_c) = V_s$$

$$\begin{aligned} V_c &= 0.05 V_s \\ V_d &= V_s + V_c = 1.05 V_s \\ V_d &= 1.05 V_s \end{aligned}$$

$$\text{الحجم المسحوب في الدورة} = (V_a - V_d)$$

$$(V_a - V_d) = \frac{14}{300 \times 2} = 0.0233 m^3$$

(عدد الدورات في الدقيقة × عدد الفات في الدقيقة = عدد الدورات في الدقيقة)

الآن:

$$V_d = 1.05 V_s \quad , \quad V_d = V_c \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} = 0.05 V_s \left(\frac{7}{1.013} \right)^{\frac{1}{1.3}}$$

$$\text{i.e.} \quad V_d = 0.221 V_s$$

$$\therefore (V_a - V_d) = 1.05 V_s - 0.221 V_s = 0.0233 m^3$$

$$\therefore V_s = \frac{0.0233}{0.829} = \frac{0.028}{m^3}$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} \quad \text{درجة حرارة التصريف}$$

$$T_1 = 15 + 273 = 288k$$

$$\text{i.e. } T_2 = 288 \left(\frac{7}{1.013} \right)^{(1.3-1)/1.3} = 288 \times 1.563 = 450k$$

$$\therefore \text{درجة حرارة التصريف} = 177^\circ c$$

مستخدماً المعادلة (13) ،

$$\begin{aligned} \text{القدرة البيانية} &= \frac{n}{n-1} P_1 (V_a - V_d) \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right] \\ &= \frac{1.3}{0.3} \times \frac{1.013 \times 10^5 \times 14}{10^3 \times 60} \left\{ \left(\frac{7}{1.013} \right)^{(1.3-1)/1.3} - 1 \right\} kw \end{aligned}$$

$$\text{i.e. القدرة البيانية} = 57.65kw$$

بطريقة أخرى :

$$m^* = \frac{1.013 \times 14 \times 10^5}{0.287 \times 288 \times 10^3} = 17.16 kg/min$$

بالتالي ، مستخدماً المعادلة (12)

$$\text{القدرة البيانية} = \frac{n}{n-1} m^* R (T_2 - T_1)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1.3}{0.3} \times 17.16 \times 0.287 (450 - 288) \\ &= 3459 kJ/min \end{aligned}$$

$$\text{i.e. القدرة البيانية} = \frac{3459}{60} kw = 57.65kw$$

(Volumetric efficiency) : الكفاءة الحجمية

لقد تم توضيح ان احد تاثيرات الخلوص هو خفض الحجم المسحوب الى قيمة اقل من ذلك للحجم المكتسح . هذا يعني انه ولسحب مطلوب يجب زيادة مقياس الاسطوانة فوق ذلك الذي يتم حسابه بافتراض خلوص صفري .

يتم يتم تعريف الكفاءة الحجمية كالآتي:

$\eta_v = \frac{\text{حجم الهواء المصروف مقسومة على كتلة الهواء التي تشمل الحجم المكتسح عند حالات}}{\text{حجم الهواء المصروف مقاساً عند ضغط ودرجة حرارة الهواء الطليق ، مقسوماً على الحجم المكتسح للاسطوانة}}$

(14) (أ) الهواء الطليق للضغط ودرجة الحرارة

$\eta_v = \frac{\text{حجم الهواء المصروف مقاساً عند ضغط ودرجة حرارة الهواء الطليق ، مقسوماً على الحجم المكتسح للاسطوانة}}{\text{حجم الهواء المصروف مقاساً عند ضغط ودرجة حرارة الهواء الطليق ، مقسوماً على الحجم المكتسح للاسطوانة}}$

(14) (ب)

يمكن توضيح ان المعادلة (14) و (14)^(ب) تكونا متطابقان ،
 i.e. اذا كان تصريف الهواء الطليق F.A.D هو V ، عند P و T ، بالتالي تكون الكتلة

$$m^* = \frac{PV}{RT}$$

الكتلة المطلوبة لملء الحجم المكتسح ، V_s ، عند P و T تعطي بـ

$$m_s^* = \frac{PV_s}{RT}$$

عليه بالمعادلة (14)^(ا) ،

$$\eta_v = \frac{m^*}{m_s^*} = \frac{PV}{RT} \times \frac{RT}{PV_s} = \frac{V}{V_s} = \frac{\text{كتلة الهواء المصروف}}{\text{كتلة الهواء الممتلئ عند حالات الهواء الطليق}}$$

يمكن الحصول على الكفاءة الحجمية من مخطط البيان . بالرجوع للشكل (9) ،

$$\therefore \text{الحجم المسحوب} = V_a - V_d = V_s + V_c - V_d$$

وباستخدام المعادلة التالية ،

$$\frac{V_d}{V_c} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{i.e.} \quad V_d = V_c \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}}$$

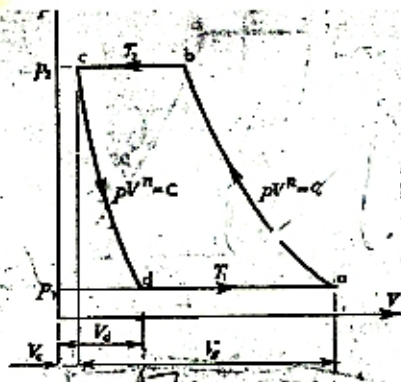
$$\begin{aligned} (V_a - V_d) &= V_s + V_c - V_c \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}} \\ &= V_s - V_c \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \end{aligned} \quad (15)$$

بالتالي مستخدماً المعادلة (14)^(ا) ،

$$\eta_v = \frac{V_a - V_d}{V_s} = \frac{V_s - V_c \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right]}{V_s} = \frac{\text{حجم الهواء المصروف لملء مكبس مقاساً عند ضغط ودرجة حرارة الهواء الطليق}}{\text{الحجم المكتسح للأحجام}} \quad (16)$$

i.e. $\eta_v = 1 - \frac{V_c}{V_s} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right]$

سؤال رقم (٩)



من المهم ملاحظة ان هذا التعريف للكفاءة الحجمية يكون متسقاً فقط مع المعادلتان (14) و (14) (ط) اذا كانت حالات الضغط ودرجة الحرارة في الاسطوانة اثناء شوط السحب متطابقة مع تلك للهواء الطليق . حقيقة فأن الغاز سيتم تسخينه بواسطة جدران الاسطوانة ، وسيكون هنالك انخفاضاً في الضغط نتيجة لانخفاض الضغط المطلوب لسحب الغاز الى الاسطوانة ضد مقاومة السريان الحتمية . تتطلب هذه التعديلات للحالة المثالية تطبيق بنائية اكثر للصيغ التي اشتقاقها مسبقاً.

كمثال ، كما في السابق اذا تم ترميز الـ F.A.D في الدورة بـ V عند P و T :

بالتالي :

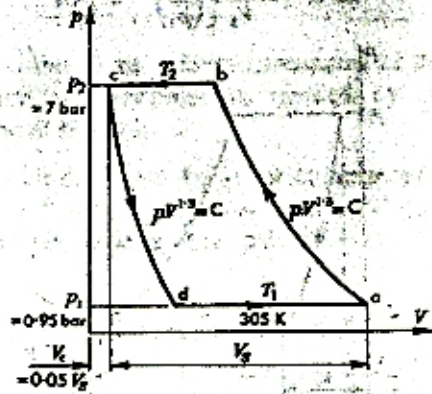
$$m = \frac{PV}{RT} = \frac{P_1(V_a - V_d)}{RT_1}$$

$$\text{i.e. F.A.D./cycle, } V = (V_a - V_d) \frac{T_1}{T_2} \frac{P_1}{P} \quad (17)$$

(حيث P_1 و T_1 هما حالات السحب)

مثال (5) :

ضاغط هواء مفرد المرحلة ، مزدوج التشغيل لديه F.A.D. مقداره $14 \text{ m}^3/\text{min}$ متطابقاً عند 1.013 bar و 15°C . يكون الضغط ودرجة الحرارة في الاسطوانة اثناء السحب هما 0.95 bar و 32°C يكون ضغط التصريف 7 bar واس الانضغاط والتمدد ، $n=1.3$. احسب القدرة البيانية المطلوبة والكفاءة الحجمية . يكون حجم الخلوص مساوياً لـ 5% من الحجم المكتسح .



شكل (10)

يتم توضيح مخطط P-V في الشكل (10).

$$m = \frac{PV}{RT} \text{ الكتلة المصروفة في الدقيقة}$$

(حيث الـ F.A.D. في الدقيقة هو V عند P و T)

$$\text{i.e. } m = \frac{1.013 \times 14 \times 10^5}{0.287 \times 288 \times 10^3} = 17.16 \text{ kg/min}$$

(حيث $T = 15 + 273 = 288 \text{ K}$)

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n}$$

$$\text{i.e. } T_2 = 305 \times \left(\frac{7}{0.95} \right)^{(1.3-1)/1.3} = 305 \times 1.586 = 483.7 \text{ K}$$

(حيث $T_1 = 32 + 273 = 305 \text{ K}$)

من المعادلة (12)

$$\text{القدرة البيانية} = \frac{n}{n-1} m R (T_2 - T_1)$$

$$= \frac{1.3}{0.3} \times 17.16 \times 0.287 (483.7 - 305)$$

$$= 3813 \text{ kJ/min}$$

$$\therefore \text{i.p.} = \frac{3813}{60} = 63.55 \text{ kW}$$

كما في سابقه

$$V_d = V_c \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$\text{i.e. } V_d = 0.05 V_s \left(\frac{7}{0.95} \right)^{\frac{1}{1.3}} = 0.05 V_s \times 7.369^{0.769}$$

$$= 0.5 V_s \times 4.65 = 0.233 V_s$$

$$\therefore V_a - V_d = V_a - 0.233 V_s = 1.05 V_s - 0.233 V_s = 0.817 V_s$$

$$V_a = V_s + V_c$$

مستخدما المعادلة (17)،

$$F.A.D. / \text{cycle} = (V_a - V_d) \frac{T}{T_1} \frac{P_1}{P}$$

$$\text{i.e. } F.A.D. / \text{cycle} = 0.817 V_s \times \frac{288}{305} \times \frac{0.95}{1.013} = 0.724 V_s$$

بالتالي من المعادلة (14):

$$\eta_v = \frac{V}{V_s} = \frac{0.724 V_s}{V_s} = 0.724 \text{ أو } 72.4\%$$

لنلاحظ انه اذا كانت الكفاءة الحجمية في المثال عالية يتم تقويمها باستخدام المعادلة (16) بالتالي:

$$\eta_v = 1 - \frac{V_E}{V_S} \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right\} = 1 - \frac{0.05 V_S}{V_S} \left\{ \left(\frac{7}{0.95} \right)^{\frac{1}{1.3}} - 1 \right\}$$

$$\text{i.e. } \eta_v = 1 - 0.05(4.65 - 1) = 1 - 0.183 = 0.817 \text{ أو } 81.7\%$$

يكون هنالك فرقاً معتبراً بين القيمتين ، بما ان الاجابة الاخيرة تتجاهل الفرق في درجة الحرارة والضغط بين حالات الهواء الطليق وحالات السحب .

الانضغاط متعدد المرحلة: (Multi - Stage Compression)

لقد تم سابقاً تأسيس أنه ولشغل أدنى يجب أن يكون اجراء الانضغاط ثابت درجة

الحرارة . عموماً فان درجة الحرارة بعد الانضغاط تعطى بالمعادلة

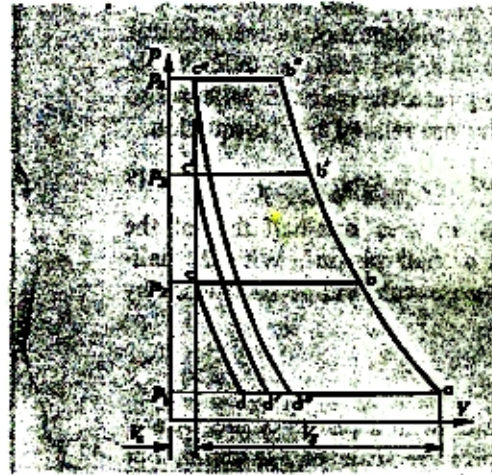
$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n}$$

نزيد درجة حراره التصريف بزيادة نسبة الضغط . اضافياً ، من المعادلة (16) ،

$$\eta_v = 1 - \frac{V_E}{V_S} \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right\} = \frac{V}{V_S}$$

يمكن ملاحظة أنه كلما زادت نسبة الضغط نقصت الكفاءة الحجمية . هذه يتم توضيحها في

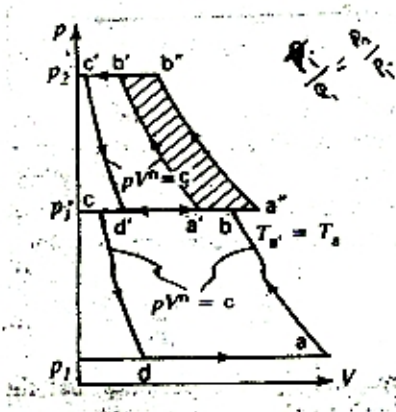
الشكل رقم (11) أدناه:



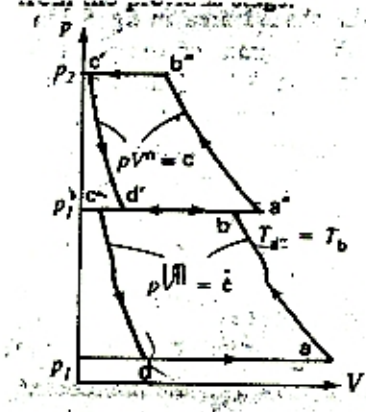
شكل رقم (11)

لإنضغاط من p_1 الى p_2 تكون الدورة abcd و F.A.D. للدورة $V_a - V_d$ ، لانضغاط من p_1 الى p_3 تكون الدورة $ah'c'd'$ و F.A.D. للدورة $V_a - V_{d'}$ ، لانضغاط من p_1 الى p_4 تكون الدورة $ah''c''d''$ ويكون F.A.D. للدورة $V_a - V_{d''}$. عليه — F.A.D. مطلوب سيزيد مقاس الاسطوانة كلما زادت نسبة الضغط .

يمكن تحسين الكفاءة الحجمية بتنفيذ الانضغاط في مرحلتين . بعد المرحلة الاولى للانضغاط يتم تمرير المائع الى اسطوانة أصغر يتم فيها انضغاط الغاز الى الضغط النهائي المطلوب . اذا كانت هنالك مرحلتان للماكينة سيتم تصريف الغاز عند نهاية المرحلة ، لكن يمكن تصريفه الى اسطوانة ثالثة لنسب ضغط أعلى . تكون أسطوانات المراحل المتعاقبة متناسبة لآخذ حجم الغاز المصروف من المرحلة السابقة .

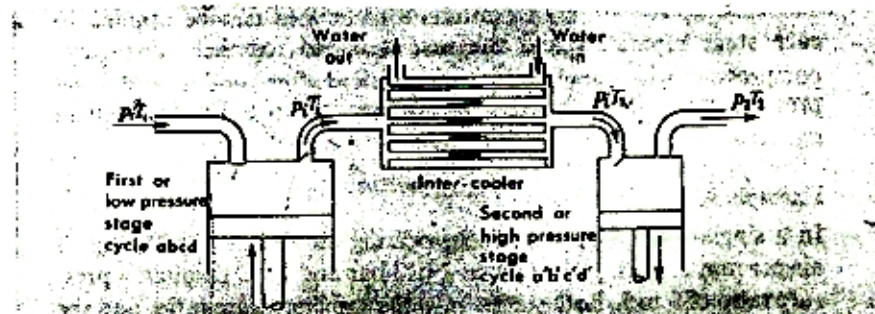


شكل (13a)



شكل (12)

شكل (13b)

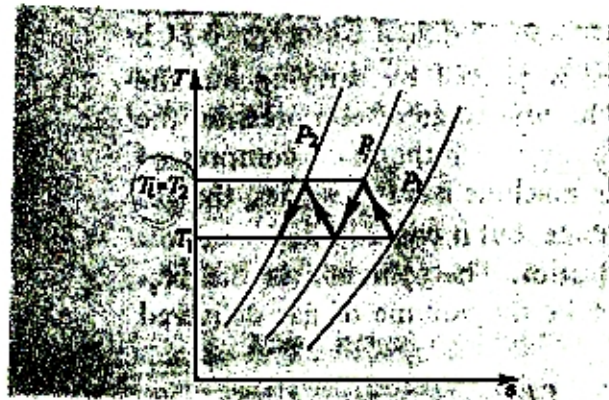


يتم توضيح مخطط البيان لماكينة ذات مرحلتين في الشكل رقم (12) . في هذا المخطط يتم افتراض أن اجراء التصريف من المرحلة الاولى أو مرحلة الضغط المنخفض و اجراء السحب للمرحلة الثانيه أو مرحلة الضغط العالي ، يكونا عند نفس الضغط . يمكن الحصول على انضغاط ثابت لدرجة حراره مثالي فقط اذا كان التبريد المثالي متصلا . هذه من الصعوبة مكان الحصول عليها اثناء الانضغاط العادي . بانضغاط متعدد المرحلة يتم تبريد الغاز كلما يتم نقله من اسطوانة الى اخرى ، بتمريره خلال مبرد بيني (intercooler). اذا كان التبريد كاملا ، سيدخل الغاز المرحلة الثانيه عند نفس درجة الحراره التي دخل بها المرحلة الاولى . يتم توضيح الشكل المتحصل عليه بالتبريد البيني بالمساحة المظلمة في الشكل رقم 13a ، ومخطط المحطة في الشكل رقم 13b . يتم توضيح مخططي البيان abcd و a'b'c'd' بضغط مشترك ، p_1 ، هذا لا يحدث في ماكينة فعليته

لان هنالك هبوط صغير في الضغط بين الاسطوانتين . يمكن تركيب مبرد بعدى (aftercooler) بعد اجراء التصريف لتبريد الغاز . تعطى درجات حرارة التصريف من المرحلتين بـ

$$T_i = T_1 \left(\frac{P_i}{P_1} \right)^{(n-1)/n}, \quad T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n}$$

على الترتيب . هذا يفترض أن الغاز يتم تبريده في المبرد البيني الى درجة حراره المدخل ، ويسمى بالتبريد الكامل . لحساب الـ i.p يمكن تطبيق المعادلات (12) و (13) لكل مرحلة بانفصال و اضافة النتائج لبعضها . يتم تمثيل الانضغاط ثنائى المرحلة بتبريد بينى كامل وتبريد بعدى ، ونسب ضغوط متساوية في كل مرحلة على مخطط T-S فى الشكل رقم (14).



الشكل (14)

مثال 6:-

في ضاغط هواء ترددي مفرد لتشغيل - ثنائى المرحلة يتم انضغاط 4.5kg من الهواء في الدقيقة من 1.013bar و 15°C خلال نسبة ضغط مقدارها 9/1 . كلا المرحلتين لها نفس نسبة الضغط ، ويكون قانون الانضغاط والتمدد في كلا المرحلتين هو $PV^{1.3} = \text{const}$. اذا كان التبريد البيني كاملا ، أحسب القدرة البيانيه والحجوم المكتسحة المطلوبة للاسطوانة . أفترض أن حجوم الخلوص لكلا المرحلتين هما 5% من حجومها المكتسحة وأن الضاغط يشتغل بسرعة مقدارها 300rev/min .

يتم توضيح مخططا البيان متراكبين فى الشكل رقم (15) . تكون دورة مرحلة الضغط

المنخفض هي abcd ودورة الضغط العالى هي a'b'c'd' الان $P_2/P_1 = 9$

$$\therefore P_2 = 9P_1$$

$$\text{ايضا } P_1/P_1 = P_2/P_2$$

$$\therefore P_2^2 = P_1 P_2 = P_1^2 9 P_1$$

$$\therefore P_2^2 = 9 P_1^2 \therefore \frac{P_2}{P_1} = \sqrt{9} = 3$$

مستخدما المعادلة التالية:-

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n}$$

$$\therefore \frac{T_2}{288} = 3^{(1.3-1)/1.3}$$

(حيث $T_1 = 15 + 273 = 288K$ و T_2 هي درجة حرارة الهواء الداخل للمبرد البيني)

$$\text{i.e. } T_2 = 288 \times 1.289 = 371K$$

الآن بما أن n ، \dot{m} ، و فرق درجة الحرارة هي نفسها لكلا المرحلتين ، بالتالي فإن الشغل

المبدول في كل مرحلة هو نفسه . i.e. ، مستخدما المعادلة (12) ،

$$\begin{aligned} \text{الشغل الكلي المطلوب في الدقيقة} &= 2 \times \frac{n}{n-1} \dot{m} R (T_2 - T_1) \\ &= 2 \times \frac{1.3}{1.3-1} \times 4.5 \times 0.287 (371 - 288) \\ &= 930 \text{ kJ/min} \end{aligned}$$

$$\therefore \text{القدرة البينائية} = \frac{930}{60} = 15.5 \text{ kW}$$

الكتلة المصروفة

يكون ~~الشغل المطلوب~~ في الدورة هي ،

$$\dot{m} = \frac{4.5}{300} = 0.015 \text{ kg/cycle}$$

يتم تمرير الكتلة خلال كل مرحلة على الترتيب .

لاسطوانة الضغط المنخفض ، بالرجوع للشكل (16) ،

$$V_a - V_d = \frac{\dot{m} R T_1}{P_1} = \frac{0.015 \times 287 \times 288}{1.013 \times 10^5} = 0.0122 \text{ m}^3 / \text{cycle}$$

مستخدما المعادلة (16)

$$\eta_v = \frac{V_a - V_d}{V_s} = 1 - \frac{V_c}{V_s} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] = 1 - 0.05 (3^{0.769} - 1)$$

$$\therefore \eta_v = 1 - 0.066 = 0.934 = \frac{V_a - V_d}{V_s}$$

$$\therefore V_s = \frac{V_a - V_d}{0.934} = \frac{0.0122}{0.934} = 0.0131 \text{ m}^3 / \text{cycle}$$

i.e. الحجم المكتسح لاسطوانة الضغط المنخفض = $0.013 / \text{m}^3$

لمرحلة الضغط العالي ، يتم سحب كتلة مقدارها 0.015kg/cycle عند 15c" وضغط مقداره

$$P_c = 3 \times 1.013 = 3.039 \text{ bar}$$

$$(V_{a'} - V_{d'}) = \frac{0.015 \times 287 \times 288}{3.039 \times 10^5} = 0.00406 \text{ m}^3 / \text{cycle}$$

مستخدما المعادلة (16) املحة الضغط العالي ،

$$\eta_v = 1 - \frac{V_c}{V_s} \left[\left(\frac{P_2}{P_c} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right]$$

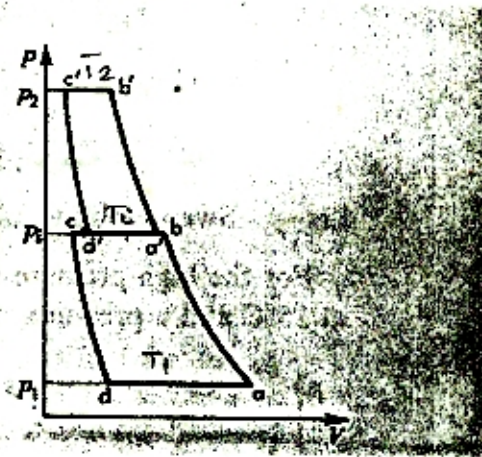
وبما أن V_c/V_s هي نفسها كما لمرحلة الضغط المنخفض وايضا $P_2/P_c = P/P$ وبالتالي η_v تكون 0.934 كما في عاليه .

$$(V_s) : \text{الحجم المكتسح لمرحلة الضغط العالي} = \frac{0.00406}{0.934} = 0.00436 \text{ m}^3$$

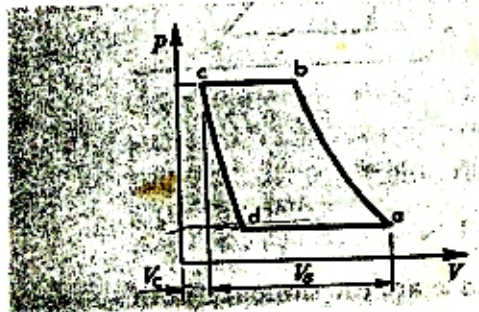
لاحظ أن نسبة الخلوص هي نفسها في كل أسطوانة ، ودرجات حراره السحب هي نفسها بما أن التبريد البيني يكون كاملاً ، عيه فان الحجم المكتسح تكون في نسبة ضغوط السحب .

$$\text{i.e. } V_{SH} = \frac{V_{SL}}{3} = \frac{0.0131}{3} = 0.00436 \text{ m}^3$$

شكل (15)



شكل (16)



حسابات في المضخات الترددية

1/ يتم لضغط هواء في مضخة ترددية أحادية المرحلة عند 1.013 bar و 15°C إلى 7 bar . أحسب القدرة البيانية المطلوبة لتصريف هواء لطيف مقداره $0.3 \text{ m}^3/\text{min}$.

عندما يكون الجهد الضغط هو :-

- (a) ثابت الضغط الحراري.
- (b) انفاكسي ثابت درجة الحرارة.
- (c) مستقيم الإنتاج ب $n=1.25$.

ثم حلت له درجة حرارة التصريف في كل حالة ؟

Ans. (1.51 kW ; 0.98 kW ; 1.19 kW ; 228°C ; 15°C ; 151°C)

2/ المضخة في المسألة (1) يشتغل بسرعة 1000 rev/min . إذا كانه المضخة أحادية التشغيل (الفعل) وله نسبة طول شوط / قطر الأعمدة مقداره $1.2/1$ ،

أحسب قطر الأعمدة المطلوبة .

Ans. (68.3 mm)

3/ مضخة هواء أحادية المرحلة ، أحادية الفعل يشتغل بسرعة 1000 rev/min

ويعصر هواء عند 25 bar . لهذا الصن يحلده أخذ حالات السحب والرياء

الطليقة ك 1.013 bar و 15°C وتصريف الرياء الطليقة ك $0.25 \text{ m}^3/\text{min}$. يلو

حجم المحرك حساب ل 3% من الحجم الممتدح ونسبة طول الشوط هو $1.2/1$ قطر الأعمدة

أحسب قطر الأعمدة وطول الشوط والكفاءة الحجمية لهذا الماكينة .

خذ أسس الضغط والشدد ك 1.3 - أحسب أيضاً القدرة البيانية وكفاءة

ثابت درجة الحرارة .

Ans. (73.2 mm ; 87.84 mm ; 67.6% ; 2 kW ; 67.5%)

4/ المضخة في المسألة (3) لديه حالات سحب فعلية مقداره 1 bar و 40°C

ويلو منظم التصريف مساو ل 25 bar - يأخذ قطر الأعمدة وطول الشوط

كما يتم حسابه في المسألة (3) ، أحسب تصريف الرياء الطليقة بالرجوع إلى

1.013 bar و 15°C والقدرة البيانية المطلوبة . ماهي قيمة الكفاءة الحجمية

التي سيتم قياسها من مخطط البيانه ؟

Ans. ($0.225 \text{ m}^3/\text{min}$; 1.97 kW ; 60.9% ; 67%)

5/ مضخة أحادية الفعل مطلية هذه تصريف هواء عند 70 bar من منظم

سحب مقداره 1 bar جمعت $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$ مقاساً عند حالات الرياء الطليقة

1.013 bar و 15°C . تلو درجة الحرارة عند نهاية شوط السحب 32°C ، أحسب

القعدة البيانية المطلوبة إذا تمّ تنفيذ الانقضاط في مرحلتين بحيث يكون متوسط مساحة
مقبريد بيني كمثل . ^{أو ادائها} يلعب أسس الانقضاط والتعدد للأمر على مساهلة 1.25
حاصل القعدة التي تمّ توفيرها في حال استخدام الانقضاط أو إحدى المرحلتين ؟
إذا كان حجم المزل من مساهلة 3% من الحجم الملتصق في كل مرحلة ، أحسب
الحجم الملتصق للأسطوانات . سرعة الصناغص مساوية لـ 750 rev/min .
إذا كانت الكفاءة الميكانيكية للصناغص 85% أحسب قدرة المخرج بال kW للمحرك
المطلوب .
Ans. (22.7 kW ; 6 kW ; 0.00396 m³ ; 0.000474 m³ ; 26.75 kW).

6/ للعتاخط في المسألة (5) أ سب الحرارة المفقودة في الدقيقة (أ) ماء التبريد لكل مرحلة، والحرارة المفقودة في الدقيقة للتبريد البيني. افترض أن 50% من قدرة التبريد في كل مرحلة يتم نقلها إلى ماء التبريد.

Ans. (325 kJ/min. & 476 kJ/min.)

4/ مناعطه صواء أحمادي (الوجه لحوانه) أحمادي الفحل بقطر مقداره 200mm ويصلح
شوط مقداره 250mm يتم وإنشاؤه بحيث يحلده تغيير خلو صده بتحويل أس الوجه لحوانه
دوميه أنه يؤثر ذلك على طول الشوط .

(هـ) أحسب تصريف المروء الطلحي عند سرعة مقادها $300 \text{ m}^3/\text{min}$ عندما يتم ضغط حجم المخلو من عند 700 cm^3 ، ويبلغ ضغط التصريف مساوياً لـ 5 bar . اختلف من أنه $n = 1.25$ ، وضغط مذبذب حرارة السحب هما 1 bar و 32°C على الترتيب . أوجد أيضاً القدرة المطلوبة باختلاف كفاءة مضخة مقادها 80% . تلويم سرالوت المروء الطلحي مساوية لـ 1.013 bar و 15°C .

(ط) إلى أي قيمة ديناميكية خضعت حجم التوربين عندما يلعب ضغط التصريف مساوٍ لـ 4.2 bar ، باختلاف تغير نفس قدرة الإطارة ، واثارة ضغط السحب السرعة ، قيمة n ، والكمية الميكانيكية تحمل ثابتة (غير متغيرة) ؟
 Ans. (1.68 m³/min. ؛ 7.2 kW ؛ 453 cm³)

8/ مناظرة صعد أحادي الوجه لمرآة ، أحادي الفضل يشتغل بسرعة 300 rev/min. يتم إدارته بمحرك كهربائي بقوة محورها 23 kW . تلمس اللبلة الميكانيكية للدارة بين الملقق والمناظرة مساوية لـ 87% . شروط التشغيل ^{أحوال} الرء هي 1.013 bar و 15°C و منسوب التصريف 8 bar . أحسب تصريف الرء الحليق بال m^3/min . الكفاءة المجهية ، وقطر وطول شط المناظرة . اختر من أ س الإرضاط

والتحليل بعد 1.3 ، وحجم الهواء يتحرك 7% من الحجم الممتلئ وحجم
الضغط يساوي طول السوط .

$$\text{Ans. } (4.47 \text{ m}^3/\text{min} ; 73\% ; 296 \text{ mm})$$

9/ مناظرة الهواء من المرحلة يتلقى من 3 أحوالاً لدرجات نفس القطر وطول
الشوط . يلقى ضغط التصريف مساو لـ 7 bar وتصريف الهواء الطليق مساو
لـ $4.2 \text{ m}^3/\text{min}$. يتم سحب الهواء عند 1.013 bar ، 15°C وصناعات حيز الهواء بيني
بحد الهواء () 38°C . يلقى أس الإزغاط للثلاث أحوالاً مساو لـ 1.3 .
يتجاهل الهواء أحسب :-

a/ الضغط العرسي .

b/ القدرة المطلوبة لإدارة المناظرة .

c/ كفاءة ثابت درجة الحرارة .

$$\text{Ans. } (2.19 \text{ bar} ; 16.3 \text{ kW} ; 84.5\%)$$

10/ مناظرة الهواء بين المرحلة يشتغل بين مدى الضغط 1 bar و 112 bar . أس
الإزغاط في كل مرحلة هو 1.28 ، درجة الحرارة عند بداية الإزغاط في كل
مرحلة هي 32°C ، ويتم إختيا - الضغط المسيلة بكل عناية بحيث يُقسم السط
بالنسبة بين المراحل . يتجاهل الهواء أحسب :-

(a) حجم تصريف الهواء الطليق لكل kWh عند 1.013 bar و 15°C .

(b) درجة حرارة التصريف من كل مرحلة .

(c) كفاءة ثابت درجة الحرارة .

$$\text{Ans. } (6.24 \text{ m}^3/\text{kWh} ; 122^\circ\text{C} ; 87.8\%)$$