

UNIVERSITÉ POLYTECHNIQUE DE LODZ
FACULTÉ: Internationale d'Ingénierie
SPÉCIALITÉ: Gestion et Technologie
II-ème année

**THERMODYNAMIQUE ET
MÉCANIQUE DES FLUIDES**

Travaux Pratiques

A l'Institut des Turbomachines

TRAVAIL PRATIQUE # 16

***VENTILATEURS RADIAUX : CARACTERISTIQUES
ET MONTAGES EN SERIE ET EN PARALLELE***

Personnes responsables du programme:
Dr ing. Jaroslaw R. Blaszcak (côté polonais)
Prof. Geneviève Comte-Bellot (côté français)

LODZ / LYON 2005

1. BUTS DU TRAVAIL

Trois buts sont recherchés à l'aide de mesures à effectuer sur le poste didactique du Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'Institut des Turbomachines:

- a) détermination pour deux ventilateurs radiaux, travaillant de façon indépendante, des caractéristiques suivantes :
 - o accroissement de pression totale fournie Δp_c
 - o puissance électrique aux bornes du moteur entraînant le ventilateur, P_{el}
 - o puissance absorbée par le ventilateur P_w
 - o rendement total du ventilateur η
 - o rendement du groupe moteur – ventilateur η_z
- b) pour deux ventilateurs identiques travaillant en série, détermination des caractéristiques aérodynamiques et électriques. Comparaison avec les prédictions théoriques.
- c) pour deux ventilateurs identiques travaillant en parallèle, détermination des caractéristiques aérodynamiques et électriques. Comparaison avec les prédictions théoriques.

2. INTRODUCTION

Les ventilateurs appartiennent au groupe des machines à rotor qui servent au refoulement et à la compression des vapeurs et des gaz, et dans lesquelles l'accroissement de la pression totale Δp_c du fluide refoulé (ou comprimé) ne dépasse pas 13 kPa (~ 1300 mm H₂O). Δp_c est la différence entre la pression totale du fluide à la sortie du ventilateur et celle à l'entrée du ventilateur.

Les ventilateurs sont utilisés aussi bien dans les grandes unités de production que dans les habitations, pour la ventilation et la climatisation. Ils sont classés selon la direction principale du flux du fluide à travers le rotor en :

- ventilateurs radiaux
- ventilateurs axiaux
- ventilateurs mixtes (machines hélico-centrifuges et hélico-centripètes)

Les schémas de ces différents types de ventilateurs sont présentés sur la figure 16.1.

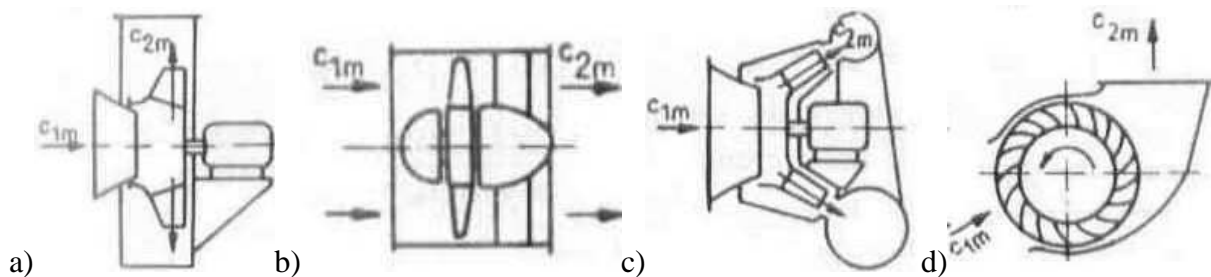


Fig.16.1. Schémas des ventilateurs

- a) radial
- b) axial
- c) et d) mixtes

3. PARAMÈTRES CARACTÉRISANT LE TRAVAIL DES VENTILATEURS

Les paramètres principaux caractérisant le travail du ventilateur sont:

- le débit \dot{V} [m³/s]
- l'accroissement de pression totale Δp_c [Pa]
- la fréquence de rotation du rotor n [Hz];
- la puissance consommée P_w [W];
- l'efficacité totale du ventilateur η ;
- les paramètres thermodynamiques du fluide traversant le ventilateur, c'est-à-dire la température statique T [K], la densité ρ [kg/m³] et l'humidité relative ϕ [%].

3.1. Débit du ventilateur

Le débit volumique du ventilateur est le volume de fluide qui passe pendant l'unité de temps à travers sa section d'entrée. Dans les ventilateurs où $\Delta p_c < 7$ kPa on suppose que le changement de température du fluide à travers le ventilateur est très petit et qu'il ne provoque pas de changement de densité. Donc on peut supposer que les débits volumiques du fluide passant par les sections d'entrée et de sortie sont les mêmes.

3.2. Accroissement de pression totale du ventilateur

L'accroissement de l'énergie transmise au fluide passant à travers le ventilateur peut être exprimé par l'accroissement de la pression totale de ce fluide, soit:

$$\Delta p_c = p_{c2} - p_{c1} = \Delta p + \Delta p_d \quad (16-1)$$

avec:

$\Delta p = p_2 - p_1$ différence entre la pression statique à la sortie du ventilateur et la pression statique à l'entrée du ventilateur,

$\Delta p_d = p_{d2} - p_{d1}$ différence entre la pression dynamique à la sortie du ventilateur et la pression dynamique à l'entrée du ventilateur.

L'énergie fournie au fluide par le rotor du ventilateur est utilisée à augmenter la pression statique du fluide, à accroître sa vitesse de v_1 à v_2 , et à vaincre les résistances à l'écoulement du fluide à travers le ventilateur.

On rappelle que la pression dynamique du fluide dans la section d'entrée et de sortie du ventilateur sont données par :

$$p_{d1} = \frac{\rho_1 v_1^2}{2}; \quad p_{d2} = \frac{\rho_2 v_2^2}{2} \quad (16-2)$$

Les notations utilisées dans la suite sont les suivantes :

$\rho_1 = \frac{p_1}{RT_1}$ densité du fluide à l'entrée du ventilateur

p_1 pression statique du fluide à l'entrée du ventilateur

R	constante des gaz parfaits
$v_1 = \frac{\dot{V}_1}{A_1}$	vitesse moyenne du fluide à l'entrée du ventilateur
$T_1 = T_{c1} - \frac{v_1^2}{2c_p}$	température statique du fluide à l'entrée du ventilateur
T_{c1}	température totale du fluide à l'entrée du ventilateur
c_p	chaleur spécifique à pression constante
\dot{V}_1	débit volumique du fluide à l'entrée du ventilateur
A_1	aire de la section d'entrée
$\rho_2 = \frac{p_2}{RT_2}$	densité du fluide à la sortie du ventilateur
p_2	pression statique du fluide à la sortie du ventilateur
$v_2 = \frac{\dot{V}_2}{A_2}$	vitesse moyenne du fluide à la sortie du ventilateur
$T_2 = T_{c2} - \frac{v_2^2}{2c_p}$	température statique du fluide à la sortie du ventilateur
T_{c2}	température totale à la sortie du ventilateur
\dot{V}_2	débit volumique du fluide à la sortie du ventilateur
A_2	aire de la section de sortie.

3.3. Puissance consommée par le ventilateur

La puissance consommée par le ventilateur P_w est égale à la puissance sur l'arbre du moteur électrique entraînant le ventilateur corrigée du rendement du moteur, soit :

$$P_w = P_{el} \cdot \eta_{el} \quad (16-3)$$

où : P_{el} est la puissance électrique sur les bornes du moteur entraînant le ventilateur, et η_{el} le rendement du moteur électrique entraînant le ventilateur.

3.4. Rendement total du ventilateur

Le rendement η du ventilateur est le quotient de la puissance effective du ventilateur P par la puissance consommée par le ventilateur P_w , soit :

$$\eta = \frac{P}{P_w} \quad (16-4)$$

La puissance effective du ventilateur est définie comme étant le produit de l'accroissement de pression totale par le débit volumique du ventilateur:

$$P = \dot{V}(L_s + \Delta p_d) \quad (16-5)$$

avec

\dot{V} débit volumique du ventilateur

Δp_d accroissement de la pression dynamique

$$L_s = \frac{\kappa}{\kappa-1} p_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \text{ travail de la compression isentropique rapporté à une unité de}$$

volume du fluide qui s'écoule

κ rapport des chaleurs spécifiques, intervenant dans les transformations isentropiques (adiabatiques)

Pour l'air ($\kappa = 1.4$) et pour $\frac{\Delta p}{p_1} < 0,07$ le travail isentropique unitaire de compression est identifié avec l'accroissement de la pression statique, donc $L_s \approx \Delta p$. La puissance effective est donc définie par:

$$P = \dot{V}(\Delta p + \Delta p_d) = \dot{V} \cdot \Delta p_c \quad (16-6)$$

La puissance consommée par le ventilateur (la puissance sur l'arbre du ventilateur) P_w est en pratique réduite du fait des pertes mécaniques par frottement dans les paliers du rotor et au joint d'étanchéité de l'arbre (P_t), et par glissement des disques tournant (P_{br}), soit en tout $P_m = P_t + P_{br}$. La puissance finalement transmise au fluide passant dans le rotor du ventilateur P_u , est donc:

$$P_u = P_w - P_m \quad (16-7)$$

Le rapport de la puissance effective P à la puissance transmise au fluide P_u est appelé l'efficacité interne du ventilateur η_i , alors:

$$\eta_i = \frac{P}{P_u} \quad (16-8)$$

Le quotient de la puissance transmise au fluide P_u par la puissance consommée par le ventilateur P_w est appelé l'efficacité mécanique du ventilateur η_m , soit:

$$\eta_m = \frac{P_u}{P_w} \quad (16-9)$$

Des équations (16-4), (16-8), et (16-9) il résulte la relation suivante:

$$\eta = \eta_i \cdot \eta_m \quad (16-10)$$

Enfin, la puissance effective du ventilateur P rapportée à la puissance électrique sur les bornes du moteur entraînant le ventilateur, fournit l'efficacité du système moteur-ventilateur, alors:

$$\eta_z = \frac{P}{P_{el}} = \eta \cdot \eta_{el} \quad (16-11)$$

3.5. Paramètres réduits du travail du ventilateur

Pour se servir plus facilement des grandeurs caractérisant le travail du ventilateur dans des conditions thermodynamiques variables du fluide à l'entrée, les paramètres réels déterminés par les mesures, selon le standard polonais PN-64/M-43001, sont calculés pour les conditions suivants:

- vitesse de rotation du ventilateur nominale \bar{n} ;
- densité du fluide $\bar{\rho}$ prise à la pression barométrique 760 mm Hg, température 20 °C et humidité relative du fluide ~50%.

Les calculs des paramètres sont faits en utilisant la similitude cinématique de l'écoulement à travers le ventilateur, entre l'état de travail réel et l'état de travail à paramètres réduits. Les valeurs calculées caractérisant le travail du ventilateur sont appelées les paramètres réduits et sont définies par les relations suivantes:

- o débit réduit du ventilateur

$$\bar{\dot{V}} = \dot{V} \frac{\bar{n}}{n} \quad (16-12)$$

- o accroissement réduit de la pression totale du ventilateur

$$\bar{\Delta p_c} = \Delta p_c \left(\frac{\bar{n}}{n} \right)^2 \frac{\bar{\rho}}{\rho} \quad (16-13)$$

- o puissance réduite consommée par le ventilateur

$$\bar{P_w} = P_w \left(\frac{\bar{n}}{n} \right)^3 \frac{\bar{\rho}}{\rho} \quad (16-14)$$

avec:

- \dot{V} débit du ventilateur mesuré
- n vitesse de rotation du ventilateur mesurée
- ρ densité du fluide mesurée

Δp_c	accroissement de la pression totale mesuré pour la vitesse de rotation n et la densité du fluide ρ
P_w	puissance consommée par le ventilateur mesurée pour la vitesse de rotation n et la densité du fluide ρ .

En prenant en compte dans la relation (16-4) l'équation (16-6) et les relations (16-12) à (16-14) on peut facilement remarquer, que l'efficacité totale du ventilateur avant et après les calculs de réduction des paramètres est la même, ce qui est en accord avec l'hypothèse prise pour l'établissement des équations des états similaires du mouvement.

4. CARACTÉRISTIQUES DU VENTILATEUR

Les caractéristiques du ventilateur sont fournies par les relations donnant l'accroissement de pression Δp_c , la puissance consommée par le ventilateur P_w , et l'efficacité totale du ventilateur η en fonction du débit du ventilateur \dot{V} , pour la fréquence de rotation du rotor n et la densité du fluide constante, soit:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta p_c = f(\dot{V}) \\ P_w = f(\dot{V}) \\ \eta = f(\dot{V}) \end{array} \right\} \quad n = \text{const}, \quad \rho = \text{const}$$

On appelle la caractéristique d'écoulement du ventilateur, la relation $\Delta p_c = f(\dot{V})$. Elle traduit la relation entre l'énergie totale unitaire (pour une unité du volume) et le rendement du ventilateur. La quantité Δp_c peut être déterminée expérimentalement pour des valeurs différentes du rendement du ventilateur et le graphe est curviligne. Cela montre la capacité du ventilateur à transmettre de l'énergie au fluide qui le traverse.

Pour différents rendements du ventilateur on peut mesurer la charge du moteur électrique entraînant le ventilateur (la puissance P_{el}). Si l'efficacité η_{el} de ce moteur est connue alors l'équation (16-3) permet de déterminer la puissance consommée par le ventilateur P_w pour les rendements différents. On obtient donc la relation $P_w = f(\dot{V})$, qui est la caractéristique de la puissance du ventilateur.

En se basant sur l'équation (16-6) pour des rendements particuliers du ventilateur on peut déterminer la puissance effective P . En connaissant la puissance consommée P_w calculée auparavant pour ces rendements du ventilateur, selon la relation (16-4), on calcule l'efficacité η pour des rendements différents, donc on obtient la relation $\eta = f(\dot{V})$, qui traduit la caractéristique de l'efficacité totale du ventilateur.

La figure 16.2 représente des exemples de caractéristiques du ventilateur. De même en se basant sur les paramètres réduits du travail du ventilateur, on peut déterminer ses caractéristiques réduites.

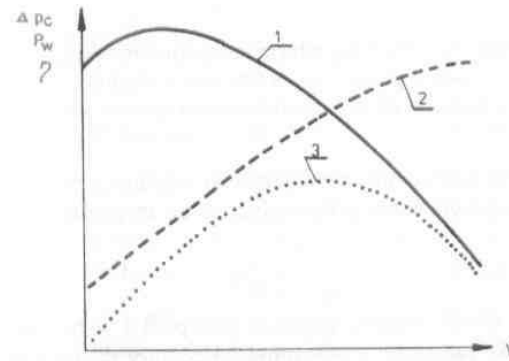


Fig. 16.2. Exemples de caractéristiques du ventilateur:
 1 – caractéristique d'écoulement, 2 – caractéristique de puissance, 3 – caractéristique d'efficacité totale

5. CARACTÉRISTIQUE DE RÉSEAU

Pour assurer l'écoulement dans un réseau donné (un système des tuyauteries) avec un débit volumique défini \dot{V} , il faut une valeur de Δp_c convenable pour:

- o vaincre la différence de pression entre l'espace dans lequel le fluide est refoulé et l'espace d'où il est aspiré, c'est-à-dire vaincre la résistance hydrostatique Δp_o ,
- o vaincre les résistances d'écoulement Δp_r .

La présentation graphique de ces relations est illustrée la Figure 16.3.

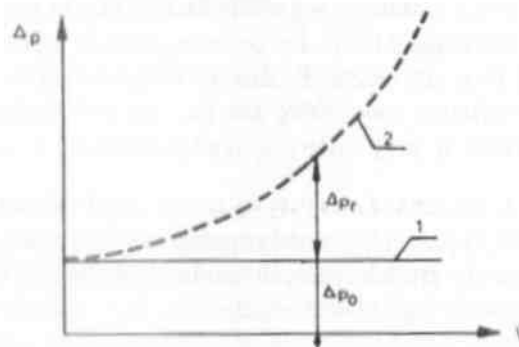


Fig. 16.3. Résistance hydrostatique et résistance d'écoulement en fonction du débit volumique:
 1- ligne de résistance hydrostatique
 2- caractéristique des résistances du réseau de tuyauterie

Dans le cas d'écoulements turbulents- ce qui est très fréquent, la résistance du réseau est approximativement proportionnelle au carré du débit volumique, alors

$$\Delta p_r \approx k \cdot v^2 \quad (16-15)$$

Le plus souvent en pratique, le gaz est aspiré du milieu ambiant et refoulé à l'extérieur. Alors la caractéristique des résistances du réseau passe par l'origine du système de coordonnées.

6. POINT DE FONCTIONNEMENT D'UN VENTILATEUR

Si on superpose la caractéristique d'écoulement du ventilateur et la caractéristique des résistances du réseau, alors le point où ils se coupent est le point de fonctionnement du ventilateur installé sur le réseau (Fig. 16.4, point 1). Il définit le débit volumique du fluide s'écoulant dans la tuyauterie avec la pression convenable total créée par le ventilateur avec un rendement maximal. En augmentant le laminage du ventilateur, par fermeture partielle de la vanne de réglage, on provoque l'augmentation des résistances du réseau, alors on obtient une autre caractéristique du réseau (Fig. 16.4, ligne pointillée). Le point de fonctionnement passe de \dot{V}_1 à \dot{V}_2 (débits) et de Δp_{c1} à Δp_{c2} (pression). Il y a simultanément un changement du rendement total du ventilateur.

Sur la figure 16.5 on a présenté les caractéristiques d'écoulement du ventilateur pour différentes fréquences de rotation du rotor $n_A < n_B < n_C$. En augmentant la fréquence de rotation du rotor on augmente le débit volumique du gaz, de V_A à V_B ou V_C . En considérant que la caractéristique des résistances du réseau reste la même, les points A, B, C, montrent les nouvelles conditions de fonctionnement du réseau avec le ventilateur en augmentant la vitesse de rotation de rotor.

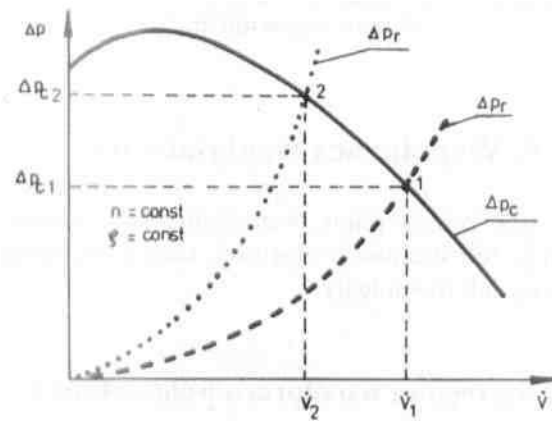


Fig. 16.4. Détermination du point de fonctionnement du ventilateur avec le réseau

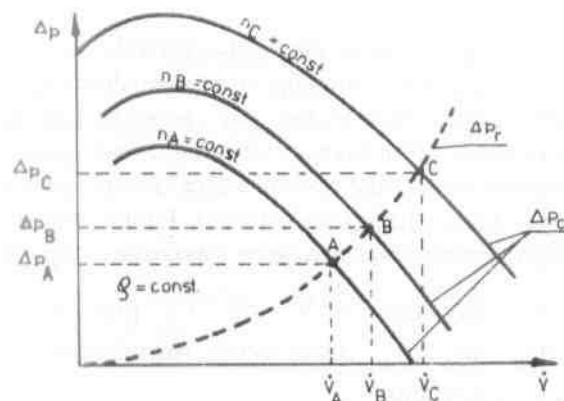


Fig. 16.5. Fonctionnement du ventilateur avec le réseau pour différentes fréquences de rotation du ventilateur

7. ASSOCIATION DE VENTILATEURS

Lorsque les ventilateurs particuliers ne garantissent pas l'accroissement de pression nécessaire, ou le débit volumique exigé, on associe des ventilateurs en série ou en parallèle.

7.1. Association des ventilateurs en série

On utilise une association en série (Fig. 16.6) lorsqu'il y a nécessité d'augmenter la pression du fluide qui s'écoule, par exemple pour vaincre les résistances d'écoulement.

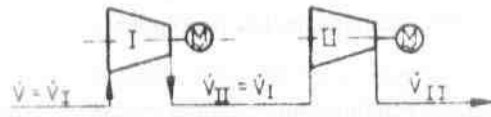


Fig. 16.6. Schéma de l'association de deux ventilateurs en série

En régime permanent, cette association se traduit par

$$\Delta p_c = \Delta p_{cI} + \Delta p_{cII} \quad \text{avec} \quad \dot{V} = \dot{V}_I = \dot{V}_{II} \quad (16-16)$$

Le fluide passe d'abord par le premier ventilateur avec le débit $\dot{V}_I = \dot{V}$ et obtient l'accroissement de pression Δp_I . Il traverse ensuite le second ventilateur avec le même débit, soit $\dot{V}_{II} = \dot{V}$, et il reçoit l'accroissement de pression Δp_{cII} .

L'intersection de la caractéristique d'écoulement du système des ventilateurs connectés en série avec la caractéristique du réseau détermine le point de fonctionnement de ce système avec le réseau, point W sur la Fig. 16.7.

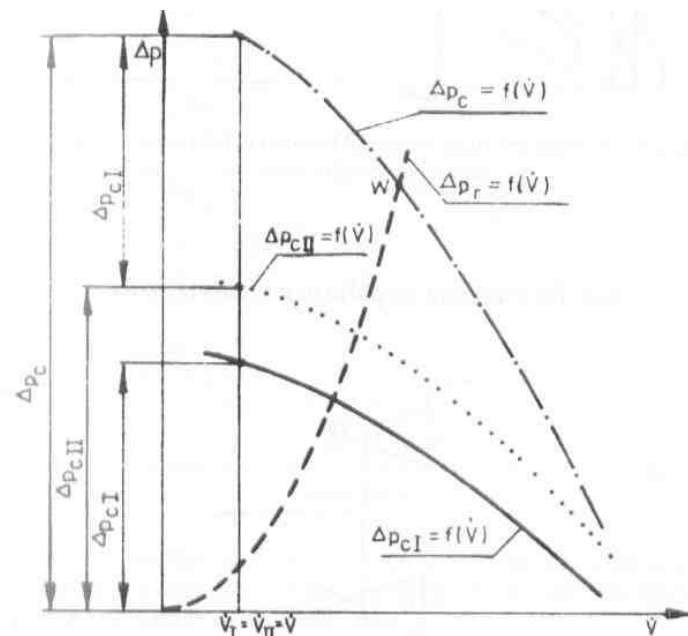


Fig. 16.7. Caractéristique d'écoulement du système des ventilateurs connectés en série

On obtient la caractéristique de la puissance électrique pour le système de deux ventilateurs travaillant en série par la sommation des puissances électriques des ventilateurs particuliers avec le rendement donné (Fig. 16.8), alors

$$P_{el} = P_{el I} + P_{el II} \quad \text{pour} \quad V_I = V_{II} = V \quad (16-17)$$

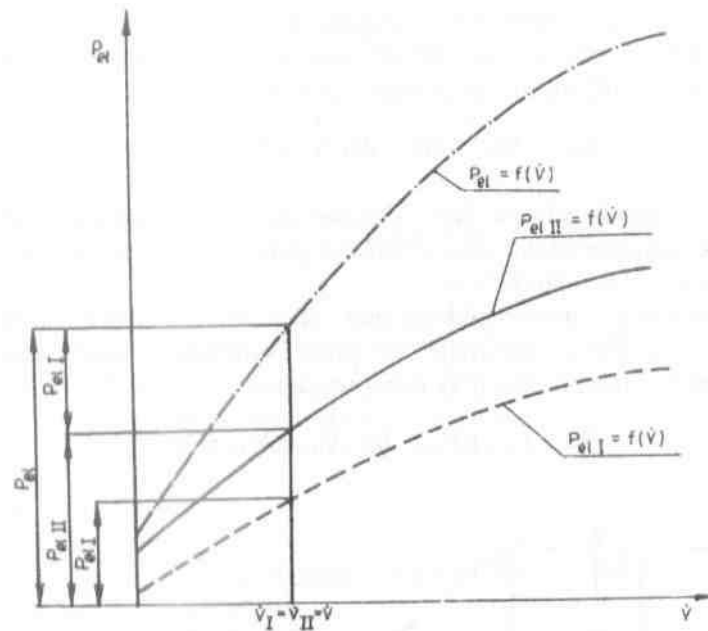


Fig. 16.8. Caractéristique de la puissance du système de deux ventilateurs en série

7.2. Association des ventilateurs en parallèle

On applique une association en parallèle (Fig. 16.9) lorsqu'il y a nécessité d'augmenter le débit qui ne peut pas être obtenu par l'augmentation de la fréquence de rotation du ventilateur.

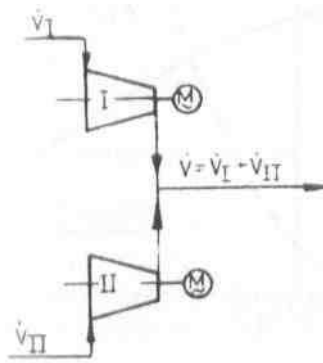


Fig. 16.9. Schéma de l'association de deux ventilateurs en parallèle

Pour l'association en parallèle le point de fonctionnement exige pour les pressions

$$\Delta p_c = \Delta p_{cI} = \Delta p_{cII} \quad (16-18)$$

et pour les débits

$$V = V_I + V_{II} \quad (16-19)$$

On obtient alors pour cette association en parallèle la caractéristique d'écoulement illustrée par la Fig. 16.10 . On observe la sommation des abscisses pour les débits de chaque ventilateur à surpression identique

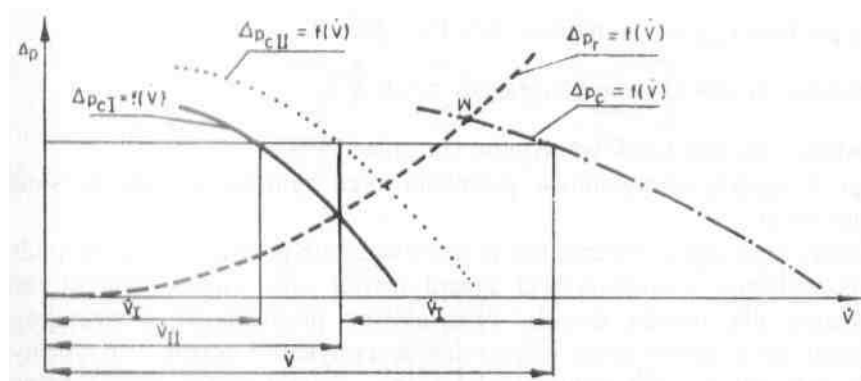


Fig. 16.10. Caractéristique d'écoulement pour deux ventilateurs en parallèle

L'intersection de la caractéristique d'écoulement du système des ventilateurs connectés en parallèle avec la caractéristique du réseau détermine le point de fonctionnement du ce système avec le réseau donné (Fig. 16.10, le point W).

On obtient la caractéristique de la puissance électrique pour le système de deux ventilateurs mis en parallèle par la sommation de la puissances électrique du premier ventilateur avec le rendement V_I et celle du second ventilateur avec le rendement V_{II} . Les débits V_I et V_{II} résultent du point de fonctionnement fixé par Δp_c , alors

$$P_{el} = P_{el I} + P_{el II} \quad \text{pour } \Delta p_{c I} = \Delta p_{c II} = \Delta p_c \quad (16-20)$$

8. SCHÉMA ET DESCRIPTION DU BANC D'ESSAIS

Le banc d'essais se compose de deux ventilateurs radiaux de type WP-12-37-16-22-70 qui alimentent un système commun de tuyauteries et les appareils de mesure. Le système de tuyauteries et de vannes fournit les possibilités suivantes:

- travail de chaque ventilateur séparément,
- association en série des deux ventilateurs,
- association en parallèle des deux ventilateurs.

Le schéma du banc d'essais est présenté sur la Fig. 16.11. Les ventilateurs aspirent l'air à la pression atmosphérique et le rejettent aussi à la pression atmosphérique. Les débits volumiques sont mesurés dans les tuyaux d'aspiration des deux ventilateurs à l'aide de jauges de mesures d'amenée 1 et 2, qui sont des collerettes ISA. Les diamètres de tous les tuyaux sont les mêmes, soit $D = 150.5 \text{ mm}$. Les chutes de pression sur les collerettes et l'accroissement de pression statique de l'air pendant l'écoulement dans les ventilateurs sont mesurés avec les manomètres liquides 15. Pour mesurer la puissance électrique prélevée par les moteurs 9 et 10, qui entraînent les ventilateurs radiaux 7 et 8, on utilise deux wattmètres dans la disposition d'Aron 11 et 12. L'ensemble est complété par le baromètre 13 et le thermomètre 14, pour mesurer les paramètres de l'air ambiant.

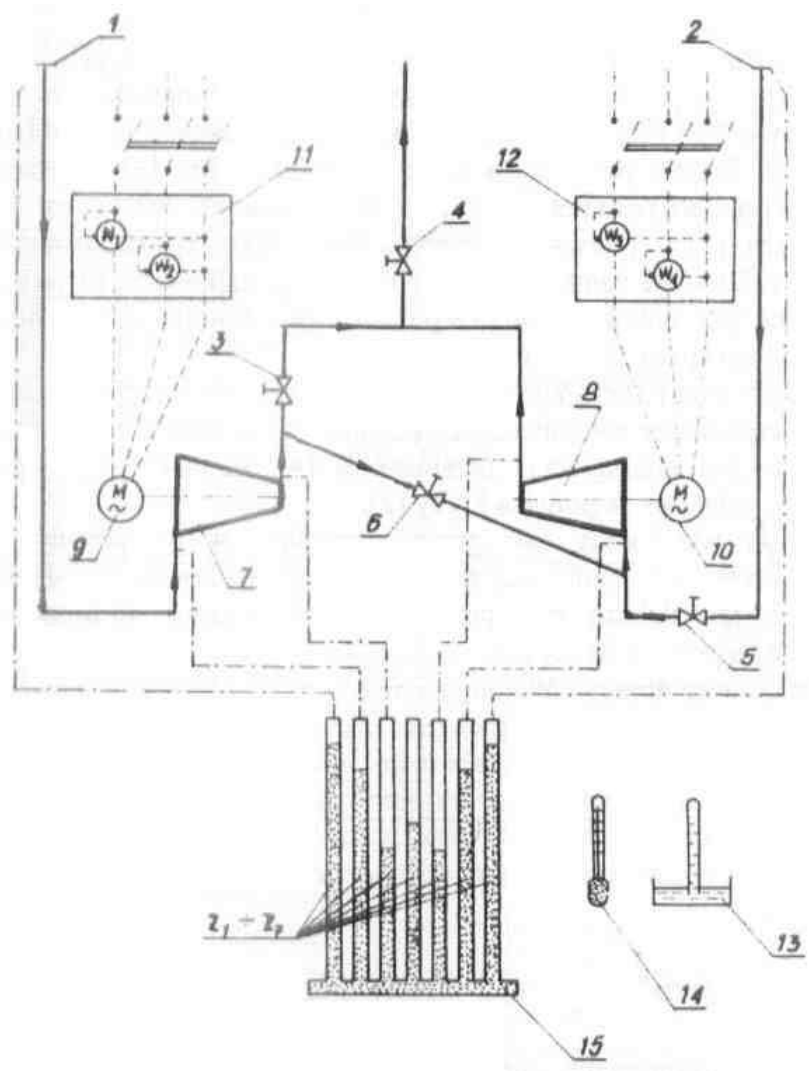


Fig. 16.11. Schéma du banc d'essais

1, 2 – collerettes d'amenée de mesures; 3, 4, 5, 6 – vannes; 7, 8 – ventilateurs radiaux;
 9, 10 – moteurs électriques entraînant les ventilateurs; 11, 12 – groupes de deux wattmètres;
 13 – baromètre; 14 – thermomètre; 15 – micromanomètre vertical à liquide;
 tuyau pneumatique d'impulsion; ----- installation électrique

Pendant le travail du seul premier ventilateur (W_I) 7 les vannes 5 et 6 restent totalement fermées, la vanne 3 est totalement ouverte, et le changement de résistance du réseau est fait avec l'aide de la vanne 4. La mesure de débit volumique est faite à l'aide de la collerette 1.

Pendant le travail du seul second ventilateur (W_{II}) 8 les vannes 3 et 6 restent totalement fermées, la vanne 5 est totalement ouverte, et le changement de résistance du réseau est fait par la vanne 4. La mesure de débit volumique est faite à l'aide de la collerette 2.

Pendant l'association des ventilateurs en série les vannes 3 et 5 restent totalement fermées, la vanne 6 est totalement ouverte, et le changement de résistance du réseau est fait par la vanne 4. La mesure du débit volumique est faite à l'aide de la collerette 1.

Pendant l'association des ventilateurs en parallèle la vanne 6 reste totalement fermée, les vannes 3 et 5 sont totalement ouvertes mais placées de façon que les augmentations de pression créées par les deux ventilateurs soient les mêmes, par contre le laminage (le changement de résistance du réseau) est fait par la vanne 4. La mesure du débit volumique de

l'air traversant les ventilateurs (W_I) 7 et 8 (W_{II}) est faite alors exactement à l'aide des collerettes 1 et 2.

9. Caractéristiques du ventilateur radial

Pour déterminer les caractéristiques du ventilateur radial il faut mettre en marche les ventilateurs W_I ou W_{II} en suivant les indications données au point 8. Ensuite, successivement pour six cas de résistance du réseau (changement fait par la vanne 4) il faut faire les mesures des grandeurs suivantes:

- l_1 (l_7) hauteur de la colonne du liquide manométrique correspondant à la pression statique après la jauge qui se trouve dans la tuyauterie d'aspiration du ventilateur W_I (W_{II}) [mm],
- l_2 (l_6) hauteur de la colonne du liquide manométrique correspondant à la pression statique à l'entrée de ventilateur W_I (W_{II}) [mm],
- l_3 (l_5) hauteur de la colonne du liquide manométrique correspondant à la pression statique à la sortie de ventilateur W_I (W_{II}) [mm],
- l_4 hauteur de la colonne du liquide manométrique correspondant à la pression atmosphérique [mm],
- i_1, i_2 (i_3, i_4) nombre de graduations sur les wattmètres correspondant à la puissance absorbée par le moteur entraînant le ventilateur W_I (W_{II}),
- t_o température ambiante [°C],
- z_b hauteur de la colonne du liquide manométrique correspondant à la pression barométrique [mm Hg].

Il faut écrire les résultats des mesures dans le tableau 16.1 pour le premier ventilateur (W_I) et dans le tableau 16.2 pour le second ventilateur (W_{II}). Il faut ensuite calculer les grandeurs suivantes:

- o débit volumique de chaque ventilateur, \dot{V}_I (\dot{V}_{II})
- o accroissement de pression de chaque ventilateur, Δp_{cI} (Δp_{cII})
- o puissance électrique aux bornes du moteur entraînant chaque ventilateur P_{elI} (P_{elII}),
- o puissance absorbée par le ventilateur P_{wI} (P_{wII})
- o rendement du groupe moteur – ventilateur η_{zI} (η_{zII}).

Les résultats sont consignés dans deux tableaux

Tableau 16.1. Résultats des mesures pour le premier ventilateur (W_1)

N°	l_1	l_2	l_3	l_4	i_1	i_2	t_0	l_b
	mm C ₂ H ₅ OH				échelons		°C	mmHg
1								
2								
3								
4								
5								
6								

Tableau 16.2. Résultats des mesures pour le second ventilateur (W_{11})

N°	l_4	l_5	l_6	l_7	i_3	i_4	t_0	l_b
	mm C ₂ H ₅ OH				échelons		°C	mmHg
1								
2								
3								
4								
5								
6								

9.1. Débit volumique de l'air

Le débit volumique de l'air passant par le ventilateur est déterminé à partir des jauges et il est défini par la relation:

$$\dot{V} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p_z}{\rho}} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (16.21)$$

avec:

$C = 0.596$

$d = 95.08 \text{ mm}$

$D = 150.5 \text{ mm}$

$\beta = d/D \approx 0.63$,

$\varepsilon = 0.99$

Δp_2

ρ

coefficient d'écoulement, constante pour $0.2 \leq \beta \leq 0.5$, $Re \geq 5 \cdot 10^4$

diamètre de la collerette,

diamètre de la tuyauterie de mesure,

pour $\beta = 0.6 \div 0.75$, $\delta C = 0.63 \%$,

nombre d'expansion,

chute de pression sur le jauge [Pa],

densité de l'air

Après calculs on peut obtenir:

$$\dot{V} = 0.00585 \sqrt{\Delta p_z} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (16.22)$$

Dans le système des mesures utilisé dans cet exercice les chutes de pression sur la collette d'arrivée du ventilateur W_I et du ventilateur W_{II} (en accord avec les notations donnés sur la fig, 3.1) sont égales:

$$\Delta p_{zI} = (\rho_m - \rho) \cdot g \frac{l_1 - l_4}{1000} = 9,81 \cdot 10^{-3} (\rho_m - \rho)(l_1 - l_4) \text{ [Pa]} \quad (16-23)$$

$$\Delta p_{zII} = (\rho_m - \rho) \cdot g \frac{l_7 - l_4}{1000} = 9,81 \cdot 10^{-3} (\rho_m - \rho)(l_7 - l_4) \text{ [Pa]} \quad (16-24)$$

où:

$\rho_m = 820 \text{ kg/m}^3$ densité du liquide du manomètre utilisé pour la mesure de la chute de pression dans la jauge (alcool C_2H_5OH [kg/m^3]),
 ρ densité de l'air atmosphérique au voisinage du poste des mesures ;
 $g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$ accélération de la pesanteur [m/s^2].

Dans le système de mesure de la pression statique de l'air en amont de la collette d'arrivée on a la pression barométrique, alors

$$p = p_b = \frac{\rho_b \cdot g \cdot z_b}{1000} = 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_b \cdot l_b \text{ [Pa]} \quad (16-25)$$

et la densité du mercure: $\rho_b = 13\,600 \text{ kg/m}^3$.

9.2. Pression totale du ventilateur

L'accroissement de la pression totale créé par le ventilateur est déterminé par l'équation (16-1). La pression statique à la sortie du ventilateur est supérieure à la pression atmosphérique, tandis qu'à l'entrée elle est inférieure à la pression atmosphérique. C'est pourquoi on détermine l'accroissement de la pression statique pour le premier ventilateur (W_I) par les relations:

$$\begin{aligned} \Delta p_I &= p_{2I} - p_{1I} = (p_b + \Delta p_{2I}) - (p_b - \Delta p_{1I}) = \Delta p_{2I} + \Delta p_{1I} = \\ &= (\rho_{cm} - \rho) \cdot g \frac{l_4 - l_3}{1000} + (\rho_{cm} - \rho) \cdot g \frac{l_2 - l_4}{1000} = \\ &= (\rho_{cm} - \rho) \cdot \frac{g}{1000} (l_2 - l_3) = 9,81 \cdot 10^{-3} (\rho_{cm} - \rho)(l_2 - l_3) \quad \text{[Pa]} \end{aligned} \quad (16-26)$$

et pour le deuxième ventilateur (W_{II}) par les relations:

$$\begin{aligned}
\Delta p_{II} &= p_{2II} - p_{1II} = (p_b + \Delta p_{2II}) - (p_b - \Delta p_{1II}) = \Delta p_{2II} + \Delta p_{1II} = \\
&= (\rho_{cm} - \rho) \cdot g \frac{l_4 - l_5}{1000} + (\rho_{cm} - \rho) \cdot g \frac{l_6 - l_4}{1000} = \\
&= (\rho_{cm} - \rho) \cdot \frac{g}{1000} (l_6 - l_5) = 9,81 \cdot 10^{-3} (\rho_{cm} - \rho) (l_6 - l_5) \quad [\text{Pa}]
\end{aligned} \tag{16-27}$$

La pression dynamique du gaz dans la section d'entrée et celle dans la section de sortie du ventilateur sont déterminées par les formules (16-2). Les différences de pressions statiques ($p_1 \approx p_2$), de températures statiques ($T_1 \approx T_2$) du gaz entre l'entrée et la sortie du ventilateur sont petites, et les paramètres ambiants ($T_1 \approx T_0$ et $p_1 \approx p_0$) ont été adoptés, donc :

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho \tag{16-28}$$

En prenant en considération dans les équations (16-2) que la vitesse moyenne déterminée par l'équation de conservation de la masse est définie par le rapport:

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{4\dot{V}}{\pi D^2} \tag{16-29}$$

on obtient la relation suivante pour l'accroissement de la pression dynamique du premier ventilateur (W_I):

$$\Delta p_{dI} = \frac{\rho}{2} (v_{2I}^2 - v_{1I}^2) = \frac{\rho}{2} \left[\left(\frac{4\dot{V}_I}{\pi D_{2I}^2} \right)^2 + \left(\frac{4\dot{V}_I}{\pi D_{1I}^2} \right)^2 \right] \tag{16-30}$$

et de même pour le second ventilateur:

$$\Delta p_{dII} = \frac{\rho}{2} (v_{2II}^2 - v_{1II}^2) = \frac{\rho}{2} \left[\left(\frac{4\dot{V}_{II}}{\pi D_{2II}^2} \right)^2 + \left(\frac{4\dot{V}_{II}}{\pi D_{1II}^2} \right)^2 \right] \tag{16-31}$$

Comme dans toute l'installation le diamètre des conduits d'air est le même ($D_{1I} = D_{2I} = D_{1II} = D_{2II}$) alors, l'accroissement de la pression dynamique est égal zéro ($\Delta p_{dI} = 0$, $\Delta p_{dII} = 0$). Il en résulte que l'accroissement de la pression totale du ventilateur correspond à l'accroissement de la pression statique, alors:

$$\Delta p_{cI} = \Delta p_I; \quad \Delta p_{cII} = \Delta p_{II} \tag{16-32}$$

9.3. Puissance électrique du moteur d'entraînement

La mesure de la puissance électrique aux bornes du moteur entraînant le ventilateur, c'est-à-dire la mesure de la puissance active prélevée du réseau, est effectuée à l'aide de deux wattmètres dans le système d'Aron. La puissance électrique du moteur entraînant le premier ventilateur est déterminée par la relation:

$$P_{eII} = k_1 \cdot i_1 + k_2 \cdot i_2 \quad [W] \quad (16-33)$$

et pour le second ventilateur par la relation:

$$P_{eIII} = k_1 \cdot i_3 + k_2 \cdot i_4 \quad [W] \quad (16-34)$$

où k_1, k_2 sont les constantes du premier et du second wattmètre [W / échelle].

La constante d'un wattmètre résulte du type de dispositif utilisé ainsi que de la gamme de mesure utilisée. Pour les wattmètres montés sur le présent banc d'essais, la gamme est 800 W, et les constantes sont égales à $k_1 = k_2 = 8 \text{ W/div.}$, alors finalement:

$$P_{eII} = 8(i_1 + i_2) \quad [W] \quad (16-35)$$

et

$$P_{eIII} = 8(i_3 + i_4) \quad [W] \quad (16-36)$$

9.4. Puissance consommée par le ventilateur

Les ventilateurs utilisés dans ce dispositif possèdent un entraînement direct. La puissance consommée par le ventilateur à cet entraînement est déterminée par l'équation (16-3). L'efficacité absolue du moteur électrique entraînant le ventilateur (η_{el}) doit être lue sur la caractéristique du moteur utilisé c'est-à-dire dans le diagramme $\eta_{el} = f(p_{el})$. Dans ce dispositif les ventilateurs sont entraînés par des moteurs de type SLf71-2A. La caractéristique de ces moteurs est présentée sur la fig. 16.12.

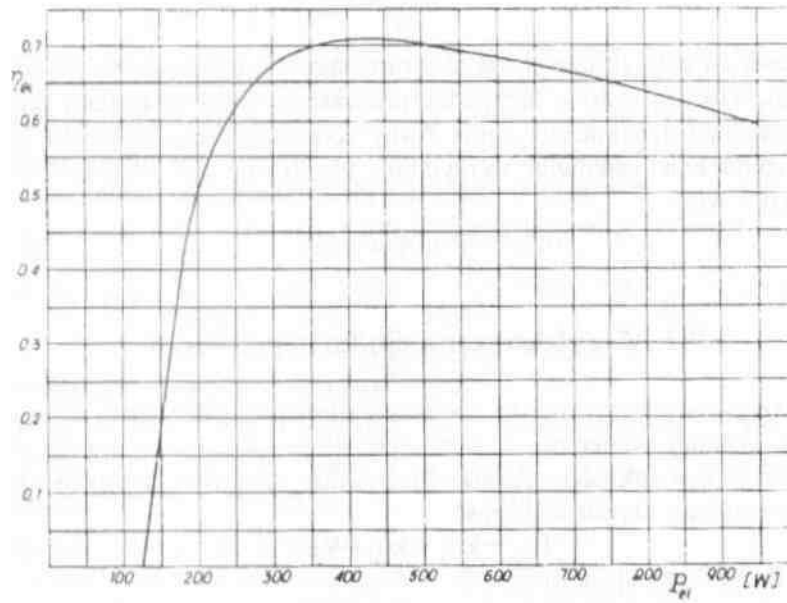


Fig. 16.12. Caractéristique du moteur électrique SLf71-2A

9.5. Efficacité totale du ventilateur

L'efficacité totale du ventilateur est déterminée par la relation (16-4). La puissance effective du ventilateur est présentée dans l'équation (16-6). Dans le cas du dispositif $\Delta p_c = \Delta p$, on peut alors écrire:

$$P = \dot{V} \cdot \Delta p \quad [W] \quad (16-37)$$

9.6. Efficacité du système moteur - ventilateur

L'efficacité du système moteur - ventilateur est déduite de l'équation (16-11) par la substitution des puissances et des efficacité convenables.

9.7. Résultats de calculs

D'après les mesures inscrites au tableau 16.1 et au tableau 16.2 il faut déterminer les grandeurs particulières définies aux points 9.1 à 9.6 pour le premier ventilateur (W_I) et pour le deuxième ventilateur (W_{II}). Les résultats des calculs doivent être reportés sur les tableaux 16.3 et 16.4. En se basant sur les résultats des calculs il faut créer sur un papier millimétré les caractéristiques pour chaque ventilateur:

$$\Delta p_c = f(\dot{V}), \quad P_{el} = f(\dot{V}), \quad P_w = f(\dot{V}), \quad \eta = f(\dot{V}) \quad \text{et} \quad \eta_z = f(\dot{V})$$

Tableau 16.3. Résultats des calculs des caractéristiques du premier ventilateur

N°	Δp_{zI}	p_I	\dot{V}_I	$\Delta p_{cI}=\Delta p_I$	$P_{el I}$	$\eta_{el I}$	$P_{w I}$	P_I	η_I	$\eta_{z I}$
	Pa	Pa	m ³ /s	Pa	W	-	W	W	-	-
	Eq. (16-23)	Eq. (16-25)	Eq. (16-22)	Eq. (16-26)	Eq. (16-35)	Fig. 16-12	Eq. (16-3)	Eq. (16-37)	Eq. (16-4)	Eq. (16-11)
1										
2										
3										
4										
5										
6										

Tableau 16.4. Résultats des calculs des caractéristiques du second ventilateur

N°	Δp_{zII}	p_{II}	\dot{V}_{II}	$\Delta p_{cII}=\Delta p_{II}$	$P_{el II}$	$\eta_{el II}$	$P_{w II}$	P_{II}	η_{II}	$\eta_{z II}$
	Pa	Pa	m ³ /s	Pa	W	-	W	W	-	-
	Eq. (16-24)	Eq. (16-25)	Eq. (16-22)	Eq. (16-27)	Eq. (16-36)	Fig. 16-12	Eq. (16-3)	Eq. (16-37)	Eq. (16-4)	Eq. (16-11)
1										
2										
3										
4										
5										
6										

10. Caractéristiques du travail des ventilateurs placés en série

Pour faire fonctionner les deux ventilateurs en série, il faut mettre en marche le dispositif conformément aux indications présentées au point 8 et mesurer les grandeurs indiquées ci-après pour six cas de résistance du réseau (réglages par la vanne 4) :

$l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, i_1, i_2, i_3, i_4, t_0$ et l_b , ces symboles se trouvent au point 9.

Les résultats de mesures doivent être placés dans le tableau 16.5. D'après ces résultats, il faut calculer les grandeurs suivantes:

- Le débit volumique du système des ventilateurs \dot{V}
- L'accroissement de pression totale du système des ventilateurs Δp_c
- La puissance électrique du système des ventilateurs (la puissance active prélevée du réseau) P_{el} .

Tableau 16.5. Résultats des mesures pour les ventilateurs placés en série

N°	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	i_1	i_2	i_3	i_4	t_0	l_b
	mm C ₂ H ₅ OH						échelons				°C	mm Hg
1												
2												
3												
4												
5												
6												

10.1. Débit volumique du montage en série des ventilateurs

Dans l'association en série de deux ventilateurs, le débit du système, \dot{V} , est déterminé par le débit volumique du premier ventilateur (\dot{W}_I).

Pour déterminer le débit volumique du premier ventilateur d'après l'équation (16-22), il faut d'abord calculer les grandeurs suivantes:

- La chute de pression sur le diaphragme d'entrée de ce ventilateur d'après l'équation (16-23),
- La pression statique absolue devant le diaphragme d'entrée d'après l'équation (16-25).

10.2. Accroissement de pression totale fournie par les deux ventilateurs en série

Pour l'association en série des deux ventilateurs, Δp_c est donnée par la relation (16-16). On déterminera Δp_c en utilisant les équations (16-32), (16-26) et (16-27).

10.3. Puissance électrique des deux ventilateurs en série

Pour l'association en série de deux ventilateurs, la puissance électrique est déterminée par l'équation (16-17). La puissance active consommée au réseau par les moteurs d'entraînement des ventilateurs particuliers qui forment le système, est déterminée par les relations (16-35) et (16-36).

10.4. Résultats des calculs pour les deux ventilateurs en série

Utilisant les résultats de mesures donnés au tableau 16.5, il faut déterminer les grandeurs définies aux points 10.1 à 10.3. Ces résultats de calculs doivent être placés dans le tableau 16.6.

Utilisant le tableau 16.6 on tracera la caractéristique de l'écoulement $\Delta p_c = f(\dot{V})$ et la caractéristique de la puissance électrique $P_{el} = f(\dot{V})$ pour le système de deux ventilateurs en séries. Sur les graphes il faut mettre aussi les caractéristiques partielles c'est-à-dire:

$$\Delta p_{cI} = f(\dot{V}_I), \quad \Delta p_{cII} = f(\dot{V}_{II}) \quad \text{ainsi que} \quad \Delta P_{elI} = f(\dot{V}_I) \quad \text{et} \quad \Delta P_{elII} = f(\dot{V}_{II})$$

Pour comparaison, il faut placer, sur les mêmes graphes, les caractéristiques du système, données ci-dessous et déterminées par la méthode de calculs ou par la méthode graphique comme les sommes des caractéristiques convenables des ventilateurs particuliers, qui ont été déterminées au point 9.

Tableau 16.6. Résultats des calculs des caractéristiques pour les ventilateurs en série

N°	Δp_{zI}	p_I	$\dot{V} = \dot{V}_I$ $= \dot{V}_{II}$	Δp_{cI} $= \Delta p_I$	Δp_{zII} $= \Delta p_{II}$	Δp_c $= \Delta p$	P_{elI}	P_{elII}	P_{el}
	Pa	Pa	m ³ /s	Pa			W		
	wg (16-23)	wg (16-25)	wg (16-22)	wg (16-26)	wg (16-27)	wg (16-16)	wg (16-35)	wg (16-36)	wg (16-17)
1									
2									
3									
4									
5									
6									

11. Caractéristiques du travail des ventilateurs placés en parallèle

En déterminant les caractéristiques du système de deux ventilateurs radiaux en parallèle, il faut faire démarrer le dispositif conformément aux indications données au chapitre 8. De l'équation (16-32) on voit qu'il convient que les accroissements de pression des deux ventilateurs soient les mêmes. D'après les équations (16-26) et (16-27) il résulte que les accroissements des pressions statiques seront pareilles et cela pour

$$l_2 - l_3 = l_6 - l_5 \quad (16-38)$$

L'analyse du système des ventilateurs en parallèle doit être menée en réalisant la relation (16-38) pour les six cas de résistance du réseau (réglage assurée par la vanne 4) et en effectuant les mesures des grandeurs suivantes:

$l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, l_7, i_1, i_2, i_3, i_4, t_0$ et l_b , ces symboles se trouvent au chapitre 9.

Les résultats de mesures doivent être reportés dans tableau 16.7. En les utilisant il faut calculer:

- Le débit volumique du système des ventilateurs \dot{V}
- L'accroissement de pression total du système des ventilateurs Δp_c
- La puissance électrique du système des ventilateurs (la puissance active consommée au réseau) P_{el} .

11.1. Débit volumique des ventilateurs placés en parallèle

Dans l'association en parallèle, l'efficacité du système est donnée par l'équation (16-19). Pour la déterminer il faut connaître les débits volumiques des deux ventilateurs (\dot{V}_I et \dot{V}_{II}).

Pour déterminer, d'après l'équation (16-22), les débits volumiques convenables, il faut d'abord calculer les grandeurs suivantes:

- la chute de la pression sur le diaphragme d'entrée du premier et du second ventilateur, en utilisant les équations (16-23) et (16-24);
- la pression statique absolue en amont des diaphragmes d'entrée du premier et du second ventilateur en utilisant la relation (16-25).

Tableau 16.7. Résultats des mesures pour les ventilateurs en parallèle

N°	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	l_7	i_1	i_2	i_3	i_4	t_0	l_b
	mm C ₂ H ₅ OH							échelons					mm Hg
1													
2													
3													
4													
5													
6													

11.2. Accroissement de pression totale assuré par les ventilateurs en parallèle

L'accroissement de pression totale du système de deux ventilateurs Δp_c associés en parallèle est donné par l'équation(16-18). Dans le présent dispositif expérimental, et d'après l'équation (16-32), l'accroissement assuré par chaque ventilateur est égal à l'accroissement de pression statique et on se reportera aux équations (16-26) et (16-27).

