

SUR LES MESURES DE LA VITESSE DE LA VEINE
DANS UNE SOUFFLERIE AÉRODYNAMIQUE
(MÉTHODE PHOTO-STROBOSCOPIQUE)

par
VSEVOLOD SISOJEV (Beograd)

1. Le principe de mesures

On photographie sur une même plaque un corps très léger, entraîné par la veine de la soufflerie aérodynamique, dans ses positions successives (les images étant obtenues par l'éclairage intermittent à l'aide d'un appareil stroboscopique à réflecteur) et on mesure le temps écoulé entre des images successives imprimées sur la photo.

2. Observations générales sur la conduite d'un corps entraîné par la veine d'une soufflerie aérodynamique

Considérons dans la veine d'une soufflerie aérodynamique de la vitesse (V) (qu'on admet constante sur la section et sur la longueur de la veine) un corps léger qui, en sortant du collecteur, a une vitesse initiale (v), différente de la vitesse de la veine.

Avec les symboles:

- S — maître couple du corps,
- C_x — coefficient de résistance,
- m — masse du corps,
- x — parcours mesuré sur l'axe de la veine,
- γ — poids spécifique du milieu de la veine,
- g — accélération de la pesanteur,
- G — poids du corps,

il est très facile de former l'équation de l'équilibre dynamique du corps dans la veine projetée sur un plan parallèle à l'axe de la veine. (Cette projection se confond du reste pratiquement avec le parcours réel, étant donné que le corps est très léger, ce qui permet de négliger la composante verticale due à la pesanteur).

On peut donc écrire

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{\gamma S C_x}{2g} (V - v)^2. \quad (1)$$

Étant donné que

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \frac{dx}{dt} = v \frac{dv}{dx}, \quad (2)$$

l'expression (1) se transforme en

$$m \frac{dv}{dx} v = \frac{\gamma S C_x}{2g} (V - v)^2,$$

d'où

$$dx = \frac{2gm}{\gamma S C_x} \frac{v}{(V - v)^2} dv = \frac{K}{C_x} \frac{v}{(V - v)^2} dv. \quad (3)$$

avec

$$K = \frac{2gm}{\gamma S} = C^{te}. \quad (4)$$

Si l'on suppose

$$C_x = C^{te} \quad \text{et} \quad V = V_0 = C^{te},$$

l'équation (3) s'intègre très facilement par la substitution

$$V_0 - v = z$$

ce qui donne

$$x = \frac{K}{C_x} \left[\ln (V_0 - v) + \frac{V}{V_0 - v} \right] + C^{te}. \quad (5)$$

On peut analyser le déplacement du corps pour les deux états initiaux comme suit:

a) Pour $t = t_0 = 0$, on a $v = v_0 = 0$ le corps se trouvant au fond du collecteur de la soufflerie dans une zone où la vitesse (V collect) est assez faible (Dans les souffleries à circuit fermé la vitesse au fond du collecteur est de l'ordre de 10 à 20% de la vitesse de la veine).

b) Pour $t = t_0 = 0$, on a $v = v_0 = V_1$ le corps ayant en ce moment une vitesse $V_1 < V_0$ et se trouvant dans la zone des grandes vitesses à la sortie du collecteur.

Pour le cas (a) calculons le parcours correspondant à une vitesse du corps définie par

$$v = \alpha V_{collect} \quad \text{avec} \quad (\alpha < 1)$$

on supposant toujours la vitesse $V_{collect} = C^{te}$.

Pour $t = t_0 = 0$, le parcours est aussi zéro et d'après l'équation (5), on aura

$$x_0 = 0 = \frac{K}{C_x} \left[\ln V_{collect} + 1 \right] + C_1 = 0 ; \quad C_1 = - \frac{K}{C_x} \left[\ln V_{collect} + 1 \right] ,$$

d'où

$$x = \frac{K}{C_x} \left[\ln \frac{V_{collect} - v}{V_{collect}} + \frac{v}{V_{collect} - v} \right] + \frac{K}{C_x} \left[\ln(1 - \alpha) + \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right] . \quad (6)$$

D'après l'expression (6) il est évident que le parcours (x) ne dépend que du quotient des vitesses $\left(\alpha = \frac{v}{V_{collect}} \right)$ qu'on désire atteindre.

Analysons un exemple. Considérons un ballon en caoutchouc très mince le diamètre étant 0,25 m environ rempli d'hydrogène.

Soient: — le poids total du ballon: $G = 1 \text{ gr} = 0,001 \text{ kg}$.

— le maître couple: $S = \frac{\pi \cdot 0,25^2}{4} \approx 0,05 \text{ m}^2$

— le poids spécifique de l'air: $\gamma = 1,225 \text{ kg/m}^3$

— le coefficient de résistance: $C_x = 0,5$ ce qui correspond à l'écoulement laminaire.

Posons qu'on cherche le parcours à la fin duquel on désire avoir la différence des vitesses:

$$V_{collect} - v = 0,01 \cdot V_{collect} = 1\% \text{ de } V_{collect}, \quad \text{soit } \alpha = 0,99.$$

Avec ces données numériques on aura:

$$K = \frac{2 m g}{\gamma S} = \frac{2 G}{\gamma S} = \frac{2 \cdot 0,001}{1,225 \cdot 0,05} \approx 0,0327 ,$$

$$\frac{K}{C_x} = \frac{0,0327}{0,5} \approx 0,065 , \quad \frac{\alpha}{1-\alpha} = \frac{0,99}{1-0,99} = 99 ,$$

$$\ln(1-\alpha) = \ln(1-0,99) = \ln 0,01 = \frac{\lg 0,01}{M} \approx -2 \cdot 2,303 = -4,606$$

$$x = (99 - 4,606) 0,065 \approx 6,12 m .$$

Il est évident que pour les parcours $< 6,12 m$ la différence des vitesses ($V_{collect} - v$) sera plus grande que le pourcentage d'un $\%$ initialement choisi.

Pour le cas (b) faisons le calcul semblable mais pour les autres constantes initiales soient:

$$t = t_0 = 0 , \quad x = x_0 = 0 , \quad V = V_1 .$$

Prenons

$$V_1 = \beta V_0 , \quad (\beta < 1)$$

$$0 = \frac{K}{C_x} \left[\ln(V_0 - V_1) + \frac{V_0}{V_0 - V_1} \right] + C_2 = \frac{K}{C_x} \left\{ \ln[V_0(1-\beta)] + \frac{1}{1-\beta} \right\} + C_2 ,$$

$$C_2 = - \frac{K}{C_x} \left\{ \ln[V_0(1-\beta)] + \frac{1}{1-\beta} \right\} ,$$

d'où

$$\begin{aligned} x &= \frac{K}{C_x} \left\{ \left[\ln(V_0 - v) + \frac{V_0}{V_0 - v} \right] - \ln \left[V_0(1-\beta) + \frac{1}{1-\beta} \right] \right\} = \\ &= \frac{K}{C_x} \left\{ \ln \left[\frac{V_0 - v}{V_0(1-\beta)} \right] + \frac{V_0}{V_0 - v} - \frac{1}{1-\beta} \right\} . \end{aligned} \quad (7)$$

Si l'on prend comme dans l'exemple (a) ($v = \alpha V_0$), l'expression (7) se transforme en

$$x = \frac{K}{C_x} \left[\ln \left(\frac{1-\alpha}{1-\beta} \right) + \frac{1}{1-\alpha} - \frac{1}{1-\beta} \right] = \frac{K}{C_x} \left[\ln \left(\frac{1-\alpha}{1-\beta} \right) + \frac{\alpha-\beta}{(1-\alpha)(1-\beta)} \right]. \quad (8)$$

Comme dans le cas précédent le parcours ne dépend que des quotients α et β .

Si l'on prend $\alpha=0,99$ et $\beta=0,2$ (ce qui correspond à une contraction de (5) dans le collecteur en supposant, pour simplifier, un brusque changement de vitesse à la sortie du collecteur) on aura

$$x = 0,065 \left[\ln \frac{0,01}{0,8} + \frac{0,79}{0,01 \cdot 0,8} \right] = 0,065 \left[-1,90309 \cdot 2,303 + \frac{0,79}{0,01 \cdot 0,8} \right] \approx 6,13 \text{ m.}$$

Le résultat est semblable à celui de l'exemple précédent; le parcours correspondant à la différence des vitesses d'un % est assez important et peut facilement dépasser la longueur libre de la veine.

En fixant $\alpha=0,97$, soit 3% de différence des vitesses on aura

$$x = 0,065 \left[\ln \frac{0,03}{0,8} + \frac{0,77}{0,03 \cdot 0,8} \right] = 0,065 \left[-1,42597 \cdot 2,303 + \frac{0,77}{0,03 \cdot 0,8} \right] \approx 1,88 \text{ m.}$$

L'examen des exemples étudiés montre qu'en mesurant la vitesse de la veine par la méthode spécifiée en (1) on aura l'approximation de l'ordre de 2-3% ce qui n'est pas suffisant pour les mesures de précision.

Pour parer à ces inconvénients on est obligé d'introduire les corrections appropriées.

3. L'évaluation des paramètres intervenant dans les corrections nécessaires à introduire dans les mesures de la vitesse réelle de la veine

Dans la résolution de l'équation (3) on a admis $(C_x = C^{te})$, $(V = C^{te})$.

En réalité (C_x) est une fonction du nombre de Reynolds, soit de la différence des vitesses $(V-v)$; la vitesse (V) variant elle aussi le long du collecteur. Les deux fonctions:

$$C_x = f_1(V-v) \quad , \quad V = f_2(x)$$

ne peuvent pas être en général exprimés analytiquement mais seulement graphiquement. De plus, même si l'on pouvait les exprimer analytiquement,

la résolution de l'équation (3) serait trop compliquée pour les calculs courants: il ne reste pratiquement que de faire l'intégration grapho-analytique en introduisant les simplifications nécessaires pour un simple calcul.

Dans ce but on peut utiliser l'équation (8) des deux façons suivantes:

soit par les mesures directes à l'aide d'un tube Pitot, soit en se servant des données analytiques du collecteur, on définit graphiquement la fonction $[V=f_2(x)]$, la précision des mesures étant de l'ordre de précision du tube Pitot (figure 1).

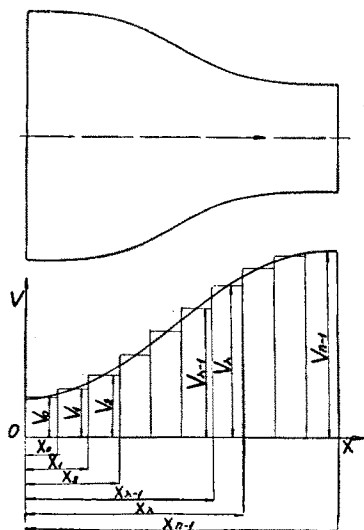


Fig. 1.

On divise ensuite la longueur du collecteur en (n) parties égales et on définit graphiquement la vitesse moyenne $(V_λ)$ correspondant à un tronçon de l'abscisse (ou bien à un parcours élémentaire) défini par $(x_λ - x_{λ-1})$ (figure 1).

En supposant toujours $(C_x = C^{te})$ on définit à l'aide de l'équation (8) la vitesse (v) à la fin du tronçon de l'abscisse (x_0) . Dans ce cas on aura:

$$\beta_0 = 0$$

$$\alpha = \alpha_0 \quad (\text{encore inconnu}).$$

Étant donné que dans l'équation (8) α ne figure pas explicitement on aura à déterminer (α) graphiquement (figure 2) en calculant pour quelques valeurs différentes de (α_{00}) , (α_{01}) , (α_{02}) , ... les valeurs de (x_{00}) , (x_{01}) , (x_{02}) , ... La valeur de α_0 est déterminée par l'intersection de la courbe $[x = \varphi(\alpha)]$ avec l'ordonnée au point d'abscisse (x_0) .

La courbe exponentielle $[x = \varphi(\alpha)]$ a une asymptote à l'ordonnée $(\alpha = 1,0)$; l'accroissement des valeurs (α) au voisinage de $(x=0)$ est très rapide ce que facilite le tracé de la courbe,

Étant donné que (C_x) varie avec la différence des vitesses $(V - v)$ il est nécessaire d'évaluer (C_x) d'une manière appropriée.

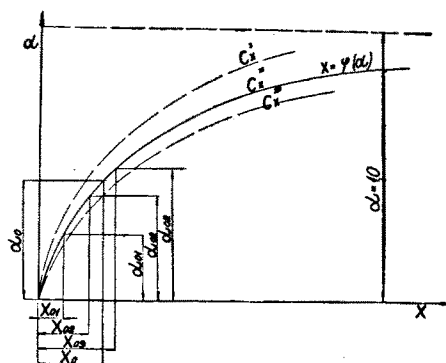


Fig. 2

Le nombre de Reynolds critique pour une sphère en bois poli ou en verre dans les conditions de l'atmosphère standard au niveau de la mer et pour le facteur de turbulence atmosphérique est à peu près: ($R_e cr = 385\ 000$).

En introduisant les valeurs de viscosité cinématique (ν) pour les conditions des mesures dans la veine donnée, on déduit facilement le maximum de vitesse à laquelle correspond encore le régime laminaire d'après l'expression

$$\frac{(V - \nu) \cdot l}{V} = \frac{R_e cr}{K_t} \quad (9)$$

où (K_t) signifie le facteur de turbulence de la soufflerie en question.

Pour les conditions de l'atmosphère standard au niveau de la mer, pour le facteur de turbulence ($K_t \approx 2$) et pour une sphère de ($D = 0,25$ m) le régime laminaire ira jusqu'à (11 m/sec) environ; de cette façon dans la plupart des souffleries on aura sur presque tout le trajet dans le collecteur le régime laminaire, soit ($C_x \approx 0,5$). (Dans la plupart des souffleries à vitesse moyenne la vitesse de l'air au fond du collecteur est de l'ordre de 10 m/sec.)

De plus, pour avoir la meilleure précision on peut faire les mesures directes des valeurs de ($R_e cr$) pour une sphère donnée (ballon en caoutchouc) et pour la soufflerie en question (en mesurant la vitesse à l'aide d'un tube Pitot).

Étant donné qu'il y a deux régimes:

- a) régime laminaire,
- b) régime turbulent,

on peut définir grosso modo:

- $C_x l$ (régime laminaire),
- $C_x t$ (régime turbulent),

auxquels correspondra toujours une certaine vitesse, soit la différence des vitesses ($V - \nu$).

Pour le premier tronçon (x_0) la vitesse de départ est nulle ($\nu = \nu_0 = 0$), c'est à dire la différence des vitesses est maximum (égale à la vitesse de l'air au fond du collecteur).

Si cette vitesse correspond au régime turbulent, on prendra pour tout le tronçon la valeur $(C_x t)$; il est très possible que vers la fin du tronçon le régime soit déjà laminaire; dans ce cas on prendra dans le 2^{ème} tronçon la valeur $(C_x l)$.

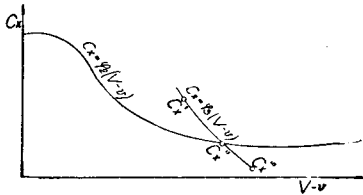


Fig. 3

Pour procéder avec plus de précision on peut tracer la courbe $[C_x = \varphi_2 (V - v)]$ (toujours à l'aide des mesures effectuées) et — sur le même diagramme (figure 3) — la courbe $[C_x = \varphi_3 (V - v)]$ calculée à l'aide de l'expression (8) (pour les différentes valeurs de (C_x) (figure 2) et pour les valeurs

moyennes de (V) et (v) pour chaque tronçon; l'intersection des deux courbes donne la valeur de (C_x) correspondant au régime.

Le calcul est à effectuer pour chaque tronçon, soit élément de parcours:

$$x_0, x_1 - x_0, \dots, x_\lambda - x_{\lambda-1}, \dots, x_{n-1} - x_{n-2}.$$

Pour le tronçon $(x_1 - x_0)$ la valeur $(\beta \neq 0)$; on la détermine de la manière suivante:

à l'entrée du tronçon $(x_1 - x_0)$ le corps a la vitesse $(v_0 = \alpha_0 V_0)$; la vitesse de l'air dans le second tronçon sera (V_1) et par conséquent

$$\beta_1 = \frac{v_0}{V_1} = \frac{V_0}{V_1} \alpha_0. \quad (10)$$

Le mode de calcul de (α_1) pour le tronçon $(x_1 - x_0)$ reste le même sauf qu'on introduit dans l'équation (8) la valeur de $(\beta_1 \neq 0)$.

On peut se demander, ce que l'on obtient en utilisant le procédé décrit étant donné que le principe même n'est pas théoriquement exact (l'intégration par tronçon avec le changement de vitesse par bonds; les mesures insuffisamment exactes à l'aide de tube Pitot etc.):

Or, en faisant les calculs on peut déterminer la grandeur $(V_v - v_v)$ (l'index v désignant les vitesses dans la veine), ce qu'on peut écrire aussi:

$$(V_v - v_v) = V \left(1 - \frac{v_v}{V_v}\right) = V_v (1 - \alpha_v) = V_v \cdot \Phi(\alpha_v). \quad (11)$$

Supposons qu'on ait commis l'erreur absolue $\Delta \Phi(\alpha_v)$. Étant donné qu'on a:

$$\Phi(\alpha_v) = (1 - \alpha_v) \quad (12)$$

on peut écrire:

$$\Delta \Phi (\alpha_v) = \Delta (1 - \alpha_v) \approx - \Delta \alpha_v ,$$

d'où

$$\Delta \alpha_v = - \frac{\Delta \Phi (\alpha_v)}{\Phi (\alpha_v)} \cdot (1 - \alpha_v) . \quad (13)$$

Cela veut dire que la valeur absolue de l'erreur en (α_v) sera égale à l'erreur relative de $\Phi (\alpha_v)$ multipliée par $[-(1 - \alpha_v)]$.

Puisque (α_v) croît très vite et diffère peu de l'unité, le multiplicateur $(1 - \alpha_v)$ sera très petit, ce qui montre que l'erreur en (α_v) , même pour les grandes erreurs relatives de $[\Phi (\alpha_v)]$, sera très petite. [Pour l'erreur relative de $\Phi (\alpha_v)$ de $10^0/0$, par exemple, et pour $(\alpha_v = 0,97)$ on aura $(\Delta \alpha \approx - 0,003)$ soit $(\Delta \alpha / \alpha \approx 0,31^0/0)$. C'est-à-dire que l'erreur relative de vitesse $(V_v) = \left(\frac{v \text{ mesuré}}{\alpha_v} \right)$ sera du même ordre.

Par la méthode décrite on détermine (α_0) , $(\alpha_1) \dots (\alpha_\lambda) \dots$, (α_{n-1}) soit (β_2) , $(\beta_v) \dots$, $(\beta_\lambda) \dots$, (β_{n-1}) et enfin:

$$\beta_n = \beta_v = \frac{V_{n-1}}{V_v} \cdot \alpha_{n-1} , \quad (14)$$

où l'index (v) désigne le coefficient (β) relatif à la sortie du collecteur.

Dans les souffleries actuelles le gradient de vitesse de la veine sur l'axe est sensiblement voisin de zéro, soit $(V_v \approx C^{te})$ sur toute la longueur de la veine de l'expérimentation; d'après cela c'est le cas où l'expression (8) devient exacte.

Reste encore à voir quelle influence peut avoir l'erreur éventuelle en (β_v) sur la correction définitive (α_v) .

En prenant l'expression (8) pour une distance déterminée, on peut étudier les variations de (α) en fonction de (β) .

En écrivant

$$\ln \frac{1 - \alpha}{1 - \beta} + \frac{1}{1 - \alpha} - \frac{1}{1 - \beta} = C^{te}$$

et en dérivant on aura

$$\frac{\alpha}{(1 - \alpha)^2} d\alpha - \frac{\beta}{(1 - \beta)^2} d\beta = 0 ,$$

d'où, en remplaçant les infiniment petits par les petites grandeurs finies, on aura

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha} = \frac{\Delta \beta}{\beta} \cdot \frac{\beta^2}{\alpha^2} \cdot \frac{(1 - \alpha)^2}{(1 - \beta)^2} . \quad (15)$$

Puisque on a ($\beta < \alpha < 1$) et [$(1 - \alpha) \ll (1 - \beta)$] l'erreur relative en (α) sera peu influencée par l'erreur relative en (β); pratiquement cette erreur n'atteint que quelques % seulement de l'erreur relative en (β).

Pour fixer à peu près les limites des erreurs on peut prendre à la place des vitesses moyennes sur les parcours élémentaires ($x_{\lambda} - x_{\lambda-1}$) — celles au commencement — pour une série des calculs — et les vitesses au bout des parcours correspondants — pour une autre série des calculs. On aura ainsi les deux limites entre lesquelles se trouve la valeur de (α_v) précédemment calculée, — d'où la possibilité d'évaluer la grandeur de l'erreur possible. Pratiquement l'ordre de grandeur de l'erreur due à l'introduction des corrections sera de 0,25% au maximum.

4. Le principe des mesures de la vitesse d'un corps entraîné par la veine de soufflerie à l'aide de la méthode photo-stroboscopique

On photographie sur une plaque à l'aide d'un appareil photographique ordinaire avec l'obturateur ouvert le corps (le ballon) pendant son passage entre la sortie du collecteur et l'entrée du diffuseur dans les positions successives 1-2-3-4... l'éclairage étant assuré par les étincelles d'un réflecteur stroboscopique à cadence bien déterminée (t_1), (t_2), ...

Ainsi on détermine les vitesses du corps (ballon) sur les parcours élémentaires (x_1), (x_2), ... par (figure 4):

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{x_1}{t_1} , & v_2 &= \frac{x_2}{t_2} , \\ v_3 &= \frac{x_3}{t_3} . \end{aligned} \quad (16)$$

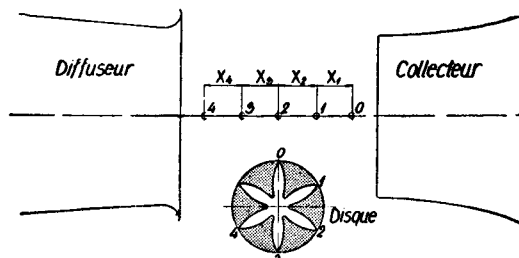


Fig. 4

Les mesures exactes des temps élémentaires (t_1), (t_2)... se font à l'aide d'un disque noir sur lequel se trouve un index peint en blanc, photographié sur la même plaque que le corps.

Le disque, entraîné par un moteur électrique à une vitesse appropriée, est d'une part synchronisé avec l'appareil stroboscopique et d'autre part branché sur un chronographe de précision, contrôlé par le chronomètre.

De cette façon, étant donné que la vitesse angulaire du disque est mesurée par le chronographe, les images successives de l'index sur la plaque définissent exactement le temps écoulé entre les 2 étincelles successives du stroboscope, même s'il y a une irrégularité éventuelle des étincelles due à l'interrupteur du stroboscope ou à son dispositif électrique.

La vitesse de rotation du disque dépend de la longueur de la veine et de la vitesse du corps, puisque il faut éviter la superposition des images de l'index sur la plaque; cela implique que le disque fasse 1 tour au maximum pendant le trajet du corps, ce qui conduit à

$$n_{\text{disque}} \leq \frac{v_v}{X_v} . \quad (17)$$

(X_v) étant la longueur totale de la veine. Le nombre d'étincelles par seconde doit être déterminé de la manière à éviter les superpositions des images successives du corps, ce qui conduit à:

$$z \leq \frac{X_v}{D} . \quad (18)$$

(z) étant le nombre des étincelles par seconde et (D) le diamètre du corps (ballon).

Pratiquement on obtient le nombre des étincelles voulu, convenant à la vitesse et la veine de la soufflerie en question, en fixant sur l'axe du moteur, entraînant le disque, un interrupteur à (z) lamelle (type collecteur).

Avec la diminution de la vitesse du moteur la fréquence des étincelles diminue elle aussi de sorte, que pour une nouvelle vitesse du moteur, calculée à l'aide de l'expression (17), correspondant à une autre vitesse (v) du corps, la distribution des images sur la plaque ne change que peu; la différence sera mesurée par le chronographe, les éléments du temps étant plus longs.

En faisant les calculs avec les éléments mesurés, sur la plaque il faut tenir compte de ce que la plaque est impressionnée par la projection centrale, ce qui exige certaines corrections trigonométriques.

Pour simplifier les calculs il suffit, après les mesures stroboscopiques, de faire une photo (sur la même plaque toujours) d'un réseau composé des fils verticaux équidistants passant par la trajectoire du corps, les distances entre les fils étant exactement connues. De cette manière on obtient directement sur la plaque photographique une échelle des longueurs. Or il faut encore éliminer l'erreur due à la parallaxe. En consultant la figure 5 et en utilisant les symboles de celle-ci, on aura à apporter les corrections suivantes:

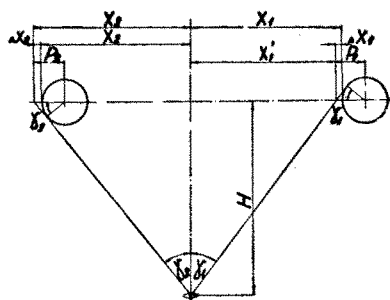


Fig. 5

$$\Delta x_1 = P_1 - r = r \left(\frac{1}{\cos \gamma_1} - 1 \right),$$

$$\Delta x_2 = P_2 - r = r \left(\frac{1}{\cos \gamma_2} - 1 \right),$$

ce qui donne pour les longueurs réelles

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_1' + \Delta x_1 = x_1' + r \left(\frac{1}{\cos \gamma_1} - 1 \right), \\ x_2 &= x_2' + \Delta x_2 = x_2' + r \left(\frac{1}{\cos \gamma_2} - 1 \right), \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

(x_1') et (x_2') étant les longueurs mesurées sur la plaque.

Puisque les angles (γ_1) et (γ_2) se déterminent facilement à l'aide de l'échelle des images sur la plaque (m) à l'aide des expressions

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg}(\gamma_1) &= \frac{x_1'}{H}, \\ \operatorname{tg}(\gamma_2) &= \frac{x_2'}{H}, \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

les corrections sont faciles à calculer.

L' échelle de l' image photographique est

$$m = \frac{b}{B} = \frac{h}{H}$$

qui donne avec $\left(h = \frac{f \cdot H}{H - f} \right)$

$$m = \frac{h}{H} = \frac{f}{H - f} \quad (21)$$

où (f, H) sont: (f) — la distance focale mesurée du centre optique de l'objectif photographique, (H) — la distance de l'objet du centre optique.

NB. La distance focale (f) gravée sur la monture de l'objectif étant indiquée toujours en chiffres ronds, il est nécessaire de faire les mesures de la distance focale exacte en choisissant une méthode convenable.

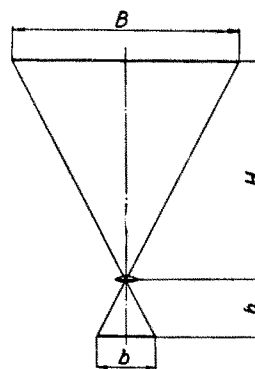


Fig. 6

5. La précision des mesures par la méthode décrite en 4

Il y a deux sources d'erreurs dans la méthode, à savoir:

- a) inexactitudes des observations et des mesures des longueurs sur la plaque photographique;
- b) inexactitudes des mesures du temps.

Les erreurs provenant de la sources (a).

À l'aide d'un appareil photographique d'un format moyen ou grand on peut arriver, suivant les dimensions de la veine, à des échelles de l'ordre de $\left(\frac{1}{10} \right)$.

Étant donné que pour les objectifs de bonne qualité le diamètre du cercle de dispersion est de $\frac{1}{25} \div \frac{1}{30}$ mm, on arrive (toujours pour une échelle de $\frac{1}{10}$ environ) à des erreurs de mesures des longueurs de $\frac{1}{2,5} \div \frac{1}{3,0}$ mm; pour les positions du corps (ballon) espacées au moins de 250 mm (c'est à dire le diamètre du ballon, soit l'espacement sans

superposition des images) cela donne la précision des mesures de l'ordre de $\left(\frac{1}{2,5} \div \frac{1}{3,0}\right) : 250 \approx 0,16 \div 0,13\%$.

L'inexactitude de lectures des arcs sur le disque est du même ordre de grandeur que celui des portions du trajet du ballon, soit $0,16 \div 0,13\%$, si le périmètre du disque est de la même longueur environ que celle du trajet total du corps.

Les erreurs provenant des sources (b).

Celles-ci sont dues aux deux facteurs suivants:

— Inexactitude des lectures de longueurs sur la bande du chronographe.

— Inexactitude du chronomètre contrôlant le chronographe.

L'inexactitude des lectures de la bande du chronographe dépend du système de l'appareil et de la vitesse de la bande. Dans les appareils à commande électromagnétique et à la vitesse de déroulement de la bande de l'ordre de 20 mm/sec, pour le régime du moteur bien stabilisé on arrive à la précision des lectures de l'ordre de 0,02%.

L'erreur du chronomètre, à une marche diurne l'erreur de l'ordre de 1 sec., donne une erreur relative de $\frac{1.100}{24.3600} \approx 0,0012\%$, donc négligeable.

Dans le cas le plus défavorable lorsque toutes les erreurs calculées s'additionnent, l'erreur maximum possible se monte à

$$2 (0,16 \div 0,13) + (0,02) = 0,34 \div 0,28\% .$$

C'est à dire l'erreur maximum possible dans les mesures de la vitesse (v_v) du corps entraîné par la veine sera en chiffres ronds de l'ordre de (0,3%).

En nous reportant au paragraphe 3 où on a évalué l'erreur maximum en chiffres rond à (0,25%), on arrive finalement à la conclusion que l'erreur totale maximum due à la méthode des mesures proposée (méthode photostroboscopique) sera de l'ordre de (0,3 + 0,25 = 0,55%).

6. Les appareils de mesures

Les appareils d'utilisation générale:

1) Un appareil stroboscopique à réflecteur à une durée de l'étincelle de l'ordre de 10 μ sec (cette durée de l'étincelle est suffisamment courte

pour qu'à la vitesse du corps de l'ordre de 50 m/sec la netteté des contours de l'image sur la plaque soit à l'intérieur de cercle de dispersion) et à des fréquences allant jusqu'à 300 + 500 Herz.

2) Un chronographe à bande à commandes électromagnétiques capable d'enregistrer les signaux à la fréquence allant jusqu'à 15 Herz.

3) Un chronomètre de marine à contacts électriques.

4) Un appareil photographique d'un format correspondant à des dimensions de la veine.

Les appareils spéciaux:

1) Un disque de contrôle noir à l'index blanche entraîné par le moteur électrique à vitesse réglable allant jusqu'à 5000 t/min, muni d'un stabilisateur de tension.

2) Un dispositif de synchronisation.

3) Un dispositif de lancement du ballon.

Le fonctionnement du disque est décrit plus haut; en même temps fut soulignée la nécessité de synchronisation du disque et du stroboscope.

La synchronisation est assurée par le dispositif donné sur le schéma (figure 7).

Le rôle du dispositif de synchronisation est:

— d'assurer le synchronisme entre le stroboscope et le disque ainsi que l'enregistrement du temps à l'aide du chronographe.

— d'assurer le déclenchement du fonctionnement du stroboscope au moment précis du passage du corps (ballon) par l'orifice du collecteur et le stoppage du stroboscope au moment lorsque le disque achève le tour complet (pour éviter les superpositions des images de l'index).

Puisque la durée du passage du corps est très courte (de l'ordre de quelques centièmes de seconde) on a prévu un déclenchement automatique étant donné que les reflexes humains sont trop lents.

Le fonctionnement du dispositif (envisagé pour les vitesses du corps de l'ordre de 60 m/sec et pour la longueur de la veine de l'ordre de 2 m) est le suivant.

Sur l'axe (O_1) qui est directement lié au moteur tourne-disque, se trouve un anneau à contacts (K_1) type collecteur à 6 secteurs et à 2 balais pouvant rétablir ou couper le circuit 6 fois par tour; sur le même axe se trouvent une roue d'engrenage (Z_1) et une vis sans fin (Z_2).

À l'aide de l'engrenage (Z_1) et (Z_2) l'axe (O_2) tourne à la vitesse égale à 1/4 de la vitesse de (O_1).

Sur l'axe (O_2) est fixé un anneau à contacts type collecteur (K_2) à un seul secteur d'un quart du périmètre et à 2 balais; à l'aide de ce dispo-

sitif le chronographe (*CH*) reçoit (par les connexions (8)) des impulsions à la fréquence d'un quart de la vitesse du moteur. L'abaissement de fréquence des impulsions de chronographe est nécessaire à cause de l'inertie des électro-aimants et pour faciliter les dépouillements des diagrammes).

La vis sans fin (Z_3) est engrenée à la roue (Z_4) solidaire de l'axe (O_3) qui tourne à une vitesse 30 fois plus faible que la vitesse de (O_1); de cette façon la vitesse de (O_3) qui dépend de la vitesse du moteur est de l'ordre de $1 \div 2$ t/sec.

Sur l'axe (O_3) sont fixés les trois disques de contacts (K_3), (K_4) et (K_5) du même type que (K_1).

Le disque de contact (K_3) a un seul secteur d'un trentième de périmètre; les balais de ce disque sont branchés en série avec ceux du disque (K_1) à l'aide des contacts (3) du relais (R_2) et avec le dispositif de déclenchement du stroboscope (*S*).

De cette façon, si les contacts (3) du relais (R_2) sont fermés le stroboscope donne 6 étincelles lorsque le disque (K_3) ferme le circuit.

Étant donné que le secteur sur le (K_3) est de $1/30$ de la circonférence et que l'axe (O_3) tourne 30 fois moins vite que l'axe (O_1), le stroboscope produira périodiquement les 6 étincelles à la fréquence 6 fois plus grande que la vitesse du moteur; la cadence des étincelles périodique correspondra à la vitesse de rotation de l'axe (O_3).

Puisque il s'écoule un certain temps entre le lancement du ballon, placé au fond du collecteur, et son apparition à la sortie du collecteur, le démarrage du stroboscope doit avoir lieu quelques instants après le lancement. Ce retard est assuré par les deux disques de contact (K_4) et (K_5) et les 3 relais (R_1), (R_2) et (R_3).

Le dispositif de lancement (*V*) est constitué par un fil métallique mince en forme de boucle à laquelle est fixé le ballon (par une ficelle). Au moment du passage du courant électrique d'intensité suffisante par le fil mince celui-ci saute et libère le ballon.

La boucle (*V*) est reliée à la source du courant continu par la bobine de relais (R_3), dont l'intensité ne suffit pas à griller le fil grâce à la résistance de la bobine convenablement choisie.

Le relais (R_3) étant ainsi fermé, les contacts (6) ferment le circuit de sorte que si le relais (R_1) aussi est fermé au moment de rencontre du secteur du disque (R_1) du balais correspondant, le contact est établi avec le relais (R_2).

Au moment précis de la fermeture du relais (R_2), les contacts (4) court-circuitent la bobine du relais (R_3), la boucle (*V*) saute et le ballon

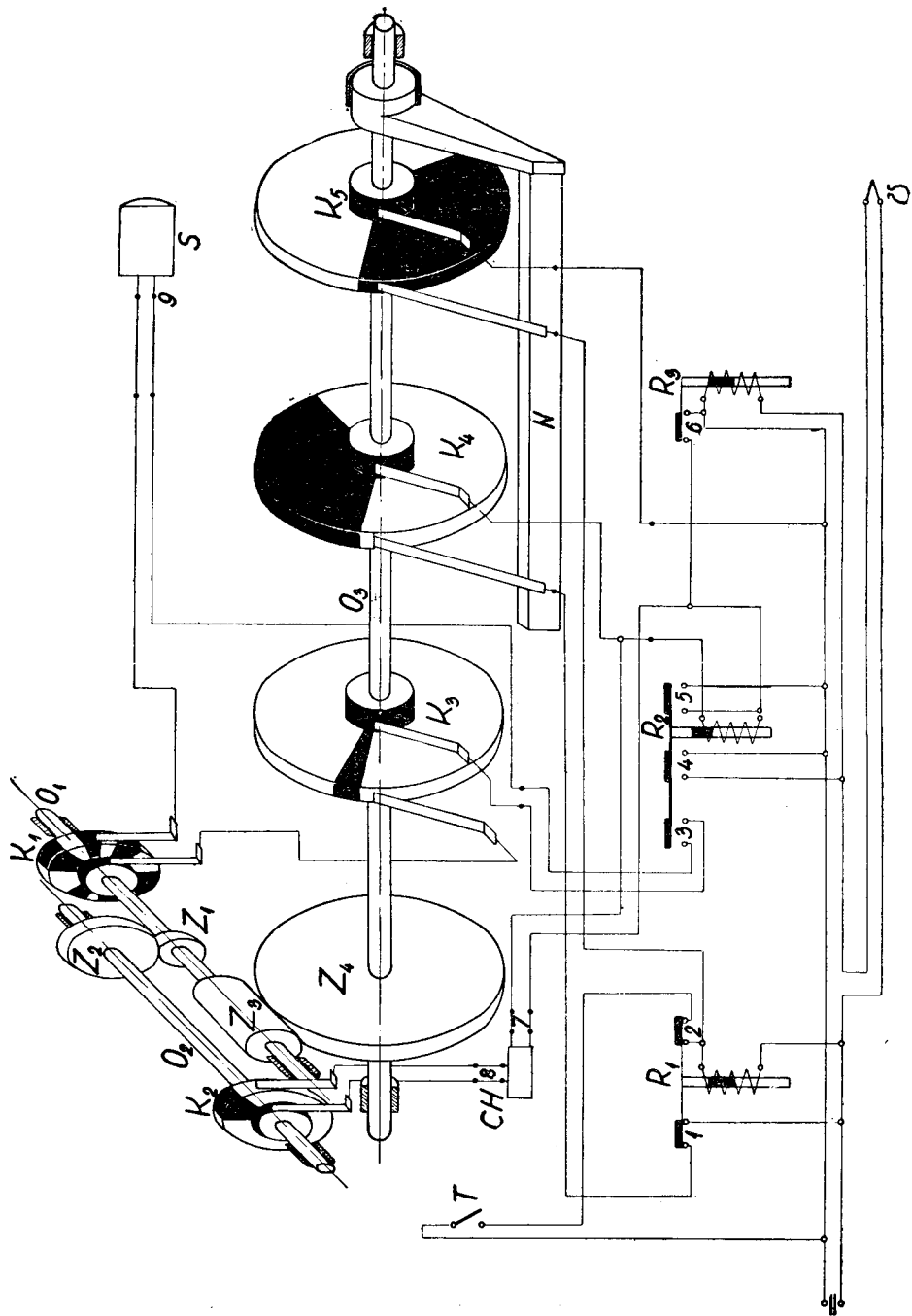


Fig. 7

est lancé. Le relais (R_2) reste fermé (à l'aide de contacts (5)), si le relais (R_1) aussi est fermé, jusqu'à la coupure du contact sur le disque (K_4).

Au moment de la fermeture du relais (R_2) les contacts (3) sont court-circuités et le stroboscope démarre lorsque le secteur du disque (K_3) touche le balai.

Puisque la fermeture du relais (R_2) s'établit au moment de court-circuitage au disque (K_4), ce qui correspond au lancement du ballon, il est possible de régler le moment de démarrage du stroboscope en décalant le balai de (K_4) à l'aide d'un support (N), rotatif autour de l'axe (O_3).

Le disque (K_5) assure l'impossibilité de fermeture du relais (R_2) pendant que le disque (R_4) reste court-circuité (dans le cas contraire le retard nécessaire dans le démarrage du stroboscope pourrait être altéré).

Le secteur du disque (K_5) est de $1/3$ de circonférence de façon qu'en tournant il provoque les fermetures périodiques du relais (R_1) qui durent pendant $1/3$ du tour de l'axe (O_3). Le secteur sur le disque (K_4) est lui aussi de $1/3$ de circonférence; le décalage des secteurs sur (K_4) et (K_5) assure que le relais (R_1) ne peut pas être fermé par le (K_5) tant que le balai du disque (K_4) touche le secteur.

Si on appuie sur le bouton de commande (T) pendant le contact avec (K_5), le relais (K_1) se ferme immédiatement et reste fermé jusqu'on appuie le bouton (à cause du court-circuitage des contacts (2)). Au contraire, s'il n'y a pas de contact sur (K_5) le relais (R_1) ne se ferme qu'au moment où s'établit le contact sur (K_5).

Lorsque le disque (K_4) coupe le circuit, c'est à dire lorsque le stroboscope a produit les 6 étincelles commandés par les disques (K_1) et (K_3), le relais (R_2) s'ouvre; la refermeture du circuit par le disque (K_4) ne peut plus attirer le relais (R_2) même si le relais (R_1) est fermé puisque la boucle (V) est grillée, le relais (R_3) reste ouvert et les contacts (6) ne sont pas court-circuités.

Le balai du disque (K_5) est fixé lui aussi sur le support (N) de façon que pendant le réglage du retard stroboscopique le décalage entre (K_4) et (K_5) reste constant.

La bobine du relais (R_2) est connectée au mécanisme enregistreur du chronographe pour qu'on puisse voir sur la bande le moment des mesures.

Ainsi, si le bouton (T) reste appuyé pendant un tour entier de l'axe (O_3), soit pendant le temps de l'ordre d'une seconde, le dispositif décrit exclut toute possibilité d'une fausse manœuvre.