ÉTUDE SUR LES MODÈLES AÉRODYNAMIQUES DE LA SÉDIMENTATION DES DÉBITS SOLIDES EN SUSPENSION DANS LES RETENUES

PAR
J. KOMORA *
ET
J. SUMBAL *

Introduction.

En construisant les retenues, on doit s'occuper de la question de la sédimentation des débits solides en suspension. Plusieurs méthodes de calcul rendent possible le calcul de la quantité des suspensions qui sédimentent dans la retenue. Pour simplifier les calculs, il se montre nécessaire d'introduire une schématisation du phénomène, de même que certaines hypothèses. Par les méthodes de calcul, il est possible de repérer l'écoulement spatial et par là les lieux de sédimentation des débits solides en suspension dans la retenue. On peut étudier sur les modèles réduits cet écoulement spatial dans les retenues. En même temps, on a cherché la possibilité d'étudier sur les modèles réduits la sédimentation des suspensions.

L'étude de la sédimentation des débits solides en suspension, sur les modèles hydrauliques à surface libre, recèle de grandes difficultés. On ne peut pas, sur un modèle distordu, réaliser les conditions de similitude de la rugosité du fond ainsi que la similitude des lignes de courant et simultanément les conditions de similitude du mouvement des sus-

pensions. Pour cette raison, il est nécessaire d'opérer sur des modèles non distordus à très grandes échelles. La construction et l'usage de modèles pareils exigent des dépenses considérables et la recherche est de longue durée. Le dosage des suspensions salit l'eau du laboratoire. Dans ces conditions, on doit pourvoir un modèle d'un système de circuit fermé indépendant avec un bassin de sédimentation.

On peut résoudre ces problèmes d'une façon beaucoup plus simple sur les modèles où l'écoulement du plan d'eau libre peut être modelé comme un écoulement sous pression. Dans ces conditions, il est avantageux d'utiliser des modèles aérodynamiques où fonctionne, comme milieu d'écoulement, l'air au lieu de l'eau.

Conditions de la similitude mécanique

Sur les modèles aérodynamiques, on remplace l'écoulement à surface libre par un écoulement en charge. On néglige, dans ce cas, le critère de similitude de Froude; c'est pourquoi l'échelle des débits n'est pas décisive. Du point de vue de la similitude de l'écoulement, il suffit d'obtenir que les phénomènes examinés soient dans la région homologue des nombres de Reynolds. L'intervalle de la région homologue est délimité généralement

* Institut de Recherches Hydrauliques, Bratislava (Tchécoslovaquie).

par des mesures directes sur le modèle. Le critère est la réalisation du même champ de vitesses pour un certain intervalle des débits.

Il est important de déterminer la distorsion du modèle. Les avis diffèrent sur ce sujet. En principe, la distorsion, même sur un modèle aérodynamique, provoque une déformation de l'écoulement; il en est de même sur les modèles hydrauliques. Les grandes réductions exigent une certaine distorsion, du fait de la possibilité d'avoir des nombres de Reynolds suffisamment grands, sans excéder les vitesses maximales admissibles du point de vue du critère de Mach, afin d'avoir une précision suffisante dans les dimensions verticales sur le modèle. Le facteur correspondant de la distorsion dépend du problème que l'on étudie sur le modèle. Pour avoir, sur un modèle aérodynamique, la même répartition des vitesses, dans la partie inférieure du profil qui existe dans la nature, dans un écoulement à surface libre, il faut, selon Gilarov [1], choisir une distorsion du modèle de 1,5 à 2.

Si on étudie seulement l'écoulement global dans une rivière avec inondation, Lapšin [5] admet — sur la base des résultats expérimentaux — une distorsion du modèle de 4. Quant à une étude détaillée des écoulements inverses, dans le cas d'un élargissement subit de l'écoulement, on n'admet pas une distorsion, étant donné que, dans ces conditions, la distorsion — de la même façon que sur les modèles hydrauliques — agrandit les zones d'écoulement inverse [6].

Sur un modèle distordu, il est nécessaire [6] de maintenir la condition :

$$\frac{\lambda_f \lambda_l}{\lambda_R} = 1 \quad (1)$$

où λ : rapport des grandeurs dans la nature et sur le modèle;
 f : coefficient de perte de charge;
 l : dimension de longueur;
 R : rayon hydraulique du profil entier (dans le périmètre mouillé on compte aussi la glace protectrice).

Cette condition, on doit la remplir si on veut utiliser le modèle aérodynamique pour déterminer les lignes du plan d'eau libre [9].

Pour les profils fermés et larges, le rayon hydraulique est approximativement égal à la moitié de la profondeur et l'équation (1) se transforme en :

$$\frac{\lambda_f \lambda_l}{2 \lambda_h} = 1 \quad (2)$$

où h est la dimension verticale.

L'analyse détaillée des conditions de similitude de la sédimentation des débits solides en suspension, sur les modèles aérodynamiques, est relatée dans l'article [8].

Supposons un modèle géométriquement semblable sur lequel sont remplies les conditions de l'écoulement. Pour obtenir la similitude du mouvement de la particule en suspension sur un tel modèle il est nécessaire de maintenir l'invariabilité des critères :

$$\frac{1}{\zeta} \cdot \frac{K_2}{K_1} \cdot \frac{d}{l} \cdot \frac{\rho_s}{\rho} = \text{idem}, \quad (3)$$

$$\frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \cdot \frac{g \cdot l}{V^2} = \text{idem}, \quad (4)$$

où ρ : densité du liquide;
 ρ_s : densité de la particule;
 d : dimension de la particule;
 l : dimension longitudinale caractéristique du modèle;
 ζ : coefficient de la résistance de la particule;
 V : vitesse de l'écoulement;
 g : accélération gravitationnelle;
 K_1, K_2 : coefficients de forme des particules.

Pour les grains des matériaux en suspension qui en général possèdent des dimensions très petites, le coefficient de résistance dépend de la vitesse de la particule relativement au milieu et de la dimension de la particule. A ce point de vue, on ne peut pas réaliser exactement les critères de similitude cités.

Admettons comme simplification que la valeur du coefficient de résistance de la particule en suspension soit supposée constante et égale à la valeur correspondante de la vitesse de chute de cette particule dans le milieu considéré quand les forces de résistance sont en équilibre avec les forces de gravitation et avec la poussée verticale.

Ensuite :

$$\zeta K_2 \rho d^2 \omega_0^2 = K_1 (\rho_s - \rho) g d^3 \quad (5)$$

où ω_0 : vitesse de chute de la particule dans le milieu considéré, puis :

$$\zeta = \frac{K_1}{K_2} \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot \frac{g d}{\omega_0^2} \quad (6)$$

En substituant ζ en (3), ce critère adopte la forme :

$$\frac{\rho_s}{\rho_s - \rho} \cdot \frac{\omega_0^2}{g \cdot l} = \text{idem} \quad (7)$$

Des relations (4) et (7), on peut déduire la condition :

$$\frac{\omega_0}{V} = \text{idem} \quad (8)$$

à laquelle on peut arriver directement de la nécessité de la similitude des trajectoires des particules dans un écoulement horizontal uniforme quand la vitesse longitudinale de la particule est égale à la vitesse de l'écoulement. Si nous envisageons le modèle distordu, nous obtiendrons de la nécessité de similitude des trajectoires des particules en négligeant la turbulence, au lieu de la relation (8), la relation :

$$\frac{\omega_0}{V} \cdot \frac{l}{h} = \text{idem} \quad (9)$$

où h : dimension verticale;
 l : dimension horizontale.

On peut écrire l'équation (9) sous la forme :

$$\lambda_{\omega_0} = \lambda_V \cdot \frac{\lambda_h}{\lambda_l} \quad (10)$$

De l'équation de continuité, il résulte que :

$$\lambda_V = \frac{\lambda_Q}{\lambda_F} = \frac{\lambda_Q}{\lambda_h \lambda_l} \quad (11)$$

Des équations (10) et (11) on obtient, pour le

rapport de la vitesse de chute des particules en suspension, la relation :

$$\lambda_{w_0} = \frac{\lambda_Q}{\lambda_l^2} \quad (12)$$

où λ_Q : le rapport des débits Q_n/Q_m .

Du point de vue de la similitude d'une flottation des particules sous l'influence de la turbulence, il se révèle nécessaire (en supposant que le coefficient de perte de charge du fond et celui de la couche protectrice sont approximativement égaux) de satisfaire à la relation :

$$\lambda_f = \left(\frac{\lambda_h}{\lambda_l} \right)^2 \quad (13)$$

Cette relation, ne peut être pratiquement satisfaite simultanément avec la relation (1) resp. (2). Dans le cas où le coefficient de perte de charge du modèle est plus petit que selon la relation (13) (c'est-à-dire λ_f plus grand), la sédimentation des débits solides en suspension sur le modèle sera plus intense et on obtiendra des résultats d'une précision plus grande. On aura un état situé entre la réalité et l'état qui adviendrait si la turbulence n'existait pas.

Passons maintenant à l'analyse du critère (4). Ce critère de similitude représente la condition de similitude de l'inertie des particules en suspension. Dans la nature, vu les petits diamètres des particules en suspension et les relativement petites vitesses d'écoulement, l'inertie des particules est pratiquement sans influence sur leurs trajectoires. En fait, on obtient sur les modèles aérodynamiques des vitesses d'écoulement beaucoup plus grandes que dans la nature (on néglige le critère de Froude). On a étudié comment sera déformé le passage des particules en suspension en tenant compte des forces d'inertie. Cette déformation, on la caractérise par une longueur Δ_s que parcourt la particule à une vitesse w_a , à la hauteur h au-dessus du fond — par l'effet d'inertie — quand elle parvient subitement dans une région sans mouvement. Une seconde caractéristique est la déviation de la particule de la ligne de courant Δ_r au cours d'un écoulement en arc, de rayon r , déviation due aux forces centrifuges sur la particule.

Si nous considérons seulement les composantes horizontales des forces et des vitesses, alors l'accélération de la particule dans la direction horizontale peut s'exprimer, selon la seconde loi de Newton, par la relation :

$$\frac{\Delta_{s(t)}}{dt^2} = \frac{\Sigma S_x}{m}, \quad (14)$$

où $\Delta_{s(t)}$: composante de la trajectoire de la particule dans la direction horizontale;

t : temps;

ΣS_x : somme des composantes horizontales des forces s'exerçant sur la particule;

m : masse de la particule.

Dans les composantes horizontales des forces, on peut prendre en considération seulement la résistance du milieu :

$$S_{x1} = -\zeta K_2 \rho d^2 \left(\frac{d\Delta_{s(t)}}{dt} \right)^2 \quad (15)$$

La masse de la particule peut s'exprimer par la relation :

$$m = K_1 \rho_s d^3 \quad (16)$$

Pour simplifier, supposons dans la relation (15) le coefficient ζ constant; sa valeur est déterminée d'après la vitesse de chute connue dans le liquide immobile w_0 de la relation (6). En introduisant les relations mentionnées dans l'équation (14), on obtient l'équation différentielle du mouvement de la particule sous la forme :

$$\frac{d^2 \Delta_{s(t)}}{dt^2} + \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \cdot \frac{g}{w_0^2} \cdot \left(\frac{d\Delta_{s(t)}}{dt} \right)^2 \quad (17)$$

La solution de cette équation est la suivante :

$$\Delta_{s(t)} = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho} \cdot \frac{w_0^2}{g} \cdot \ln (C_1 t + C_2) \quad (18)$$

Les constantes d'intégration C_1 et C_2 sont déterminées en partant des conditions limites au temps $t_0 = 0$ quand la vitesse de la particule est $w = w_a$ et la trajectoire $\Delta_{s(t)} = 0$. Si on évalue ces constantes et si on substitue au temps t pendant lequel la particule tombe du niveau près de la surface jusqu'au fond, le temps t_h :

$$t_h = \frac{h}{w_0} \quad (19)$$

on obtient la valeur cherchée :

$$\Delta_s = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho} \cdot \frac{w_0^2}{g} \ln \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \cdot \frac{g w_a h}{w_0^3} + 1 \right) \quad (20)$$

Dans le cas où il s'agit d'un modèle aérodynamique, on peut négliger la densité de l'air relativement à la densité de la particule. Ensuite on obtient la relation :

$$\Delta_s = \frac{w_0^2}{g} \ln \left(\frac{g w_a h}{w_0^3} + 1 \right) \quad (21)$$

D'après les relations (20) et (21) on peut évaluer l'erreur que l'on peut attendre dans les emplacements de la sédimentation des particules, au vu d'un schéma du ralentissement rapide de l'écoulement, si les forces d'inertie ne sont pas en similitude.

D'une façon analogue, on évaluera l'imprécision de la trajectoire de la particule si les lignes de courant sont courbes. Pour simplifier, considérons que sur la particule en mouvement s'exerce la même force centrifuge que si elle suivait exactement la ligne de courant.

Puis :

$$S_y = m \frac{w_x^2}{r} \quad (22)$$

où S_y : force centrifuge s'exerçant sur la particule;

w_x : vitesse longitudinale de la particule;

r : rayon de courbure de l'écoulement.

Cette force doit être en équilibre avec la force de résistance du milieu :

$$S_{y1} = \zeta K_2 \rho d^2 w_y^2 \quad (23)$$

et avec la poussée horizontale :

$$S_{y2} = m \frac{\rho}{\rho_s} \frac{w_x^2}{r} \quad (24)$$

où w_y : composante de la vitesse de la particule perpendiculaire à la ligne de courant.

En substituant m et ζ , des relations (16) et (6), dans les équations (22)-(24) on obtient de l'équation $S_y = S_{y1} + S_{y2}$ la déviation de la trajectoire de la particule de la ligne de courant :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{w_z}{w_x} = \frac{w_0}{\sqrt{gr}} \quad (25)$$

Etant donné que, pour les petits angles :

$$\operatorname{tg} \alpha = \alpha = \frac{\pi}{180} \alpha [^\circ]$$

on a ensuite :

$$\alpha [^\circ] = \frac{180}{\pi} \frac{w_0}{\sqrt{gr}} \quad (26)$$

Si nous considérons la trajectoire circulaire avec un angle au centre $\beta [^\circ]$, alors la déviation absolue de la particule à la fin de cette trajectoire de la ligne de courant sera :

$$\Delta_r = \frac{\pi}{180} \beta \sqrt{\frac{w_0^2 r}{g}} \quad (27)$$

A l'aide des relations déduites (21) et (27) on peut, dans le projet du modèle, faire préalablement une estimation des erreurs maximales prévues dans les emplacements où se produit la sédimentation des matériaux en suspension. Puis on peut décider du genre resp. de l'échelle du modèle. La connaissance de ces erreurs maximales prévues rendra possible une interprétation plus exacte des résultats de la recherche.

De la relation (12), il résulte que du point de vue de la similitude du mouvement des suspensions, on peut, dans une certaine mesure, changer arbitrairement l'échelle des débits sur le modèle. Il suffit seulement de maintenir le rapport de la vitesse de chute des particules en suspension au rapport de la vitesse de l'écoulement. Des relations (21) et (27), il ressort que les erreurs dans les trajectoires des particules en suspension diminuent avec la décroissance de la vitesse sur le modèle; d'autre part, la nécessité d'un écoulement turbulent sur le modèle détermine la valeur minimale de la vitesse sur le modèle V_m . La valeur maximale de la vitesse est limitée par la compressibilité de l'air, qui pratiquement n'a aucune influence quand la vitesse est inférieure à 20 m/s.

Si on envisage les possibilités réelles de déterminer les coefficients de perte de charge, sur le modèle, il s'ensuit généralement une distorsion du modèle 2-4. Comme nous l'avons déjà relaté, une pareille distorsion du point de vue de la similitude des champs de vitesse est encore admissible, si nous étudions l'écoulement global.

Installation expérimentale

Il est plus avantageux de construire le modèle aérodynamique de la retenue sur une table spéciale, comme dans l'étude d'un écoulement d'air. Les

dimensions de la table sont données par l'échelle horizontale du modèle. Pour toutes les mesures des cotes de la surface du modèle, on peut utiliser une échelle mobile munie d'un indicateur centésimal placé sur des rails. On peut modeler la topographie du fond du modèle en utilisant la plastelline. Si on dispose d'un plan des courbes de niveau du fond de la retenue, on peut modeler la topographie du fond du modèle avec une fraise montée sur un pont roulant sur des rails (fig. 1). Pour un report des courbes de niveau de la carte sur le modèle et une transposition des affouillements et des dépôts du modèle à la carte, on peut employer avec succès un

1/ Modelage de la topographie du lit du modèle à l'aide d'une fraise.

Cutting the model bed contours to shape.

pantographe. Le plan d'eau dans la retenue doit être fixé sur le modèle au moyen de la glace ou du plexiglas qui recouvre le modèle.

L'avantage des tableaux en glace, en comparaison avec les tableaux de plexiglas, est la possibilité de réaliser une surface plus plane. Avec une épaisseur de glace de 7-8 mm, le fléchissement est plus petit et par conséquent on peut utiliser des dimensions de tableaux plus grandes. L'inconvénient des tableaux en glace est leur fragilité et la difficulté du forage des trous pour le montage des sondes de vitesse. Les tableaux en glace doivent également être rendus étanches hermétiquement (par exemple par collage d'un bandeau adhésif). L'herméticité sur les bords du modèle peut être réalisée en poussant la glace vers une gomme étanche ayant une surface lisse. Pour éliminer le fléchissement, dans le cas d'une large retenue, on doit la faire reposer sur plusieurs points du modèle. Du fait que, pour l'étude du problème de sédimentation des suspensions dans la retenue, on se sert d'un modèle en sous-pression, il suffit de supporter la glace par de minces tenons dont les bords supérieurs s'alignent précisément à la hauteur du plan d'eau. La répartition de ces tenons doit être faite de façon à ne pas trop perturber l'écoulement. S'il est nécessaire de conduire la recherche avec plusieurs plans d'eau dans la retenue, on doit choisir une gomme étanche plus épaisse et l'appliquer sur le bord du modèle pour

pouvoir changer le plan d'eau par une pression plus efficace de la glace.

Pour l'étude de l'écoulement dans la retenue, on a employé la méthode de visualisation par de la fumée amenée dans le profil d'entrée du modèle. Pour la formation de la fumée, on a employé avec succès l'appareil dans lequel on brûle du tabac et où l'intensité de la fumée est réglée par la quantité de l'air amené.

Par la représentation photographique de l'écoulement ainsi figuré on obtient un bon contraste si on emploie sur le modèle un fond noir.

Pour l'étude de la sédimentation des débits solides en suspension sur les modèles aérodynamiques, on a imaginé une installation réalisant — d'une façon simple — le dosage simultané et la séparation des fractions, ce qui est en accord avec le rapport de la vitesse de chute des particules en suspension, au débit sur le modèle selon la relation (13). Ce rapport est respecté pour le diamètre maximal des particules qui parviennent dans le modèle, ce qui est une condition suffisante pour une recherche qualitative. La même installation peut être employée même pour une séparation préalable du matériau en fractions et la formation d'une granulométrie désirée si nous revendiquons la similitude de la courbe granulométrique.

La figure 2 est le schéma de l'installation pour le dosage du matériau en suspension. Le principe de l'installation est le suivant : le matériau en suspension est aspiré par le tube élastique 4 du récipient 1 dans le cylindre de classement 2 par action du ventilateur 9 qui se trouve à la partie finale du modèle. Dans le cylindre de classement, on peut obtenir une vitesse égale à la vitesse de chute choisie pour les particules, au moyen d'un réglage du

2/ Schéma de l'installation pour le dosage des suspensions sur un modèle aérodynamique.

Diagrammatic layout of aerodynamic model sediment metering arrangements.

débit d'air additionnel par une vanne 3. Les particules possédant une vitesse de chute plus petite que la vitesse choisie, sont aspirées à travers le tube élastique 5 dans le modèle, tandis que les particules ayant une vitesse de chute plus grande tombent successivement par une fente 6 entre l'élément conique élargi du tube élastique 4 et la paroi du cylindre de classement 2, dans le récipient 7 assujéti d'une façon étanche au cylindre de classement. Pour atténuer la pulsation du débit d'air par une plongée différente du tube élastique 4 dans le matériel se trouvant dans le récipient 1, il est avantageux que le ventilateur 8 fonctionnant

pour ajouter de l'air dans le cylindre de classement au moyen de la vanne 3, ait la plus grande pression possible. La mesure du débit d'air à travers le modèle, de même que le débit additionnel d'air, à l'aide de la vanne 3, s'effectuent au moyen des diaphragmes. Vu les petits diamètres de ces diaphragmes, il est préférable qu'ils soient étalonnés.

Pour dimensionner l'installation pour le dosage du matériau en suspension, on procède de la façon suivante : on détermine, au préalable, d'après la condition de la préservation du régime turbulent, le débit minimal Q_m de l'air à travers le modèle et on calcule pour le débit minimal Q_n dans la nature les valeurs :

$$\lambda_Q = \frac{Q_{(n)}}{Q_{(m)}}, \quad \lambda_v = \frac{\lambda_Q}{\lambda_h \lambda_l}$$

De la relation (13) on déduit λ_{W_0} , de la vitesse de chute maximale connue max. $W_{0(n)}$ on déduit :

$$\max. W_{0(m)} = \frac{\max. W_{0(n)}}{\lambda_{W_0}}$$

et on vérifie si les erreurs déterminées par les relations (31) et (27) ne dépassent pas les valeurs admises du point de vue de l'effet examiné. La valeur $W_{0(m)}$ on peut aussi la déduire directement de la relation :

$$W_{0(m)} = \frac{W_{0(n)} \lambda_l^2}{Q_{(n)}} \cdot Q_{(m)} \quad (28)$$

où l'indice m représente les valeurs sur le modèle et l'indice n représente les valeurs dans la nature.

Le diamètre du cylindre de classement 2 peut être calculé d'après la relation :

$$d \leq \sqrt{\frac{4 Q_{(m)}}{\pi \max. W_{0(m)}}} \quad (29)$$

Le diamètre d est choisi généralement foncièrement plus petit, pour des raisons pratiques, ce qu'exprime la partie droite de la relation (29). D'habitude, on s'accommode de $d = 15-20$ cm.

Le diamètre du tube élastique 4 doit être tel que les vitesses dans ce tube élastique soient supérieures aux vitesses de chute des grains les plus grossiers du matériau dosé. La distance de l'orifice de sortie 5 du cylindre de classement 2 à la partie finale conique du tube élastique 4, doit être au minimum dix fois le diamètre du cylindre de classement 2. On mesure par là une distribution des vitesses suffisamment proportionnelle dans la partie active du cylindre de classement 2. Le débit additionnel d'air Q_p peut être déterminé d'après la relation :

$$Q_p = Q_{(m)} \left(1 - \frac{\pi d^2}{4} \frac{W_{0(n)} \lambda_l^2}{Q_{(n)}} \right) \quad (30)$$

Pour le contrôle, il est avantageux, avant de commencer le classement lui-même, de mesurer les vitesses dans le cylindre de classement par une méthode de mesure des petites vitesses de l'air (par exemple par le thermoanémomètre).

En utilisant l'installation pour le classement préalable du matériau, si on veut conserver la similitude de la courbe granulométrique, on interpose, au lieu du modèle, un grand récipient de sédimentation entre le ventilateur 9 et le tube élasti-

que 5. Dans ce récipient, va se déposer tout le matériau qui passe par le cylindre de classement. En employant un classement successif répété, les vitesses dans le cylindre étant chaque fois différentes, on peut de cette manière fractionner le matériau en suspension en un nombre arbitraire de fractions que l'on peut ensuite utiliser pour faire un mélange de la granulométrie désirée.

Les expériences de l'étude sur modèles de la sédimentation des suspensions dans la retenue Samarra en Iraq.

En 1962, on a réalisé, à l'Institut des Recherches hydrauliques de Bratislava, une étude sur modèles des problèmes hydrauliques s'attachant à la construction postérieure de la centrale hydroélectrique de l'aménagement Samarra sur le fleuve Tigris, en Iraq [3], [4]. Ici, on relate les essais d'une méthode de recherche sur modèle aérodynamique de la sédimentation des suspensions dans la retenue. On était obligé d'examiner ce problème, car le fleuve Tigris transporte une quantité de suspensions exceptionnelle. Selon [4], le débit annuel des suspensions dans l'année hydrologique moyenne est de 82 000 000 m³. Le diamètre des particules en suspension est de 0,001 à 0,004 mm.

Après la construction de la centrale hydroélectrique, on établira un niveau d'eau maximal dans la retenue et en conséquence les suspensions vont sédimenter en quantité considérable dans cette retenue. On devait par la suite examiner le problème de la sédimentation des suspensions et projeter les aménagements pour régler la sédimentation dans la retenue. Nous avons étudié ces problèmes sur un modèle aérodynamique et nous avons confronté certains résultats avec le calcul et l'étude sur un grand modèle hydraulique.

En calculant les échelles d'un modèle aérodynamique, le point capital était de réaliser la similitude de la rugosité. Le coefficient de rugosité au fond du fleuve a été choisi le même que dans le périmètre inondé, parce que dans les premières années de l'exploitation, les dépôts de suspension se formeront au fond de la retenue. Dans le projet du modèle, on a supposé pour la nature :

$$n_{(n)} = 0,020.$$

La topographie du fond de la retenue a été modélisée avec de la plastelline, dont les caractéristiques de rugosité ont été tirées de la littérature [6]. D'après ces valeurs, on a calculé $\lambda_f = 0,5$.

L'échelle verticale du modèle $\lambda_h = 1\,000$, a été choisie de façon à pouvoir modéliser avec une précision suffisante la topographie du fond du modèle. L'échelle horizontale du modèle a été calculée d'après l'équation [2] $\lambda_l = 4\,000$. Le modèle a été construit sur une table expérimentale ayant pour dimensions $4,00 \times 1,40$ m (fig. 3). Le plan d'eau dans la retenue a été fixé par le plexiglas. Dans la partie finale du modèle, on a placé un ventilateur donnant une surpression de 280 kg/m². On a réalisé, sur le modèle, un débit maximal d'air de 0,035 m³/s.

Pour simuler les suspensions, on a utilisé les sciures fines obtenues par le ponçage de bois dur. Puisque, dans le cas donné, il s'agissait d'obtenir seulement une simulation qualitative de la sédimentation des suspensions, on a conservé uniquement le rapport des vitesses de chute des grains en suspension, au débit pour le diamètre maximal des suspensions. Le diamètre du grain maximal des suspensions dans la nature est 0,04 mm, ce qui correspond à la vitesse de chute de ce matériau dans l'eau sans mouvement $W_{0(n)} = 0,001$ m/s.

En dimensionnant l'installation pour le dosage du matériau représentant les suspensions et en déterminant les conditions optimales pour l'étude de la sédimentation des suspensions, on a procédé de la façon suivante :

La valeur limite à laquelle, sur le modèle, on réalise un écoulement turbulent, est exprimée par la relation :

$$R = \frac{VR}{\nu} = 1\,000 \quad (31)$$

où $R = (h/2)$.

Dans notre cas, la profondeur moyenne sur le modèle est $h = 0,01$ m.

D'après la relation (31) on a calculé :

$$\min. V_{(m)} = 2,9 \text{ m/s.}$$

Le profil moyen transversal dans la retenue, dans la nature est $F_{(n)} = 30\,000$ m² et sur le modèle $F_{(m)} = 0,0075$ m². Ensuite :

$$\min. Q_{(m)} = \min. V_{(m)} F_{(m)} = 0,0218 \text{ m}^3/\text{s.}$$

La valeur $W_{0(m)}$, a été calculée directement de l'équation (28), où pour $Q_{(m)}$ on a :

$$\min. Q_{(m)} = 0,022 \text{ m}^3/\text{s}$$

et on l'a représentée graphiquement dans la partie gauche de la figure 4, en fonction de $Q_{(n)}$.

On a calculé ensuite dans quelle mesure le mouvement des particules en suspension sera déformé en raison des forces d'inertie, d'après les équations (21) et (27) pour les conditions défavorables.

On a supposé que la vitesse maximale dans le modèle est environ de 6,0 m/s et la profondeur maximale $h = 0,015$ m. Les valeurs $\Delta_{(m)}$, sont présentées graphiquement dans la partie droite de la figure 4 en fonction de $W_{0(n)}$. En calculant Δ_r , on a pris comme valeurs critiques :

$$r = 0,25 \text{ m, } \beta = 45^\circ, \text{ resp. } r = 0,10, \beta = 90^\circ.$$

Ces résultats sont de même représentés graphiquement sur la figure 4 en fonction de $Q_{(n)}$. L'erreur due à l'inertie des particules — pour les débits partiels — peut être déterminée directement sur le graphique de la figure 4. Par exemple, en prenant $Q_{(n)} = 3\,000$ m³/s avec un débit minimal sur le modèle $Q_{(m)} = 0,022$ m³/s, l'erreur maximale selon la relation (21) $\Delta s = 0,009$ m et d'après la relation (27) $\Delta r = 0,015$ m, resp. $\Delta r = 0,019$ m. Dans nos conditions, ces valeurs sont négligeables.

Comme débit minimal, on a supposé :

$$Q_{(n)} = 2\,000 \text{ m}^3/\text{s.}$$

Dans ce cas, quand le débit sur le modèle est :

$$Q_{(m)} = 0,022 \text{ m}^3/\text{s},$$

la vitesse de chute d'après la relation (28) est :

$$W_{0(m)} = 0,17 \text{ m/s}.$$

D'après la relation (29) on doit avoir $d \leq 0,4 \text{ m}$. On a choisi le diamètre $d = 0,15 \text{ m}$ qui a donné de bons résultats pratiques. Dans ce cas, l'air additionnel, pour le débit $Q_{(n)} = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ calculé d'après la relation (30) est $Q_p = 0,0189 \text{ m}^3/\text{s}$.

Pour le diamètre du cylindre de classement $d = 0,15 \text{ m}$, la hauteur de la partie active est $1,5 \text{ m}$. On a déterminé expérimentalement le diamètre du tube élastique 4, équivalent à 3 cm . Puis les vitesses moyennes dans le tube élastique 4 étaient $4,3 \text{ m/s}$. Le diamètre du tube d'amenée 5 a été déterminé de telle façon que la vitesse moyenne dans le tube soit approximativement égale à la vitesse maximale sur le modèle. Le diamètre satisfaisant était de 7 cm .

La méthode relatée nous a donné des résultats quantitatifs analogues à ceux tirés du calcul, sans considérer la turbulence [4], [7]. (La quantité de suspensions sédimentées dans la retenue par rapport à la quantité totale transportée par la rivière.)

Sur les figures 5 et 6, on voit une sédimentation relativement considérable dans la retenue. Etant donné que l'essai de sédimentation des suspensions sur le modèle est très rapide, on a pu expérimentalement examiner plusieurs alternatives des ouvrages de régularisation dans la retenue. Le processus de la sédimentation observé sur un modèle aérodynamique a permis une comparaison rapide des ouvrages examinés. L'influence des ouvrages de régularisation se manifestait d'une façon éclatante sur le caractère de la sédimentation dans la retenue, ce que l'on peut constater en comparant les figures 5 et 6 et ce qui a permis une appréciation des ouvrages projetés.

Les résultats de l'étude de la sédimentation dans

3/ Un modèle aérodynamique. Aerodynamic model.

4/ Expression graphique de la fonction (5) (6) pour le cas relaté dans le texte.
Graph of functions (5) and (6) for the case discussed in the article.

Sédimentation des suspensions dans la retenue après deux heures d'essais — sans ouvrages de régularisation.

/5/ Sedimentation after two hours testing, without control works.

Sédimentation des suspensions dans la retenue après deux heures d'essai; influence d'un ouvrage de régularisation.

/6/

Sedimentation after two hours testing : effect of a control structure.

la retenue, obtenus par ladite méthode ont été comparés avec ceux de la recherche de l'écoulement au moyen de la méthode de visualisation par la fumée. Nous avons constaté que, dans le cas donné, les plus gros sédiments s'accumulent dans les endroits où l'écoulement est le plus intense (ce que l'on peut voir sur les figures 6 et 7).

Cela a permis une accélération de la recherche en éliminant certains ouvrages qui n'étaient pas acceptables du point de vue de l'écoulement dans la retenue. L'écoulement dans la retenue a été aussi examiné sur quelques ouvrages sur un modèle hydraulique de la retenue à une échelle des longueurs 1 : 200 et à une échelle des hauteurs 1 : 100.

Les résultats obtenus sur un modèle hydraulique sont analogues à ceux d'un modèle aérodynamique.

Conclusion

De l'analyse des conditions de similitude de la sédimentation des suspensions, décrite en détail dans la publication [9], on peut déduire que sur les modèles aérodynamiques, on peut obtenir une représentation suffisante de la sédimentation des suspensions dans la retenue.

Ladite méthode de recherche expérimentale, que nous avons employée avec succès dans l'étude [3],

Visualisation par la fumée de l'écoulement dans la retenue; l'ouvrage de régularisation est le même que celui de la fig. 6.

/7/

Use of smoke to show up the flow pattern in the reservoir: the control structure is the same as in Fig. 6.

facilite la solution du problème de la sédimentation des suspensions dans les retenues et la détermination de l'influence des ouvrages de régularisation sur la sédimentation.

Vu que cette méthode est rapide et avantageuse, elle facilite une étude expérimentale de l'influence de différentes alternatives des ouvrages de régularisation dans la retenue, sur la sédimentation des suspensions.

Ladite méthode nous a permis de déterminer, en étudiant le problème [3], le rapport des suspensions déposées à la quantité totale transportée par la rivière, approximativement égal à celui obtenu par le calcul [4], ce qu'on peut, dans une certaine mesure, considérer comme une vérification de la méthode projetée, au point de vue quantitatif.

L'avantage de la méthode projetée, en comparaison avec le calcul, c'est qu'elle prend en compte la répartition des vitesses dans la retenue, ce que le calcul ne rend pas possible entièrement.

L'installation expérimentale projetée facilite, d'une manière simple, le dosage des matériaux en état de suspension dans le modèle et simultanément élimine les grains en suspension d'un diamètre plus grand qu'il n'est admissible du point de vue de la similitude. Cette installation facilite même une séparation préalable des matériaux en suspension nécessaires pour une recherche quantitative.

Pour la simulation des suspensions sur un modèle aérodynamique, les sciures obtenues par le ponçage de bois dur donnaient de bons résultats.

Références bibliographiques

- [1] GIL'AROV (N. P.). — Ispol'zovanie žestkikh aerodinamičeskikh modelej pri issledovanii rek. Zbornik : Novyje metody i apparatura dl'a issledovanij ruslovych procesov, Moskva 1959.
- [2] GRUND (I.), KOMORA (J.), ROHAN (K.) et ŠTICH (O.). — La recherche hydraulique d'une centrale hydroélectrique à basse pression, Samarra sur le fleuve Tigris. *Travaux et Etudes (Práce a štúdie)*, VUV, Bratislava, 1963.
- [3] Hydraulic Research of the Regulation Measures in the Reservoir of the Water Installation Samarra Iraq. — Report of *Hydraulic Research Institute*, Bratislava, Czechoslovakia, 1962.
- [4] Hydraulic Research of the Power Station Samarra, Iraq. — Report of *Hydraulic Research Institute*, Bratislava, Czechoslovakia, 1962.
- [5] LAPŠIN (G. N.). — O geometričeskom iskaženii masštabov prostranstvennykh napornych modelej, *IVNIIG* Tom. 64, Moskva, Leningrad, 1960.
- [6] LATCHER (V. N.) et PRUDOVSKIJ (A. M.). — Issledovanie otkrytych potokov na vozdušno-napornych model'ach, *Trudy Gidroprojekta*, Moskva, 1959.
- [7] PANTÉLOPOULOS (J.). — Méthode rapide de calcul des dépôts dans les bassins de décantation de section variable, *Vodohospodársky časopis*, 1960/4, Bratislava.
- [8] SUMBAL (J.). — Les considérations sur la possibilité d'application d'un modèle aérodynamique pour la recherche directe de la sédimentation des suspensions dans les retenues. *Vodoh. čas. SAV*, Bratislava, 1964/I.
- [9] SUMBAL (J.). — L'usage d'un modèle aérodynamique pour la détermination de cours de niveau libre de l'écoulement graduellement varié, *Vodohospodársky časopis*, 1962/IV.

Abstract

Study of suspended load sedimentation in reservoirs on aerodynamic models

by
J. Komora *
and
J. Sumbal *

By means of computation methods the amount of settled suspended load in reservoirs can be determined. The disadvantage is that with these computation methods the problem of suspended load sedimentation is too schematized and they do not take fully into account the shape of the reservoir and the velocity distribution in it. The authors established, by theoretical and experimental analysis that the suspended load sedimentation in reservoirs of hydraulic structures can be studied successfully on aerodynamic models. From the point of view of flow similarity conditions it is sufficient that the phenomena studied are in the automodel sphere of Reynolds numbers and to attain approximate similarity of resistance coefficients according to relationship (2).

In view of the actual possibilities of attaining resistance coefficients on a model, this condition usually involves double to quadruple distortion of the model. It follows from analysis of the conditions of suspended load sedimentation similarity on aerodynamic models that the basic condition of suspended load sedimentation similarity is given by the relationship (12). This condition is a consequence of the similarity of the trajectories

* Hydraulic Research Institute, Bratislava (Czechoslovakia).

of suspended load grains, where turbulence is neglected. The aerodynamic model should be designed such that the distortion of suspended grain trajectories by inertial forces not in similarity can be neglected. The values of this distortion can be computed according to equations (21) and (27).

A further part deals with the method of construction of the aerodynamic reservoir model. Experimental equipment is proposed for the direct proportioning of ungraded material representing the suspended load (Fig. 2). With this equipment, material with a larger diameter than permissible for similarity is automatically eliminated. The same equipment can be also used for the grading of material into the requisite fractions. A computation procedure is proposed for the dimensioning of individual parts of this equipment.

In 1962, hydraulic problems connected with the completion of the power station for the Samarra hydraulic scheme on the river Tigris in Iraq were investigated on a model. In view of the exceptionally large quantities of sediment carried by the Tigris, the problem of silt in the reservoir was a very serious one indeed. If the water level in the reservoir were to remain at maximum elevation, 75 per cent of the reservoir volume would silt up completely in 15 years. The authors have proposed reservoir regulation and dam operation methods to slow down and control silting in the reservoir. A 1:4 000/1:1 000 scale aerodynamic model was used for suspended load sedimentation research for urgently-required tests on a series of regulation methods. Fine sawdust was used to simulate suspended load.

By means of the method described an approximately equal portion of the whole inflow of sedimented suspended load was attained in the reservoir as by computation without considering turbulence [4, 7]. As the reservoir sedimentation experiment itself takes very little time on the model, it was possible during both this and the investigation with streaming flow to study reservoir silting conditions for several alternative regulation dam layouts. The effects of various regulation measures showed up strikingly by the different types of sedimentation pattern they produced, which enabled the proposed measures to be reliably assessed (see Figures 5 and 6 for instance).

The results of the study of reservoir sedimentation obtained by the above method were compared with the streaming flow investigation results obtained by smoke visualisation. It was established that in the given case the most extensive suspended load sediment deposits formed in the regions of most extensive water flow, as is evident from the comparison of Figures 6 and 7. More comprehensive streaming flow tests with regulation in the reservoir found favorable on aerodynamic model were run on a hydraulic model to a scale of 1:200/1:100. The overall results obtained on the aerodynamic model confirmed those of the hydraulic model study.

Results of this study show that the described method of experimental research makes possible the solution of the problem of reservoir sedimentation with suspended load and the determination of the effect of regulation measures in reservoirs on the settlement of suspended loads. These data show that the method is rapid and not expansive. It provides a means of testing a series of alternative regulation measures in the reservoir from the point of view of their effect on suspended load sedimentation. The advantage of the proposed method over computation, is that it also allows for the velocity distribution in the reservoir, what is not entirely possible by computation alone.