

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Interaction d'une Dalle de Turbogénérateur et du Sol

Interaction of Turbogenerator Footing with Foundation

P. D. EVDOKIMOV Dr. Sc. (Tech.),
 A. M. VINOGRADOVA Cand. Sc. (Phys.-Math.),
 A. L. GOLDINE Cand. Sc. (Tech.),
 O. D. SAPÉGUINE Cand. Sc. (Tech.),
 I. F. LIPOVETSKAYA Ing., Inst. de Recherches Hydrauliques B.E. Védénéev, Leningrad, U. S. S. R.

RÉSUMÉ L'exploitation sûre des turbogénérateurs de grande puissance reposant sur les sols cohérents saturés d'eau exige la prévision du développement dans le temps de déformations lentes des fondations. Le calcul des déformations lentes d'une dalle de fondation d'un turbogénérateur de 300 Mw, compte tenu de la consolidation des sols, a été réalisé à l'aide des méthodes proposées pour la résolution du problème des pressions de contact dans la théorie de la consolidation par filtration. Le calcul des déformations lentes d'une fondation, compte tenu du fluage du béton et du sol, s'effectuait par les méthodes de l'approximation quasi-élastique. On donne une confrontation des tassements et des flèches calculés, ainsi que des pressions de contact, avec les données obtenues en nature sur la centrale thermique de Kostroma.

Le problème de l'interaction des fondations des ouvrages avec les sols les supportant est très complexe. Le dernier temps la plus grande attention est accordée à l'analyse des processus lents imputables à la consolidation et au fluage du squelette des sols argileux saturés d'eau. C'est grâce à l'élaboration des méthodes de calcul permettant de déterminer la variation dans le temps des tassements et des flèches des fondations à rigidité finie qu'on peut prévoir le comportement à long terme de plusieurs ouvrages industriels, de génie civil et énergétiques. La confrontation des valeurs théoriques des tassements et des flèches de fondations, ainsi que du type et la distribution des pressions de contact entre l'ouvrage et le sol, avec les valeurs obtenues "in situ" permet de justifier l'emploi ultérieur des méthodes de calcul élaborées dans des projets des fondations.

Ce problème est très important pour les projets des fondations des turbogénérateurs reposant sur le sol cohérent saturé d'eau. L'analyse de la variation dans le temps du comportement des dalles de fondation des turbogénérateurs est nécessaire pour évaluer la sécurité de leur exploitation de longue durée. À particularité des turbogénérateurs réside dans la relation rigide de la ligne d'arbre à l'aide des paliers, ce qui interdit de grands déplacements réciproques des semelles de paliers en période du fonctionnement des turbogénérateurs. C'est pourquoi on prête une attention particulière à la rigidité de ces fondations.

Cela est d'autant plus important que les organismes occupant des projets de l'équipement énergétique imposent des restrictions sévères relatives à l'accroissement maximal de la flèche des dalles de fondation.

À l'heure actuelle dans les calculs de déformations lentes imputables aux processus de la consolidation du sol argileux saturé d'eau et du fluage de son squelette, ces processus peuvent être analysés séparément. Ils sont souvent définis comme périodes

de la consolidation primaire et secondaire. En période de la consolidation primaire les tassements et les flèches sont déterminés par les processus de la consolidation par filtration; en période de la consolidation secondaire ils sont définis par les déformations visqueuses du squelette du sol. Naturellement, ces méthodes ont un caractère approximatif.

Le calcul des déformations lentes des poutres, compte tenu de la consolidation du sol, est basé sur une résolution commune des équations d'une ligne élastique d'une poutre et de celles de la théorie de consolidation par filtration. En cas de filtration de l'eau interstitielle dans le sol, les tassements et les flèches d'une dalle de fondation, ainsi que les pressions de contact, sont fonctions du temps. Dans ce cas l'équation de la flèche d'une poutre a une forme (1) suivante:

$$D\bar{w}(\bar{x}, t) = q(\bar{x}) - p(\bar{x}, t) \quad (1)$$

où \bar{x} est une coordonnée dimensionnelle.

La courbe des pressions de contact $p(\bar{x}, t)$ peut être déterminée par la décomposition en série selon les polynômes de Tchebycheff $T_n(x)$ en coordonnées adimensionnelles $x = \frac{\bar{x}}{l}$ [2]:

$$p(x, t) = \frac{R}{\pi l} \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} + \frac{2M}{\pi l^2} \frac{x}{\sqrt{1-x^2}} + \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \sum_{n=2}^{\infty} A_n(t) T_n(x) \quad (2)$$

où R, M sont le vecteur et le moment principaux des charges extérieures sur une dalle.

Dans ce cas les flèches sont déterminées selon l'équation:

$$\begin{aligned}
 \frac{D}{l^4} w(x, t) = & C_1 \frac{x^3}{6} + C_2 \frac{x^2}{2} + C_3 x + C_4 + \sum_{n=2}^{\infty} P_n \frac{(x-x_n)^3}{6l} + \\
 & + \sum_{m=1}^{\infty} M_m \frac{(x-x_m)^2}{2l^2} + F_3(x) - \frac{1}{6} \sum_{n=2}^{\infty} A_n(t) F_n(x),
 \end{aligned} \quad (3)$$

avec C_1, C_2, C_3, C_4 - constantes déterminées par les conditions aux limites du problème; P_n - forces concentrées; M_m - moments concentrés.

Les coefficients inconnus $A_n(t)$ sont déterminés sur la base des conditions d'égalité des flèches d'une dalle et des tassements du sol de fondation. Pour définir les tassements on doit résoudre le problème bidimensionnel de la théorie de consolidation par filtration d'un milieu biphasique à l'aide de la méthode des différences finies. Dans le cas du réseau carré l'équation en différences finies a une forme suivante[5]:

$$h_{t,i,k} = (1 - \alpha)h_{t,i,k} + \frac{\Delta t}{2\gamma} \Delta \theta_{t,i,k}^* + \alpha(h_{t,i+1,k} + h_{t,i-1,k} + h_{t,i,k+1} + h_{t,i,k-1}) \quad (4)$$

où

$$\alpha = \frac{k(1 + \theta_0)(1 + \frac{1}{2})}{2\alpha\gamma} \quad \Delta \theta_{t,i,k}^* = \theta_{t,i,k} - \theta_{t-1,i,k} \quad (\theta^* = \theta_x + \theta_y)$$

Dans l'équation (4) le membre avec $\Delta \theta^*$ tient compte de la variation des pressions de contact due à l'accroissement de la flèche durant un intervalle de temps Δt . La distribution initiale des charges hydrauliques est déterminée, selon les conditions de l'absence de déformations du sol de fondation au moment de l'application de la charge en supposition qu'un reflux instantané de l'eau interstitielle n'a pas lieu.

Si l'on tient compte de la pression excessive de l'eau interstitielle, on doit déterminer les tassements de la surface d'une fondation selon l'équation:

$$S(x,t) = \frac{(1 - \nu_0)\Delta z}{E_0} \sum_{q=1}^Q [\theta_{x,q}^*(x,z,t) + \theta_{y,q}^*(x,z,t) - 2\gamma h(x,z,t)] \quad (5)$$

E_0, ν_0 étant les caractéristiques élastiques du sol de fondation. Dans l'équation (5) on fait la somme des tassements correspondant aux couches élémentaires Δz selon la profondeur de la zone de calcul soumise à la consolidation ($1 \leq q \leq Q$)

Pour la résolution numérique du problème de la déformation lente d'une dalle imputable à la consolidation du sol on a adopté une procédure suivante. La période du compactage du sol (déformations lentes d'une dalle) est divisée en intervalles Δt . On remplace la courbe des pressions de contact $p(x,t)$ variant dans le temps par un nombre de courbes de pressions de contact qui varient seulement lors du passage d'un intervalle de calcul à un autre. Conformément à l'équation (4) à chaque intervalle correspond une variation de la pression d'eau dans le sol de fondation, cette variation étant la cause d'une augmentation des tassements de la surface du terrain. Pour chaque intervalle le problème de la consolidation est résolu pour une certaine charge extérieure sur le sol égale à la valeur des pressions de contact. Les coefficients inconnus $A_n(t)$ sont déterminés selon les conditions de l'égalité entre les flèches d'une fondation (définies par l'équation (3)) et les tassements du sol (obtenus à l'aide de la formule (5)). Après avoir déterminé les coefficients inconnus on peut trouver la valeur des pressions de contact $p(x,t)$ considérées comme une charge extérieure sur le sol de fondation pour l'intervalle suivant. Pour faciliter les calculs (trouver les constantes C_1, C_2, C_3, C_4) on a représenté les charges connues sur la fondation sous forme des schémas symétrique

et à symétrie gauche.

Le problème analogue est étudié du point de vue analytique dans l'article [4].

Lors de la consolidation secondaire la charge transmise au sol de fondation est complètement recue par son squelette. Donc, dans les calculs on suppose que le sol de fondation représente un milieu continu monophasique et homogène se caractérisant par les propriétés de fluage.

Les propriétés rhéologiques du squelette du sol sont décrites selon la théorie de l'élasticité visqueuse linéaire. Dans les conditions du travail combiné d'une dalle avec le sol on remplace dans l'équation différentielle de la flèche de cette dalle les caractéristiques élastiques du sol E_0, ν_0 par les opérateurs intégraux de temps de Volterra:

$$\bar{E}_0 = E_0(1 - \bar{R}_0), \quad \bar{\nu}_0 = \nu_0(1 - \frac{1-2\nu_0}{2\nu_0}\bar{R}_0) \quad (6)$$

où l'action de l'opérateur \bar{R}_0 sur une fonction arbitraire $f(t)$ est représentée sous forme:

$$\bar{R}_0\{f(t)\} = \int_0^t \bar{R}_0(t-\tau) f(\tau) d\tau \quad (7)$$

$\bar{R}_0(t-\tau)$ étant le noyau de la relaxation du sol.

La deuxième équation (6) est valable en cas d'absence de l'effet rhéologique volumique du sol.

Le système de base des équations qui décrivent le travail combiné d'une dalle de fondation et du sol se réduit à l'équation intégral-différentielle:

$$\bar{T} \left\{ \frac{d^4 p(x,t)}{dx^4} \right\} + p(x,t) = q(x) \quad (8)$$

où $\bar{T} = \frac{E}{1-\nu^2} \frac{1-\nu^2}{E_0}$

E, ν étant les caractéristiques élastiques du matériau de la dalle (béton).

La fonction $\Psi [p(x,t), x, t]$ est proportionnelle au tassement; elle est déterminée par un modèle choisi, ce modèle pouvant être représenté sous forme d'une demi-espace ou d'une couche de sol d'épaisseur finie.

Durant la période de déformations d'une dalle sont respectées les équations intégrales de l'équilibre

$$\int_{-l}^l p(x,t) dx = \int_{-l}^l q(x) dx, \quad \int_{-l}^l p(x,t) x dx = \int_{-l}^l q(x) x dx \quad (9)$$

L'équation (8) est résolue sur la base des itérations [5], ce qui permet de représenter les pressions de contact $p(x,t)$ comme une série

$$p(x,t) = p_0(x,t) + \sum_{k=1}^n p_k(x,t) \quad (10)$$

où $p_0(x,t)$ est une approximation nulle, $p_n(x,t)$ ($n=1,2,\dots,n$) sont les corrections à une solution approchée. Pour le calcul des termes de l'équation (10) on utilise les principes des solutions élastiques [6]. Dans l'équation (8) on remplace formellement l'opération

$$\bar{T} \left\{ \frac{d^4 \varphi [p(x,t), x, t]}{dx^4} \right\}$$

par le produit

$$\bar{T} \{ I \} \cdot \frac{d^4 \varphi [p(x,t), x, t]}{dx^4}$$

Pour chaque pas on résoud l'équation:

$$T \{ I \} \cdot \frac{d^4 \varphi [p_n(x,t), x, t]}{dx^4} + p_n(x,t) = q_w(x,t), \quad (11)$$

$$q_w(x,t) = q(x)$$

Le calcul de $q_w(x,t)$ s'effectue à l'aide d'une formule de récurrence

$$q_w(x,t) = q_{w,i}(x,t) - p_{n,i}(x,t) - \bar{T} \left\{ \frac{d^4 \varphi [p_{n,i}(x,t), x, t]}{dx^4} \right\} \quad (12)$$

Dans l'équation (11) le terme $p_n(x,t)$ exprime une réaction élastique du sol de fondation supportant une dalle sous charge extérieure fictive $q_w(x,t)$. On obtient pour chaque valeur donnée de $t = t_i$ ($i = 0, 1, 2, \dots$) un problème élastique aux valeurs correspondantes de E_0, ν_0 .

Ainsi, le travail d'une fondation élasto-visqueuse est simulé par le comportement d'une fondation élastique dont les caractéristiques élastiques sont fonctions du paramètre t . La réaction $p(x,t)$ étant connue, les tassements d'une dalle sont calculés par l'intégration successive selon la coordonnée x et le temps t .

En tenant compte du fluage du sol et du béton d'une dalle il faut prendre en considération la relation entre les opérateurs

$$\frac{\bar{T}}{\bar{E}_0} = \frac{E}{E_0} (1 - \bar{R}_1 + \bar{P}_0 - \bar{R}_2 \bar{P}_1) \quad (13)$$

où \bar{R}_1 est l'opérateur de relaxation du béton, \bar{P}_0 est l'opérateur du fluage du sol.

Les calculs montrent que pour les valeurs réelles des caractéristiques du fluage du sol et pour les charges constantes dans le temps ou décrites par une fonction en escalier, la précision satisfaisante de la résolution peut être assurée par l'approximation nulle.

Comme exemple nous allons donner les résultats de calculs de la déformation d'une dalle inférieure d'un turbogénérateur de 300 Mwt de la centrale thermique de Kostroma. La dalle de fondation à longueur

$2l = 36$ m et à hauteur de 2,1 m repose sur le sol argileux saturé d'eau se caractérisant par les paramètres suivants: $\alpha = 0,02$ cm²/kg, $\nu_0 = 0,51$, $\kappa = 10^{-7}$ cm/sec, $E_0 = 2 \times 10^3$ t/m², $\nu_0 = 0,30$. Pour $\xi = 0,408$, $\delta = 0,322$ le noyau de l'équation du fluage a une forme suivante: $R_0(t-\tau) = 65(t-\tau)^{0,4}$. Les caractéristiques élastiques du béton sont: $E = 3,15 \cdot 10^6$ t/m², $\nu = 0,17$. La charge due à la

superstructure est considérée comme les forces concentrées (fig. 1) transmises par les piliers. Les calculs de consolidation ont été réalisés pour le domaine de la fondation de 90 m de largeur et de 15 m de profondeur. On a adopté pour les limites intérieure et supérieure du domaine de consolidation la condition $h = 0$, pour les limites latérales $\frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0$. Les figures 1 et 2 donnent les courbes de la variation des pressions de contact et de l'accroissement de la flèche d'une dalle de fondation tant pour la période de la consolidation primaire ($0 \leq t \leq 3$ années) que de la consolidation secondaire ($3 \leq t \leq 6$ années).

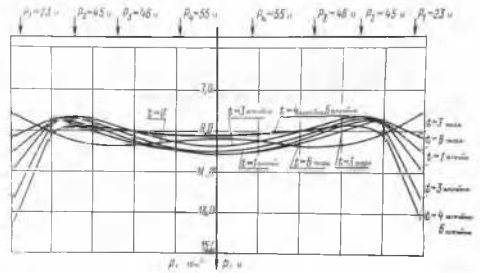


Fig. 1

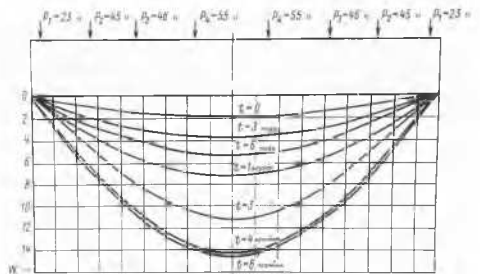


Fig. 2

Comme on le montre les figures c'est durant la première année après le chargement qu'on observe une variation intense des flèches des fondations et des pressions de contact. L'accroissement des flèches de fondations imputables aux déformations visqueuses du squelette disparaît pratiquement durant la période de trois années. La figure 3 donne la confrontation des valeurs calculées des tassements d'une dalle suppor-

tant un turbogénérateur de 300 Mwt (tassements au milieu de la dalle) avec les données obtenues en nature pour huit groupes de la centrale thermique de Kostroma. On voit une assez bonne coïncidence entre la courbe calculée et celle obtenue en nature pour les huit groupes. Dans les calculs des tassements on a tenu compte au poids propre de la fondation et de l'équipement énergétique.

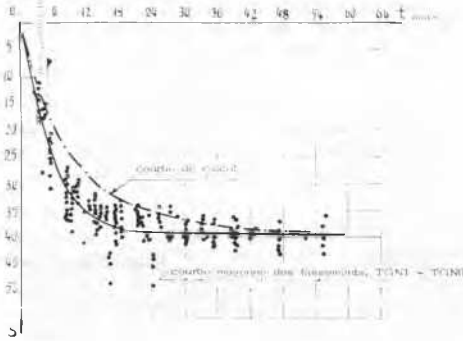


Fig. 3

La comparaison des valeurs calculées des pressions de contact sous dalle de fondation avec celles obtenues "in situ" représente un intérêt considérable.

Les observations "in situ" sur la distribution des pressions de contact normales ont été réalisées sur la centrale thermique de Kostroma*. Dans ce but on a installé dans la semelle de fondation d'un groupe de 300 Mwt 44 dynamomètres à fil résistant mis au point au NIISK. Ces appareils ont été installés selon huit sections transversales et sept sections longitudinales. L'étalonnage des appareils s'effectuait à l'aide d'un dispositif spécial dans lequel ils sont placés dans une dalle en béton armé et la pression était transmise par une couche du sol, ce qui correspond aux conditions du travail des dynamomètres dans une fondation. On faisait la lecture des que les appareils étaient mis en place, après le bétonnage de la dalle, lors du montage et de l'exploitation du turbogénérateur. Avant la mise en place du turbogénérateur la courbe des pressions de contact se caractérise par la diminution de l'ordonnée dans la partie moyenne, ensuite elle devient convexe tant dans les sections longitudinales que dans celles transversales. La figure 4 permet de confronter les courbes théoriques et expérimentales obtenues pour une section longitudinale. La courbe théorique est définie sur la base d'une solution qui tient compte tant du poids propre de la dalle de fondation que de la charge transmise à cette dalle par la superstructure.

* Ces recherches ont été accomplies avec le concours de la Section de dynamométrie du NIISK sous la direction de M. Lazebnik G. E., cand. ès sc. techn.

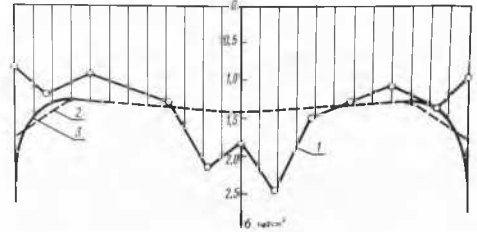


Fig. 4

L'examen de la figure ci-dessus montre que la courbe réelle des pressions de contact sous une dalle de fondation se caractérise par les ordonnées maximales qui correspondent au centre de la dalle; quant à la courbe théorique elle est déterminée en supposition de la relation linéaire entre les contraintes dans le squelette du sol et ses déformations.

Les calculs effectués ont permis de prévoir une exploitation sûre des turbogénérateurs durant une longue période. Les recherches expérimentales sur les pressions de contact donnent la possibilité d'élaborer les projets plus économiques des dalles de fondation des turbogénérateurs.

REFERENCES

- Gorbunov-Possadov, M. I., Malikova, T. A., (1973), "Calcul des constructions reposant sur une fondation élastique", *Stroïzdat*, 627 pp.
- Goldine, A. I., Zvereva, V. V., Sapojnikov, L. B. (1973), "Méthode de calcul pratique des dalles de fondation reposant sur le sol en état de consolidation", *Izvestia VNIG*, Vol. 102, pp. 114-122.
- Florine, V. A. (1961), "Principes de la mécanique des sols", *Gosstroïzdat*, Vol. II, 543 pp.
- Kertchman, V. I. (1974), "Problème relatif aux pressions de contact dans la théorie de la consolidation d'un milieu saturé d'eau", *Izvestia AN SSSR, MTT*, N 3, pp. 102-109.
- Vinogradova, A. M. (1974), "Influence des propriétés rhéologiques du béton et du sol sur le comportement des dalles de fondation", *Izvestia VNIG*, Vol. 104, pp. 146-209.
- Schapery, R. A. (1965), "A method of viscoelastic solutions", *Journ. of Franklin Inst.*, Vol. 279, N 4, pp. 286-289.