

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.

Pénétration dans le sol des hautes températures industrielles de longue durée

Long term penetration of heat into soil

par PIETKOWSKI Radzimir, D. Sc., Professeur à l'Université Polytechnique de Varsovie, Warszawa, Poznanska 24 m. 21, Pologne

Sommaire

Le rapport décrit le cas de l'action continue d'une température de 900 °C et de sa pénétration dans le sol pendant plus de 10 ans. Une méthode de calcul à base thermodynamique est présentée, qui permet d'évaluer les températures des sols aux diverses profondeurs en fonction de temps.

Au cours de la dernière guerre, les Allemands, en vue d'augmenter, dans une cokerie de Haute-Silésie, la production de gaz, avaient agrandi le conduit principal de gaz porté à la température de + 900 °C, en supprimant au-dessous de ce conduit un canal parallèle pour l'air destiné à l'isolation du sol. Le sol devint ainsi extrêmement surchauffé et complètement desséché, ce qui causa d'importantes fissures et affaissements, et par suite de dangereuses crevasses dans le bâtiment de la cokerie.

Une question se posait alors : quelle profondeur la chaleur avait-elle intéressé et à quelle température le sol avait-il été porté ? Cette question conduisit à l'étude de la pénétration de la chaleur dans le sol, exposée dans le présent rapport.

On a cherché la solution du problème par l'application de l'équation :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\gamma} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (1)$$

déduite de la formule fondamentale de Fourier, où on a :

- θ : température en un point quelconque, °C ;
- t : temps, h ;
- λ : conductivité calorifique, kcal/h m °C ;
- c : chaleur spécifique, kcal/tonne °C ;
- γ : densité apparente du sol, tonne/m³ ;

$$a = \frac{\lambda}{c\gamma} : \text{conductivité de température, m}^2/\text{h} ;$$

x : distance de pénétration de la chaleur, m.

En supposant la transmission de la chaleur dans la direction unique en profondeur, on peut trouver la solution générale de l'équation différentielle (1) comme suit :

$$\theta = \theta_I - (\theta_I - \theta_{II}) \Sigma B \sin(nx + b) A e^{-n^2 at} \quad (2)$$

où :

- θ_I : température de chauffage, °C ;
- θ_{II} : température naturelle du sol, °C ;
- A, B, b : grandeurs constantes ;
- n : chiffre lié avec les termes de série embrassée par le signe Σ .

L'analyse mathématique de l'équation (2), limitée au premier terme de la série, conduit à l'équation définitive générale :

Summary

The author describes a case when gases at a temperature of 900 °C heated soil at ground level and penetrated into it over a period of ten years. He proposes a method of computation based on thermodynamic principles, which enables the temperature of soils to be determined at various depths as a function of heating time.

$$\theta = \theta_I - (\theta_I - \theta_{II}) \left[\frac{4}{\pi} \sin \left(\frac{\pi}{2x_0} x \right) e^{-\left(\frac{\pi}{2x_0} \right)^2 at} \right] \dots \quad (3)$$

où x_0 signifie l'extrême distance de pénétration et d'influence de la chaleur.

En appliquant cette équation, on a obtenu le diagramme, Fig. 1, pour le sol sec aux caractéristiques suivantes :

$$\lambda = 0.30 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{C} ;$$

$$c = 200 \text{ kcal/tonne } ^\circ\text{C} ;$$

$$\gamma = 1.7 \text{ ton./m}^3 ;$$

$$a = \frac{\lambda}{c\gamma} = 0.00088 \text{ m}^2/\text{h}.$$

Ecart des températures :

à la surface de contact : $\theta_I = 900$ °C ;
température naturelle du sol $\theta_{II} = 8$ °C.

On profite en plus de la dépendance :

$$\frac{at}{x_0^2} = 0.1129, \quad \dots \quad (4)$$

qui a été déduite des formules (2) et (3) en tenant compte de trois termes de la série, ce qui assure une exactitude supérieure à 0.03 pour cent.

L'équation (4) démontre que la profondeur de pénétration de la chaleur dépend des caractéristiques du sol et du temps d'action de la chaleur, mais ne fait pas intervenir l'écart des températures.

Le diagramme, Fig. 1, montre que la profondeur de pénétration de 15 m serait atteinte après 28 870 h = 40 mois = 3 ans 4 mois d'action continue de la chaleur. Dans le cas de la cokerie mentionné au début du rapport, l'action du feu durait environ 10 ans, mais on devait prendre en considération, que le conduit de feu avait une largeur de 1.50 m et que le flux de chaleur se dispersait non seulement en profondeur, mais aussi sur les côtés. Considérant cette circonstance, l'auteur a trouvé à propos d'introduire dans

l'équation (3) l'exposant $-\frac{\pi^2}{4x_0^2} \cdot \frac{at}{3x_0}$ au lieu de $-\frac{\pi^2}{4x_0^2} \cdot at$. La

modification introduite de cette manière a amené, après 10 ans d'action du feu, à la température calculée de 265 °C à la profondeur de 5 m et à 630 °C à la profondeur de 2 m.

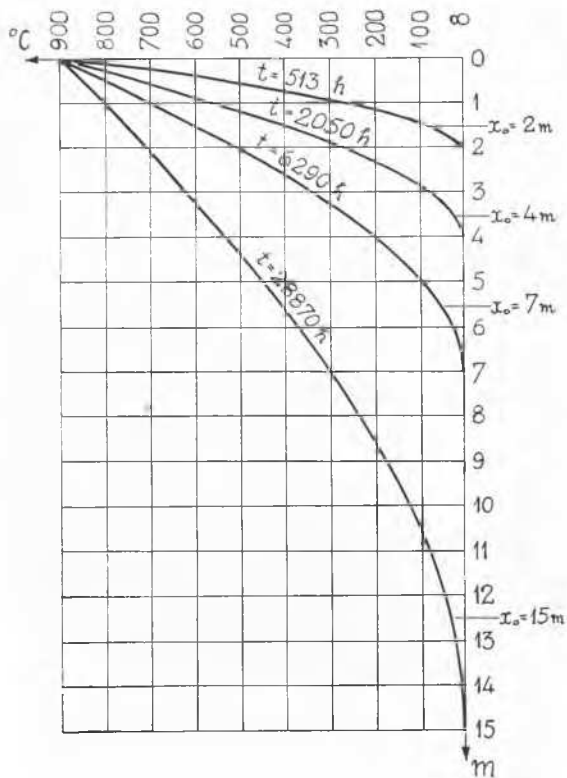


Fig. 1 Pénétration de chaleur dans le sol en fonction du temps.
Penetration progress of heat with the time.

On peut trouver dans la nature confirmation, que les sols transmettent la chaleur jusqu'à de grandes profondeurs et peuvent la retenir longtemps. L. F. Cooling et W. H. Ward citent un cas (Proceed. of the 2nd Intern. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., II, 162), où une briquetterie fondée sur l'argile d'Oxford travailla sans cesse pendant trente ans et fut ensuite démolie. On a observé 7 ans plus tard la température de 70 °C à la profondeur de 4.80 m et 390 °C à la profondeur de 10.5 m. Ici les auteurs supposent, à juste raison d'ailleurs, que des inclusions organiques contenues dans le sol (17 per cent en poids) ont contribué à augmenter la chaleur à cause de leur lente combustion.

L'auteur a observé des températures élevées dans un puits de reconnaissance, foncé à 12 m dans un ancien remblai de scories répandues à l'état chaud 15 ans avant.

Evidemment, la pénétration de la chaleur dans le sol et son écoulement ultérieur sont des phénomènes soumis aux mêmes lois et sont lents.

Lorsqu'on rencontre une nappe d'eau souterraine, alors la transmission de la chaleur devient très lente par rapport à un sol sec. En effet, la chaleur spécifique du sol croît très

sensiblement dans le sol saturé d'eau et par suite il faut lui procurer plus de calories par unité de volume. Il faut ajouter que lorsque la température du sol monte et franchit 100 °C, l'eau du sol passe de l'état liquide à l'état gazeux. Pour cette transformation il faut une grande quantité de calories due à la chaleur de vaporisation. Ici apparaît la deuxième raison de ralentissement de la pénétration de la chaleur.

En étudiant le flux de chaleur dans une direction unique, on peut parvenir à l'évaluation numérique des températures en un point quelconque dans le sol, même en présence d'un sol saturé d'eau. Evidemment, on ne peut estimer le chauffage du sol, qui franchit la température de 100 °C, que lorsqu'il n'y a pas de percolation d'eau.

Si le sol est saturé d'eau, il faut agir alors dans les calculs de telle manière, que le flux de la chaleur soit ajusté en chaque moment mutuellement sur tout son parcours, notamment, pour la région sèche, pour la barrière d'évaporation et pour la région humide, où la température est au-dessous de 100 °C.

Il serait trop difficile d'exposer ici les détails de calcul. On doit se borner à citer les résultats obtenus dans le cas, où le niveau de la nappe d'eau se trouvait à 1.77 m au-dessous du niveau de terrain. On a admis pour le sol sec les valeurs :

$$\lambda = 0.30 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{C};$$

$$a = 0.00088 \text{ m}^2/\text{h}.$$

pour le sol saturé d'eau :

$$\text{porosité } n = 0,35;$$

$$\lambda = 1.8 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{C};$$

$$a = 0.00259 \text{ m}^2/\text{h}.$$

On a obtenu la marche suivante de la température de 100 °C, en admettant au niveau du terrain la température $\theta_I = 900$ °C et la température naturelle du sol $\theta_{II} = 8$ °C :

Profondeur sous la surface du terrain	Durée de l'action continue de feu	
	heures	jours
cm		
177	800	33
212	2 300	96
248	4 100	170
283	6 200	258
425	17 300	720

En comparant ces chiffres avec le diagramme, Fig. 1, on aperçoit un très important ralentissement de la pénétration de la chaleur dans le sol saturé d'eau.

La méthode de calcul exposée dans ce rapport permettra d'éclaircir dans beaucoup de cas la question d'influence des hautes températures dans les établissements industriels (hauts-fourneaux, cokeries, etc), tendant à pénétrer dans les sols sous-jacents.