

STEFAN BEDNARCZYK

Université Technique de Gdańsk

Institut des Constructions Hydrauliques — Gdańsk

PROPAGATION DES INTUMESCENCES DANS LES CANAUX DÉCOUVERTS DES CENTRALES D'ACCUMULATION

Table des matières: 1. Introduction, 2. Types des ondes. 3. Ondes positive
4. Ondes négatives, 5. Atténuation de l'onde, 6. Superposition des ondes apparaissant
dans les canaux de la centrale d'accumulation; Streszczenie; Summary; Bibliographie.

1. INTRODUCTION

La situation énergétique qui existe actuellement en Pologne nous oblige à développer et à construire des centrales d'accumulation. Les centrales construites récemment sont équipées en machines réversibles, dont la machine hydraulique joue le rôle de la turbine ou de la pompe. Une autre caractéristique de nos aménagements d'accumulation consiste à équiper presque chaque centrale d'un canal découvert supérieur ou inférieur. Le fonctionnement très variable d'une centrale d'accumulation pendant une journée de travail provoque dans les canaux l'apparition d'intumescences assez compliquées et par suite de perturbation d'écoulement énormes. Dans cette situation, pour l'exploitation correcte des centrales existantes et pour la construction de nouvelles centrales il a fallu reprendre les études de régime transitoire. Dans le cadre des études globales nous avons élaboré des modèles mathématiques du régime transitoire rapidement variable dans les canaux découverts, grâce auxquels nous pouvons déterminer les grandeurs hydrauliques des intumescences provoquées par les machines réversibles. C'est ce que nous présentons dans ce rapport.

2. TYPES DES ONDES

Au moment où le débit de la centrale hydraulique change rapidement, une onde de translation prend tout à coup naissance dans le canal. Elle se propage le long du canal en modifiant brusquement le tirant d'eau

et le débit, provoquant par la suite une variation de la charge du canal. Suivant le caractère du changement de régime de la machine hydraulique, nous avons les quatre types d'ondes, positive d'amont, positive d'aval, négative d'amont et négative d'aval (tabl. 1).

Du point de vue mathématique il n'y en a que deux: une onde positive et une onde négative.

Table 1

Changement du régime de la machine hydraulique	Onde dans le canal	
	supérieur	inférieur
Arrêt turbine pompe	positive d'aval négative d'amont	négative d'amont positive d'aval
Démarrage turbine pompe	négative d'aval négative d'amont	positive d'amont négative d'aval

3. ONDES POSITIVES

Quel que soit le type d'ondes positives (amont ou aval), elles se forment et se propagent presque de la même manière dans un canal énergétique. Au début, l'onde a un profil doux (fig. 1), qui dépend direc-

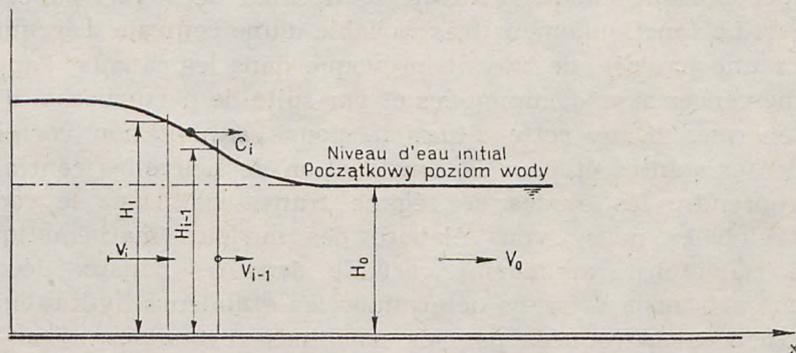


Fig. 1. Onde positive sans oscillations secondaires

Ryc. 1. Fala dodatnia bez oscylacji

tement de la loi de changement du débit par la machine. Pour calculer ces grandeurs hydrauliques nous avons créé un modèle mathématique assez simple. En partant du théorème d'énergie spécifique se rapportant au mouvement relatif, nous avons la formule suivante

$$H_{i-1} + \frac{w_{i-1}^2}{2g} = H_i + \frac{w_i^2}{2g} = \text{const.} \quad (1)$$

où: H — tirant d'eau

w — vitesse de l'eau en mouvement relatif,

g — accélération de la gravité.

Et en tenant compte de l'équation de continuité du débit, nous avons la formule donnant la célérité d'une onde élémentaire

$$c_i = v_{i-1} \pm \varnothing_i \sqrt{g H_{ei}} \quad (2)$$

où: v — vitesse de l'eau en mouvement absolu,

H_e — tirant d'eau moyen,

\varnothing — coefficient de célérité d'onde

Le coefficient de la célérité d'onde est décrit par la formule

$$\varnothing_i = \sqrt{\frac{2 \frac{\Delta H_i}{H_{ei}}}{1 - \left(\frac{S_{i-1}}{S_i}\right)^2}} \quad (3)$$

où: H — hauteur d'onde

S — aire de la section transversale mouillée.

Elle donne des valeurs un peu inférieures à celles venant de la formule classique de St. Venant [9] pour les mêmes hauteurs d'onde. Cette observation est prouvée par les résultats du calcul d'une intumescence se propageant dans un canal à section rectangulaire (voir tabl. 2).

Table 2

$\frac{\Delta H_i}{H_{i-1}}$	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20
Formule St. Venant	1.0150	1.0299	1.0449	1.0598	1.0747	1.0896	1.1044	1.1193	1.1341	1.1489
Formule (3)	1.0148	1.0297	1.0444	1.0590	1.0735	1.0878	1.1021	1.1162	1.1302	1.442

Une onde positive change plus ou moins rapidement son profil sur une longueur du canal. La rapidité de transformation du profil d'onde dépend directement de la variation du débit sortant des machines hydrauliques. Actuellement nous ne disposons d'aucun modèle mathématique qui nous permettrait de calculer le développement du profil d'onde sur la distance transitoire.

A une certaine distance du canal les oscillations secondaires apparaissent. Elles prennent naissance grâce au fait que les éléments de l'eau

se trouvant au sommet ont une vitesse de propagation supérieure à celle des éléments se trouvant au pied d'une onde positive.

Suivant les travaux de M.M. Serre [13], Sandover [10] et autres [7, 8, 11, 12] nous avons élaboré deux modèles mathématiques d'une onde de translation accompagnant des oscillations secondaires développées. Nous examinons toujours la translation d'une onde positive dans les coordonnées mobiles x, z se déplaçant le long du canal avec la célérité d'onde. Leur origine est confondue avec le point mobile où se produit la variation du débit.

Notre modèle en première approximation admet qu'une onde positive développée est constituée par un train d'ondes solitaires qui se suivent (fig. 2). La distance entre elles est déterminée par le théorème de la conservation du volume d'intumescence. On ne prend pas en considération les pertes de charge.

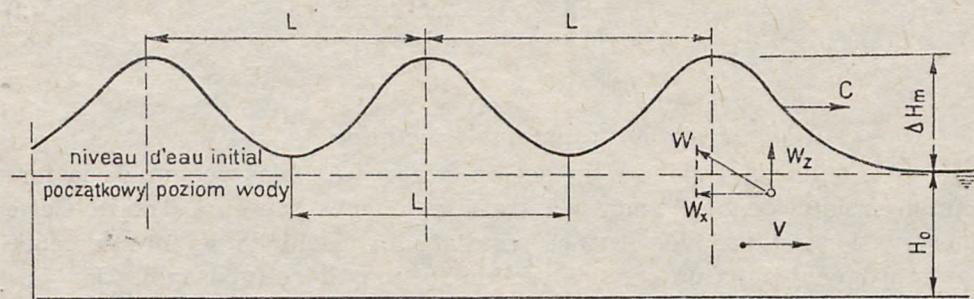


Fig. 2. Modèle d'onde première approximation — train d'ondes solitaires

Ryc. 2. Model fali w pierwszym przybliżeniu — ciąg fal pojedynczych

En partant des équations fondamentales d'Euler on trouve des formules pour l'énergie spécifique et la quantité de mouvement en régime relatif comme l'a fait M. Serre dans son travail [13] pour le régime réel. Ensuite en appliquant le théorème de l'énergie ou celui de la quantité de mouvement en régime relatif nous trouvons les équations différentielles du profil d'ondes solitaires, qui sont dans un canal à section:

a) rectangulaire:

$$\frac{d\xi}{d\eta} = \frac{\sqrt{3}}{\varnothing_0} \sqrt{\varnothing_0^2 - \xi} (\xi - 1) \quad (4)$$

cette formule est intégrable; nous avons donc

$$\eta = \pm \frac{2\varnothing_0}{\sqrt{3}(\varnothing_0^2 - 1)} \operatorname{arc\,tg\,h} \sqrt{\frac{\varnothing_0^2 - \xi}{\varnothing_0^2 - 1}} \quad (5)$$

b) trapézoïdale:

$$\frac{d\xi}{d\eta} = \frac{z_0 \xi + 1}{z_0 \xi + 0,5} \left\{ \frac{1 + 2z_0}{9 \varnothing_0^2 (1 + z_0)^3} \left[4z_0^2 (\xi^2 - \xi^5) + 10z_0 (\xi^2 - \xi^4) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{19}{3} (\xi^2 - \xi^3) - \frac{5}{9z_0} \xi^2 \ln \frac{z_0 \xi + \frac{4}{3}}{z_0 + \frac{4}{3}} \right] + \frac{1}{8(z_0 + 1)} \left[1 + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\left(1 + \frac{2}{3}z_0\right)(1 + 2z_0)}{2 \varnothing_0^2 (1 + z_0)^2} \right] \cdot \left[27z_0 \xi^2 \ln \xi + 5z_0 \xi^2 \cdot \ln \frac{z_0 \xi + \frac{4}{3}}{z_0 + \frac{4}{3}} - \right. \right. \\ \left. \left. - 12(\xi - \xi^2) \right] + \frac{15}{8} \left[z_0 (\xi - \xi^2 + \frac{2}{5}(1 - \xi^2) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{3}{4} z_0^2 \xi^2 \ln \xi \frac{z_0 + \frac{4}{3}}{z_0 \xi + \frac{4}{3}} \right] \right\}^{1/2} \quad (6)$$

c) parabolique:

$$\frac{d\xi}{d\eta} = \frac{1}{e^{1/2} (1 + 2e)^{1/2}} \left\{ \frac{\xi^{2/e(e^2+e-1)}}{2e^2 + 2e - 3} \left[\frac{2}{\varnothing_0^2 (4 - 2e - e^2)} - \frac{1}{e^2 + e - 1} \right] - \right. \\ \left. - \frac{2 \xi^{1/e(2+e)}}{\varnothing_0^2 (1 + e) (4 - 2e - e^2)} - \frac{\xi^{1/2}}{2e^2 - 2e - 3} \left[\frac{2}{\varnothing_0^2 (1 + e)} + 1 \right] + \right. \\ \left. + \frac{1}{e^2 + 1 - 1} \right\}^{1/2} \quad (7)$$

$$\text{où } \xi = \frac{H}{H_0}$$

$$\eta = \frac{x}{H_0}$$

$$\varnothing_0 = \left| \frac{v - c}{\sqrt{g H_{e0}}} \right| \quad (8)$$

$$z_0 = \frac{m H_0}{B_0} \quad e = \frac{H_e}{H} = \frac{H_{e0}}{H_0}$$

où H_e — tirant d'eau moyen,

B_0 — largeur au radier du canal,

m — coefficient de la pente de la berge.

Les formules ci-dessus nous permettent de calculer la hauteur maximale et moyenne, ainsi que la célérité des premières ondulations si nous connaissons le débit d'onde ΔQ dans la section du canal examinée.

Les nombreuses observations que nous avons faites nous ont permis de tirer une conclusion différente de celle de M.M. Sandover, Taylor et Pouzanov [10, 11, 7]. Nous estimons que, en principe, les pertes de charge

sont provoquées par une grande perturbation de la vitesse d'écoulement et grâce à ces pertes de charge il y a atténuation et enfin disparition des ondulations secondaires à une certaine distance du front d'onde positive. Les perturbations de la vitesse et du débit sont telles que dans les cas d'une onde positive d'aval, il y a changement de la grandeur et du sens de l'écoulement (voir fig. 3).

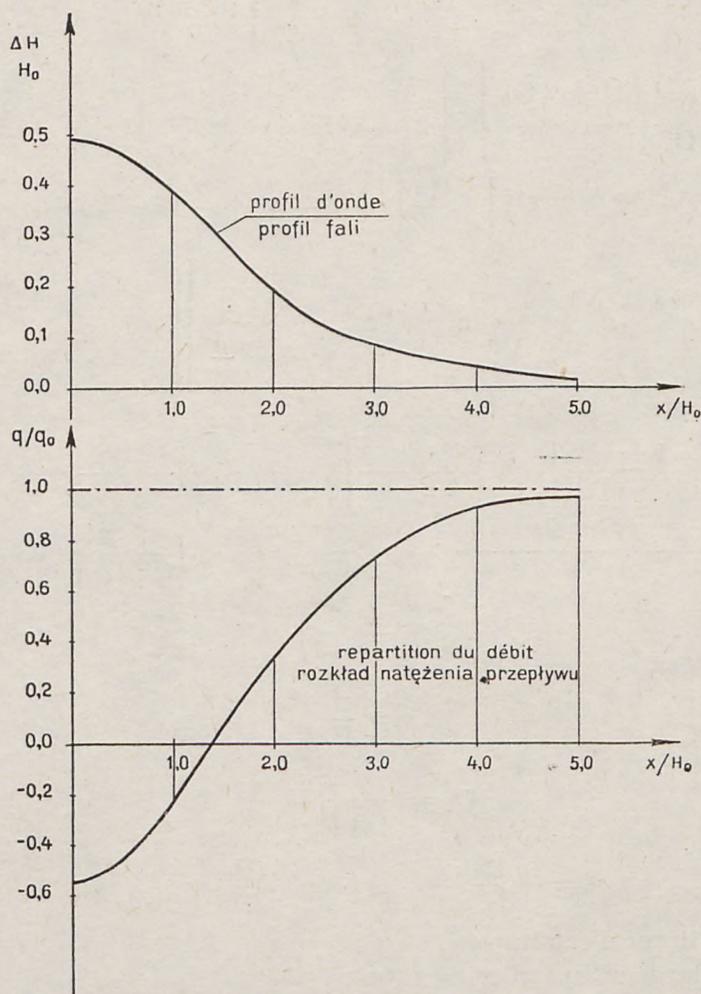


Fig. 3. Répartition du débit le long d'une onde positive

Ryc. 3. Rozkład natężenia przepływu na długości fali dodatniej

Notre modèle en seconde approximation prend en considération les pertes de charge de façon globale et il se base sur le fait que le coefficient de pertes de charge est déterminé a priori le long d'une onde. En supposant que les pertes de charge sont fonction du carré de la vitesse relative dans

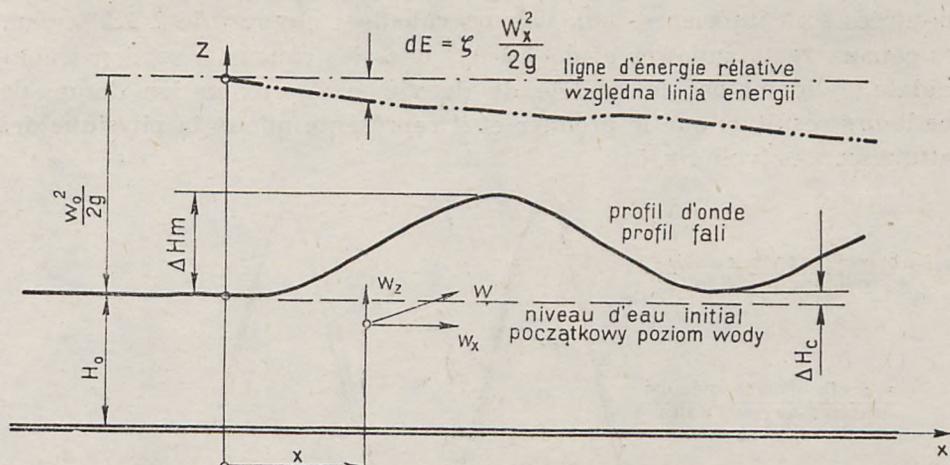


Fig. 4. Modèle d'onde en seconde approximation

Ryc. 4. Model fali w drugim przybliżeniu

n'importe quelle section de l'onde (fig. 4) nous avons obtenu l'équation différentielle du profil d'onde dans les canaux rectangulaires sous la forme

$$\frac{d\xi}{d\eta} = \frac{3}{\Phi_0^2} (1 - \xi) [\xi^2 - (1 + \Phi_0^2)\xi + \Phi_0^2(1 + \zeta)]^{1/2} \quad (9)$$

où ζ — coefficient de pertes de charge qui s'expriment par la formule

$$E = \zeta \frac{W_x^2}{2g} \quad (10)$$

Notre formule nous permet de calculer numériquement le profil d'onde à partir du premier sommet et de déterminer la hauteur d'onde maximale:

$$\text{minimale } \frac{\Delta H_m}{H_0} = \frac{\Phi_0^2 - 1}{2} + \sqrt{\frac{(\Phi_0^2 + 1)^2}{4} - \Phi_0^2(\zeta_m + 1)} \quad (11)$$

$$\frac{\Delta H_c}{H_0} = \frac{\Phi_0^2 - 1}{2} - \sqrt{\frac{(\Phi_0^2 + 1)^2}{4} - \Phi_0^2(\zeta_c + 1)} \quad (12)$$

moyenne (stabilisée):

$$\frac{\Delta H_s}{H_0} = \frac{\Phi^2 - 1}{2} \quad (13)$$

Les études expérimentales effectuées dans le canal à section rectangulaire et dans les canaux industriels à section trapézoïdale en général confirment notre étude théorique. Cependant en ce qui concerne les hauteurs d'onde maximale et moyenne et la célérité d'onde, les valeurs

mesurées sont inférieures aux valeurs calculées environ de 2 à 5% dans les canaux rectangulaires et de 4 à 8% dans les canaux à section trapézoïdale. Evidemment le modèle de deuxième approximation donne de meilleurs résultats que le premier et il représente mieux la physique des intumescences (voir fig. 5).

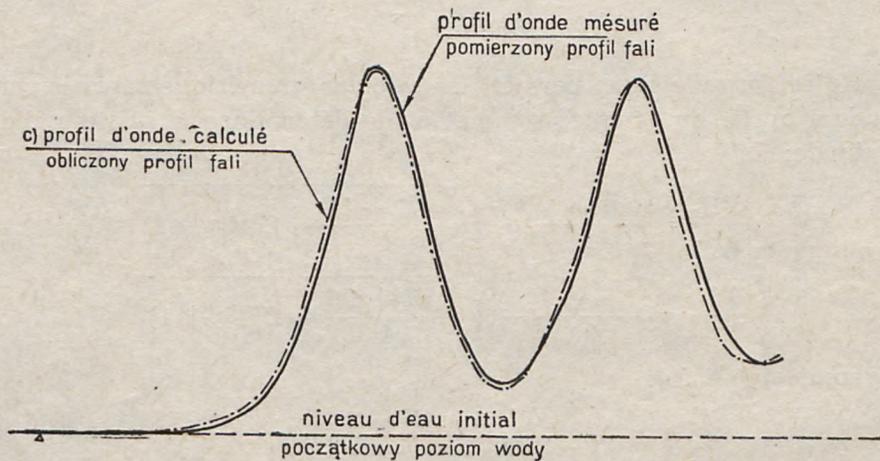
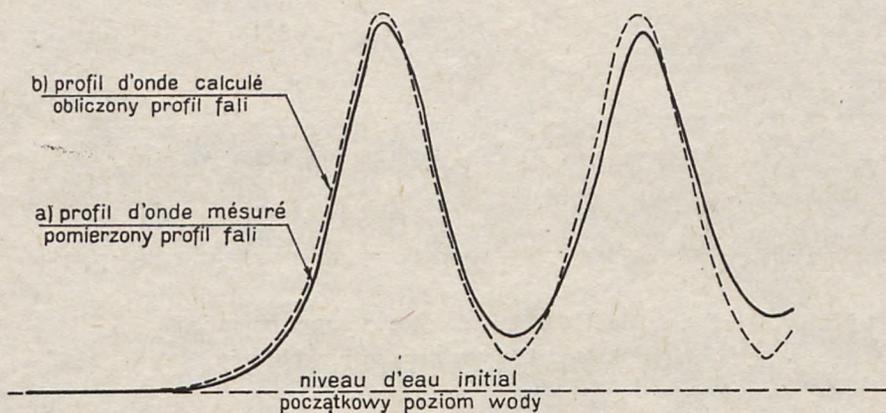


Fig. 5. Profil d'onde positive avec des oscillations secondaires: a) mesuré, b) calculé d'après la théorie en première approximation, c) calculé d'après la théorie en seconde approximation

Ryc. 5. Profil fali dodatniej z oscylacjami: a) pomierzony, b) obliczony według teorii w pierwszym przybliżeniu, c) obliczony według teorii w drugim przybliżeniu

4. ONDES NÉGATIVES

Chaque onde négative se propageant provoque la diminution du tirant d'eau (fig. 6).

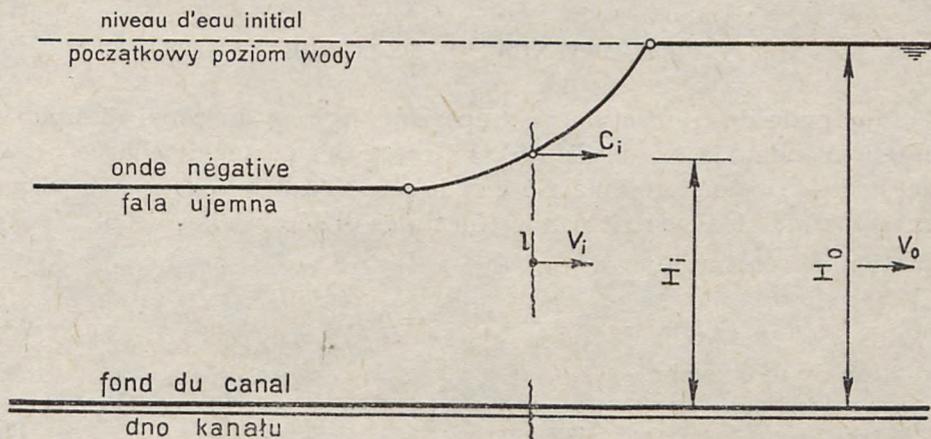


Fig. 6. Profil d'onde négative

Ryc. 6. Profil fali ujemnej

D'après de nombreuses observations faites au cours des expériences, nous admettons la formule de St. Venant pour la célérité d'un élément de l'onde négative

$$c_i = v_i \pm \sqrt{g H_{ei}} \quad (14)$$

D'autre part nous estimons que la vitesse moyenne d'écoulement dans une section transversale du canal est déterminée par l'équation différentielle

$$dv = \sqrt{g} \frac{dH}{\sqrt{H_e}} \quad (15)$$

Dans le canal à section transversale parabolique l'équation ci-dessus peut être facilement intégrée d'où la formule suivante pour la célérité d'un élément de l'onde

$$c_i = v_0 \pm \left[\sqrt{eg} + 2 \sqrt{\frac{g}{e}} \right] \sqrt{H_i} \mp 2 \sqrt{\frac{g}{e}} H_0 \quad (16)$$

A la sortie de la centrale la répartition du débit passant par les machines est connue, donc il n'y a pas de difficulté pour calculer le profil d'onde, la hauteur et la vitesse moyenne d'onde grâce aux formules (15) et (16) et en tenant compte des équations de continuité. Le long du canal il y a une atténuation de l'onde et le profil d'onde s'allonge. Suivant cha-

que point du profil d'onde initial et en tenant compte des conditions imposées par le mouvement non permanent on peut trouver la variation du tirant d'eau dans le canal.

5. ATTÉNUATION DE L'ONDE

Une onde de translation se propageant le long du canal diminue sa hauteur d'onde ΔH et son débit ΔQ à cause des pertes de charge provoquées par le frottement. En arrière de la tête d'onde le régime non permanent apparaît. Il est décrit par les formules différentielles de St. Venant équation de continuité:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \quad (17)$$

équation du mouvement

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \alpha v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} = I - J \quad (18)$$

Pour calculer les intumescences dans les canaux énergétiques nous transformons les équations de St. Venant aux dérivées partielles en équations aux dérivées totales grâce à la méthode des caractéristiques.

Au point d'intersection du profil d'onde négative et du profil d'eau en mouvement non permanent (points M_{i-1} , M_i sur la fig. 7) nous avons l'équation du régime transitoire

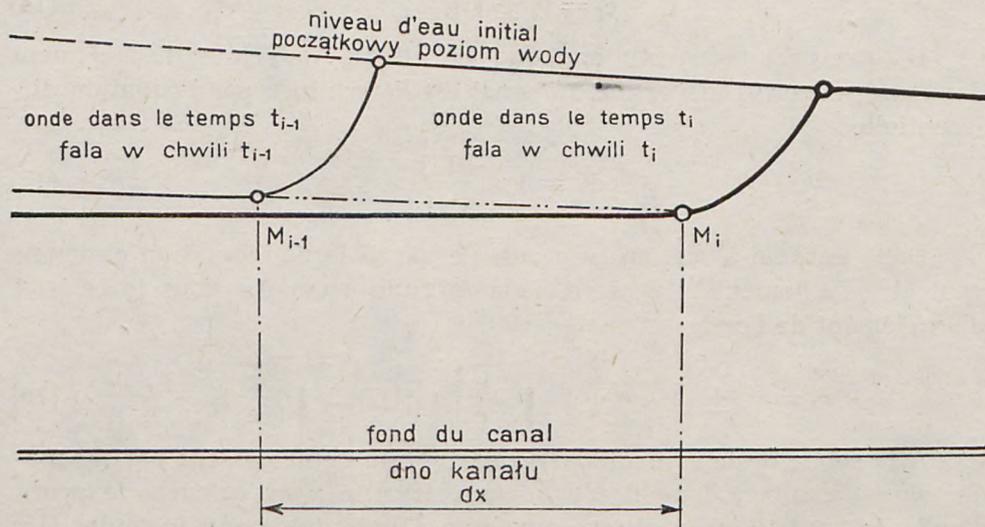


Fig. 7. Propagation d'une onde négative

Ryc. 7. Propagacja fali ujemnej

$$d v - \left(\frac{\alpha - 1}{2} v \pm \beta \sqrt{g H_e} \right) \frac{d H}{H_e} - \left[g (I - J) + \kappa v \left(\frac{\alpha - 1}{2} v \pm \beta \sqrt{g H_e} \right) \right] d t = 0 \quad (19)$$

ou

$$d t = \frac{d x}{\frac{\alpha + 1}{2} v \pm \beta \sqrt{g H_e}} \quad (20)$$

$$= \frac{1}{S} \left(\frac{d S}{d x} \right) H = \text{const.} = \left(\frac{d \ln S}{d x} \right) H = \text{const.} \quad (21)$$

$$\beta = \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha - 1}{2} \right)^2 \frac{v^2}{g H_e}} \quad (22)$$

Pour calculer l'atténuation d'une onde positive nous simplifions le profil d'onde (voir fig. 8) en prenant en considération le débit moyen ΔQ

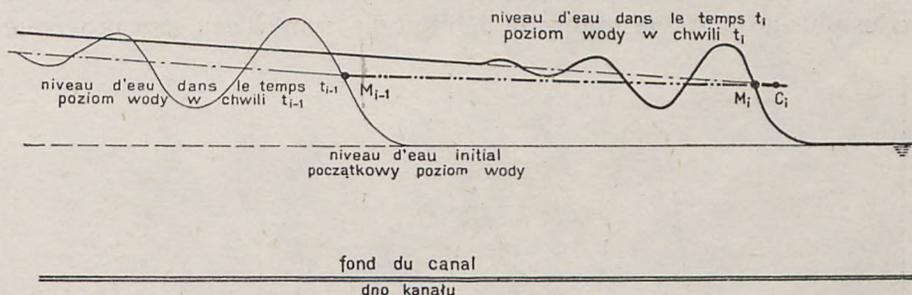


Fig. 8. Propagation d'une onde positive
Ryc. 8. Propagacja fali dodatniej

et la hauteur d'onde moyenne ΔH_s . Au point d'intersection du niveau d'eau pondéré (moyen imaginé) en mouvement non permanent et du profil d'onde sur la hauteur moyenne nous avons l'équation du régime transitoire:

$$d v + (c - \alpha v) \frac{d H}{H_e} + \left(1 - \frac{\alpha v}{c} \right) \kappa v d x - g (I - J) \frac{d x}{c} = 0 \quad (23)$$

où: c — célérité moyenne d'une onde positive.

Suivant les sections transversales du canal déterminées par la position du point M et en faisant l'intégration de l'équation du régime non permanent (19) ou (22), tout en tenant compte de la formule décrivant la tête d'onde on trouve les valeurs du débit Q et du tirant d'eau H (point M sur la fig. 8 et 9) qui donnent ensuite la possibilité de trouver le profil d'onde et le niveau d'eau en régime transitoire.

6. SUPERPOSITION DES ONDES APPARAISSANT DANS LES CANAUX DE LA CENTRALE D'ACCUMULATION

Une onde de translation qui suit le canal supérieur ou inférieur se réfléchit contre le réservoir puis contre le bâtiment de la centrale ou contre la prise d'eau où elle a pris naissance. D'après les lois de la réflexion, une onde de translation change son signe à l'entrée du réservoir et conserve son signe à la sortie de la centrale. L'onde positive devient négative en se réfléchissant à l'entrée du réservoir, elle devient aussi positive à la sortie de la centrale et vice-versa.

Bien entendu chaque onde qui suit le canal et qui se réfléchit modifie sa forme et sa grandeur.

Pendant qu'une onde provoquée par la centrale suit le canal et se réfléchit, les machines réversibles peuvent créer une onde nouvelle qui doit se superposer à l'onde déjà existante. Le moment d'apparition de la nouvelle onde influe sensiblement sur la grandeur de l'onde superposée qui pourrait avoir la grandeur diminuée ou augmentée. Nos études prouvent que les plus grandes variations du débit et du tirant d'eau sont provoquées

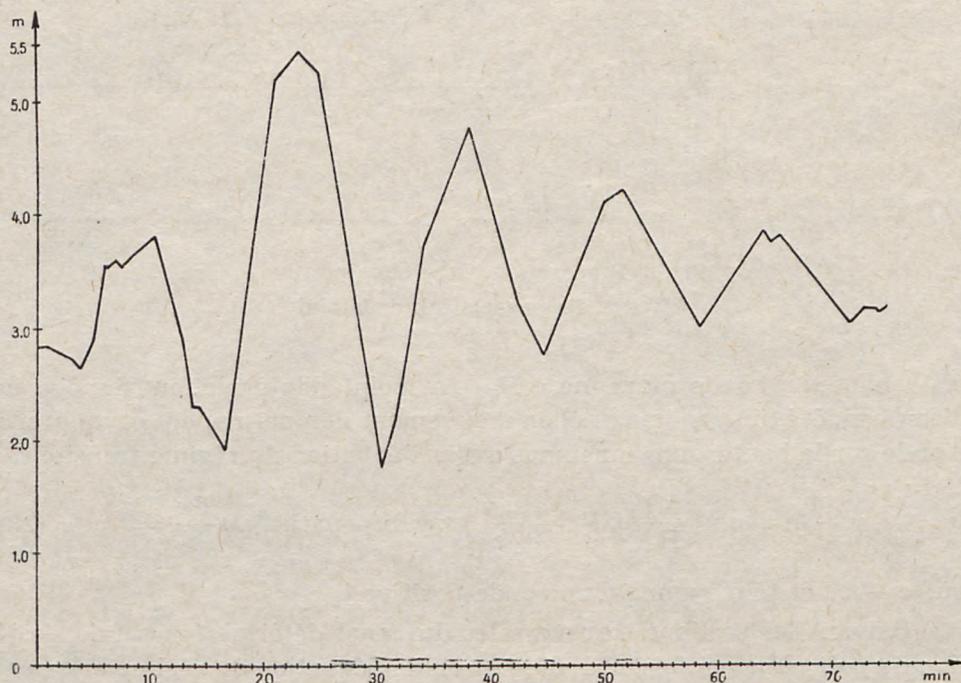


Fig. 9. Variation du niveau d'eau dans un canal supérieur de la centrale d'accumulation provoqué par le passage de pompage au turbinage

Ryc. 9. Zmiany poziomu wody w kanale górnym elektrowni akumulacyjnej spowodowane przez przejście z pracy pompowej na turbinową

par le passage du pompage au turbinage et ensuite par le déclenchement des turbines à la condition que:

- a) le démarrage et la recharge des turbines se fassent juste après l'arrêt du pompage ou au moment de la deuxième réflexion de la première onde contre le bâtiment de la centrale,
- b) l'arrêt des turbines se fasse au moment où l'onde superposée et venant des deux premières manoeuvres se réfléchit pour la première fois contre le bâtiment de la centrale ou contre la prise d'eau.

Notre étude théorique a été confirmée, dans une certaine mesure au cours de l'exploitation de la centrale d'accumulation de Żydowo.

Les mesures que nous avons faites sur le canal supérieur (fig. 9) de cette centrale montrent que les ondes de translation peuvent être très dangereuses pour le canal et son revêtement et par suite pour toute la centrale.

STEFAN BEDNARCZYK

Politechnika Gdańska

Instytut Hydrotechniki — Gdańsk

PROPAGACJA FAL TRANSLACYJNYCH W KANAŁACH OTWARTYCH ELEKTROWNI AKUMULACYJNYCH

Streszczenie

Budowane w Polsce elektrownie akumulacyjne charakteryzują się tym, że z reguły są wyposażone w hydrauliczne maszyny rewersyjne, do których prowadzi się wodę bądź to za pomocą kanału górnego, bądź to za pomocą kanału dolnego.

Zmienna praca maszyn hydraulicznych jest bezpośrednią przyczyną powstania w tych kanałach fal translacyjnych prostych i złożonych. Fale dodatnie (napełnienia i piętrzenia) w momencie powstawania mają profil stosunkowo łagodny. Jest on opisany układem równań (1) i (2). W miarę oddalania się od elektrowni powstają oscylacje falowe (ryc. 2 i 3). Tworzą się dwa modele teoretyczne tych fal. Model pierwszego przybliżenia jest opisany równaniami (4), (6) i (7). Model drugiego przybliżenia, uwzględniający straty hydrauliczne w ruchu falowym, jest opisany równaniem (9). Fale ujemne posiadają zawsze profil łagodny, który w kanale parabolicznym opisany jest równaniem (16). Zjawisko rozplywu fal i zmniejszania ich wielkości hydraulicznych zostało opisane równaniami wyprowadzonymi z równań St. Venanta. Równanie (19) opisuje ruch nie ustalony, towarzyszący czole fali ujemnej, a równanie (23) — fali dodatniej.

Jak wykazują badania, najbardziej groźne fale złożone powstają w czasie awaryjnego przejścia z pracy pompowej na turbinową. Tezę tę potwierdzają wyniki pomiarów przedstawione na ryc. 9.

STEFAN BEDNARCZYK

Gdańsk Technical University

Institute of Hydro-Engineering — Gdańsk

PROPAGATION OF TRANSLATION WAVES IN OPEN CANALS OF PUMPED-STORAGE PLANTS

Summary

In the pumped-storage plants built in Poland, the equipment generally consists of reversible pump-turbine units and the water is brought to them by open canal from the upper or from the lower reservoir.

The alternating work of hydraulic machines in plant is the main cause of translation waves which form in the canals mentioned. These waves are of simple and complex character. At the moment of forming of positive waves, their profiles are fairly gentle. This is described by equations (1) and (2). The formation of wave oscillation takes place some distance, from the power plant (Figs. 2 and 3). Two mathematical models of these waves were formulated. The model of the first approximation was given by equations (4), (6), (7). The model of the second approximation in which hydraulic losses in wave movement were taken into account, was given by equation (9). The negative waves always have a gentle profile which is described in parabolic canals by equation (16). The phenomena of the dissipating of waves and decreasing of their hydraulic parameters were described by equations drawn from St. Venant equations. The equation (19) describes the unsteady flow of head of the negative wave and equation (23) for the head of the positive wave. As was observed during field investigations, the most dangerous are complex waves which take place during emergency change-over from pumping to the generating of energy (turbine work). The results of such investigations are shown in Figs. 9.

BIBLIOGRAPHIE

LITERATURA

1. Bednarczyk S., *O kształcie i wielkościach fal translacyjnych wywołanych nagłą zmianą przepływu w kanałach otwartych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej 131, 1968, Budownictwo Wodne, XII.
2. Bednarczyk S., Thirriot C., *Etude théorique des oscillations secondaires dans les canaux à profil rectangulaire en l'absence de perte de charge*, Compte Rendus de l'Académie des Sciences, Paris 1964, 251, 3441—3444.
3. Bednarczyk S., Thirriot C., *Etude théorique des oscillations secondaires dans les canaux rectangulaires compte tenu des pertes de charge*, Compte Rendus de l'Académie des Sciences, Paris 1964, 259, 4226—4228.

4. Benjamin T.B., Lighthill L.J., *On cnoidal waves and bares*, Proceedings of the Royal Society 224, 1954, 488.
5. Boussinesque J., *Théorie de l'écoulement tourbillonnant et tumultueux des liquides dans les lits rectilignes à grande section*, 2 memoires, Paris 1897.
6. Favre H., *Etude théorique et expérimentale des ondes de translations dans les canaux découverts*, Paris 1935.
7. Puzanov A., *Struktura vlnového prudění v otevřených korytech*, Rozpravy CSAV, 1962, c. 2.
8. Puzanov A., Elias V., *Velocity and pressure distribution in plane positive surges*, Leningrad 1965, AIRH, rapport 3.46.
9. Saint Venant, *Démonstration élémentaire de la formule de propagation d'une onde ou d'une intumescence dans un canal prismatique et remarque sur les propagations du son et de la lumière, les ressauts, ainsi que sur la distinction des rivières et des torrents*, Compte Rendus de l'Academie des Sciences, 1870.
10. Sandover J., *An investigation of surge wave profiles in open channel flow*, Thèse de Doctorat, Université d'Edinburgh, 1957.
11. Sandover J., Taylor C., *Les ondes de translation et les ondulations de front d'onde*, La Houille Blanche 3, 1962, 443.
12. Sandover J., Zienkiewicz O., *Experiments on surge waves*, Water Power 17, 1957, 18.
13. Serre F., *Contribution à l'étude des écoulements permanents et variables dans les canaux*, La Houille Blanche 3, 1953, 374—388 et 6, 830—872.
14. Thirriot C., Bednarczyk S., *Ondulations secondaires en front d'intumescences et ondes solitaires*, La Houille Blanche 8, 1964, 879—888.