Obliczenie ekonomicznego ciśnienia i temperatury wody powrotnej ogrzewania pompkowego.*)

Napisał Inż. H. Czopowski.

Wzór algebraiczny kosztu napędu. Koszt roczny pompowania jest proporcjonalny do ilości wody tłoczonej, do wysokości tłoczenia, do kosztu jednostki energji i do czasu trwania pompowania. Jeżeli literą Q oznaczymy ilość wody w litrach na godzinę; literą H wysokość tłoczenia, to stosunek kosztów napędu o różnych ciśnieniach H i H' i o różnych ilościach wody Q i Q' przy tym samym jednostkowym koszcie energji i tym samym czasie pompowania wyrazimy wzorem:

$$\frac{K_n}{K'_n} = \frac{Q \,.\, H}{Q' \,.\, H'} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad (18)$$

Dla jednej i tej samej instalacji ogrzewniczej, dla obydwu przypadków, ilość ciepła W na godzinę jest ta sama; a więc

$$Q = W \,.\, (t_z - t_p)^{-1} \text{ oraz } Q' = W \,.\, (t_z - t'_p)^{-1}$$

po podstawieniu do wzoru 18-go, otrzymamy

$$\frac{K_n}{K_n'} = \left(\frac{t_z - t_p}{t_z - t'_p}\right)^{-1} \cdot \frac{H}{H'} \quad . \quad . \quad . \qquad (19)$$

Wzór algebraiczny kosztu grzejników. Koszt grzejników tego samego rodzaju jest proporcjonalny do ich powierzchni, koszt przeto wszystkich grzejników K_g danej instalacji, na podstawie wzoru R.-Br. I, str. 65:

$$K_g = \sum_k \frac{W_k}{K_k \left(\frac{t_z + t_p}{2} - t_o\right)} \,.\, g_k \,, \quad . \quad . \qquad (20)$$

w którym W_k oznacza ilość kaloryj, którą k-ty grzejnik ma wydać na godzinę, K_k — spółczynnik jego wydajności z m^2, g_k — cenę 1 m^2 grzejnika, t_o — temperaturę otoczenia grzejnika (np. powietrza w pokoju), którą uważać będę w tem obliczeniu za jednakową dla wszystkich grzejników, a spółczynnik K_k za niezależny od t_p (jest to pewnie przybliżenie).

Dla innej temperatury wody powrotnej $= t'_p$, przy tych samych rodzajach grzejników, koszt K'_g wyrazi się tym samym wzorem, z zamianą tylko litery t_p na t'_p; a więc otrzymamy stosunek tych kosztów:

$$\frac{K_g}{K'_g} = \left(\frac{\frac{t_z + t_p}{2} - t_o}{\frac{t_z + t_p'}{2} - t_o}\right)^{-1} \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad (21)$$

Jeżeli przyjmiemy np., że koszty K'_p, K'_n i K'_g są znane, np. obliczone w sposób zwykły z projektu, zestawionego dla obranych H' i t'_p, to możemy obliczyć bezpośrednio z wzoru 17b, 19-go i 21-go koszty K_p, K_n i K_g dla dowolnych wartości H i t_p, z zachowaniem dla tych dwóch projektów warunku 14-go.

Obliczenie ekonomicznej wysokości tłoczenia i ekonomicznej temperatury wody powrotnej. Całkowity koszt roczny instalacji wyraża się sumą:

$$K = K_p + K_n + K_g \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad (22)$$

która powinna być minimum przy zmiennych niezależnych H oraz t_p.

Dla obliczenia K_{min} należy zestawić, jak zwykle, dwa równania:

$$\frac{\partial K}{\partial H} = 0, \text{ oraz } \frac{\partial K}{\partial t_p} = 0, \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad (23)$$

z których obliczymy wysokość $H = H_m$, i temperaturę $t_p = t_{pm}$. Ze wzorów 17-go, 19-go i 21-go, otrzymamy pochodną cząstkową względem H:

$$\frac{\partial K}{\partial H} = -0{,}212 \,.\, K'_p \left(\frac{t_z - t_p}{t_z - t'_p}\right)^{-0{,}392} . \, H'^{\,0{,}212} . \, H_m^{\,-1{,}212} +$$

$$+ K'_n \left(\frac{t_z - t_p}{t_z - t'_p}\right)^{-1} . \, H'^{-1} = 0 \quad . \quad . \quad . \qquad (24)$$

Z równania tego obliczymy:

$$H_m = 0{,}278 \left(\frac{K'_p}{K'_n}\right)^{0{,}825} \cdot \left(\frac{t_z - t_{pm}}{t_z - t'_p}\right)^{0{,}5} . \, H' \,.\, \varphi^{0{,}175} \qquad (25)$$

Z tych samych wzorów otrzymamy kolejno pochodne cząstkowe względem t_p:

$$\frac{\partial K_p}{\partial t_p} =$$

$$= 0{,}392 \,.\, K'_p \,.\, (t_z - t'_p)^{0{,}392} \,.\, \left(\frac{H}{H'}\right)^{-0{,}212} . \, (t_z - t_p)^{-1{,}392} \,.\, \varphi^{0{,}212};$$

$$\frac{\partial K_n}{\partial t_p} = K'_n \,.\, \left(\frac{H}{H'}\right) . \, (t_z - t'_p) \,.\, (t_z - t_{pm})^{-2} \,;$$

$$\frac{\partial K_g}{\partial t_p} = -\frac{1}{2} \cdot K_g' \,.\, \left(\frac{t_z + t'_p}{2} - t_o\right) \cdot \left(\frac{t_z + t_{pm}}{2} - t_o\right)^{-2} . \quad . \qquad (26)$$

Po przyrównaniu sumy tych trzech wyrazów do zera i po podstawieniu następnie $H = H_m$ z równ. 25-go, i wreszcie po przeniesieniu wszystkich wyrazów, zawierających niewiadomą t_{pm}, na lewą stronę, otrzymamy równanie

$$\left(\frac{t_z + t_{pm}}{2} - t_o\right)^2 . \, (t_z - t_{pm})^{-1{,}5} = \qquad (27)$$

$$= 0{,}632 \varphi^{0{,}175} \cdot \frac{K'_g}{K'^{\,0{,}825}_p \,.\, K'^{\,0{,}175}_n} \cdot \left(\frac{t_z + t'_p}{2} - t_o\right) . \, (t_z - t'_p)^{-0{,}5}$$

z którego obliczymy — np. drogą prób — niewiadomą t_{pm}. Do tego obliczenia zastosować można załączoną tablicę lub załączony wykres (rys. 1), który obliczyliśmy przyjąwszy $\varphi = 1$; $t_z = 90^0$ C; $t_o = 20^0$ C i dla następujących wartości t_{pm} (wartość prawej strony rów. 27-go oznaczyliśmy literą T_o):

t_{pm}	85^0	80^0	75^0	70^0	65^0	60^0	55^0	50^0
T_o	407,5	133,5	67,4	40,2	26,3	18,4	13,32	9,96

Obliczywszy przeto wartość T_o prawej strony równania 27-go (przyjąwszy $\varphi = 1$) odczytamy z tej tabliczki (z ewent. interpolacją) odpowiednią wartość t_{pm}.

Wartość $\varphi^{0{,}175}$ w powyższym wzorze jest praktycznie bez znaczenia dla obliczenia t_{pm}.

Wzór przeto 25-ty i 27-my rozwiązują postawione zadanie.

*) Dokończenie do str. 442 w № 20 r. b.

Obliczenie poprawki φ. W tym celu weźmiemy pod uwagę obieg przewodu, w którym zachodzi największa strata ciśnienia na tarcie. Stratę ciśnienia na miejscowe opory obliczymy ze wzoru:

$$H_s = \Sigma \zeta_i \frac{v_i^2}{2g} \gamma \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (28)$$

gdzie i odnosi się do odcinków, znajdujących się na tym obiegu.

W to równanie wstawimy

$$v_i = \frac{Q_i}{Ad_i}; \qquad Q_i = \frac{W_i}{t_z - t_p},$$

oraz d_i z równania 10-go i otrzymamy

$$H_s = \frac{\gamma}{2g} \Sigma \zeta_i W_i^2 (t_z - t_p)^{-2} . A^{-2} . A^{\frac{4n}{2n+p}} . a^{\frac{4}{2n+p}} .$$

$$. (t_z - t_p)^{\frac{4n}{2n+p}} . l_i^{-\frac{4}{2n+p}} . W_i^{-\frac{4n}{2n+p}} . H_{it}^{\frac{4}{2n+p}} \quad (29)$$

Oznaczając wszystkie czynniki oprócz czynników, zawierających wielkości H_{it} oraz t_p, literą M_i, napiszemy wzór 29-ty w postaci

$$H_s = (t_z - t_p)^{-\frac{2p}{2n+p}} . \Sigma M_i H_{it}^{\frac{4}{2n+p}} \quad (30)$$

Zastosujemy następnie do tegoż układu rur temperaturę t_p' oraz wysokości H'_{it} czyniące zadość prawu proporcjonalności wyrażonemu równaniem 14-tem i otrzymamy następujący wyraz dla nowego H'_s:

$$H_s' = (t_z - t'_p)^{-\frac{2p}{2n+p}} . \left(\frac{H_t'}{H_t}\right)^{\frac{4}{2n+1}} . \Sigma M_i H_{it}^{\frac{4}{2n+p}} \quad (31)$$

a następnie po podzieleniu 30-tego przez 31-sze otrzymamy:

$$H_s = H'_s \left(\frac{t_z - t_p}{t_z - t'_p}\right)^{-\frac{2p}{2n+p}} . \left(\frac{H_t}{H'_t}\right)^{\frac{4}{2n+p}} \quad . \; . \; . \quad (32)$$

Ponieważ $H = H_t + H_s$, a $H' = H'_t + H'_s$, napiszemy po podstawieniu H_s z równ. 32-go:

$$\frac{H}{H'} = \frac{H_t + H'_s \left(\frac{t_z - t_p}{t_z - t'_p}\right)^{-\frac{2p}{2n+p}} . \left(\frac{H_t}{H'_t}\right)^{\frac{4}{2n+p}}}{H'_t + H'_s} \quad . \quad (33)$$

Zważywszy następnie, po podstawieniu wartości n i p ze wzoru 6-go i 7-go,

że dla rur gazowych $\frac{2p}{2n+p} = 0{,}51$ i $\frac{4}{4n+p} = 0{,}81$,

a dla rur kołnierzowych

$$\frac{2p}{2n+p} = 0{,}53 \text{ i } \frac{4}{4n+p} = 0{,}74,$$

przyjmiemy przybliżone wartości dla obydwóch rodzajów rur: 0,53 oraz 0,788, a po ich podstawieniu do równ. 33-go otrzymamy

$$\frac{H}{H'} = \frac{H_t + H'_s \left(\frac{t_z - t_p}{t_z - t'_p}\right)^{-0{,}53} . \left(\frac{H_t}{H'_t}\right)^{0{,}788}}{H'_t + H'_s} \quad . \; . \quad (34)$$

lub inaczej, mając na uwadze wzór 17a, gdzie

$$\frac{H}{H'} = \frac{H_t}{H'_t} . \varphi,$$

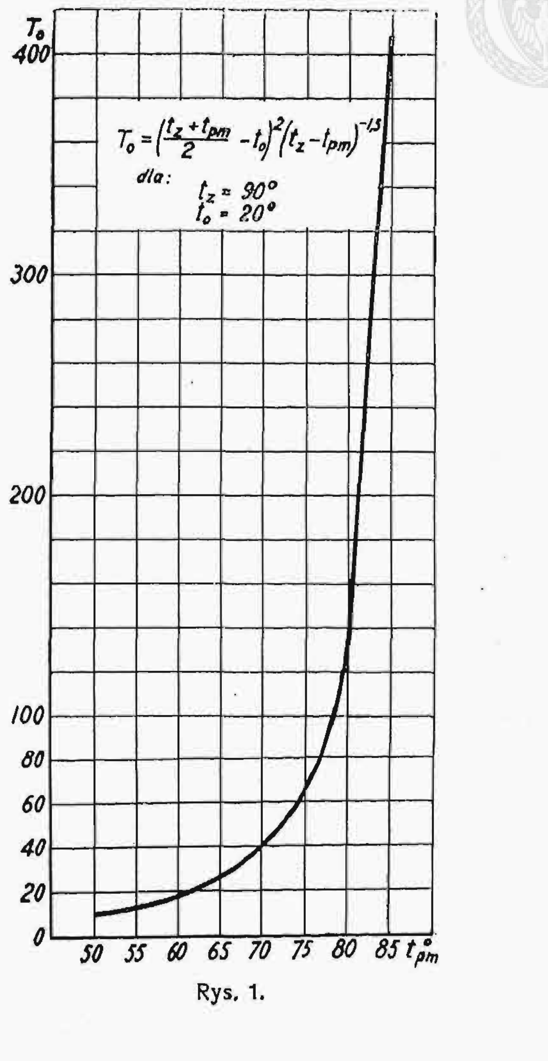
$$\varphi = \frac{1 + \frac{H'_s}{H'_t} . \left(\frac{t_z - t_p}{t_z - t'_p}\right)^{-0{,}53} . \left(\frac{H_t}{H'_t}\right)^{-0{,}212}}{1 + \frac{H'_s}{H'_t}} \quad . \quad (35)$$

W wyrazie tym wielkość H_t jest nieznana, zastąpimy ją przeto w tym wzorze wielkością H_m (obliczoną dla $\varphi = 1$), a zamiast H'_t podstawimy wartość H' z projektu przygotowawczego; otrzymamy wtedy wartość φ z dostateczną dokładnością. Wartość ta, podstawiona do równ. 25-tego, da dostatecznie dokładną wartość H_m, a podstawiona do równ. 17-tego, da wysokość H_{tm} odpowiadają wysokości H_m. W razie niepewności, co do dostatecznej dokładności obliczonych H_m, H_{tm} i t_{pm} (gdy φ jest znaczne, np. $\varphi \geqslant 1{,}3$), można projekt, zestawiony na podstawie tych wielkości (H_m, H_{tm} i t_{pm}), uważać za przygotowawczy i, w sposób już wskazany, — obliczyć nowe wartości H_m i t_{pm}.

Różnice tych obliczeń nie mogą być praktycznie wielkie, gdyż w bliżkości K_{min}, znaczniejsze nawet odchylenia wartości H od H_m, nie mogą wiele wpływać na wartość K_{min}.

Schemat obliczenia. Całe obliczenie da się ująć w następujące schematyczne postępowanie. Po zwykłem obliczeniu strat ciepła, należy sporządzić zupełny projekt instalacji dla dowolnie obranych strat R'_i (ewent. H'_{it}) i dla dowolnie obranej temperatury wody powrotnej (t'_p).

Następnie należy obliczyć z tego projektu stratę ciśnienia H'_t na tarcie i H'_s — stratę na miejscowe opory, skąd obliczymy wysokość tłoczenia $H' = H'_t + H'_s$, oraz z projektu w sposób zwykły koszty K'_p, K'_n i K'_g,



Rys. 1.

Na podstawie tych liczb (H', t'_p, K'_p, K'_n, K'_g) obliczymy wartość prawej strony równania 27-go, t. zn. T_o, poczem z tegoż równania (lub z załączonej tabelki albo z wykresu) — temperaturę ekonomiczną t_{pm}, a następnie koszt grzejników K_{gm}.

Potem obliczymy ze wzoru 25-go, przyjąwszy $\varphi = 1$, przybliżoną wartość H_m, która może być uważana z praktyczną dokładnością za ekonomiczną. Jeżeli zechcemy postępować dokładniej, należy ze wzoru 35-go obliczyć φ, podstawiwszy weń zamiast H_t obliczoną wartość (przybliżoną) H_m, a zamiast H'_t wartość z projektu przygotowawczego H'.

Na podstawie tej wartośći φ obliczymy z 25-go szukane

$$H_m = H_{przybliżone} \,.\, \varphi^{0,175},$$

ze wzoru zaś 17-go — wartość H_{tm}, a ze wzoru 14-go

$$R_{im} = R'_t \, \frac{H_{tm}}{H'_t},$$

na podstawie którego obliczymy z tablic Rietschel'a wszystkie d_i oraz z projektu K_{pm}, K_{nm} i K_{gm}, które powinny być w praktycznych granicach zgodne z kosztami obliczonemi z równań 36, 37 i 40-go; lub powinny czynić zadość stosunkom, wyrażonym równaniem 42-em.

O b l i c z e n i e t e o r e t y c z n e w a r t o ś c i K_{pm}, K_{nm} i K_{gm}. Wartości te obliczymy, gdy w równanie 17, 19 i 21 podstawimy z równ. 25-go i 27-go wartości $H = H_m$ i $t_p = t_{pm}$. W tem obliczeniu niewiadoma t_{pm} nie da się jednakże bezpośrednio obliczyć. Pozostawiamy przeto tę wielkość narazie nieobliczoną liczbowo i po podstawieniu H_m z równ. 25-go kolejno do 17b, 19 i 21-go otrzymamy:

$$K_{pm} = 1{,}312\, K_p'^{\,0,825} \,.\, K_n'^{\,0,175} \,.\, \left(\frac{t_z - t_{pm}}{t_z - t'_p}\right)^{-0,5} .\, \varphi^{0,175} \qquad (36)$$

$$K_{nm} = 0{,}278\, K_p'^{\,0,825} .\, K_n'^{\,0,175} .\, \left(\frac{t_z - t_{pm}}{t_z - t_p'}\right)^{-0,5} .\, \varphi^{0,175} \qquad (37)$$

$$K_{gm} = K'_g \left(\frac{\tau_m}{\tau'}\right)^{-1} \quad . \; . \; . \; . \qquad (38)$$

gdzie

$$\tau_m = \frac{t_z + t_{pm}}{2} - t_o \text{ i } \tau' = \frac{t_z + t_p'}{2} - t_o,$$

a gdy w to ostatnie równanie (38) podstawimy K_g' z równania 27-go, otrzymamy:

$$K_{gm} = \tau_m^{\,2} \,.\, (t_z - t_{pm})^{-1,5} .\, K_p'^{\,0,825} .\, K_n'^{\,0,175} \frac{1}{0{,}632} \,.$$

$$.\, \varphi^{0,175} \,.\, \tau'^{-1} .\, (t_z - t_p')^{0,5} .\, \left(\frac{\tau_m}{\tau'}\right)^{-1} \quad . \; . \qquad (39)$$

a po uporządkowaniu:

$$K_{gm} = 1{,}582 \,.\, K_p'^{\,0,825} \,.\, K_n'^{\,0,175} \,.$$

$$.\left(\frac{t_z - t_{pm}}{t_z - t_p'}\right)^{-1,5} .\, \frac{\tau_m}{t_z - t'_p} .\, \varphi^{-0,175} \quad . \; . \qquad (40)$$

Po dodaniu tych trzech równań (36, 37 i 40-go) napiszemy:

$$K_m = \left[1{,}590 \,.\, \left(\frac{t_z - t_{pm}}{t_z - t_p'}\right)^{-0,5} .\, \varphi^{0,175} + 1{,}582 \,.\, \left(\frac{t_z - t_{pm}}{t_z - t'_p}\right)^{-1,5} .\right.$$

$$\left. .\, \frac{\tau_m}{t_z - t_p'} .\, \varphi^{-0,175}\right] .\, K_p'^{\,0,825} .\, K_n'^{\,0,175} \quad . \; . \qquad (41)$$

lub wyrazimy te wartości w postaci stosunków:

$$K_{pm} : K_{nm} : K_{gm} = 1 : 0{,}212 : 1{,}206 \,.\, \frac{\tau_m}{t_z - t_{pm}} .\, \varphi^{-0,350} \qquad (42)$$

Tym stosunkom powinny odpowiadać koszty K_p, K_n i K_g wszelkich instalacyj ekonomicznych.

Z tego wynika np., że w instalacji ekonomicznej roczny koszt napędu powinien stanowić ok. 21% rocznego kosztu przewodu.

W p ł y w o d c h y l e ń w y s o k o ś c i H_m i t e m p e r a t u r y t_{pm} n a r o c z n y k o s z t i n s t a l. e k o n.

Jeżeli, czy to wskutek niedokładności założeń, czynionych w tem obliczeniu, czy też dla jakichkolwiek innych powodów, nie zastosujemy ścisłych wartości H_m i t_{pm} dla obliczenia ekonomicznego projektu, lecz przyjmiemy bliskie wartości równe $H_m + \Delta H_m$, oraz $t_{pm} + \Delta t_{pm}$, (wielkość ΔH_m i Δt_{pm} nazwiemy odchyłkami), to zachodzi pytanie, jaki wpływ będą miały te odchyłki na roczny najmniejszy koszt instalacji.

W tym celu, uważając koszt K za funkcję zmiennych niezależnych H i t_p, rozwiniemy ją w szereg Taylora względem tych zmiennych, a zważywszy, że dla projektu ekonomicznego:

$$\frac{\partial K}{\partial H} = 0 \quad \text{i} \quad \frac{\partial K}{\partial t_p} = 0,$$

obliczymy przyrost kosztów obu instalacyj:

$$K - K_m = \Delta K_m$$

z następującego wzoru:

$$\Delta K_m = \frac{1}{2!} \cdot \frac{\partial^2 K_m}{\partial H_m^2} .\, \Delta H_m^2 + 2 \,.\, \frac{1}{2!} \cdot \frac{\partial^2 K_m}{\partial H_m \partial t_p} \,.\, \Delta H_m \,.\, \Delta t_{pm} +$$

$$+ \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 K_m}{\partial t_{pm}^2} .\, \Delta t_{pm} + \; . \; . \; . \; . \qquad (43)$$

Różniczki cząstkowe obliczymy z równania 17, 19 i 21-go; a zważywszy, że K_p i K_n są funkcjami jednorodnemi względem H oraz względem wyrazu $(t_z - t_n)$, zaś wyraz K_g — względem wyrazu $\left(\frac{t_z + t_p}{2} - t_o\right)$, napiszemy wyrazy szeregu 43-go na zasadzie twierdzenia Eulera o funkcjach jednorodnych w nast. postaci; wyraz pierwszy

$$\frac{1}{2!} \frac{\partial^2 K}{\partial H^2} .\, \Delta H_m^2 = \frac{1}{2!} .\, (-0{,}212) .\, (-1{,}212) .\, K_{pm} \left(\frac{\Delta H_m}{H_m}\right)^2 =$$

$$= 0{,}129\, K_{pm} \left(\frac{\Delta H_m}{H_m}\right)^2; \quad . \; . \; . \qquad (44)$$

następnie drugi wyraz szeregu 43-go:

$$2 \,.\, \frac{1}{2!} \cdot \frac{\partial^2 K}{\partial H \, \partial t_p} .\, \Delta H_m \,.\, \Delta t_{pm} =$$

$$= (-0{,}212) \,.\, (-0{,}392) \,.\, \frac{K_{pm}}{H_m (t_z - t_{pm})} .\, (-1) +$$

$$+ (-1) \frac{K_{nm}}{H_m (t_z - t_{pm})} .\, (-1) \,.\, 2 \frac{1}{2!} \cdot \frac{\partial^2 K}{\partial H \partial t_p} .\, \Delta H_m \,.\, t_{pm} =$$

$$= \left[-0{,}083\, K_{pm} + K_{nm}\right] .\, \left(\frac{\Delta H_m}{H_m}\right) .\, \left(\frac{\Delta t_{pm}}{t_z - t_{pm}}\right) . \qquad (45)$$

i wreszcie wyraz 3-ci tego szeregu:

$$\frac{1}{2!} \cdot \frac{\partial^2 K}{\partial t_p^2} .\, \Delta t_p^2 = \left[\frac{1}{2!} (-0{,}392)(-1{,}392) \frac{K_{pm}}{(t_z - t_p)^2} .\, (-1)(-1) + \right.$$

$$+ \frac{1}{2!} (-1) \,.\, (-2) \,.\, \frac{K_{nm}}{(t_z - t_p)^2} .\, (-1)(-1) +$$

$$\left. + \frac{1}{2!} (-1) \,.\, (-2) \,.\, \frac{K_{gm}}{\tau_m^2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2}\right] .\, \Delta t_{pm}^2.$$

a po wykonaniu działań:

$$\frac{1}{2!} \cdot \frac{\partial^2 K}{\partial t_p^2} .\, \Delta t_p^2 = \left[0{,}273\, K_{pm} + K_{nm}\right] .\, \left(\frac{\Delta t_{pm}}{t_z - t_{pm}}\right)^2 +$$

$$+ 0{,}25\, \tau_m K_{gm} \left(\frac{\Delta t_{pm}}{\tau_m}\right)^2 \quad . \; . \; . \; . \qquad (46)$$

Wyrazimy następnie wielkości K_{pm}, K_{nm} i K_{gm} przez wielkość $K_m = K_{pm} + K_{nm} + K_{gm}$ i w tym celu obliczamy z równania 42-ego:

$$K_{pm} = \frac{K_m}{1{,}212 + 1{,}206 \frac{\tau_m}{t_z - t_{pm}} \cdot \varphi^{-0{,}350}} \quad (47)$$

$$K_{nm} = 0{,}212 \cdot \frac{K_m}{1{,}212 + 1{,}206 \frac{\tau_m}{t_z - t_{pm}} \cdot \varphi^{-0{,}350}} \quad (48)$$

$$K_{gm} = 1{,}206 \cdot \frac{\tau_m}{t_z - t_{pm}} \cdot \varphi^{-0{,}350} \cdot \frac{K_m}{1{,}212 + 1{,}206 \frac{\tau_m}{t_z - t_{pm}} \cdot \varphi^{-0{,}350}} \quad (49)$$

a po podstawieniu tych wartości do równania 44, 45 i 46-go, a następnie do szeregu 43-go otrzymamy:

$$\frac{\Delta K_m}{K_m} = \frac{1}{1{,}212 + 1{,}206 \frac{\tau_m}{t_z - t_{pm}} \cdot \varphi^{-0{,}350}} \cdot \left[0{,}129 \cdot \left(\frac{\Delta H_m}{H_m}\right)^2 + (-0{,}083 + 0{,}212) \cdot \frac{\Delta H_m}{H_m} \cdot \frac{\Delta t_{pm}}{t_z - t_{pm}} + (0{,}273 + 0{,}212) \cdot \left(\frac{\Delta t_{pm}}{t_z - t_{pm}}\right)^2 + 0{,}25\, \tau_m \cdot 1{,}206 \frac{\tau_m}{t_z - t_{pm}} \cdot \varphi^{-0{,}350} \cdot \left(\frac{\Delta t_{pm}}{\tau_m}\right)^2\right] ;(50)$$

i wreszcie po wykonaniu działań:

$$\frac{\Delta K_m}{K_m} = \frac{1}{1{,}212 + 1{,}206 \frac{\tau_m}{t_z - t_{pm}} \cdot \varphi^{-0{,}350}} \cdot \left[0{,}129 \left(\frac{\Delta H_m}{H_m}\right)^2 + 0{,}129 \frac{\Delta H_m}{H_m} \cdot \frac{\Delta t_{pm}}{t_z - t_{pm}} + 0{,}485 \left(\frac{\Delta t_{pm}}{t_z - t_p}\right)^2 + 0{,}302 \frac{\Delta t_{pm}^2}{\tau_m (t_z - t_{pm})}\right] \quad (51)$$

Przykład: Dla pewnej instalacji otrzymaliśmy: $H_m = 0{,}74\, m$, $t_{pm} = 77^0$ C, gdy $t_z = 90^0$, $t_o = 20^0$; przyjmujemy następnie odchyłki $\Delta H_m : H_m = 0{,}2$; oraz $\Delta t_{pm} = 5^0$.

Ze wzoru powyższego otrzymamy kolejno:

$$\frac{\Delta K_m}{K_m} = 0{,}07\% + 0{,}15\% + 1{,}0\% + 0{,}14 = 1{,}36\%.$$

Z tych liczb widzimy, że największą podwyżkę kosztów wywołuje wyraz 3-ci, wynikający z odchyłki t_{pm} o 5^0 C; — odchyłki zaś wysokości mają wpływ nieznaczny na podwyżkę kosztów.

Z tego wynika, że 20%-owa odchyłka od ekonomicznej wysokości nie ma praktycznego wpływu na najmniejszy koszt instalacji; przybliżenia przeto, jakieśmy przyjęli w tem obliczeniu, nie mają wpływu na koszt instalacji i wzory 25-ty i 27-my mogą być z dostateczną dokładnością stosowane.

Obliczenie bezpośrednie wysokości H_{tm}.

Chociaż podane wzory powinny wystarczyć do obliczenia projektu ekonomicznego zestawimy jednakże dokładny wzór dla H_{tm} nie posiłkując się założeniem, że $\varphi =$ stałej.

Równanie to otrzymamy jak poprzednio z równ. 22-go i z tą tylko różnicą, że wartość K_p przyjmiemy z równania 16-tego, a H_t uważać będziemy jako funkcję zmiennej H, obliczoną z równ. 34 go; inaczej mówiąc obliczymy z równ. 22-go $K = K_{min}$; uważając H_t i H za niezależne zmienne, natomiast równanie 34-te uważać będziemy jako równanie warunkowe.

W celu tego obliczenia pomnożymy równ. 34-te przez współczynnik nieoznaczony λ; dodamy je następnie do 22-go i obliczymy K_m, uważając H_t i H na niezależne.

Na tej podstawie napiszemy z tego równania (t. j. z 16, 17b, 19 i 34-go):

$$\frac{\partial K}{\partial H_t} = \frac{\partial K_p}{\partial H_t} - \lambda \left[1 + 0{,}788\, H_s' \cdot \left(\frac{t_z - t_p}{t_z - t_p'}\right)^{-0{,}53} \cdot H_t'^{-0{,}788} \cdot H_t^{-0{,}212}\right] = 0,$$

oraz

$$\frac{\partial K}{\partial H} = \frac{\partial K_n}{\partial H} + \lambda = 0;$$

Po wykonaniu działań i wyrugowaniu z tych równań λ, otrzymamy, korzystając z równania 16-tego i 19-tego:

$$-0{,}212 \cdot K_p' \left(\frac{t_z - t_o}{t_z - t_p'}\right)^{-0{,}392} \cdot H_t'^{0{,}212} \cdot H_t^{-1{,}212} + K_n' \left(\frac{t_z - t_p}{t_z - t_p'}\right)^{-1} \cdot H'^{-1} \cdot \left[1 + 0{,}788 \cdot H_s' \left(\frac{t_z - t_p}{t_z - t_p'}\right)^{-0{,}53} \cdot H_t'^{-0{,}788} \cdot H_t^{-0{,}212}\right] = 0,$$

pomnożymy to równanie przez wyraz $H_t^{1{,}212} \cdot H'$, a po uporządkowaniu otrzymamy:

$$K_n' \left(\frac{t_z - t_p}{t_z - t_p'}\right)^{-1} \cdot H_t^{1{,}212} + 0{,}788\, K_n' \cdot H_s' \cdot \left(\frac{t_z - t_p}{t_z - t_p'}\right)^{-1{,}53} \cdot H_t'^{-0{,}788} \cdot H_t = 0{,}212\, K_p' \left(\frac{t_z - t_p}{t_z - t_p'}\right)^{-0{,}392} \cdot H_t'^{0{,}212} \cdot H' = 0.$$

Podzielimy to równanie przez spółczynnik, znajdujący się w pierwszym wyrazie przy niewiadomej H_t i otrzymamy:

$$H_t^{1{,}212} + 0{,}788\, H_s' \cdot \left(\frac{t_z - t_p}{t_z - t_p'}\right)^{-0{,}53} \cdot H_t'^{-0{,}788} \cdot H_t = 0{,}212 \cdot \left(\frac{K_p'}{K_n'}\right) \cdot \left(\frac{t_z - t_p}{t_z - t_p'}\right)^{0{,}608} \cdot H_t'^{0{,}212} \cdot H' = 0$$

i wreszcie, po podzieleniu przez $H_t'^{1{,}212}$, otrzymamy:

$$\left(\frac{H_t}{H_t'}\right)^{1{,}212} + 0{,}788 \cdot \frac{H_s'}{H_t'} \cdot \left(\frac{t_z - t_p}{t_z - t_p'}\right)^{-0{,}53} \cdot \left(\frac{H_t}{H'}\right) = 0{,}212 \cdot \frac{K_p'}{K_n'} \cdot \left(\frac{t_z - t_p}{t_z - t_p'}\right)^{0{,}608} \cdot \frac{H'}{H'} \quad (52)$$

Z równania tego obliczymy wysokość H_t z danych, odnoszących się do projektu przygotowawczego i z temperatury $t_p = t_{pm}$, którą obliczymy z równ. 27-go; wartość ta H_{tm} jest wysokością odpowiadającą ekonomicznemu układowi t. j. $= H_{tm}$.

Równanie to ma postać $x^{1{,}212} + ax = b$; pierwiastek jego z pewnem przybliżeniem można przyjąć:

$$x = \frac{b}{1 + a};$$

dokładniejszy zaś obliczymy metodą przybliżoną, np. metodą Newtona.