ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Nr 46 AUTOMATYKA z.1 1961

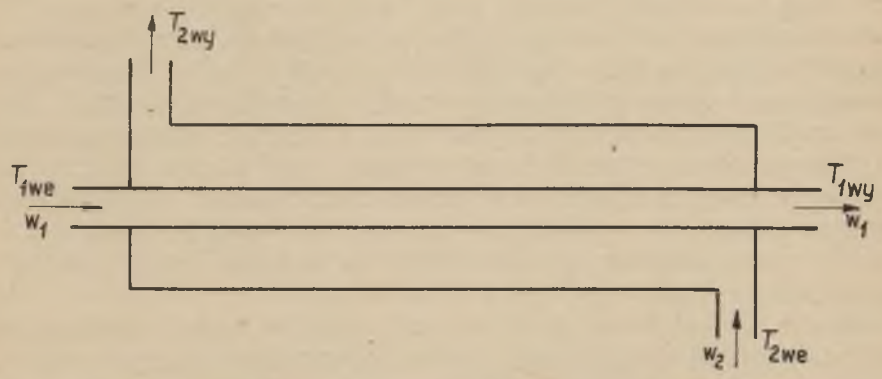
ZDZISŁAW TRYBALSKI

Katedra Elektroautomatyki Przemysłowej

STUDIUM NAD WŁASNOŚCIAMI REGULACYJNYMI PRZECIWPRĄDOWEGO WYMIENNIKA CIEPŁA, ZE ZMIENNYM PRZEPŁYWEM JEDNEGO MEDIUM

Streszczenie: Oprócz wymienników cieplnych regulowanych zmianą temperatury jednego z mediów, napotyka się w technologii procesów chemicznych wymienniki regulowane zmianą prędkości przepływu. Przedyskutowano warunki hydrodynamiczne jakim winien odpowiadać sygnał pobudzający oraz podano wyniki analizy odpowiedzi wymiennika na skok przepływu. Zamieszczono również krzywe porównawcze otrzymane drogą obliczeń dokładnych, przybliżonych i pomiarów.

Różnego rodzaju aparaty, w których zachodzi wymiana ciepła dadzą się przedstawić zasadniczo, jako układ współ - względnie przeciwprądowy typu rura w rurze zmontowane współśrodkowo.



Rys.1. Schemat ideowy wymiennika ciepła typu rura w rurze

Zagadnienie regulacji takiego wymiennika sprowadza się do uzyskania np. stałej temperatury wyjściowej $T_{1\,wy}$ drogą:

a) zmiany temperatury wejściowej $T_{2\,we}$ medium drugiego, przy czym prędkość w_2 przepływu tego medium jest stała,

b) zmiany prędkości w_2 przepływu medium drugiego, przy zachowaniu stałości temperatury wejściowej $T_{2\,we}$.

Począwszy od pracy [2] w której P.Profos podał po raz pierwszy własności dynamiczne wymiennika ciepła, o zmiennej temperaturze jednego z mediów, wszystkie dotychczasowe prace ujmują zagadnienie regulacji analogicznie, rozpatrując układ zgodnie z problematyką zawartą w punkcie "a". [3-12]. Istnieją jednak przemysłowe układy wymienników ciepła, pracujące z regulacją prędkości (natężenia) przepływu.

Zwrócił już na to uwagę Y. Takahashi [5] przy okazji omawiania własności regulacyjnych temperaturowych wymienników ciepła. Taki stan rzeczy może znaleźć następujące wyjaśnienie:

1. Własnościami regulacyjnymi wymienników ciepła zajęto się z uwagi na potrzeby techniki:

a) reaktorów jądrowych,

b) kotłów parowych energetycznych,

c) innych aparatów wymiany ciepła,

a więc rozpatrywano układy charakteryzujące się stałością przepływu.

2. Nieliczne prace z zakresu analizy własności dynamicznych obiektów przemysłowych, ograniczają się do badań wymiany ciepła w instalacjach chłodzenia przestrzeni reakcyjnych reaktorów [13], układów grzanych dowthermem [14] [15] [16], względnie grzejników w odparowywaczach kolumn destylacyjnych [14] [17] [18] lub też przegrzewaczy pary w instalacjach kotłowych [11] [19] [20], a więc w układach o zmiennych temperaturach, jednak przy ustalonym przepływie.

3. Analiza układu wymiennika ze zmiennym przepływem jest skomplikowana zarówno matematycznie jak i technologicznie, z uwagi na brak w literaturze technologicznych danych odnośnie współczynników wymiany ciepła w stanach nieustalonych.

Głównym parametrem wymiany ciepła jest współczynnik przechodzenia ciepła k [21], względnie przenikania ciepła α. Zarówno jeden jak i drugi są związane z "przyścienną warstewką temperaturową Prandtla", a ta z kolei z zjawiskami hydrodynamicznymi [22-29].

Ustalenie warunków analizy wymiany ciepła przy zmieniającym się przepływie wymaga sprecyzowania kształtu i przebiegu zmian profili prędkości, zarówno przy przepływach nieusta-

lonych, jak również ustalonych. Albowiem nawet w przepływach ustalonych w rurach, jak wykazała praca Direksena [30], stałość pól prędkości (profili przepływu(nie jest zachowana.

Każda, nawet mała zmiana przepływu powoduje w stanie nieustalonym silne zmiany profili przepływu. Tym samym będzie ulegać zmianie współczynnik przenikania ciepła α .

Sprecyzowanie przebiegu czasowego sygnału zaburzającego (wejściowego) natrafia więc na następujące trudności:

a) sygnał (zmiana wielkości wejściowej) nie powinien powodować zrywania profili prędkości, zwłaszcza w warstwach przyściennych,

b) sygnał winien być zbliżony swoim kształtem do rzeczywistej zmiany przepływu w przeciętnych warunkach przemysłowych,

c) sygnały wyjściowe będące odpowiedziami na sygnały wejściowe, winny być jak najbardziej powtarzalne, a zmiana warunków hydrodynamicznych nie powinna pociągnąć za sobą utraty korelacji.

Rozpatrzenie przebiegów czasowych sygnałów wejściowych ograniczymy do:

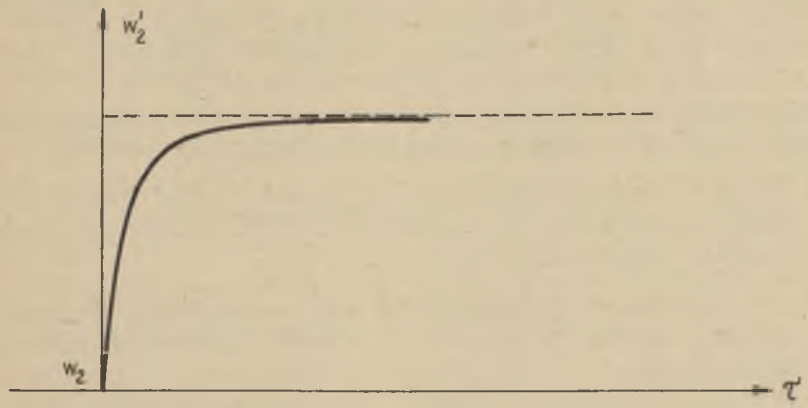
1) rzeczywistego sygnału skokowego,

2) sygnału jednostajnie narastającego,

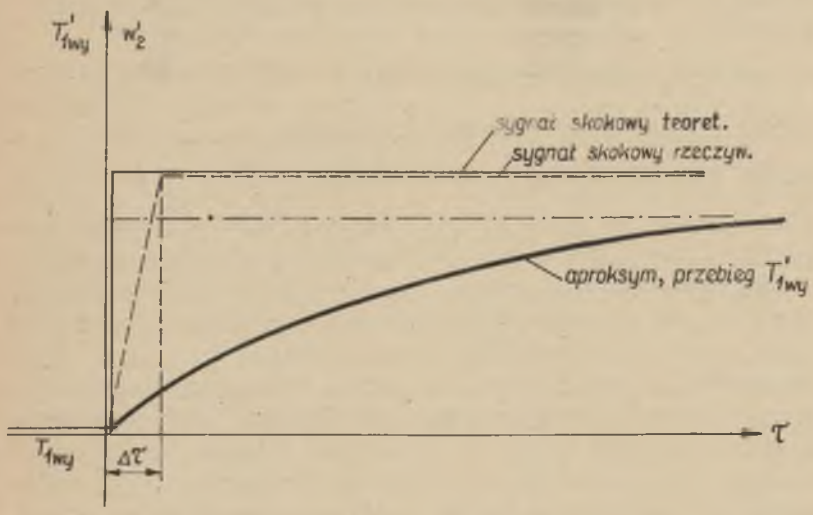
3) sygnału sinusoidalnego ze składową stałą.

ad 1. Do nadania skokiem przepływającej masie medium nowej prędkości w_2 wymagana była by zgodnie z drugim prawem Newtona nieskończenie duża siła. Tego rodzaju zmiana prędkości powoduje również powstanie udarów hydraulicznych [32] [34], a więc zrywanie warstewki przyściennej.
W takim przypadku rozkład profili prędkości będzie zależał od położenia elementu sterującego przepływem, względem wyjścia i wejścia obiektu oraz od kierunku zmiany przepływu, a więc od tego, czy przepływ będzie otwierany czy też zamykany. Z podanych powyżej powodów, będziemy rozpatrywali sygnał skokowy w postaci sygnału rzeczywistego, o $\Delta\tau$ dobranym w zależności od rozmiarów geometrycznych obiektu, jego stałej czasowej i masy przepływającego medium.
Ponieważ jednak analiza matematyczna przebiegów, dla sygnału wejściowego typu skok rzeczywisty (rys.2) jest bardzo trudna, rozpatrzymy zagadnienie, zakładając skok teoretyczny (rys.3) i przyjmując równocześnie, że $\Delta\tau$ będzie w stosun-

ku do stałej czasowej obiektu aproksymowanego do 1-o rzędu do pominięcia.



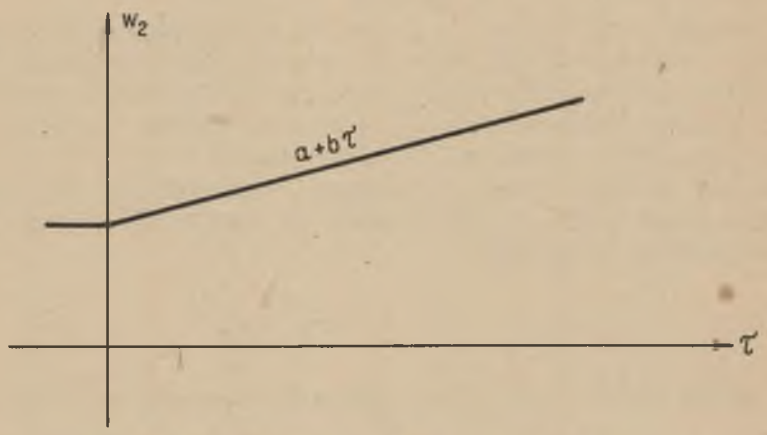
Rys.2. Rzeczywisty przebieg skokowej zmiany przepływu w czasie



Rys.3. Przebieg teoretyczny oraz rzeczywisty sygnału wymuszającego i aproksymowany temperatury wyjściowej

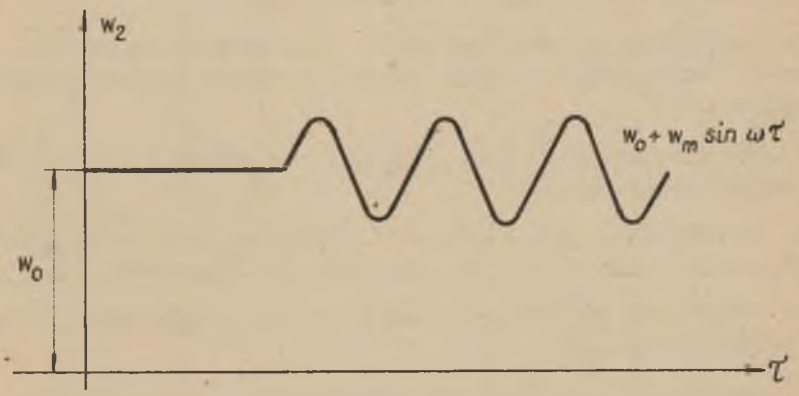
Ad 2. Wprawdzie sygnał tego rodzaju stwarza dogodniejsze warunki dla płynnej zmiany profili prędkości, mimo tego jednak istnieją w pewnym zakresie zmian "w" możliwości powsta-

nia udaru hydraulicznego [33]. Natomiast w rejonie bezpiecznym od udaru hydraulicznego sygnał na skutek wolnego wzrostu "w" daleko odbiega od sygnału rzeczywistego.



Rys.4. Liniowy sygnał wymuszający

Ad.3. Chociaż dla stałej amplitudy składowej zmiennej uzyskamy przebiegi stacjonarne, to jednak z uwagi na "annularny efekt Richardsona" [35] współczynnik przenikania ciepła α będzie bliżej nieznaną funkcją częstości tejże składowej.



Rys.5. Inicjujący sygnał sinusoidalny ze składową stałą

Niestety, w szeregu pracach [36] [37] [38] [39], a nawet [40] analizowany jest wpływ zmiany profili na opór hydrauliczny, o wpływie natomiast "efektu annularnego" na współczynnik przenikania ciepła α są tylko wzmianki, świadczące o jego silnym wzroście z częstotliwością drgań - w potędze większej niż 1-a (porów. [22] [23]).
Precyzując zagadnienie - rozpatrzymy zgodnie z rys.1 sytuację, w której medium gorące o stałej temperaturze T_1 = const. wpływa rurą wewnętrzną, a równocześnie medium zimne o stałej temperaturze T_2 = const. wpływa do rury zewnętrznej w przeciwprądzie (współprądzie).
Będziemy szukali funkcji czasowej temperatury wyjściowej T_1 medium pierwszego, w zależności od chwilowej zmiany przepływu medium drugiego

$$T_1 = f(C_2^x)$$

względnie zakładając stały przekrój aparatu na całej długości

$$T_1 = (w_2) \quad .$$

wprowadzamy również oznaczenia:
Celem umożliwienia matematycznego rozwiązania postawionego problemu wprowadza się następujące uproszczenia:

1. Wymiana ciepła następuje radialnie, wprost pomiędzy przepływającymi mediami. Pomija się istnienie ścianek rur zarówno zewnętrznej jak i wewnętrznej.

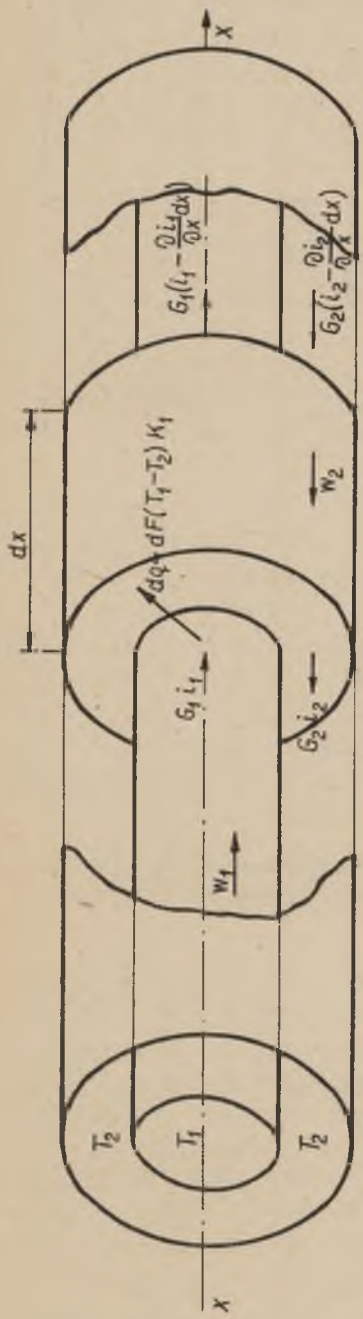
2. Zakładamy pewne średnie α dla danych warunków przepływu i traktujemy je jako stałe, w całym zakresie zmiany przepływu.

3. Uśredniamy wielkość liczby Re w całym zakresie rozpatrywanych temperatur.

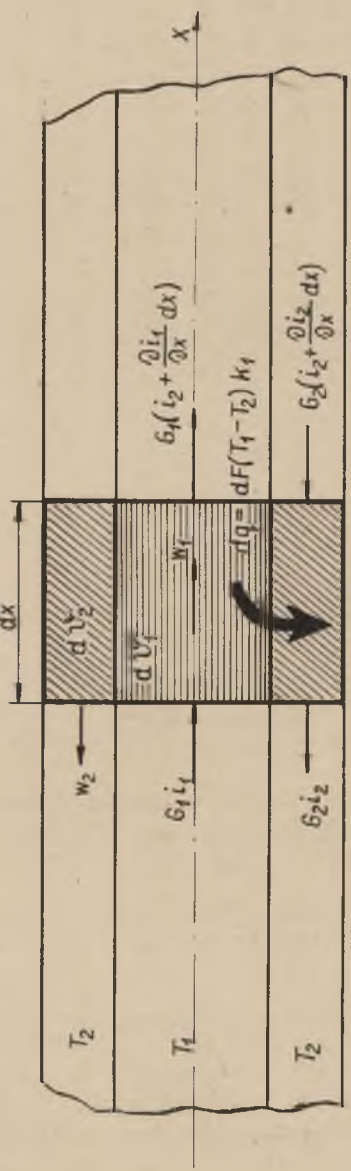
4. Uśredniamy temperatury i prędkości w poszczególnych przekrojach zakładając ich profile jako prostokątne.

5. Wszystkie przebiegi odbywają się w zakresie przepływów turbulentnych.

6. Wymiana ciepła medium zewnętrznego z otoczeniem jest uniemożliwiona dokładnym odizolowaniem układu.



Rys.6



Rys.6a

Rys.6 i 6a - Podstawowy schemat ideowy wymiany ciepła w wymienniku

Dla $T_1 > T_2$ otrzymamy z bilansu energetycznego

$$G_1 i_1 \partial\tau = dv_1 \gamma_1 c_1 \partial T_1 + dF(T_1 - T_2)\alpha_1 \partial\tau + G_1\left(i_1 + \frac{\partial i_1}{\partial x} dx\right)\partial\tau$$

oznaczamy:

$$\frac{\alpha_1 \, 0}{f_1 \; \gamma_1 \; c_1} = k_1\left[\frac{1}{sek}\right]$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial\tau} = k_1 (T_2 - T_1) - w_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \tag{1}$$

$$dF\,\alpha_2(T_1 - T_2)\,\partial\tau + G_2\left(i_2 + \frac{\partial i_2}{\partial x} dx\right)\partial\tau = dv_2 \; \gamma_2 \, c_2 \; \partial T_2 + G_2 \, i_2 \partial\tau$$

$$\frac{\alpha_2 o}{f_2 \; \gamma_2 \; c_2} = k_2\left[\frac{1}{sek}\right]$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial\tau} = k_2(T_1 - T_2) + w_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \tag{2}$$

Bezpośrednie i ogólne rozwiązanie układu równań (1) (2) dla w_2 zmieniającego się skokowo podali B.Drobot i A.Rybarski [41] w postaci:

$$1.\; T_1(l,t) = T_{u1}(1) + T_{p1}(1,t) \tag{3}$$

$$2.\; T_{u1} = \frac{1}{1 - \frac{\rho^2}{\beta^2} e^{-\sqrt{\Delta}}} T_1\left\{\left(1 - \frac{\rho^2}{\beta^2}\right) e^{p2} + T_{21} \frac{\rho}{d_{21}}\left(1 - e^{-\sqrt{\Delta}}\right)\right\}$$

gdzie należy położyć $s = 0$, $w_2 = w_2 +$

3. Dla s = 0 mamy

$$\sqrt{\Delta} = \left| \frac{k_1}{w_1} - \frac{k_2}{w_2} \right| \qquad \rho = 2 \min\left(\frac{k_1}{w_1} ; \frac{k_2}{w_2} \right)$$

$$\beta^2 = 4 \frac{k_1 k_2}{w_1 w_2} \qquad p_2 = \frac{\rho}{2} - \frac{k_1}{w_1} ; \qquad d_{21} = \frac{k_2}{w_2}$$

4. $$T_{p1}(1,t) = \sum_{i=1}^{4} T_{p1}^{i_1}(1,t) + \sum_{i=1}^{4} T_{p1}^{i_2}(1,t)$$

5. $$T_{p1}^{i_1}(1,t) = e^{\alpha i} \pi_{11}^{i} e^{si1t} - A_1^i(t) \pi_{11}^{i} -$$

$$- B_1^i(t) \pi_{12}^{i} = e^{\alpha i}$$

$$T_{p1}^{i2}(1,t) = e^{\alpha i} \pi_{21}^{i} e^{si2t} - A_2^i(t) \pi_{21}^{i} -$$

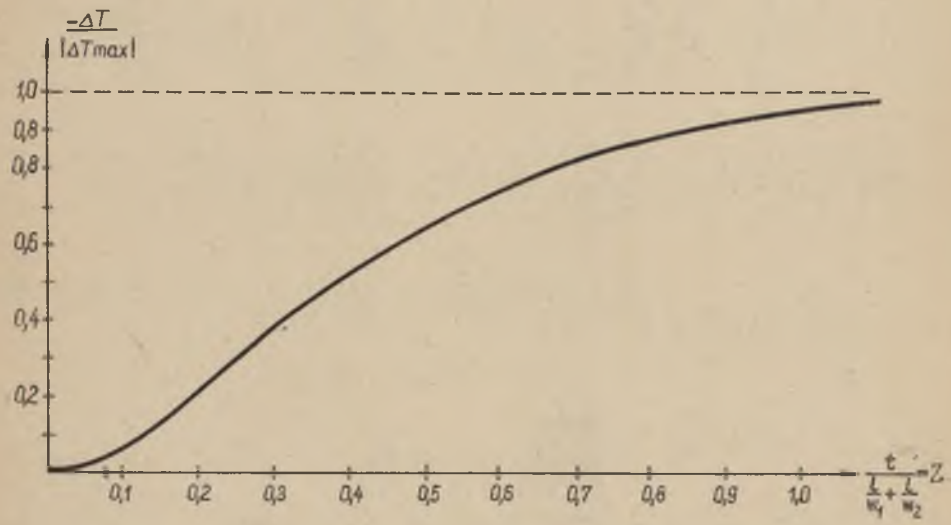
$$- B_2^i(t) \pi_{22}^{i} e^{\alpha i}$$

Przebieg czasowy T_{11} wyliczony zgodnie z funkcją (3) przedstawia się następująco:

Ponieważ przeliczenie funkcji (3) dla wartości liczbowych jest bardzo uciążliwe, a wynikowy przebieg czasowy obarczony jest w stosunku do rzyczywistego znacznym błędem, na skutek poczynionych założeń upraszczających (założenia 1 do 6 str. 5) dokonano próby posłużenia się dla celów praktycznych przybliżoną metodą obliczenia przebiegu funkcji $T_1 = f(\tau)$ dla w_2 zmienionego skokowo.

W tym celu sprowadzono układ równań (1) (2) do układu równoważnych równań całkowitych i rozwiązywano je metodą kolejnych przybliżeń wg Picarda [43] [45].

Adaptacja metody Picarda sprowadza się do znalezienia dwu funkcji $T_1(x,t)$, $T_2(x,t)$ spełniających w obszarze $0 \leqslant x \leqslant 1$, $t \geqslant 0$ układu równań (1) (2), a na brzegach



Rys.7. Teoretyczny przebieg odpowiedzi temperaturowej na skokową zmianę przepływu

tego obszaru warunki:

$$T_1(x,0) = \varphi_1(x), \qquad T_2(x,0) = \varphi_2(x)$$

w których $\varphi_1(x)$ i $\varphi_2(x)$ są danymi funkcjami dla $o \leqslant x \leqslant 1$, oraz $T_1(o,t) = T_{10} = \text{const.}$

$$T_2(1,t) = T_{21} = \text{const.}$$

Współczynniki w_1, k_1, k_2 są stałe, a w_2 jest funkcją tylko zmiennej t.

$$w_2(t) = \begin{cases} w_2^- & \text{dla} \quad o \leqslant t < t_o \\ w_2^+ & \text{dla} \quad t > t_o \end{cases}$$

charakterystyki układu (1) (2) otrzymamy z warunku:

$$\begin{vmatrix} dx - w_1\,dt & 0 \\ 0 & dx + w_2\,dt \end{vmatrix} = 0 \qquad (2.1)$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{w_1} \quad \text{oraz} \quad \frac{dt}{dx} = -\frac{1}{w_2} \qquad (2.2)$$

Z wzorów (2,2) widać, że układ (1) (2) jest typu hyperbolicznego, bo charakterystyki są rzeczywiste.
Z równań (2,2) otrzymujemy równania charakterystyk

$$\xi = w_1 t - x = \text{const}$$

$$\eta = \int w_2(t)dt - x = \text{const} \qquad (2.3)$$

charakterystyki $\xi = \text{const}$ są liniami prostymi, a $\eta = \text{const}$ są dla $w_2 \neq \text{const}$ krzywymi.
Zamiast zmiennych x,t, wprowadzimy zmienne , , określone wzorami (2.3). Wtedy układ równań (1), (2) przyjmie postać:

$$w\frac{\partial T_1}{\partial \eta} = k_1\,(T_2 - T_1)$$

$$w\frac{\partial T_2}{\partial \xi} = k_2\,(T_1 - T_2) \qquad (3.1)$$

gdzie $w = w_1 + w_2$

a obszar, w którym rozpatrujemy ten układ, będzie w płaszczyźnie ξ, η obszarem ograniczonym krzywymi, które otrzymamy podstawiając w (2.3) odpowiednio $t = 0$, oraz $x = 1$.
W płaszczyźnie ξ, η charakterystykami są linie $\xi = \text{const}$ oraz $\eta = \text{const}$ a więc równoległe do osi układu.
Pierwsze z równań (3.1) przepisujemy w postaci

$$\frac{\partial T_1}{\partial \eta} + \frac{k_1}{w}T_1 = \frac{k_1}{w}T_2$$

i całkujemy względem T_1, tzn. równanie to traktujemy jako równanie różniczkowe liniowe o niewiadomej T_1.

W ten sposób otrzymujemy:

$$T_1(\xi,\eta) = \varphi_1(\xi,\eta) + \int_{\eta=\xi}^{\eta} G_1(\xi,\eta,\eta') T_2(\xi,\eta')\,d\eta' \tag{4.1}$$

gdzie

$$\varphi_1(\xi,\eta) = T_1\left[\xi,\eta_0(\xi)\right] \exp\left\{-k_1 \int_{\eta_0(\xi)}^{\eta} \frac{d\eta'}{w(\xi,\eta')}\right\} \tag{4.1}$$

oraz

$$G_1(\xi,\eta,\eta') = \frac{k_1}{w(\xi,\eta')} \exp\left\{-k_1 \int_{\eta'}^{\eta} \frac{d\eta''}{w(\xi,\eta'')}\right\} \tag{4.3}$$

Równanie (4.1) jest równaniem całkowym równoważnym pierwwszemu z równań (3.1). Analogicznie drugie z równań (3.1) zastępujemy przez następujące równanie całkowe

$$T_2(\xi,\eta) = \varphi_2(\xi,\eta) + \int_{\xi=\eta}^{\xi} G_2\left[(\xi,\eta)\xi'\right] T_1(\xi',\eta)\,d\xi' \tag{4.4}$$

gdzie

$$\varphi_2(\xi,\eta) = T_2\left[\xi_0(\eta)\eta\right] \exp\left\{-k_2 \int_{\xi_0=(\eta)}^{\xi} \frac{d\xi'}{w(\xi',\eta)}\right\} \tag{4.5}$$

oraz

$$G_2(\xi,\eta,\xi') = \frac{k_2}{w(\xi',\eta)} \exp\left\{-k_2 \int_{\xi'}^{\xi} \frac{d\xi''}{w(\xi'',\eta)}\right\} \tag{4.6}$$

W ten sposób układ równań różniczkowych (3.1) wraz z warunkami granicznymi został zastąpiony przez równoważny mu układ równań całkowych (4.1) i (4.4).

Te równania zawierające obie niewiadome funkcje T_1 i T_2 przekształcimy w ten sposób, żeby w jednym równaniu była tylko jedna niewiadoma funkcja.

W tym celu wstawiamy pod całkę w równaniu (4.1) wyrażenie na $T_2(\xi, \eta')$ wzięte z równania (4.4). W ten sposób otrzymujemy

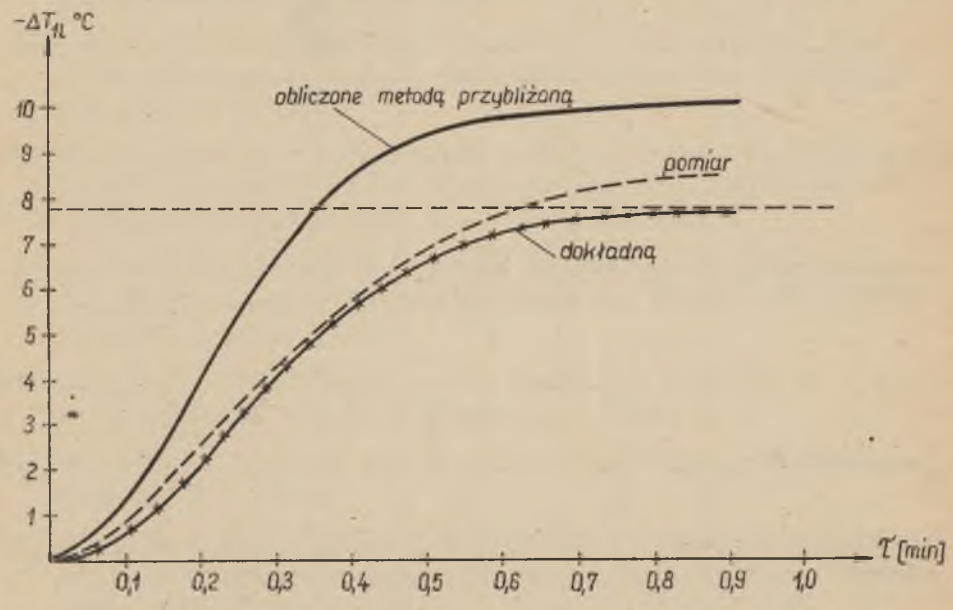
$$T_1(\xi, \eta) = \psi_1(\xi, \eta) + \int_{\eta_0(\xi)}^{\eta} d\eta' \int_{\xi_0(\eta')}^{\xi} d\xi' \, \zeta_1(\xi, \eta; \xi', \eta') T_1(\xi', \eta') \tag{4.7}$$

a więc równanie zawierające tylko niewiadomą T_1, przy czym oznaczono:

$$\psi_1(\xi, \eta) = \varphi_1(\xi, \eta) + \int_{\eta_0(\xi)}^{\eta} C_1(\xi, \eta, \eta') \varphi_2(\xi, \eta') d\eta' \tag{4.8}$$

oraz

$$\zeta_1(\xi, \eta, \xi', \eta') = G_1(\xi, \eta, \eta') G_2(\xi, \eta', \xi') \tag{4.9}$$



Rys.8. Krzywe: teoretyczna i eksperymentalna odpowiedzi temperaturowej na zmianę przepływu

analogicznie otrzymujemy dla T_2 następujące równanie

$$T_2(\xi,\eta) = \psi_2(\xi,\eta) + \int_{\xi_0(\eta)}^{\xi} d\xi' \int_{\eta_0(\xi')}^{\eta} d\eta' \; s_2(\xi,\eta,\xi',\eta') T_2(\xi',\eta') \tag{4.10}$$

gdzie

$$\psi_2(\xi,\eta) = \varphi_2(\xi,\eta) + \int_{\xi_0(\eta)}^{\xi} G_2(\xi,\eta,\xi')\, \varphi_1(\xi',\eta)\, d\xi' \tag{4.11}$$

oraz

$$s_2(\xi,\eta,\xi',\eta') = G_2(\xi,\eta,\xi')\, G_1(\xi',\eta,\eta') \tag{4.12}$$

Równania (4.1) oraz (4.4) będziemy traktowali metodą Picarda ograniczając się tylko do pierwszego kroku.
Wynik obliczeniowy funkcji przejścia dla wymiennika modelowego i zmiany przepływu Q_2^x z 570 l/h na 1500 l/h przy Q_1^x = 450 l/h = const przedstawia rysunek 8.

LITERATURA

[1] Z.Trybalski - Praca doktorska Politechnika Śląska Gliwice 1960.

[2] P.Profos - Vektorielle Regeltheorie Zürich 1944 Lemann Verlag.

[3] J.L.More, F.J.Quail and J.W.Bain - Application of automatic centrollers to heat exchangers, Industrial and Engineering Chemistry vol.37 N° 10 October 1945.

[4] Y.Takahashi - Transfer Funktion Analysis of Heat Exchange Processes, Automatic and Manuel Control Butterwoths Scientific Pub. London 1952.

[5] Y.Takahashi - Regeltechnische Eigenschaften von Gleich- und Gegenstronwärme - austauschern Regelungstechnik H.2 1953.

[6] W.C.Cohen and E.F.Johnson - Dynamic charakteristies of Double. Pipe Heat Exchangers Industrial and Engineering Chemistry Vol. 48 June 1956.

[7] J.M.Morley - Predicting Dynamies of Concentriie Pipe Heat Exchangers. Industrial and Engineering Chemistry vol. 48 June 1956.

[8] H.M.Paynter and Y.Takahashi - A.New Method of Evaluating Dynamic Response of Counterflow and Parallel-flow Heat Exchangers Trans. ASME vol. 78.No.4.1956.

[9] B.J.Dewiatow - Pierochodnyje reżimy raboty niepreriwnodiejstwujuszczich tiepłoobmiennikow, Dokł.Ak.Nauk SSSR t.XL No 5.1953.

[10] B.Hanuś - Vysetrovani nestacjonarnich pochodu ve vymienioich tepla; Mereni a Regulace 3.1957.

[11] P.Profos - Dynamik der Uberhitzerregellung, Regelungstechnik N.7.1958.

[12] J.A.Clark V.S.Arpaci, K.M.Treadwell - Dynamic Response of Heat Exchangers Hawing Internal Heat Sources. Trans. ASME. vol.80 No.3.1958.

[13] A.R.Aikman - Frequancy - Response Analysis and Controllability of a Chemical Plant Trans.ASME. Vol.74.Nor. 1954.

[14] Plant and Process Dynamic Charakteristies, Procsedings of a Conference held at Cambridge April 1956, London B Butterworthas Sci. 1957.

[15] G.H.Farrington - Automatic Temperature Control of Jacketed Pans.Trans. S.J.T.vol.1.1947.

[16] D.W.St.Clair. W.F.Coombe and W.D.Owens - Frequency Response Analysis for Industrial Automatic Control Systems-Trans. ASME vol.74.1952.

[17] K.Hengst E.Meier - Versuche zur automatischer Regelung von Destillationskollonnen; Regelungstechnik N.9.u.H.10. 1955.

[18] W.Kundt - Die Regelung von Destillationskollonnen nach der Produktqualität H.8.1955.

[19] Z.J.Beirach - Woprosy teorii regelirowanija kotielnych ustanowok. Trudy wtorowo Wsiesojuznowo Sowieszczanije po Teorii Automaticzeskowo Regulirowanija Moskwa 1955.

[20] A.Leonhard - Die selsttätige Regelung, Springer Verlag 1957.

[21] T.Hobler - Ruch ciepła i wymienniki PWT 1953.

[22] H.Schlichting - Grenzschicht - Theorie Karlsruhe 1951.

[23] A.L.London H.B. Nottage and L.M.K.Boelter - Determinations of Unit Conductances for Heat and Mass Transfer by the Transient Method. Industrial and Engineering Chemistry. April 1941.

[24] Physical Measuremente in Gas Dynamice and Combustion Osford University Press London 1955.

[25] R.O.L.Bosforth - Heat Transfer Phenomena, John Wiley N.Y. 1957.

[26] J.T.Aładiew - Eksperymentalnoje opredielienie lokalnych i średnich koefficientew tiepłootdaczi pro turbulentnom tieczenii żidkosti w trubach. Izw.Ak.Nauk SSSR. OTN. Nr 11. 1951.

[27] J.T.Aładiew, M.A.Michiejew, O.S.Fedinskij - Zawisimost tiepłootdaczi w trubach ot naprawlenija tiepłowowo potoka i jestestwiennoj konwekcji. Izw.Ak.Nauk.SSSR. OTN. Nr 1.1951.

[28] M.A.Michiejew - Tiepłootdacza pri turbulentnom dwiżenii żidkosti w trubach. Izw.A.Nauk.SSSR.OTN.Nr 10.1952.

[29] G.A.Rabinowicz - Rasozot Tiepłoobmiennych apparatow rabotojaszczich pri niestacjonarnom tiepłowom reżimie. Żurnal tiechniczeskoj Fizykie, Cz.1. Nr 3.XXIII.1953. cz.II Nr 4. XXIII.1953, cz.III.Nr 7.XXIV.1954, cz.IV Nr 5.XXVIII.1958.

[30] B.Dirksen - Messung von Geschwindingkeitefeldern turbulenter Rohrströmung bei kleinen Kennzahlen. Doktor Dissertation T.H. Aachen 1935.

[31] L.E.Kalichman - Nowyj metod rasczota turbulentnowo pogranicznowo słoja i opredielenie toczki zrywa. Dokł.Ak.Nauk SSSR Nr 5-6 T.XXXVIII.1943.

[32] E.Światopełk-Czetwertyński - Hydraulika i hydromechanika PWN Warszawa 1958.

[33] F.Tölke - Vöreffentlichungen zur Erforschung der Druckstossprobleme in Wasserkraft - anlagen und Rohrleitungen Springer - Verlag. Berlin 1956.

[34] A.M.Łatyszankow, W.G.Łobaczew - Gidraulika Gos-izdstroj. Moskwa 1956.

[35] E.G.Richardson, E.Tyler - The transverse velocity gradient near the mouths of pipes in which on alternating or continous flow of is established. The Proceedings of the Physical Society London 42.1.1929.

[36] Th.Sexl. - Über den von E.G.Richardson eutdeckten "Annularsffekt" Zeitschrift für Physik Gl.1930.

[37] J.Nikuradze - Gesetzmäsigkeiten der turbulenten Strömung in Glatten Rohren. VDJ-Forsch, Heft 356 Berlin 1932.

[38] J.Nikuradze - Strömungsgesetze in rauhen Rohren; VDJ Forsch-Heft 361. Berlin 1933.

[39] B.Bauer u.F.Galaviens - Experimentelle und theoretische Untersuchungen über die Rohreibung von Heisswasserfernleitungen. Mitteilung aus Betrieb und Forschung des Fernheizkraftwerkes der Eidg. Techn. Hochschule Zürich 1936.

[40] F.Schultz - Grunow - Pulsierender Durchfluss durch Rohre Forschung 11. Heft 4. Göttingen 1940.

[41] S.Drobot, A.Rybarski - Rozwiązanie układu równań. Wrocław 1959. Niepublikowane.

[42] A Gray, G.B.Mathews - A treatise on Bessel funktions and their applications to physics. Glasgow 1931.

[43] W.J.Smirnow - Kurs wyższej matematyki Moskwa 1957.

[44] B.van der pol and H.Bremmer - Operational calculus based on the two - sided Laplace intergral Cambrige 1950.

[45] W.W.Stiepanow - Równanie różniczkowe (tłumacz. z ros.) PWN 1956.

[46] St.Węgrzyn - Przebiegi nieustalone w elektrycznych liniach i układach łańcuchowych PWN 1958.

[47] W.J.Caldwell, G.A.Coon, L.M.Zoss - Frequency response for process control, Mc Graw Hill Book Co. 1959.

[48] Kondriatiew G.M. - Tiepłowyje izmierienija Moskwa 1957.

Этюд регуляционных свойств противоточных теплообменников с изменяющимся переплывом одного фактора

Содержание

Кроме теплообменников регулированных с помощию изменения температуры одного из факторов, встречаются в технологических процессах химического производства, теплообменники регулированные с помощию изменения скорости переплыва.

Проанализировано гидродинамические условия каким должен соответствовать возмущающий сигнал а также представлено результаты исследования реакции теплообменника на одиночный толчок. Представлено также сравнительные кривые, полученные путем вычислений точных, приближенных и измерений.

Ein Studium über die Regeleigenschaften eines Wärmeaustauschers mit entgegenströmender Wärme und wechselartiger Strömung eines Mediums

Zusammenfasung

In der chemischen Industrie werden ausser den Wärmeaustauschern in welchen die Eingangstemperatur zur Regelung der Ausgangstemperatur dient, auch andere verwendet, in welchen zu dieser Regelung die Strömungsgeschwindigkeit eines Mediums ausgenutzt wird. Es werden die hydrodynamischen Bedingungen geprüft, denen das Eingengssignal entsprechen soll. Das Ergebniss der Analyse des Ausgangssignals bei einer sprungartigen Änderung der Strömung wird angegeben. Die theoretisch berechneten und experimentell aufgenommene Kurven werden vergliechen.

A Study of the Dynamic Behaviour of a Counter-Current Heat Exchanger with the Variable Flow

Summary

The heat exchanger are usually controlled by the variation of the temperature. In some chemical applications, the control by means of flow variation is also practicable. The flow input signal is considered from the point of view of hydrodynamics, and the step response of the exchanger is calculated. The step response curves computed by exact and approximate methods are compared with the experimental data.