

ANTONI GUZIK

Katedra Energetyki Ciepłej

ZASTOSOWANIE ANALOGII HYDRODYNAMICZNEJ
DO WYZNACZANIA WSPÓŁCZYNNIKA
PRZEKAZYWANIA CIEPŁA W REGENERATORZE

Streszczenie. Opisano zbudowane hydrauliczne urządzenie analogowe do badania zjawiska cyklicznego przepływu ciepła w regeneratorze o działaniu niesymetrycznym. Równania, z których wynikają warunki analogii oparto na elementarnych bilansach energetycznych i substancjalnych. Zastosowano zmienne zredukowane, dzięki czemu staje się zbędne respektowanie indywidualnych własności fizycznych materiału wypełnienia i cieczy zastosowanej w urządzeniu analogowym. Opisano przebieg doświadczeń oraz uzyskane wyniki. Podano wnioski dotyczące celowości stosowania analogii hydrodynamicznej.

1. Wstęp

Regenerator czyli przekaznik ciepła z wypełnieniem jest urządzeniem o działaniu cyklicznym. Następujące po sobie fazy grzania G i ochładzania O wypełnienia powodują, że temperatura w dowolnym punkcie regeneratora, zarówno

*) Artykuł jest fragmentem pracy doktorskiej pt. "Wyznaczenie współczynnika przekazywania ciepła w regenerato-
rze dla stałych temperatur gazów w oparciu o metody róż-
nicowe", wykonanej w Katedrze Energetyki Ciepłej. Pro-
motorem pracy był prof. dr inż. Jan Szargut.

wypełnienia jak i gazu, zmienia się okresowo. Panuje przekonanie, że teoria regeneratorów jest jednym z najbardziej trudnych i skomplikowanych problemów spotykanych w technice. Trwające od 40 lat próby rozwiązania zagadnienia miały na celu analityczny opis zjawisk zachodzących w regeneratorze [1, 2], a przede wszystkim ustalenie metod obliczania współczynnika przekazywania ciepła k_r [3, 6, 7, 8]. Znajomość współczynnika k_r zezwala ująć obliczenie regeneratora w formie stosowanej dla rekuperatora

$$Q = A k_r \Delta t_m \quad (1)$$

gdzie:

- Q - ilość ciepła przekazywana w czasie jednego cyklu od gazu grzejącego do ogrzewanego,
- k_r - współczynnik przekazywania ciepła dotyczący jednego cyklu,
- Δt_m - średnia czasowa i przestrzenna różnica temperatur gazów grzejącego i ogrzewanego.

Ścisła metoda obliczania współczynnika k_r została dotychczas opracowana przy założeniu jednakowych wartości współczynników wnikania ciepła α_G i α_0 dla fazy grzania i ochładzania wypełnienia [1]. Jest to tzw. wypadek pólśymetryczny.

Ze względu na wielką złożoność procesów zachodzących w regeneratorze oraz z uwagi na brak ścisłych rozwiązań analitycznych dla regeneratorów działających niesymetrycznie (niejednakowe wartości współczynników wnikania ciepła i czasów trwania faz grzania i ochładzania wypełnienia), wydaje się celowe zastosowanie w tym zagadnieniu prostych i oczywistych metod różnicowych. Metody różnicowe są metodami przybliżonymi, jednak ich dokładność można dowolnie zwiększać przez zmniejszanie podziału różnicowego. Metody różnicowe można realizować m.in. na urządzeniach analogowych. W urządzeniach tych podział różnicowy stosuje się tylko do współrzędnej miejsca, współrzędna zaś czasu pozostaje ciągłą. W pracy rozpatrzono zastosowanie analogii hydrodynamicznej.

2. Określenie współczynnika przekazywania ciepła w regenera- torze

Współczynnik k_r przekazywania ciepła w regeneratorze jest w niniejszej pracy wyznaczony przy następujących założeniach upraszczających:

- nieruchome wypełnienie regeneratora stanowią płyty płaskie, obustronnie omywane przez gaz. Ich grubość 2δ jest znacznie mniejsza od długości i szerokości,
- współczynnik przewodzenia ciepła λ , gęstość ρ i ciepło właściwe c materiału wypełnienia nie zależą od temperatury,
- współczynniki wnikania ciepła α_G , α_0 dla fazy grzania i ochładzania i temperatury t_G , t_0 gazu grzejącego i ogrzewanego w rozważanym przekroju regeneratora mają wartości stałe,
- przewodzenie ciepła w materiale wypełnienia występuje tylko w kierunku prostopadłym do powierzchni.

Dla stanu pseudoustalonego ilość ciepła przekazywana w czasie jednego cyklu od gazu grzejącego do ogrzewanego odniesiona do jednostkowego pola powierzchni wypełnienia jest równa zmianie entalpii wypełnienia (przy pominięciu strat do otoczenia)

$$k_r(t_G - t_0) = \delta \rho c (\dot{v}_{mG} - \dot{v}_{m0}) \quad (2)$$

Określając zredukowane ciepło α podobnie jak w pracy [1] jako stosunek różnicy średnich ekstremalnych temperatur płyty, do różnicy temperatur gazów

$$\alpha = \frac{\dot{v}_{mG} - \dot{v}_{m0}}{t_G - t_0} \quad (3)$$

uzyskuje się wzór na współczynnik przekazywania ciepła

$$k_r = \alpha \delta \rho c \quad (4)$$

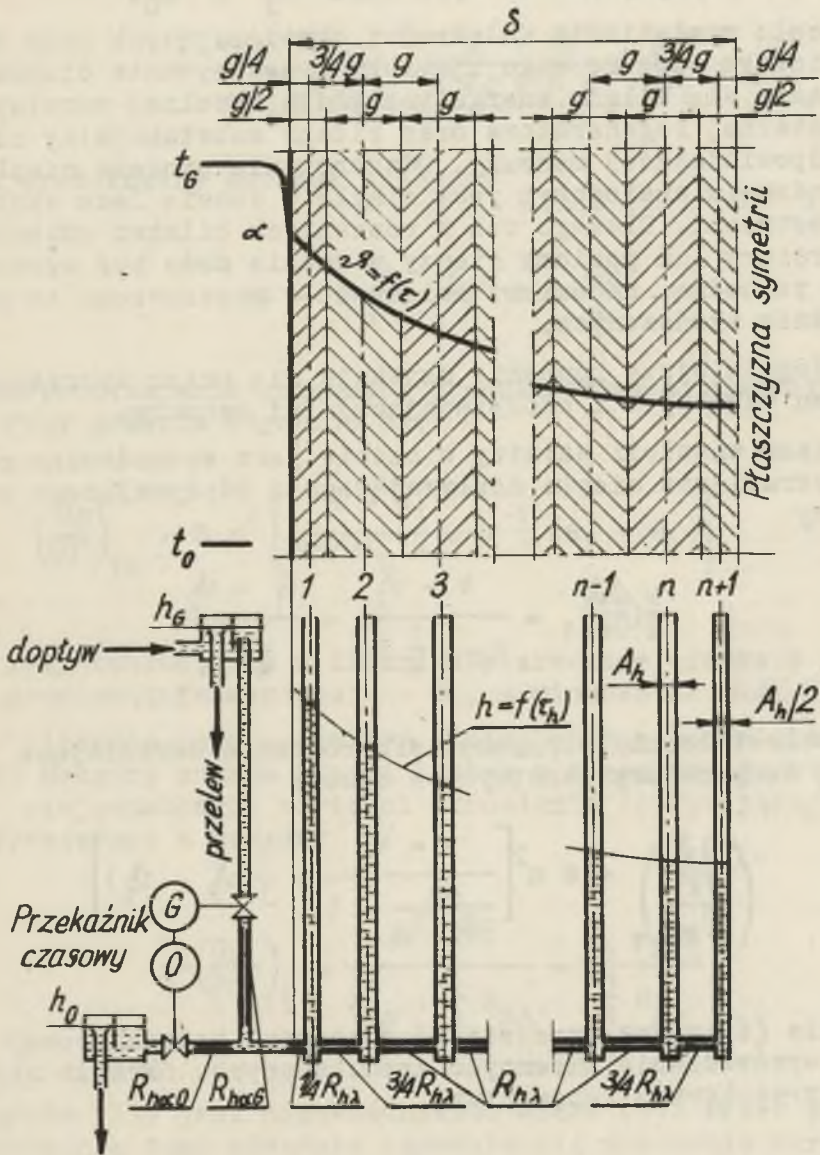
Dla obliczenia współczynnika k_r należy więc znać stosunek κ , czyli należy określić średnie ekstremalne temperatury płyty w stanie pseudoustalonym, dla fazy grzania λ_{mG} i ochładzania λ_{mO} . Do wyznaczenia tych temperatur zastosowano metodę analogii hydrodynamicznej.

3. Określenie warunków analogii

Przekazywanie ciepła oraz laminarny przepływ cieczy lepkiej są zjawiskami analogicznymi. Strumieniowi ciepła proporcjonalnemu do różnicy temperatur, odpowiada strumień cieczy proporcjonalny do różnicy poziomów cieczy; akumulacji ciepła proporcjonalnej do zmiany temperatury, odpowiada akumulacja cieczy proporcjonalna do zmiany poziomu cieczy; oporowi cieplnemu przepływu ciepła, odpowiada opór hydrauliczny przepływu cieczy [4].

Przedmiotem rozważań jest wycinek płyty o polu zewnętrznej powierzchni $A = 1 \text{ m}^2$. Ze względu na symetrię wystarcza rozpatrzenie połowy grubości płyty δ . Chcąc odwzorować przekazywanie ciepła pomiędzy gazami a płytą dzieli się ją płaszczyznami równoległymi do powierzchni na $n+1$ warstw elementarnych. Warstwy podstawowe (od 2 do n) mają grubość $g = \delta/n$ warstwy skrajne (1 i $n+1$) są dwukrotnie cieńsze (rys. 1). Im większa jest liczba podziału n , tym dokładność odwzorowania jest większa. Zakłada się, że pojemność cieplna poszczególnych warstw jest skupiona w ich ośrodku.

W urządzeniu analogowym pojemności cieplnej $W = g\rho c$ warstwy podstawowej, odpowiada pojemność menzury o polu przekroju A_h . Warstwom skrajnym płyty odpowiadają menzury o polu przekroju $A_h/2$. Opory przewodzenia ciepła $R_\lambda = g/\lambda$ pomiędzy płaszczyznami oddalonymi o grubość g zastępuje się oporami hydraulicznymi $R_{h\lambda}$ odpowiednio dobranych kapilar. Opory hydrauliczne pomiędzy menzurami 1 i 2 oraz n i $n+1$ wyrażają się ułamkami $R_{h\lambda}$ proporcjonalnymi do drogi przepływu ciepła. Ze względu na brak przepływu ciepła przez płaszczyznę symetrii płyty, menzura $n+1$ ma połączenie tylko z menzurą n . Opory wnikania ciepła $R_{\alpha} = 1/\alpha$ imituje się za pomocą kapilar o oporze hydraulicznym $R_{h\alpha}$. Gazom o temperaturach t_G i t_0 odpe-



Rys. 1. Schemat ideowy analogii hydrodynamicznej

wiadają zbiorniczki, w których poziomy cieczy są dzięki przelewom utrzymywane na wysokości h_G i h_0 .

W celu znalezienia zależności obowiązujących przy hydraulicznym odwzorowaniu zjawiska przekazywania ciepła sporządza się bilans energetyczny dla dowolnej warstwy elementarnej regeneratora oraz bilans substancjalny cieczy dla odpowiadającej menzury. Odwzorowanie procesu cieplnego w urządzeniu analogowym jest ciągłe w czasie lecz skokowe w przestrzeni. Dlatego też w równaniach bilansu zmienność temperatury lub poziomu cieczy w czasie może być wyrażona przez pochodną, natomiast zmienność w przestrzeni za pomocą różnic skończonych.

Najogólniejsze równanie uzyskuje się przez sporządzenie bilansu warstwy 1 i odpowiadającej jej menzury.

Zmiana entalpii warstwy w czasie jest spowodowane różnicą strumienia ciepła dopływającego i odpływającego z warstwy

$$\frac{W}{2} \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} \right)_1 = \frac{t - \vartheta_1}{R_{\alpha} + \frac{1}{4} R_{\lambda}} - \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\frac{3}{4} R_{\lambda}} \quad (5)$$

Po przekształceniu otrzymuje się równanie określające zmianę temperatury warstwy 1 w czasie

$$\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} \right)_{n^2 W R_{\lambda} 1} = 8 n^2 \left[\frac{t - \vartheta_1}{\frac{4n}{n R_{\lambda} / R_{\alpha}} + 1} + \frac{1}{3} (\vartheta_2 - \vartheta_1) \right] \quad (6)$$

Równanie (6) można przedstawić w postaci bezwymiarowej przez wprowadzenie zmiennych zredukowanych. Określa się więc: zredukowaną temperaturę

$$\theta = \frac{\vartheta - t_0}{t_G - t_0} \quad (7)$$

zredukowany czas

$$\Gamma = \frac{\tau}{n^2 WR_\lambda} = \frac{\lambda}{n g \varrho c} \frac{\tau}{n g} = \frac{a\tau}{\delta^2} \quad (8)$$

oraz zredukowany warunek brzegowy

$$Bi = \frac{n R_\lambda}{R_\alpha} = \frac{n g}{\lambda} \alpha = \frac{\delta \alpha}{\lambda}. \quad (9)$$

Przez podstawienie zmiennych zredukowanych w równaniu (6) dla fazy grzania uzyskuje się

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial \Gamma}\right)_{1G} = 8 n^2 \left[\frac{1 - \theta_1}{4n/Bi_G + 1} + \frac{1}{3} (\theta_2 - \theta_1) \right] \quad (10)$$

Dla fazy ochładzania w liczniku pierwszego ułamka w nawiasie prostokątnym występuje $-\theta_1$, w mianowniku zaś Bi_0 .

W bilansie substancjalnym cieczy sporządzonym dla pierwszej menzury zmiana ilości cieczy w menzurze, jest wynikiem niejednakowych wartości strumienia dopływającego i odpływającego z menzury

$$\frac{A_h}{2} \left(\frac{\partial h}{\partial \tau_h}\right)_1 = \frac{h - h_1}{R_{h\alpha} + \frac{1}{4} R_{h\lambda}} - \frac{h_1 - h_2}{\frac{3}{4} R_{h\lambda}} \quad (11)$$

Równanie (11) jest odpowiednikiem wzoru (5). Przez przekształcenie tego równania uzyskuje się wyrażenie określające zmianę poziomu cieczy w czasie, w postaci odpowiadającej wzorowi (6). W wyrażeniu tym podstawia się zmienne zredukowane: zredukowany poziom cieczy

$$H = \frac{h - h_0}{h_G - h_0} \quad (12)$$

zredukowany czas przebiegu zjawiska w urządzeniu analogowym

$$\Gamma_h = \frac{\tau_h}{n^2 A_h R_{h\lambda}} \quad (13)$$

oraz zredukowany warunek brzegowy

$$Bi_h = \frac{n R_{h\lambda}}{R_{h\alpha}} \quad (14)$$

Wówczas dla fazy dopływu cieczy do zespołu menzur uzyskuje się zależność

$$\left(\frac{\partial H}{\partial \Gamma_h}\right)_{1G} = 8 n^2 \left[\frac{1 - H_1}{4n/Bi_{hG} + 1} + \frac{1}{3}(H_2 - H_1) \right] \quad (15)$$

analogiczną do równania (10).

Zachowanie analogii wymaga zgodności odpowiednich zmiennych zredukowanych

$$H = \theta, \quad \Gamma_h = \Gamma, \quad Bi_h = Bi \quad (16)$$

Warunek (16) określa zależności jakie powinny być spełnione pomiędzy wielkościami w urządzeniu analogowym. Jeżeli zredukowany czas trwania fazy grzania lub ochładzania jest

$$Fo_{G,0} = \frac{a \tau_{G,0}}{\delta^2} \quad (8a)$$

to z równań (13) i (16) wynika czas jaki powinien upłynąć w urządzeniu analogowym dla wypełnienia fazy

$$\tau_{hG,0} = n^2 A_h R_{h\lambda} Fo_{G,0} \quad (17)$$

Z równań (14) i (16) wynika opór hydrauliczny $R_{h\alpha}$ kapilar imitujących opór wnikania ciepła

$$R_{h\alpha} = \frac{n}{Bi} R_{h\lambda} \quad (18)$$

Równania (17) i (18) określają warunki budowy i działania hydraulicznego urządzenia analogowego. Wynika z nich, że dla przyjętego podziału n płyty, przekrój menzur A_h oraz opór hydrauliczny przewodzenia $R_{h\lambda}$ można dobierać dowolnie. Wówczas z równania (18) wynika opór hydrauliczny wnikania $R_{h\alpha}$ odpowiadający przyjętej wartości liczby Biota Bi , z wzoru zaś (17) czas $\tau_{hG,0}$ przebiegu fazy w urządzeniu analogowym dla osiągnięcia zamierzonej liczby Fouriera Fo .

W celu przyspieszenia przebiegu doświadczeń analogowych wielkości A_h i $R_{h\lambda}$ powinny być możliwie małe. Zmniejszenie pola przekroju menzury poniżej $A_h \approx 1 \text{ cm}^2$ jest związane z wpływem kapilarności na położenie cieczy w menzurze. Należy bowiem pamiętać, że menzury skrajne mają pole przekroju $A_h/2$. Również nadmierne zmniejszenie oporu $R_{h\lambda}$ przy danej średnicy kapilary, grozi przekroczeniem dopuszczalnych wahań oporu ze zmianą różnicy poziomów cieczy, mimo zachowania kryterium laminarności przepływu $Re < 2320$. Jest to spowodowane burzliwością przepływu na odcinku rozbiegu hydraulicznego L_r , który zależy od średnicy d kapilary i liczby Reynoldsa [5],

$$L_r = 0,0288 d Re.$$

Przy doborze kapilar należy więc przestrzegać warunku $L/d \gg L_r/d$.

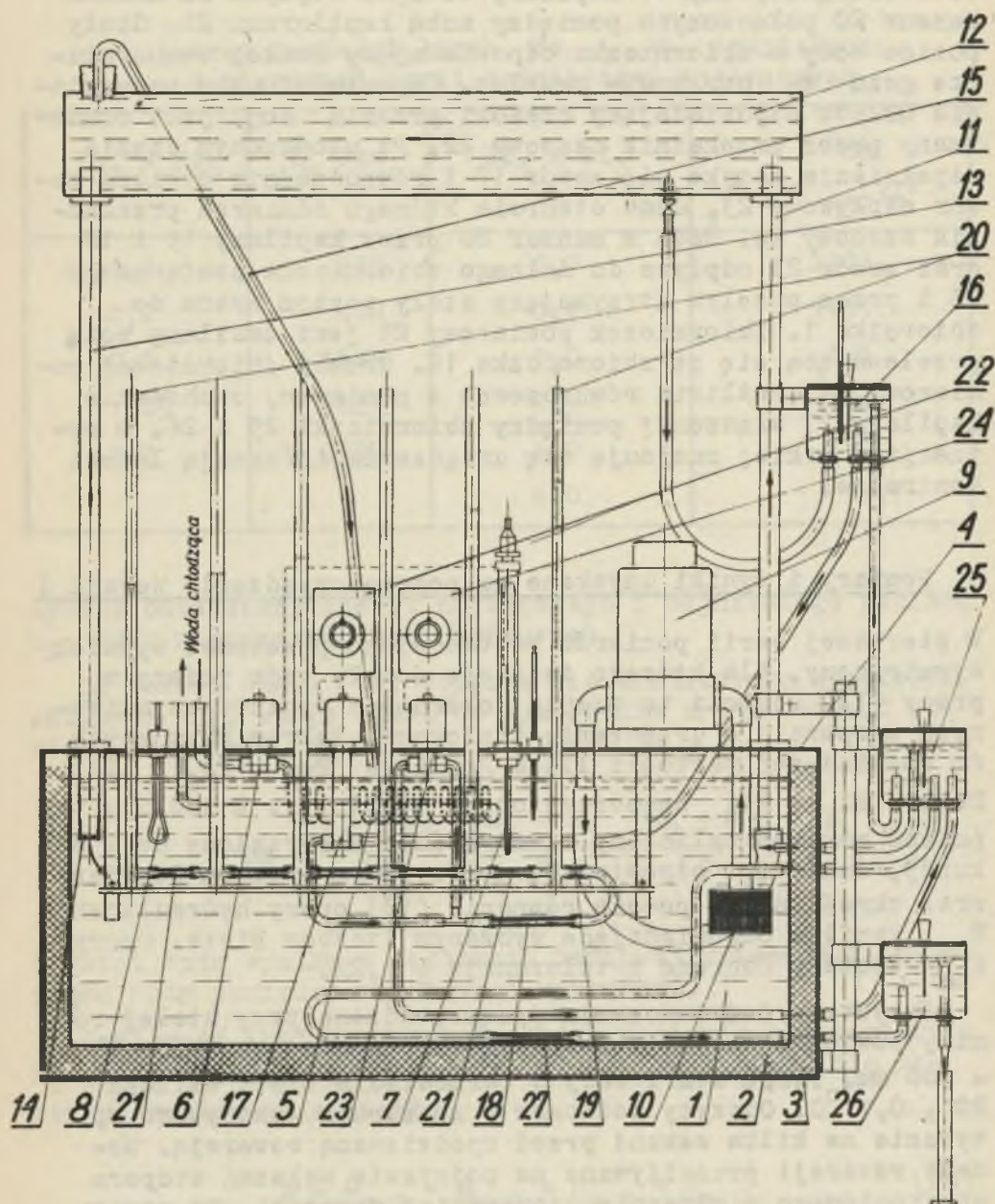
Należy zauważyć, że w równaniach (17) i (18) nie występują wielkości indywidualne materiału płyty i rodzaju cieczy zastosowanej w urządzeniu hydraulicznym. Również i rezultaty doświadczeń opracowane w postaci bezwymiarowej będą miały zastosowanie ogólne bez względu na indywidualne własności fizyczne materiału wypełnienia regeneratora.

Gdyby równanie (16) przedstawić w formie jawnej przez wykorzystanie wzorów (7) do (9) i (12) do (14), to można by uzyskać znane w literaturze [4] tzw. skale odwzorowania, wiążące pomiędzy sobą wielkości tego samego typu dla procesu cieplnego i hydraulicznego.

4. Opis urządzenia analogowego wersji 1

Hydrauliczne urządzenie analogowe zbudowano dla połowy grubości płyty, przyjmując liczbę podziału $n = 5$. Zastosowano menzury szklane o średnim polu przekroju $A_h = 0,997 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ oraz kapilary imitujące opór przewodzenia ciepła warstwy podstawowej mające średni opór hydrauliczny $R_{h\lambda} = 92,1 \cdot 10^4 \text{ sec/m}^2$. Tolerancja pola przekroju menzur w porównaniu z przekrojem średnim wynosiła od $-0,3$ do $+0,8\%$; tolerancja oporu kapilar od $-0,4$ do $+0,3\%$. Jako ciecz zastosowano wodę destylowaną. Dla uniknięcia wpływu temperatury na lepkość wody (zmianę oporu hydraulicznego kapilar) całe urządzenie wykonano jako termostatowe.

Schematycznie przedstawiono je na rysunku 2. Zasadnicze elementy pomiarowe (kapilary i dolna część menzur) są zanurzone w wodzie zawartej w wewnętrznym zbiorniku 1 odizolowanym od zewnątrz rozdrobionym korkiem 2. Całość urządzenia jest zamknięta w bakelitowej obudowie 3 przykrytej pokrywą 4. Stałość temperatury wody jest utrzymywana przez przepływ wody chłodzącej wewnątrz węzownicy 5 sterowany zaworem elektromagnetycznym 6 impulsowanym przez termometr kontaktowy 7. Do ewentualnego podgrzania wody przewidziano grzejnik elektryczny 8. Do kontroli temperatury służą laboratoryjne termometry. Ze zbiornika 1 pompa 9 pobiera wodę przez filtr 10 i rurą 11 tłoczy ją do zbiornika górnego 12 skąd rurą 13 z przewężeniem 14 i przewodem 15 woda wraca z powrotem do zbiornika 1. Intensywny przepływ wody sprzyja dobremu jej mieszaniu. Ze zbiornika 12 woda dopływa do górnego zbiorniczka pomiarowego 16 skąd przez zawór



Rys. 2. Schemat urządzenia analogowego wersji 1

elektromagnetyczny 17 kapilary 18 i 19 dopływa do układu menzur 20 połączonych pomiędzy sobą kapilarami 21. Stały poziom wody w zbiorniczku odpowiadający stałej temperaturze gazu t_G utrzymuje przelew. Odpowiedni czas napełniania układu odpowiadający czasowi grzania F_{0G} jest odmierzany przez przekaźnik czasowy 22. Po skończonym czasie napełniania zamyka się zawór 17 i równocześnie otwiera zawór odpływowy 23, czas otwarcia którego odmierza przekaźnik czasowy 24. Woda z menzur 20 przez kapilary 19 i 18 oraz zawór 23 odpływa do dolnego zbiorniczka pomiarowego 25 i przez przelew utrzymujący stały poziom wraca do zbiornika 1. Zbiorniczek pomiarowy 25 jest zasilany wodą przelewającą się ze zbiorniczka 16. Trzeci zbiorniczek pomiarowy 26 umożliwia równoczesne z pomiarem, cechowanie kapilary 27 włączonej pomiędzy zbiorniczki 25 i 26. O sytuacji w jakiej znajduje się urządzenie informują lampki kontrolne.

5. Pomiary i wyniki uzyskane za pomocą urządzenia wersji 1

W pierwszej serii pomiarów postanowiono przebadąć wypadek symetryczny, dla którego istnieje ścisły wzór podany w pracy [1]. Pozwoli to ocenić dokładność wyników uzyskiwanych w oparciu o urządzenie analogowe. Zakres przyjętych do doświadczeń wartości liczb Fouriera $Fo_G = Fo_0$ i liczb Biota $Bi_G = Bi_0$ przedstawiono w tabelicy 1. W tabelicy tej podano również wyliczony z wzoru (17) zaokrąglony do 1 sekundy, czas τ_h odpowiadający przyjętym liczbom Fouriera oraz określone za pomocą równania (18) opory hydrauliczne R_{hoc} kapilar odpowiadające wybranym liczbom Biota. Opory R_{hoc} zostały dobrane z tolerancją $\pm 1,2\%$.

Wszystkie doświadczenia przeprowadzone przy stałej różnicy poziomów wody w zbiorniczkach pomiarowych $h_G - h_0 = 400$ mm. Temperatura wody w termostacie miała wartość $20 \pm 0,1$ °C. Odczyty poziomów w menzurach wykonywano optycznie na kilka sekund przed spodziewaną rewersją. Moment rewersji przewidywano na podstawie wskazań stopera uruchomionego w momencie poprzedniej rewersji. Po stwierdzeniu, że różnica poziomów wody w menzurach po kolejnych cyklach mieściła się w granicach błędu odczytu ($\pm 0,5$ mm), przyjmowano, że układ osiągnął stan pseudoustalony i wyko-

Tablica 1

Zakres wartości liczb Fo i Bi przyjętych
w pierwszej serii doświadczeń analogowych

$Fo_G = Fo_O$	τ_h sec	$Bi_G = Bi_O$	$\frac{R_h \alpha c}{10^{-4} \text{ sec/m}^2}$
0,1	230	0,2	2303
0,2	459	0,4	1151
0,5	1148	1,0	461
1,25	2869	2,5	184
3,0	6887	4,0	115
		6,0	76,7

nywano ostateczny odczyt najwyższego i najniższego poziomu h_i wody w poszczególnych menzurach.

Za pomocą wzoru (12) oblicza się zredukowane wysokości poziomów H_i , które służą do wyliczenia zredukowanego poziomu średniego H_m

$$H_m = \frac{H_1 + H_6}{7,5} + \frac{H_2 + H_5}{6} + \frac{H_3 + H_4}{5} \quad (19)$$

Ostatni wzór wynika z założenia liniowej zmienności poziomu wody pomiędzy sąsiednimi menzurami.

Znajomość zredukowanych średnich poziomów ekstremalnych H_{mG} , H_{mO} oraz równania (3), (7) i (16) pozwalają obliczyć zredukowane ciepło

$$x = \theta_{mG} - \theta_{mO} = H_{mG} - H_{mO} \quad (20)$$

Tablica 2

Wyniki pomiarów i obliczeń pierwszej serii
doświadczeń dla $F_{0G} = F_{00}$ i $B_{1G} = B_{10} = B_1$

P	$t_h \text{ sec}$		F_{0C}	B1	$H_m - \theta_m$		x	x_t	$\beta\%$
	G	O			G	O			
1	240	238	0,208	0,2	0,5065	0,4963	0,0102	0,0102	0,00
2	240	240	0,209	0,4	0,5107	0,4900	0,0207	0,0199	4,02
3	240	242	0,210	1,0	0,5260	0,4775	0,0485	0,0466	4,08
4	240	240	0,209	2,5	0,5517	0,4517	0,1000	0,0965	3,63
5	239	241	0,209	6,0	0,5827	0,4227	0,1600	0,1622	-1,36
6	453	454	0,395	0,2	0,5110	0,4910	0,0200	0,0191	4,71
7	456	458	0,398	0,4	0,5207	0,4815	0,0392	0,0373	5,09
8	456	455	0,397	1,0	0,5440	0,4585	0,0855	0,0841	1,66
9	457	457	0,398	2,5	0,5835	0,4195	0,1640	0,1654	-0,85
10	455	456	0,397	6,0	0,6242	0,3772	0,2470	0,2543	-2,87
11	1150	1151	1,002	0,2	0,5240	0,4763	0,0477	0,0477	0,00
12	1155	1157	1,007	0,4	0,5465	0,4552	0,0913	0,0913	0,00
13	1148	1148	1,000	1,0	0,5960	0,4047	0,1913	0,1942	-1,49
14	1153	1150	1,003	2,5	0,6693	0,3313	0,3380	0,3481	-2,90
15	1152	1151	1,003	4,0	0,7113	0,2908	0,4205	0,4263	-1,36
16	1150	1151	1,002	6,0	0,7308	0,2705	0,4603	0,4830	-4,70
17	2875	2873	2,504	0,2	0,5598	0,4425	0,1173	0,1175	-0,17
18	2900	2887	2,521	0,4	0,6140	0,3905	0,2235	0,2205	1,36
19	2871	2872	2,502	1,0	0,7113	0,2895	0,4218	0,4404	-4,22
20	2867	2863	2,496	2,5	0,8345	0,1697	0,6648	0,6873	-3,27
21	2876	2872	2,504	4,0	0,8813	0,1195	0,7618	0,7796	-2,28
22	2877	2880	2,508	6,0	0,9068	0,0935	0,8133	0,8332	-2,39
23	6897	6901	6,012	0,2	0,6383	0,3640	0,2743	0,2750	-0,26
24	6907	6907	6,018	0,4	0,7405	0,2627	0,4778	0,4865	-1,79
25	6888	6892	6,003	1,0	0,8965	0,1042	0,7923	0,8071	-1,83
26	6886	6887	6,000	2,5	0,9770	0,0247	0,9523	0,9627	-1,08
27	6928	6925	6,035	4,0	0,9878	0,0110	0,9768	0,9853	-0,86
28	6895	6894	6,007	6,0	0,9933	0,0068	0,9865	0,9924	-0,60

$$F_{0C} = F_{0G} + F_{00}$$

Wyniki $p = 28$ pomiarów i wyliczone na ich podstawie zredukowane ciepło α zebrano w tablicy 2. W tablicy tej podano również ścisłe wartości α_t obliczone w oparciu o wzór z pracy [1]. Wartości α_t zezwalają na określenie błędu względnego β wyznaczenia α metodą analogową

$$\beta = \frac{\alpha - \alpha_t}{\alpha_t} \quad (21)$$

Z tablicy 2 wynika, że dokładność większą od $\pm 2\%$ uzyskano dla 16 pomiarów, w zakresie $\pm 2 \div 5\%$ - dla 11 pomiarów, dokładność mniejszą od $\pm 5\%$ dał 1 pomiar.

Średni błąd dla całej serii pomiarów wynosi

$$\beta_m = \pm \sqrt{\frac{\sum \beta^2}{p}} = \pm 2,62\%$$

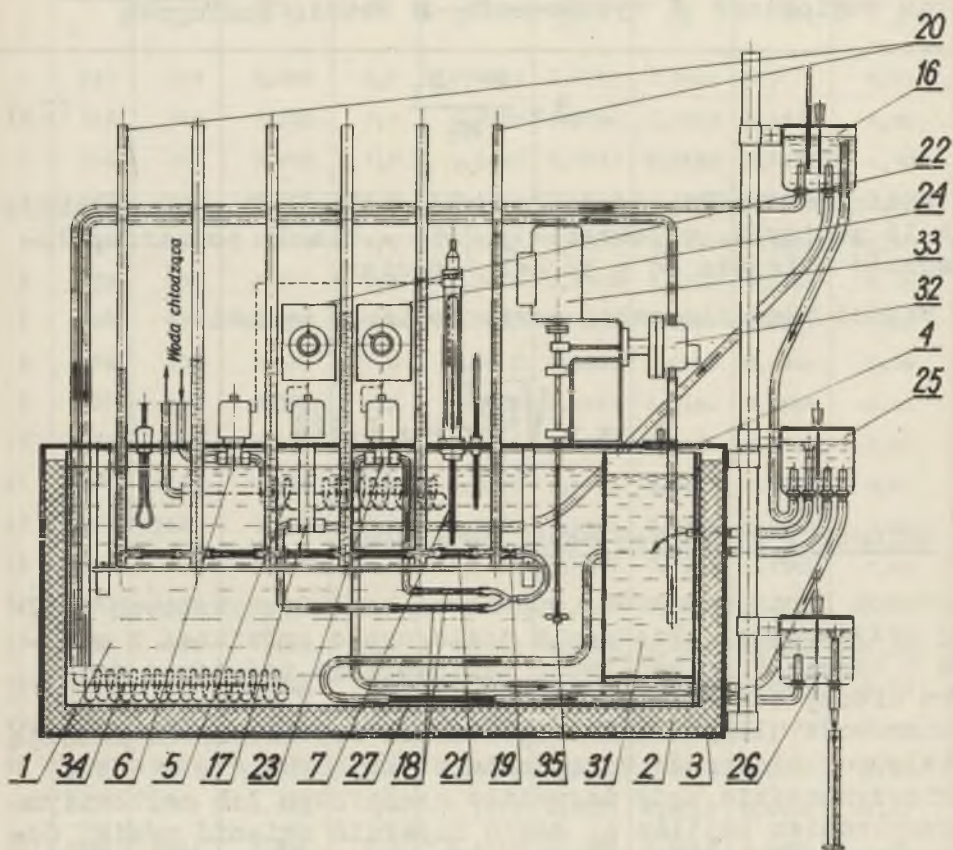
6. Wnioski z pierwszej serii pomiarów

Pierwsza seria pomiarów, oprócz wniosków dotyczących ogólnej przydatności urządzenia analogowego omówionej w punkcie 3 wskazała na wadliwość zastosowania tej samej wody jako cieczy termostatowej i pomiarowej. Z biegiem czasu bowiem woda ulegała zanieczyszczeniu spowodowanemu korozją metalowych elementów urządzenia stykających się z wodą. Zanieczyszczenie wody zagrażało częściowym lub całkowitym zacopowaniem kapilar co mogło zupełnie zmienić wyniki doświadczeń. Dlatego też postanowiono rozdzielić obieg wody pomiarowej i termostatowej, a w obiegu pomiarowym zastosować materiały odporne na korozję.

7. Zmodyfikowane urządzenie analogowe (wersja 2)

W zmodyfikowanym urządzeniu analogowym (rys. 3) zachowując ogólną zasadę opisaną w punkcie 4, wprowadzono zmiany polegające na odrębnym obiegu wody pomiarowej. Zastosowano oddzielny zbiornik 31, z którego pompa membranowa 32 napędzana silnikiem 33 pobiera wodę destylowaną i przez szklaną chłodnicę 34 tłoczy do zbiorniczka pomiarowego 16.

Zbiornik 31 i chłodnica 34 są w celu zachowania stałości temperatury, zanurzone w termostacie 1. Ruch wody w termo-



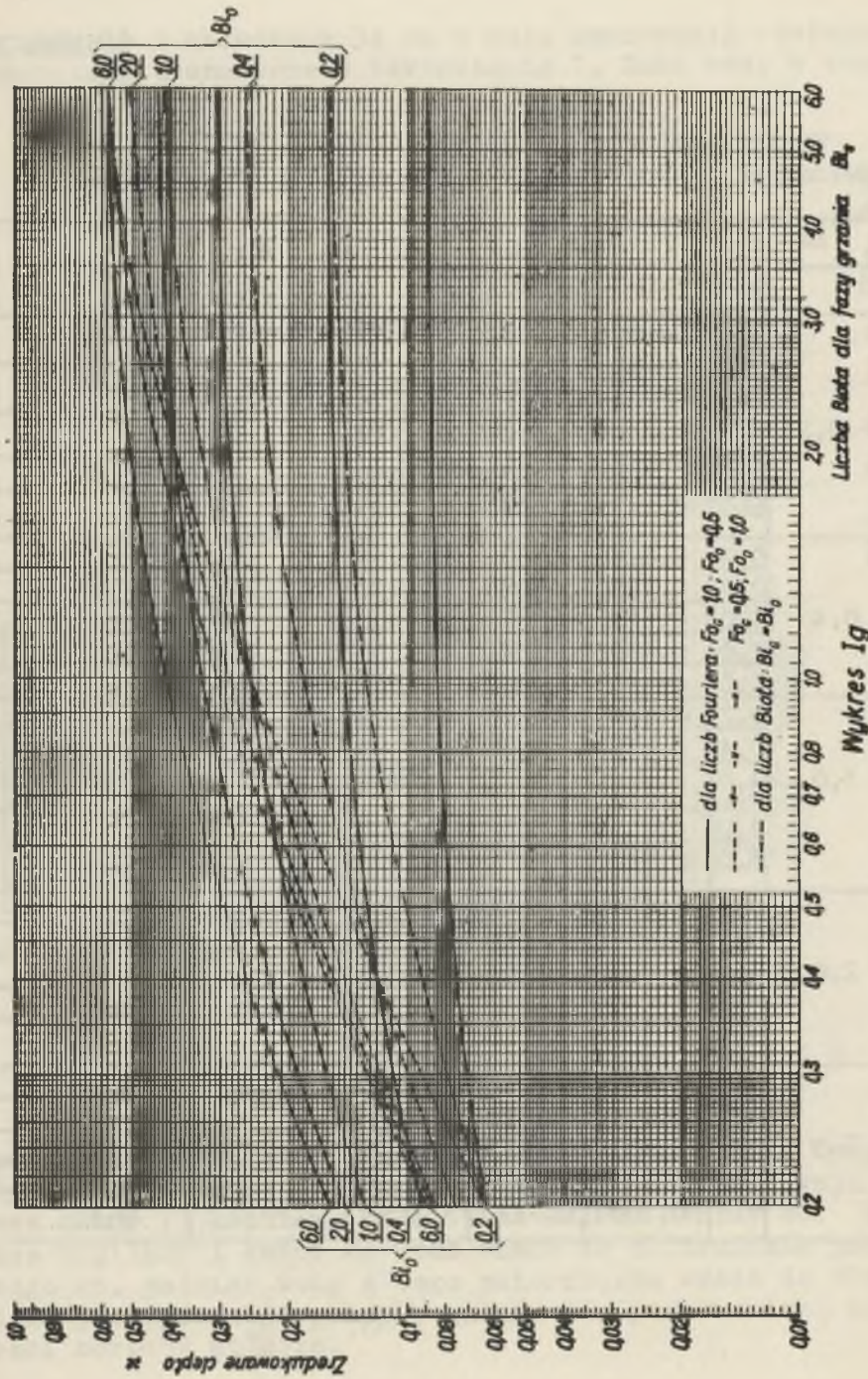
Rys. 3. Schemat urządzenia analogowego wersji 2

stacie uzyskuje się za pomocą mieszadła 35. Dalsza droga wody pomiarowej jest taka sama jak w urządzeniu wersji 1: przez zawór 17 kapilary 18 i 19 do układu menzur 20. Stąd przez kapilary i zawór 23 woda wraca do zbiorniczka pomiarowego 25. Nadmiar wody z tego zbiorniczka wraca do zbiorniczka 31. Wydajność pompy reguluje się przez zmianę częstotliwości obrotów silnika.

Tablica 3

Wyniki pomiarów i obliczeń drugiej serii
doświadczeń analogowych (dla $Fo_G = 1,0$; $Fo_0 = 0,5$)

p	Bi		$H_m = \Theta_m$		λ	λ_t	β %
	G	0	G	0			
1	0,2	0,2	0,6975	0,6330	0,0645	0,0632	2,06
2		0,4	0,5585	0,4645	0,0940		
3		1,0	0,3920	0,2650	0,1270		
4		2,0	0,3088	0,1630	0,1458		
5		6,0	0,2435	0,0840	0,1595		
6	0,4	0,2	0,8260	0,7512	0,0748		
7		0,4	0,7255	0,6043	0,1212	0,1193	1,59
8		1,0	0,5728	0,3893	0,1835		
9		2,0	0,4808	0,2545	0,2263		
10		6,0	0,3985	0,1417	0,2568		
11	1,0	0,2	0,9273	0,8420	0,0853		
12		0,4	0,8753	0,7298	0,1455		
13		1,0	0,7825	0,5290	0,2535	0,2518	0,68
14		2,0	0,7128	0,3793	0,3335		
15		6,0	0,6410	0,2258	0,4152		
16	2,0	0,2	0,9638	0,8750	0,0888		
17		0,4	0,9358	0,7803	0,1555		
18		1,0	0,8830	0,5975	0,2855		
19		2,0	0,8385	0,4465	0,3920	0,3894	0,67
20		6,0	0,7842	0,2790	0,5052		
21	6,0	0,2	0,9847	0,8947	0,0900		
22		0,4	0,9745	0,8135	0,1610		
23		1,0	0,9510	0,6445	0,3065		
24		2,0	0,9307	0,4975	0,4332		
25		6,0	0,9057	0,3230	0,5827	0,5813	0,24



Rys. 4. Przykładowy wykres zredukowanego ciepła

8. Pomiary i wyniki uzyskane za pomocą urządzenia wersji 2

W drugiej serii pomiarów przebadano ogólny wypadek niesymetryczny dla jednej pary wartości liczb Fouriera $Fo_G = 1,0$; $Fo_0 = 0,5$ i dla 5 wartości liczb Biota $(0,2$; $0,4$; $1,0$; $2,0$; $6,0$).

Wyniki $p = 25$ pomiarów oraz uzyskane na tej podstawie wartości α zebrano w tablicy 3 oraz na rysunku 4. Wymagany czas był zachowany z dokładnością ± 1 sec. Największy błąd względny występujący w tej serii pomiarów, dla dających się sprawdzić 5 punktów, wynosi $\beta = + 2,6\%$, błąd średni zaś ma wartość $\beta_m = + 1,24\%$.

Na rysunku 4 linie ciągłe dotyczą wartości otrzymanych z pomiaru, linia zaś kreska - kropka odpowiada jednakowym wartościom liczb Biota $Bi_G = Bi_0$. Przebieg natomiast linii kreskowanych dotyczących zamienionych miejscami liczb Fouriera wynika z wartości uzyskanych z pomiaru dla zamienionych zarazem liczb Biota.

Ze względu bowiem na symetrię wartość α wyznaczona dla zespołu wartości $(Fo_1, Bi_2)_G$, $(Fo_3, Bi_4)_0$ jest taka jak dla zespołu $(Fo_3, Bi_4)_G$, $(Fo_1, Bi_2)_0$. Tak więc np. wartość $\alpha = 0,2263$ wynikła z pomiaru dla zespołu $(1,0$; $0,4)_G$, $(0,5$; $2,0)_0$ jest identyczna z wartością dla zespołu $(0,5$; $2,0)_G$, $(1,0$; $0,4)_0$.

9. Wnioski ogólne wynikające z zastosowania hydraulicznego urządzenia analogowego

Średnia dokładność dla sprawdzonych 33 pomiarów wynosi $\beta_m = \pm 2,46\%$. Dokładność tę można by zwiększyć przez zastosowanie fotograficznej rejestracji poziomów wody w momencie rewersji. Od dokładności bowiem odczytu w znacznym stopniu zależy wynik obliczeń, zwłaszcza w zakresie małych liczb Biota i Fouriera. Można więc uważać, że pod względem dokładności hydrauliczne urządzenie analogowe jest wystarczające. Należy jednak zwrócić uwagę na długotrwałość przeprowadzania pomiarów.

Dla uzyskania stabilizacji mieszczącej się w granicach dokładności odczytu, potrzeba kilku do kilkunastu pełnych cykli co trwa kilka godzin. Każda, nawet chwilowa przerwa w dopływie prądu powoduje powrót działającego w danej chwili przekaźnika czasowego do stanu wyjściowego i odmierzanie czasu danej fazy od początku. Jest to równoznaczne z rozpoczęciem ustalania się stanu. W przeprowadzonych pomiarach uzyskanie jednego wyniku trwało ok. 8 godzin. Przyspieszenie przebiegu pomiarów wymagałoby zgodnie z wzorem (17), bądź zmniejszenia pola przekroju A_h menzur, bądź zmniejszenia oporu hydraulicznego $R_{h\lambda}$ podstawowych kapilar. W punkcie 3 wyjaśniono powody nie zezwalające na nadmierne zmniejszanie zarówno pola przekroju menzur jak i oporu kapilar. Dobrane menzury i kapilary znajdują się przy dolnej granicy dopuszczalnych wartości. Zmniejszenie ich, a więc skrócenie czasu doświadczeń jest utrudnione.

Znaczne przyspieszenie doświadczeń analogowych można by uzyskać przez zbudowanie elektrycznego urządzenia analogowego. Ze względu jednak na czasochłonność budowy takiego urządzenia, postanowiono rozwiązać zagadnienie metodą numeryczną w oparciu o równania różnicowe i rozwiązanie za pomocą maszyny cyfrowej.

LITERATURA

- [1] Gdula St.J.: Przepływ ciepła w ciałach stałych przy skokowych periodycznych zmianach temperatury ośrodka. Archiwum Budowy Maszyn T.XI. 1964 r. Zeszyt 2.
- [2] Hausen H.: Wärmeübertragung im Gegenstrom, Gleichstrom und Kreuzstrom. Berlin-Göttingen-Heidelberg-München 1950 r.
- [3] Heiligenstaedt W.: Wärmetechnische Rechnungen für Industrieöfen, 3 Auflage. Düsseldorf 1951 r.
- [4] Müller L.: Teoria podobieństwa mechanicznego, WNT Warszawa 1961 r.

- [5] Ochęduszek St.: Teoria maszyn cieplnych, Cz.III Warszawa 1955 r.
- [6] Rummel K.: Berechnung der Wärmespeicher auf Grund der Wärmedurchgangszahl, Stal u. Eisen 48, 1928 r.
- [7] Schack A.: Der Industrielle Wärmeübergang, 5 Auflage, Düsseldorf 1957 r. (Przekład rosyjski: Promyszlennaja tiepkopieriedacza, Moskwa 1961 r.).
- [8] Timofiejew W.N., Małkin W.M., Szklar F.R.: Teoria rascziota riegienieratiwnych tiepkoołmiennikow. Tiepło i massopierienos T.V. Mińsk 1963 r.

Wpłynęło do Redakcji 5 kwietnia 1966 r.

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ АНАЛОГИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В РЕГЕНЕРАТОРАХ

Р е з ю м е

Описывается построенное автором гидродинамическое аналоговое устройство для исследования периодической теплопередачи в несимметрически действующих регенераторах. Уравнения, определяющие условия аналогии, выведены на основании элементарных энергетических и вещественных балансов. Применены безразмерные переменные, благодаря чему в рассуждениях не появляются индивидуальные физические свойства материала решетки регенератора и жидкости, применяемой в аналоговом устройстве. Описывается ход экспериментов и полученные результаты. Обсуждается вопрос целесообразности применения гидродинамической аналогии.

APPLICATION OF THE HYDRODYNAMIC ANALOGY FOR DETERMINING
THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT IN A REGENERATOR

S u m m a r y

Description of the hydraulic analogy installation for examining the cyclic heat transfer in a non-symmetrically operating regenerator, is given. The equations from which the analogy conditions result, are based on the elementary energy and substance balances. The dimensionless reduced variables are applied, so there is no need to take in the account the individual physical properties of the checkerbricks and of the liquid used in the analogy installation. The course and the results of the experiments have been described. Conclusions about the suitability of application of the hydrodynamic analogy are given.