Termotehničke osobine kalorifera „voda-vazduh"

Nikolaj Volohov*

UVOD

Pod kaloriferima »voda-vazduh« podrazumevamo kalorifere kod kojih razmenjivač toplote radi sa toplom vodom kao primarnim i atmosferskim vazduhom kao sekundarnim nosiocem toplote. Takav kalorifer imaće različitu vrednost koeficijenta prenosa toplote u zavisnosti od konstrukcije njegovog razmenjivača toplote kao i termičkih, hidro i aerodinamičkih uslova rada samog kalorifera. Koeficijenat prenosa toplote *k* može se odrediti samo pomoću serije eksperimentalnih ispitivanja.

Zagrevna površina većih kaloriferskih razmenjivača toplote obično se formira od gvozdenih ili bakarnih cevi sa orebrenom spoljnom zagrevnom površinom, koja je u dodiru s vazduhom, pošto koeficijent prelaza toplote aL na strani vazduha obično ima malu vrednost.

Koeficijenat prenosa toplote *k* u našim proučavanjima usvajamo u odnosu na spoljnu orebrenu vazdušnu površinu. Tako određene vrednosti koeficijenata *k* važe samo za potpuno određenu konstrukciju razmenjivača toplote dotičnog kalorifera.

Pošto rebra spoljne zagrevne površine obično ne sačinjavaju celinu sa cevima već se orebravanje dobija putem nasađivanja, odnosno navijanja pljosnatih površina na cev, prenos toplote od cevi na rebro u jakoj meri zavisi od intimnosti dodira površina cevi i rebara. Da bi se ostvario što veći kontakt pomenutih površina, razmenjivači napravljeni od gvožđa obično se podvrgavaju cinkovanju. Kod rebrastih površina napravljenih od aluminijuma posle navlačenja na bakarne cevi dobar se kontakt dobija mehaničkim ili hidrauličnim ekspandiranjem cevi.

Zadatak našeg proučavanja termotehničkih osobina kalorifera sastoji se u pronalaženju funkcionalne zavisnosti koeficijenta *k* od protoka vode Gw i protoka vazduha G_L. Pri obradi eksperimentalnih podataka naročita pažnja bila je posvećena metodi pomoću koje možemo dobiti karakteristiku našeg razmenjivača toplote za što širi dijapazon nezavisnih promenljivih veličina, a na osnovu što manjeg broja eksperimenata, što se daje postići jedino pravilno postavljenom teorijom o odgovarajućem problemu.

* Nikolaj I. Volohov, dipl. ing., naučni savetnik Instituta tehničkih nauka SANU. Beograd; stan: Otona župančiča 8

TEORETSKI DEO

U matematičkoj interpretaciji koeficijent prenosa toplote *k* u najopštijem obliku obično se predstavlja sledećom jednačinom:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_L} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_w}} \qquad \text{(B-1)}$$

U ovoj jednačini imamo sledeće oznake:

aL — koeficijent prelaza toplote od strane orebrene površine na vazduh;

aW — koeficijent prelaza toplote od strane primarnog nosioca toplote, tj. vode, na zid cevi;

ρ/χ — predstavlja član koji zavisi od konstrukcije i materijala zagrevne površine razmenjivača.

O pojedinim veličinama koje figuriraju u imenitelju navedene formule (B-l) može se kazati sledeće:

Koeficijenat prelaza toplote a, uglavnom zavisi od brzine kretanja, odnosno od protoka *X),* sekundarnog nosioca toplote i kao što je poznato sa povećanjem protoka G_L povećava se i koeficijent prelaza toplote aL Dakle, kao što se vidi iz formule (B-l), pri povećavanju protoka G_L povećava se i koeficijent prenosa toplote *k*.

Drugi član imenitelja naše formule reprezentuje uglavnom konstrukciju i materijal samog razmenjivača toplote i za određen tip razmenjivača predstavlja konstantnu vrednost u našim analizama.

I na kraju koeficijent prelaza toplote aL zavisi takođe od brzine strujanja primarnog nosioca toplote odnosno njegovog protoka Gw. Pri povećavanju protoka povećava se i koeficijent prenosa toplote *k.*

Formula (B-l) važi za razmenjivač toplote potpuno određene konstrukcije, a koji radi pri potpuno određenim termičkim uslovima primarnog i sekundarnog nosioca toplote, jer početna i krajnja temperatura vode i ulazna temperatura vazduha takođe utiču na vrednost našeg koeficijenta *k*.

Dakle, u opštem matematičkom obliku naš koeficijent možemo prikazati na sledeći način

$$k = f\,(t_{wm},\ t_L^u,\ G_w,\ G_L,\ A) \qquad \text{(B-2)}$$

U gornjoj jednačini imamo sledeće oznake:

t_{wm} — srednja vrednost temperature vode u razmenjivaču toplote;

t_L^u — temperatura vazduha na ulazu u razmenjivač;

G_w — težinski protok vode kroz primarno strujno kolo;

G_L — težinski protok vazduha kroz razmenjivač;

A — predstavlja konstruktivne osobine razmenjivača i za dotični tip razmenjivača figurira kao konstantna vrednost.

Jednačina za proračun koeficijenta prenosa toplote

Za proračun našeg koeficijenta prenosa toplote k moraćemo imati odgovarajuću formulu u kojoj bi figurirale konkretne vrednosti neza-

visnih promenljivih t_{wm}, t_L, G_v, i G_L koje su određene na osnovu eksperimentalnih podataka. Napisaćemo poznatu jednačinu toplotnog bilansa prenosa toplote:

$$G_w \cdot \Delta t_w \cdot C_{pw} = F_L \cdot k \cdot (t_{wm} - t_{Lm}) \qquad \text{(B-3)}$$

U ovoj jednačini pored već poznatih oznaka pojedinih veličina imamo još sledeće:

Δt_w — temperaturska razlika vode na ulazu i izlazu razmenjivača toplote;

C_{pw} — specifična toplota vode pri dotičnoj temperaturi;

t_{Lm} — srednja vrednost temperature vazduha koji struji kroz sekundarno strujno kolo razmenjivača;

F_L — spoljna orebrena zagrevna površina razmenjivača kroz koju struji vazduh.

Za dalju analizu jednačine (B-3) usvajamo logaritamsku srednju vrednost temperature vazduha, naime:

$$t_{Lm} = t_{wm} - \frac{\left(t_L^{i.isp} - t_L^{u.isp}\right)}{ln\left(\dfrac{t_{wm}^{isp} - t_L^{u.isp}}{t_{wm}^{isp} - t_L^{u.isp}}\right)} \qquad \text{(B-4)}$$

Ovu vrednost za t_{lm} stavimo u jednačinu (B-3) i dobijamo sledeći izraz:

$$G_w \cdot C_{pw} \cdot \Delta t_w = F_L \cdot k \cdot \frac{\Delta t_L^{isp}}{ln\left(\dfrac{t_{wm}^{isp} - t_L^{u.isp}}{t_{wm}^{isp} - t_L^{u.isp}}\right)} \qquad \text{(B-5)}$$

odakle imamo sledeći izraz za proračun traženog koeficijenta prenosa toplote k:

$$k = \frac{Q_w^{isp}}{F_L \cdot \Delta t_L^{isp}} \, ln\left(\frac{t_{wm}^{isp} - t_L^{u.isp}}{t_{wm}^{isp} - t_L^{u.isp}}\right) \qquad \text{(B-6)}$$

gde imamo:

$Q_w = G_w \cdot C_{pw} \cdot \Delta t_w$ — termička moć našeg razmenjivača toplote pri uslovima ispitivanja;

Δt_L — temperaturska razlika vazduha na ulazu i izlazu razmenjivača pri uslovima ispitivanja;

$t_L^{u.isp}$ — temperatura vazduha pri ulazu u razmenjivač pri uslovima ispitivanja;

$t_L^{i.isp}$ — temperatura vazduha na izlazu iz kalorifera pri uslovima ispitivanja.

Za standardne uslove pisaćemo našu formulu (B-6) na sledeći način:

$$k = \frac{Q_{wL}^{st}}{F_L \cdot \Delta t_L} \cdot ln\left(\frac{t_m^{wst} - t_L^{i.st}}{t_{wm}^{st} - t_L^{u.st}}\right) \qquad \text{(B-7)}$$

0 pojedinim veličinama formule (B-7) mora-ćemo naglasiti sledeće:

t_{wm}^{st} — usvajamo u našim proračunima kao srednju aritmetičku vrednost temperature vode;

$t_L^{u.st}$ — vrednost standardne temperature vazduha na ulazu u kalorifer usvajamo prema zahtevu;

$t_L^{i.st}$ — vrednost standardne temperature vazduha na izlazu iz razmenjivača određujemo, prema specijalnoj metodi, grafičkim putem;

$Q_{wL}^{st} = \eta \cdot Q_w^{st}$ — termičku mod pri standardnim uslovima određujemo na osnovu eksperimentalnih podataka za određiva-nje faktora ri čiji se matematički ob-lik daje jednačinom:

$$\eta = \frac{p^{st}}{p^{isp}} \cdot \frac{T_L^{i.isp}}{T_L^{i.st}} \cdot \frac{\Delta t_L^{st}}{\Delta t_L^{isp}} \qquad \text{(B-8)}$$

gde je:

p^{st} — standardni atmosferski pritisak vazduha, koji mi u našim proračunima usvajamo da je ravan p'' — 760 mm ž. s.

p^{isp} — atmosferski pritisak, koji je vladao za vreme ispitivanja;

$T_L^{i.isp}$ — apsolutna temperatura vazduha na izlazu iz kalorifera pri uslovima ispitivanja;

$T_L^{i.st}$ — apsolutna temperatura vazduha na izlazu iz kalorifera pri standardnim uslovima.

Matematički oblik faktora r\ koji je dat for-mulom (B-8) odredili smo u našim drugim radovima.

Metod iznalaženja matematičke zavisnosti $k = f(G_w)$ $_{Gw = const}$

Ovaj metod sastoji se u tome što se sprovede serija ispitivanja pri konstantnom protoku vazduha *G,* i promenljivim vrednostima protoka vode G,,.. Zatim na osnovu podataka ispitivanja i poznatih jednačina određujemo vrednosti *k* za različite protoke vode G„„ ali za iste standardne temperaturske uslove vode i vazduha.

Slične serije ispitivanja sprovodimo za druge protoke vazduha G_{l2}, G_u, ... sa promenljivim vrednostima protoka vode G,,,.

Na osnovu serije dobivenih vrednosti koeficijenta prenosa toplote *k,* konstruišemo u koordinatnom sistemu (G„.— *k)* krive zavisnosti:

$$k = f(G_w)_{GL = const} \tag{B-9}$$

Oblik ovih krivih prikazan je na si. (B-l). U granicama A, B_u A_2 B_2, A_t B_t ispitanih konkretnih vrednosti, ove krive imaju izrazit oblik fami-lije parabola višeg reda. Početak koordinatnog sistema ovih parabola neće se poklapati sa iza-branim početkom koordinatnog sistema (G„,— *k),* na osnovu koga smo konstruisali naše krive, jer pri G„. = 0 koeficijent prenosa toplote *k* neće biti ravan null jer sa prestankom strujanja vode koeficijent *k* koji figurira u jednačini (B-l) ima-će smanjenu ali konkretnu vrednost.

Razmatraćemo naše parabole u koordinatnom sistemu (x — *y),* pri čemu je ordinata *y* — *k,* dok je apscisa *X* = *a* + G„.. Vrednost konstante *a* određujemo na osnovu konkretnih vrednosti po-jedinih veličina. Pošto *k* ima realnu vrednost pri G„, = 0, to unapred možemo kazati da će početak koordinatnog sistema *(x— y)* ležati levo od po-četka koordinatnog sistema (G„.— *k).*

Napisaćemo jednačinu za familiju naših parabola:

$$y^n = 2\,Px \tag{B-10}$$

Prema smislu našeg problema vrednost eksponenta *n* u našoj jednačini (B-10) treba da bu-de ista za celu familiju parabola dok parametar 2 *P* ima da se menja u zavisnosti od protoka vazduha G;.

Parabolu koja je predstavljena jednačinom (B-10) mogli bismo konstruisati dajući pojedine vrednosti nezavisnoj promenljivoj veličini *x,* ako bismo poznavali numeričke vrednosti eksponenta *n* i parametra 2 *P.* Kod nas je obratan slučaj — imamo konstruisan deo krive za konkretne vrednosti G_u, i *G,,* ali nama nisu poznate vred-nosti *n* i 2 *P,* na osnovu kojih bismo mogli pro-širiti naša poznavanja za slučajeve za koje nismo sproveli eksperimente.

Za iznalaženje traženih vrednosti *n* i 2 *P* primenićemo metodu konačnih razlika. Radi toga diferenciramo našu jednačinu (B-10) i dobijamo sledeći izraz:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{2\,P}{n y^{n-1}} \tag{B-11}$$

Vrednost *dy/dx* predstavlja tangentu na našu parabolu u dotičnoj tački krive.

U konačnim razlikama jednačinu (B-l 1) možemo napisati u sledećem obliku:

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{2\,P}{n y^{n-1}} \tag{B-12}$$

Izabraćemo na nekoj od naših parabola, recimo A_x B_u dve tačke koje odgovaraju poznatim vrednostima ordinata y_t i y_2 i u tačkama x, i x_2 povlačimo tangente. Zatim usvajamo sa obe tačke istu vrednost *&x.* Na taj način dobili smo za ordinatu y, vrednost A.Vi i za ordinatu y_2 dobili smo vrednost A^- Prema tome na osnovu jedna-čine (B-12) imaćemo za tačku x,:

$$\frac{\Delta y_1}{\Delta x} = \frac{2\,P}{n y_1^{n-1}} \tag{B-13}$$

a za tačku τ_2 imamo:

$$\frac{\Delta y_2}{\Delta x} = \frac{2\,P}{n y_2^{n-1}} \tag{B-14}$$

Delimo jednačinu (B-13) sa jednačinom (B-14) i dobijamo sledeći izraz:

$$\frac{\Delta y_1}{\Delta y_2} = \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^{n-1} \qquad \text{(B-15)}$$

Putem logaritmiranja jednačine (B-15) dobijamo izraz za izračunavanje našeg eksponenta *n* i to:

$$(n-1) = lg\left(\frac{\Delta y_1}{\Delta y_2}\right) : lg\left(\frac{y_2}{y_1}\right) \qquad \text{(B-16)}$$

Napisaćemo zatim našu jednačinu (B-10) za dve vrednosti poznatih ordinata y_1 i y_2, kojim odgovaraju do sada napoznate vrednosti A, i x_2:

$$y_2^n = 2\,P\,x_2 \qquad \text{(B-17)}$$

$$y_1^n = 2\,P\,x_1 \qquad \text{(B-18)}$$

Oduzimamo jednačinu (B-18) od jednačine (B-17) i dobijamo sladeći izraz za izračunavanje našeg parametra *2 P:*

$$2\,P = \frac{(y_2^n - y_1^n)}{x_2 - x_1} \qquad \text{(B-19)}$$

Mada ne poznajemo ni x_x niti x_2, njihova razlika A-v = $(x_2$— A,) nama je poznata jer odgovara usvojenim vrednostima y, i v_2. Dakle sada imamo sve elemente za konstrukciju naše parabole.

Fiksiramo sada na našem dijagramu (B-l) neku tačku x_2 koja odgovara vrednosti protoka G„.$_2$ i za tu tačku, za koju već znamo elemente parabole *n* i 2 *P,* na osnovu jednačine (B-10) određujemo vrednost apscise A,:

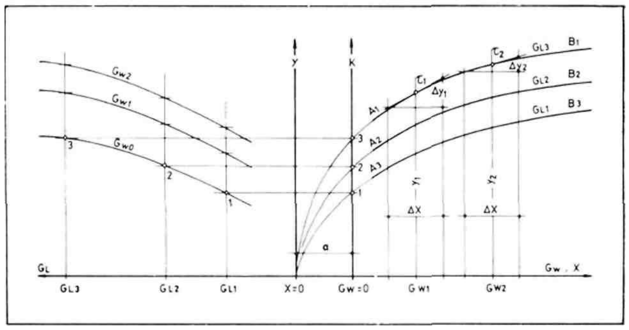
$$x_2 = \frac{y_2^n}{2\,P} \qquad \text{(B-20)}$$

Dakle, početak koordinatnog sistema (A — v) ležaće levo od početka koordinatnog sistema (G„.— *k)* na rastojanju:

$$a = \frac{y_2^n}{2\,P} - G_{w2} \qquad \text{(B-21)}$$

Naš dijagram (B-l) dopunjujemo sada na taj način što se levo od koordinatnog sistema (G„.— *k)* uvodi koordinatni sistema *(G, — k).* Zatim pravimo odgovarajući presek G„. u desnom koordinatnom sistemu i tačke ukrštanja ovog preseka sa odgovarajućim vrednostima krivih ^tii ^*i2* i G_u prenosimo na ordinate levog koor-

Sl. B-1.



dinatnog sistema kojima odgovaraju dotične vrednosti *G,.* Na taj način u levom koordinatnom sistemu dobijamo familiju krivih koje odgovaraju opštem analitičkom izrazu:

$$k = f\,(G_L)_{Gw\;=\;const} \qquad \text{(B-22)}$$

Putem pravljenja odgovarajućih preseka u levom i desnom koordinatnom sistemu možemo dobiti dopunske krive kako za *k* = /, (G„.) f;, = (0,s tako i za *k*= /, *(G,)* *Gw* =,,,,,s,

EKSPERIMENT

Radi provere iznete metode za određivanje koeficijenta prenosa toplote *k* bio je podvrgnut ispitivanju jedan razmenjivač toplote koji je na-pravljen od gvozdenih cevi sa gvozdenim spiralno navijenim rebrima. Zagrevna površina sa vazdušne strane iznosila je *F,* = 5.76 m^2. Glavne dimenzije ovog razmenjivača date su na zasebnoj skici na dijagramu si. (B-4).

Pošto je u konkretnim uslovima ispitivanja nemoguće održavati konstantne termičke i druge uslove, to su potrebne veličine koje su ušle u proračun našeg koeficijenta prenosa toplote *k,* putem teoretski obrazložene metode, svedene na unapred utvrđene standardne vrednosti. U našem slučaju usvojili smo kao standardnu vrednost! srednju temperaturu vode $t_{„m}$ = 80°C, ulaznu temperaturu vazduha '"s = 15°C i standardni atmosferski pritisak vazduha *P"* = 760 mm Ž. s.

U ovoj prvoj seriji ispitivanja strujno kolo primarnog nosioca toplote, tj. vode bilo je ostvareno putem povezivanja na red svake dve cevi, što se vidi na zasebnoj skici pomenutog dijagrama (B-4).

Podaci koji su se prikupljali za vreme eksperimenta za neko ispitivanje prikazani su u tablici (B-l). U ovoj tablici imamo sledeće oznake:

t^u_w — temperatura vode na ulazu u razmenjivač toplote u °C;

t^i_w — temperatura vode na izlazu iz razmenjivača;

Δt_w = '!'. — t'u- — temperaturska razlika na ulazu i izlazu razmenjivača;

$t_{wm} = \frac{t^u_w + t^i_w}{2}$ — srednja aritmetička vrednost temperature vode u razmenjivaču;

ΔH — razlika u pokazivanju diferencijalnog manometra na blendi za merenje pro-toka vode kroz naš sistem vodenog strujnog kola;

V — zapreminski protok vode kroz sistem u dm^3, koji je određen na osnovu prethodno izbaždarene zavisnosti $V = = I (AH)$ za dotičnu blendu;

t^{bl}_w — temperatura vode na blendi za vreme ispitivanja;

γ_w — specifična težina vode na dotičnoj temperaturi vode na blendi;

G_w — težinski protok vode kroz naš sistem u kp/min, a koji je određen na osnovu podataka *V* i *y„;*

t^u_L — temperatura vazduha na ulazu u razmenjivač toplote;

t^i_L — temperatura vazduha na izlazu iz razmenjivača;

t_c — temperatura vazduha u laboratoriji po suvom termometru psihrometra;

t_v — temperatura vazduha po vlažnom termometru psihrometra;

Hg — barometarski pritisak za vreme ispitivanja u mm ž. s.

Za dalju obradu eksperimentalnog materijala ušli su podaci poslednjeg reda naše tablice, koji su u daljem obeleženi masnim brojem*). Kao primer ovi podaci u našoj tablici nose br. 5.

0 pojedinim vrednostima poslednjeg reda naše tablice dajemo sledeći komentar.

Vrednost temperature vode na ulazu u razmenjivač toplote, koja je ušla u dalja razmatranja našeg problema, javlja se kao srednja vrednost četiri čitanja; to isto važi i za ostale vrednosti pod glavnim naslovom »voda«.

V teksiii ovos rada i u tablicama li brojevi su odštampani kao masni brojevi, dok su u slikama oni naznačeni na taj način što su zaokruženi.

Temperatura vazduha na ulazu u kaloriferski razmenjivač, za dotično ispitivanje, kao što se vidi iz tablice, javlja se kao srednja vrednost osam čitanja.

Temperaturno polje vazduha na izlazu iz razmenjivača neće imati podjednake vrednosti temperature u svakoj tački polja, jer temperatura vode opada duž primarnog strujnog kola i brzi-na vazduha po celom temperaturnom polju nije potpuno ista. Radi dobijanja što tačnije srednje vrednosti izlazne temperature vazduha, celokupno temperatursko polje bilo je podeljeno na dvanaest manjih polja u kojima je merena temperatura izlaznog vazduha. Dakle za merodavnu izlaznu temperaturu u daljim proračunima usvojena je srednja aritmetička vrednost dvanaest merenja.

Dalja obrada eksperimentalnog materijala sa-stoji se u određivanju termičke moći našeg razmenjivača toplote i to pri uslovima ispitivanja i određivanju protoka vazduha za vreme dotičnog ispitivanja.

Termička moć razmenjivača toplote pri uslovima ispitivanja određena je na bazi sledeće jednačine: »

$$Q^{isp}_w = 60 \cdot G_w \cdot \Delta t_w \qquad \text{(B-23)}$$

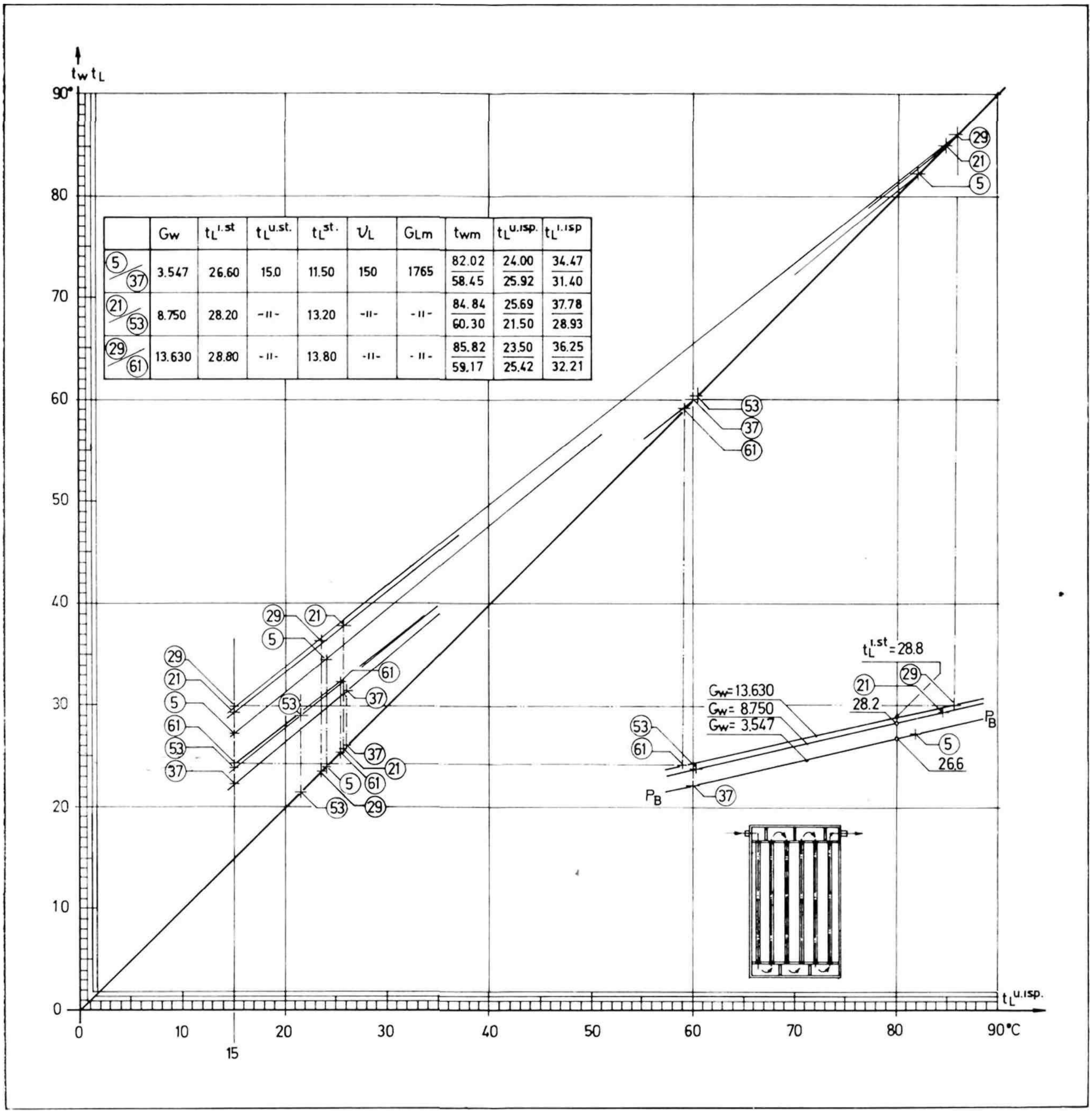
Pošto su vrednosti *G„.,&t*^n^ ' &f["* pri našim merenjima veoma pouzdane, to smatramo da najpouzdaniji podatak o protoku vazduha možemo dobiti jedino na bazi termičke moći razmenjivača i to na osnovu jednačine:

$$G_L = \frac{Q^{isp}_w}{C_{pL} \cdot \Delta t^{isp}_L} \qquad \text{(B-24)}$$

Proračun pomenutih vrednosti G£^p^ i *G,,* za pojedina ispitivanja prikazan je u tablici (B-2).

Pošto koeficijent prenosa toplote zavisi i od temperaturskih uslova naših nosilaca toplote, ka-ko je to naglašeno ranije, to se naš dalji postu-pak sastoji u određivanju termičke modi pri standardnim temperaturskim uslovima rada našeg razmenjivača. Za standardne temperaturske uslove usvojili smo srednju vrednost temperature vode 'f„„ = 80°C i ulaznu temperaturu vazduha *t"-^sl^* — 15°C. Na osnovu odgovarajućih podataka izračunavamo količnik -n, čiji je matematički izraz dat jednačinom (B-8).

Veličine *P"^p^ T\^s"^* i A?/^s,>^ dobijamo direktno na osnovu pročitanih vrednosti za vreme ispitivanja. Međutim vrednost veličine 7|^s/^ i vrednost



	Gw	$t_L^{i.st}$	$t_L^{u.st.}$	$t_L^{st.}$	υ_L	GLm	twm	$t_L^{u.isp.}$	$t_L^{i.isp}$
5/37	3.547	26.60	15.0	11.50	150	1765	82.02 / 58.45	24.00 / 25.92	34.47 / 31.40
21/53	8.750	28.20	-II-	13.20	-II-	-II-	84.84 / 60.30	25.69 / 21.50	37.78 / 28.93
29/61	13.630	28.80	-II-	13.80	-II-	-II-	85.82 / 59.17	23.50 / 25.42	36.25 / 32.21

SI. B 2.

A']' moraju se odrediti specijalnom metodom. Ova metoda razrađena je od strane autora u jed-nom specijalnom radu i ovde je prikazana u vi-du dijagrama, koji je dat na si. (B-2). Na ovom dijagramu prikazana je grafička metoda za odre-divanje standardne vrednosti izlazne temperature za protok G_L = 1765 kp/h i tri protoka vode, na-ime G„ = 3.547, G„ = 8.750 i G_w = 13.630 kp/min. Za protok G_H. = 3.547 kp/min dobili smo '£** = = 26.6°C, za protok G„. = 8.750 kp/min imamo

Tablica (B-1)

Broj čitanja	Voda										Vazduh						Psihrometar		
												ulaz		izlaz					
	t_w^u	t_w^i	Δt_w	t_{wm}	H_1	H_2	ΔH	V	t_w^b	γ_w	G_w	t_L^u	t_L^u	t_L^i	t_L	t_L^i	t_c	t_v	H_g
1	92.3	71.9	—	—	378	107	—	—	71.0	—	—	24.0	23.9	35.8	33.6	33.2	22.4	18.6	757.5
2	92.3	71.9	—	—	378	107	—	—	71.0	—	—	24.0	23.9	35.8	34.0	33.3	22.2	18.6	„
3	92.2	71.9	—	—	380	107	—	—	71.0	—	—	24.0	23.9	38.1	34.1	33.3	22.2	18.7	„
4	92.2	71.9	—	—	380	107	—	—	71.0	—	—	24.2	24.1	36.5	34.3	33.7	22.2	18.8	„
	369.0	287.6			1516	428	1088					192.0			413.7		89.0	74.7	
	: 4	: 4	—	—	—	—	: 4	—	—	—	—	: 8			: 12		: 4	: 4	
5	92.25	71.90	20.35	82.08	—	—	272.2	3.630	71.0	.9773	3.547	24.00			34.47		22.25	18.67	757.5

Tablica (B-2)

$$Q_w^{isp} = 60 \times G_w \times \Delta t_w \; — — — (B-23); \quad G_L = \frac{Q_w^{isp}}{C_{pL} \times \Delta t_L^{isp}} \; — — — (B-24)$$

Broj eksper.	G_w kp/min	t_w^u	t_w	Δt_w	t_{wm}	Q_w^{isp}	$t_L^{i.isp}$	$t_L^{u.isp}$	Δt_L^{isp}	C_{pL}	$C_{pL} \times \Delta t_L^{isp}$	G_L kp/h
3	3.552	90.37	72.37	18.00	81.37	3830	36.07	24,46	11.61	0,241	2.80	1370
19	8.775	88.95	80.50	8.45	84.73	4440	39.59	25.92	13.67	„	3.30	1345
27	13.552	88.40	82.40	6.00	85.40	4890	38.15	23.66	14.49	„	3.49	1400
										Srednja vrednost		1373
5	3.547	92.25	71.90	20.35	82.08	4320	34.47	24.00	10.47	0.241	2.52	1175
21	8.750	89.65	80.02	9.63	84.84	5050	37.78	25.69	12.09	„	2.91	1740
29	13.630	89.27	82.37	6.90	85.82	5690	36.25	23.50	12.75	„	3.07	1840
										Srednja vrednost		1765
7	3.565	89.97	69.32	20.38	79.51	4350	36.52	28.40	8.12	0.241	1.96	2210
23	8.800	88.80	78.20	10.60	83.50	5590	35.34	25.12	10.22	„	2.46	2270
31	13.640	89.82	82.12	7.70	85.97	6300	34.97	23.77	11.22	„	2.71	2320
										Srednja vrednost		2270

If = 28.2°C i za protok G„ = 13.630 kp/min imamo *'f* — 28.8°C. Slični dijagrami konstruisa-ni su i za protoke vazduha *G,* = 1373 i *G,* = 2270 kp/h. Podaci o traženim standardnim vrednosti-ma pojedinih veličina prikazani su u tablici (B-3).

Položaji takozvanih projektivnih bazisa *(P_b — — P_h)* koji su dati na si. (B-2) konstruisani su na osnovu dotičnih dvaju ispitivanja pri različitim srednjim vrednostima temperature vode t_{wm}. Tako projektivni bazis za protok vode G„. = 13.630 kp/min konstruisan je na osnovu ispitivanja br. 29 i br. 61, čiji su podaci ispitivanja dati u tablici (B-3).

Na osnovu do sada dobivenih podataka možemo za pojedina ispitivanja odrediti naš faktor T| i na osnovu njega izračunati vrednost termič-ke moći našeg razmenjivača za standardne uslove, tj. za /„.„ = 80°C i /£*' = 15°C. Proračuni -n i Q_{wL} prikazani su u tablici (B-4) i to za ranije pomenute protoke vazduha *G,* - 1373, *G,* = 1765 i G_L = 2270 kp/h.

Za sada imamo sve elemente za proračun traženog koeficijenta prenosa toplote *k*. Koristimo ove elemente iz pređašnjih tablica i izračunavamo naš koeficijent *k* za tri pomenute vrednosti vazduha G_L i tri vrednosti protoka vode G„. Proračun je sproveden na osnovu formule (B-7) i prikazan je u tablici (B-5). Koristeći podatke ove tablice konstruišemo dijagram zavisnosti *k — i* (G„.) G„. =ams*i* Takav dijagram, u linijskom koordinatnom sistemu (G„ — *k)*, prikazan je na si. (B-3) i to za tri vrednosti protoka vazduha, naime za G,. = 1373, G;. = 1765 i G_L = 2270 kp/h.

Koristeći gornji dijagram, koji je kao što znamo konstruisan na osnovu eksperimentalnih podataka, tražićemo analitički oblik krivih $k = /$ (G„) *ci. = const* a u saglasnosti sa ranije iznetom teorijom.

Na tačkama 1 i 2 ordinata, čije su vrednosti *k* odnosno *y* poznate, konstruišemo odgovarajuće trouglove za određivanje AV| i Ay_2- Pošto se ovde radi o odnosu pomenutih veličina A>'i i Ay>, to su radi tačnijeg očitavanja njihovih vrednosti na istom dijagramu konstruisana u većoj razmeri dva trougla *A \ B* koja su slična onima na tačkama 1 i 2. Vrednost očitavanja Ay, i Ay? usvajamo u jedinicama koje su prikladne za dalji proračun. U našem slučaju usvojili smo očitava-nje u milimetrima.

Na osnovu podataka koji su dati na dijagramu si. (B-3), a u saglasnosti sa ranije nađenom formulom (B-16) određujemo eksponent naših parabola. Proračun eksponenta /? sproveden je u obliku tablice (B-6).

Tablica (B-3)

	G_w	$t_L^{i.st}$	$t_L^{u.st}$	Δt_L^{st}	v_L	G_{Lm}	t_{wm}	$t_L^{u.isp}$	$t_L^{i.isp}$
3	3.552	28.20	15.0	13.20	119	1373	81.37	24.46	36.07
35							56.19	23.05	29.32
19	8.775	30.00	„	15.00	„	„	84.73	25.92	39.59
51							62.21	22.75	31.48
27	13.552	30.40	„	15.40	„	„	85.40	23.66	38.15
59							59.87	24.55	32.65
5	3.547	26.60	15.0	11.60	150	1765	82.08	24.00	34.47
37							58.45	25.92	31.40
21	8.750	28.20	„	13.20	„	„	84.84	25.69	37.78
53							60.30	21.50	28.93
29	13.60	28.80	„	13.80	„	„	85.82	23.50	38.25
71							59.17	25.12	32.21
7	3.565	25.05	15.0	10.05	194	2270	79.51	28.40	36.52
39							58.72	24.91	29.70
23	8.800	26.40	„	11.40	„	„	83.50	25.12	35.34
55							59.95	22.28	28.62
31	13.640	26.90	„	11.90	„	„	85.97	23.77	34.97
63							58.05	23.85	24.76

Dakle našli smo naš eksponent koji je ravan 4,66 a koji važi, kako smo naglasili ranije, za sve parabole.

Proračun vrednosti parametra 2 *P* za poje-dine parabole i položaj početka koordinatnog sistema (.v — y) dat je u tablici (B-7).

Dakle za pojedine protoke vazduha naše parabole imaćemo sledeći matematički oblik:

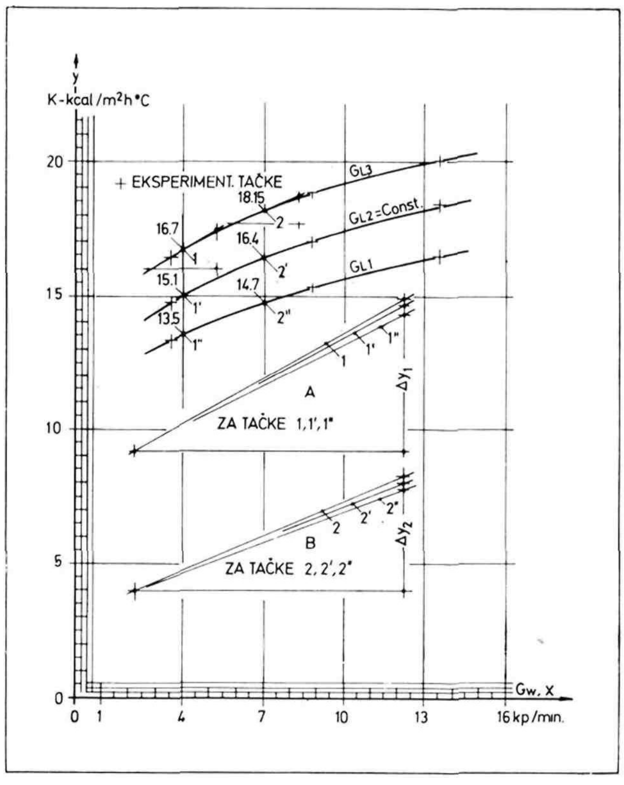
$$y^{4.66} = 75600\,x \text{ za } G_L = 2270 \text{ kg/h}$$
$$y^{4.66} = 47000\,x \text{ za } G_L = 1765 \text{ kg/h}$$
$$y^{4.66} = 28700\,x \text{ za } G_L = 1373 \text{ kg/h} \qquad \text{(A)}$$

Gornje jednačine koristimo za proračun vrednosti ponaosob za svaki protok vazduha G_L. Ovaj proračun prikazan je u obliku tablice (B-8).

Na osnovu podataka tablice (B-8) konstruisan je dijagram zavisnosti $k = f$ (G„.) ci _ ,„„s, Ovaj dijagram je prikazan u desnom delu si. (B-4).

Na poznati način, koji smo izložili u opštem teoretskom delu ovog rada, konstruišemo u levom koordinatnom sistemu *(G, — k)* krive zavisnosti *k = f (G,)* Gw · consl Pomoću sistema krivih u desnom i levom koordinatnom sistemu možemo konstruisati dopunske krive *k — f* (G_w) GI= co:ls_ odnosno krive $k = f$ (G,_) Cn· =,„s„,

Sl. B-3.



Tablica (B-4)

$$\eta = \frac{p^{st}}{p^{isp}} \times \frac{T_L^{i.isp}}{T_L^{i.isp}} \times \frac{\Delta t_L^{st}}{\Delta t_L^{isp}} \text{ --- } (B-8); \quad Q_{wL}^{st} = \eta \times Q_w^{isp}$$

Broj eksper.	t_{wm}	G_w	$t_L^{i.isp}$	$t_L^{u.isp}$	Δt_L^{isp}	$T_L^{i.isp}$	$t_L^{i.st}$	$t_L^{u.st}$	Δt_L^{st}	$T_L^{i.st}$	η	Q_w^{isp}	Q_{wL}^{st}	p^{isp}	G_{Lm}
3	81.37	3.552	36.07	24.46	11.61	309.07	28.20	15.0	13.20	301.20	1.172	3830	4490	756.0	1373
19	84.73	8.775	39.59	25.92	13.67	312.59	30.00	„	15.00	303.00	1.139	4440	5055	„	„
27	85.40	13.552	38.15	23.66	14.49	311.15	30.40	„	15.40	303.40	1.098	4890	5370	„	„
5	82.08	3.547	34.47	24.00	10.47	307.47	28.60	15.0	11.60	299.60	1.137	4320	4910	757.5	1765
21	84.34	8.750	37.78	25.69	12.09	310.78	28.20	„	13.20	301.20	1.128	5050	5690	759.5	„
29	85.82	13.630	36.25	23.50	12.75	309.25	28.80	„	13.80	301.80	1.104	5540	6110	765.5	„
7	79.51	3.565	36.52	28.40	8.12	309.52	25.05	15.0	10.05	298.05	1.293	4350	5630	752.5	2270
23	8350	8.800	35.34	25.12	10.22	308.34	26.40	„	11.40	299.40	1.149	5590	6420	760.0	„
31	85.97	13.640	34.97	23.77	11.22	307.97	26.90	„	11.90	299.90	1.083	6300	6820	765.5	„

Tablica (B-5)

$$\lambda = \frac{Q_{wL}^{st}}{F_L \times \Delta t_L^{st}} \times ln \left\{ \frac{t_{wm}^{st} - t_L^{u.st}}{t_{wm}^{st} - t_L^{i.st}} \right\} \text{ ------ } (B-7)$$

Broj eksper.	G_w	t_{wm}^{isp}	t_{wm}^{st}	$t_L^{u.s}$	$t_L^{i.st}$	$\left(t_{wm}^{st} - t_L^{u.st}\right)$	$\left(t_{wm}^{st} - t_L^{i.st}\right)$	$ln\left(\frac{t_{wm}^{st} - t_L^{u.st}}{t_{wm}^{st} - t_L^{i.st}}\right)$	Q_{wL}^{st}	Δt_L^{st}	F_L	$F_L\,\Delta t_L^{st}$	κ	G_L
3	3.552	81.37	80.0	15.0	28.20	65.0	51.8	0,221	4490	13.20	5.76	76.00	13.05	
19	8.775	84.73	„	„	30.00	„	50.0	0.263	5055	15.00	„	86.40	15.39	1373
27	13.552	85.40	„	„	30.40	„	49.6	0.271	5370	15.40	„	88.70	16.40	
5	3.547	82.08	80.0	15.0	26.60	65.0	53.4	0.197	4910	11.60	5.76	66.80	14.47	
21	8.750	84.84	„	„	28.20	„	51.8	0.227	5690	13.20	„	76.00	17.00	1765
29	13.630	85.82	„	„	28.80	„	51.2	0.239	6110	13.80	„	79.50	18.36	
7	3.565	79.51	80.0	15.0	25.05	65.0	54.95	0.168	5630	10.05	5.76	57.90	16.32	
23	8.800	83.50	„	„	26.40	„	53.6	0.193	6420	11.40	„	65.70	18.85	2270
31	13.640	85.97	„	„	26.90	„	53.1	0.202	6820	11.90	„	68.60	20.00	

Tablica (B-6)

$$(n-1) = lg \frac{\Delta x_1}{\Delta x_2} : lg \frac{x_2}{x_1} \text{ ---- } (Б-16)$$

Gl			Δy_1	Δy_2	y_2	y_1	$\frac{\Delta x_1}{\Delta x_2}$	$\frac{x_1}{x_2}$	$lg \frac{\Delta x_1}{\Delta x_2}$	$lg \frac{x_2}{\upsilon_1}$	$n-1$
2270	1	2	56.5	41.5	18.15	16.70	1.362	1.087	0.13400	0.03616	3.70
1765	1'	2'	55.3	40.0	16.40	15.10	1.382	1.086	0.14067	0.03586	3.91
1373	1''	2''	51.5	38.6	14.70	13.50	1.335	1.085	0.12522	0.03539	3.39

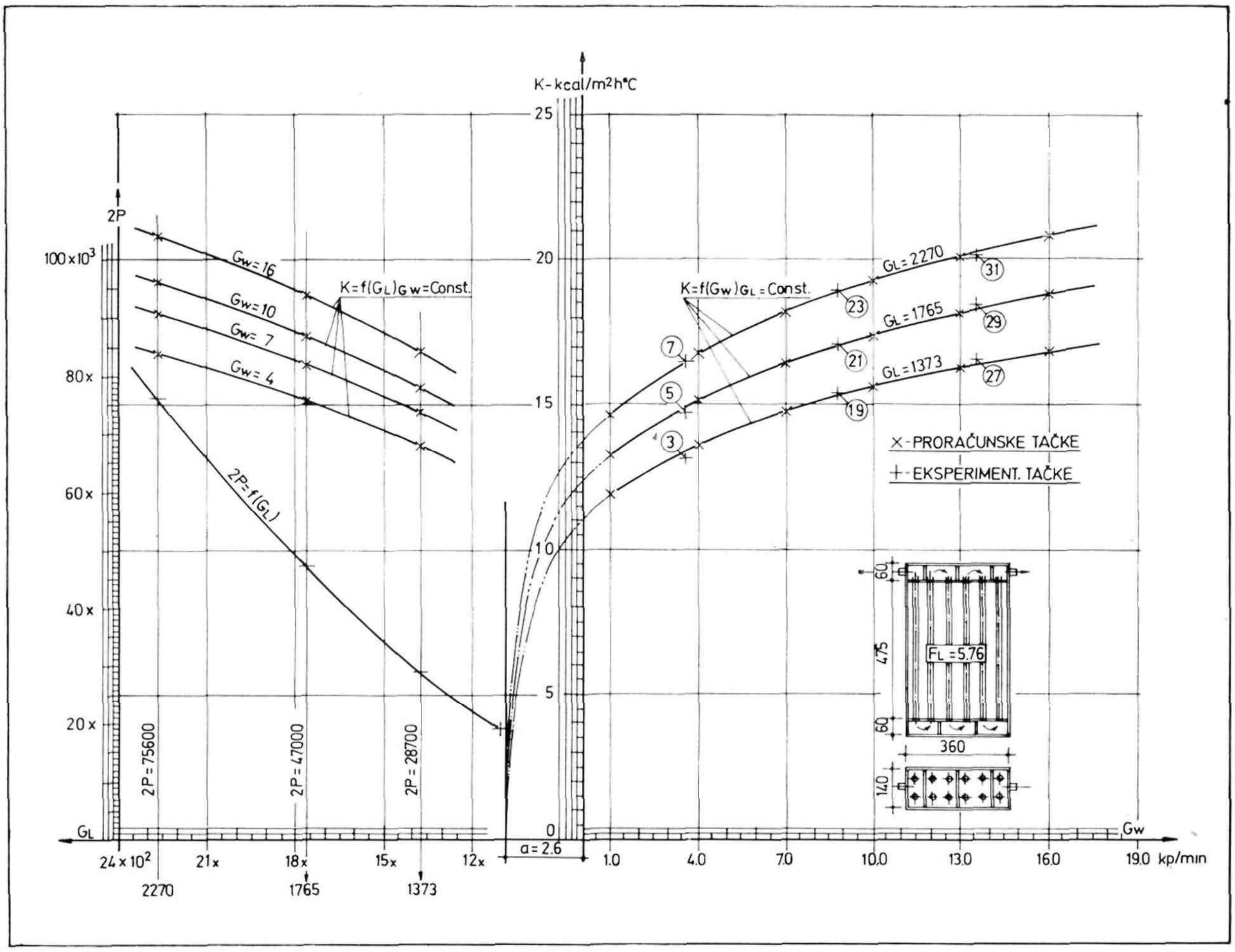
Srednja vrednost 3.66

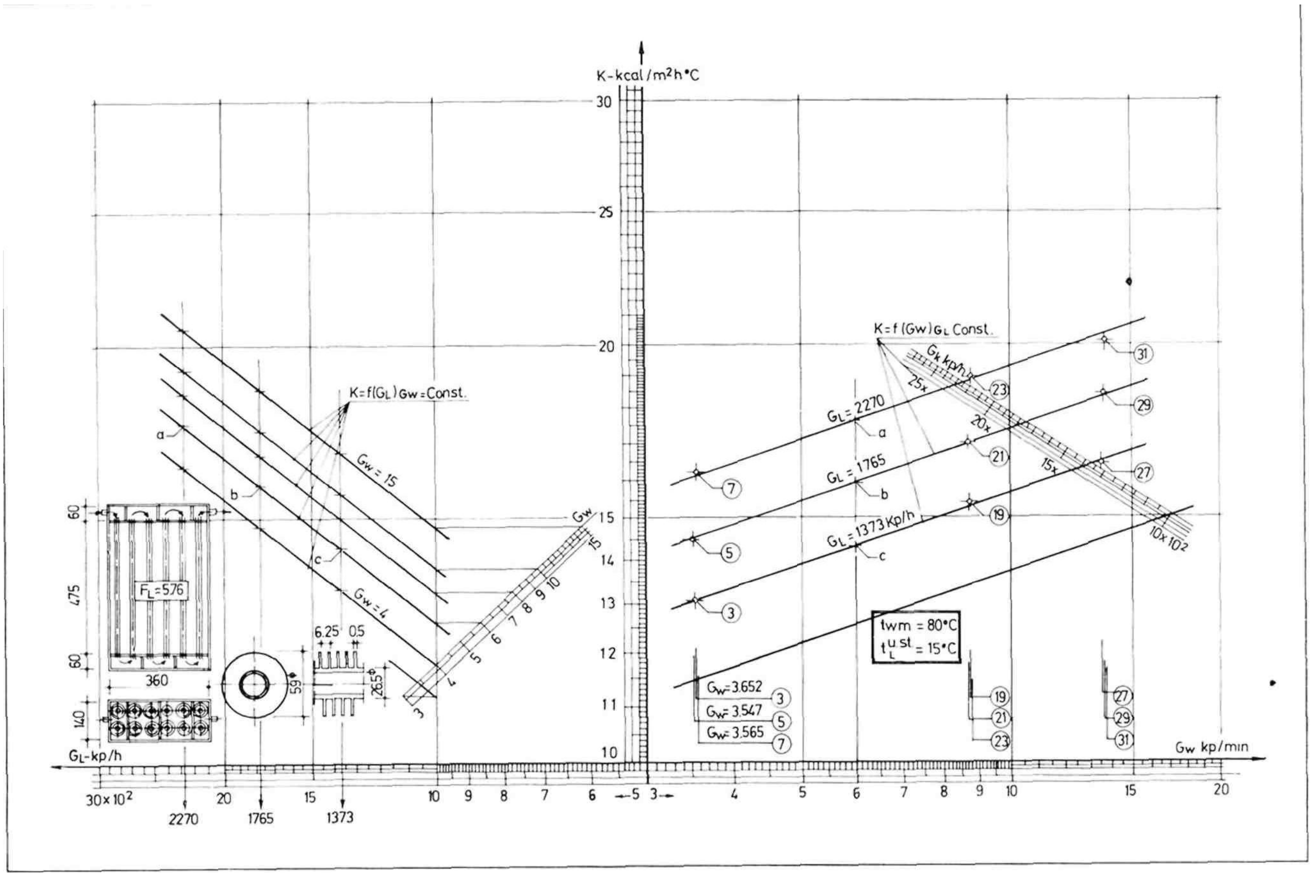
Tablica (B-7)

$$2P = \frac{\left(y^n_{m+1} - y^n_m \right)}{\left(x_{m+1} - x_m \right)} \; --- (B-19) \; ; \; X_o = \frac{y^1}{2P} \; --- (B-20) .$$

Gl		*y*	*lgy*	*n*	*nlgy*	y^n	*x*	*2 P*	x_o	G_w
2270	**m** + 1	'8.15	1.25888	4.66	5.86100	726.100	3.00	75.600	9.60	7.0
	m	16.70	1.22272	„	5.69500	495.500	„	„	6.60	4.0
1765	*m* + 1	16.40	1.21484	4.66	5.65500	451.900	3.00	47.000	9.60	7.0
	m	15.10	1.17898	„	5.49000	309.000	„	„	6.60	4.0
1373	*m* + 1	14 70	1.67332	4.66	5.44000	275.500	3.00	28.700	9.60	7.0
	m	13.55	1.13194	„	5.27740	189.400	„	„	6.60	4.0

Sl. B-4.





SI. B-5.

Krive $k = f\ (G_w)\ _{GL}\ —_{const}$ koje su prikazane u desnom koordinatnom sistemu, kao što znamo, konstruisane su na osnovu jednačine (A). U isti koordinatni sistem ucrtane su odgovarajuće vrednosti koeficijenta prenosa toplote k, koje su iz-računate na osnovu eksperimentalnih podataka. Kao što vidimo, eksperimentalne tačke 3, 19, 27 itd. odlično se uklapaju u naše krive, što dokazuje da su vrednosti eksponenta n i parametra $2\ P$ jednačina (A) određene tačno.

Razmotrićemo naš problem zavisnosti $k = f\ (G_{,v,})$ G/. $=const$ u drugom aspektu. Radi toga logaritmiraćemo našu jednačinu (B-10) i dobijamo sledeći izraz:

$$n \lg y = \lg 2\ P + \lg x \qquad \text{(B-25)}$$

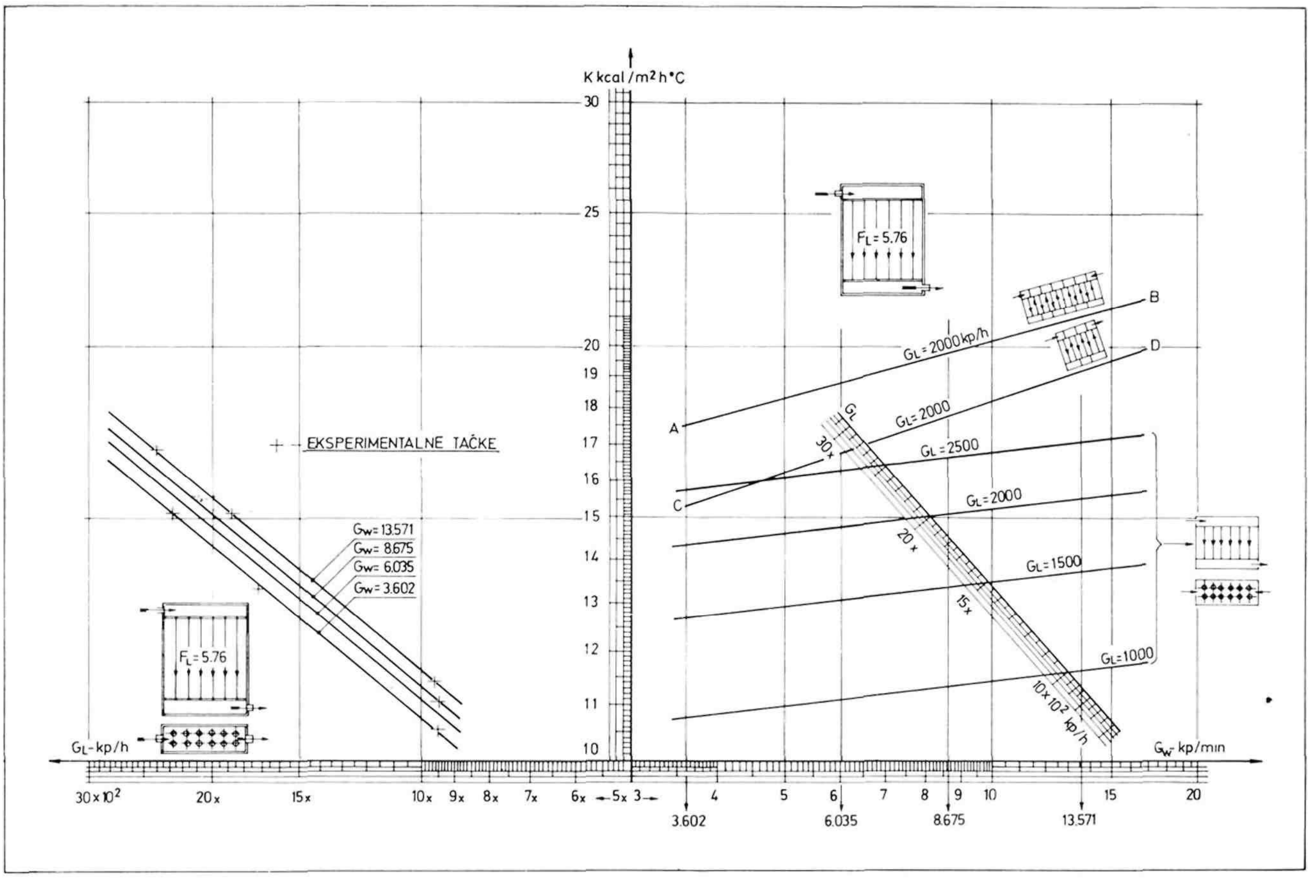
U koordinatnom sistemu sa logaritamskom podelom jednačina (B-25) predstavlja familiju pravih Iinija kod kojih eksponent n karakteriše nagib linija, dok parametar $2\ P$ karakteriše po-ložaj pojedinih pravih linija u zavisnosti od pro-toka vazduha $G_{,}$.

Na si. (B-5) konstruisan je u logaritamskom koordinatnom sistemu dijagram zavisnosti $k = /$ '(G,,.) CL-.-,,,,.,,odnosno $k = /\ (G,)\ _{Cw}$,0HS, Desni deo dijagrama konstruisan je na osnovu podataka tablice (B-5).

Levi deo dijagrama (B-5) konstruisan je na osnovu desnog dijagrama putem pravljenja pre-seka G,,.|, G_{w2l} G_{w3} . . . i prenošenje tačaka ukrštavanja ovih preseka sa linijama G_{LU} G_{l2} i G_u u levi koordinatni sistem na odgovarajuće ordinate.

Linije G;., = 2270, G_{l2} = 1765 ' i G_{IA} = 1373 kp/h desnog dijagrama si. (B-5) lepo se uklapaju u jednu logaritamsku skalu AB, te tako možemo konstruisati linije G, za svaki protok vazduha, putem povlačenja kroz odgovarajuću vrednost skale AB.

Preimućstva dijagrama zavisnosti $k = f\ (G_{,,})\ _{CL\ =,,,,,s/}$ u logaritamskom koordinatnom sistemu očevidna su, jer za njegovu konstrukciju dovoljni su samo podaci tablice (B-5) i nije po-



Sl. B-6.

trebno određivanje ni eksponenta *n* niti para-metra *2 P* za jednačinu (B-IO), a osim toga za konstrukciju takvog dijagrama potreban je minimalan broj eksperimenata.

Dijagram si. (B-5) konstruisan je za razmenjivač čija je zagrevna površina iznosila 5,76 m^2, pri čemu se isti sastojao od dvanaest orebrenih cevi, koje su raspoređene u dva reda »po kori-dorskom« sistemu. U gornjem i donjem delu razmenjivača ugrađene su pregrade tako da su sva-ke dve cevi bile povezane na red.

Naknadno je isti razmenjivač ispitan bez ikakvih pregrada u gornjem i donjem delu istog, tj. svih 12 orebrenih cevi bile su povezane paralelno. Takav razmenjivač ispitan je pri istim pro-tocima vode G„, i vazduha G,. Rezultati ispitivanja svedeni su na standardne uslove i na osnovu takvih podataka za fc = / $(G_w)_{GL= consl}$ konstruisan je dijagram koji je prikazan na si. (B-6).

Eksperimenat za proučavanje koeficijenta prenosa toplote *k* bio je proširen na taj način što su svih dvanaest orebrenih cevi, putem pravljenja odgovarajućih pregrada, bile povezane za red. Eksperimentalni materijal za ovu varijantu 'bio je obrađen na isti način kao i ranije i na osnovu njega dobivene konkretne vrednosti za konstrukciju zavisnost *k* = *f* (G„.) $_{GL = const}$

Radi upoređenja koeficijenta prenosa toplote *k* kod različitih varijanti povezivanja cevi, u dijagramu si. (B-6) ucrtane su naknadno dve li-nije promene *k* = *f* (G„.) $_{GL}$ $_L$>(><>o i to linija *AB* za slučaj kada su svih dvanaest cevi povezane na red i linija *CD* za slučaj kada smo imali po dve cevi povezane na red. Upoređujući vrednosti koeficijenta *k u* odnosu na slučaj paralelne veze sviju dvanaest cevi, kod protoka vazduha *G,* = = 2000 kp/h i protoka vode G„. = 10 kp/min do-lazimo do zaključka da je za slučaj veze 2x6 koraka koeficijent *k* povećan za 19,3%, dok za slučaj veze 1 x 12 koraka imamo povećanje za 31,7%. Konstruktori razmenjivača toplote, prema tome, moraju o gornjem zaključku voditi računa.