

OPTIMIZACIJA TOPLINSKIH PARAMETARA I KONSTRUKTIVNIH SVOJSTAVA POSTROJENJA ZA STERILIZACIJU MLIJEKA

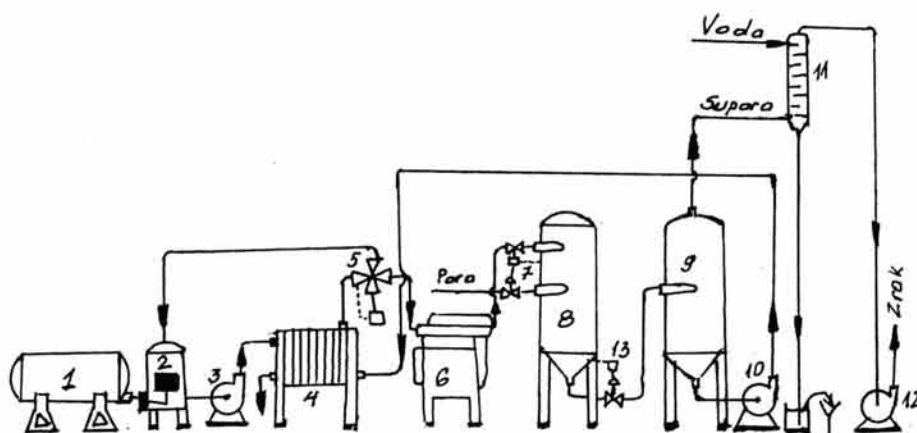
(Nastavak)

Svetozar STANIŠIĆ
Tehnološki fakultet, Zagreb

Opis postupka

U Laboratoriju za tehnološke operacije u suradnji s Laboratorijem za tehnologiju mlijeka i mlječnih proizvoda razrađen je postupak i projektirano postrojenje za visokotemperaturnu sterilizaciju mlijeka učinka 3600 lh^{-1} .

Pri projektiranju je ovog postrojenja vođeno računa o mogućnosti proizvodnje postrojenja iz aparata koje proizvode naše tvornice za proizvodnju aparata za prehrambenu industriju.



Sl. 1 Shema postrojenja za visokotemperaturnu sterilizaciju mlijeka

Glavni su aparati ovog postrojenja pločasti izmjenjivač topline (4) za predgrijavanje mlijeka i hlađenje mlijeka nakon samoisparivanja, autoklav (8) za sterilizaciju mlijeka raspršavanjem mlijeka u atmosferi pare, vakuumisparivač (9) za samouparavanje mlijeka, homogenizator (6) za homogenizaciju mlijeka i barometarski kondenzator (11) za održavanje potlaka u vakuumisparivaču (9).

Svježe se mlijeko iz prihvatne posude (1) preko balansne posude (2) pumpom (3) protiskuje kroz pločasti izmjenjivač topline (4), pri čemu se pregrijava. Ogrijevni medij je pločastog izmjenjivača topline (4) sterilno mlijeko iz vakuumisparivača (9) koje se prolazom kroz pločasti izmjenjivač topline (4) hladi. Temperatura se mlijeka na izlazu iz pločastog izmjenjivača topline kontrolira temperaturnim osjetilom (5), koje preko trokrake slavine dovoljno predgrijano mlijeko upušta u homogenizator (6), a nedovoljno predgrijano mlijeko vraća u balansnu posudu (2).

Iz pločastog izmjenjivača topline (4) mlijeko se preko homogenizatora (6) doprema u autoklav (8 — tzv. komoru za sterilizaciju) gdje se u struji pare pomoću rotacionog raspršivača raspršuje u sitne kapljice. Dotok se mlijeka i

pare u autoklav (8) regulira temperaturnim osjetilom (7). Iz autoklava se sterilno mlijeko uvodi u vakuumisparivač (9 — tzv. ekspanzionu posudu), gdje se hladi. Supara se iz vakuumisparivača (9) odvodi u barometarski kondenzator (11) gdje se kondenzira vodom a nekondenzirajući se plinovi vakuum pumpom (12) odsisavaju iz barometarskog kondenzatora (11) i ispuštaju u atmosferu.

Iz vakuumisparivača (9) se mlijeko pumpom (10) protiskuje kroz pločasti izmjenjivač topline (4) gdje se hladi.

Rezultati i diskusija rezultata

U tabeli br. 1 navedene su značajke pločastog izmjenjivača topline (4), a u tabeli br. 2 fizički parametri mlijeka u pločastom izmjenjivaču topline.

U tabeli br. 3 naveden je postupak pri proračunu pločastog izmjenjivača topline, upotrebene jednadžbe te rezultati dobiveni proračunom.

U pločastom se izmjenjivaču topline hladno mlijeko grije od temperature 5° C na temperaturu 72° C, toplinom toplijeg mlijeka koje se pri tome hladi od temperature 80° C na temperaturu 13,2° C.

Tabela br. 1

Značajke pločastog izmjenjivača topline

Naziv veličine	Oznaka	Vrijednost
Debljina ploče	δ	0,002 m
Razmak između ploča	x	0,003 m
Širina ploče	y	0,27 m
Visina ploče	z	0,74 m
Koeficijent toplinske vodljivosti ploče	λ	14,55 Wm ⁻¹ K ⁻¹
Maseni protok mlijeka	m	1 kg s ⁻¹
Pretpostavljeni koeficijent prolaza topline	kp	2500 Wm ⁻² K ⁻¹
Pretpostavljeni pad tlaka	p	50.000 Nm ⁻²
Koeficijent trenja	λ'	0,5

Tabela br. 2

Fizikalni parametri mlijeka u pločastom izmjenjivaču topline

N a z i v	Oznake za mlijeko koje se		Vrijednosti za mlijeko koje se	
	grije	hladi	grije	hladi
Ulazna temperatura	t_{1u}	t_{2u}	5° C	80° C
Izlazna temperatura	t_{1i}	t_{2i}	72° C	13,2° C
Specifična toplina	c_1	c_2	3954,2 Jkg ⁻¹ K ⁻¹	3966,0 Jkg ⁻¹ K ⁻¹
Gustoća	ρ_1	ρ_2	1021,6 kgm ⁻³	1017,6 kgm ⁻³
Koeficijent toplinske vodljivosti	λ_1	λ_2	0,510 Wm ⁻¹ K ⁻¹	0,516 Wm ⁻¹ K ⁻¹
Dinamički viskozitet	μ_1	μ_2	1,1 · 10 ⁻³ Nsm ⁻²	9,146 · 10 ⁻⁴ Nsm ⁻²
Pretpostavljena srednja razlika temperatura	p_{sp}		8° C	

Pločasti izmjenjivač topline (IT)

Tabela br. 3

N a z i v	Jednadžba na strani mlijeka koje se	Vrijednost
Toplinsko opterećenje na strani mlijeka koje se:		
a) grije	$Q = m_1 c_1 (t_{1i} - t_{1u})$	264.931 W
b) hladi	$Q = m_2 c_2 (t_{2u} - t_{2i})$	264.931 W
Razlika temperatura mlijeka koje se:		
a) grije	$\Delta t_1 = t_{1i} - t_{1u}$	67° C
b) hladi	$\Delta t_2 = \frac{Q}{m_2 c_2}$	66,7° C
Temperatura na izlazu iz IT mlijeka koje se:		
a) grije	$\Delta t_{1i} = t_1 - t_{1u}$	72° C
b) hladi	$\Delta t_{2i} = t_{2u} - t_2$	13,1° C
Temperaturni kriterij mlijeka koje se:		
a) grije	$\psi_1 = \frac{t_{1i} - t_{1u}}{t_{sp}}$	8,375° C
b) hladi	$\psi_2 = \frac{t_{2u} - t_{2i}}{t_{sp}}$	8,35° C
Orijentaciona brzina strujanja mlijeka koje se:		
a) grije	$w_{01} = 2 \left(\frac{k_p \Delta p_p}{\lambda' c_1 \varrho_1^2 \psi_1} \right)^{1/3}$	0,3868 $\frac{m}{s}$
b) hladi	$w_{02} = 2 \left(\frac{k_p \Delta p_{pz}}{\lambda' c_2 \varrho_2 \psi_2} \right)^{1/3}$	0,3878 $\frac{m}{s}$
Broj kanala u sloju mlijeka koje se:		
a) grije	$n_1 = \frac{m_1}{xy w_{01} \varrho_1}$	3,12 3
b) hladi	$n_2 = \frac{m_2}{xy w_{02} \varrho_2}$	3,13 3
Brzina strujanja mlijeka koje se:		
a) grije	$w_1 = \frac{m_1}{\varrho_1 xy n_1}$	0,403 $\frac{m}{s}$
b) hladi	$w_2 = \frac{m_2}{\varrho_2 xy n_2}$	0,404 $\frac{m}{s}$
Ekvivalentni promjer kanala između ploha		
	$d_e = \frac{2 xy}{x + y}$	0,005934 m

Nastavak tabele br. 3:

Naziv	Jednadžba na strani mlijeka koje se	Vrijednost
Re-broj mlijeka koje se:		
a) grije	$Re_1 = \frac{w_1 d_e \varrho_1}{\mu_1}$	2221
b) hladi	$Re_2 = \frac{w_2 d_e \varrho_2}{\mu_2}$	2667
Pr-broj mlijeka koje se:		
a) grije	$Pr_1 = \frac{\mu_1 c_1}{\lambda_1}$	8,529
b) hladi	$Pr_2 = \frac{\mu_2 c_2}{\lambda_2}$	7,028
Koeficijent prenosa topline na strani mlijeka koje se:		
a) grije	$\alpha_1 = 0,2536 \frac{\lambda_1}{d_e} Re_1^{0,65} Pr_1^{0,4}$	7691 $\frac{W}{m^2 K}$
b) hladi	$\alpha_2 = 0,2536 \frac{\lambda_2}{d_e} Re_2^{0,65} Pr_2^{0,4}$	8111 $\frac{W}{m^2 K}$
Koeficijent prolaza topline:	$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_2}}$	2560 $\frac{W}{m^2 K}$
Ulazna razlika temperature	$\Delta t_u = t_{2i} - t_{1u}$	8,2° C
Izlazna razlika temperature	$\Delta t_i = t_{2u} - t_{1i}$	8° C
Srednja razlika temperature	$\Delta t_s = \frac{t_u - t_i}{\ln \frac{t_u}{t_i}}$	8,1° C
Potrebna površina izmjene topline	$A = \frac{Q}{k \Delta t_s}$	12,776 m ²
Površina jedne ploče	$A_1 = y z$	0,1998 m ²
Potrebni broj ploča	$n = \frac{A}{A_1}$	63,946 64
Duljina kanala na strani mlijeka koje se:		
a) grije	$l_1 = \frac{z n}{n_1}$	15,787 m
b) hladi	$l_2 = \frac{z n}{n_2}$	13,299 m
Vrijeme		
a) grijanja mlijeka	$\Theta_1 = \frac{l_1}{w_1}$	39,15 s
b) hlađenja mlijeka	$\Theta_2 = \frac{l_2}{w_2}$	39,15 s

Značajke autoklava i fizički parametri mlijeka i pare u autoklavu

Tabela br. 4

Naziv	Oznaka	Vrijednost
Maseni protok mlijeka	m	1 kgs ⁻¹
Entalpija ogrijevne pare	i''	2.736.911 Jkg ⁻¹
Entalpija kondenzata	i'	597.875 Jkg ⁻¹
Specifična toplina mlijeka	c ₃	4001,5 Jkg ⁻¹
Temperatura mlijeka na ulazu u autoklav	t _{3u}	78 ^o C
Temperatura mlijeka na izlazu iz autoklava	t _{3i}	142 ^o C
Tlak ogrijevne pare u autoklavu	p	382263,2 Nm ⁻²
Temperatura kondenzata iz ogrijevne pare	t	142 ^o C
Broj okretaja diska	n ₃	3 s ⁻¹
Gustoća ogrijevne pare	ρ _p	2,073 kgm ⁻³
Visina autoklava	z ₁	2 m
Brzina strujanja pare u autoklavu	w	0,12 ms ⁻¹
Gustoća mlijeka u raspršivaču	ρ ₃	1000,3 kgm ³
Površinska napetost mlijeka	σ	0,04 Jm ⁻²
Promjer diska raspršivača	d _o	0,05 m
Specifična toplina kapljice sa slojem kondenzata	c ₈	4002,5 Jkg ⁻¹ K ⁻¹
Gustoća kapljica i kondenzata	ρ ₄	951 kgm ³

Autoklav i raspršivač u autoklavu

Tabela br. 5

Naziv	Jednadžbe	Vrijednost
Toplinsko opterećenje	$Q_a = mc_3 (t_{3i} - t_{3u})$	256.096 W
Maseni protok ogrijevne pare	$m_p = \frac{Q_a}{i'' - i'}$	0,1197249 kgm ⁻¹
Promjer kapljice mlijeka	$d_k = 32 \frac{1}{n} \left(\frac{\sigma}{d_o \rho} \right)^{0.5}$	0,00468 m
Masa kapljice mlijeka	$m_{m'} = \frac{4}{3} (Om5 d_k)^3 \pi \rho_3$	0,0000536 kg

Nastavak tabele br. 5:

Naziv	Jednadžbe	Vrijednost
Masa pare koja se ukapljuje	$m_p' = \frac{m_m' c_s (t_{3i} - t_{3u})}{i'' + c_{st}}$	0,0000041 kg
Masa kapljice nakon dostizanja temperature 142° C	$d_{ks} = 2 \left(\frac{3 m_k'}{4\pi \rho_4} \right)^{1/3}$	0,0024 m
Promjer autoklava	$d_a = \left(\frac{4 m_p}{\pi w \rho} \right)^{0,5}$	0,3 m

Značajke isparivača i raspršivača u isparivaču i fizički parametri mlijeka i pare u isparivaču

Tabela br. 6

Naziv veličine	Oznaka	Vrijednost
Koeficijent brzine	β	0,6
Tlak u isparivaču	p_i	74356,31 Nm ⁻²
Gustoća mlijeka u raspršivaču	ρ_4	951 kgm ⁻³
Koeficijent suženja mlaza	φ	0,78
Promjer rupice raspršivača	d_r	0,002 m
Obračunski promjer rupice	d_o	0,001 m
Maseni protok supare	m_s	0,1197249 ms ⁻¹
Gustoća supare	ρ_s	0,2434 kgm ⁻³
Brzina strujanja supare	w_s	2,5 ms ⁻¹

Isparivač i raspršivač isparivača

Tabela br. 7

Naziv	Jednadžba	Vrijednost
Maseni protok sterilnog mlijeka	$m_{st} = m + m_p$	1,1197249 kgs ⁻¹
Pad tlaka u raspršivaču	$\Delta p_r = p - p_i$	30.7906,9 Nm ⁻²
Brzina isticanja mlijeka iz raspršivača	$w_3 = \beta \left(\frac{2 \Delta p_2}{\rho_4} \right)^{0,5}$	15,24 ms ⁻¹

Nastavak tabele br. 7:

Naziv	Jednadžba	Vrijednost
Volumni protok mlijeka kroz jednu rupicu	$V = \varphi w_3 \frac{d_r^2 \pi}{4}$	0,00003627 m ³ s ⁻¹
Potreban broj rupica za raspršavanje mlijeka	$n_3 = \frac{m_{st}}{\rho_4 \cdot V}$	32
Promjer isparivača	$d_i = \left(\frac{4 m_s}{\pi w_s \rho_s} \right)^{0,5}$	0,4 m

Značajke barometarskog kondenzatora, supare i vode u barometarskom kondenzatoru

Tabela br. 8

Naziv	Oznaka	Vrijednost
Specifični volumen supare	v	3,679 m ³ kg ⁻¹
Obračunska brzina supare	w _{0s}	10 ms ⁻¹
Toplina ukapljivanja supare	r _s	2.639.777 Jkg ⁻¹
Specifična toplina kondenzata supare	c _{sk}	4.207,5 Jkg ⁻¹
Temperatura supare u barometarskom kondenzatoru	t _{sk}	78° C
Temperatura kondenzata na izlazu iz barometarskog kondenzatora	t _k	75° C
Specifična toplina vode	c _w	4.180,1 Jkg ⁻¹
Temperatura vode na ulazu u barometarski kondenzator	t _w	16° C
Gustoća vode	ρ _w	990 kgm ⁻³
Promjer otvora u podu	d _p	0,003
Koeficijent protoka	φ ₁	0,62
Razmak između podova	z _p	0,4 m
Broj podova	n ₃	8
Erzina strujanja kondenzata u barometarskoj cijevi	w _b	0,2 ms
Visina vode na podu	z	
Gustoća vode u barometarskoj cijevi	φ _b	972 kgm ³

Nastavak tabele br. 8:

Naziv	Oznaka	Vrijednost
Viskozitet vode u barometarskoj cijevi	ρ_b	0,0003794 Nsm ⁻²
Tlak u barometarskom kondenzatoru	μ_b	43649,4 Nm ⁻²
Koeficijent mjesnog otpora na ulazu u barometarsku cijev	ζ_1	0,5
Koeficijent mjesnog otpora na izlazu iz barometarske cijevi	ζ_2	1

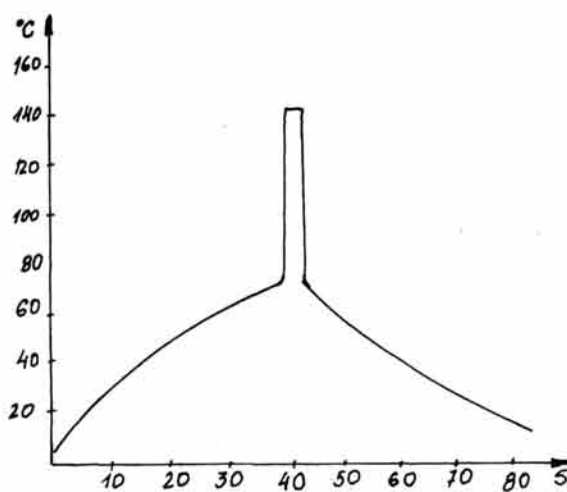
Barometarski kondenzator

Tabela br. 9

Naziv	Jednadžba	Vrijednost
Promjer barometarskog kondenzatora	$d_k = \left(\frac{6 v_s m_s}{\pi w_s} \right)^{0,5}$	0,30 m
Površina poprečnog presjeka barometarskog kondenzatora	$A_k = 0,25 d_k^2$	0,0661
Širina podova barometarskog kondenzatora	$Y_1 = 0,5 d_k + 0,005$	0,250 m
Volumni protok vode u kondenzatoru	$V_w = \frac{m_s r_s + m_s c_{sk} (t_{sk} - t_k)}{o_w c_w (t_s - t_w)}$	0,0013 m ³ s ⁻¹
Protok kroz otvor u podu	$V_0 = \varphi_1 0,25 d_0 (2 g z_2)^{0,5}$	0,000038 m ³ s ⁻¹
Broj otvora u podu	$n = \frac{V_w}{2 V_0}$	342
Korisna visina kondenzatora	$z_k = n_1 z_p$	3,2 m
Protok vode kroz barometarsku cijev	$V_c = W_w + \frac{m_s}{o_w}$	0,001429 m ³ s ⁻¹
Unutarnji promjer barometarske cijevi	$d_b = \left(\frac{4 V_c}{\pi w_b} \right)^{0,5}$	0,09 m
Reynoldsov broj vode u barometarskoj cijevi	$Re = \frac{w_b d_b o_b}{u_b}$	46.115

Naziv	Jednadžba	
Koeficijent trenja vode u barometarskoj cijevi	$\lambda' = 0,14 + \frac{1,056}{\text{Re}^{0,42}}$	0,1516
Visina stupca vode u barometarskoj cijevi	$z_b = 10,33 \frac{p_b}{p_o}$	4,45 m
Potrebna visina barometarske cijevi	$z_p = \frac{w_k}{2g} \left(1 + \frac{z_w}{d_b} + \zeta_1 + \zeta_2 + z_w + 0,5 \right)$	5,05

Vrijeme grijanja odnosno hlađenja mlijeka u pločastom izmjenjivaču topline je relativno kratko i iznosi 39,1 s. Srednja logaritamska razlika temperatura u pločastom izmjenjivaču topline od 8° C omogućuje da se mlijeko u potpunosti predgrije toplinom steriliziranog mlijeka koje se hladi, tj. regeneracije topline u pločastom izmjenjivaču topline iznosi 100%. Duljina kanala između ploča od



Sl. 2 to-dijagram sterilizacije mlijeka

15,787 m dovoljna je da se mlijeko ugrije od 5° C na 72° C, što znači da je tlak u pločastom izmjenjivaču topline relativno mali i da nema poteškoća s brtvljenjem ploča. Temperatura se mlijeka na izlazu iz pločastog izmjenjivača topline kontrolira temperaturnim osjetilom.

Predgrijano se mlijeko prije sterilizacije homogenizira, pri čemu mu se temperatura povećava za 6—10° C. Homogenizacijom se mlijeka prije sterilizacije izbjegavaju česte kontaminacije mli-

jeka pri homogenizaciji.

Autoklav je izveden kao valjkasta posuda promjera 0,3 m i visine 2 m. Mlijeko se u autoklav raspršava pomoću rotirajućeg raspršivača u struji pare. Promjer kapljice mlijeka dobivenih raspršivanjem iznosi cca 5 mm čime se temperatura mlijeka za dijelić sekunde poveća od 78° C na 142° C. Pri povećanju se temperature na površini kapljice kondenzira para a toplinom se kondenzacije povećava temperatura kapljice. Visina autoklava od 2 m dovoljna je da se temperatura kapljice pri padanju poveća od 78° C na 142° C. Raspršivač je izveden tako da je u autoklav moguće uvoditi predgrijano mlijeko

samo ako je tlak para dovoljno velik. Temperatura se mlijeka na izlazu iz autoklava kontrolira temperaturnim osjetilom (13).

Iz autoklava (8) sterilizirano se mlijeko uvodi u isparivač (9) pri čemu se raspršava u sitne kapljice. U isparivaču (9) se pomoću barometarskog kondenzatora (11) održava tlak od $74356,31 \text{ Nm}^{-2}$. Zbog nastale razlike tlaka mlijeko se samouparava na račun topline pregrijavanja pri čemu se hladi od 142°C na 80°C i postiže postotak suhe tvari sirovog mlijeka.

Osim viška vode samouparavanjem se mlijeko oslobađa stranih mirisa koji se sastoje od lako hlapivih tvari. Zahvaljujući raspršavanju u sitne kapljice difuzija tih tvari prema površini kapljice i isparavanju s površine kapljice traje vrlo kratko vrijeme.

Isparivač (9) je kao i autoklav (8) valjkastog oblika, visine 2 m i promjera 0,4 m. Iz isparivača (9) se mlijeko pumpom (10) protiskuje kroz pločasti izmjenjivač topline (4), gdje se hladi na $13,2^{\circ} \text{C}$ a zatim se odvodi u prihvatni spremnik odakle se odvodi u postrojenje za pakovanje.

Barometarski kondenzator ima 8 podova između kojih je razmak 0,4 m tako da je ukupna visina barometarskog kondenzatora 3,6 m. Promjer je barometarskog kondenzatora 0,3 m. Utrošak vode u barometarskom kondenzatoru iznosi 1,3 kg vode po kg mlijeka. Temperatura je vode na izlazu iz barometarskog kondenzatora 75°C .

Zaključci

Predgrijavanje mlijeka i hlađenje steriliziranog mlijeka u pločastom izmjenjivaču topline omogućuje kratku toplinsku obradu, mali pad tlaka i 100% regeneraciju topline.

Sterilizacijom se mlijeka u autoklavu u struji pare temperatura mlijeka povećava od 78°C do 142°C za dijelić sekunde, može se lagano regulirati vrijeme zadržavanja na toj temperaturi čime se otklanja mogućnost zagorijevanja mlijeka.

Hlađenjem se mlijeka samoisparavanjem u isparivaču smanjuje temperatura od 142°C na 80°C za dijelić sekunde pri čemu se uklanjaju strani mirisi do te mjere da se dobije mlijeko prirodnog okusa.

Održavanje potlaka u isparivaču pomoću barometarskog kondenzatora omogućuje mali utrošak vode, mogućnost iskorištenja topline kondenzata iz barometarskog kondenzatora za predgrijavanje nekog drugog medija van ovog postrojenja. Obzirom na jednostavnost rješenja cijena koštanja postrojenja i pogonski troškovi pri radu postrojenja su mali.

Literatura

1. Clark J. G., Milk processing: on up-to-date survey. Dairy Inds., 1963, 28. No. 1, 40—46; 1963/I, str. 352.
2. Farrall A. W., Heating systems for high temperature treatment of milk, Proc. 13th Annual National Dairy Engng. Conf., East Lansing, Mich., 1965, S. 1, s. a., 19—26; 1966/I, str. 357, 1967/II, str. 249.