

Prof. inż. STANISŁAW NIEWIADOMSKI

STĘŻANIE ROZTWORÓW I APARATY WYPARNE



WARSZAWA 1950

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWA TECHNICZNE

Prof. inż. STANISŁAW NIEWIADOMSKI

STĘŻANIE ROZTWORÓW I APARATY WYPARNE



66.02

WARSZAWA 1950

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWA TECHNICZNE

66.048.54

Opiniodawca: Prof. dr inż. Tadeusz Pietrzykowski

Redaktor PWT: Wacław Geritz

Praca przedstawia przebieg zjawisk, zachodzących przy stężaniu roztworów oraz opis i zakres stosowalności różnorodnych urządzeń wyparnych.

Książka jest przeznaczona dla inż. i techników.



1468

WSZELKIE PRAWA ZASTRZEŻONE

Redaktor techniczny *D. Sikorski*

Korektorka *I. Smolińska*

Format A 5

Symbol PWT 71255

Nakład 2 100

Ark. druku 6¹/₂, Papier druk. sat. kl. V, 70 g, form. 61×86 Data druku 29. IX. 50.

K-1-16314

Wielkopolskie Zakłady Graficzne w Poznaniu, Zakład Główny — 2100 — 1325. IV. 50.

1952 K 10/30

Errata
(dostrzeżone ważniejsze błędy)

Str.	Wiersz	Jest	Powinno być
11	5 od dołu	$\frac{D = W i - t_z +}{I - t_k}$	$D = \frac{W i - t_z +}{I - t_k}$
15	1 „ „	p	P_{H_2O}
15	4 „ „	$p = \frac{P_{H_2O}}{p} \cdot p$	$P_{H_2O} = \frac{P'_{H_2O}}{p} \cdot p$
15	6 „ „	p'_{H_2O}	P'_{H_2O}
15	9 „ „	p	P
15	10 „ „	p'	P'
15	19 od góry	p	P
16	5 „ „	p	P
33	22 „ „	oddzielając się	oddzielają się
35	1 od dołu	15.	15a.
36	13 od góry	2 m/sek	20 m/sek
38	5 „ „	I	J
38	6 „ „	J	I
43	10 „ „	t_{krs}	t_{skr}
45	11 „ „	$F = \frac{Q}{K \theta_{sr} \tau}$	$F = \frac{Q}{k \theta_{sr} \tau}$
45	13 „ „	K	k



Str.	Wiersz	Jest	Powinno być
45	14 od góry	ϑ_{sr}	Θ_{sr}
45	14 od dołu	$F = \frac{D(I - t_{skr})}{K \Theta_{sr} \tau}$	$\bar{F} = \frac{D I - t_{skr}}{k \Theta_{sr} \tau}$
51	5 od góry	20	21
56	13 od dołu	utrzymywana	otrzymywana
57	4 „ „	+ $\varphi_1 \psi_2 \psi_3$ +	+ $\varphi_1 \psi_2 \psi_3$ +
59	2 „ „	$w_2 = (w_2 - G_2) \varphi_2 +$	$w_2 = (w_1 - G_1) \varphi_2 +$
63	4 od góry	, wtedy gdy	wtedy, gdy
67	19 od dołu	$F_3 = \frac{Q_3}{k_2 \Theta_3}$	$F_3 = \frac{Q_3}{k_3 \Theta_3}$
71	12 „ „	10 000 kcal/m ² ·°C·h,	10 000 kcal/m ² ·°C·h,
72	7 od góry	kcal/m ² ·°C·h	kcal/m ² ·°C·h
72	8 „ „	kcal/m ² ·°C·h	kcal/m ² ·°C·h
72	12 „ „	W	w
73	11 „ „	h_m	H_m
79	5 i 6 od góry	at	ata
81	5 od góry	$= \frac{90 - 102,7}{640,5 - 102,7} =$	$= \frac{90 - 102,7}{640,4 - 102,7} =$
81	9 „ „	$= \frac{88,2 - 59,7}{622,3 - 59,7} =$	$= \frac{88,2 - 59,7}{622,8 - 59,7} =$
82	1 „ „	$= 1389(640,5 - 90) =$	$= 1389(640,4 - 90) =$
82	2 „ „	1495 (334 - 88,2)	· 1495 (634,6 - 88,2)
82	3 „ „	1616 (622,3 - 59,7)	1616 (622,8 - 59,7)

SPIS RZECZY

	Str.
1. Wiadomości wstępne	5
2. Wyparka bez wrzenia cieczy	6
3. Wyparowywanie w otwartych naczyniach pod atmosferycznym ciśnieniem	10
4. Temperatura wrzenia roztworów	12
5. Wyparka pod próżnią	17
6. Klasyfikacja aparatów wyparnych	22
7. Aparaty wyparne z płaszczem ogrzewającym i z węzownicami	22
8. Aparaty wyparne z rurkami poziomymi	27
9. Aparaty wyparne z rurkami pionowymi	30
10. Aparaty wyparne z rurkami pochyłymi	37
11. Aparat wyparny z wymuszoną cyrkulacją	39
12. Wyparka jednodziałowa	40
13. Wyparka wielodziałowa	45
14. Obliczanie wyparki wielodziałowej	52
15. Różnica temperatur w wielodziałowej baterii wyparnej . .	60
16. Ustalenie temperatur wrzenia w poszczególnych działach wyparki	66
17. Współczynnik przewodnictwa ciepła k w aparatach wyparnych	71
18. Ilości działów w wyparce wielodziałowej	75
19. Przykład obliczania wielodziałowej baterii wyparnej . . .	79
20. Wyparka mechaniczna	89
21. Warniki	97

SPIS RYSUNKÓW

1. Otwarty aparat wyparny z płaszczem ogrzewającym . . .	7
2. Panwiowy aparat wyparny	9
3. Rurowy aparat wyparny	9
4. Zależność temperatury wrzenia od stężenia roztworów wodnych	14
5. Schemat instalacji wyparki próżniowej	19
6. Aparat wyparny z płaszczem ogrzewającym	23
7. Aparat wyparny Frederkinga	25

	Str.
8. Dolna część aparatu wyparnego, ogrzewanego węzownicą	26
9. Aparat wyparny Y. P. Dewine Co.	27
10. Umocowanie rurek	28
10a. Rozmieszczenie rurek	29
10b. Rozmieszczenie rurek	29
11. Aparat wyparny systemu „Wellner-Jelinek”	29
12. Aparat wyparny Roberta	31
13. Kołpak (hełm)	33
14. Aparat wyparny Seidaka	34
15. Aparat wyparny Kestnera	36
15a. Przekrój przez rurkę	37
16. Aparat wyparny Buflovaca	38
17. Aparat wyparny „Prache et Bouillon”	40
18. Schemat wyparki trójdziałowej	46
19. Schemat przeciwwrądowej baterii wyparnej	49
20. Schemat równoległej baterii wyparnej	50
21. Schemat baterii wyparnej z działem zerowym i oddawaniem pary do celów grzejnych	51
22. Schemat cyrkulacji i temperatur wrzenia w aparacie Roberta	64
23. Wykres Alperta	71
24. Wyparka mechaniczna	90
25. Wykres entropowy wyparki mechanicznej	92
26. Aparat natryskowy	93
27. Aparat natryskowy do studzenia pary przegrzanej syst. Seiferta	94
28. Bateria do destylacji wody	96
29. Dolna część warnika systemu „Lira”	98
30. Dolna część warnika systemu Graentzdoeffera	99
31. Warnik z odbieralnikami	100
32. Warnik z ciągłym odbieraniem	101

SPIS TABLIC

1. Temperatura wrzenia niektórych roztworów pod ciśnieniem atmosferycznym	13
2. Wartości liczby β dla różnych działów	75
3. Współczynnik przewodnictwa ciepła w wyparce cukrowniczej	75
4. Para wodna nasycona	103

1. Wiadomości wstępne

Jedną z najważniejszych operacji stosowanych w przemyśle chemicznym jest stężanie roztworów.

Stężaniem nazywamy operację technologiczną mającą na celu zagęszczanie słabych roztworów soli lub innych ciał stałych przez odparowywanie rozpuszczalnika i usuwanie oparów. W miarę tego jak roztwór paruje, zawartość procentowa rozpuszczonego w nim ciała stałego powiększa się, a cieczy maleje, stężenie więc roztworu wzrasta. Przy dostatecznie długim odparowywaniu można doprowadzić roztwór do przesylenia i wypadania z niego ciała rozpuszczonego.

Urządzenia, w których zachodzi odparowywanie rozcieńczonych roztworów aż do stanu nasycenia, noszą nazwę *a p a r a t ó w w y p a r n y c h*; urządzenia zaś, w których są odparowywane roztwory przesycone w celu wydzielenia z nich kryształów, nazywamy *w a r n i k a m i*.

Roztwory w zależności od stopnia stężenia oraz od własności rozpuszczalnika i ciała rozpuszczonego posiadają różnorodne własności fizyczne i chemiczne i w różny sposób zachowują się podczas odparowywania. Jedne roztwory na przykład posiadają lepkość bardzo małą, inne natomiast są tak lepkie i gęste, że z trudnością powstają w nich prądy konwekcyjne podczas ogrzewania. Są roztwory, które wytwarzają na powierzchniach ogrzewalnych twarde osady, wydzielają kryształy lub dają duże ilości piany. Bywają poza tym roztwory, których temperatura wrzenia jest bardzo wysoka oraz takie, które należy odparowywać w temperaturach niskich ze względu na niebezpieczeństwo rozkładu.

Jest rzeczą zupełnie zrozumiałą, że do roztworów różniących się od siebie własnościami fizycznymi i chemicznymi należy stosować podczas wyparowywania różne metody postępowania oraz różną aparaturę.

Wyparowywanie można prowadzić albo w sposób periodyczny, albo ciągły, pod ciśnieniem atmosferycznym lub pod

próżnią. Poza tym stosowana jest wyparka w otwartych naczyniach bez wrzenia odparowywanego roztworu. Na uwagę zasługuje również wyparka mechaniczna oraz, bardzo ważna z punktu widzenia gospodarki cieplnej, wyparka wielodziałowa.

Przy wyborze i projektowaniu aparatów wyparnych należy uwzględnić wszystkie własności zagęszczanych roztworów. Dlatego powstało dużo różnych typów aparatów wyparnych.

2. Wyparka bez wrzenia cieczy

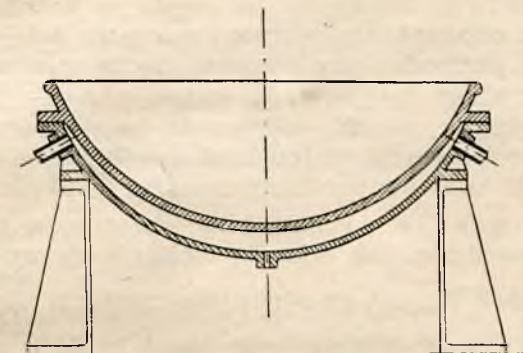
Przejście substancji ze stanu ciekłego w stan gazowy zachodzi w każdej temperaturze, jeżeli tylko prężność cząstkowa pary nad swobodną powierzchnią cieczy jest mniejsza od prężności pary w temperaturze cieczy. Gdy jest na odwrót, następuje skraplanie się pary znajdującej się nad swobodną powierzchnią cieczy.

Ogrzewając jakąkolwiek ciecz w otwartym naczyniu zauważymy, że ze wzrostem jej temperatury ilość wydzielającej się pary ze swobodnej powierzchni cieczy wzrasta, gdyż wzrasta jej prężność. Dopóki prężność pary jest mniejsza od ciśnienia atmosferycznego, parowanie zachodzi łagodnie, gdy zaś osiągnie wartość ciśnienia panującego nad powierzchnią cieczy (w otwartych naczyniach ciśnienie 1 atmosfery), następuje wrzenie, para przy tym wydziela się w sposób burzliwy, porywając kropelki cieczy, która rozpryskuje się na wszystkie strony.

Wyparowywanie w temperaturach niższych od temperatury wrzenia roztworu stosowane jest w przypadkach, gdy chodzi o odparowanie stosunkowo niewielkich ilości cieczy (na przykład w przemyśle farmaceutycznym) i gdy wrzenie przy tym nie jest pożądane ze względu na możliwość powstawania podczas wrzenia procesów ubocznych, mogących wpłynąć szkodliwie na którąś z własności odparowywanego roztworu. Wyparowywanie bez wrzenia jest stosowane i w tych przypadkach, gdy chodzi o stężenie małych ilości roztworu substancji, która rozkłada się w temperaturze bliskiej temperaturze wrzenia.

Aparaty wyparne używane w tym przypadku, są to albo panwie, albo kotły z płaszczem ogrzewającym kształtu niegłębokiej czaszy, jak to przedstawia rys. 1.

Ilość cieczy, którą można odparować w takim aparacie, zależy przede wszystkim od wielkości swobodnej powierzchni cieczy parującej, a poza tym od ciśnienia barometrycznego, od prężności pary w temperaturze parowania, od prężności



Rys. 1. Otwarty aparat wyparny z płaszczem ogrzewającym.

cząstkowej pary w powietrzu oraz od prędkości ruchu powietrza nad powierzchnią cieczy. Zależność tę dla wody i wodnych roztworów przedstawia następujący przybliżony wzór Daltona:

$$G = \alpha F \frac{P_1 - \varphi P_2}{B} \text{ kg/h,} \quad (1)$$

gdzie: G jest to ilość cieczy odparowanej w kg/h,
 F — swobodna powierzchnia cieczy w m^2 ,
 B — ciśnienie barometryczne w mm Hg,
 P_1 — prężność pary w temperaturze parowania cieczy w mm Hg,
 P_2 — prężność pary w mm Hg znajdującej się w powietrzu w temperaturze powietrza,
 φ — wilgotność względna powietrza,
 α — współczynnik zależny od prędkości przepływu powietrza nad powierzchnią parującej cieczy.

Zależność tę przedstawia wzór empiryczny

$$\alpha = 23 + 10 w,$$

gdzie w jest prędkością przepływu powietrza w m/sek.

Ilość ciepła potrzebną do odparowania G kg cieczy obliczamy ze wzoru:

$$Q = G (i - ct), \quad (2)$$

gdzie: i — jest to entalpia pary w kcal/kg,
 t — temperatura cieczy parującej,
 c — ciepło właściwe cieczy (dla wody $c = 1$).

Przykład. Obliczyć, ile ciepła w kcal/h należy dostarczyć na odparowanie wodnego roztworu soli w otwartym kotle, jeżeli swobodna powierzchnia cieczy wynosi:

$F = 0,6$ m², temperatura roztworu $t_1 = 85^\circ$, temperatura powietrza $t_2 = 25^\circ$, wilgotność powietrza $\varphi = 70\%$, prędkość przepływu powietrza nad powierzchnią cieczy $v = 1,2$ m/sek, ciśnienie barometryczne $B = 750$ mm Hg.

Rozwiązanie. Prężność pary wodnej w temperaturze $t_1 = 85^\circ$ równa się, jak widać z tablicy pary wodnej nasyconej, $p_1 = 0,589$ kg/cm², co odpowiada ciśnieniu $\frac{0,589}{13,6} \cdot 1000 = 433$ mm Hg, w temperaturze zaś $t_2 = 25^\circ$, $p_2 = 0,0326$ kg/cm², co odpowiada ciśnieniu $\frac{0,0326}{13,6} \cdot 100 = 239$ mm Hg. Współczynnik α przy prędkości powietrza $v = 1,2$ m/sek wynosi:

$$\alpha = 23 + 10 \cdot 1,2 = 35.$$

Podstawiając powyższe wartości do wzoru Daltona (1) otrzymamy

$$G = 35 \cdot 0,6 \frac{433 - 0,70 \cdot 23,9}{750} = 11,7 \text{ kg/h.}$$

Podstawiając wartość entalpii pary w temperaturze $t = 85^\circ$ z tablic pary wodnej $i = 633,2$ do wzoru (2), otrzymamy, że należy dostarczyć

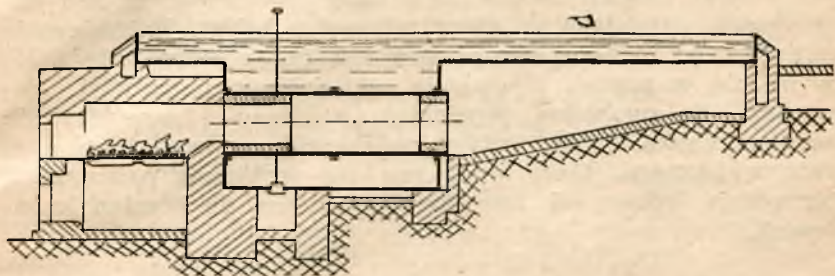
$$Q = 11,7 (633,2 - 1 \cdot 85) = 6414 \text{ kcal/h.}$$

Aparaty wyparne, w których zachodzi odparowywanie bez wrzenia cieczy, pracują — w zależności od konstrukcji — w sposób periodyczny lub ciągle.

Na rysunku 2 podany jest przekrój pionowy aparatu wyparnego o działaniu periodycznym. Aparat ten składa się z panwi, płomienicy i paleniska. Gazy spalinowe po przejściu przez płomienicę ogrzewają panwę od dołu i odchodzą do kolumny kanałem (nie zaznaczonym na rysunku). Opary wydzielające się z powierzchni cieczy w temperaturze od 92 do 95° zabiera przepływające nad nią powietrze i unosi na zewnątrz

przez specjalny wyciąg. Aparat po zakończeniu szarży jest opróżniany przez zawór umieszczony w najniższym miejscu.

Tego rodzaju aparaty wyparne były dawniej stosowane powszechnie w większych zakładach przemysłu solnego, obec-



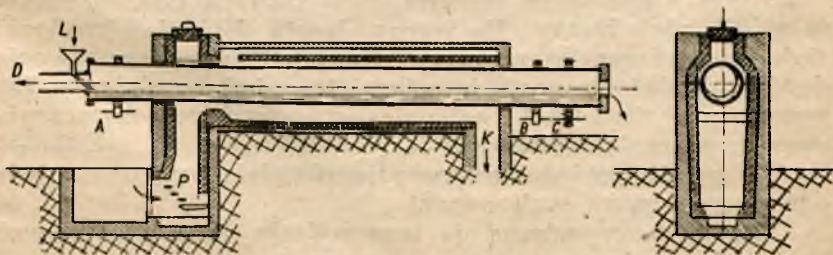
Rys. 2. Panwiowy aparat wyparny.

nie zaś są używane w tym przemyśle w wyjątkowych przypadkach, gdyż zajmują dużo miejsca i posiadają małą sprawność i wydajność.

Panwie średniej wielkości (przedstawione na rysunku 2) mogą dać od 10 000 do 12 000 kg soli na dobę posiadając około 20 m długości, 8 m szerokości, 180 m² powierzchni ogrzewalnej i 160 m² zwierciadła wodnego; urządzenia większych wymiarów posiadają zwierciadło wodne do 300 m².

Nateżenie powierzchni ogrzewalnej aparatów wyparnych typu panwiowego wynosi od 7 do 11 kg pary na godzinę z 1 m² powierzchni ogrzewalnej.

Na rysunku 3 przedstawiony jest rurowy aparat wyparny o działaniu ciągłym (firmy „ZAHN et Co“), ogrzewany ga-



Rys. 3. Rurowy aparat wyparny.

zami spalinowymi. Długi pochyło ustawiony bęben rurowy, obracający się na rolkach A i B (rys. 3) otrzymuje napęd za pośrednictwem przekładni zębatej C. Roztwór rozcieńczony

doprowadzany jest przez lej L w górnym końcu bębna, zagęszczony zaś odchodzi z końca przeciwnego, położonego cokolwiek niżej. Przez bęben przepływa powietrze w przeciwnym kierunku z cieczą. Powietrze to unosi opary na zewnątrz przez przewód D . Bęben obraca się z taką prędkością, że siła odśrodkowa, działająca na ciecz wewnątrz bębna, jest niewiele mniejsza od ciężaru cieczy, wskutek czego ciecz układa się w bębnie w postaci pierścienia niejednakowej grubości. Powiększa to swobodną powierzchnię cieczy i współczynnik przewodnictwa ciepła, wpływając znacznie na wydajność aparatu wyparnego. Gazy spalinowe po wyjściu z paleniska P ogrzewają bęben od zewnątrz i odchodzą do komina kanałem K .

3. Wyparowywanie w otwartych naczyniach pod atmosferycznym ciśnieniem

Najprostszym urządzeniem wyparnym stosowanym w tych przypadkach, gdy trzeba odparować niewielkie stosunkowo ilości wody, jest otwarty kocioł, panew lub inny zbiornik, w którym podczas parowania zachodzi wrzenie cieczy.

Ogrzewanie tych aparatów odbywa się gazami spalinywymi, cieczą lub parą. W pierwszym przypadku są one obmurowane, w innych zaś posiadają płaszcze ogrzewające lub węzownice. Para wydzielająca się ze swobodnej powierzchni wrzącego roztworu odchodzi bezpośrednio do otoczenia i jest usuwana na zewnątrz budynków ciągiem naturalnym lub wentylatorami.

Kotły z płaszczem ogrzewającym różnych typów pracują w sposób periodyczny. Po wprowadzeniu do kotła określonej ilości rozcieńczonego roztworu prowadzi się odparowywanie dopóty, dopóki nie zostanie osiągnięte pożądane stężenie. Zagęszczony roztwór jest następnie usuwany i po oczyszczeniu aparatu operację można powtórzyć.

W sposób periodyczny pracują również kotły i panwie ogrzewane gazami spalinowymi.

Ciepło doprowadzane do tego rodzaju aparatów wyparnych zużywa się na:

1. ogrzanie roztworu rozcieńczonego od temperatury początkowej t_1 do temperatury wrzenia t_2 ;
2. odparowanie roztworu;
3. pokrycie strat ciepłych.

Oznaczając przez:

S — ilość roztworu surowego w kg/h,

t_s — temperaturę roztworu surowego w $^{\circ}\text{C}$,

t_z — temperaturę roztworu zagęszczonego w $^{\circ}\text{C}$,

b_s — stężenie surowki w % wagowych,

b_z — stężenie roztworu zagęszczonego w %,

D — ilość kg pary ogrzewającej na godzinę,

I — entalpię pary ogrzewającej w kcal/kg,

T — temperaturę pary ogrzewającej,

t_k — temperaturę skroplin w $^{\circ}\text{C}$,

i — entalpię oparów wydzielających się z roztworu,

c — ciepło właściwe roztworu w kcal/kg $^{\circ}\text{C}$

— obliczymy ilość wody W w kg/h odparowywanej w wyparce z równania:

$$\frac{S b_s}{100} = \frac{(S - W) b_z}{100};$$

albowiem ilość ciała rozpuszczonego w roztworze rozcieńczonym $\frac{S b_s}{100}$ równa się ilości jego w roztworze stężonym $\frac{(S - W) b_z}{100}$.

Rozwiązując to równanie względem W otrzymamy, że

$$W = S \left(1 - \frac{b_s}{b_z} \right). \quad (3)$$

Bilans cieplny wyparki można napisać w postaci następującego równania:

$$DI + Sct_s = Wi + (Sc - W)t_z + Dt_k + Q_s,$$

gdzie Q_s jest to ciepło stracone nieużytecznie. Z równania tego możemy obliczyć ilość potrzebnej pary D w kg/h:

$$D = \frac{W(i - t_z) + Sc(t_z - t_s) + Q_s}{I - t_k} \quad (4)$$

Przykład. Obliczyć ile kg pary o ciśnieniu 4 at należy doprowadzić do aparatu wyparnego, ażeby stężyć 400 kg roztworu 4% do 20%, jeżeli straty ciepłne wynoszą 10%,

a temperatura roztworu rozcieńczonego wynosi $t_s = 25^{\circ}$, roztworu zagęszczonego $t_z = 105^{\circ}$, temperatura zaś skroplin $t_k = 140^{\circ}$, ciepło właściwe roztworu $c = 0,9$.

Rozwiązanie. Ilość wody, którą należy odparować

$$W = S \left(1 - \frac{b_s}{b_z} \right) = 400 \left(1 - \frac{4}{20} \right) = 320 \text{ kg.}$$

Z tablicy 4 odczytujemy:

1. entalpię pary ogrzewającej $I = 654,4$ kcal/kg,
2. „ oparów $i = 638,9$ kcal/kg.

Podstawiając dane liczbowe do wzoru (4) otrzymamy, że należy dostarczyć:

$$D = \frac{320(638,9 - 105) + 400 \cdot 0,9(105 - 25)}{654,4 - 140} \cdot 1,10 = \\ = 357,4 \text{ kg pary.}$$

4. Temperatura wrzenia roztworów

Temperatura wrzenia roztworu ciała stałego w cieczy pod dowolnym ciśnieniem jest, jak wiadomo, wyższa od temperatury wrzenia chemicznie czystego rozpuszczalnika; prężność bowiem oparów wydzielających się z roztworu ciała stałego jest mniejsza niż prężność pary chemicznie czystej cieczy w tej samej temperaturze. Toteż, ażeby doprowadzić roztwór do wrzenia, należy go ogrzać do temperatury wyższej niż temperatura wrzenia czystego rozpuszczalnika, przy czym tym wyższej, im stężenie roztworu jest większe.

Temperatury wrzenia roztworów wodnych różnego rodzaju substancyj pod ciśnieniem 1 atmosfery ustalone dla rozmaitych stężeń drogą doświadczenia podane są w tablicy 1 oraz przedstawione są graficznie na rysunku 4.

Jeżeli wyparka pracuje pod innym niż atmosferyczne ciśnieniem (na przykład pod próżnią lub pod ciśnieniem zwiększonym), można dla tego ciśnienia w przypadku roztworów o małym stężeniu ustalić temperaturę wrzenia, opierając się na prawach Raoult'a lub Babo.

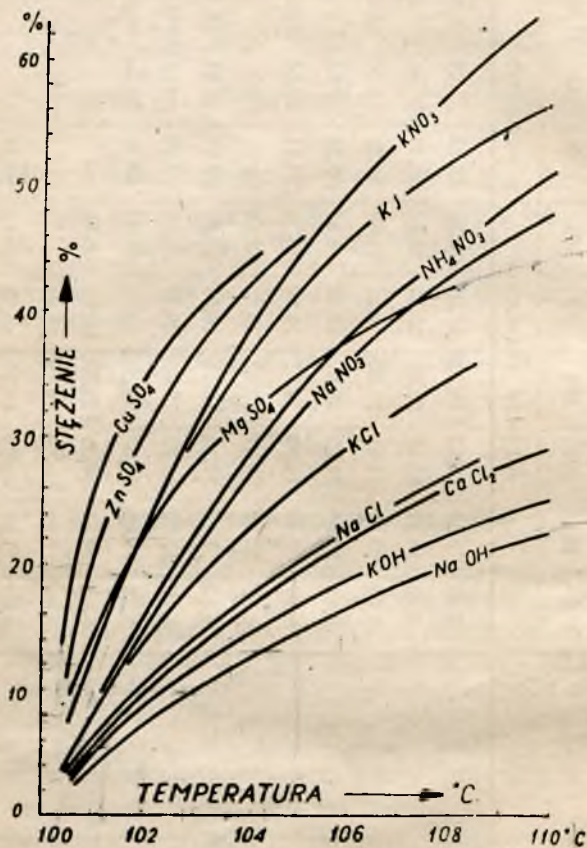
Prawo Raoult'a dla wodnych roztworów można wyrazić w sposób następujący: Różnica pomiędzy tempera-

Tablica I

Temperatury wrzenia niektórych roztworów pod ciśnieniem atmosferycznym

	T e m p e r a t u r a °C									
	101	102	103	104	105	107	110	115	120	125
	Stężenie roztworu w % wagowych									
Wodorotlenek potasu KOH	4,49	8,51	11,97	14,82	17,01	20,88	25,65	31,57	36,51	40,23
Chlorek potasu KCl	8,42	14,31	16,96	23,02	26,57	32,62	36,47	(przy 108,5)		
Jodek potasu KJ	13,04	23,97	31,03	37,50	42,52	48,87	57,26	64,90	68,75	
Azotan potasu KNO ₃	19,19	23,66	32,23	39,2	45,10	54,65	65,34	79,53		
Chlorek magnezu MgCl ₂	4,67	8,42	11,66	14,31	16,59	20,32	24,41	20,84	23,07	36,02
Siarczan magnezu MgSO ₄	14,31	22,78	28,31	32,23	35,32	42,86	(przy 108)			
Wodorotlenek sodu NaOH	4,12	7,40	10,15	12,51	14,51	18,32	23,08	26,21	33,77	37,58
Chlorek sodu NaCl	6,19	11,03	14,67	17,69	20,32	25,09	28,92	(przy 108)		
Azotan sodu NaNO ₃	8,26	15,61	21,87	27,53	32,43	40,47	49,87	60,94	65,94	
Siarczan sodu Na ₂ SO ₄	15,26	24,81	30,73	31,83	(przy 103,2)					
Węgiel sodu Na ₂ CO ₃	9,42	17,22	23,73	29,18	33,86					
Siarczan miedzi CuSO ₄	26,95	35,98	40,83	44,47	45,12	(przy 104,2)				
Siarczan cynku ZnSO ₄	20,00	31,22	37,09	42,82	46,15					
Azotan amonu NH ₄ NO ₃	9,09	16,66	23,08	29,08	34,21	42,53	51,92	63,24	71,26	77,11

tura wrzenia roztworu jakiejś substancji pod dowolnym ciśnieniem a temperaturą wrzenia pod tym ciśnieniem czystej wody



Rys. 4. Zależność temperatury wrzenia od stężenia roztworów wodnych. równa się różnicy temperatur wrzenia tego roztworu i czystej wody pod ciśnieniem atmosferycznym, a więc:

$$t - t_{H_2O} = t' - t'_{H_2O}, \quad (5)$$

gdzie t i t_{H_2O} są to temperatury wrzenia wodnego roztworu i wody pod dowolnym ciśnieniem, a t' i t'_{H_2O} — temperatury wrzenia tego roztworu i wody pod ciśnieniem atmosferycznym.

Jeżeli znana jest temperatura wrzenia jakiegoś roztworu, na przykład 10,15% roztworu wodorotlenku sodowego (NaOH), w wodzie pod ciśnieniem 760 mm Hg, to temperatura wrzenia tego roztworu pod innym ciśnieniem, na przykład pod ciśnieniem 147 mm Hg, wyniesie:

$$t = t' - t'_{H_2O} + t_{H_2O} = 103^{\circ} - 100^{\circ} + 59,7^{\circ} = 62,7^{\circ};$$

gdź

$t' = 103^{\circ}$ (z tablicy 1), a $t_{H_2O} = 59,7^{\circ}$ (z tablicy dla pary wodnej nasyconej).

Prawo Babo brzmi: Stosunek prężności oparów wydzielających się w pewnej temperaturze z rozcieńczonego roztworu wodnego jakiejś substancji do prężności w tej temperaturze pary czystej wody jest wielkością dla danego stężenia stałą, niezależną od temperatury. Czyli:

$$\frac{P}{P_{H_2O}} = \frac{P'}{P'_{H_2O}} = \text{const.} \quad (6)$$

Jeżeli roztwór wrze pod ciśnieniem p , to prężność pary wodnej wyniesie:

$$P_{H_2O} = P \frac{P'_{H_2O}}{P'}$$

Znając prężność pary temperaturę wrzenia t odczytamy z tablic dla pary wodnej nasyconej.

Na przykład, jeżeli znana jest temperatura wrzenia 12-procentowego roztworu wodorotlenku potasowego (KOH) w wodzie pod ciśnieniem $p' = 760$ mm Hg, która równa się $t' = 103^{\circ}$, to temperaturę wrzenia t tego roztworu pod ciśnieniem $p = 205$ mm Hg obliczymy przeprowadzając następujące rozumowania. Prężność pary wodnej w temperaturze $t' = 103^{\circ}$ wynosi $p'_{H_2O} = 845,1$ mm Hg, a w poszukiwanej temperaturze t :

$$p_{H_2O} = \frac{p'_{H_2O}}{p'} p = \frac{845,1}{760} 205 = 228 \text{ mm Hg}$$

lub

$$p_{H_2O} = \frac{228 \cdot 13,6}{10000} = 0,31 \text{ kg/cm}^2.$$

Znając prężność pary wodnej odczytamy jej temperaturę wrzenia z tablicy pary wodnej nasyconej. Wynosi ona $t = 69,4^{\circ}$. Zgodnie z prawem Babo w tej temperaturze powinien wrzeć 12-procentowy roztwór KOH pod ciśnieniem $p = 205 \text{ mm Hg}$.

Prawa Babo i Raoult'a są słuszne tylko dla roztworów rozcieńczonych. Stosowanie tych praw do roztworów stężonych prowadzi do dość dużych błędów. Znacznie dokładniej można obliczać temperatury wrzenia roztworów stężonych na podstawie prawa E. Dühringa, które brzmi dla roztworów w sposób następujący: Stosunek różnicy pomiędzy temperaturami wrzenia jakiegoś roztworu pod różnymi ciśnieniami do różnicy pomiędzy temperaturami wrzenia pod tymi ciśnieniami czystej wody jest wielkością stałą. A więc:

$$\frac{t' - t}{t'_{\text{H}_2\text{O}} - t_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{t' - t''}{t'_{\text{H}_2\text{O}} - t''_{\text{H}_2\text{O}}} = K = \text{const}, \quad (7)$$

$$\text{skąd} \quad t = t' - K (t'_{\text{H}_2\text{O}} - t_{\text{H}_2\text{O}}), \quad (7a)$$

gdzie t' i $t'_{\text{H}_2\text{O}}$ są to temperatury wrzenia roztworu i wody pod ciśnieniem atmosferycznym, t'' i $t''_{\text{H}_2\text{O}}$ temperatury wrzenia roztworu i wody pod ciśnieniem p'' , a t i $t_{\text{H}_2\text{O}}$ temperatury wrzenia roztworu i wody pod ciśnieniem dowolnym.

Jeżeli znane są temperatury wrzenia t' i t'' jakiegoś roztworu pod ciśnieniem $p' = 1 \text{ at}$ oraz p'' , to potrafimy obliczyć stałą K oraz temperaturę wrzenia roztworu pod dowolnym ciśnieniem.

Przykład. Temperatura wrzenia 20-procentowego roztworu wodnego chlorku wapnia (CaCl_2) pod ciśnieniem $p'' = 525 \text{ mm Hg}$ wynosi $t'' = 94^{\circ}$; obliczyć temperaturę wrzenia t tego roztworu pod ciśnieniem $p = 1310 \text{ mm Hg}$.

Rozwiązanie. Stałą K obliczamy ze wzoru (7)

$$K = \frac{t' - t''}{t'_{\text{H}_2\text{O}} - t''_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{105 - 94}{100 - 90} = 1,1,$$

bowiem $t' = 105^{\circ}$ (z tablicy 1)

$t''_{\text{H}_2\text{O}} = 90^{\circ}$ (z tablic pary wodnej nasyconej dla ciśnienia $p'' = 525 \text{ mm Hg}$).

Znając stałą K obliczymy temperaturę wrzenia roztworu pod ciśnieniem $p = 1310 \text{ mm Hg}$ z równania (7a);

$$t = t' - K(t'_{H_2O} - t_{H_2O}) = 105 - 1,1(100 - 116) = 122,6^\circ$$

albowiem

$$t' = 105^\circ \text{ (z tablicy 1),}$$

$$t_{H_2O} = 116^\circ \text{ (z tablic pary wodnej nasyconej dla } p =$$

$$= 1310 \text{ mm Hg} = \frac{1310 \cdot 13,6}{10000} = 1,78 \text{ kg/cm}^2.$$

5. Wyparka pod próżnią

Temperatura wrzenia każdej cieczy zarówno czystej jak i roztworu zmniejsza się ze spadkiem ciśnienia. Gdy obniżymy na przykład ciśnienie z 760 mm Hg do 50 lub do 10 mm Hg, zmniejszymy temperaturę wrzenia wody ze 100° do $38,2^\circ$ bądź do $11,2^\circ$, benzenu zaś z $80,4^\circ$ do $9,3^\circ$ lub do $-15,8^\circ$. Temperatury wrzenia kilku innych substancji przy powyższych ciśnieniach podaje tablica następująca.

Zależność temperatury wrzenia od ciśnienia

Nazwa	ciśnienie w mm Hg		
	760	50	10
Benzen	80,4°	9,3°	-15,8°
Woda	100°	38,2°	11,2°
Kwas karbolowy	178°	104°	70°
Anilina	183,7°	87,1°	38,7°
Gliceryna	290°	215°	177,5

Z powyższego wynika, że obniżając ciśnienie w aparacie wyparnym poniżej ciśnienia atmosferycznego można odparować roztwory w temperaturach niższych od ich temperatury wrzenia pod ciśnieniem atmosferycznym. Jest to bardzo ważne w wielu gałęziach przemysłu chemicznego, gdyż daje możliwość zagęszczania takich roztworów, które pod ciśnieniem atmosferycznym posiadają temperaturę wrzenia wyższą od tempera-

tury, przy której substancje rozpuszczone ulegają rozkładowi w stopniu szkodliwym dla procesu technologicznego.

Wyparowywanie pod próżnią pozwala poza tym na odparowywanie i takich roztworów, których ogrzewanie pod ciśnieniem atmosferycznym połączone jest z powstawaniem szeregu procesów ubocznych wpływających ujemnie na własności roztworu.

Przy zagęszczaniu na przykład mleka, w miarę odparowywania wody i wzrostu stężenia substancyj tłuszczowych, wzrasta możliwość przypalenia się jego do powierzchni ogrzewalnej. Możliwość ta znacznie się zmniejsza przy prowadzeniu wyparki w niskich temperaturach, a więc pod obniżonym ciśnieniem.

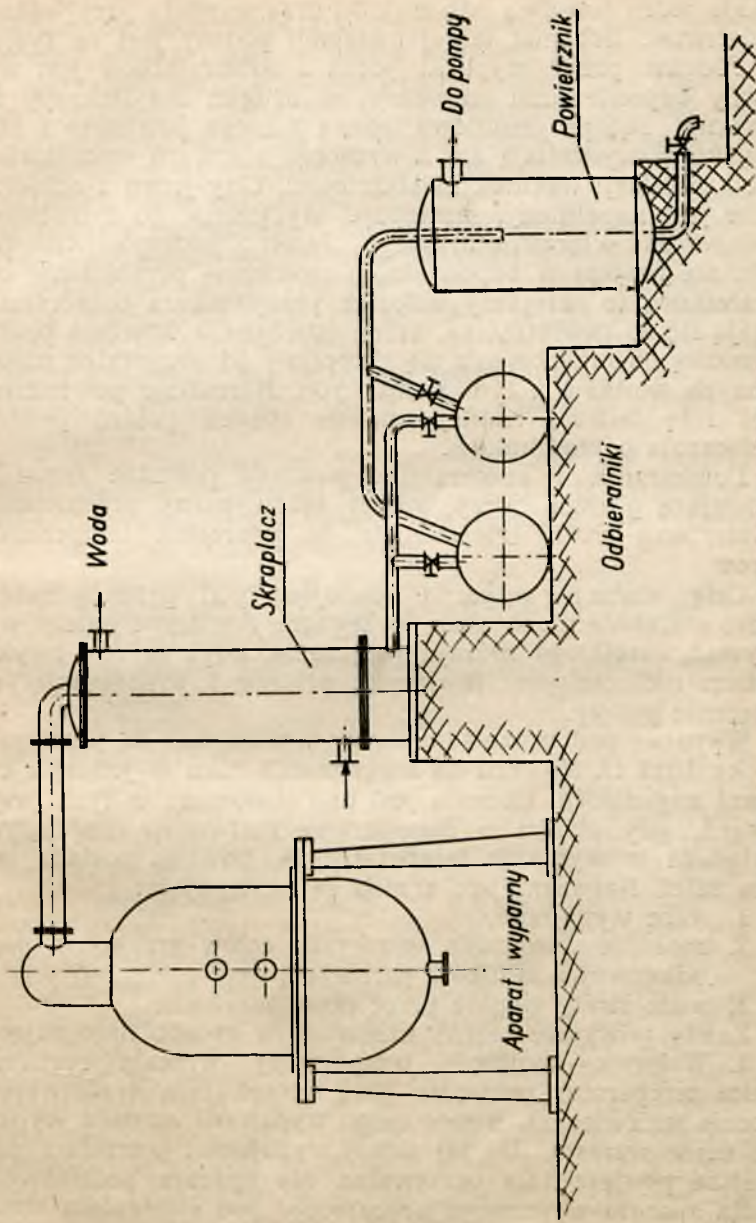
Wyparowywanie pod ciśnieniem niższym od atmosferycznego, czyli pod próżnią, prowadzone jest w hermetycznie zamkniętych aparatach wyparnych połączonych ze skraplaczem, w którym opary ulegają skropleniu. Próżnię w skraplaczu utrzymuje pompa próżniowa, usuwająca z niego powietrze i gazy nie skraplające się.

W skład każdej instalacji wyparnej, pracującej pod próżnią, wchodzi aparat wyparny, skraplacz i pompa próżniowa.

Aparat wyparny ogrzewany jest w większości przypadków parą wodną. Posiada on w tym celu węzownicę, płaszcz ogrzewający lub ogrzewacz rurkowy. Opary z aparatu wyparnego odprowadzane są do skraplacza. Jeżeli powierzchnia ogrzewalna aparatu wyparnego jest duża, a swobodna powierzchnia cieczy mała, powstaje niebezpieczeństwo porywania przez opary kropelek cieczy do skraplacza. W tym przypadku pomiędzy aparatem wyparnym i skraplaczem umieszczany jest łapacz kropli.

W instalacji przedstawionej na rysunku 5 specjalnego łapacza kropli nie ma. Jego rolę spełnia hełm znajdujący się na pokrywie aparatu wyparnego. Zatrzymuje on częściowo również pianę, która powstaje obficie przy odparowywaniu niektórych lepkich cieczy w niskich temperaturach, a więc pod próżnią.

W wyparce próżniowej stosowane są skraplacze natryskowe i przeponowe. Pierwsze stosuje się wtedy, gdy skropliny nie posiadają żadnej wartości i są nieużytecznym odpadkiem procesu technologicznego. Skraplacze przeponowe stosuje się wtedy, gdy skropliny są produktem operacji technologicznej lub gdy, będąc odpadkiem, posiadają jednak pewną wartość. Instalacja wyparna ze skraplaczem przeponowym



Rys. 5. Schemat instalacji wyparki próżniowej.

posiada jeden lub dwa odbieralniki oraz w wielu przypadkach powietrznik. Schemat takiej instalacji podany jest na rys. 5.

Podczas pracy wyparki jeden z odbieralników jest wyłączony odpowiednimi zaworami, w drugim zaś zbierają się skropliny. Pompa próżniowa usuwa z niego powietrze i inne gazy, które wydzielają się z wrzącego roztworu oraz dostają się do instalacji wskutek nieszczelności. Gdy jeden z odbieralników jest napełniony, następuje wyłączenie go z instalacji i jednoczesne włączenie drugiego. Jeżeli z jakiegokolwiek powodu nie nastąpi w odpowiednim momencie przełączenie odbieralników, to skropliny wskutek przepełnienia odbieralnika dostają się do powietrznika, który zabezpiecza wówczas pompę próżniową od przedostania się skroplin i od wszystkich niepożądanych skutków z tym związanych. Normalnie powietrznik pełni rolę bufora, zmniejszającego spadek próżni podczas przełączania odbieralników.

Powietrznik i odbieralniki powinny posiadać armaturę wskazującą poziom cieczy, aparat zaś wyparny próżniomierz do mierzenia próżni i termometr do mierzenia temperatury oparów.

Całą instalację wyparną pracującą pod próżnią należy bardzo starannie montować. Szczególnie dokładnie należy wykonywać wszelkiego rodzaju połączenia, gdyż są one zwykle źródłem nieszczelności psujących próżnię i powiększających obciążenie pompy.

Wyparkę pod próżnią pierwszy wprowadził do przemysłu w roku 1812 G. Howard do zagęszczania soku w jednej z cukrowni angielskich. Obecnie jest ona stosowana w tych przypadkach, gdy chodzi o zagęszczanie roztworów ulegających rozkładowi w wysokich temperaturach, bowiem posiada ona sporo zalet. Najważniejsze z nich są następujące:

1. duża wydajność,
2. możliwość stosowania w niej do celów grzejnych pary odlotowej z silników parowych,
3. małe straty cieplne przez promieniowanie.

Zalety powyższe można uzasadnić w sposób następujący:

1. Wskutek obniżenia temperatury wrzenia roztworu różnica temperatur pomiędzy parą ogrzewającą a roztworem znacznie się zwiększa, wobec czego wydajność aparatu wyparnego silnie wzrasta. Do tej samej wydajności potrzebna jest mniejsza powierzchnia ogrzewalna dla aparatu próżniowego niż dla aparatu wyparnego pracującego pod ciśnieniem atmosferycznym.

2. Dzięki obniżeniu temperatury wrzenia roztworu można stosować do ogrzewania aparatów wyparnych parę o niskim ciśnieniu, a więc i parę odlotową z maszyn i turbin parowych. Na przykład przy odparowywaniu aniliny pod ciśnieniem atmosferycznym potrzeba by ją ogrzewać źródłem ciepła o temperaturze około 200 lub więcej stopni, gdyż temperatura wrzenia jej pod ciśnieniem atmosferycznym wynosi 183,7°. Należałoby więc zastosować ogrzewanie olejowe, albowiem zastosowanie ogrzewania parowego jest utrudnione ze względu na wysokie ciśnienie pary w temperaturze około 200°, ogrzewanie zaś ogniowe aniliny nie jest wskazane. Odparowując anilinę pod próżnią około 710 mm Hg, to jest pod ciśnieniem absolutnym 50 mm Hg, obniżymy jej temperaturę wrzenia do 87,1°, a więc będziemy mogli ogrzewać aparat wyparny parą odlotową o temperaturze około 110°, czyli o prężności mniej więcej 1,5 at.

3. Przy ogrzewaniu próżniowych aparatów wyparnych parą o stosunkowo niskiej temperaturze straty ciepłne w wyparce prowadzonej pod próżnią są mniejsze niż w wyparce pod ciśnieniem atmosferycznym.

Do wad wyparki pod próżnią należy zaliczyć:

1. większe koszty inwestycyjne niż w wyparce pod ciśnieniem atmosferycznym;
2. zwiększone koszty eksploatacyjne napędu pompy próżniowej.

Powiększając próżnię w aparacie wyparnym obniżamy temperaturę wrzenia roztworu, przez co zwiększa się, jak już było zaznaczone, różnica temperatur pomiędzy parą ogrzewającą a roztworem; wpływa to dodatnio na wydajność wyparki. Z drugiej strony obniżenie temperatury wrzenia roztworu powiększa jego lepkość, przez co zmniejsza się współczynnik przewodnictwa ciepła, co znowu wpływa ujemnie na wydajność wyparki. Z tego wynika, że wydajność wyparki jest największa przy pewnej optymalnej próżni. Nadmierne obniżenie próżni zmniejsza wydajność. Trzeba jednak pamiętać, że często zastosowanie optymalnej — z punktu widzenia wydajności — próżni koliduje ze względami ekonomicznymi. Ze wzrostem próżni zwiększa się zużycie energii na napęd pompy próżniowej, bo ilość powietrza, zasysanego przez nie szczelności, wzrasta. Powiększa się również zużycie wody chłodzącej w skraplaczu, a więc rosną i koszty z tym związane. Na ogół biorąc w aparatach wyparnych rzadko stosowana jest próżnia powyżej 660 mm Hg.

6. Klasyfikacja aparatów wyparnych

Przy projektowaniu aparatów wyparnych należy, jak było zaznaczone poprzednio, uwzględnić nie tylko własności zagęszczanych roztworów, lecz również szereg innych okoliczności i warunków, w jakich zachodzi odparowywanie, na przykład: sposoby ogrzewania (parowe, ogniowe lub inne), odporność mechaniczną i chemiczną materiałów, łatwość obsługi, koszt budowy itp. Z tego powodu istnieje dużo różnych typów aparatów wyparnych. Na ogół posiadają one:

- a. przestrzeń wrzącego roztworu,
- b. przestrzeń pary ogrzewającej,
- c. powierzchnię ogrzewalną,
- d. przewody do doprowadzania i odprowadzania odparowywanej cieczy,
- e. przewód do doprowadzania pary ogrzewającej,
- f. przewód do odprowadzania oparów,
- g. przewody do usuwania skroplin i gazów,
- h. przyrządy do kontroli i regulacji samego procesu wyparki.

Kształt aparatu, sposób rozmieszczenia powyższych składowych jego części, rodzaj powierzchni ogrzewalnej itd., zależą z jednej strony od własności odparowywanego roztworu, z drugiej zaś od pomysłowości konstruktora i od zwyczajów panujących w danej gałęzi przemysłu.

Aparaty wyparne można podzielić na następujące grupy:

1. aparaty z ogrzewaniem ogniowym,
2. „ z płaszczem ogrzewającym,
3. „ ogrzewane wężownicami,
4. „ z ogrzewaczami rurkowymi,

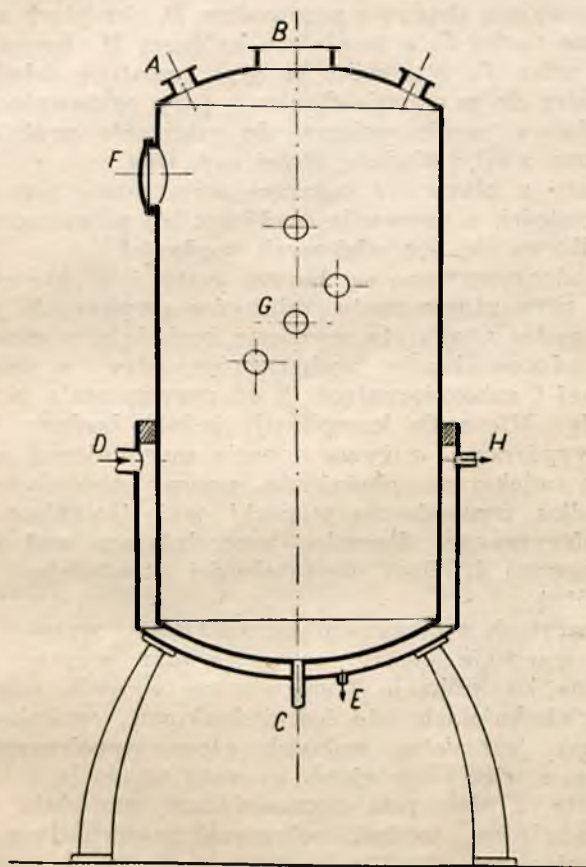
te ostatnie można znowu podzielić na:

- a. aparaty z rurkami poziomymi,
- b. „ „ pionowymi,
- c. „ „ pochyłymi.

7. Aparaty wyparne z płaszczem ogrzewającym i z wężownicami

Aparaty wyparne z ogrzewaniem ogniowym stosowane są bardzo rzadko. Są to przeważnie panwie lub otwarte kotły z paleniskiem dolnym. Kocioł parowy można również zaliczyć do tego typu aparatów.

Aparaty wyparne z płaszczem ogrzewającym są stosowane w tych przypadkach, gdy chodzi o odparowanie stosunkowo niewielkich ilości cieczy. Używane więc są w przemyśle farmaceutycznym, spożywczym i innych.



Rys. 6. Aparat wyparny z płaszczem ogrzewającym.

Najprostszym tego rodzaju aparatem jest otwarty kocioł o podwójnych ścianach, przedstawiony na rysunku 1. W przypadku gdy wyparka prowadzona jest pod próżnią lub gdy opary przedstawiają pewną wartość, stosowany jest kocioł zamknięty. Przykładem tego rodzaju aparatów wyparnych jest pionowy aparat przedstawiony na rysunku 6. Pracuje on,

jak prawie wszystkie aparaty z płaszczem ogrzewającym, w sposób periodyczny. Roztwór rozcieńczony dopływa do niego przez króciec *A*, opary odchodzą przez przewód o dużej średnicy *B*, roztwór zaś zagęszczony odprowadzany jest po skończonej operacji przewodem *C*, znajdującym się w dnie. Para ogrzewająca dopływa przewodem *D*, skropliny zaś są odprowadzane rurką *E*, a powietrze króćcem *H*. Aparat posiada poza tym włącz *F*, wzierniki *G* oraz armaturę składającą się z manometru do mierzenia ciśnienia pary ogrzewającej, klapy bezpieczeństwa, próżniomierza do mierzenia próżni, termometrów oraz z odpowiedniej ilości zaworów.

Aparaty z płaszczem ogrzewającym łatwo jest utrzymywać w czystości, a usuwanie osadów z ich powierzchni ogrzewalnej odbywa się bez większych trudności.

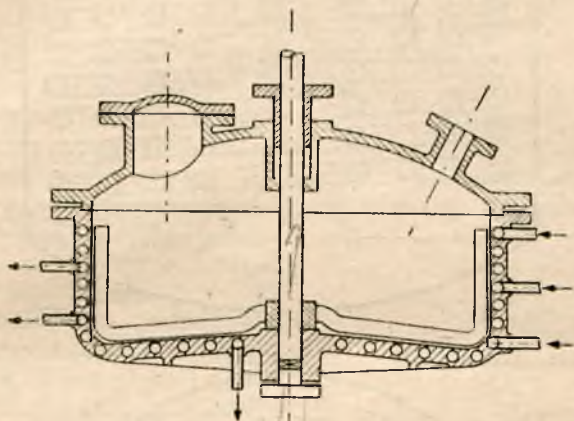
Gdy odparowywane są bardzo gęste i lepkie cieczce, na przykład przy zagęszczaniu miąższów owocowych w fabrykach marmolady, aparaty wyparne posiadają mieszadła ułatwiające odprowadzanie pęcherzyków pary z powierzchni ogrzewalnej i zabezpieczające ją od przystawania przypalonej marmolady. Mieszadło komplikuje jednak budowę i obsługę aparatu wyparnego, zużywa energię mechaniczną oraz jest przyczyną większego obciążenia pompy próżniowej, gdyż w przypadku prowadzenia wyparki pod ciśnieniem niższym od atmosferycznego, dławnice uszczelniające wał mieszadła są dodatkowym źródłem nieszczelności utrudniających utrzymanie próżni.

W aparatach z płaszczem ogrzewającym wrzenie zachodzi w grubej warstwie cieczy, co wprowadza w pracę wyparki niepożądane komplikacje. Temperatura wrzenia roztworu na różnych głębokościach nie jest jednakowa, cyrkulacja naturalna cieczy jest słaba, wskutek czego współczynnik przewodnictwa, a więc i wydajność aparatu są niskie.

Aparaty z płaszczem ogrzewającym posiadają dużą pojemność względną, to jest pojemność przypadająca na 1 m² powierzchni ogrzewalnej, a że praca w sposób periodyczny, czas przebywania w nich roztworu jest długi, co z punktu widzenia technologicznego dla wielu substancji nie jest pożądane, gdyż prowadzi do ich rozkładu.

W przypadkach, gdy roztwór zagęszczany posiada wysoką temperaturę wrzenia, a więc musi być ogrzewany źródłem ciepła o temperaturze jeszcze wyższej, stosowane są jako aparaty wyparne kotły *Frederkinga*. Posiadają one małą głębokość, a dużą średnicę ze względu na wielkość swobodnej

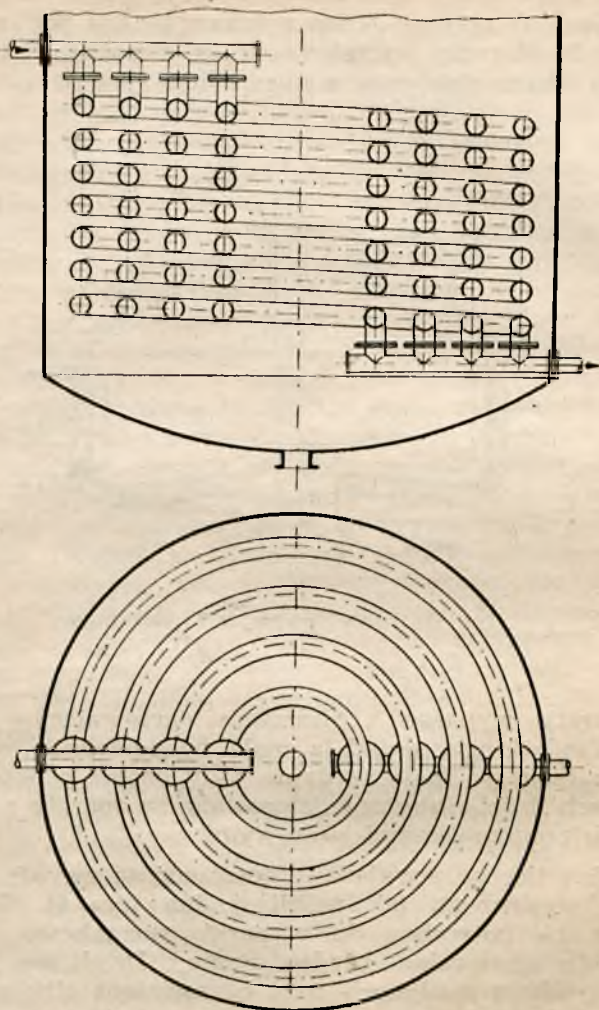
powierzchni cieczy i na dobrą cyrkulację. Ogrzewane są wodą przegrzaną lub olejem. Jeden z takich kotłów podany jest na rysunku 7. W razie potrzeby aparaty wyparne systemu Frederkinga można zbudować z mieszadłem (jak na rys. 7).



Rys. 7. Aparat wyparny Frederkinga.

Aparaty wyparne z płaszczem ogrzewającym oraz systemu Frederkinga posiadają małą powierzchnię ogrzewalną, wskutek czego są mało wydajne. Gdy chodzi o odparowywanie dużych ilości roztworów, stosowane są aparaty z węzownikami lub z ogrzewaczami rurkowymi.

Węzownice ogrzewające umieszczane są zwykle wewnątrz aparatu wyparnego, jak najbliżej dna (rys. 8). Są one, ze względu na potrzebną do wyparki stosunkowo dużą powierzchnię ogrzewalną, bardzo długie. Dzieli się je zwykle na kilka sekcji zasilanych parą ogrzewającą albo niezależnie jedna od drugiej, w przypadku gdy sekcje są umieszczone jedna nad drugą (rys. 29), bądź też wspólnym przewodem parowym, jak na rysunku 8, gdy sekcje znajdują się jedna wewnątrz drugiej. Pierwszy sposób stosowany jest często w przypadku, gdy wyparka pracuje periodycznie. Wtedy w miarę odparowywania roztworu poziom cieczy się obniża, wobec czego górne sekcje węzownicy (rys. 29) można stopniowo wyłączać.



Rys. 8. Dolna część aparatu wyparnego, ogrzewanego wężownicą!

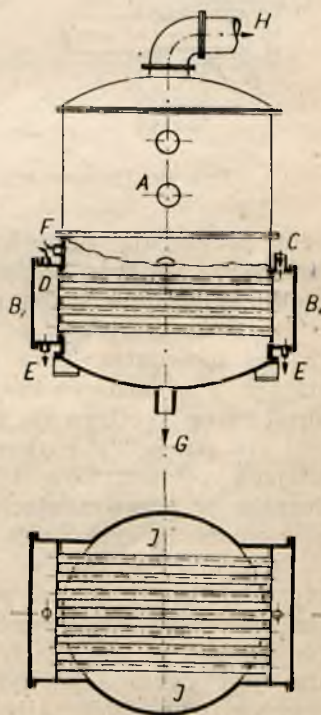
Gdy odparowywane są roztwory kwaśne, atakujące chemicznie żelazo, wężownice należy wykonywać z ołowiu, ściany zaś aparatu zabezpieczyć w odpowiedni sposób od działania chemicznego cieczy.

8. Aparaty wyparne z rurkami poziomymi

Znacznie większą powierzchnię ogrzewalną w porównaniu z aparatami z płaszczem ogrzewającym posiadają aparaty wyparne z ogrzewaczami rurkowymi. Rurki w aparatach wyparnych bywają poziome, pionowe i pochyłe. Aparaty wyparne z rurkami poziomymi są typem najstarszym, gdyż wprowadzone zostały do przemysłu przeszło sto lat temu w roku 1843 przez inżyniera *N. Rillieux*.

We wszystkich aparatach z rurkami poziomymi warstwa cieczy wrzącej jest nieduża. Posiadają one poza tym bardzo wielką przestrzeń parową, co pozwala na zagęszczanie roztworów wytwarzających dużo piany podczas wrzenia.

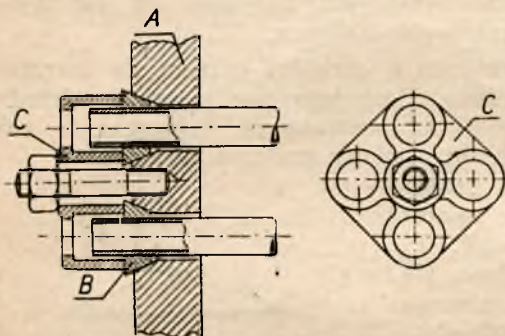
Na rysunku 9 jest przedstawiony schematycznie aparat wyparny konstrukcji „Y. P. Dewine Company”. Składa się on z cylindrycznego pionowego zbiornika A, który posiada dwa denka wyoblone. W dolnej części zbiornika naprzeciw siebie znajdują się komory parowe B_1 i B_2 posiadające od strony zewnętrznej pokrywy, a od wewnętrznej denka sitowe. W denka te wstawione są rurki poziome. Para grzejna dochodzi do komory parowej B_1 przewodem C. Komora B_2 połączona jest rurką D z pompą próżniową, która usuwa powietrze i gazy, jeżeli ogrzewanie odbywa się oparami o ciśnieniu mniejszym od atmosferycznego, w przeciwnym przypadku powietrze usuwa się przez kurek odpowietrzający. Skropliny odprowadzane są rurkami E. Roztwór rozcieńczony dopływa przewodem F, a zagęszczony usuwamy przez króciec G w dnie aparatu, opary zaś odchodzą przewo-



Rys. 9. Aparat wyparny
Y. P. Dewine Co.

dem *H*. Aparat posiada kilka wzierników i odpowiednią armaturę.

Rurki poziome aparatów wyparnych należy umocowywać w denkach sitowych w taki sposób, ażeby można je było łatwo wyjmować w celu wymiany lub czyszczenia. Najpraktyczniejszy i najczęściej stosowany sposób umocowania rurek przedstawiony jest na rysunku 10; w grubym denku sitowym *A*



Rys. 10. Umocowanie rurek.

wywiercone są otwory o średnicy większej niż średnica zewnętrzna rurek. Otwory te rozwiercone są od strony zewnętrznej na stożek. Rurki wystają z denka sitowego na 20 lub 25 mm. Stożkowe pierścienie gumowe *B*, naciągnięte na wystający koniec rurek i wciskane przez specjalną rozetkę *C*, mocno przylegają do zewnętrznej ich ścianki i do stożkowej powierzchni otworu zapewniając w ten sposób szczelność. Rozetka dociskana śrubą uszczelnia jednocześnie 4 rurki.

Roztwór znajduje się na zewnątrz rurek, para ogrzewająca zaś wewnątrz. Przy ogrzewaniu pęcherzyki oparów powstające z odparowywanego roztworu na powierzchni ogrzewanej rosną i odrywają się od niej. Mieszanina cieczy i pary unoszą się pomiędzy rurkami wypierana przez ciecz, nie posiadającą pęcherzyków i opadającą na dół wzdłuż ścianek zbiornika w przestrzeniach *J* (rys. 9). W ten sposób odbywa się w aparacie cyrkulacja odparowywanego roztworu.

Jest ona jednak w tym przypadku, jak w ogóle we wszystkich aparatach wyparnych z poziomymi rurkami, zbyt słaba. Wskutek tego współczynnik przewodnictwa ciepła jest mniejszy niż w aparatach z rurkami pionowymi. Szczególnie słaba jest cyrkulacja, gdy rurki rozmieszczone są w szachownicę (rys. 10a), albowiem takie ułożenie rurek stawia większy opór przepływającej między nimi cieczy niż ułożenie rurek rzędami równoległymi (rys. 10b).

W aparacie wyparnym, przedstawionym na rysunku 9, wysokość komór parowych B_1 i B_2 jest mała, mniejsza od ich

szerokości, wskutek czego warstwa cieczy wrzącej nie jest duża, a wpływ ciśnienia hydrostatycznego na temperaturę wrzenia mały.

Oczyszczanie rurek z osadów jest w omawianym aparacie dość kłopotliwe, gdyż trzeba je w tym celu wyjmować, na co zużywa się sporo czasu. Z tego powodu aparat wyparny systemu „Y. P. Dewine Company“, jak i wszystkie inne aparaty wyparne z rurkami poziomymi, nadaje się do odparowywania tylko takich roztworów, które



Rys. 10a



Rys. 10b

Rozmieszczenie rurek.

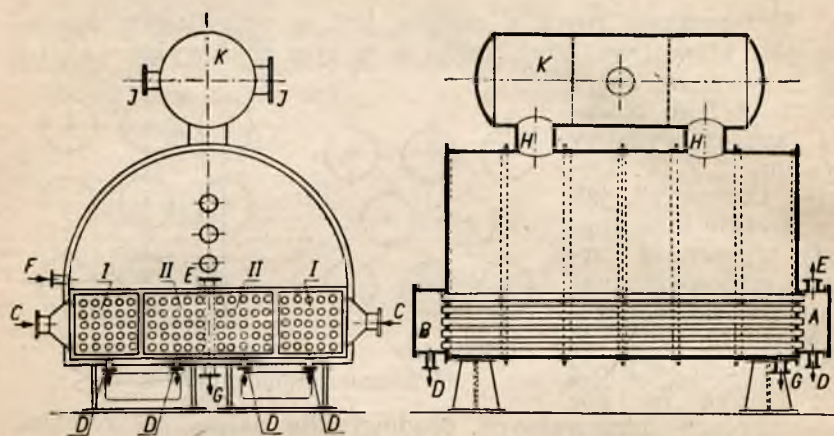
nie tworzą na powierzchniach ogrzewalnych osadów. Nie należy go również używać, wskutek słabej w nim cyrkulacji, do zagęszczania cieczy posiadających dużą lepkość.

Aparaty wyparne systemu „Y. P. Dewine Company“ wykonywane są ze stali lub żeliwa, rurki zaś ze stali lub miedzi. Średnica rurek wynosi od 20 do 30 mm.

Szerokość komory parowej stanowi połowę średnicy aparatu, która waha się w granicach od 0,9 m do 3,65 m.

Na rysunku 11 podany jest aparat wyparny systemu „Wellner-Jelinek“, stosowany dawniej dość często w cukrowniach do zagęszczania soku. Komory parowe tego aparatu, przednia A i tylna B, są podzielone przegrodami na części w taki sposób, że poziome rurki grzejne umocowane w denkach sitowych komór tworzą kilka pęków (w aparacie przedstawionym na rysunku 11 — cztery), nazywanych biegami. Para ogrzewająca, doprowadzana do przednich komór grzejnych przewodami C, płynie rurkami pierwszych biegów do tylnej komory B, skąd wraca następnie rurkami drugich biegów. W rurkach skrapla się, oddając ciepło zagęszczanej cieczy; skropliny odprowadzane są przewodami D, a nie skraplające się gazy rurkami E. Roztwór surowy dopływa przewodem F, zagęszczony odprowadzany jest rurą G, opary zaś odchodzą rurami H do łapacza kropli K, skąd odprowadzane są przewodami I i J.

Łapacz kropli posiada przegrody sitowe z drobnymi otworkami ukośnie skierowanymi z góry na dół. Przegrody te ułatwiają oddzielenie kropelek od oparów.



Rys. 11. Aparat wyparny systemu „Wellner-Jelinek“.

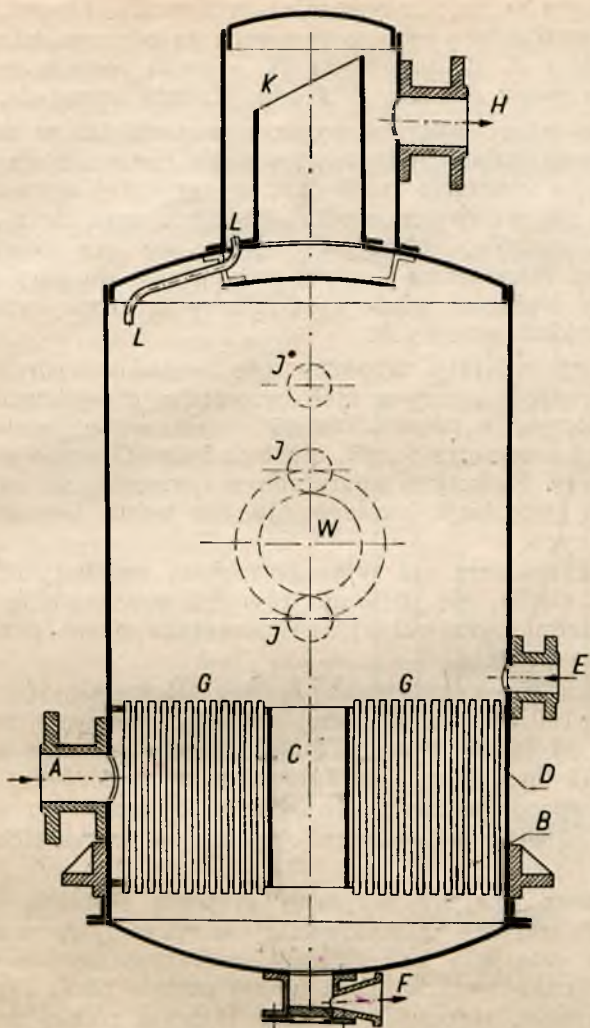
Najwięcej ciepła dochodzi do zagęszczanego roztworu przez rurki pierwszych biegów, bowiem w nich skrapla się główna część pary ogrzewającej. Ciecz odparowywana cyrkuluje wobec tego w rozpatrywanym aparacie wyparnym w taki sposób, że powstają w niej trzy prądy: dwa pionowe, wznoszące się pomiędzy rurkami skrajnych biegów do góry, i jeden opadający w dół pomiędzy rurkami biegów środkowych.

W aparacie wyparnym systemu „Wellner-Jelinek“ jest silnie rozwinięta przestrzeń parowa nad poziomem zagęszczanego roztworu; wskutek tego nadaje się on do odparowywania cieczy pieniających się podczas wrzenia.

9. Aparaty wyparne z rurkami pionowymi

Aparat wyparny Roberta jest typowy dla aparatów z rurkami pionowymi. Został on skonstruowany w roku 1850 przez dyrektora cukrowni *Roberta* i od tego czasu znalazł szerokie zastosowanie nie tylko w cukrownictwie, ale i w innych gałęziach przemysłu chemicznego. Schematycznie jest przedstawiony na rysunku 12.

Komora grzejna tego aparatu umieszczona w dolnej części składa się z dwóch denek sitowych, w których są roz-



Rys. 12. Aparat wyparny Roberta.

walcowane rurki grzejne *G* oraz jedna centralna rura cyrkulacyjna *C* o dużej średnicy.

Skropliny odprowadzane są z aparatu przez otwór *B*, a powietrze i gazy przez *D*. Roztwór rozcieńczony wchodzi do aparatu przewodem *E*, zagęszczony odpyływa przewodem *F*

umieszczonym w najniższym miejscu aparatu. Opary wydzielające się z odparowywanego roztworu są odprowadzane przez kółpak (helm) *K* do przewodu *H*. Aparat posiada poza tym kilka wzierników *J*, właz *W* i odpowiednią armaturę.

Podczas pracy aparatu wyparnego zachodzi w nim dość intensywne cyrkulacje odparowywanego roztworu. Para znajdująca się na zewnątrz rurek komory grzejnej ogrzewa ciecz znajdującą się wewnątrz rurek. Wskutek tego ciecz zawiera pęcherzyki oparów, które wydzielają się na powierzchni ogrzewalnej. Mieszanina cieczy i pary płynie do góry na skutek różnicy ciężarów właściwych cieczy w rurze cyrkulacyjnej i w rurekach grzejnych.

Pierwsze aparaty wyparne nie posiadały rur cyrkulacyjnych, krążenie cieczy w nich było słabe, a wydajność mała, gdyż współczynnik przewodnictwa ciepła, wobec małej prędkości cieczy wewnątrz rurek, nie był duży. Obecnie niektórzy konstruktorzy, w dużych aparatach wyparnych, do zapewnienia dobrej cyrkulacji, umieszczają nie jedną lecz kilka rur cyrkulacyjnych.

Silna cyrkulacja nie tylko powiększa współczynnik przewodnictwa ciepła, ale utrudnia również powstawanie osadów na powierzchni ogrzewalnej, co przedłuża okres pracy aparatu bez czyszczenia.

Średnica rurek grzejnych w aparatach Roberta wynosi od 25 do 100 mm, najczęściej jednak stosowane są rurki o średnicy od 40 do 50 mm. Długość rurek waha się w granicach od 0,75 do 1,75 m. Średnicę rury cyrkulacyjnej dobiera się w taki sposób, ażeby powierzchnia jej przekroju wynosiła od 75 do 150% powierzchni przekroju wszystkich rurek grzejnych.

W Polsce aparaty wyparne systemu Roberta znalazły szczególnie szerokie zastosowanie w przemyśle cukrowniczym. Na czterysta kilkadziesiąt aparatów zainstalowanych w polskich cukrowniach przed wojną prawie 80%, czyli trzyście kilkadziesiąt, stanowiły aparaty Roberta różnej wielkości, od małych o powierzchni ogrzewalnej 50 m² do dużych o powierzchni ogrzewalnej przekraczającej 1000 m².

Powierzchnia ogrzewalna aparatu Roberta, jak i wszystkich innych rurkowych aparatów wyparnych, jest duża, a warstwa roztworu nad nią mała. Mała jest również swobodna powierzchnia odparowywanej cieczy, wskutek czego wrze ona w sposób bardzo burzliwy, silnie rozpryskując się

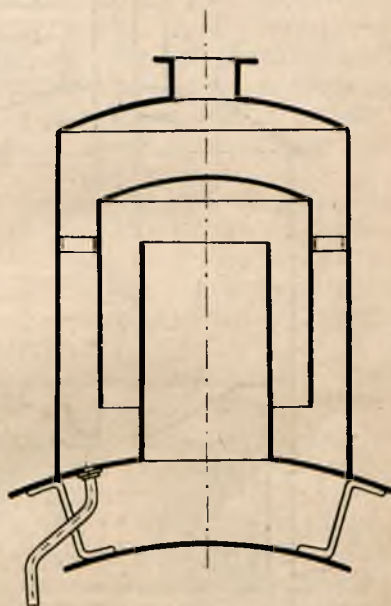
na wszystkie strony. Opary, wydzielając się z wielką prędkością z powierzchni wrzącego roztworu, porywają ze sobą sporo kropelek cieczy. Jeżeli odparowywane roztwory są lepkie, to powstaje przy tym dużo piany. Jest więc niebezpieczeństwo stracenia pewnej ilości zagęszczanej substancji wskutek unoszenia przez opary kropelek cieczy i przerzucania piany poza aparat wyparny.

W celu zapobieżenia przerzucaniu piany i w celu zmniejszenia ilości cieczy unoszonej przez opary w postaci kropelek należy odbierać opary z aparatu wyparnego w punkcie możliwie odległym od powierzchni cieczy. Najlepiej przez kołpak K (rys. 12) znajdujący się na górnym denku aparatu. Pod kołpakiem znajduje się tarcza odbijająca kropelki i zatrzymująca pianę, a w kołpaku przegrody w celu nadania oparom krętej drogi. Wskutek zmian kierunku strumienia oparów kropelki cieczy oddzielają się i przez rurkę L wracają do aparatu wyparnego.

Na rysunku 13 przedstawiony jest kołpak (hełm) z przegrodami zmieniającymi kilka razy kierunek przepływu oparów. Straty ciśnienia na pokonanie oporów hydraulicznych są w tym kołpaku większe niż w poprzednim, a oddzielanie kropelek niewiele lepsze.

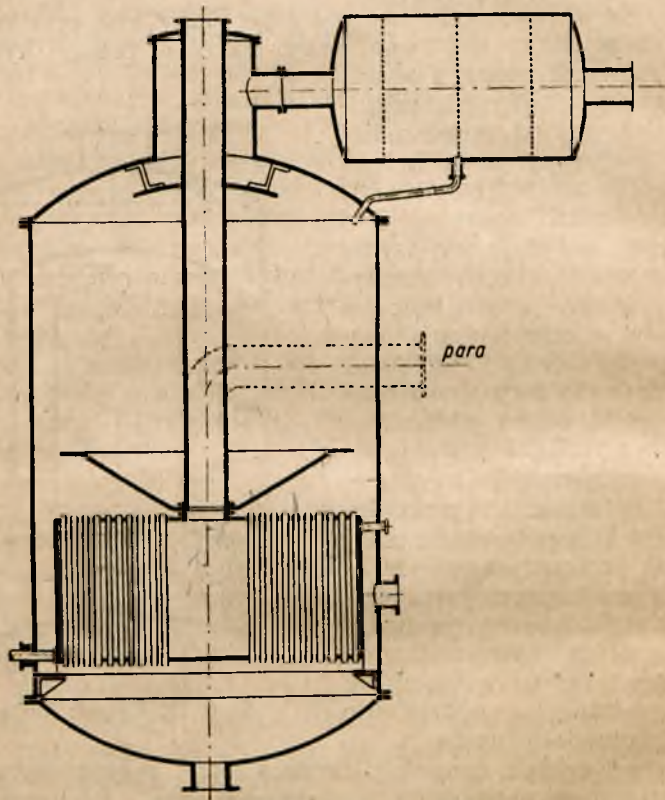
Opary, oprócz kropelek, unoszą przy zagęszczaniu lepkich roztworów pęcherzyki wypełnione parą. Pęcherzyki te rozbijają się o przegrody przy zmianie kierunku strumienia oparów.

Łapacze poziome oddzielają kropelki i pęcherzyki od oparów znacznie lepiej niż kołpaki z przegrodami. Są to zbiorniki cylindryczne z jedną lub kilkoma przegrodami sitowymi. Ustawia się je zwykle na przewodzie odprowadzającym opary z aparatu wyparnego tuż przy samym aparacie, jak na rys. 14, lub bezpośrednio na nim (jak na rysunku 11).



Rys. 13. Kołpak (hełm).

Wskutek zmniejszenia się prędkości strumienia oparów przy wlocie do łapacza, kropelki pod wpływem siły ciężkości wypadają ze strumienia, zbierają się w dolnej części łapacza i wracają do aparatu. Wskutek rozprężenia się zawartej w nich pary pęcherzyki pękają w łapaczu, gdyż ciśnienie w nim jest mniejsze niż w aparacie wyparnym lub też rozbijają się o przegrody.



Rys. 14. Aparat wyparny Seidaka.

Aparat wyparny systemu Seidaka (rys. 14) jest odmianą aparatu Roberta. Jego komora grzejna stanowiąca oddzielną całość jest zawieszona lub wsparta (jak na rysunku 14) na specjalnych konsolach w taki sposób, że pomiędzy nią a ściankami aparatu istnieje pierścieniowa prze-

strzeń, która pełni taką samą rolę jak rura cyrkulacyjna w aparacie Roberta. Takie ustawienie komory grzejnej pozwala na wyjmowanie jej podczas remontu oraz na umieszczenie tarczy odbijającej bezpośrednio nad wylotem rurek grzejnych. Tarcza powyższa skutecznie oddziela kropelki cieczy od oparów oraz utrudnia powstanie piany.

Zasilanie komory grzejnej parą ogrzewającą może zachodzić albo rurą przechodzącą przez cały aparat wzdłuż jego osi (jak pokazane jest na rys. 14), albo rurą przechodzącą przez boczną ściankę aparatu, jak zaznaczono na tym rysunku linią przerywaną. W pierwszym przypadku rura doprowadzająca parę osusza opary, przez co zmniejsza się ilość kropelek unoszonych przez nie, drugi natomiast sposób jest wygodniejszy, prostszy i tańszy. Opary opuszczające aparat wyparny przechodzą przez poziomy łapacz kropli, omawiany poprzednio.

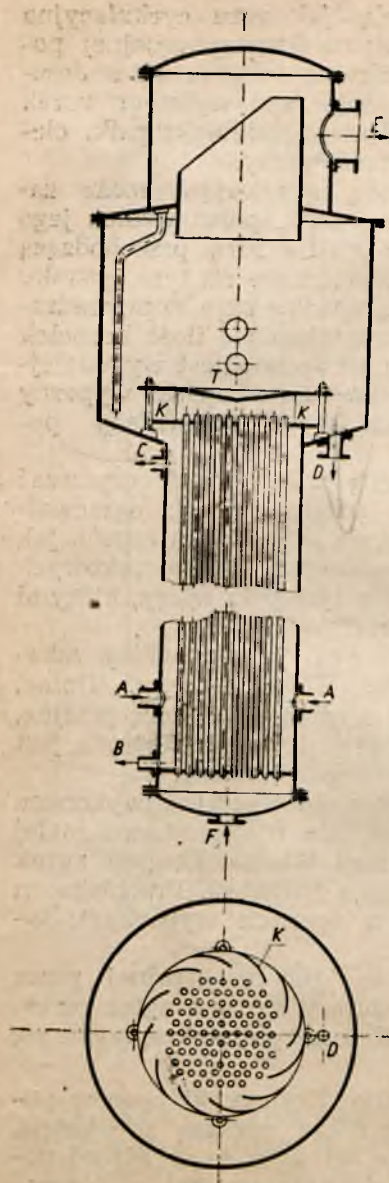
Aparaty wyparne Roberta i Seidaka łatwo jest oczyszczać z osadów, wydzielających się na powierzchniach ogrzewalnych rurek. Oczyszczanie odbywa się w taki sam sposób jak czyszczenie rurek w kotłach parowych wodnorurkowych o rurkach stromych. Posiadają one w tym celu włazy, którymi można się dostać do wnętrza aparatu.

Aparat wyparny Kestnera przedstawiony schematycznie na rysunku 15 składa się z dwóch części. Dolna, o mniejszej średnicy, posiada silnie wydłużoną komorę grzejną, górna zaś krótsza, lecz o większej średnicy, przeznaczona jest do oddzielania oparów od zagęszczonego roztworu.

Komorą grzejną aparatu wyparnego Kestnera wykonana jest z rurek długości od 6 do 9 m, ale o stosunkowo małej średnicy wynoszącej 30 lub 35 mm. Wielka długość rurek wpływa znacznie na proces parowania roztworu. Przebiega on w aparacie Kestnera inaczej niż w aparacie wyparnym Roberta.

Para ogrzewająca dopływa do komory grzejnej przez otwory A i ogrzewa roztwór znajdujący się wewnątrz rurek. Skropliny odpływają przez otwór B, a gazy nie skraplające się rurą C.

Roztwór wewnątrz rurek paruje. Pęcherzyki oparów posuwają się w rurkach do góry z coraz większą prędkością, gdyż ilość ich i objętość tak silnie wzrasta, że w górnej połowie rurek ciecz przylega tylko cienką warstwą do wewnętrznej powierzchni, jak schematycznie pokazano na rysunku 15a. Reszta zaś przestrzeni wewnętrznej rurek jest wy-



Rys. 15. Aparat wyparny Kestnera.

pełniona oparami. Ciecz w rurkach utrzymuje się na dość niskim poziomie, w niektórych przypadkach nie przekracza on 1 m, licząc od dolnego końca.

Opary podnosząc się z dużą prędkością pociągają za sobą przylegającą do ścianek warstewkę roztworu, która wskutek tego posuwa się również do góry z prędkością dochodzącą do 20m/sek.

Duża prędkość warstewki cieczy wpływa dodatnio na współczynnik przewodnictwa ciepła. Tym się tłumaczy, że wydajność aparatów Kestnera jest większa niż aparatów wyparnych Roberta i wynosi od 35 do 40 kg oparów z 1 m² powierzchni ogrzewalnej w przeciągu godziny.

Mieszanina oparów i cieczy, wypływająca z dużą prędkością z rurek komory grzejnej, trafia na tarczę odbijającą T, która posiada specjalnie wygięte łopatki kierownicze K (rys. 15); nadają one mieszaninie silny ruch wirowy. Krople cieczy odrzucane siłą odśrodkową na ściankę boczną górnej części aparatu oddzielają się w ten sposób od oparów, zbierają na dnie rozszerzonej części aparatu i odpływają na zewnątrz, jako roztwór zagęszczony, rurą D. Opary zaś odchodzą przewodem E.

Aparat wyparny Kestnera nie posiada, jak wynika z po-

wyższego, rury cyrkulacyjnej. Ciecz przechodzi przez niego tylko jeden raz wchodząc z dołu, jako roztwór rozcieńczony, przewodem F i odchodząc, jako stężony, rurą D . Ażeby aparat ten dobrze działał, należy regulować w nim bardzo starannie zasilanie, gdyż przy zbyt obfitym doprowadzaniu cieczy surowej roztwór nie zdąży się należycie zagęścić, natomiast przy niedostatecznym zasilaniu może zachodzić całkowite odparowywanie rozpuszczalnika i górne końce rurek będą zarastać kryształami ciała rozpuszczonego.

Aparaty wyparne Kestnera weszły do przemysłu dopiero w roku 1899 i, chociaż wymagają wysokich budynków, znalazły duże zastosowanie do odparowywania roztworów gęstych i dających podczas wrzenia dużo piany. Pęcherzyki piany, wylatując z rurek z wielką prędkością, rozbijają się o tarczę T .

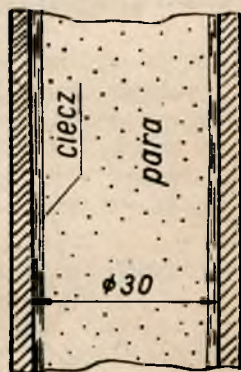
Do wad aparatów wyparnych Kestnera, poza ich wielkimi wymiarami, należy zaliczyć bardzo trudne oczyszczanie z osadów długich rurek w komorze grzejnej. Dlatego nie zaleca się zagęszczania w tych aparatach roztworów tworzących osady na powierzchni ogrzewalnej.

W Polsce, przed wojną, aparaty Kestnera były stosowane między innymi i w przemyśle cukrowniczym, gdzie pracowało około 25 takich aparatów różnej wielkości.

10. Aparaty wyparne z rurkami pochyłymi

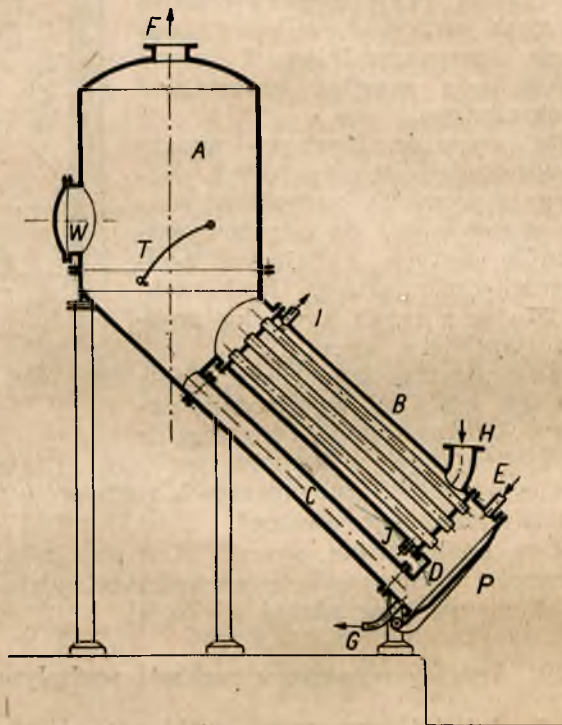
Znacznie łatwiej oczyszczać rurki z osadów w aparacie z rurkami pochyłymi konstrukcji „Buflovac“, przedstawionym schematycznie na rys. 16. W aparacie tym część parowa A dużej średnicy posiada dno stożkowe, do którego przytworowana jest dość długa, krótsza jednak niż w aparacie Kestnera, pochyła ustawiona część grzejna B oraz również pochyła rura cyrkulacyjna C .

Rzadki roztwór dopływa do dolnej komory D przewodem E i dostaje się do pochyłych rurek, gdzie następuje jego parowanie. Mieszanina oparów i cieczy przechodzi z dużą prędkością do przestrzeni parowej, uderza o tarczę T , wskutek czego piana się niszczy, a kropelki cieczy, odbijając się w kierunku



Rys. 15a. Przekrój przez rurkę.

stożkowego dna, spływają rurą cyrkulacyjną do dolnej komory *D*. Opary odchodzą z aparatu u szczytu przewodem *F*, roztwór zaś zagęszczony w najniższym miejscu — rurą *G*. Para ogrzewająca dopływa do części grzejnej aparatu przewodem *H*, skropliny odchodzą rurą *J*, a gazy i powietrze są usuwane z części grzejnej rurą *I*.



Rys. 16. Aparat wyparny Buflovaca.

Aparat wyparny Buflovaca wspiera się na kolumnach. Jego część grzejna jest nachylona pod kątem 45° do poziomu. Posiada on właz *W* umieszczony naprzeciw górnego dna sitowego. W celu ułatwienia oczyszczania rurek należy odchylić tarczę *T* i otworzyć dolną pokrywę *P*. Pokrywa i tarcza są zmontowane na zawiasach.

Aparaty wyparne z rurkami pochyłymi, dzięki dobrej cyrkulacji, posiadają dwukrotnie większe natężenie powierzchni

ogrzewalnej niż aparaty Kestnera. Nadają się również do odparowywania roztworów wydzielających podczas wrzenia dużo piany. Można je stosować i do zagęszczania cieczy tworzących niezbyt obfite osady na powierzchniach ogrzewalnych.

11. Aparat wyparny z wymuszoną cyrkulacją

Dla powiększenia współczynnika przewodnictwa ciepła k oraz dla zapobieżenia zbyt szybkiemu narastaniu osadów na powierzchni ogrzewalnej, stosowane są aparaty wyparne o wzmożonej w sposób mechaniczny cyrkulacji. Z kilku konstrukcyj tego typu aparatów na uwagę zasługuje aparat wyparny systemu „Prache et Bouillon“ przedstawiony schematycznie na rys. 17.

W aparacie tym część grzejna A znajduje się obok części parowej B . Obie części połączone są ze sobą w górze i na dole króćcami C .

Roztwór przepływa przez rurki komory grzejnej z bardzo wielką prędkością pod działaniem pompy śmigłowej P oraz dzięki cyrkulacji naturalnej wywołanej ogrzewaniem.

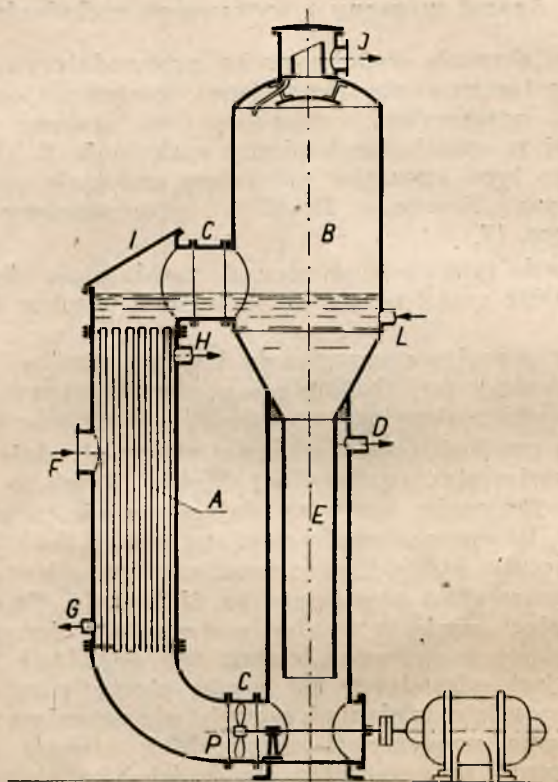
Znaczna prędkość odparowywanej cieczy utrudnia powstawanie na powierzchni ogrzewalnej osadów. Jeżeli w aparacie tym są odparowywane roztwory dające twarde, trudno usuwalne osady, to wprowadza się do niego pewną ilość (od 20 do 100 kg) kwarcytu, który, krążąc wraz z cieczą, zdrapuje z powierzchni ogrzewalnej powstające na niej osady. Są one usuwane, w postaci zawiesin wraz z roztworem stężonym, przez rurę D . Ażeby z zagęszczoną cieczą nie odchodził kwarcyt, przewód D jest odgradzony od prądu cieczy rurą cyrkulacyjną E . Oczywiście działanie kwarcytu nie ogranicza się tylko do oczyszczania powierzchni ogrzewalnej; atakuje on rurki i śmigło pompy, przyczyniając się do ich stosunkowo przedkiego zużycia. Z tego powodu kwarcyt dodaje się tylko w razie nieodzownej potrzeby, po uwzględnieniu odpowiedniej kalkulacji.

Czyszczenie rurek, w przypadku gdy aparat wyparny pracuje bez kwarcytu, jest łatwe. Służy do tego celu pokrywa I zawieszona na zawiasach.

Para ogrzewająca dopływa do aparatu przewodem F , skropliny odchodzą rurą G , a gazy i powietrze rurą H . Opary wydzielające się ze swobodnej powierzchni cieczy, która w aparacie „Prache et Bouillon“ jest większa niż w innych,

odchodzą przez kołpak przewodem *J*. Roztwór rozcieńczony dopływa rurą *L*.

Natężenie powierzchni ogrzewalnej aparatów wyparnych z przymusową cyrkulacją jest duże. W niektórych przypadkach dochodzi nawet do $100 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$.



Rys. 17. Aparat wyparny „Prache et Bouillon”.

Aparaty wyparne o wzmożonej mechanicznie cyrkulacji nadają się lepiej niż inne do odparowywania cieczy wydzielających osady szczególnie twarde i silnie przystające do powierzchni ogrzewalnej. Przed wojną aparaty „Prache et Bouillon” stosowane były w Polsce do odparowywania (destylacji) wody przeznaczonej do zasilania kotłów parowych w elektrowniach w Warszawie, Mościcach i w kilku innych.

12. Wyparka jednodziałowa

Jeżeli aparat wyparny pracuje samodzielnie, to jest niezależnie od innych aparatów wyparnych, to tego rodzaju instalację wyparną będziemy nazywać *jednodziałową* w odróżnieniu od wielodziałowej, w której kilka aparatów wyparnych łączy się w baterię pracującą jako jedna całość.

Wyparka jednodziałowa może pracować w sposób periodyczny lub ciągły. W pierwszym przypadku wprowadza się do aparatu wyparnego od razu taką ilość roztworu rozcieńczonego, jaka może się w nim zmieścić. W miarę odparowywania rozpuszczalnika stężenie roztworu w aparacie wzrasta, zmienia się również i jego temperatura wrzenia. Gdy stężenie osiąga pożądaną wielkość, roztwór wypuszcza się z aparatu, który następnie poddaje się oczyszczeniu, jeżeli potrzeba, i operację się powtarza.

Jeżeli wyparka prowadzona jest w sposób ciągły, to roztwór rozcieńczony dopływa do aparatu, a zagęszczony odpływa z niego bez przerwy. W aparacie ustala się wkrótce po rozpoczęciu odparowywania takie stężenie, jakie posiada roztwór zagęszczony. Temperatura i ciśnienie (próżnia) w aparacie wyparnym nie ulegają zmianom.

Odparowywanie ciągłe jest, oczywiście jak każdy proces ciągły, korzystniejsze od periodycznego. To ostatnie znajduje zastosowanie tylko w instalacjach małych lub gdy używanie wyparki ciągłej łączy się z trudnościami technologicznymi.

Wyparka jednodziałowa może pracować pod ciśnieniem atmosferycznym lub pod próżnią. Z punktu widzenia zużycia ciepła wyparka pod próżnią nie daje żadnych korzyści. Łatwo się o tym przekonać, rozpatrując tablice dla pary wodnej nasyconej. Widzimy z nich, że dla ciśnień mniejszych od ciśnienia atmosferycznego ciepło parowania r wzrasta, ale ciepło potrzebne do ogrzania cieczy do temperatury wrzenia i' maleje, tak że w rezultacie entalpia pary nasyconej i'' ze spadkiem prężności (ze wzrostem próżni) nieco spada. Jeżeli do aparatu wyparnego doprowadzany jest roztwór zimny (na przykład o temperaturze 0° , to trzeba go najpierw podgrzać do temperatury wrzenia, a wtedy, jak wynika z tych tablic, zużycie ciepła przy prowadzeniu wyparki pod ciśnieniem absolutnym wynoszącym na przykład 0,1 ata (tj. pod próżnią 0,9 at) będzie o około 3% mniejsze niż w wyparce prowadzonej pod ciśnieniem atmosferycznym (bowiem entalpia pary

4389

wodnej pod ciśnieniem 1 kg/cm^2 wynosi $637,9 \text{ kcal}$, a pod ciśnieniem $0,1 \text{ kg/cm}^2$ tylko $616,7 \text{ kcal}$.

Gdy zaś do aparatu wyparnego dopływa roztwór ogrzany do temperatury wrzenia, a w aparacie należy go tylko odparować, jak to się dzieje w cukrowniach, to zużycie ciepła w wyparce prowadzonej pod próżnią $0,9 \text{ at}$, będzie większe o przeszło 5% niż w wyparce prowadzonej pod ciśnieniem atmosferycznym (gdyż ciepło parowania pod ciśnieniem $0,1 \text{ kg/cm}^2$ wynosi $571,2 \text{ kcal/kg}$, a pod ciśnieniem 1 kg/cm^2 tylko $539,7 \text{ kcal/kg}$).

Normalnie do aparatu wyparnego wprowadza się roztwór o temperaturze większej od 0° , a mniejszej od temperatury wrzenia, wskutek czego różnica w zużyciu ciepła w wyparkach próżniowej i pod ciśnieniem atmosferycznym sprowadza się do zera.

Obliczenie wyparki jednodziałowej polega na:

1. ułożeniu bilansu materiałowego i ustaleniu ilości odparowywanego rozpuszczalnika;
2. ułożeniu bilansu cieplnego i ustaleniu ilości potrzebnej pary ogrzewającej;
3. obliczeniu wymiarów aparatu wyparnego.

Przy obliczaniu wyparki znane są zwykle następujące wielkości:

1. ilość roztworu surowego $S \text{ kg}$;
2. stężenie roztworu surowego b_s w procentach wagowych;
3. „ „ zagęszczonego b_z w procentach wagowych;
4. temperatura roztworu surowego $t_s \text{ }^\circ\text{C}$;
5. prężność $p \text{ kg/cm}^2$ i temperatura T° pary ogrzewającej;
6. ciśnienie w skraplaczu $p_k \text{ kg/cm}^2$.

Przyjmując, że zagęszczamy roztwory wodne i oznaczając przez W ilość kg wody odparowywanej w wyparce jednodziałowej, otrzymamy bilans materiałowy wyparki w postaci równania:

$$S = S_z + W,$$

gdzie S_z jest to ilość otrzymywanego gęstego roztworu w kilogramach.

Ilość suchej substancji zawarta w roztworze przed i po zagęszczeniu jest jednakowa, wobec czego

$$S b_s = (S - W) b_z;$$

z równania tego obliczamy W :

$$W = S \left(1 - \frac{b_s}{b_z} \right). \quad (3)$$

Znając ilość odparowywanej w wyparce cieczy i oznaczając przez:

c_s — ciepło właściwe roztworu surowego w kcal/kg °C;

c_z — ciepło właściwe roztworu stężonego w kcal/kg °C;

t_{krs} — temperaturę skroplin w °C;

t — „ „ wrzenia roztworu;

I — entalpię pary ogrzewającej w kcal/kg;

i — „ „ oparów w kcal/kg;

możemy ułożyć bilans cieplny i obliczyć rozchód pary ogrzewającej D .

Przychód

1. Ciepło dostarczone z roztworem rozcieńczonym $Sc_s t_s$ kcal.

2. Ciepło dostarczone z parą ogrzewającą DI kcal.

Rozchód

1. Ciepło zawarte w roztworze zagęszczonym $(S - W) c_z t_z$.

2. Ciepło zawarte w skroplinach Dt_{skr} kcal.

3. Ciepło uniesione przez opary Wi kcal.

4. Ciepło stracone przez promieniowanie z gazami nie skraplającymi się w inny sposób Q_{str} kcal.

Równanie bilansu cieplnego przedstawia się wobec tego w sposób następujący:

$$Sc_s t_s + DI = (S - W) c_z t_z + Dt_{skr} + Wi + Q_{str},$$

skąd można obliczyć rozchód pary ogrzewającej D :

$$D = \frac{(S - W) c_z t_z - Sc_s t_s + Wi + Q_{str}}{I - t_{skr}}. \quad (8)$$

Jeżeli roztwór surowy podgrzewany jest poza wyparką, jak to się dzieje w cukrownictwie, i dopływa do aparatu wyparnego prawie w temperaturze wrzenia, to przyjmując (bez wielkiego błędu) $c_s = c_z = 1$ oraz $t_s = t_z = t$ i nie uwzględniając strat otrzymamy, że:

$$D = \frac{W(i-t)}{I - t_{skr}}, \text{ skąd } \frac{D}{W} = \frac{i-t}{I - t_{skr}} \quad (9)$$

Zwykle prężność pary ogrzewającej jest większa od ciśnienia panującego wewnątrz aparatu wyparnego, inaczej nie byłaby przecież temperatura pary większa od temperatury roztworu. Ale różnica ciśnień nie jest wielka i tylko wyjątkowo przekracza 2 at, normalnie zaś jest mniejsza. W takim razie entalpie pary ogrzewającej i oparów również mało różnią się od siebie, wobec czego stosunek $\frac{i-t}{I-t_{skr}}$ jest zbliżony do 1. Łatwo się o tym przekonać, rozpatrując następujący przykład.

P r z y k ł a d. W aparacie wyparnym zagęszczany jest 5-procentowy roztwór soli kuchennej do stężenia 20%, przy czym jest on ogrzewany prawie do temperatury wrzenia przed wprowadzeniem do aparatu. Obliczyć rozchód pary ogrzewającej na 1 kg odparowanej wody, jeżeli prężność pary wynosi 1,8 kg/cm², a ciśnienie absolutne w aparacie wyparnym 0,1 kg/cm², temperatura zaś skroplin 108°.

R o z w i ą z a n i e. Ilość wody, którą należy odparować, wynosi:

$$W = S \left(1 - \frac{b_s}{b_z} \right) = 1 \left(1 - \frac{5}{20} \right) = 0,75 \text{ kg.}$$

Rozchód pary obliczymy ze wzoru (9), podstawiając wartości na entalpie z tablicy 1.

$$D = \frac{0,75 (638,9 - 199,1)}{645,4 - 108} = 0,7525 \text{ kg.}$$

Wobec czego na odparowanie 1 kg wody potrzeba:

$$\frac{D}{W} = \frac{0,7525}{0,75} = 1,0033 = \text{ok. 1 kg pary.}$$

W rzeczywistości zużycie pary na 1 kg odparowywanej wody, nie licząc zużycia jej na podgrzewanie roztworu surowego do temperatury wrzenia, jest ze względu na straty ciepłne większe niż 1 kg. Średnio dla przybliżonych obliczeń można przyjmować na podstawie badań *Hausbranda*, że straty ciepłne stanowią 10%, czyli rozchód pary wynosi 1,1 kg na 1 kg odparowanej wody.

Powierzchnię ogrzewalną F aparatu wyparnego oblicza się w sposób zwykły ze wzoru :

$$F = \frac{Q}{K \theta_{sr} \tau}$$

gdzie:

- K — współczynnik przewodnictwa ciepła w $\text{kcal/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h}$,
- θ_{sr} — średnia różnica temperatur pary ogrzewanej i roztworu w $^\circ\text{C}$;
- τ — ilość godzin zużytych na odparowanie D kg oparów;
- Q — ilość ciepła w kcal, która przeszła przez powierzchnię ogrzewalną.

Ciepło, które przeszło przez powierzchnię ogrzewalną Q , w przybliżeniu równa się:

$$Q = D (I - t_{skr});$$

wobec czego

$$F = \frac{D (I - t_{skr})}{K \theta_{sr} \tau} \quad (10)$$

Pewną trudność przy korzystaniu z tego wzoru stanowi ustalenie wielkości współczynnika przewodnictwa k oraz średniej różnicy temperatur θ_{sr} . W jaki sposób pokonać te trudności zostanie wyjaśnione w rozdziałach 15 i 17.

13. Wyparka wielodziałowa

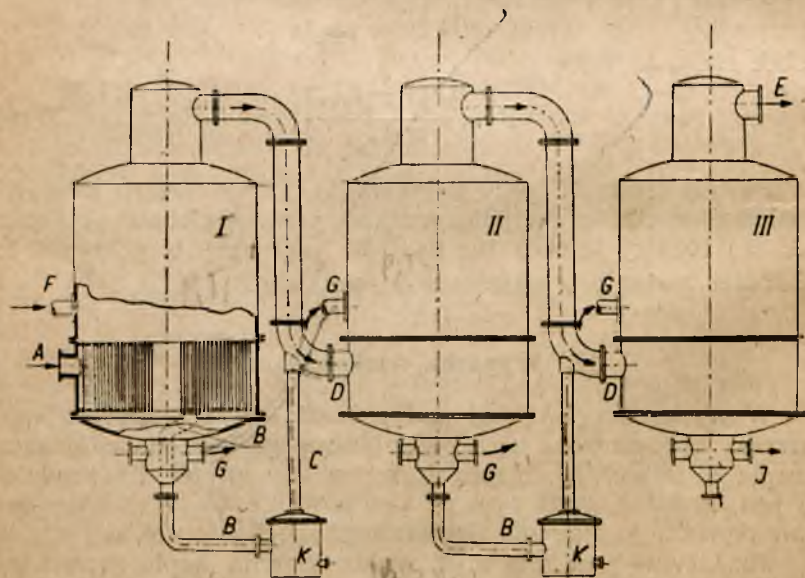
W wyparce pracującej pod próżnią opary z aparatu wyparnego wprowadzane są do skraplacza, gdzie woda chłodząca skrapla je odbierając ciepło, które w ten sposób dla produkcji jest stracone. Poza tym na pompowanie wody do skraplacza zużywana jest pewna ilość energii mechanicznej.

Już dawno powstała myśl wykorzystania ciepła zawartego w oparach do celów produkcyjnych. Urzeczywistniał ją w sposób właściwy przeszło sto lat temu (w roku 1829) inżynier

Poequier, wprowadzając opary z jednego aparatu wyparnego, jako parę ogrzewającą, do komory grzejnej aparatu drugiego, opary zaś z tego aparatu do komory grzejnej trzeciego itd. W ten sposób powstała wyparka wielodziałowa.

Każdy aparat, wchodzący w skład tej najprostszej baterii wyparnej, nosi nazwę „działu“ (w dużych i skomplikowanych bateriach wyparnych bywa po kilka aparatów w jednym dziale). W zależności od ilości aparatów, połączonych ze sobą w klasyczną baterię, rozróżniamy wyparkę jednodziałową, dwudziałową, trójdziałową i wielodziałową. Poszczególne aparaty wchodzące w skład klasycznej baterii wyparnej są ponumerowane. Pierwszym działem nazywamy ten aparat, do którego doprowadzana jest para ogrzewająca z silnika parowego (para odlotowa) lub z kotła (para żywa). Temperatura wrzenia w nim jest najwyższa. Działem ostatnim jest ten aparat, w którym temperatura wrzenia jest najniższa. Opary odprowadzane są z tego działu albo do skraplacza, albo w celu wyzyskania zawartego w nich ciepła do jakiejś stacji grzejnej w fabryce.

Na rysunku 18 podany jest schemat trójdziałowej instalacji wyparnej. Para ogrzewająca dopływa do działu pierw-



Rys. 18. Schemat wyparki trójdziałowej.

szego przewodem A, gdzie każdy jej kilogram skraplając się może teoretycznie odparować prawie 1 kg wody. Opary z działu pierwszego, skraplające się jako para ogrzewająca w działle drugim, a opary z działu drugiego w działle trzecim odparowują teoretycznie również po 1 kg wody na 1 kg oparów. Z tego wynika, że 1 kg pary doprowadzanej do wyparki może odparować teoretycznie w wyparce trójdziałowej prawie 3 kg wody, a w wyparce wielodziałowej tyle kilogramów, z ilu działów składa się wyparka. W rzeczywistości jednak, wskutek różnego rodzaju strat cieplnych, stosunek ten, jak zobaczymy w rozdziale 18, nie przedstawia się tak świetnie.

Skropliny, jak widać na rysunku 18, odpływają z komory grzejnej każdego aparatu do garnka kondensacyjnego K rurami B. Jeżeli wraz ze skroplinami dostanie się do tego garnka para, to jest ona odprowadzana rurkami C do przewodów D, którymi płyną opary z poprzedniego aparatu do komory grzejnej następnego. Opary z ostatniego działu odchodzą rurą E. Roztwór odparowywany dopływa do pierwszego działu przewodem F, a następnie przechodzi z jednego działu do następnego rurami G, odchodząc z wyparki, jako stężony, przewodem J.

Koniecznym warunkiem przechodzenia ciepła od pary ogrzewającej przez ścianki rurek komory grzejnej do cieczy wrzącej wewnątrz aparatu jest różnica temperatur pomiędzy parą a roztworem lub odpowiadającą tej różnicy temperatur różnica ciśnień. Ciśnienie więc oparów w każdym działle powinno być większe niż w działle następnym, a mniejsze niż w poprzednim.

Różnicę ciśnień, pomiędzy poszczególnymi działami baterii wyparnej można osiągnąć albo utrzymując próżnię w działle ostatnim przez połączenie go ze skraplaczem, albo przez utrzymanie nadciśnienia w działle pierwszym i odparowywanie w nim roztworu pod ciśnieniem większym od atmosferycznego, albo wreszcie stosując oba sposoby jednocześnie.

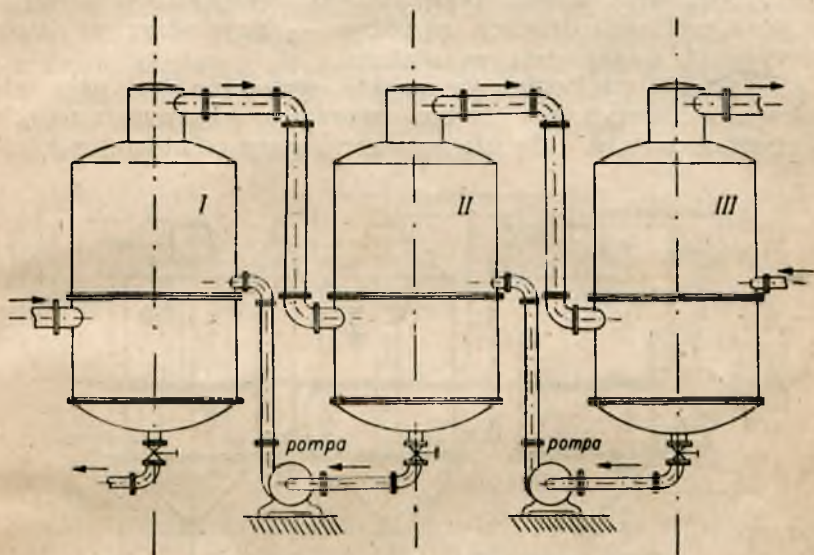
Wszelkie zmiany ciśnienia pary ogrzewającej dział pierwszy lub zmiany próżni w działle ostatnim pociągają za sobą zmiany ciśnienia i temperatury we wszystkich działach baterii wyparnej. Rzeczywiście, jeżeli na przykład z jakiegoś powodu próżnia w skraplaczu spadnie, podniesie się ciśnienie, a więc i temperatura w działle ostatnim. Wtedy różnica temperatur pomiędzy działem przedostatnim i ostatnim zmniejszy się. Opary z przedostatniego działu będą więc oddawać

w dziale ostatnim mniej ciepła niż poprzednio, mniej ich wobec tego skropli się w komorze grzejnej, a więc i mniej tych oparów wytworzy się w dziale przedostatnim, a w konsekwencji ciśnienie i temperatura w dziale przedostatnim wzrosną. Wzrost ciśnienia w tym dziale z kolei wywoła wzrost ciśnienia i temperatury w dziale poprzedzającym itd. Zmiany ciśnienia i temperatury rozciągną się automatycznie na całą baterię wyparną i w ten sposób posiada ona zdolność samoregulacji ciśnienia i temperatury.

Wyparka wielodziałowa, przedstawiona na rysunku 18, nosi nazwę w s p ó ł p r ą d o w e j. Roztwór surowy w tego rodzaju wyparkach doprowadzany jest do pierwszego działu, w którym wskutek odparowania części rozpuszczalnika stężenie roztworu wzrasta. Z pierwszego przechodzi roztwór do działu drugiego, gdzie następuje dalsze odparowywanie cieczy i wzrost stężenia. Z tego działu płynie do trzeciego, czwartego itd., przy czym w każdym z nich stężenie roztworu wzrasta. Ruch cieczy w kierunku od pierwszego do ostatniego działu odbywa się pod wpływem różnicy ciśnień w tych działach. Zawory umieszczane na przewodach, przez które roztwór przepływa z jednego działu do drugiego, służą do regulowania prędkości przepływu. Do obsługiwania wyparki współprądowej potrzebna jest jedna pompa tłocząca roztwór surowy do działu pierwszego oraz, jeżeli wyparka pracuje pod próżnią, druga do usuwania z ostatniego działu roztworu zagęszczonego.

Współprądowa bateria wyparna jest najbardziej rozpowszechnionym typem wyparki wielodziałowej. Znacznie rzadziej stosowana jest wyparka przeciwproudowa przedstawiona schematycznie na rysunku 19. Roztwór rozcieńczony w tej wyparce doprowadzany jest do działu ostatniego, gdzie częściowo się zagęszcza i przechodzi następnie do działu przedostatniego itd., aż do działu pierwszego, skąd odpływa roztwór już ostatecznie stężony. Wobec tego, że w ostatnim dziale panuje najniższe ciśnienie, a w pierwszym najwyższe, roztwór musi być przetłaczany z jednego działu do drugiego za pomocą pomp tłokowych lub odśrodkowych; komplikuje to i podraża instalację oraz wymaga zużycia energii mechanicznej. Pompy należy umieszczać nieco niżej od aparatów wyparnych, ażeby na ich przewodach ssących uzyskać pewne nadciśnienie. Ważne to jest szczególnie dla pomp odśrodkowych.

Wyparkę przeciwprądową opłaca się stosować do zagęszczania roztworów bardzo lepkich, bowiem w tym przypadku najbardziej stężony roztwór znajduje się w dziale pierwszym, w którym panuje najwyższa temperatura. Gdyby tego rodzaju roztwór odparowywać w wyparce współprądowej, to wydajność ostatniego działu, a więc i całej baterii wyparnej byłaby mała, bo współczynnik przewodnictwa ciepła k byłby bardzo



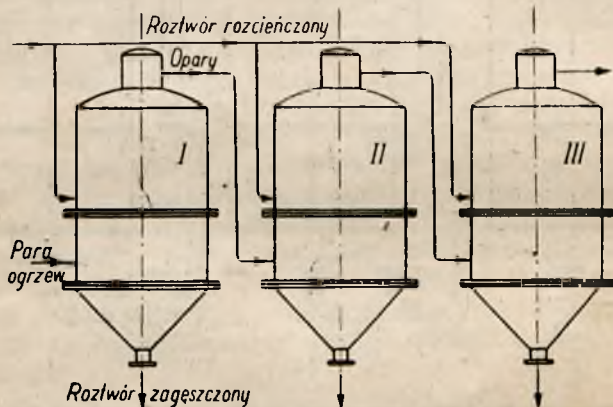
Rys. 19. Schemat przeciwprądowej baterii wyparnej.

mały ze względu na wielką lepkość roztworu posiadającego w tym dziale największe stężenie i najniższą temperaturę. Przeciwprądową baterię wyparną opłaca się również stosować i w tym przypadku, gdy roztwór rozcieńczony posiada stosunkowo niską temperaturę, mniejszą niż 60° . O tym, jaką wyparkę wybrać: współprądową czy przeciwprądową, można zdecydować na podstawie bilansu cieplnego i kalkulacji.

Jeżeli są odparowywane roztwory nasycone w celu wydzielenia kryształów ciała rozpuszczonego, jak na przykład w warzelniach soli kuchennej, to w niektórych przypadkach ze względów technologicznych jest stosowana bateria wyparna o zasilaniu równoległym przedstawiona schematycznie na rysunku 20.

W wyparce o zasilaniu równoległym para ogrzewająca dopływa do komory grzejnej działu pierwszego, a opary przepływają z poprzedniego działu do komory grzejnej działu następnego, tak jak w wyparkach współprądowych i przeciwprądowych. Natomiast doprowadzenie roztworu surowego do każdego działu wyparki odbywa się niezależnie od innych. Wskutek tego, że każdy dział, oprócz pierwszego, ogrzewany jest oparami z działu poprzedniego, temperatury wrzenia w poszczególnych działach są różne — największa w dziale pierwszym, najmniejsza w ostatnim.

Wyparka wielodziałowa zwykle ogrzewana jest parą odlotową z maszyn lub turbin parowych doprowadzaną do pierwszego działu. Gdy nie wystarcza para odlotowej z silni-



Rys. 20. Schemat równoległej baterii wyparnej.

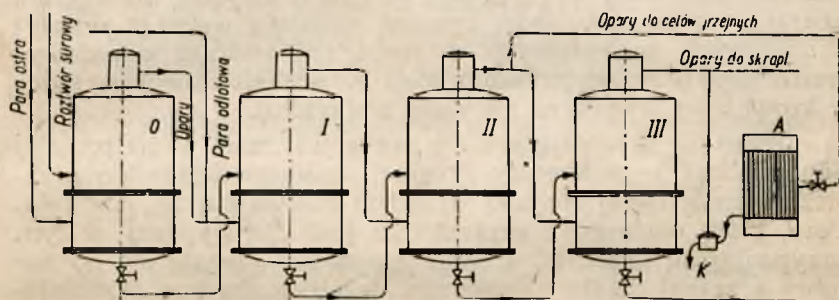
ków parowych, dodaje się parę ostrą, przy czym ciśnienie tej pary przed wprowadzeniem do komory grzejnej pierwszego działu zmniejszane jest do ciśnienia pary odlotowej przez dławienie w zaworze redukcyjnym.

Dławienie pary, jak wiadomo, jest przemianą przy stałej entalpii i przyczynia się do osuszenia, a nawet przegrzania pary. To ostatnie nie jest pożądane w aparatach wyparnych, gdzie służy ona do podgrzewania. Z tego powodu w ostatnich czasach parę ostrą z kotłów parowych wprowadza się bezpośrednio do specjalnego aparatu wyparnego, ustawionego przed działem pierwszym, w którym odparowuje ona roztwór surowy, skraplając się sama. W aparacie tym, który nosi nazwę działu zerowego, utrzymywane jest ciśnienie oparów

równe prężności pary odlotowej z silników parowych. Opary z działu zerowego łączą się z parą odlotową i wspólnym przewodem są doprowadzane do pierwszego działu. Schemat instalacji wyparnej z działem zerowym podany jest na rysunku 20.

Stosowanie działu zerowego, zamiast zaworu redukcyjnego, daje podwójną korzyść. Po pierwsze otrzymuje się parę nasyconą zamiast przegrzanej, po drugie zaś roztwór surowy ogrzewa się do temperatury wrzenia i częściowo odparowuje w działle zerowym, przez co wydajność wyparki wzrasta.

Jeżeli fabryka zużywa do celów grzejnych parę o temperaturze odpowiadającej temperaturze wrzenia roztworu, jak się to dzieje w cukrowni, to zamiast pary z kotła można do



Rys. 21. Schemat baterii wyparnej z działem zerowym i oddawaniem pary do celów grzejnych.

aparatu grzejnego skierować opary z tego działu wyparki, którego temperatura jest odpowiednia. W tym celu od przewodu, którym płyną opary od jednego aparatu wyparnego do następnego, prowadzi się odgałęzienie, którym część ich odchodzi do aparatu grzejnego. Aparat ten może służyć do podgrzewania roztworu surowego przed wyparką albo może wcale nie być związany z baterią wyparną. Garnek kondensacyjny aparatu grzejnego należy połączyć rurką z przewodem odprowadzającym opary z działu następnego.

Schemat wyparki wielodziałowej z oddawaniem pary do celów grzejnych podany jest na rysunku 21. Aparat grzejny A pobiera parę z działu II, jego garnek kondensacyjny K połączony jest z przewodem odprowadzającym opary z działu III.

Opary do celów grzejnych należy pobierać z działów jak najdalszych. Najkorzystniejsze z punktu widzenia gospodarki

cieplnej jest pobieranie oparów z ostatniego działu. Posiadają one jednak stosunkowo niską temperaturę i dlatego nie zawsze opary z tego działu mogą być wykorzystane do celów grzejnych. Aparat zużywający opary z wyparki wielodziałowej powinien je pobierać stale i w jednakowej ilości. Wszelkie przerwy i zaburzenia w jego pracy odbijają się ujemnie na działaniu całej baterii wyparnej.

Dość ważnym zagadnieniem w wielodziałowej baterii wyparnej jest odprowadzanie nie skraplających się gazów z komór grzejnych poszczególnych działów. Gazów tych w niektórych przypadkach jest dość dużo, gdyż oprócz powietrza, które zawsze w pewnej ilości jest rozpuszczone w wodzie, a więc i w roztworze, dochodzi jeszcze powietrze, które przez nieszczelności przy wyparce pod próżnią dostaje się do wnętrza aparatury oraz gazy, które czasami powstają wskutek reakcyj chemicznych zachodzących w roztworze podczas odparowywania (np. przy zagęszczaniu soku w wielodziałowej wyparce cukrowniczej wytwarza się dużo amoniaku).

Jeżeli nie skraplających się gazów jest mało, to najprościej odprowadzać je z komory grzejnej każdego działu do przestrzeni znajdującej się nad wrzącym roztworem tegoż działu. Para, która odchodzi z gazami, nie jest dla wyparki w tym przypadku stracona, gdyż wraz z oparami dostaje się do komory grzejnej działu następnego. Jeżeli gazów nie skraplających się jest dużo, to nie należy odprowadzać ich w sposób wyżej opisany, bowiem w komorze grzejnej ostatniego działu zbierze się tak dużo gazów, że odbije się to ujemnie na współczynniku przewodnictwa ciepła k i na wydajności całej baterii wyparnej. W tym przypadku najlepiej odprowadzać gazy z komory grzejnej każdego działu bezpośrednio do skraplacza. Strata pewnej ilości pary, która wraz z gazami dostanie się do skraplacza, będzie mniejszym złem niż obniżenie się wydajności baterii wyparnej wskutek nagromadzenia się dużej ilości gazów w ostatnich działach.

14. Obliczanie wyparki wielodziałowej

Obliczanie wyparki wielodziałowej polega na:

1. ułożeniu bilansów materiałowych dla całej wyparki i poszczególnych działów i obliczeniu ilości odparowywanego rozpuszczalnika w każdym działale i w całej wyparce;

2. ułożeniu bilansów cieplnych dla całej baterii wyparnej i poszczególnych działów i obliczeniu ilości potrzebnej pary ogrzewającej;
3. obliczeniu powierzchni ogrzewalnej i innych głównych wymiarów każdego działu.

Przy obliczaniu wyparki wielodziałowej znane są zwykle te same wielkości, co i przy obliczaniu wyparki jednodziałowej, a więc:

1. ilość roztworu surowego S kg/h;
2. stężenie roztworu surowego b_s w procentach wagowych;
3. „ „ „ zagęszczonego b_z w procentach wagowych;
4. temperatura roztworu surowego t_s °C;
5. prężność p kg/cm² i temperatura T^0 pary ogrzewającej;
6. ciśnienie p_k kg/cm² i temperatura t_k^0 w skraplaczu.

Przyjmując, że zagęszczamy roztwory wodne, oznaczamy przez:

W — ilość odparowywanej wody w całej baterii wyparnej w kg/h;

S_z — ilość roztworu zagęszczonego w kg/h, otrzymanego z wyparki;

w_1, w_2, w_3 ilości kg/h wody odparowywanej w poszczególnych działach;

S_1, S_2, S_3 ilości kg/h roztworu odpływające z poszczególnych działów;

D_1, D_2, D_3 ilości kg/h pary ogrzewającej poszczególne działy;

T_1, T_2, T_3 temperatury w °C pary ogrzewającej poszczególne działy;

t_1, t_2, t_3 temperatury wrzenia w °C w poszczególnych działach;

T'_1, T'_2, T'_3 temperatury w °C oparów opuszczających poszczególne działy;

t'_1, t'_2, t'_3 temperatury w °C skroplin w poszczególnych działach;

I_1, I_2, I_3 entalpie par ogrzewających poszczególne działy w kcal/kg;

- $i_1, i_2, i_3 \dots\dots\dots$ entalpie oparów opuszczających poszczególne działy w kcal/kg;
 $b_1, b_2, b_3 \dots\dots\dots$ stężenia roztworu w procentach wagowych w poszczególnych działach;
 c — ciepło właściwe w kcal/kg $^{\circ}\text{C}$ roztworu surowego;
 $G_1, G_2, G_3 \dots\dots\dots$ ilości kg/h oparów odprowadzanych z poszczególnych działów do celów grzejnych.

Bilans ciała stałego rozpuszczonego w cieczy można napisać w postaci podanego w rozdziale 12 równania:

$$\frac{S b_s}{100} = \frac{(S - W) b_z}{100},$$

skąd obliczamy ilość kg wody odparowywanej w całej wyparce wielodziałowej w przeciągu 1 godziny:

$$W = S \left(1 - \frac{b_s}{b_z} \right). \quad (3)$$

Bilans materiałowy całej wyparki wielodziałowej można napisać w postaci równania:

$$S = S_z + W.$$

Bilans zaś dowolnego n -tego działu tej wyparki w postaci analogicznego równania:

$$S_{n-1} = S_n + w_n.$$

Biorąc pod uwagę, że ilość roztworu dopływającego do n -tego działu wyparki wielodziałowej wynosi:

$$S_{n-1} = S - w_1 - w_2 - w_3 - \dots - w_{n-1},$$

a ilość roztworu odpływającego z tego działu równa się:

$$S_n = S_{n-1} - w_n = S - w_1 - w_2 - w_3 - \dots - w_n,$$

będziemy mogli ułożyć bilans ciała stałego rozpuszczonego w cieczy w postaci równania:

$$S \frac{b_s}{100} = S_n \frac{b_n}{100}$$

lub

$$S b_s = (S - w_1 - w_2 - w_3 - \dots - w_n) b_n.$$

Z równania tego obliczamy stężenie roztworu b_n w dowolnym n -tym dziale wyparki:

$$b_n = \frac{Sb_s}{S - w_1 - w_2 - w_3 \dots - w_n} \quad (11)$$

Ze wzorów powyższych możemy obliczyć tylko całkowitą ilość odparowywanej w wyparce wielodziałowej cieczy (ze wzoru 3) oraz stężenie roztworu w dowolnym dziale (ze wzoru 11). Do obliczenia zaś ilości cieczy odparowywanej w poszczególnych działach oraz zużycia pary ogrzewającej musimy ułożyć bilanse cieplne całej wyparki wielodziałowej i każdego działu oddzielnie.

Do pierwszego działu wyparki doprowadzamy ciepło:

1. z roztworem rozcieńczonym (surówką) w ilości $S \cdot c \cdot t_s$ kcal/h;
2. z parą ogrzewającą w ilości $D_1 \cdot I_1$ kcal/h;

odprowadzamy zaś ciepło:

1. z oparami w ilości $w_1 i_1$ kcal/h;
2. z roztworem zagęszczonym w ilości $Sc t_1 - w_1 t_1 = (Sc - w_1) t_1$ kcal/h;
3. ze skroplinami w ilości $D_1 t'_1$ kcal/h.

Jeżeli nie uwzględniać strat cieplnych przez promienianie i przewodnictwo, to dostarczona ilość ciepła równa się ilości odprowadzonej, wobec czego można napisać równanie bilansu cieplnego dla pierwszego działu w sposób następujący:

$$Sct_s + D_1 I_1 = w_1 i_1 + (Sc - w_1) t_1 + D_1 t'_1,$$

skąd

$$w_1 = D_1 \frac{I_1 - t'_1}{i_1 - t_1} + Sc \frac{t_s - t_1}{i_1 - t_1}$$

lub

$$w_1 = D_1 \varphi_1 + Sc \psi_1, \quad (12)$$

gdzie

$$\varphi_1 = \frac{I_1 - t'_1}{i_1 - t_1} \quad \text{oraz} \quad \psi_1 = \frac{t_s - t_1}{i_1 - t_1}.$$

Przeprowadzając analogiczne rozumowania, otrzymamy równanie bilansu cieplnego dla drugiego działu w postaci równania:

$$D_2 I_2 + (Sc - w_1) t_1 = w_2 i_2 + (Sc - w_1 - w_2) t_2 + D_2 t'_2,$$

skąd

$$w_2 = D_2 \frac{I_2 - t'_2}{i_2 - t_2} + (Sc - w_1) \frac{t_1 - t_2}{i_2 - t_2}$$

lub

$$w_2 = D_2 \varphi_2 + (Sc - w_1) \psi_2, \quad (13)$$

gdzie

$$\varphi_2 = \frac{I_2 - t'_2}{i_2 - t_2} \quad \text{oraz} \quad \psi_2 = \frac{t_1 - t_2}{i_2 - t_2}$$

oraz dla dowolnego n -tego działu

$$D_n I_n + (Sc - w_1 - w_2 \dots - w_{n-1}) t_{n-1} = w_n i_n + (Sc - w_1 - w_2 \dots - w_n) t_n + D_n \cdot t'_n,$$

skąd

$$w_n = D_n \frac{I_n - t'_n}{i_n - t_n} + (Sc - w_1 - w_2 \dots - w_{n-1}) \frac{t_{n-1} - t_n}{i_n - t_n}$$

lub

$$w_n = D_n \varphi_n + (Sc - w_1 - w_2 \dots - w_{n-1}) \psi_n, \quad (14)$$

gdzie

$$\varphi_n = \frac{I_n - t'_n}{i_n - t_n} \quad \text{oraz} \quad \psi_n = \frac{t_{n-1} - t_n}{i_n - t_n}. \quad (15)$$

Ułamek φ_n nazywamy współczynnikiem odparowalności n -tego działu; jest to stosunek ilości ciepła, którą oddaje 1 kg pary grzejnej w tym dziale do ilości ciepła potrzebnej na odparowanie 1 kg cieczy (wody) w tym samym dziale. Wskazuje on, jaka ilość oparów jest otrzymana w n -tym dziale wyparki przy skropleniu w jego komorze grzejnej 1 kg pary ogrzewającej.

Ułamek zaś ψ_n nosi nazwę współczynnika samo odparowalności. Jest to stosunek ilości ciepła, które wydzieli 1 kg wody przy przejściu z działu $n-1$ do działu n , do ilości ciepła potrzebnego na odparowanie 1 kg wody w dziale n . Wskazuje on, ile kilogramów oparów wydzieli się n -tym dziale wyparki wielodziałowej dzięki obniżeniu się temperatury wrzenia 1 kg roztworu przy przejściu z działu poprzedniego.

Współczynnik odparowalności φ jest w większości przypadków, jak przekonamy się później, wielkością mało róż-

nlącą się od 1, przy czym różnica ta jest tym mniejsza, im mniejsza jest różnica temperatur pary ogrzewającej i roztworu wrzącego. Natomiast współczynnik samoodparowalności ψ jest ułamkiem małym — tym mniejszym, im mniejsza jest różnica pomiędzy temperaturami wrzenia w dziale poprzednim i rozpatrywany. Na ogół jego wartość liczbową jest mniejsza od 0,05.

Opierając się na równaniu (14) możemy napisać wzory na ilość wody odparowywanej w trzecim, czwartym, piątym itd. dziale wyparki wielodziałowej.

$$w_3 = D_3 \varphi_3 + (Sc - w_1 - w_2) \psi_3, \quad (16)$$

$$w_4 = D_4 \varphi_4 + (Sc - w_1 - w_2 - w_3) \psi_4, \quad (17)$$

$$w_n = D_n \varphi_n + (Sc - w_1 - w_2 - w_3 - \dots - w_{n-1}) \psi_n. \quad (14)$$

Jeżeli wszystkie opary z każdego działu wyparki wielodziałowej odprowadzane są do komory grzejnej działu następnego, to jest jeżeli wyparka wielodziałowa pracuje bez oddawania oparów do celów grzejnych, to wtedy

$$D_2 = w_1, \quad D_3 = w_2, \quad D_4 = w_3, \quad \dots \quad D_n = w_{n-1}. \quad (18)$$

Uwzględniając równania (18) i wstawiając wartość w_1 ze wzoru (12) do równania (13), a otrzymaną w ten sposób wartość w_2 oraz wartość w_1 ze wzoru (12) do równania (16), otrzymamy następujące wzory:

$$w_1 = D_1 \varphi_1 + S \cdot c \cdot \psi_1, \quad (19a)$$

$$w_2 = D_1 (\varphi_1 \varphi_2 - \varphi_1 \psi_2) + Sc (\varphi_2 \psi_1 + \psi_2 - \psi_1 \psi_2) \quad (19b)$$

$$w_3 = D_1 (\varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 - \varphi_1 \varphi_3 \psi_2 - \varphi_1 \varphi_2 \psi_3 - \varphi_1 \psi_3 + \varphi_1 \psi_2 \psi_3) + \\ + Sc (\psi_1 \varphi_2 \varphi_3 + \psi_3 \varphi_3 + \psi_3 - \psi_1 \psi_2 \varphi_3 + \\ - \psi_1 \psi_3 \varphi_2 + \psi_1 \psi_2 \psi_3 - \psi_1 \psi_3 - \psi_2 \psi_3). \quad (19c)$$

Wobec czego ilość wody odparowanej w wyparce trzydziałowej wynosi:

$$W = w_1 + w_2 + w_3 = D_1 (\varphi_1 + \varphi_1 \varphi_2 + \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 - \\ - \varphi_1 \psi_2 - \varphi_1 \varphi_3 \psi_2 - \varphi_1 \psi_3 - \varphi_1 \varphi_2 \psi_3 + \varphi_1 \psi_2 \psi_3) + \\ + Sc (\psi_1 + \psi_2 + \psi_3 + \psi_1 \varphi_2 + \psi_1 \varphi_2 \varphi_3 + \varphi_3 \psi_2 - \\ - \psi_1 \psi_2 - \psi_1 \psi_3 - \psi_2 \psi_3 + \psi_1 \psi_2 \psi_3 - \varphi_2 \psi_1 \psi_3 - \\ - \varphi_3 \psi_1 \psi_2). \quad (20)$$

Gdy są znane temperatury wrzenia roztworu w każdym dziale wyparki wielodziałowej, to ze wzorów (15) obliczamy współczynnik φ i ψ zaś z równania (3) ilość wody W , którą trzeba odparować w wyparce i , wstawiając otrzymane wyniki do równania (20), obliczymy ilość kg pary D , którą należy doprowadzić do pierwszego działu wyparki, a z równań (19a), (19b) i (19c) ilości wody, które należy odparować w każdym dziale wyparki trójdziałowej.

Równanie (20) wyprowadzone dla wyparki trójdziałowej jest jednak zbyt skomplikowane. Oczywiście dla wyparok czterodziałowych, pięciodziałowych i więcej działowych równania analogiczne są znacznie dłuższe.

Można je uprościć przyjmując, że współczynniki odparowalności φ są równe jedności, a iloczyny dwóch lub więcej współczynników samoodparowalności ψ są tak małe, że można je przyjąć za równe 0. Założenia te dają mały błąd (znacznie mniejszy niż założenie, że wyparka wielodziałowa nie posiada strat cieplnych przez promieniowanie i przewodnictwo), natomiast bardzo upraszczają wzory i ułatwiają obliczenia. Przyjmując powyższe założenia otrzymamy, że:

$$w_1 = D_1 + S c \psi_1 \quad (21)$$

$$w_2 = D_1 (1 - \psi_2) + S c (\psi_1 + \psi_2) \quad (22)$$

$$w_3 = D_1 (1 - \psi_2 - 2 \psi_3) + S c (\psi_1 + \psi_2 + \psi_3) \quad (23)$$

Ilość wody odparowanej w całej wielodziałowej baterii wyparnej równa się oczywiście sumie ilości wody odparowywanej w poszczególnych działach, wobec czego dla wyparki trójdziałowej

$$W = w_1 + w_2 + w_3$$

lub

$$W = D_1 (3 - 2 \psi_2 - 2 \psi_3) + S c (3 \psi_1 + 2 \psi_2 + \psi_3) \quad (24)$$

W podobny sposób możemy obliczyć zależność pomiędzy W i D_1 dla wyparki dwudziałowej

$$W = D_1 (2 - \psi_2) + S c (2 \psi_1 + \psi_2); \quad (25)$$

dla czterodziałowej

$$W = D_1 (4 - 3 \psi_2 - 4 \psi_3 - 3 \psi_4) + S c (4 \psi_1 + 3 \psi_2 + 2 \psi_3 + \psi_4); \quad (26)$$

dla pięciodziałowej

$$W = D_1 (5 - 4 \psi_2 - 6 \psi_3 - 6 \psi_4 - 4 \psi_5) + S c (5 \psi_1 + 4 \psi_2 + 3 \psi_3 + 2 \psi_4 + \psi_5) \quad (27)$$

Ilość wody odparowywanej w czwartym i piątym dziale wyparpek wielodziałowych wynosi:

$$w_4 = D_1 (1 - \psi_2 - 2\psi_3 - 3\psi_4) + Sc (\psi_1 + \psi_2 + \psi_3 + \psi_4),$$

$$w_5 = D_1 (1 - \psi_2 - 2\psi_3 - 3\psi_4 - 4\psi_5) + Sc (\psi_1 + \psi_2 + \psi_3 + \psi_4 + \psi_5).$$

Ze wzorów powyższych obliczamy zużycie pary ogrzewającej wyparkę wielodziałową bez oddawania oparów do celów grzejnych.

W wyparce jednodziałowej zużycie pary wynosi:

$$D_1 = W - Sc \psi; \quad (28)$$

w dwudziałowej

$$D_1 = \frac{W - Sc (2\psi_1 + \psi_2)}{2 - \psi_2}; \quad (29)$$

w trójdziałowej

$$D_1 = \frac{W - Sc (3\psi_1 + 2\psi_2 + \psi_3)}{3 - 2\psi_2 - 2\psi_3}; \quad (30)$$

w czterodziałowej

$$D_1 = \frac{W - Sc (4\psi_1 + 3\psi_2 + 2\psi_3 + \psi_4)}{4 - 3\psi_2 - 4\psi_3 - 3\psi_4}; \quad (31)$$

w pięciodziałowej

$$D_1 = \frac{W - Sc (5\psi_1 + 4\psi_2 + 3\psi_3 + 2\psi_4 + \psi_5)}{5 - 4\psi_2 - 6\psi_3 - 6\psi_4 - 4\psi_5}; \quad (32)$$

Jeżeli wielodziałowa bateria wyparna oddaje opary do celów grzejnych w ilości G_1 kg/h z pierwszego działu, G_2 kg/h z drugiego, G_3 kg/h z trzeciego itd., to ilość kg wody odparowywanej w dziale, z którego pobieramy opary, będzie większa od ilości kg pary ogrzewającej, doprowadzanej do działu następnego. Wzory (18) wobec tego nie będą w tym przypadku słuszne, natomiast można napisać:

$$\begin{aligned} D_2 &= w_1 - G_1, & D_3 &= w_2 - G_2, \\ D_4 &= w_3 - G_3, & D_n &= w_{n-1} - G_{n-1}. \end{aligned} \quad (33)$$

Przepisując równanie (12) i podstawiając wartości D_2 i D_3 ze wzorów (33) do równań (13) i (16) otrzymamy:

$$w_1 = D_1 \varphi_1 + Sc \psi_1, \quad (12)$$

$$w_2 = (w_1 - G_1) \varphi_2 + (Sc - w_1) \psi_2, \quad (13a)$$

$$w_3 = (w_2 - G_2) \varphi_3 + (Sc - w_1 - w_2) \psi_3. \quad (16a)$$

Jeżeli dodamy stronami powyższe równania, następnie wyrugujemy w_1 i w_2 , podstawiając wartości ich ze wzorów (13a) i (12) oraz przyjmiemy dla uproszczenia, że współczynniki odparowalności φ_1, φ_2 i φ_3 są równe 1, a iloczyn dwóch współczynników samoodparowalności równają się 0, to otrzymamy, że ilość wody W , odparowywanej w przeciągu godziny w trójdziałowej wyparce z odprowadzaniem oparów do celów grzejnych wynosi:

$W = D_1 (3 - 2 \psi_2 - 2 \psi_3) + Sc (3 \psi_1 + 2 \psi_2 + \psi_3) - G_1 (2 - \psi_3) - G_2$,
a zużycie pary ogrzewającej równa się

$$D_1 = \frac{W - Sc (3 \psi_1 + 2 \psi_2 + \psi_3) + G_1 (2 - \psi_3) + G_2}{3 - 2 \psi_2 - 2 \psi_3}$$

Dla wyparki czterodziałowej

$W = D_1 (4 - 3 \psi_2 - 4 \psi_3 - 3 \psi_4) + Sc (4 \psi_1 + 3 \psi_2 + 2 \psi_3 + \psi_4) - G_1 (3 - 2 \psi_3 - 2 \psi_4) - G_2 (2 - \psi_4) - G_3$,

$$D_1 = \frac{W - Sc (4 \psi_1 + 3 \psi_2 + 2 \psi_3 + \psi_4) + G_1 (3 - 2 \psi_3 - 2 \psi_4) + G_2 (2 - \psi_4) + G_3}{4 - 3 \psi_2 - 4 \psi_3 - 3 \psi_4}$$

Dla wyparki pięciodziałowej

$W = D_1 (5 - 4 \psi_2 - 6 \psi_3 - 6 \psi_4 - 4 \psi_5) + Sc (5 \psi_1 + 4 \psi_2 + 3 \psi_3 + 2 \psi_4 + \psi_5) - G_1 (4 - 3 \psi_3 - 4 \psi_4 - 3 \psi_5) - G_2 (3 - 2 \psi_4 - 2 \psi_5) - G_3 (2 - \psi_5) - G_4$,

$$D_1 = \frac{W - Sc (5 \psi_1 + 4 \psi_2 + 3 \psi_3 + 2 \psi_4 + \psi_5) + G_1 (4 - 3 \psi_3 - 4 \psi_4 - 3 \psi_5) + G_2 (3 - 2 \psi_4 - 2 \psi_5) + G_3 (2 - \psi_5) + G_4}{5 - 4 \psi_2 - 6 \psi_3 - 6 \psi_4 - 4 \psi_5}$$

W podobny sposób można obliczyć ilość wody odparowywanej oraz zużycie pary dla baterii wyparnej, składającej się z sześciu, siedmiu i więcej działów oraz oddającej opary do celów grzejnych.

15. Różnica temperatur w wielodziałowej baterii wyparnej

Ze wzorów (24) — (28) wyprowadzonych w rozdziale 14 wynika, że do obliczenia zużycia pary w wyparce niezbędne jest ustalenie wartości współczynników samoodparowalności ψ

dla każdego działu wyparki wielodziałowej. Współczynniki te jednak, jak widać ze wzoru (15), zależą od temperatur wrzenia roztworu w poszczególnych działach. Z drugiej strony będziemy mogli obliczyć powierzchnie ogrzewalne aparatów wyparnych, gdy będziemy znali różnice między temperaturą pary ogrzewającej każdy dział a temperaturą wrzenia roztworu w tym dziale. Przystępując do obliczania wyparki wielodziałowej znamy tylko temperaturę pary ogrzewającej T , temperaturę panującą w skraplaczu t_k oraz temperaturę roztworu surowego t_s (rozcieńczonego). Nie znamy zaś ani temperatur wrzenia roztworu w poszczególnych aparatach baterii ani temperatur, w których opary opuszczają te działy wyparki, z którymi one wchodzi do działów następných.

Różnica pomiędzy temperaturą pary ogrzewającej poszczególne działy wyparki, a temperaturą wrzenia roztworu w tym dziale, wynosi odpowiednio:

$$\theta_1 = T_1 - t_1, \theta_2 = T_2 - t_2, \dots, \theta_n = T_n - t_n.$$

Jeżeli dodamy te różnice temperatur we wszystkich działach wyparki, to otrzymana suma będzie jednak mniejsza od ogólnej różnicy temperatur w wyparce wielodziałowej θ , która się równa różnicy pomiędzy temperaturą pary ogrzewającej a temperaturą oparów wchodzących do skraplacza.

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \dots + \theta_n < \theta, \text{ gdzie } \theta = T - t_k.$$

Wynika stąd, że ogólną różnicę temperatur w wielodziałowej baterii wyparnej θ można podzielić na dwie części: na użyteczny spadek temperatur $\theta_{u\dot{z}}$, który równa się:

$$\theta_{u\dot{z}} = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \dots + \theta_n$$

i zużywa się na przewodzenie ciepła od pary ogrzewającej do wrzącego roztworu oraz na nieużyteczny spadek temperatur θ_{str} , który dla przewodnictwa ciepła jest stracony. Oczywiście

$$\theta_{u\dot{z}} = \theta - \theta_{str}.$$

Straty różnicy temperatur w wyparce wielodziałowej powstają z kilku przyczyn, a mianowicie:

1. z powodu tego, że roztwór wrze w temperaturze wyższej od temperatury wrzenia czystej wody;

2. z powodu wzrostu temperatury wrzenia roztworu na skutek ciśnienia hydrostatycznego;
3. z powodu spadku temperatury pary ogrzewającej wskutek spadku jej prężności, zużytego na pokonanie oporów hydraulicznych podczas przepływu z jednego działu do następnego.

Rozpatrzmy te przyczyny po kolei. Zaczniemy od pierwszej.

Jak było wyjaśnione w rozdz. 4, temperatura wrzenia roztworu jest zależna od jego stężenia. Widać to wyraźnie z tablicy 1 oraz z wykresu na rysunku 4.

Jeżeli np. ogrzewać rozcieńczony roztwór wodny soli kuchennej pod ciśnieniem atmosferycznym, to wrzenie jego rozpocznie się w temperaturze nie wiele wyższej od 100° . W miarę jak roztwór ten będzie parować, temperatura wrzenia będzie wzrastać wskutek wzrostu stężenia, aż osiągnie prawie 109° . Przy dalszym podgrzewaniu temperatura zostanie stała, natomiast z roztworu będą wypadać kryształy soli kuchennej.

Para wodna, która się wydziela z wrzącego roztworu, posiada bezpośrednio nad jego powierzchnią temperaturę równą temperaturze wrzenia, a więc jest przegrzana, lecz już w pewnej odległości od powierzchni cieczy temperatura jej spada do 100° , bowiem część ciepła traci ona przez promieniowanie i przewodnictwo ścian aparatu, inną zaś zużywa na częściowe parowanie kropelek cieczy, porwanych przy wydzielaniu się z powierzchni roztworu. Widzimy więc, że temperatura oparów w pewnej odległości od cieczy zawsze jest niższa niż temperatura wrzącego roztworu i w dodatku tym niższa, im stężenie jego jest większe. Z tego powodu część ogólnej różnicy temperatur ginie bezużytecznie.

Drugą przyczyną wywołującą straty różnicy temperatur w wyparce jest, jak wspomniano, wzrost temperatury wrzenia na skutek ciśnienia hydrostatycznego.

Temperatura wrzenia cieczy zależy od ciśnienia. Im głębiej od swobodnej powierzchni wrzącego roztworu, tym ciśnienie jest większe, bowiem do ciśnienia, które opary wywierają na swobodną powierzchnię, dodaje się ciśnienie hydrostatyczne słupa cieczy. Dlatego im głębiej, tym temperatura wrzenia jest większa. Jeżeli na przykład w aparacie wyparnym wrze czysta woda pod ciśnieniem atmosferycznym, a długość rurek ustawionych pionowo wynosi 1,5 m, to ciśnienie panujące w dolnym końcu rurek wynosi:

$$p = 760 \left(1 + \frac{1,5}{10,33} \right) = 867,4 \text{ mm Hg.}$$

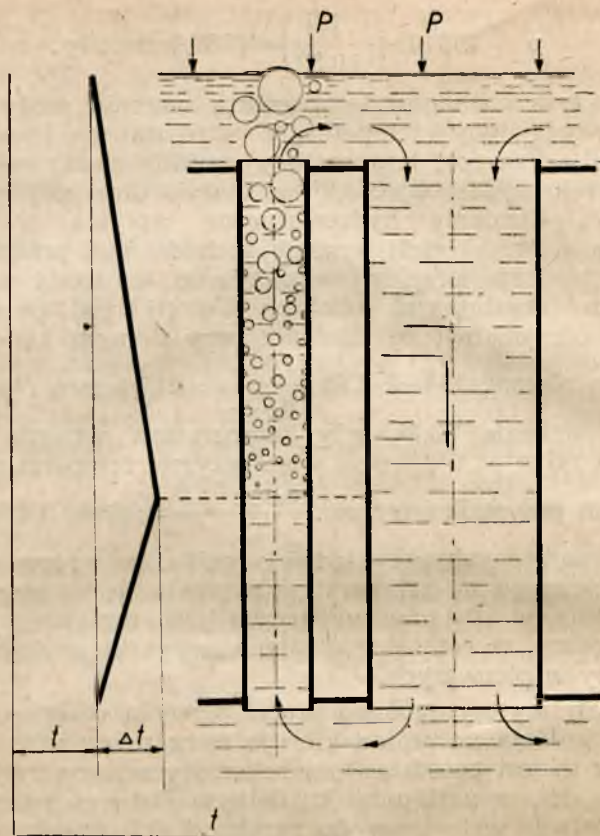
Przy tym ciśnieniu temperatura wrzenia wody wynosi $103,8^{\circ}$, wtedy gdy temperatura wrzenia na powierzchni tylko 100° . Przyrost temperatury wrzenia cieczy w dolnym końcu rurek wynosi więc $3,8^{\circ}$, a średnio dla całej ich wysokości $1,9^{\circ}$. Ciśnienie hydrostatyczne wpływa w znacznie większym stopniu, jeżeli wrzenie zachodzi pod próżnią. Rozpatrując ten sam przykład w założeniu, że woda wrze pod ciśnieniem (absolutnym) 100 mm Hg (tj. pod próżnią 660 mm Hg) otrzymamy, że ciśnienie przy dolnym końcu rurek będzie się równać $100 + 760 \frac{1,5}{10,33} = 217,4 \text{ mm Hg}$, a temperatura wrzenia $68,3^{\circ}$, gdy temperatura wrzenia na powierzchni tylko $51,6^{\circ}$, średni więc przyrost temperatury wrzenia w tym przypadku wynosi $\frac{68,3 - 51,6}{2} = \text{około } 8,4^{\circ}$.

Z rozpatrzonych przykładów wynika, że wpływ ciśnienia hydrostatycznego na temperaturę wrzenia jest tym większy, im ciśnienie w aparacie wyparnym jest mniejsze. Jest on więc większy w ostatnich działach wyparki wielodziałowej, a mniejszy w pierwszych.

Rozpatrzmy szczegółowo proces wrzenia roztworu w rurkach. Cyrkulacja naturalna kieruje ciecz przez rurę cyrkulacyjną, jak to jest przedstawione schematycznie na rysunku 22, z góry na dół, a następnie ku dolnym końcom rurek grzejnych. Roztwór wchodzący do rurek od dołu, posiada temperaturę górnych warstw, a więc niższą od temperatury wrzenia pod ciśnieniem panującym w dolnych końcach rurek. W miarę jak ciecz podnosi się do góry, ciśnienie maleje, a jednocześnie wskutek ogrzewania temperatura jej wzrasta. Na pewnej wysokości od dolnego końca rurek następuje wrzenie roztworu. Zaczynając od tego miejsca, aż do górnego końca rurek, roztwór paruje, jednocześnie jego temperatura obniża się do temperatury odpowiadającej ciśnieniu na danej wysokości.

Na rysunku 22 — dla ilustracji — podany jest wykres zależności temperatury roztworu od głębokości.

Ciśnienia hydrostatycznego wewnątrz rurek nie jest łatwo ustalić, albowiem ze względu na cyrkulację cieczy jest ono na głębokości h od swobodnej jej powierzchni mniejsze od



Rys. 22. Schemat cyrkulacji i temperatur wrzenia w aparacie Roberta.

ciśnienia słupa cieczy o wysokości h . Różnica równa się ciśnieniu hydrodynamicznemu cieczy przepływającej przez rurki. Gdy prędkość c cieczy w rurkach jest duża, jej ciśnienie hydrodynamiczne, równe $\frac{c^2}{2g}$, jest również duże, a ciśnienie hydrostatyczne $h_s = h - \frac{c^2}{2g}$ jest małe.

Widzimy, że wpływ ciśnienia hydrostatycznego jest skomplikowany i trudny do ujęcia we wzory matematyczne. Obli-

czanie średniej temperatury wrzenia w sposób podany na rozpatrzonych wyżej przykładach nie jest dokładne, albowiem ciecz w rurkach zmieszana jest z pęcherzykami pary i jej ciężar właściwy trudny jest do ustalenia nawet w sposób przybliżony, a ciśnienie hydrostatyczne trzeba ustalić w założeniu, że ciśnienie hydrodynamiczne jest równe zeru.

Otrzymuje się tym sposobem wyższą średnią temperaturę wrzenia, niż jest ona w rzeczywistości. Obliczanie zaś straty różnicy temperatur, wywołanej ciśnieniem hydrostatycznym, na podstawie tak ustalonej średniej temperatury wrzenia daje wyniki z pewnym zapasem.

W aparatach wyparnych systemu Kestnera wpływ ciśnienia hydrostatycznego na zmniejszenie różnicy temperatur jest mały, bo w nich proces odparowania zachodzi w cienkiej warstwie cieczy, jak zostało wyjaśnione w rozdziale 9 na rysunku 15 a.

Trzecią przyczyną wywołującą straty różnicy temperatur jest spadek prężności oparów przy przejściu z jednego działu do komory grzejnej następnego.

Opary, płynąc przewodem łączącym dział poprzedni z komorą grzejną następnego, pokonują na swej drodze szereg oporów hydraulicznych, jak tarcie o ścianki przewodu, zakrzywienia i załamania przewodu oraz zmiany jego przekroju. W kołpaku, posiadającym przegrody, opary przebywają krętą drogą, powodującą straty ciśnienia. Spadek ciśnienia jest tym większy, im przewód jest dłuższy oraz im więcej posiada zakrzywień, załamań i odgałęzień. Włączenie łapaczy kropli i piany do przewodów prowadzących opary z jednego działu do drugiego powiększa straty ciśnienia.

Z powodu oporów hydraulicznych w komorze grzejnej jakiegoś działu panuje niższe ciśnienie (a więc i temperatura) niż w przestrzeni nad swobodną powierzchnią roztworu w dziale poprzednim.

Spadek ciśnienia wywołany oporami hydraulicznymi można obliczyć posługując się wzorami podanymi w podręcznikach hydrauliki i na podstawie tych obliczeń — ustalić spadek różnicy temperatur. W praktyce przyjmuje się (na podstawie danych praktycznych), że spadek różnicy temperatur przy przejściu oparów z jednego działu do drugiego wynosi średnio $1,5^{\circ}$ na jeden dział.

Sumując straty różnicy temperatur wskutek wzrostu temperatury wrzenia roztworu, wskutek ciśnienia hydrosta-

tycznego oraz wskutek oporów hydraulicznych dla całej wielodziałowej baterii wyparnej, oraz dla każdego działu oddzielnie, znajdziemy całkowitą stratę różnicy temperatur Θ_{str} w $^{\circ}\text{C}$ dla baterii i dla każdego działu. Jeżeli teraz odejmiemy stratę różnicy temperatur dla całej wyparki od ogólnej różnicy temperatur w baterii wielodziałowej, to otrzymamy użyteczną różnicę $\Theta_{uż}$, która właśnie powoduje przechodzenie ciepła od pary ogrzewającej do odparowywanego roztworu

$$\Theta_{uż} = \Theta - \Theta_{str}.$$

16. Ustalenie temperatur wrzenia w poszczególnych działach wyparki

Jeżeli wyparka wielodziałowa pracuje z oddawaniem oparów do celów grzejnych, to zwykle temperatury oparów tych działów, które je oddają, są ustalone potrzebami aparatów grzejnych pobierających opary, a więc ustalona jest również i temperatura wrzenia w działach oddających opary. Inaczej przedstawia się sprawa temperatur wrzenia w wyparkach wielodziałowych, które nie oddają oparów do celów grzejnych. Dla tego rodzaju instalacji należy obliczyć temperatury wrzenia w poszczególnych działach. Bardzo często oblicza się również temperatury wrzenia i dla wyparek oddających opary na zewnątrz, natomiast dostosowuje się do nich instalacje grzejne.

Można by było ustalić temperatury wrzenia roztworu w poszczególnych działach wyparki wielodziałowej, gdyby znane były użyteczne różnice temperatur w każdym dziale. Straty różnicy temperatur w aparatach wyparnych oblicza się w sposób podany w rozdziale poprzednim, temperatura zaś pary doprowadzanej do pierwszego działu oraz temperatura oparów w skraplaczu są znane. Sposobem podanym poprzednio można również obliczyć użyteczną różnicę temperatur dla całej wielodziałowej baterii wyparnej $\Theta_{uż}$. Nie można jej jednak rozdzielić równomiernie na wszystkie działy, gdyż współczynniki przewodnictwa ciepła w nich nie są jednakowe: w ostatnich działach są mniejsze i wskutek tego powierzchnie ogrzewalne ostatnich działów baterii wyparnej wypadłyby przy jednakowych spadkach temperatur bardzo duże, a więc bardzo duże byłyby i same aparaty.

Ze względu na koszt budowy wielodziałowej baterii wyparnej, pożądane jest, aby jej ogólna powierzchnia ogrzewalna, to jest suma powierzchni ogrzewalnych wszystkich działów wyparki, była jak najmniejsza. W niektórych jednak przypadkach przy projektowaniu wyparki wielodziałowej chodzi o to, aby wszystkie działy baterii wyparnej posiadały jednakowe wymiary. Przy odpowiednim podziale użytecznej różnicy temperatur dla całej wyparki wielodziałowej na poszczególne działy można spełnić albo jeden, albo drugi warunek.

Obliczmy, jak należy podzielić użyteczną różnicę temperatur całej baterii wyparnej na poszczególne aparaty, ażeby ogólna powierzchnia ogrzewalna wyparki wielodziałowej była najmniejsza.

Oznaczając przez:

- F powierzchnię ogrzewalną w m^2 całej baterii wyparnej;
 $F_1, F_2, F_3 \dots$ powierzchnie ogrzewalne w m^2 poszczególnych działów wyparki wielodziałowej;
 $\theta_1, \theta_2, \theta_3 \dots$ użyteczną różnicę temperatur w poszczególnych działach w $^{\circ}C$;
 $k_1, k_2, k_3 \dots$ współczynnik przewodnictwa ciepła w poszczególnych działach;
 $Q_1, Q_2, Q_3 \dots$ ilość ciepła w $kcal/h$, przewodzoną przez powierzchnię ogrzewalną odpowiedniego działu —

możemy napisać następujące wzory:

$$F_1 = \frac{Q_1}{k_1 \theta_1}, \quad F_2 = \frac{Q_2}{k_2 \theta_2}, \quad F_3 = \frac{Q_3}{k_3 \theta_3} \dots F_n = \frac{Q_n}{k_n \theta_n}$$

Powierzchnia ogrzewalna całej baterii wyparnej równa się sumie powierzchni ogrzewalnych poszczególnych jej działów, a więc:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_n$$

lub

$$F = \frac{Q_1}{k_1 \theta_1} + \frac{Q_2}{k_2 \theta_2} + \frac{Q_3}{k_3 \theta_3} + \dots + \frac{Q_n}{k_n \theta_n}$$

Powierzchnia ogrzewalna całej wyparki wielodziałowej oraz powierzchnia ogrzewalna poszczególnych jej działów są funkcjami, jak widać z powyższych wzorów, różnicy temperatur. Powierzchnia F osiągnie wielkość najmniejszą wtedy,

gdy powierzchnie ogrzewalne każdego bez wyjątku działu będą miały wielkość możliwie najmniejszą.

W celu ustalenia, przy jakich wartościach różnicy temperatur powierzchnia ogrzewalna dowolnego działu posiada wartość najmniejszą, należy znaleźć pochodną powierzchni ogrzewalnej względem różnicy temperatur, przyrównać ją do zera i rozwiązać otrzymane równania:

$$\frac{dF}{d\theta} = \frac{Q_1}{k_1 \theta^2_1} = \frac{Q_2}{k_2 \theta^2_2} = \frac{Q_3}{k_3 \theta^2_3} = \dots = \frac{Q_n}{k_n \theta^2_n} = 0.$$

Z równań tych wynika następująca proporcjonalność:

$$\theta^2_1 : \theta^2_2 : \theta^2_3 : \dots : \theta^2_n = \frac{Q_1}{k_1} : \frac{Q_2}{k_2} : \frac{Q_3}{k_3} : \dots : \frac{Q_n}{k_n}$$

lub

$$\theta_1 : \theta_2 : \theta_3 : \dots : \theta_n = \sqrt{\frac{Q_1}{k_1}} : \sqrt{\frac{Q_2}{k_2}} : \sqrt{\frac{Q_3}{k_3}} : \dots : \sqrt{\frac{Q_n}{k_n}}$$

Wobec tego, że użyteczna różnica temperatur całej baterii wyparnej równa się sumie użytecznych różnic temperatur w poszczególnych działach, można napisać następujące równania:

$$\theta_{uz} = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \dots + \theta_n.$$

Widzimy, że użyteczną różnicę temperatur całej wyparki θ_{uz} należy podzielić pomiędzy poszczególne działy baterii proporcjonalnie do pierwiastków kwadratowych ze stosunków ilości ciepła przewodzonej przez powierzchnię ogrzewalną każdego działu do współczynnika przewodnictwa ciepła w tym dziale.

Stosując regułę podziału proporcjonalnego z arytmetyki elementarnej*), otrzymamy wartości użytecznej różnicy temperatur w każdym dziale baterii wyparnej:

*) Jeżeli jakąś liczbę A należy podzielić na części proporcjonalne do $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$, to jest, jeżeli $A = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n$ oraz $A_1 : A_2 : \dots : A_n = m_1 : m_2 : \dots : m_n$, to

$$A_1 = \frac{Am_1}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}, \quad A_2 = \frac{Am_2}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}, \quad \dots \quad A_n = \frac{Am_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}$$

$$\begin{aligned} \Theta_1 &= \frac{\Theta_{u\dot{z}} \sqrt{\frac{Q_1}{k_1}}}{\sqrt{\frac{Q_1}{k_1} + \frac{Q_2}{k_2} + \frac{Q_3}{k_3} + \dots + \frac{Q_n}{k_n}}}, \\ \Theta_2 &= \frac{\Theta_{u\dot{z}} \sqrt{\frac{Q_2}{k_2}}}{\sqrt{\frac{Q_1}{k_1} + \frac{Q_2}{k_2} + \frac{Q_3}{k_3} + \dots + \frac{Q_n}{k_n}}}, \\ \Theta_3 &= \frac{\Theta_{u\dot{z}} \sqrt{\frac{Q_3}{k_3}}}{\sqrt{\frac{Q_1}{k_1} + \frac{Q_2}{k_2} + \frac{Q_3}{k_3} + \dots + \frac{Q_n}{k_n}}}, \\ \Theta_n &= \frac{\Theta_{u\dot{z}} \sqrt{\frac{Q_n}{k_n}}}{\sqrt{\frac{Q_1}{k_1} + \frac{Q_2}{k_2} + \frac{Q_3}{k_3} + \dots + \frac{Q_n}{k_n}}}. \end{aligned} \quad (35)$$

Gdy użyteczne różnice temperatur w każdym dziale wy-
parki wielodziałowej $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \dots, \Theta_n$ będą odpo-
wiadać równaniom (35), to ogólna powierzchnia ogrzewalna
baterii wyparnej będzie posiadała wartość minimalną.

Jeżeli przy projektowaniu wielodziałowej baterii wypar-
nej zależy na tym, żeby wszystkie działy jej miały jednakową
powierzchnię ogrzewalną, to użyteczne różnice temperatur
w poszczególnych działach $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \dots, \Theta_n$ obli-
czamy w sposób następujący:

wobec tego, że:

$$\Theta_1 = \frac{Q_1}{k_1 F_1}, \quad \Theta_2 = \frac{Q_2}{k_2 F_2}, \quad \Theta_3 = \frac{Q_3}{k_3 F_3}, \quad \dots, \quad \Theta_n = \frac{Q_n}{k_n F_n}$$

można napisać, gdy $F_1 = F_2 = F_3 = \dots = F_n$, że

$$\Theta_1 : \Theta_2 : \Theta_3 : \dots : \Theta_n = \frac{Q_1}{k_1} : \frac{Q_2}{k_2} : \frac{Q_3}{k_3} : \dots : \frac{Q_n}{k_n}.$$

Stosując prawo podziału proporcjonalnego otrzymamy:

$$\Theta_1 = \frac{\Theta_{uz} \frac{Q_1}{k_1}}{\frac{Q_1}{k_1} + \frac{Q_2}{k_2} + \frac{Q_3}{k_3} + \dots + \frac{Q_n}{k_n}},$$

$$\Theta_2 = \frac{\Theta_{uz} \frac{Q_2}{k_2}}{\frac{Q_1}{k_1} + \frac{Q_2}{k_2} + \frac{Q_3}{k_3} + \dots + \frac{Q_n}{k_n}}, \quad (36)$$

$$\Theta_3 = \frac{\Theta_{uz} \frac{Q_3}{k_3}}{\frac{Q_1}{k_1} + \frac{Q_2}{k_2} + \frac{Q_3}{k_3} + \dots + \frac{Q_n}{k_n}}.$$

Znając:

1. użyteczne różnice temperatur $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3 \dots \Theta_n$,
2. straty różnicy temperatur w każdym dziale $\Theta'_1, \Theta'_2, \Theta'_3 \dots \Theta'_n$ i
3. temperaturę pary ogrzewającej pierwszy dział T_1 , można obliczyć temperatury wrzenia $t_1, t_2, t_3 \dots t_n$, temperatury oparów $T'_1, T'_2, T'_3 \dots T'_n$ oraz temperatury pary ogrzewającej $T_2, T_3 \dots T_n$ — dla każdego działu wyparki wielodziałowej, a więc:

$$T_1, \quad t_1 = T_1 - \Theta_1, \quad T'_1 = T_1 - \Theta_1 - \Theta'_1 + 1,5^{\circ}$$

$$T_2 = T_1 - \Theta_1 - \Theta'_1, \quad t_2 = T_2 - \Theta_2, \quad T'_2 = T_2 - \Theta_2 - \Theta'_2 + 1,5^{\circ}$$

$$T_3 = T_2 - \Theta_2 - \Theta'_2, \quad t_3 = T_3 - \Theta_3, \quad T'_3 = T_3 - \Theta_3 - \Theta'_3 + 1,5^{\circ}$$

$$T_n = T_{n-1} - \Theta_{n-1} - \Theta'_{n-1}, \quad t_n = T_n - \Theta_n, \quad T'_n = T_n - \Theta_n - \Theta'_n + 1,5^{\circ}$$

17. Współczynnik przewodnictwa ciepła k w aparatach wyparnych

Powierzchnię ogrzewalną aparatów grzejnych F obliczamy z równania:

$$F = \frac{Q}{k \theta \tau}$$

Stosując ten wzór do aparatów wyparnych wielodziałowej baterii trzeba pamiętać, że współczynniki przewodnictwa ciepła k dla każdego działu są inne. Dla pierwszego działu k jest największe, dla każdego zaś następnego coraz mniejsze, a dla ostatniego najmniejsze. Przyczyną tego jest zmniejszanie się w każdym następnym dziale zdolności pobierania ciepła przez roztwór od ścian aparatu, to jest zmniejszanie się współczynnika α_2 .

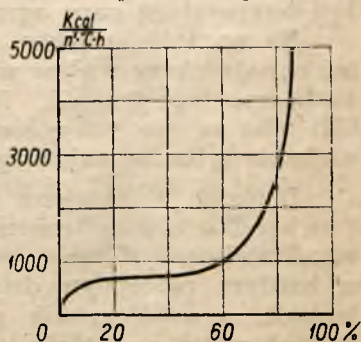
Jak wiadomo:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2},$$

gdzie:

- α_1 jest współczynnikiem oddawania ciepła przez parę ściankom;
- α_2 jest współczynnikiem pobierania ciepła przez roztwór od ścianek;
- λ jest przewodnictwem właściwym materiału, z którego wykonane są ścianki;
- δ jest grubością ścianek.

Współczynnik oddawania ciepła przez parę ściankom α_1 , można przyjmować dla wszystkich działów jednakowy, równy $10\,000 \text{ kcal/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot h$, jeżeli odprowadzanie powietrza i gazów nie skraplających się z komory grzejnej każdego działu jest dobre i odbywa się bezpośrednio do skraplacza. Gdy gazy i powietrze odprowadzane są z komory grzejnej do przestrzeni nad powierzchnią roztworu w tym samym dziale, to α_1 w ostatnich działach będzie wskutek nagromadzenia się dużych ilości gazów



Rys. 23. Wykres Alperta.

mniejszy niż w pierwszych. W tym przypadku należy przy określaniu a_1 uwzględnić wpływ gazów na współczynnik oddawania ciepła przez skraplającą się parę, posługując się wykresem *Alperta* podanym na rysunku 23.

Przewodnictwo właściwe ścianek λ , gdy rurki komory grzejnej wykonane są z miedzi wynosi $\lambda_{Cu} =$ od 260 do 300 kcal/m² · °C · h, a gdy są wykonane ze stali $\lambda_{Fe} =$ od 40 do 50 kcal/m² · °C · h.

Wartość współczynnika pobierania ciepła przez roztwór od ścianek rurek komory grzejnej a_2 zależy od wielu czynników, a mianowicie od prędkości cyrkulacji roztworu w rurekach W , od średnicy rurek d , od lepkości roztworu μ , od jego ciepła właściwego c , ciężaru właściwego γ i przewodnictwa właściwego λ .

Zależność tę można przedstawić w postaci wzoru:

$$a_2 = b w^{0,87} d^{-0,13} \left[\left(\frac{\gamma}{\gamma_{H_2O}} \right)^2 \frac{C}{C_{H_2O}} \frac{\mu_{H_2O}}{\mu} \right]^{0,435} \left(\frac{\lambda}{\lambda_{H_2O}} \right)^{0,565} \quad (37)$$

We wzorze tym b jest współczynnikiem zależnym od pewnej średniej temperatury t_{sr} , a mianowicie:

$$b = 1720 + 26 t_{sr}.$$

Co zaś dotyczy t_{sr} , to obliczamy ją ze wzoru empirycznego:

$$t_{sr} = 0,95 t + 0,05 T,$$

gdzie t — jest średnią temperaturą wrzenia roztworu, a T jest temperaturą pary ogrzewającej.

Na wartość liczbową a_2 w poszczególnych działach wyparki największy wpływ wywierają prędkość roztworu w rurekach oraz jego lepkość. Inne wielkości wchodzące do wzoru (37) albo są we wszystkich działach jednakowe, albo zmieniają się tylko w małych granicach.

Lepkość μ zwiększa się ze wzrostem stężenia roztworu i ze spadkiem jego temperatury. W wielodziałowej wyparce współprądowej stężenie wzrasta, a temperatura obniża się w każdym następnym dziale, wskutek czego silnie wzrasta lepkość, a współczynnik pobierania ciepła przez roztwór od ścianek rurek a_2 maleje i jest znacznie mniejszy w ostatnim dziale niż w pierwszym.

Prędkość cyrkulacji roztworu w rurkach można obliczyć w sposób następujący.

Oznaczmy przez:

w_o i w_c prędkość w m/sek oparów i cieczy w górnym końcu rurek grzejnych;

γ_o i γ_c ciężar właściwy w kg/m^3 oparów i cieczy;

p_o i p_c ciśnienie w kg/cm^2 oparów i cieczy w rurkach;

H_o i H_c ciśnienie w m oparów i cieczy;

φ stopień napełnienia rurek;

h wysokość rurek;

oraz przez w_m , γ_m , p_m , i H_m odpowiednie wielkości dla mieszaniny cieczy i oparów.

Wobec tego że:

$$H_c = \frac{p_c}{\gamma_c}, \quad H_m = \frac{p_m}{\gamma_m}, \quad H_c = \frac{w_c^2}{2g} \quad \text{i} \quad H_m = \frac{w_m^2}{2g},$$

można napisać, że:

$$p_c = \frac{\gamma_c \cdot w_c^2}{2g} \quad \text{i} \quad p_m = \frac{\gamma_m \cdot w_m^2}{2g}.$$

Dzieląc stronami, otrzymamy:

$$\frac{p_m}{p_c} = \frac{\gamma_m \cdot w_m^2}{\gamma_c \cdot w_c^2}, \quad \text{skąd} \quad w_c = w_m \sqrt{\frac{p_c \cdot \gamma_m}{p_m \cdot \gamma_c}}.$$

Bez wielkiego błędu można przyjąć, że prędkość mieszaniny w rurkach w_m równa się prędkości oparów w_o oraz że stosunek ciśnienia do ciężaru właściwego mieszaniny jest równy stosunkowi ciśnienia do ciężaru właściwego oparów, to jest, że:

$$\frac{p_m}{\gamma_m} = \frac{p_o}{\gamma_o} \quad \text{skąd} \quad H_m = H_o,$$

a w takim razie

$$w_c = w_o \sqrt{\frac{P_c \gamma_o}{P_o \gamma_c}}$$

Ciśnienie słupa cieczy w rurkach wynosi:

$$P_c = \varphi h \gamma_c,$$

a ciśnienie oparów

$$p_o = \frac{\gamma_o w_o^2}{2g}$$

Podstawiając powyższe wartości p_c i p_o do wzoru na w_c otrzymamy, że prędkość roztworu w rurkach wynosi:

$$w_c = \sqrt{2g\varphi h} \quad (38)$$

Znając prędkość cyrkulacji w każdym dziale możemy z równania (37) obliczyć a_2 , a w takim razie i współczynnik przewodnictwa k dla każdego działu wielodziałowej baterii wyparnej.

Ze wzorów i rozważań poprzednich wynika, że współczynnik przewodnictwa k możemy obliczyć, gdy znamy prędkość roztworu w rurkach, ich długość i średnicę oraz temperatury wewnątrz aparatów wyparnych. Ale średnica rurek i ich długość zależą od powierzchni ogrzewalnej F , która jest, jak wiadomo, funkcją k . Temperatura wewnątrz aparatu na podstawie wzorów (35) lub (36) także zależy od współczynnika k . Z tych powodów dokładne obliczenia wyparki wielodziałowej powinny być poprzedzone obliczeniami wstępnymi.

Podczas prowizorycznych obliczeń wstępnych ustala się przybliżoną wartość współczynnika przewodnictwa ciepła k dla pierwszego działu na podstawie rozporządzalnych danych, co zaś dotyczy prowizorycznych współczynników przewodnictwa dla innych działów to oblicza się je mnożąc współczynnik k przez liczbę mniejszą od jedności.

Wartości liczby β dla różnych działów, ustalone na podstawie obserwacji *Hausbrandta* podaje tablica 2.

Tablica 2

Wartości liczby β dla różnych działów

Wyparka	Roztwór	I	II	III
		β_1	β_2	β_3
Dwudzia- łowa	Soli kuchennej	1	0,32—0,56	—
	Boraksu	1	0,48	—
	Cukru	1	0,66	—
Trójdzia- łowa	Soli kuchennej	1	0,58	0,34
	Ekstraktów farbiarskich	1	0,84	0,26
	Ługu sodowego	1	0,85	0,38
	Cukru	1	0,70	0,33
	Niektórych innych ciał	1	0,77	0,47

M. D. Zujew podaje współczynniki przewodnictwa ciepła dla różnych działów czterodziałowych i pięciodziałowych wyparek cukrowniczych z rurkami miedzianymi; współczynniki te są umieszczone w tablicy 3.

Tablica 3

Współczynniki przewodnictwa ciepła w wyparce cukrowniczej

Nr działu	W y p a r k a	
	czterodziałowa	pięciodziałowa
I	1800 — 2100	2100 — 2400
II	1500 — 1800	1500 — 1800
III	900 — 1200	1200 — 1500
IV	300 — 600	720 — 900
V	—	360 — 480

Dla rurek stalowych wartości współczynnika przewodnictwa ciepła należy zmniejszyć o 25%.

18. Ilości działów w wyparce wielodziałowej

Teoretycznie, jeżeli nie uwzględniać strat ciepłych, jeden kg pary ogrzewającej, doprowadzonej z zewnątrz do pierwszego działu, może, jak było wyjaśnione w rozdz. 13, odparować tyle kilogramów wody z roztworu, z ilu działów składa się wielodziałowa wyparka, czyli zużycie pary w wielodziałowej baterii wyparnej jest teoretycznie odwrotnie proporc-

cyjonalne do ilości działów. W rzeczywistości, ze względu na straty ciepłne przez promieniowanie i przewodnictwo, na straty pary z gazami nie skraplającymi się oraz z innych powodów, zużycie pary jest większe niż teoretyczne.

Według A. G. Kasatkina rozchód pary na odparowanie 1 kg wody wynosi:

w wyparce jednodziałowej	—	1,1 kg
„ dwudziałowej	—	0,57 „
„ trójdziałowej	—	0,40 „
„ czterodziałowej	—	0,30 „
„ pięciodziałowej	—	0,27 „

Z liczb tych wynika, że przy zastosowaniu wyparki dwudziałowej zamiast jednodziałowej oszczędza się 0,53 kg pary na 1 kg odparowanej wody, czyli około 48%. Natomiast jeśli zamiast w czterodziałowej prowadzić odparowanie w pięciodziałowej baterii wyparnej, to oszczędność na parze będzie siedemnaście razy mniejsza i wyniesie tylko 0,03 kg na 1 kg odparowanej wody, co stanowi 10% oszczędności w odniesieniu do wyparki czterodziałowej. Oczywiście oszczędność na parze przy zastosowaniu sześciodziałowej baterii zamiast pięciodziałowej będzie jeszcze mniejsza. Koszty budowy natomiast wzrastają równomiernie ze zwiększeniem baterii o każdy następny dział, bowiem teoretycznie powierzchnia ogrzewalna wielodziałowej baterii wyparnej jest większa od wyparki jednodziałowej tyle razy, ile działów ona posiada. Wynika to z następujących rozumowań.

Powierzchnia ogrzewalna wyparki jednodziałowej przewodzi Q kcal/h ciepła, a każdy dział n -działowej wyparki $\frac{Q}{n}$ kcal/h. Różnica temperatur w wyparce jednodziałowej wynosi θ °C, w wyparce zaś n -działowej teoretycznie (tj. bez uwzględnienia strat) $\frac{\theta}{n}$ °C. Powierzchnia ogrzewalna wyparki jednodziałowej wynosi $F = \frac{Q}{K \theta}$, powierzchnia zaś ogrzewalna dowolnego działu wyparki n -działowej wynosi:

$$F_n = \frac{\frac{Q}{n}}{K \frac{\theta}{n}} = \frac{Q}{K \theta}$$

a powierzchnia ogrzewalna wszystkich n -działów wynosi

$$nF_n = n \frac{Q}{K \theta}.$$

W rzeczywistości powierzchnia ogrzewalna n -działowej wyparki jest większa niż n -ta wielokrotność powierzchni ogrzewalnej wyparki jednodziałowej.

Oprócz kosztów budowy wzrastają również i koszty obsługi wyparek wielodziałowych. Z tego wynika, że nie należy budować wielodziałowej baterii wyparnej o liczbie działów większej, niż to wypada z kalkulacji, uwzględniającej zarówno oszczędność na parze jak i koszty inwestycji oraz obsługi.

Nie zawsze zresztą tylko przyczyny ekonomiczne ograniczają ilość działów wielodziałowej baterii. Decydujące znaczenie w niektórych przypadkach ma użyteczna różnica temperatur.

Ażeby aparaty wyparne nie wypadły zbyt wielkie, różnica temperatur pomiędzy parą ogrzewającą w komorze grzejnej, a roztworem wewnątrz rurek nie powinna być mniejsza od 7° i tylko w wyjątkowych przypadkach może dochodzić do 5° . Jeżeli więc przy odparowywaniu jakiegoś roztworu użyteczna różnica temperatur wynosi na przykład 24° , to należy zastosować wyparkę o 3 działach; bowiem przy 4 działach użyteczna różnica temperatur w każdym dziale będzie mniejsza od 7° (nawet mniejsza od 6° , bo dojdą straty w czwartym dziale).

Na zakończenie rozpatrzmy przykład zaczerpnięty z rosyjskiego podręcznika A. G. Kasatkina (Osnownyje prociessy i aparaty chemiczieskiej tiechnologii).

Przykład. Ile działów powinna posiadać bateria wyparna przeznaczona do stężania 40% roztworu saletry amonowej ($\text{NH}_4 \text{NO}_3$) do 90%, jeżeli różnica temperatur pomiędzy parą ogrzewającą, a oparami w skraplaczu wynosi 98° .

Rozwiązanie. Z wykresu na rys. 4 i z tablicy 1 wynika, że 40% roztwór saletry amonowej wrze w temperaturze 106° , a 90% w temperaturze $146,5^{\circ}$.

Jeżeli zastosować wyparkę dwudziałową, to przyjmując dla uproszczenia, że powiększenie temperatury wrzenia w pierwszym dziale jest średnią arytmetyczną z powiększenia się temperatur wrzenia roztworów rozcieńczonego i zagęszczonego, otrzymamy, że w pierwszym dziale temperatura wrze-

nia roztworu jest większa od temperatury wrzenia pod tym samym ciśnieniem czystego rozpuszczalnika, tj. wody o

$$\frac{106 + 146,5}{2} - 100 = 26,25^{\circ}.$$

Nie uwzględniając strat różnicy temperatur spowodowanych ciśnieniem hydrostatycznym, a tylko straty wywołane wzrostem temperatury wrzenia oraz straty wskutek oporów hydraulicznych, otrzymamy, że straty różnicy temperatur wynoszą:

w I dziale	26,25 + 1,5	= 27,75 ^o
w II „	146,5 — 100 + 1,5	= 48 ^o
	razem:	75,75 ^o .

Użyteczna różnica temperatur wobec tego w wyparce dwudziałowej wynosi:

$$\Theta_{uz} = 98 - 75,75 = 22,25^{\circ},$$

na jeden więc dział przypada 11,1^o.

Jeżeli zastosować zamiast dwudziałowej trójdziałową baterię wyparną, to przyjmując i w tym przypadku, że powiększenie się temperatury wrzenia przypada równomiernie na wszystkie działy, otrzymamy, nie uwzględniając wpływu ciśnienia hydrostatycznego, że straty różnicy temperatur wynoszą:

w I dziale	$106 + \frac{1}{3}(146,5 - 106) - 100 + 1,5$	= 21 ^o
w II „	$106 + \frac{2}{3}(146,5 - 106) - 100 + 1,5$	= 34,5 ^o
w III „	146,5 — 100 + 1,5	= 48 ^o
		Razem: 103,5 ^o

Obliczyliśmy, że straty różnicy temperatur w wyparce trójdziałowej wyniosłyby więcej niż ogólna rozporządzalna różnica temperatur, podana w warunkach zadania. Z tego wynika, że wyparki trójdziałowej zastosować w danym przypadku nie można, należy zaś pozostać przy baterii wyparnej o dwóch działach. W ogóle roztwory stężone można odparowywać tylko w bateriach wyparnych o niewielkiej ilości działów.

19. Przykład obliczania wielodziałowej baterii wyparnej

Zadanie. Obliczyć wyparkę trójdziałową przeznaczoną do stężania w ciągu 1 godz. 6000 kg roztworu 15% saletry amonowej (NH_4NO_3) do 60%, jeżeli: 1. prężność pary ogrzewającej $P = 1,6$ at; 2. prężność oparów w III dziale $p_3 = 0,2$ at; 3. roztwór wchodzi podgrzany do temperatury 90° ; 4. ciepło właściwe roztworu $c = 0,9$ kcal/kg $^\circ\text{C}$; 5. współczynnik przewodnictwa ciepła w I dziale $k_1 = 2400$ kcal/m 2 $^\circ\text{C} \cdot \text{h}$; 6. wysokość rurek komory grzejnej $h = 1,5$ m.

Rozwiązanie. Ilość wody, którą należy odparować obliczamy ze wzoru (3)

$$W = S \left(1 - \frac{b_s}{b_z} \right) = 6000 \left(1 - \frac{15}{60} \right) = 4500 \text{ kg/h.}$$

Do ustalenia ilości wody odparowywanej w każdym dziale wyparki należy obliczyć ze wzorów (15) dla poszczególnych działów współczynniki odparowalności i samoodparowalności.

Do wzorów tych trzeba jednak wstawić wartości entalpii pary ogrzewającej i oparów oraz temperaturę wrzenia i temperaturę skroplin dla każdego działu, których to wartości nie znamy. Wobec tego przeprowadzamy obliczenia wstępne (próbne), zakładając, że różnica ciśnień:

$P - p_3 = 1,6 - 0,2 = 1,4$ at rozkłada się równomiernie na wszystkie działy wyparki. Jeżeli po wykonaniu obliczeń okaże się, że ciśnienia w działach są inne, powtórzmy obliczenia, przyjmując za podstawę rachunków nowe ciśnienia.

Ciśnienie w komorze grzejnej poszczególnych działów wobec tego wyniesie:

$$\text{w dziale I } P_1 = 1,6 \text{ kg/cm}^2,$$

$$\text{,, II } P_2 = 1,6 - \frac{1}{3} 1,4 = 1,14 \text{ kg/cm}^2,$$

$$\text{,, III } P_3 = 1,14 - \frac{1}{3} 1,4 = 0,67 \text{ kg/cm}^2.$$

Ciśnienie zaś nad roztworem (prężność oparów) w poszczególnych działach będzie:

$$\text{w dziale I } p_1 = 0,2 + \frac{2}{3} 1,4 = 1,14 \text{ kg/cm}^2,$$

$$\text{,, II } p_2 = 0,2 + \frac{1}{3} 1,4 = 0,67 \text{ kg/cm}^2,$$

$$\text{,, III } p_3 = 0,2 \text{ kg/cm}^2.$$

Entalpie i temperatury w poszczególnych działach odczytujemy z tablic dla pary wodnej nasyconej, przy czym w obliczeniach próbnych — dla uproszczenia — przyjmujemy, że roztwór wrze w tej samej temperaturze, co i czysta woda pod tym samym ciśnieniem

ciśnienie at	1,6	1,14	0,67	0,2,
temperatura °C	112,7	102,7	88,2	59,7,
entalpia kcal/kg	644,1	640,4	634,6	622,8,

Temperatury skroplin obliczamy jako średnią arytmetyczną z temperatury pary ogrzewającej i temperatury wrzenia roztworu w tym samym dziale. Wobec tego temperatury skroplin w poszczególnych działach będą:

$$\text{w dziale I } t'_1 = \frac{T_1 + t_1}{2} = \frac{112,7 + 102,7}{2} = 107,7 \text{ }^\circ,$$

$$\text{,, II } t'_2 = \frac{T_2 + t_2}{2} = \frac{102,7 + 88,2}{2} = 95,4 \text{ }^\circ,$$

$$\text{,, III } t'_3 = \frac{T_3 + t_3}{2} = \frac{88,2 + 59,7}{2} = 74,0 \text{ }^\circ.$$

Współczynniki odparowalności w poszczególnych działach obliczamy ze wzoru (15):

$$\varphi_n = \frac{I_n - t'_n}{i_n - t'_n},$$

$$\varphi_1 = \frac{644,1 - 107,7}{640,4 - 102,7} = 0,998,$$

$$\varphi_2 = \frac{640,4 - 95,4}{634,6 - 88,2} = 0,998,$$

$$\varphi_3 = \frac{634,6 - 74,0}{622,8 - 59,7} = 0,995.$$

Współczynnik samoodparowalności ze wzoru:

$$\psi_n = \frac{t_{n-1} - t_n}{i_n - t_n}$$

$$\psi_1 = \frac{90 - 102,7}{640,0 - 102,7} = - 0,024,$$

$$\psi_2 = \frac{102,7 - 88,2}{634,6 - 88,2} = + 0,027,$$

$$\psi_3 = \frac{88,2 - 59,7}{622,3 - 59,7} = + 0,051.$$

Zużycie pary ogrzewającej obliczamy ze wzoru (30):

$$D_1 = \frac{4500 - 6000 \cdot 0,9 (-3 \cdot 0,024 + 2 \cdot 0,027 + 0,051)}{3 - 2 \cdot 0,027 - 2 \cdot 0,051} = 1519 \text{ kg/h.}$$

Ilość wody odparowywanej w poszczególnych działach obliczamy ze wzorów (12), (18), (13) i (16):

$$w_1 = 1519 \cdot 0,998 - 6000 \cdot 0,9 \cdot 0,024 = 1386 \text{ kg/h}$$

$$w_2 = 1386 \cdot 0,998 + (6000 \cdot 0,9 - 1386) \cdot 0,027 = 1491 \text{ kg/h}$$

$$w_3 = 1491 \cdot 0,995 + (6000 \cdot 0,9 - 1386 - 1491) \cdot 0,051 = 1612 \text{ kg/h.}$$

Ogólna ilość wyparowanej wody wynosi:

$$W = 1386 + 1491 + 1612 = 4489 \text{ kg.}$$

Poprzednio obliczyliśmy, że odparowano $W = 4500$ kg. Różnica wynosząca $4500 - 4489 = 11$ kg/h, stanowi

$$\frac{4500 - 4489}{4500} 100 = 0,26\%.$$

Powstała ona wskutek tego, że wzór (30) nie jest dokładny, bowiem był wyprowadzony w założeniu, że $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 1$ oraz że iloczyny $\psi_1 \psi_2 = \psi_2 \psi_3 = \psi_1 \psi_3 = 0$, co nie jest, jak wynika z obliczeń, matematycznie ściśle.

Rozkładając różnicę 11 kg/h równomiernie na wszystkie działy, otrzymamy:

$$w_1 = 1389 \text{ kg/h, } w_2 = 1495 \text{ kg/h i } w_3 = 1616 \text{ kg/h.}$$

Teoretyczne zużycie ciepła bez uwzględnienia strat na promieniowanie i przewodnictwo wynosi w poszczególnych działach:

$$Q_1 = w_1 (i_1 - t_s) = 1389 (640,5 - 90) = 764\,645 \text{ kcal/h,}$$

$$Q_2 = w_2 (i_2 - t_2) = 1495 (634,6 - 88,2) = 815\,971 \text{ ,,}$$

$$Q_3 = w_3 (i_3 - t_3) = 1616 (622,3 - 59,7) = 909\,162 \text{ ,,}$$

Stężenie roztworu w poszczególnych działach obliczamy ze wzoru (11):

$$b_1 = \frac{S b_s}{S - w_1} = \frac{6\,000 \cdot 15}{6\,000 - 1389} = 19,52\%,$$

$$b_2 = \frac{S b_s}{S - w_1 - w_2} = \frac{6\,000 \cdot 15}{6\,000 - 1389 - 1495} = 28,88\%,$$

$$b_3 = 60\%.$$

Straty różnicy temperatur wywołane wzrostem temperatury wrzenia roztworu w porównaniu z temperaturą wrzenia wody obliczamy odczytując z wykresu na rys. 4 lub z tablicy 1 temperaturę wrzenia roztworu pod atmosferycznym ciśnieniem i odejmując temperaturę wrzenia wody pod tym ciśnieniem. Otrzymujemy dla:

$$\text{działu I } \Delta t' = 102,46 - 100 = 2,46^\circ,$$

$$\text{,, II } \Delta t'' = 103,97 - 100 = 3,97^\circ,$$

$$\text{,, III } \Delta t''' = 113,57 - 100 = 13,57^\circ.$$

Straty różnicy temperatur wywołane ciśnieniem hydrostatycznym obliczymy przyjmując, że ciężar właściwy mieszaniny roztworu i pęcherzyków pary w rurce równa się 1, wtedy ciśnienie w dolnym końcu rurek wzrośnie o $\Delta p = \frac{h}{10} = 0,15$ kg/cm². Wobec czego ciśnienie to wynosić będzie:

$$\text{w dziale I } p' = 1,14 + 0,15 = 1,29 \text{ kg/cm}^2,$$

$$\text{,, ,, II } p'' = 0,67 + 0,15 = 0,82 \text{ ,,}$$

$$\text{,, ,, III } p''' = 0,20 + 0,15 = 0,35 \text{ ,,}$$

Przyrost temperatury wrzenia roztworu wywołany ciśnieniem hydrostatycznym obliczamy ze wzoru: $\Delta t = \frac{t + t_d}{2} - t$, odczytując z tablic pary wodnej nasyconej temperaturę t_d wrzenia wody pod ciśnieniem panującym w dolnym końcu rurek. Otrzymujemy:

$$\begin{aligned} \text{dla działu I} \quad \Delta t_1 &= \frac{102,7 + 106,22}{2} - 102,7 = 1,76^\circ, \\ \text{,, ,, II} \quad \Delta t_2 &= \frac{88,2 + 93,64}{2} - 88,2 = 2,72^\circ, \\ \text{,, ,, III} \quad \Delta t_3 &= \frac{59,7 + 72,05}{2} - 59,7 = 6,17^\circ. \end{aligned}$$

Ogólne straty różnicy temperatur dla poszczególnych działów wynoszą:

$$\begin{aligned} \text{dla działu I} \quad \Theta' &= 2,46 + 1,76 = 4,22^\circ, \\ \text{,, ,, II} \quad \Theta'' &= 3,97 + 2,72 + 1,5 = 8,19^\circ, \\ \text{,, ,, III} \quad \Theta''' &= 13,57 + 6,17 + 1,5 = 21,24^\circ, \\ &\text{razem } \Theta_{str} \quad 33,65^\circ. \end{aligned}$$

Strata różnicy temperatur dla całej baterii wynosi $\Theta_{str} = 33,65^\circ$. Wobec tego, że ogólna różnica temperatur równa się

$$\Theta = 112,7 - 59,7 = 53^\circ,$$

użyteczna różnica temperatur dla całej baterii wynosi:

$$\Theta_{uz} = \Theta - \Theta_{str} = 53 - 33,65 = 19,35^\circ.$$

Ogólną użyteczną różnicę temperatur podzielimy pomiędzy wszystkie działy baterii w założeniu, że ogólna powierzchnia ogrzewalna wyparki wielodziałowej powinna mieć wielkość możliwie najmniejszą; w tym celu stosujemy wzory (35).

Przyjmujemy z tablicy 3, że:

$$k_2 = 0,77 k_1, \quad \text{a} \quad k_3 = 0,47 k_1,$$

wtedy

$$\Theta_1 = \frac{19,35 \sqrt{\frac{764 \ 645}{k_1}}}{\sqrt{\frac{764 \ 645}{k_1}} + \sqrt{\frac{815 \ 971}{0,77 k_1}} + \sqrt{\frac{909 \ 162}{0,47 k_1}}} = 5,14^\circ,$$

$$\Theta_2 = \frac{19,35 \sqrt{\frac{815\,971}{0,77 k_1}}}{\sqrt{\frac{764\,645}{k_1}} + \sqrt{\frac{815\,971}{0,77 k_1}} + \sqrt{\frac{909\,162}{0,47 k_1}}} = 6,04^\circ,$$

$$\Theta_3 = \frac{19,35 \sqrt{\frac{909\,162}{0,47 k_1}}}{\sqrt{\frac{764\,645}{k_1}} + \sqrt{\frac{815\,971}{0,77 k_1}} + \sqrt{\frac{909\,162}{0,47 k_1}}} = 8,17^\circ.$$

Możemy teraz obliczyć temperatury oparów w każdym dziale:

$$\begin{aligned} \text{w dziale III } T'_3 &= 59,7^\circ, \\ t_3 &= 59,7 + 13,57 + 6,17 = 79,44^\circ, \\ \text{,, II } T'_2 &= 59,7 + 21,24 + 8,17 = 89,11^\circ, \\ t_2 &= 89,11 + 3,97 + 2,72 = 95,8^\circ, \\ \text{,, I } T'_1 &= 89,11 + 8,19 + 6,04 = 103,34^\circ, \\ t_1 &= 103,34 + 2,46 + 1,76 = 107,56^\circ. \end{aligned}$$

Mając temperatury oparów odczytujemy z tablicy 4 ciśnienia nad cieczą w poszczególnych działach:

$$\begin{aligned} \text{w dziale I } p_1 &= 1,16 \text{ kg/cm}^2, \\ \text{,, II } p_2 &= 0,69 \text{ ,,} \\ \text{,, III } p_3 &= 0,2 \text{ ,,} \end{aligned}$$

Porównując ciśnienia w poszczególnych działach wyparki, otrzymane jako wynik rachunku opartego na ciśnieniach próbnych, przyjętych na początku, stwierdzamy stosunkowo małą niezgodność. W pierwszym dziale na przykład przyjęliśmy ciśnienie $p_1 = 1,14 \text{ kg/cm}^2$, a z obliczenia wypadło $p_1 = 1,16 \text{ kg/cm}^2$, w drugim przyjęliśmy $p_2 = 0,67 \text{ kg/cm}^2$, z rachunku zaś wypadło $p_2 = 0,69 \text{ kg/cm}^2$. Chociaż niezgodność jest niewielka, ma ona jednak pewien wpływ na wyniki i dlatego, uznając poprzednie obliczenia za wstępne, przeprowadzmy obecnie już obliczenia właściwe. Z tablicy dla pary wodnej nasyconej wypisujemy temperatury i entalpie dla nowych ciśnień:

ciśnienia 1,6 kg/cm², 1,16 kg/cm², 0,69 kg/cm², 0,2 kg/cm²,
 temperatury 112,7 °, 103,34 °, 89,11 °, 59,7 °,
 entalpie 644,1 kcal/kg, 640,6 kcal/kg, 634,9 kcal/kg, 622,8 kcal/kg.

Obliczamy temperatury skroplin, przyjmując temperatury wrzenia w poszczególnych działach ze wstępnych obliczeń:

$$t'_1 = \frac{112,7 + 107,57}{2} = 110,1 \text{ °},$$

$$t'_2 = \frac{103,34 + 95,8}{2} = 99,5 \text{ °},$$

$$t'_3 = \frac{89,11 + 79,44}{2} = 84,3 \text{ °}.$$

Współczynniki odparowalności i samoodparowalności:

$$\varphi_1 = \frac{644,1 - 110,1}{640,6 - 103,34} = 0,994,$$

$$\varphi_2 = \frac{640,6 - 99,5}{634,9 - 89,11} = 0,993,$$

$$\varphi_3 = \frac{634,9 - 84,3}{622,8 - 59,7} = 0,978,$$

$$\psi_1 = \frac{90 - 103,34}{640 - 103,34} = -0,025,$$

$$\psi_2 = \frac{103,34 - 89,11}{634,9 - 89,11} = 0,026,$$

$$\psi_3 = \frac{89,11 - 59,7}{625,8 - 59,7} = 0,052.$$

Mając współczynniki φ i ψ , obliczamy zużycie pary w wyparce D_1 oraz ilość wody odparowywanej w każdym działach w_1 , w_2 i w_3 :

$$D_1 = \frac{4500 - 6000 \cdot 0,9(-3 \cdot 0,025 + 2 \cdot 0,026 + 0,052)}{3 - 2 \cdot 0,026 - 2 \cdot 0,052} = 1527 \text{ kg/h},$$

$$w_1 = 1527 \cdot 0,994 - 6000 \cdot 0,9 \cdot 0,025 = 1383 \text{ kg/h}$$

$$w_2 = 1383 \cdot 0,993 - (6000 \cdot 0,9 - 1383) \cdot 0,026 = 1478 \text{ kg/h},$$

$$w_3 = 1493 \cdot 0,978 - (6000 \cdot 0,9 - 1383 - 1478) \cdot 0,052 = 1578 \text{ kg/h}.$$

Ogółem we wszystkich działach wyparowano:

$$W = 1383 + 1478 + 1578 = 4439 \text{ kg/h.}$$

Różnicę $4500 - 4439 = 61 \text{ kg/h}$ rozkładamy na wszystkie działy i otrzymujemy ostatecznie:

$$w_1 = 1403 \text{ kg/h, } w_2 = 1498 \text{ kg/h, } w_3 = 1599 \text{ kg/h.}$$

Obliczmy teraz ilość ciepła, którą przewodzi powierzchnia ogrzewalna każdego działu:

$$Q_1 = 1403 (640,6 - 90) = 772\,492 \text{ kcal/h,}$$

$$Q_2 = 1498 (634,9 - 89,11) = 817\,593 \text{ kcal/h,}$$

$$Q_3 = 1599 (622,8 - 59,7) = 900\,396 \text{ kcal/h.}$$

Stężenia w poszczególnych działach wynoszą:

$$b_1 = \frac{6000 \cdot 15}{6000 - 1403} = 19,57\%,$$

$$b_2 = \frac{6000 \cdot 15}{6000 - 1403 - 1498} = 29,04\%,$$

$$b_3 = 60\%.$$

Straty różnicy temperatur wywołane wzrostem temperatury wrzenia roztworu:

$$\Delta t' = 102,47 - 100 = 2,47^\circ,$$

$$\Delta t'' = 103,99 - 100 = 3,99^\circ,$$

$$\Delta t''' = 113,57 - 100 = 13,57^\circ.$$

Cięśnienia na dolnym końcu rurek:

$$p' = 1,16 + 0,15 = 1,31 \text{ kg/cm}^2,$$

$$p'' = 0,69 + 0,15 = 0,84 \text{ kg/cm}^2,$$

$$p''' = 0,20 + 0,15 = 0,35 \text{ kg/cm}^2.$$

Straty różnicy temperatur wywołane ciśnieniem hydrostatycznym:

$$\Delta t_1 = \frac{103,34 + 106,8}{2} - 103,34 = 1,73^\circ,$$

$$\Delta t_2 = \frac{89,11 + 94,28}{2} - 89,11 = 2,58^\circ,$$

$$\Delta t_3 = \frac{59,7 - 72,05}{2} - 59,7 = 6,17^\circ.$$

Ogólne straty różnicy temperatur w poszczególnych działach:

$$\theta' = 2,47 + 1,73 = 4,20^{\circ},$$

$$\theta'' = 3,99 + 2,58 + 1,5 = 8,07^{\circ},$$

$$\theta''' = 13,57 + 6,17 + 1,5 = 21,24^{\circ},$$

$$\text{Razem: } \theta_{str} = 33,51^{\circ}.$$

Użyteczną różnicę temperatur $\theta_{u\dot{z}} = 112,7 - 59,7 - 33,51 = 19,49^{\circ}$ rozdzielamy pomiędzy wszystkie działy baterii wyparnej stosując wzory (35):

$$\theta_1 = \frac{19,49 \sqrt{\frac{772\,492}{k_1}}}{\sqrt{\frac{772\,492}{k_1} + \frac{817\,593}{0,77 k_1} + \frac{900\,396}{0,47 k_1}}} = 5,17^{\circ},$$

$$\theta_2 = \frac{19,49 \sqrt{\frac{817\,593}{0,77 k_1}}}{\sqrt{\frac{772\,492}{k_1} + \frac{817\,593}{0,77 k_1} + \frac{900\,396}{0,47 k_1}}} = 6,09^{\circ},$$

$$\theta_3 = \frac{19,49 \sqrt{\frac{900\,396}{0,47 k_1}}}{\sqrt{\frac{772\,492}{k_1} + \frac{817\,593}{0,77 k_1} + \frac{900\,396}{0,47 k_1}}} = 8,23^{\circ}.$$

Znając użyteczne różnice temperatur oraz straty różnicy temperatur dla każdego działu, możemy obliczyć w celu sprawdzenia rachunków temperaturę i ciśnienie oparów nad poziomem cieczy w każdym dziale:

$$\text{w dziale I } T'_1 = 112,7 - 5,17 - 4,20 = 103,33^{\circ},$$

$$\text{„ „ II } T'_2 = 103,33 - 6,09 - 8,07 = 89,17^{\circ},$$

$$\text{„ „ III } T'_3 = 89,17 - 8,23 - 21,24 = 59,70^{\circ}.$$

Temperaturom powyższym odpowiadają w tablicy dla pary wodnej nasyconej następujące ciśnienia:

$$\text{w dziale I } p_1 = 1,164 \text{ kg/cm}^2,$$

$$\text{„ „ II } p_2 = 0,692 \text{ kg/cm}^2,$$

$$\text{„ „ III } p_3 = 0,20 \text{ kg/cm}^2.$$

Porównując otrzymane ciśnienia i temperatury z ciśnieniami i temperaturami wyjściowymi, na których zostały oparte obliczenia właściwe, widzimy, że zgadzają się one ze sobą w dostatecznym stopniu. Różnica w temperaturach jest mniejsza od 0,1%, a różnica w ciśnieniach mniejsza od 0,4%. W obliczeniach tych nie są uwzględnione straty ciepłne przez promieniowanie i inne. Należy je wziąć pod uwagę przy obliczeniach konstrukcyjnych aparatów wyparnych.

Po obliczeniu użytecznych różnic temperatur dla poszczególnych działów baterii wyparnej można przystąpić do obliczania powierzchni ogrzewalnej każdego działu wielodziałowej baterii. W tym celu stosujemy znany wzór:

$$F_n = \frac{Q_n}{k_n \Theta_n},$$

przy czym $k_1 = 2\,400 \text{ kcal/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h}$ (z warunków zadania).

$$k_2 = k_1 \cdot 0,77 = 1\,848 \text{ kcal/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h},$$

$$k_3 = 0,47 k_1 = 1\,128 \text{ kcal/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h}.$$

Wobec tego powierzchnie ogrzewalne poszczególnych działów obliczanej wyparki wynoszą:

$$\text{działu I } F_1 = \frac{772\,492}{2\,400 \cdot 5,17} = 62,3 \text{ m}^2,$$

$$\text{„ II } F_2 = \frac{817\,593}{1\,848 \cdot 6,09} = 72,7 \text{ m}^2,$$

$$\text{„ III } F_3 = \frac{900\,396}{1\,128 \cdot 8,23} = 97,0 \text{ m}^2.$$

Ogólna powierzchnia ogrzewalna wyparki wynosi:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 = 62,3 + 72,7 + 97,0 \text{ m}^2 = 232 \text{ m}^2.$$

Gdyby wielodziałową baterię wyparną należało obliczyć w założeniu, że wszystkie jej aparaty wyparne posiadają jednakowe powierzchnie ogrzewalne, to do podziału użytecznej różnicy temperatur całej wyparki na poszczególne działy trzeba stosować wzory (36). Wtedy:

$$\Theta_1 = \frac{19,49 \cdot \frac{772\,492}{k_1}}{\frac{772\,492}{k_1} + \frac{817\,593}{0,77 k_1} + \frac{900\,396}{0,47 k_1}} = 3,99 ^\circ,$$

$$\Theta_2 = \frac{19,49 \frac{817\,593}{0,77 k_1}}{\frac{772\,492}{k_1} + \frac{817\,593}{0,77 k_1} + \frac{900\,396}{0,47 k_1}} = 5,51^\circ,$$

$$\Theta_3 = \frac{19,49 \frac{900\,396}{0,47 k_1}}{\frac{772\,492}{k_1} + \frac{817\,593}{0,77 k_1} + \frac{900\,396}{0,47 k_1}} = 9,99^\circ,$$

a powierzchnie ogrzewalne wynoszą:

$$\text{działu I } F' = \frac{772\,492}{2\,400 \cdot 3,99} = 80,64 \text{ m}^2,$$

$$\text{„ II } F'' = \frac{817\,593}{1\,848 \cdot 5,51} = 80,30 \text{ m}^2,$$

$$\text{„ III } F''' = \frac{900\,396}{1\,128 \cdot 9,99} = 79,90 \text{ m}^2.$$

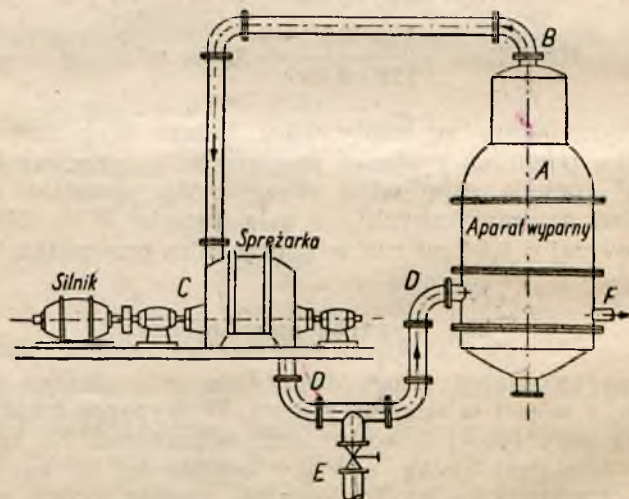
Otrzymaliśmy, że każdy dział baterii wyparnej w tym przypadku powinien posiadać powierzchnię ogrzewalną równą 80,28 m² (pewna minimalna niezgodność powstała wskutek zaokrągleń arytmetycznych), a cała bateria $F = 240,84 \text{ m}^2$, a więc więcej o 8,84 m² niż w poprzednim przypadku.

20. Wyparka mechaniczna

Wyparka wielodziałowa daje duże oszczędności w zużyciu pary, a więc i w zużyciu paliwa. W wyparce trójdziałowej np. 1 kg pary żywej z kotła może odparować 2,5 kg wody, w czterodziałowej 3,3 kg, a w pięciodziałowej 3,7 kg. Pomimo tych zalet wyparkę wielodziałową nie zawsze można stosować, bowiem na przeszkodzie stoi dość wysoka temperatura wrzenia w pierwszym dziale, nawet przy dość znacznej próżni w ostatnim. [W zadaniu np., które zostało szczegółowo rozpatrzone w poprzednim rozdziale, roztwór w pierwszym dziale trójdziałowej wyparki posiadał temperaturę $t_1 = 112,7 - 5,13 = 107,57$, chociaż próżnia w trzecim dziale wynosiła ponad 610 mm Hg (ciśnienie absolutne 0,2 kg/cm²).]

Z tego powodu nie można zagęszczać w wyparce wielodziałowej mleka, soków owocowych i innych cieczy mało odpornych na wysokie temperatury. Tego rodzaju cieczy zwykle zagęszczane są tylko w pojedynczych aparatach wyparnych. Ale w wyparce jednodziałowej zużycie pary jest mało ekonomiczne, bowiem jeden jej kilogram odparowuje tylko 0,9 kg wody. Ażeby zmniejszyć zużycie pary z kotła, już dawno, prawie osiemdziesiąt lat temu, została zaproponowana wyparka mechaniczna. W ostatnich zaś czasach zaczęto ją coraz częściej stosować.

Zasada działania wyparki mechanicznej polega na tym, że opary wydzielające się z zagęszczanego roztworu zawracane są do komory grzejnej tego samego aparatu wyparnego, w którym powstały, przechodząc po drodze przez sprężarkę, gdzie podnosi się ich ciśnienie i temperatura. Praca sprężarki jest tym jedynym źródłem, które pokrywa zużycie energii cieplnej w tej wyparce. Schemat instalacji jednodziałowej wyparki mechanicznej podany jest na rysunku 24. Opary



Rys. 24. Wyparka mechaniczna.

z komory parowej aparatu wyparnego A przewodem B zasysane są do turbosprężarki C, gdzie ulegają adiabatycznemu sprężeniu i jako para ogrzewająca wtłaczane są przewodem rurowym D do komory grzejnej tego samego aparatu A. Przewód E służy do doprowadzania pary z kotła podczas uru-

chomiania instalacji oraz uzupełniania ewentualnych strat wskutek nieszczelności. Rurą F odchodzą skropliny.

Przy uruchomieniu instalacji należy wpiery ogrzać do temperatury wrzenia roztwór znajdujący się w aparacie wyparnym, czerpiąc parę z kotła parowego; wtedy po przerwaniu dopływu pary z zewnątrz można już prowadzić dalszą wyparkę kosztem pracy sprężania.

Do wyparki mechanicznej doprowadzamy roztwór surowy, a odprowadzamy roztwór stężony i skroplony. Zachowując oznaczenia poprzednie możemy napisać równanie bilansu materiałowego:

$$S = S_z + D_{skr}.$$

Bilans zaś cieplny przedstawia się w sposób następujący.

Przychód:

1. Ciepło dostarczone z surówką $Sc_s t_s$;
2. „ „ w postaci pracy ADL .

Rozchód:

1. Ciepło odprowadzone z roztworem stężonym $S_z c_z t_z$;
2. „ „ ze skroplinami D_{skr} i t_{skr} ;
3. Straty ciepła przez promieniowanie i inne Q_{str} .

Wobec tego równanie bilansu cieplnego przybiera następującą postać:

$$Sc_s t_s + ADL = S_z c_z t_z + D_{skr} t_{skr} + Q_{str},$$

skąd po uwzględnieniu, że $D = D_{skr} = W$,

$$AWL = S_z c_z t_z + W t_{skr} - Sc_s t_s + Q_{str}.$$

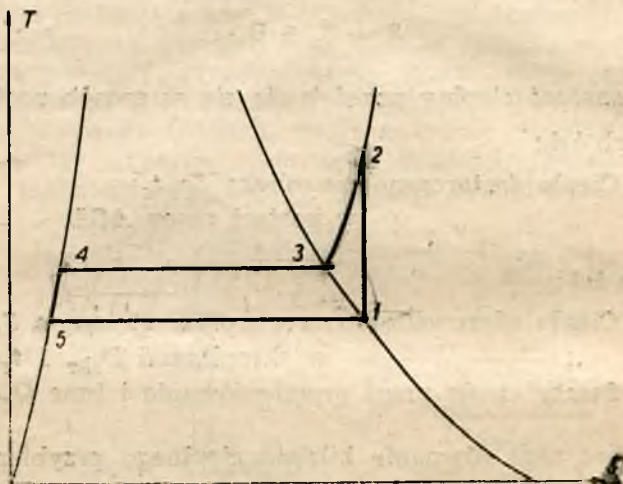
Jak widzimy z tego równania, praca AWL w sprężarce pokrywa różnicę pomiędzy ciepłem unoszonym z aparatu wyparnego przez roztwór zagęszczony i skropliny, a ciepłem doprowadzonym z roztworem surowym plus straty cieplne. Ażeby zmniejszyć pracę zużytą na sprężanie oparów, jak widać z powyższego równania, należy podnieść temperaturę roztworu surowego t_s . Dlatego należy roztwór rozcieńczony ogrzać przed wprowadzeniem do wyparki prawie do temperatury wrzenia cieczy w aparacie.

Moc zużywana przez sprężarkę wynosi:

$$N = \frac{WL}{3600 \cdot \eta} = \frac{WL}{270000 \eta} \text{ KM,}$$

gdzie η jest sprawnością sprężarki.

Sprężanie należy przeprowadzać adiabatycznie, a nie izotermicznie, jak to się normalnie dzieje w sprężarkach do gazów, gdyż przy sprężaniu adiabatycznym praca sprężarki zamienia się na ciepło, wskutek czego ze wzrostem prędkości wzrasta temperatura i entalpia pary.



Rys. 25. Wykres entropowy wyparki mechanicznej.

Proces sprężania adiabatycznego, jak widać z wykresu entropowego $T-S$ (linia 1—2 na rys. 25), połączony jest z przegrzewaniem pary, a para przegrzana nie nadaje się do ogrzewania przeponowego. Z tego powodu w większych i średnich instalacjach pomiędzy sprężarką a komorą grzejną aparatu wyparnego włącza się aparaty natryskowe, zadaniem których jest doprowadzanie pary przegrzanej do stanu nasycenia.

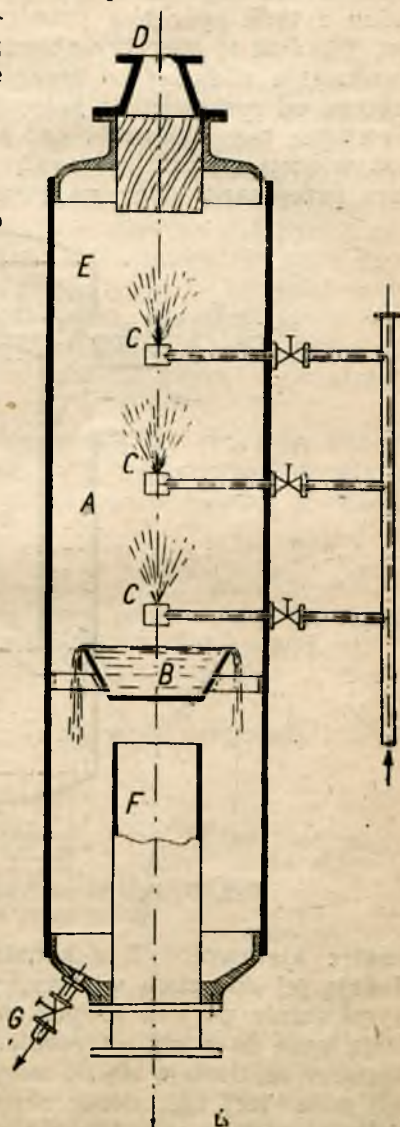
Wykres entropowy na rys. 25 przedstawia zjawiska cieplne zachodzące w całej instalacji. Linia 1—2 jest to sprężanie adiabatyczne w sprężarce; linia 2—3 przedstawia izobaryczne chłodzenie pary w aparacie natryskowym lub w ko-

morze grzejnej aparatu wyparnego, jeżeli aparat natryskowy nie jest stosowany; linia 3—4 jest to izobaryczne skraplanie pary w komorze grzejnej; linia 4—5 przedstawia chłodzenie skroplin na powierzchni zewnętrznej rurek grzejnych; linia 5—1 jest to izobaryczne parowanie roztworu w aparacie wyparnym. Pole 1, 2, 3, 4, 5, 1 przedstawia pracę AL , zużytą na sprężanie 1 kg pary.

Z wykresu entropowego wynika, że pole, a więc i praca sprężania są tym większe, im większa jest różnica ciśnień pomiędzy parą ogrzewającą a oparami, czyli im większy jest przyrost ciśnienia pary w sprężarce. Ze względu na rozchód energii mechanicznej różnica temperatur pomiędzy parą ogrzewającą, doprowadzoną do stanu nasycenia, a oparami powinna być jak najmniejsza. Wyparki mechanicznej nie oplaci się wobec tego stosować do odparowywania roztworów, których temperatura wrzenia jest znacznie wyższa od temperatury wrzenia wody pod tym samym ciśnieniem, gdyż ogólna różnica temperatur θ w tym przypadku jest duża.

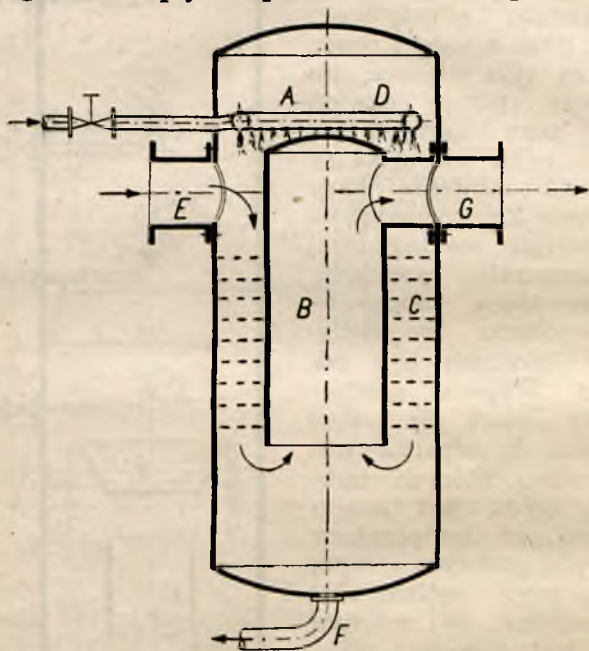
Do sprężenia pary w wyparce stosowane są głównie dwa typy sprężarek: obrotowe i strumieniowe, tłokowe zaś stosunkowo rzadko, gdyż posiadają małą sprawność — są drogie i zanieczyszczają skropliny smarem.

Jak już wspomniałem poprzednio, para opuszczając sprę-



Rys. 26. Aparat natryskowy.

zarke jest przegrzana, posiada więc mały współczynnik przewodnictwa ciepła. Dlatego należy ją ochłodzić do stanu nasycenia. Do tego celu służą specjalne aparaty natryskowe. Jeden z tych aparatów przedstawiony jest schematycznie na rys. 26. Jest to pionowy zbiornik cylindryczny A o średnicy dwukrotnie większej od średnicy przewodu rurowego prowadzącego od sprężarki do komory grzewczej aparatu wyparnego. Wewnątrz tego zbiornika nad misą B znajdują się dwa, trzy (lub więcej) wtryskiwacze C, przez które rozpyla się woda. Para przegrzana dopływa przez nasadę D, posiadającą we-



Rys. 27. Aparat natryskowy do studzenia pary przegrzanej syst. Seiferta.

wnątrz kierownicę E z kanałami w postaci linii śrubowej. Nadają jej one ruch wirowy, wskutek czego następuje dobre wymieszanie pary z kropelkami wody, które parując ochładzają parę do stanu nasycenia. Kropelki, które nie zdążyły wyparować, dostają się do miski B, skąd spadając tworzą (jeżeli miska jest ustawiona zupełnie poziomo) zasłonę wodną. Przez tę zasłonę przedziera się para, dążąc do rury F, przez którą odchodzi do komory grzewczej aparatu wyparnego. Nad-

miar doprowadzonej do aparatu wody zbiera się na dnie i odpływa przewodem *G*. Aparat ten jest prosty i tani, ale para wychodząca z niego porywa za sobą zbyt dużo kropelek wody, jest więc bardzo wilgotna.

Mniej wilgotną parę daje aparat natryskowy Seiferta przedstawiony na rys. 27. Wewnątrz cylindrycznego pionowego zbiornika *A* znajduje się drugi zbiornik *B* ustawiony dnem do góry. Pomiędzy nimi umieszczone są półki sitowe *C*. Z góry przez otwory w rurze *D*, wygiętej w postaci pierścienia wprowadza się wodę, która spada w postaci kropelek na sita *C*. Równolegle z wodą postępuje z góry na dół para przegrzana, dopływająca przewodem *E*, która mieszając się z kropkami wody na sitach, oddaje im ciepło, przez co kropelki wody parują, a temperatura pary obniża się. Nadmiar wody wypływa z aparatu rurką *F* w dnie naczynia, a para nasycona, zmieniając kierunek, odchodzi z aparatu przez wewnętrzny zbiorniczek *B* i przewód *G*.

Ilość wody, którą należy dostarczyć do aparatów natryskowych w celu doprowadzenia pary przegrzanej do stanu nasycenia, można obliczyć, układając bilans cieplny instalacji wyparnej.

Przychód:

1. Ciepło doprowadzone z *W* kg pary przegrzanej $W i$ kcal.
2. „ „ z *G* kg wody o temp. t Gt kcal.

Rozchód:

1. Ciepło odprowadzone z $(W+G)$ kg pary nasyconej $(W+G) i''$.
2. Straty ciepła przez promieniowanie i inne.

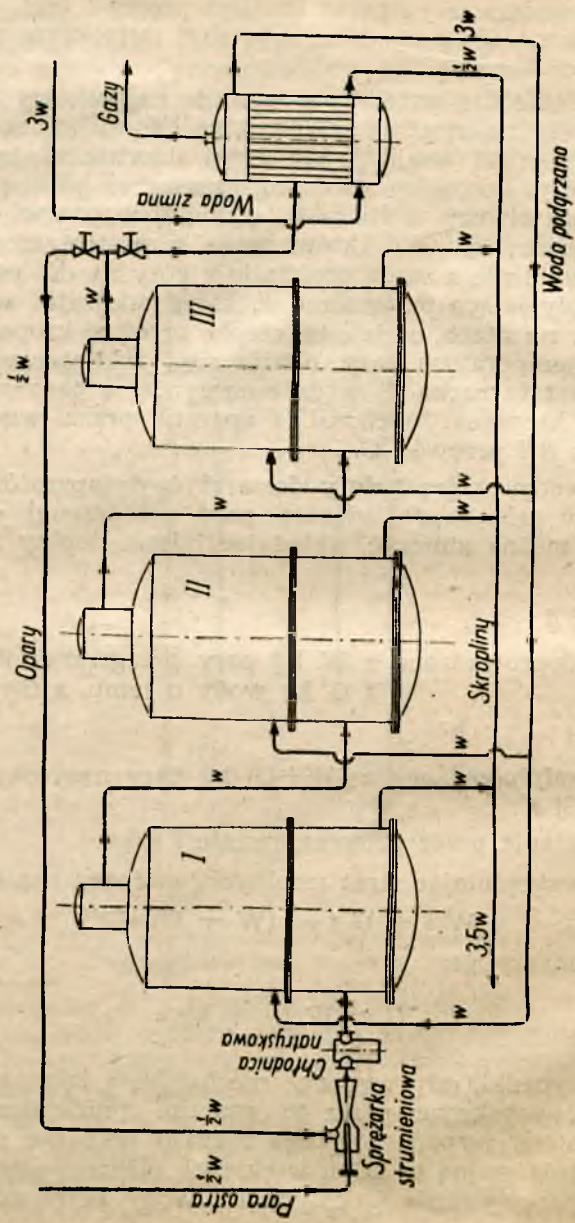
Nie uwzględniając strat cieplnych, możemy napisać, że:

$$W i + G t = (W + G) i''$$

skąd otrzymamy, że:

$$G = W \frac{i - i''}{i'' - t} \text{ kg.}$$

Są przypadki, gdy wyparkę mechaniczną łączy się z wielodziałową, uzyskując przez to znaczne zmniejszenie ilości działów baterii wyparnej. Tego rodzaju wyparkę stosowano przed ostatnią wojną w kilku większych elektrowniach w Polsce do odparowywania („destylacji“) wody przeznaczanej do

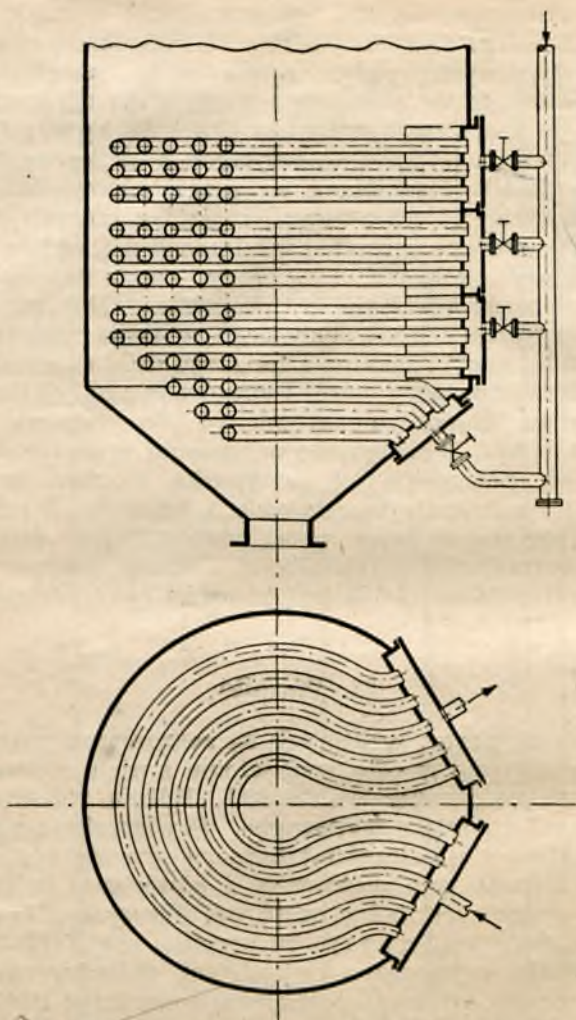


Rys. 28. Bateria do destylacji wody.

zasilania kotłów parowych. Schemat takiej wyparki systemu Prache et Bouillon przedstawia rys. 28. Składa się ona z trzech aparatów wyparnych, podgrzewacza wody, sprężarki i aparatu natryskowego do chłodzenia pary. Para ogrzewająca dopływająca do pierwszego działu w ilości W kg/h, odparowuje w trzech działach wyparki teoretycznie $3W$ kg wody. Opary z trzeciego działu rozdzielane są przez odpowiednie regulowanie zaworami na dwie równe części, z których $\frac{1}{2}W$ kg dopływa do komory grzejnej podgrzewacza, gdzie ogrzewa do temperatury około 95° 3 kg wody, reszta zaś oparów zasykana jest przez sprężarkę strumieniową. Do sprężarki dopływa para ostra z kotła parowego w ilości również około $\frac{1}{2}W$ kg, która spręża zassaną z trzeciego działu taką samą ilość oparów. Mieszanina pary ostrej i oparów w ogólnej ilości W kg wchodzi przez chłodnicę natryskową do komory grzejnej pierwszego działu. Widzimy, że w opisanej wyparce trójdziałowej wskutek połączenia jej z wyparką mechaniczną, $\frac{1}{2}$ kg pary żywej odparowuje teoretycznie 3 kg wody, a praktycznie $2,5$ kg. Odparowanie więc w tej instalacji jest pięciokrotne, gdy w normalnej trójdziałowej baterii wyparnej według A. G. Kasatkina (§ 18) jest ono dwa razy mniejsze.

21. Warniki

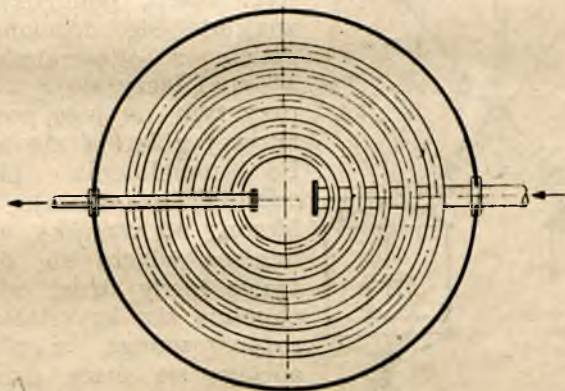
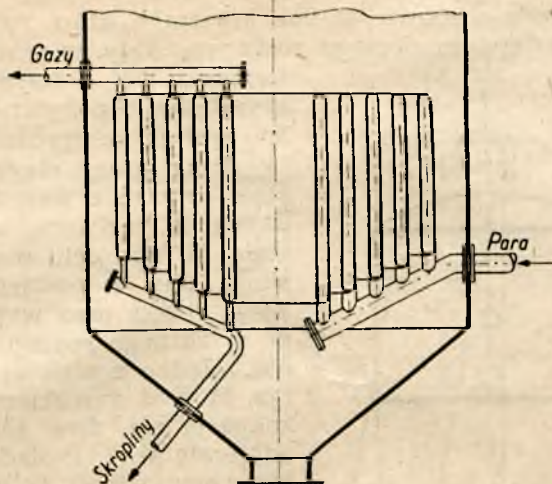
Aparaty wyparne, w których są zagęszczane roztwory nasycone i przesycone w celu wydzielenia z nich rozpuszczonego ciała stałego, nazywamy warnikami. Różnią się one stosunkowo mało od aparatów wyparnych. Powierzchnię ogrzewalną warników stanowią najczęściej komory grzejne typu Roberta lub Seidaka, poza tym węzownice i pierścienie cylindryczne. Na rys. 29 podana jest dolna część warnika syst. „Lira“, ogrzewanego węzownicami, a na rys. 30 warnika syst. Gräntzdörffera z powierzchnią ogrzewalną w postaci cylindrycznych pierścieni. Elementy ogrzewające należy umieszczać dość wysoko nad dnem aparatu. Umieszczenie komory grzejnej w warnikach na poziomie wyższym niż w aparatach wyparnych ma na celu stworzenie pod nią pewnej przestrzeni spokojnej, bez cyrkulacji, aby wydzielające się z zagęszczanego roztworu kryształki ciała stałego mogły opaść na dno aparatu. W warnikach należy zapewnić dużą prędkość cieczy wzdłuż ścianek powierzchni ogrzewalnej, w celu zapobieżenia tworzeniu się osadów na elementach ogrzewających. Warstewka przylegająca do



Rys. 29. Dolna część warknika systemu „Lira“.

tej powierzchni jest przecież najbardziej stężoną częścią roztworu i z niej dość intensywnie wypada substancja rozpuszczona.

Warkniki pracują często okresowo, np. w cukrownictwie. Roztwór w tym przypadku jest wprowadzany do aparatu porcjami. Gdy pierwsza z nich została zagęszczona do tego stopnia,

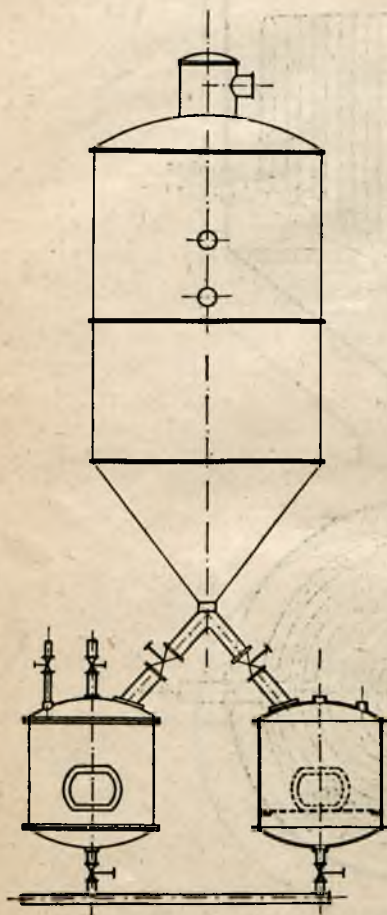


Rys. 30. Dolna część warnika systemu Gräntzdörffera.

iz wytworzyła się w niej duża ilość kryształów różnej wielkości, dociąga się następną. Drobne kryształy krążą wraz z cieczą w aparacie, gdy większe osiadają na dnie. Pierwsze ulegają rozpuszczeniu przez dociągniętą porcję rozcieńczonej cieczy, pozostałe w miarę odparowywania rosną.

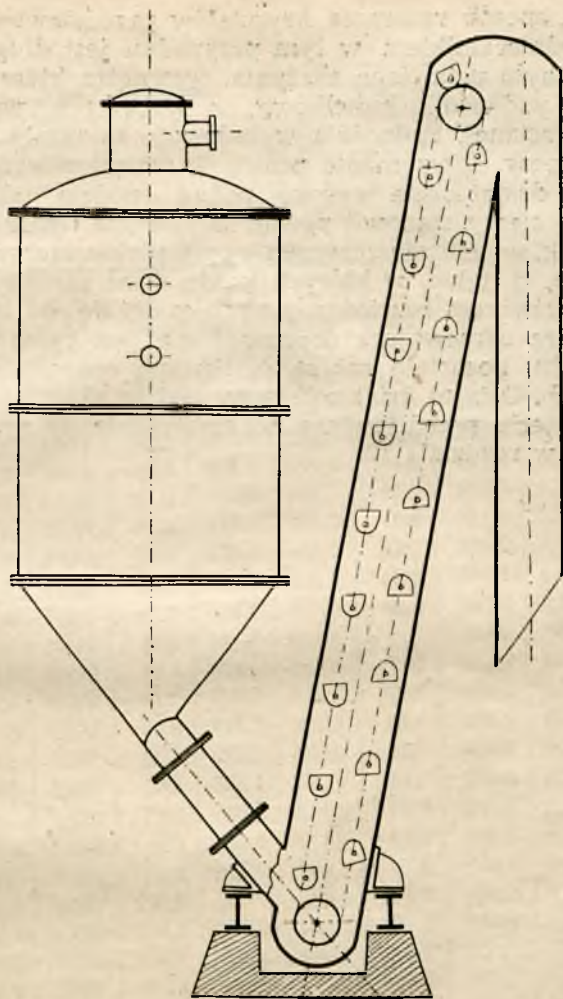
Jednocześnie jednak tworzą się nowe ośrodki krystalizacyjne i powstają znowu drobne kryształy, które rozpuszczają się przy następnym dociągu roztworu. Gdy w warniku wytworzyła się dostateczna ilość kryształów o pożądanej wielkości, zostaje on opróżniony.

Przy pracy ciągłej należy stale usuwać z warnika wypadającą z roztworu substancję stałą. W tym celu warnik uzyskuje dno w postaci wysmukłego stożka oraz wyposaża się go w różnego rodzaju urządzenia. Jedno z nich przedstawia rys. 31. Pod warnikiem (rys. 31) znajdują się dwa lub więcej odbieralniki. Posiadają one wewnątrz ponad dolnym denkiem filtrującą przegrodę wykonaną z dwóch dziurkowanych blach, pomiędzy którymi znajduje się druciana siatka. Jeden z odbieralników (na zmianę) łączy się z warnikiem, przy tym na jego powierzchni sitowej zbierają się kryształy. Po napełnieniu pierwszego odbieralnika zostaje on odłączony od warnika, a na jego miejsce włącza się drugi. W czasie kiedy drugi odbieralnik napełnia się kryształami ciała rozpuszczonego, z pierwszego odciąga się ciecz przez rurkę w dnie i wtłacza ją z powrotem do warnika. Do tego celu stosują albo parę o ciśnieniu kilku atmosfer, która wypycha ciecz



Rys. 31. Warnik z odbieralnikami.

z odbieralnika i wtłacza ją do warnika, tak jak w przesyłaczach montejus, albo małe pompki odśrodkowe. Po odcięciu cieczy ciało stałe wybiera się przez właz znajdujący się w ścianie bocznej odbieralnika tuż nad przegrodą cedzącą. Jeżeli kryształy wydzielają się z roztworu powoli, to zamiast dwóch



Rys. 32. Warnik z ciągłym odbieraniem.

wystarczy jeden odbieralnik. W czasie gdy jest on odłączony od warnika w celu odcedzenia i wybrania kryształów, gromadzą się one na stożkowym dnie aparatu wyparnego. Warniki z tego rodzaju odbieralnikami można stosować, gdy wydajność instalacji nie przekracza 1000 kg na godzinę.

Drugi sposób usuwania kryształów przedstawiony jest na rys. 32. Odbieralnikiem w tym przypadku jest długa, prostokątna, pochyło ustawiona skrzynia, wewnątrz której znajduje się mały podnośnik kubełkowy, o kubełkach wykonanych z siatki drucianej. Podnośnik wyładowuje kryształy ponad poziomem cieczy. Utrzymanie próżni w warniku wymaga ustawiania go dostatecznie wysoko ponad spodem odbieralnika, ażeby słup cieczy stanowił pewne zamknięcie hydrauliczne.

Warniki w celu zaoszczędzenia pary można łączyć w baterie równoległe, tj. takie, w których każdy dział zasilany jest tym samym roztworem rozcieńczonym niezależnie od innych, natomiast para ogrzewająca doprowadzana jest tylko do pierwszego działu, pozostałe zaś są ogrzewane oparami z działów poprzednich. Ostatni dział połączony jest ze skraplaczem. Tego rodzaju bateria przedstawiona schematycznie na rys. 20 była omawiana w rozdziale 13.

Para wodna nasycona

Pręż- ność p	Tem- pera- tura t	Obję- tość właś- ciwa pary v''	Entalpia		Ciepło parowania $r = t'' - t'$	Energia wewn.		Entropia	
			cieczy i'	pary i''		cieczy u'	pary u''	cieczy s'	pary s''
kg/cm ²	°C	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg
0,01	6,6	131,8	6,6	599,8	593,2	6,6	568,9	0,0238	2,1454
0,02	17,1	68,25	17,1	604,4	587,3	17,1	572,4	0,0607	2,0852
0,03	23,7	46,51	23,7	607,2	583,5	23,7	574,5	0,0831	2,0497
0,04	28,6	35,44	28,6	609,3	580,7	28,6	576,1	0,0994	2,0248
0,05	32,5	28,71	32,5	611,0	578,5	32,5	577,4	0,1123	2,0059
0,06	35,8	24,18	35,8	612,5	576,7	35,8	578,5	0,1230	1,9905
0,08	41,1	18,44	41,1	614,8	573,7	41,1	580,3	0,1401	1,9666
0,10	45,4	14,94	45,4	616,6	571,2	45,4	581,6	0,1537	1,9477
0,15	53,6	10,21	53,5	620,1	566,6	53,5	584,2	0,1790	1,9138
0,20	59,7	7,794	59,6	622,8	563,2	59,6	586,3	0,1974	1,8902
0,25	64,6	6,324	64,5	624,8	560,3	64,5	587,8	0,2120	1,8717
0,30	68,7	5,329	68,6	626,6	558,0	68,6	589,2	0,2242	1,8572
0,35	72,3	4,612	72,3	628,1	555,8	72,3	590,3	0,2346	1,8442
0,40	75,4	4,070	75,4	629,3	553,9	75,4	591,2	0,2437	1,8335
0,50	80,9	3,302	80,9	631,6	550,7	80,9	592,9	0,2593	1,8154
0,60	85,5	2,785	85,5	633,5	548,0	85,5	594,4	0,2722	1,8008
0,70	89,5	2,411	89,5	635,1	545,6	89,5	595,6	0,2834	1,7885
0,80	93,0	2,128	93,0	636,5	543,5	93,0	596,6	0,2931	1,7781
0,90	96,2	1,906	96,2	637,8	541,6	96,2	597,6	0,3018	1,7688
1,0	99,1	1,727	99,2	638,9	539,7	99,2	598,5	0,3097	1,7601
1,1	101,8	1,580	101,9	640,0	538,1	101,9	599,3	0,3169	1,7526
1,2	104,2	1,456	104,3	640,9	536,6	104,3	600,0	0,3236	1,7462
1,3	106,6	1,351	106,7	641,8	535,1	106,7	600,7	0,3297	1,7393
1,4	108,7	1,261	108,8	642,6	533,8	108,8	601,3	0,3354	1,7339
1,5	110,8	1,182	110,9	643,4	532,5	110,9	601,9	0,3408	1,7282
1,6	112,7	1,113	112,9	644,1	531,2	112,9	602,4	0,3460	1,7232
1,8	116,3	0,997	116,5	645,4	528,9	116,5	603,4	0,3554	1,7140
2,0	119,6	0,903	119,8	646,6	526,8	119,8	604,3	0,3638	1,7056
2,2	122,6	0,826	122,9	647,6	524,7	122,9	605,0	0,3716	1,6979
2,4	125,5	0,7614	125,8	648,6	522,8	125,7	605,8	0,3787	1,6906
2,6	128,1	0,7064	128,5	649,6	521,1	128,4	606,6	0,3854	1,6846
2,8	130,5	0,6589	130,9	650,4	519,5	130,8	607,2	0,3917	1,6792

Para wodna nasycona

(c. d.)

Pręż- ność <i>p</i>	Tem- pera- tura <i>t</i>	Obję- tość właści- ciwa pary <i>v''</i>	Entalpia		Ciepło parowania $r = \tau'' - \tau'$	Energia wewn.		Entropia	
			cieczy <i>i'</i>	pary <i>i''</i>		cieczy <i>u'</i>	pary <i>u''</i>	cieczy <i>s'</i>	pary <i>s''</i>
kg/cm ²	°C	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg
3,0	132,9	0,6176	133,4	651,2	517,8	133,3	607,8	0,3975	1,6732
3,2	135,1	0,5814	135,6	651,9	516,3	135,5	608,3	0,4031	1,6682
3,4	137,2	0,5492	137,7	652,6	514,9	137,6	608,9	0,4083	1,6635
3,6	139,2	0,5206	139,8	653,2	513,4	139,7	609,3	0,4133	1,6588
3,8	141,1	0,4948	141,7	653,8	512,1	141,6	609,8	0,4180	1,6547
4,0	142,9	0,4714	143,6	654,4	510,8	143,5	610,2	0,4224	1,6506
4,5	147,2	0,4220	148,0	655,7	507,7	147,9	611,2	0,4330	1,6412
5,0	151,1	0,3822	152,0	656,9	504,9	151,9	612,1	0,4424	1,6329
5,5	154,7	0,3494	155,7	657,9	502,2	155,6	612,9	0,4511	1,6253
6,0	158,1	0,3219	159,2	658,8	499,6	159,1	613,6	0,4592	1,6181
6,5	161,2	0,2984	162,4	659,7	497,3	162,2	614,3	0,4667	1,6120
7,0	164,2	0,2782	165,5	660,5	495,0	165,3	614,9	0,4737	1,6059
7,5	167,0	0,2607	168,5	661,2	492,7	168,3	615,4	0,4803	1,6001
8,0	169,6	0,2452	171,2	661,8	490,6	171,0	615,9	0,4865	1,5949
8,5	172,1	0,2315	173,8	662,4	488,6	173,6	616,3	0,4924	1,5901
9,0	174,5	0,2193	176,3	662,9	486,6	176,1	616,7	0,4980	1,5854
9,5	176,8	0,2083	178,7	663,5	484,8	178,5	617,1	0,5033	1,5811
10	179,0	0,1984	181,0	663,9	482,9	180,7	617,4	0,5085	1,5769
11	183,2	0,1812	185,4	664,8	479,4	185,1	618,1	0,5181	1,5689
12	187,1	0,1667	189,6	665,5	475,9	189,3	618,7	0,5270	1,5613
13	190,7	0,1543	193,4	666,2	472,8	193,1	619,2	0,5353	1,5549
14	194,1	0,1437	197,0	666,8	469,8	196,6	619,6	0,5430	1,5488
15	197,4	0,1345	200,6	667,3	466,7	200,2	620,1	0,5504	1,5425
16	200,4	0,1263	203,8	667,7	463,9	203,4	620,4	0,5573	1,5372
17	203,4	0,1191	207,0	668,1	461,1	206,5	620,7	0,5640	1,5319
18	206,2	0,1127	210,1	668,4	458,3	209,6	620,9	0,5702	1,5266
19	208,8	0,1069	212,9	668,7	455,8	212,4	621,1	0,5762	1,5222
20	211,4	0,1017	215,7	669,0	453,3	215,1	621,4	0,5819	1,5177
22	216,3	0,0926	221,1	669,4	448,3	220,5	621,7	0,5928	1,5090
24	220,8	0,0850	226,0	669,7	443,7	225,3	621,9	0,6026	1,5011
26	225,0	0,0786	230,7	669,9	439,2	230,0	622,0	0,6120	1,4939
28	229,0	0,0730	235,1	669,9	434,8	234,3	622,1	0,6208	1,4869
30	232,8	0,0681	239,4	670,0	430,6	238,5	622,1	0,6292	1,4805

Para wodna nasycona

(c. d.)

Pręż- ność <i>p</i>	Tem- pera- tura <i>t</i>	Obję- tość właś- ciwa pary <i>v''</i>	Entalpia		Ciepło parowania $r = i'' - i'$	Energia wewn.		Entropia	
			cieczy <i>i'</i>	pary <i>i''</i>		cieczy <i>u'</i>	pary <i>u''</i>	cieczy <i>s'</i>	pary <i>s''</i>
kg/cm ²	°C	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg
32	236,4	0,06382	243,5	669,9	426,4	242,6	622,1	0,6370	1,4741
34	239,8	0,06003	247,4	669,8	422,4	246,4	622,0	0,6445	1,4682
36	243,1	0,05664	251,1	669,7	418,6	250,1	621,9	0,6518	1,4629
38	246,2	0,05360	254,7	669,4	414,7	253,6	621,7	0,6586	1,4573
40	249,2	0,05085	258,2	669,2	411,0	257,0	621,6	0,6652	1,4522
42	252,1	0,04836	261,6	668,9	407,3	260,4	621,3	0,6715	1,4472
44	254,9	0,04607	264,9	668,6	403,7	263,6	621,1	0,6776	1,4423
46	257,6	0,04398	268,0	668,2	400,2	266,6	620,8	0,6836	1,4378
48	260,2	0,04206	271,1	667,9	396,8	269,7	620,6	0,6892	1,4334
50	262,7	0,04029	274,1	667,4	393,3	272,6	620,2	0,6947	1,4289
55	268,7	0,03640	281,4	666,3	384,9	279,7	619,4	0,7079	1,4184
60	274,3	0,03313	288,2	665,0	376,8	286,4	618,4	0,7202	1,4087
65	279,6	0,03034	294,8	663,6	368,8	292,8	617,4	0,7319	1,3993
70	284,5	0,02794	301,0	662,1	361,1	298,8	616,3	0,7428	1,3905
75	289,2	0,02584	307,0	660,5	353,5	304,6	615,1	0,7533	1,3821
80	293,6	0,02400	312,8	658,8	346,0	310,2	613,8	0,7631	1,3738
85	297,9	0,02236	318,5	656,9	338,4	315,7	612,4	0,7729	1,3657
90	301,9	0,02091	323,9	655,1	331,2	320,9	611,0	0,7820	1,3581
95	305,8	0,01959	329,2	653,2	324,0	326,0	609,6	0,7908	1,3506
100	309,5	0,01840	334,4	651,2	316,8	331,0	608,1	0,7995	1,3434
110	316,6	0,01632	344,6	646,9	302,3	340,8	604,8	0,8164	1,3291
120	323,1	0,01457	354,4	642,3	287,9	350,1	601,3	0,8324	1,3154
130	329,2	0,01307	364,1	637,3	273,3	359,3	597,5	0,8480	1,3018
140	335,0	0,01175	373,9	631,9	258,0	368,6	593,4	0,8635	1,2879
150	340,5	0,01058	383,9	625,9	242,0	378,1	588,7	0,8793	1,2738
160	345,6	0,00952	394,0	619,3	225,2	387,7	583,6	0,8952	1,2593
170	350,6	0,00854	404,9	611,8	206,9	398,0	577,8	0,9121	1,2438
180	355,3	0,00763	416,4	603,4	187,0	408,8	571,2	0,9298	1,2274
190	359,7	0,00678	428,6	594,0	165,4	420,2	563,8	0,9486	1,2100
200	364,0	0,00594	442,3	582,9	140,6	433,0	555,1	0,9696	1,1903
210	368,1	0,00510	458,2	569,4	111,2	447,8	544,3	0,9939	1,1674
220	372,0	0,00420	478,8	551,0	72,1	466,8	529,3	1,0254	1,1372
225	374,0	0,00310	515,5	515,5	0	499,1	499,1	1,0817	1,0817

BIBLIOGRAFIA

- Dr inż. Bohdan Stefanowski* — Termodynamika techniczna.
- Józef Zawadzki* — Technologia chemiczna nieorganiczna.
- J. M. Brajnies* — Prociessy i aparaty chemiczieskich proizwodstw.
- A. G. Kasatkin* — Osnownyje prociessy i aparaty chemiczieskoj tiechnologii.
- Gielpierin* — Wyparnyje aparaty.
- Walter L. Badger and Warren L. Mc Cabe* — Elements of chemical engineering.
- Walter L. Badger and Warren L. Mc Adams* — Principles of chemical engineering.
- Ernest Berl* — Chemische Ingenieur-Technik. Dritter Band.