

Výpočet koncentrace a úletu etanolu při aeračních procesech

663.14.033.83:547.262

663.52:547.262

Ing. KAREL KADLEC a Ing. VLADIMÍR LABÍK, Katedra automatizace VŠCHT Praha

Pro kontinuální stanovení obsahu etanolu při fermentačních procesech je možno využít skutečnosti, že při provzdušňování zápars se ustavuje rovnováha mezi obsahem etanolu v kapalně a plynné fázi. Vlastní stanovení etanolu potom probíhá v plynné fázi analyzátozem pracujícím na principu katalytického spalování [1]. Analyzátor, určený k měření obsahu etanolu v zápaře při výrobě pekařského droždí, který byl vyvinut na katedře automatizace VŠCHT Praha, byl popsán v Kvasném průmyslu č. 10 [1970] a č. 8—9 [1971] [2,3]. Při vývoji samočinného analyzátoru bylo nutno zabývat se podrobně složením analyzovaného vzorku. Koncentrace etanolu v plynech odcházejících z fermentoru je závislá na systému provzdušňování, na teplotě kvašení a tlaku v systému a konečně na obsahu etanolu v zápaře. Byly proto vypočítány teoretické koncentrace etanolu v plynné fázi pro roztoky etanolu ve vodě o různých koncentracích v závislosti na změně stavových podmínek, tzn. v závislosti na změnách teploty a barometrického tlaku.

Vzhledem k tomu, že na koncentraci etanolu v plynech, odcházejících z fermentace, závisí ztráty etanolu úletem, byl současně počítán i úlet etanolu v závislosti na stavových podmínkách a na velikosti průtoku vzduchu fermentorem. Poněvadž výsledky výpočtu mohou najít mnohem širší uplatnění, než je využití jako podkladový materiál pro konstrukci analyzátoru, věříme, že budou čtenáře zajímat.

Rovnováha v soustavě etanol — voda — vzduch

Byl proveden rozbor systému, kdy vodný roztok etanolu ve fermentoru je vydatně provzdušňován. Zde se

ustavuje rovnováha mezi obsahem etanolu, vody a vzduchu v kapalně a plynné fázi.

Pro reálnou soustavu v oblasti nízkých tlaků je možno odvodit vztah:

$$y_i \cdot P = P_i = \gamma_i \cdot x_i \cdot P_i^0, \quad (1)$$

kde P je celkový tlak systému

P_i — parciální tlak složky i

P_i^0 — tenze par čisté složky i

x_i — molární zlomek složky i v kapalně fázi

y_i — molární zlomek složky i v plynné fázi

γ_i — aktivitní koeficient složky i

Celkový tlak P v soustavě je dán vztahem:

$$P = P_1 + P_2 + P_3, \quad (2)$$

kde P_1 je parciální tlak etanolových par

P_2 — parciální tlak vodních par

P_3 — parciální tlak suchého vzduchu

Z rovnice (1) vyplývá pro tenzi par etanolu a vody:

$$P_1 = \gamma_1 \cdot x_1 \cdot P_1^0, \quad (3)$$

$$P_2 = \gamma_2 \cdot x_2 \cdot P_2^0, \quad (4)$$

kde $\gamma_{1,2}$ jsou aktivitní koeficienty etanolu a vody

$x_{1,2}$ — molární zlomky etanolu a vody v kapalně fázi

$P_{1,2}^0$ — tenze par etanolu a vody za dané teploty

U vzduchu, jehož stav je značně vzdálen od kritického stavu, hovoříme o rozpustnosti plynu v kapalině. U soustav, jejichž složky spolu chemicky nereagují, je roz-

pustnost za dané teploty přímo úměrná parciálnímu tlaku plynu nad roztokem.

Z toho tedy vyplývá pro parciální tlak vzduchu:

$$P_3 = H \cdot x_3 \quad (5)$$

kde H je Henryho konstanta

x_3 — molární zlomek vzduchu rozpuštěného ve vodě

Spojením rovnic (1), (2), (3), (4) a (5) je možno psát pro koncentraci etanolu v plynné fázi:

$$y_1 = \frac{\gamma_1 \cdot x_1 \cdot P_1^0}{P} \quad (6)$$

Tenže parciální aktivitní koeficient etanolu jsou závislé na teplotě; aktivitní koeficient je kromě toho závislý i na složení kapalně fáze. K vyjádření vlivu teploty na tenzi par etanolu byla použita Calingaertova-Davisova rovnice:

$$\log P_1^0 = 8,17807 - \frac{1633,44}{t + 230}, \quad (7)$$

kteřá byla upravena do tvaru

$$P_1^0 = \exp \left[2,303 \cdot \left(8,17807 - \frac{1633,44}{t + 230} \right) \right] \quad (8)$$

V rozmezí teplot t 0 až 50 °C, v oboru normálních a nízkých tlaků vyjadřuje Calingaertova-Davisova rovnice shodu s naměřenými hodnotami na $\pm 0,1\%$ [4]. Z rovnice (8) je zřejmé, že s rostoucí teplotou roste tenze par etanolu, a tím roste také obsah etanolu v plynné fázi při konstantním složení kapalně fáze.

Pro vyjádření závislosti aktivitního koeficientu na složení bylo užito van Laarovy rovnice:

$$\log \gamma_1 = \frac{A \cdot x_2^2}{\left(\frac{A}{B} x_1 + x_2 \right)^2}, \quad (9)$$

kde A a B jsou konstanty, které jsou mezními hodnotami aktivních koeficientů: $A = \lim_{x_1 \rightarrow 0} \log \gamma_1$, $B = \lim_{x_2 \rightarrow 0} \log \gamma_2$.

Hodnoty konstant pro binární směs etanol — voda byly vypočteny z experimentálních dat [5, 8] a pro teplotu 25 °C a tlak 760 torrů jsou $A = 0,5053$ a $B = 0,3979$. Dosadíme-li do rovnice (9) konstanty A , B a za $x_2 = 1 - x_1$, pak po úpravě získáme vztah (10), udávající závislost aktivitního koeficientu na složení směsi etanol — voda při teplotě 25 °C a tlaku 760 torrů.

$$\log (\gamma_1)_{25} = \frac{0,5053 \cdot (1 - x_1)^2}{(1 + 0,2699 x_1)^2} \quad (10)$$

Závislost aktivitního koeficientu na tlaku za nízkých a za normálních tlaků se neuplatňuje [4, 7]. K vyjádření závislosti aktivitního koeficientu na teplotě bylo užito vztahu:

$$\frac{\log (\gamma_1)_t}{\log (\gamma_1)_{25}} = \frac{(L_1)_p}{2,3 \cdot R} \cdot \left(\frac{273,15 + t}{1} - \frac{1}{298,15} \right), \quad (11)$$

kde $(\gamma_1)_t$ je aktivitní koeficient etanolu při teplotě t (°C)

$(\gamma_1)_{25}$ — aktivitní koeficient etanolu při teplotě 25 °C

$(L_1)_p$ — průměrné parciální molární teplo rozpouštěcí etanolu

R — univerzální plynová konstanta

t — teplota (°C)

Molární teplo rozpouštěcí závisí na teplotě. V případě etanolu je parciální molární teplo rozpouštěcí lineárně závislé na převrácené hodnotě absolutní teploty a průměrné parciální molární teplo rozpouštěcí je možno vy-

počítat jako aritmetický průměr mezi hodnotami při dvou uvažovaných teplotách. V [8] je uvedena grafická

lineární závislost mezi výrazem $\frac{L_1}{2,3 \cdot R}$ a $\frac{1}{T}$, která byla pro potřeby výpočtu vyjádřena matematickým vztahem:

$$\frac{(L_1)_t}{2,3 \cdot R} = 1588 - \frac{63,86 \cdot 10^4}{273,15 + t} \quad (12)$$

Při teplotě 25 °C je hodnota výrazu $\frac{(L_1)_{25}}{2,3 \cdot R} = -553,9$

a průměrná hodnota v rozmezí teplot t a 25 °C je

$$\frac{(L_1)_p}{2,3 \cdot R} = \left(-553,9 + 1588 - \frac{63,86 \cdot 10^4}{273,15 + t} \right) \cdot 0,5 \quad (13)$$

$$\frac{(L_1)_p}{2,3 \cdot R} = \frac{517,07 \cdot t - 178064}{273,15 + t} \quad (14)$$

Po dosazení do rovnice (11) a po její úpravě získáme rovnici (15), udávající závislost aktivitního koeficientu na teplotě.

$$\log (\gamma_1)_t = \log (\gamma_1)_{25} + \frac{(517,07 \cdot t - 178064) \cdot (25 - t)}{(273,15 + t)^2 \cdot 298,15} \quad (15)$$

Dosadíme-li do rovnice (15) z rovnice (10), dostaneme po úpravě rovnici (17), vyjadřující závislost aktivitního koeficientu etanolu na koncentraci i na teplotě.

$$\log (\gamma_1)_t = \frac{0,5053 \cdot (1 - x_1)^2}{(1 + 0,2699 x_1)^2} + \frac{(517,07 \cdot t - 178064) \cdot (25 - t)}{(273,15 + t)^2 \cdot 298,15} \quad (16)$$

$$(\gamma_1)_t = \exp \left[2,303 \cdot \left(\frac{0,5053 \cdot (1 - x_1)^2}{(1 + 0,2699 x_1)^2} + \frac{(517,07 \cdot t - 178064) \cdot (25 - t)}{(273,15 + t)^2 \cdot 298,15} \right) \right] \quad (17)$$

Molární zlomek etanolu v kapalně fázi je vyjádřen vztahem:

$$x_1 = \frac{n_1}{n_1 + n_2 + n_3} \quad (18)$$

kde n_1 je počet molů etanolu v kapalně fázi

n_2 — počet molů vody v kapalně fázi

n_3 — počet molů vzduchu rozpuštěného v kapalině

Spočítáme-li počty molů jednotlivých složek pro vodný roztok etanolu nasycený vzduchem při 30 °C a obsahující 1 % hmot. etanolu, zjistíme, že $n_1 = 2,17 \cdot 10^{-2}$

$$n_2 = 5,54$$

$$n_3 = 6,17 \cdot 10^{-5}$$

Vzhledem k tomu, že $n_3 \ll n_1$, $n_3 \ll n_2$, je možno počet molů rozpuštěného vzduchu zanedbat a rovnici (18) upravit na tvar:

$$x_1 = \frac{n_1}{n_1 + n_2} \quad (19)$$

Molární zlomek etanolu v kapalně fázi spočtený na základě údajů o hmotovém složení kapalně fáze potom je:

$$x_1 = \frac{\frac{c_1}{46,07}}{\frac{c_1}{46,07} + \frac{100 - c_1}{18,02}} \quad (20)$$

po úpravě:

$$x_1 = \frac{18,02 \cdot c_1}{4607 - 28,05 \cdot c_1} \quad (21)$$

kde c_1 je koncentrace etanolu v kapalně fázi (% hmot.). Po dosazení vztahů (17), (21) a (8) do rovnice (6) můžeme psát pro koncentraci etanolu v plynné fázi:

$$Y_1 = \frac{(r_1)t \cdot x_1 \cdot P_1^0}{P} \cdot 100 \quad (22)$$

kde Y_1 je koncentrace etanolu v plynné fázi (% obj.)
 $(r_1)t$ — aktivitní koeficient etanolu při teplotě t a složení x_1
 x_1 — molární zlomek etanolu v kapalně fázi
 t — teplota v soustavě (°C)
 P — tlak v systému (torr)

Ztráty, způsobené úletem etanolu v plynech, odcházejících z fermentace, jsou přímo úměrné koncentraci etanolu a průtoku vzduchu. Pro vyjádření úletu použijeme rovnici (22); koncentraci etanolu v plynné fázi v % obj. přepočteme na hodnotu v g.l⁻¹, resp. kg.m⁻³. Úlet etanolu, vyjádřený v g.h⁻¹, resp. kg.h⁻¹ je potom dán rovnicí

$$\text{ÚLET} = 0,01 \cdot Y_1 \cdot \frac{M \cdot P}{R \cdot T} \cdot Q \quad (23)$$

po dosazení molekulové hmoty etanolu a univerzální plynové konstanty dostaneme vztah:

$$\text{ÚLET} = Y_1 \cdot Q \cdot P \cdot \frac{7,3875 \cdot 10^{-3}}{t + 273,15} \quad (24)$$

kde ÚLET — je úlet etanolu (g.h⁻¹), resp. (kg.h⁻¹),
 Y_1 — koncentrace etanolu v plynné fázi (% obj.)
 Q — průtok vzduchu (l.h⁻¹), resp. (m³.h⁻¹)
 P — tlak v systému (torr)
 t — teplota v systému (°C)

Rovnic (8), (17), (21), (22) a (24) bylo použito k sestavení programu v jazyce FORTRAN pro strojový výpočet na samočinném počítači TESLA 200 [6].

Diskuse výsledků

Výsledky výpočtu koncentrací etanolu v plynné fázi pro roztoky etanolu ve vodě o koncentracích 0,1 až 2,5 % hmot. v závislosti na změně stavových podmínek a výpočty úletu etanolu byly tisknuty tiskárnou samočinného počítače do tabulek. Tiskárna samočinného počítače neumožňuje popis malými písmeny a z toho důvodu je označení jednotek (torr, l/h, m³/h, g/h, kg/h) vytištěno písmeny velkými. Vypočtené hodnoty pro jednu hodnotu tlaku jsou uspořádány do samostatné tabulky. V tabulce je rovněž uvedeno teplotní rozmezí, pro které je výpočet proveden. Z technických důvodů není možno uvést zde všechny tabulky vypočtených hodnot pro různé tlaky a různá rozmezí teplot. Jako příklad uvádíme tři tabulky koncentrací etanolu v plynné fázi (tab. 1 až 3) a jednu tabulku úletu etanolu (tab. 4).

V tab. 1 jsou koncentrace etanolu v plynné fázi při tlaku $P = 740$ torr, v tab. 2 při tlaku $P = 760$ torr. Rozmezí teplot je v obou případech stejné, a to 26 až 34 °C. Tab. 3 je spočítána pro tlak $P = 760$ torr a rozmezí teplot 17 až 25 °C. Koncentrace etanolu v kapalně fázi c jsou v % hmot., koncentrace etanolu v plynné fázi Y-v % obj.

Z vypočtených údajů je patrné, že koncentrace etanolu v plynné fázi při konstantním složení kapalně fáze je značně závislá na kolísání teploty kapalně fáze a velmi málo závisí na změnách tlaku v systému. Tak například při koncentraci 1,0 % hmot. etanolu ve vodě a při celkovém tlaku 760 torr vznikají při kolísání teploty o ± 2 °C od jmenovité hodnoty 30 °C změny koncentrace etanolu v plynné fázi od 0,158 do 0,120 % obj., tj. kolísání o +14,6 a -13,0 % relativních od jmenovité hodnoty 0,138 % obj. Naproti tomu při konstantní teplotě 30 °C a změně tlaku v systému o -20 torr, tj. od 760 do 740 torr, změnil se koncentrace etanolu v plynné fázi

Tabulka 1

VÝPOČET KONCENTRACE ETANOLU V PLYNNÉ FÁZI											
P = 740,0 TORR						ROZMEZÍ TEPLOT : 26,00 - 34,00 °C					
T (°C)	26,00	27,00	28,00	29,00	30,00	31,00	32,00	33,00	34,00		
C-ETANOL (HMOT. %)										Y-ETANOL (OBJ. %)	
0,10	0,011	0,012	0,012	0,013	0,014	0,015	0,016	0,017	0,019		
0,20	0,022	0,023	0,025	0,027	0,028	0,030	0,033	0,035	0,037		
0,30	0,032	0,035	0,037	0,040	0,043	0,046	0,049	0,052	0,056		
0,40	0,043	0,045	0,050	0,053	0,057	0,061	0,065	0,070	0,074		
0,50	0,054	0,058	0,062	0,066	0,071	0,076	0,081	0,087	0,093		
0,60	0,064	0,069	0,074	0,080	0,085	0,091	0,098	0,104	0,112		
0,70	0,075	0,081	0,086	0,093	0,099	0,106	0,114	0,122	0,130		
0,80	0,086	0,092	0,099	0,106	0,113	0,121	0,130	0,139	0,149		
0,90	0,096	0,104	0,111	0,119	0,128	0,137	0,146	0,156	0,167		
1,00	0,107	0,115	0,123	0,132	0,142	0,152	0,162	0,174	0,185		
1,10	0,118	0,126	0,136	0,145	0,156	0,167	0,178	0,191	0,204		
1,20	0,128	0,138	0,148	0,159	0,170	0,182	0,195	0,208	0,222		
1,30	0,139	0,149	0,160	0,172	0,184	0,197	0,211	0,225	0,241		
1,40	0,150	0,161	0,172	0,185	0,198	0,212	0,227	0,242	0,259		
1,50	0,160	0,172	0,185	0,198	0,212	0,227	0,243	0,260	0,277		
1,60	0,171	0,183	0,197	0,211	0,226	0,242	0,259	0,277	0,296		
1,70	0,181	0,195	0,209	0,224	0,240	0,257	0,275	0,294	0,314		
1,80	0,192	0,206	0,221	0,237	0,254	0,272	0,291	0,311	0,332		
1,90	0,202	0,217	0,233	0,250	0,268	0,287	0,307	0,328	0,351		
2,00	0,213	0,229	0,245	0,263	0,282	0,302	0,323	0,345	0,369		
2,10	0,223	0,240	0,257	0,276	0,295	0,317	0,339	0,362	0,387		
2,20	0,234	0,251	0,270	0,289	0,310	0,332	0,355	0,379	0,405		
2,30	0,244	0,263	0,282	0,302	0,324	0,346	0,371	0,396	0,423		
2,40	0,255	0,274	0,294	0,315	0,337	0,361	0,387	0,413	0,442		
2,50	0,265	0,285	0,306	0,328	0,351	0,376	0,402	0,430	0,460		

Tabulka 2

VÝPOČET KONCENTRACE ETANOLU V PLYNNÉ FÁZI											
P = 760,0 TORR						ROZMEZÍ TEPLOT : 26,00 - 34,00 °C					
T (°C)	26,00	27,00	28,00	29,00	30,00	31,00	32,00	33,00	34,00		
C-ETANOL (HMOT. %)										Y-ETANOL (OBJ. %)	
0,10	0,010	0,011	0,012	0,013	0,014	0,015	0,016	0,017	0,018		
0,20	0,021	0,022	0,024	0,026	0,028	0,030	0,032	0,034	0,036		
0,30	0,031	0,034	0,036	0,039	0,042	0,044	0,048	0,051	0,054		
0,40	0,042	0,045	0,048	0,052	0,055	0,059	0,063	0,068	0,072		
0,50	0,052	0,056	0,060	0,065	0,069	0,074	0,079	0,085	0,091		
0,60	0,063	0,067	0,072	0,077	0,083	0,089	0,095	0,102	0,109		
0,70	0,073	0,078	0,084	0,090	0,097	0,104	0,111	0,118	0,127		
0,80	0,083	0,090	0,096	0,103	0,110	0,118	0,127	0,135	0,145		
0,90	0,094	0,101	0,108	0,116	0,124	0,133	0,142	0,152	0,163		
1,00	0,104	0,112	0,120	0,129	0,138	0,148	0,158	0,169	0,181		
1,10	0,115	0,123	0,132	0,142	0,152	0,162	0,174	0,186	0,199		
1,20	0,125	0,134	0,144	0,154	0,165	0,177	0,189	0,203	0,216		
1,30	0,135	0,145	0,156	0,167	0,179	0,192	0,205	0,219	0,234		
1,40	0,146	0,156	0,168	0,180	0,193	0,206	0,221	0,236	0,252		
1,50	0,156	0,167	0,180	0,193	0,206	0,221	0,236	0,253	0,270		
1,60	0,166	0,179	0,192	0,205	0,220	0,236	0,252	0,269	0,288		
1,70	0,177	0,190	0,203	0,218	0,234	0,250	0,268	0,286	0,306		
1,80	0,187	0,201	0,215	0,231	0,247	0,265	0,283	0,303	0,324		
1,90	0,197	0,212	0,227	0,243	0,261	0,279	0,299	0,319	0,341		
2,00	0,207	0,223	0,239	0,256	0,274	0,294	0,314	0,336	0,359		
2,10	0,218	0,234	0,251	0,269	0,288	0,308	0,330	0,353	0,377		
2,20	0,228	0,245	0,262	0,281	0,301	0,323	0,345	0,369	0,395		
2,30	0,238	0,256	0,274	0,294	0,315	0,337	0,361	0,386	0,412		
2,40	0,248	0,267	0,286	0,307	0,329	0,352	0,376	0,402	0,430		
2,50	0,258	0,278	0,298	0,319	0,342	0,366	0,392	0,419	0,448		

pouze v mezích od 0,138 do 0,142 % obj., tj. o +3,0 % relativních od jmenovité hodnoty 0,138 % obj.
Grafické znázornění závislosti koncentrace etanolu

Tabulka 3

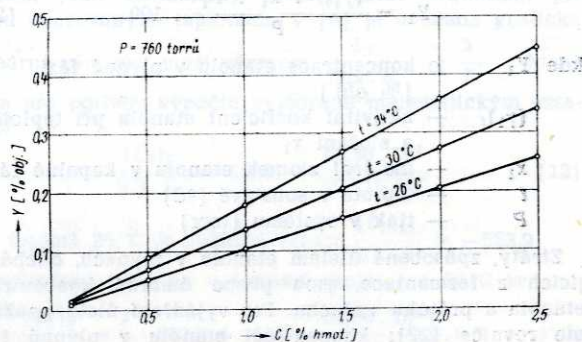
VÝPOČET KONCENTRACE ETANOLU V PLYNNÉ FÁZI										
P = 760,0 TORR			ROZMEZÍ TEPLOT : 17,00 - 25,00 °C							
T(°C)	17,00	18,00	19,00	20,00	21,00	22,00	23,00	24,00	25,00	
C-ETANOL (HMOT. %)	Y-ETANOL (OBJ. %)									
0,10	0,005	0,006	0,006	0,007	0,007	0,008	0,008	0,009	0,010	
0,20	0,011	0,012	0,012	0,013	0,013	0,015	0,016	0,017	0,018	
0,30	0,016	0,017	0,019	0,020	0,022	0,023	0,025	0,027	0,029	
0,40	0,021	0,023	0,025	0,027	0,029	0,031	0,034	0,036	0,039	
0,50	0,027	0,029	0,031	0,034	0,036	0,039	0,042	0,045	0,049	
0,60	0,032	0,035	0,037	0,040	0,043	0,047	0,050	0,054	0,058	
0,70	0,037	0,040	0,044	0,047	0,051	0,055	0,059	0,063	0,068	
0,80	0,043	0,046	0,050	0,054	0,058	0,062	0,067	0,072	0,078	
0,90	0,048	0,052	0,056	0,060	0,065	0,070	0,076	0,081	0,087	
1,00	0,053	0,057	0,062	0,067	0,072	0,078	0,084	0,090	0,097	
1,10	0,058	0,063	0,068	0,074	0,079	0,086	0,092	0,099	0,107	
1,20	0,064	0,069	0,074	0,080	0,087	0,093	0,101	0,108	0,116	
1,30	0,069	0,075	0,081	0,087	0,094	0,101	0,109	0,117	0,126	
1,40	0,074	0,080	0,087	0,094	0,101	0,109	0,117	0,126	0,136	
1,50	0,080	0,086	0,093	0,100	0,108	0,116	0,125	0,135	0,145	
1,60	0,085	0,092	0,099	0,107	0,115	0,124	0,134	0,144	0,155	
1,70	0,090	0,097	0,105	0,113	0,122	0,132	0,142	0,153	0,164	
1,80	0,095	0,103	0,111	0,120	0,129	0,140	0,150	0,162	0,174	
1,90	0,100	0,109	0,117	0,127	0,137	0,147	0,159	0,171	0,183	
2,00	0,106	0,114	0,123	0,133	0,144	0,155	0,167	0,179	0,193	
2,10	0,111	0,120	0,130	0,140	0,151	0,163	0,175	0,188	0,203	
2,20	0,116	0,126	0,136	0,146	0,158	0,170	0,183	0,197	0,212	
2,30	0,121	0,131	0,142	0,153	0,165	0,178	0,191	0,206	0,222	
2,40	0,127	0,137	0,148	0,160	0,172	0,185	0,200	0,215	0,231	
2,50	0,132	0,142	0,154	0,166	0,179	0,193	0,208	0,224	0,241	

Tabulka 4

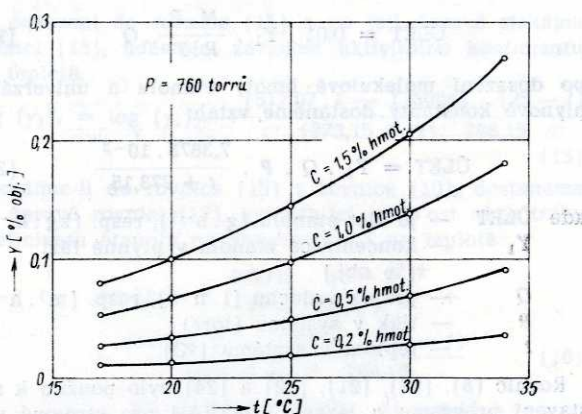
VÝPOČET ÚLETU ETANOLU PRO PRŮTOK Q= 100,00(L/H),(M ³ /H)											
P = 760,0 TORR			ROZMEZÍ TEPLOT : 26,00 - 34,00 °C								
T(°C)	26,00	27,00	28,00	29,00	30,00	31,00	32,00	33,00	34,00		
C-ETANOL (HMOT. %)	ÚLET ETANOLU (G/H),(KG/H)										
0.10	0.020	0.021	0.023	0.024	0.026	0.027	0.029	0.031	0.033		
0.20	0.039	0.042	0.045	0.048	0.051	0.055	0.058	0.062	0.066		
0.30	0.059	0.063	0.067	0.072	0.077	0.082	0.088	0.093	0.099		
0.40	0.079	0.084	0.090	0.096	0.103	0.109	0.117	0.124	0.132		
0.50	0.098	0.105	0.112	0.120	0.128	0.137	0.146	0.155	0.165		
0.60	0.118	0.126	0.135	0.144	0.154	0.164	0.175	0.186	0.198		
0.70	0.137	0.147	0.157	0.168	0.179	0.191	0.204	0.217	0.231		
0.80	0.157	0.168	0.179	0.192	0.205	0.218	0.233	0.248	0.264		
0.90	0.176	0.189	0.202	0.215	0.230	0.246	0.262	0.279	0.297		
1.00	0.196	0.209	0.224	0.239	0.255	0.273	0.291	0.310	0.330		
1.10	0.215	0.230	0.246	0.263	0.281	0.300	0.320	0.341	0.363		
1.20	0.235	0.251	0.268	0.287	0.306	0.327	0.349	0.371	0.396		
1.30	0.254	0.272	0.291	0.311	0.332	0.354	0.377	0.402	0.428		
1.40	0.273	0.292	0.313	0.334	0.357	0.381	0.406	0.433	0.461		
1.50	0.293	0.313	0.335	0.358	0.382	0.408	0.435	0.464	0.494		
1.60	0.312	0.334	0.357	0.382	0.407	0.435	0.464	0.494	0.526		
1.70	0.331	0.355	0.379	0.405	0.433	0.462	0.492	0.525	0.559		
1.80	0.351	0.375	0.401	0.429	0.458	0.489	0.521	0.555	0.591		
1.90	0.370	0.396	0.423	0.452	0.483	0.515	0.550	0.586	0.624		
2.00	0.389	0.416	0.445	0.476	0.508	0.542	0.578	0.616	0.656		
2.10	0.408	0.437	0.467	0.499	0.533	0.569	0.607	0.647	0.689		
2.20	0.428	0.458	0.489	0.523	0.558	0.596	0.635	0.677	0.721		
2.30	0.447	0.478	0.511	0.546	0.583	0.623	0.664	0.708	0.754		
2.40	0.466	0.499	0.533	0.570	0.608	0.649	0.692	0.738	0.786		
2.50	0.485	0.519	0.555	0.593	0.633	0.676	0.721	0.768	0.818		

v plynné fázi na koncentraci etanolu v kapalně fázi, na teplotě a na tlaku je na obr. 1 až 3.

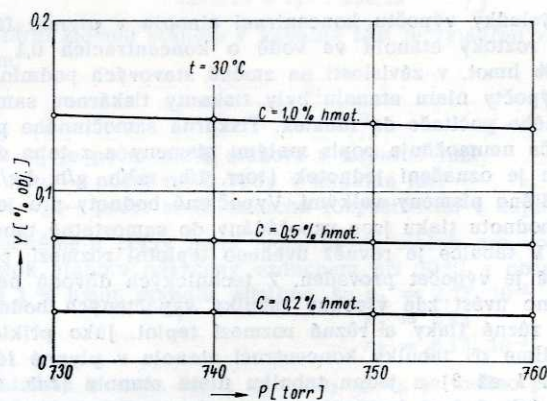
V další tabulce (tab. 4) jsou uspořádány vypočtené



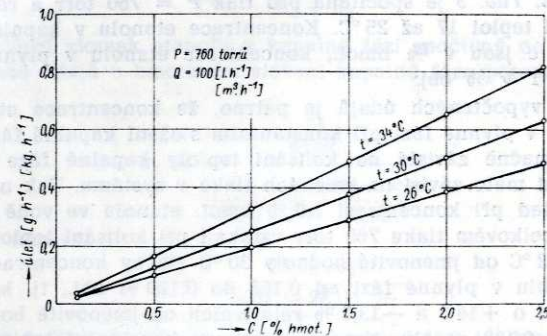
Obr. 1. Závislost koncentrace etanolu v plynné fázi na koncentraci etanolu v kapalně fázi



Obr. 2. Závislost koncentrace etanolu v plynné fázi na teplotě



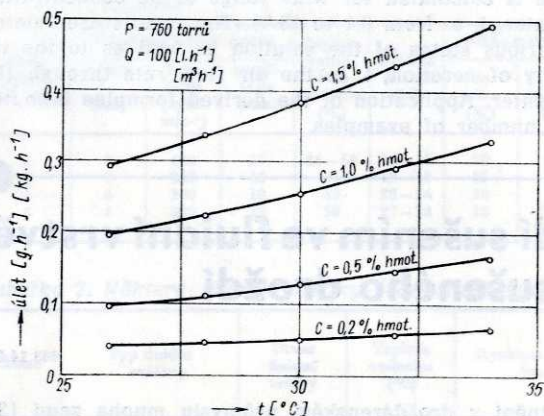
Obr. 3. Závislost koncentrace etanolu v plynné fázi na tlaku



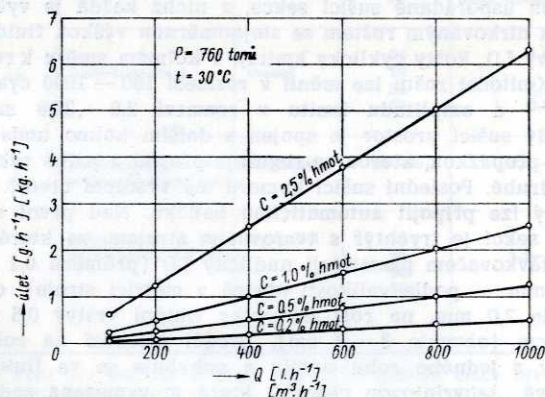
Obr. 4. Závislost úletu etanolu na koncentraci kapalně fáze

hodnoty úletu etanolu pro tlak 760 torr a teplotní rozmezí 26–34 °C při provzdušňování vodných roztoků etanolu o koncentracích c 0,1–2,5 % hmot. průtokem vzduchu $Q = 100$ [l.h⁻¹]. Jestliže uvažujeme průtok vzduchu v jednotkách [m³.h⁻¹], potom je úlet vyjádřen v [kg.h⁻¹]. Chceme-li znát velikost úletu při jiném průtoku, získáme novou hodnotu jednoduchým přepočtem, jak ukážeme na příkladu:

Potřebujeme znát úlet etanolu z fermentoru, ve kterém se provzdušňuje průtokem $Q = 400$ m³.h⁻¹ roztok o koncentraci 1,5 % hmot. C₂H₅OH a teplotě 30 °C. Z tabulky pro průtok $Q = 100$ m³.h⁻¹ odečteme hodnotu úletu 0,382 kg.h⁻¹. Pro průtok 400 m³.h⁻¹ potom bude činit úlet $4 \cdot 0,382 = 1,528$ kg C₂H₅OH za hodinu.



Obr. 5. Závislost úletu etanolu na teplotě



Obr. 6. Závislost úletu etanolu na průtoku vzduchu

Seznam symbolů použitých v obrázcích 1 až 6

- Y — koncentrace etanolu v plynné fázi (% obj.)
c — koncentrace etanolu v kapalně fázi (% hmot.)
t — teplota [°C]
P — tlak [torr]
ÚLET — velikost úletu etanolu [g.h⁻¹], resp. [kg.h⁻¹]
Q — průtok vzduchu [l.h⁻¹], resp. [m³.h⁻¹]

Na obr. 4 až 6 jsou vyneseny grafické závislosti velikosti úletu na koncentraci kapalně fáze, na teplotě a na průtoku vzduchu.

Praktické využití výsledků výpočtu

Jak již bylo naznačeno v úvodu, je možno využít vypočtených hodnot v několika oblastech.

V první řadě lze výsledků použít pro přípravu cejchovních směsí při kalibraci samočinného analyzátoru. Při cejchování analyzátoru pro stanovení etanolu v odtažových plynech se používá cejchovní zařízení, které bylo popsáno ve [3]. Podstatou zařízení jsou sytící ná-

doby s roztokem etanolu o známé koncentraci. Nádoby jsou umístěny v termostatu, jehož teplota se udržuje na hodnotě, při níž probíhá kvasný proces. Při provozním nasazení analyzátoru je třeba v určitých časových intervalech kontrolovat citlivost přístroje a používání popsaného zařízení v provozních podmínkách by bylo značně obtížné. Jednoduchý způsob bez složitého termostatování sytících nádob ukážeme na následujícím příkladu:

Je zapotřebí oceňovat analyzátor na koncentraci 0,5 % hmot. etanolu v zápaře. Zápara je provzdušňována při 30 °C a tlaku 760 torr. Z tab. 2 zjistíme, že odpovídající koncentrace etanolu v plynné fázi je 0,069 % obj. Bude-li mít kapalina v sytící nádobě teplotu 18 °C, pak připravíme roztok o takové koncentraci, aby koncentrace v plynné fázi byla opět 0,069 % obj. Z tab. 3 zjistíme, že sytící nádobu je třeba naplnit roztokem koncentrace 1,3 % hmot.

Výsledky výpočtu budou sloužit jako podklad pro další vývoj analyzátoru etanolu v zápaře. Z výpočtu je zřejmé, že změna teploty při konstantním složení kapalně fáze vede ke změně obsahu etanolu v plynech opouštějících fermentor a to nakonec způsobí změnu údaje analyzátoru. Jeví se proto účelné, aby analyzátor byl vybaven v některých případech obvodem teplotní kompenzace.

Další oblast využití výsledků je při bilancích ztrát, způsobených úletem etanolu v plynech odcházejících z fermentace. Znalost úletu je důležitým předpokladem pro správné vedení fermentace za optimálních ekonomických podmínek.

Literatura

- [1] KADLEC, K. - SLÁDEČEK, J.: Analyzátor etanolu v zápaře, Čs. patent 142 889
- [2] KADLEC, K. - SLÁDEČEK, J. - SNOPEK, S.: Kvasný průmysl 16, 1970, č. 10, s. 219
- [3] KADLEC, K. - SLÁDEČEK, J. - SNOPEK, S. - STEINER, V.: Kvasný průmysl 17, 1971, č. 8–9, s. 197
- [4] HÁLA, E. - REISER, A.: Fyzikální chemie I, SNTL Praha 1960
- [5] LANDOLT - BÖRNSTEIN: Zahlenwerte und Funktionen, Springer Verlag Berlin 1960
- [6] LABÍK, V.: Diplomová práce, VŠCHT Praha [1972]
- [7] HÁLA, E. - PICK, J. - FRIED, V. - VILÍM, O.: Rovnováha kapalina - pára, NČSAV Praha 1955
- [8] PERRY, J. H.: Chemical Engineers' Handbook, Mc-Graw Hill Book Comp. 1963

Kadlec, K. — Labík, V.: Výpočet koncentrace a úletu etanolu při aeračních procesech. Kvas. prům. 19, 1973, č. 11, s. 247–252.

Byl proveden teoretický výpočet koncentrace etanolu v plynné fázi v závislosti na obsahu etanolu v kapalně fázi pro systém, kdy vodný roztok etanolu je ydatně provzdušňován, a kdy se ustavuje rovnováha v soustavě etanol — voda — vzduch. Koncentrace etanolu v plynné fázi byla počítána pro roztoky etanolu ve vodě o koncentracích 0,1–2,5 % hmot. v závislosti na změně stavových podmínek. Současně byl počítán i úlet etanolu v závislosti na stavových podmínkách a na velikosti průtoku vzduchu fermentorem. V závěru práce jsou uvedeny příklady praktického využití výsledků výpočtu.

Кадлец, К. — Лабик, В.: Расчет концентрации и потерь этанола при аэрационных процессах. Квас. прум. 19, 1973, № 11, стр. 247–252.

В статье приводится теоретический расчет концентрации этанола в газовой фазе в зависимости от его содержания в жидкой фазе в разных установках, в которых водный раствор подвергается интенсивной аэрации при установившемся уравновешенном состоянии системы этанол-вода-воздух. Концентрация в газовой среде рассчитана для разных содержаний этанола в воде в пределах от 0,1 до 25 % (в весовом выражении). Рассматривается влияние факторов изменяющих состояние среды. Выведены формулы, показывающие зави-

симость потерь этанола от состояние среды и от количества воздуха проходящего через бродильный аппарат. Применение расчетного метода на практике показывают примеры.

Kadlec, K. — Labík, V.: Berechnung der Konzentration und des Flugverlustes des Äthanols bei Aerationprozessen. Kvas. prům. 19, 1973, No. 11, S. 247—252.

Es wurde die theoretische Berechnung der Äthanol-Konzentration in der gasförmigen Phase in Abhängigkeit von dem Äthanolgehalt in der flüssigen Phase durchgeführt, und zwar für ein System, wo die Wasserlösung des Äthanols stark durchlüftet wird und sich das Gleichgewicht im System Äthanol-Wasser-luft einstellt. Die Konzentration des Äthanols in der gasförmigen Phase wurde für die Äthanollösungen in Wasser in Konzentration von 0,1 bis 25 Gew. % in Abhängigkeit von der Änderung der Phasenbedingungen berechnet. Es wurde zugleich auch der Flugverlust des Äthanols in Abhängigkeit von den Phasenbedingungen und der Grösse der

den Fermentor durchströmenden Luftmenge berechnet. Zum Schluss der Arbeit werden praktische Beispiele der Applikation der Berechnungsergebnisse angeführt.

Kadlec K. — Labík, V.: Concentration and Losses of Ethanol Taking Place in Aeration Processes. Kvas. prům. 19, 1973, No. 11, p. 247—252.

The authors calculate theoretic concentration of ethanol in a gaseous phase relating it to the ethanol percentage in a liquid phase. The study covers systems in which water solution of ethanol is intensively aerated and equilibrium exists between components, i. e. ethanol-water-air. Ethanol concentration in gaseous phase is calculated for wide range of its concentration in water, i. e. from 0,1 to 25 %. The results are related to various states of the solution as well as to the intensity of aeration, i. e. the air flow rate through the fermenter. Application of the derived formulae is shown in a number of examples.