

# Vliv průtoku vzduchu na přenos kyslíku při fermentaci

Ing. ZDENĚK AUNICKÝ, CSc., Chemoprojekt Praha, Ing. FRANTIŠEK ŠTROS, CSc., VÚKPS Praha, Ing. ROSTISLAV ZÁBOJNÍK, Severočeské konzervárny a lihovary Ústí nad Labem

577.15.04 546.21

Do redakce došlo 7. 10. 1970

Rychlost přestupu kyslíku z fáze plynné do fáze kapalné představuje u řady fermentačních operací jeden z nejvýznamnějších procesů. V mnoha případech je přenos kyslíku klíčem k intenzifikaci hlavního výrobního článku celé linky — fermentoru.

Podle rovnice pro převod hmoty záleží rychlost absorpce kyslíku na koncentračním spádu mezi fázemi, na velikosti mezifázové plochy, době kontaktu a úhrnném koeficientu absorpce. Sledujeme-li u dané otázky vliv průtoku vzduchu, potom je zřejmé, že se tato veličina v první řadě projeví vlivem na koncentrační spád, a to dvojnásobem. Rychlejší průtok vzduchu znamená rychlejší obnovování parciálního tlaku kyslíku v plynné fázi na úroveň danou obsahem kyslíku ve vzduchu. Dále pak vyšší průtok vzduchu znamená intenzivnější promíchávání kapaliny, což má vliv jednak na charakter toku v mikroměřítku i makroměřítku, jednak na porušování fázové rovnováhy utvářející se na rozhraní fází. Současně i homogenita celého systému je větší.

Převod plynu mezi fázemi probíhá jednak molekulární difúzí, jednak víry a proudy, způsobenými mechanickými účinky. Tím se zvětšuje proudění v systému, laminární pohyb postupně přechází v turbulentní, čímž se přenos hmoty zintenzivňuje. V okolí styčné plochy zůstává vždy laminární film, v kterém se převod hmoty děje difúzí, zatímco v hlavním proudu se látka převádí v podstatně míře konvekci.

Zvýšený průtok plynu má dále menší vliv na dobu kontaktu, kterou za jinak nezměněných podmínek zkracuje.

Vliv na velikost mezifázové plochy není jednoznačný. Statická tvorba bublin se řídí jinými zákony než například tvorba bublin v oboru konstantní frekvence, nebo v proudové oblasti [1]. Vliv rychlosti průtoku plynu se projeví v každé oblasti odlišně. *Leibson* [2] například uvádí, že proudová oblast je vymezena podle Reynoldsova čísla pro plyn v otvoru tak, že zde je Reynoldsovo číslo větší než 10 000, přičemž průměr bubliny je dán vztahem:  $d_b = 0,28 \cdot \text{Re}^{-0,05}$ . Významnou roli hraje zejména při vyšších průtocích plynu koalescence a rozbití bublin [3]. V proudové oblasti se tvoří bubliny rozpadem souvislého proudu plynu přímo v kapalině. Vzniklé bub-

liny jsou různě velké, jejich velikost sleduje logaritmickou křivku pravděpodobnosti.

Použijeme-li v praxi k rozptýlu vzduchu statického nebo rotačního dispergátoru, vzniká heterogenní směs, jež se chová odlišně než původní složky. Taková hromadná tvorba bublin a vzniklý heterogenní systém se řídí proti původním složkám opět odlišnými vztahy. *Reynolds* [4] uvádí, že při vyšších rychlostech plynu, kdy Reynoldsovo číslo pro plyn v otvoru je větší než 2 100, rozbitější se zprvu vzniklé velké bubliny na menší, jež jsou charakteristické pro pohyblivou pěnu, ve které velikost bublin není závislá na charakteristikách a rozměrech systému. Při nižších rychlostech se průměr bubliny zvětšuje.

Velikost mezifázové plochy „a“ má bezprostřední vliv na přenos hmoty. Příslušná závislost na průtoku vzduchu byla vyjádřena exponenciálním vztahem ve tvaru:  $a = f(v_1^\alpha)$ , kde koeficient  $\alpha$  se pohybuje podle literárních údajů v rozmezí 0,3 až 3,6 [5]. *Westerterp* [6] dělí míchaný systém podle použitých otáček míchadla na oblast bez míchacího efektu (tj. nelineární oblast závislosti specifického povrchu na otáčkách míchadla, kde pro daný konkrétní případ byly otáčky míchadla menší než 10/s), v této oblasti velikost mezifázové plochy je pouze funkcí průtoku vzduchu. Druhá oblast — pro vyšší otáčky je oblast s míchacím efektem, kde se uplatňuje pouze vliv obvodové rychlosti míchadla a vůbec se neuplatňuje vliv průtoku vzduchu.

Pro míchané systémy lze dospět na základě dimenzionální analýzy ke vztahu, který pro konkrétní zařízení a daný systém má zjednodušený tvar:  $(k_L \cdot a) = A' \cdot v_1^\beta \cdot n^\gamma$ . Vzhledem k tomu, že velká většina metod určujících přenos kyslíku mezi fázemi poskytuje integrální údaje pro celý systém, jsou literární údaje vyjádřeny formou objemového koeficientu absorpce:  $k_v = (k_L \cdot a)$ . Diskutujeme-li otázku vlivu průtoku vzduchu na přenos kyslíku, pak literární data jsou korelována ve tvaru  $k_L \cdot a = f(v_1^\beta)$ , nebo ve tvaru závislosti specifické oxidace na průtoku plynu, tj.  $Ox_s = f(v_1^\beta)$ , kde hodnota  $(k_L \cdot a) = \text{konst. } Ox_s$ .

Přehled údajů o hodnotě exponentu  $\beta$  je uveden u *Sidemana* [5]. V souhrnu lze uvést, že tato hodnota se

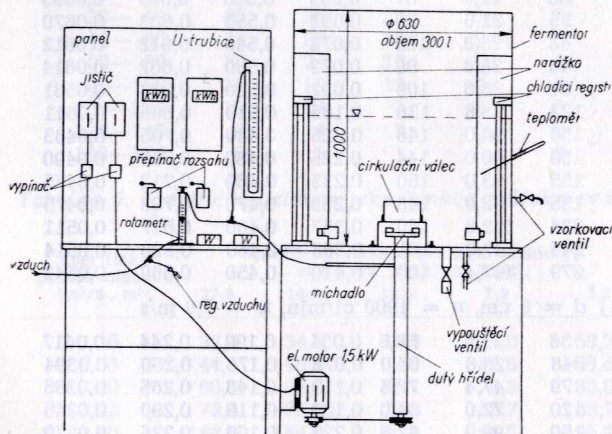


pohybuje v rozmezí 0,0 až 1,35. Rozptyl údajů je zřejmě podmíněn současným vlivem různých geometrických a hydraulických veličin, vlivem fyzikálních vlastností různých použitých tekutin, použitím různých analytických metod. Také otázka vhodnosti vyjádření vlivu průtoku vzduchu ve tvaru lineární rychlosti, tj.  $v_1$ , je problematická, vzhledem k tomu, že plocha fermentoru se mění v závislosti se čtvercem průměru a objem s třetí mocninou průměru. Příčiny rozptylu dat se dosud nediskutovaly. Na základě publikovaných hodnot exponentu  $\beta$  téměř není pochyb o tom, že zvýšení průtoku vzduchu daným systémem vede k částečnému zvýšení přenosu kyslíku. Není však známo, jaký je tvar těchto závislostí, jak další faktory působí na vliv protékajícího vzduchu, kdy je a kdy není účelné zvyšovat přenos kyslíku regulací průtoku vzduchu. Současně bylo nutno uvážit údaje Westerterpa [6] a Friedman-Lightfoota [7], neboť tito autoři došli k závěru, že přenos kyslíku je nezávislý na rychlosti průtoku vzduchu.

### Experimentální část

#### 1. Popis zařízení

Pokusy ověřující vliv průtoku vzduchu na přenos kyslíku se konaly ve třech etapách na zařízení čtvrtprovozním, poloprovozním a provozním.

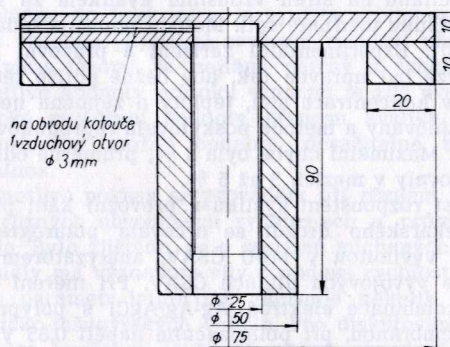


Obr. 1. Celkový pohled na čtvrtprovozní zařízení

a) Čtvrtprovozní zařízení je zobrazeno na obr. 1. Průměr fermentoru byl 63 cm, výška 100 cm, celkový objem 300 l. Vnitřek nádoby byl vystříkán epoxidovým lakem. Zarážky byly vyrobeny z PVC, trubkové chladič registry z měděných trubek. Spodní plochu tvořila deska z novoduru. K promíchávání kapaliny a k rozptýlu vzduchu sloužilo výměnné rotační zařízení, které jednak míchalo kapalinu, jednak rozptylovalo vzduch. Rotační zařízení mělo proměnné otáčky v rozsahu 680 až 4 270 ot/min. Oxidovaný objem byl 100 l. Hřídel byl dutý a sloužil současně k přívodu vzduchu do míchadla. Jako rotační zařízení bylo použito upravené míchadlo turbínového typu (obr. 2). Šlo v podstatě o plochý kotouč průměru 8 a 15 cm. V jeho středu byla dutina, ze které byl veden radiálně k obvodu výstup pro vzduch. Průměr výstupního otvoru byl 3 mm. Na horní ploše kotouče byly umístěny 4 výměnné radiální lopatky výšky 10 mm a délky 20 mm. Ve středu oxidátoru byl umístěn měděný cirkulační válec. Vzduch byl regulován v rozmezí 30 až 280 l/min, tj. 1,8 až 16,8 m<sup>3</sup>/h.

b) Poloprovozní zařízení: průměr fermentoru 230 cm, výška nádoby 270 cm, celkový objem 10 m<sup>3</sup>. K chlazení

bylo použito šesti chladicích žebër, sloužících současně jako zarážky. K míchání bylo použito v principu shodného typu míchadla. Na dutém hřídeli byl umístěn dutý plochý kotouč průměru 800 mm, do kterého se dutým hřídelem přiváděl vzduch. Na obvodu se vzduch rozptyloval z 1 000 otvorů průměru 3 mm. Lopatky byly na obou stranách míchadla, výška lopatek 100 mm, délka 180 mm, výstupní úhel lopatek 31°. Vzduch byl regulován v rozmezí 200 až 1 100 m<sup>3</sup>/h, otáčky v rozmezí 145 až 260 ot/min. Oxidovaný objem byl 5 až 7 m<sup>3</sup>. Souose s hřídelem byl umístěn cirkulační válec. Veškeré zařízení bylo opět natřeno epoxidovým lakem.



Obr. 2. Schéma turbínového míchadla  
d = 8 až 15 cm, materiál: PVC

c) Provozní zařízení: vzhledem k nemožnosti realizovat daný model zařízení v provozním měřítku v krátkém časovém intervalu, konaly se zkoušky prověřující vliv průtoku vzduchu na přenos kyslíku v provozním měřítku v kádi s trubkovým větráním. Zkušební kád měla průměr 400 cm, celkový obsah byl 75 m<sup>3</sup>, konečné plnění asi 50 m<sup>3</sup>. Instalováno bylo trubkové větrání s 2 × 36 trubkami pro rozvod vzduchu. Průměr jednoho otvoru byl 1 mm. Otvory byly umístěny ve 3 řadách, celkový počet otvorů asi 30 000. Aby bylo možno regulovat při zkouškách průtok vzduchu v širším rozmezí než povoloval stávající větrací systém, bylo položeno na dno nové, provizorní trubkové větrání, a to celkem 8 trubek pro rozvod vzduchu. Otvory zde byly ve dvou řadách, průměr jednoho otvoru byl 3 mm, celkový počet otvorů 4 400. Vzduch byl během pokusu regulován v rozmezí 1 500 až 6 000 m<sup>3</sup>/h, oxidovaný objem byl 31 až 50 m<sup>3</sup>.

#### 2. Pracovní postup

Při pokusech konaných na čtvrtprovozním zařízení byl oxidován roztok siřičitanu sodného za přítomnosti katalyzátoru. Nedostatky této metody spočívají především v tom, že siřičitanový roztok není vhodným modelem pro aerobní fermentaci vzhledem k podstatně odlišně probíhajícím procesům oxidace a k velkým rozdílům ve vlastnostech fluida. Sulfitový systém však je dobrým měřítkem pro vzájemné srovnávání výkonu fermentorů a ke zjištění vlivu jednotlivých proměnných veličin, ovlivňujících přenos kyslíku. Metoda umožňuje rychlejší pracovní postup, než jiné analytické metody. Umožňuje vyhodnotit na daném zařízení optimální podmínky pro přenos kyslíku. Takto zjištěná optimální oblast a všechny závislosti co do tvaru křivek, polohy maxim a minim apod. jsou aplikovatelné na obdobné systémy, kde růst kvasničné hmoty je závislý na rychlosti přenosu kyslíku. Pouze skutečné hodnoty přenosu kyslíku u kvasného média jsou nižší o 25 až 30 % než u sulfitového roztoku.



Poloprovodní zkoušky byly provedeny na zařízení shodného typu jako zkoušky čtvrtprovodní. Zkoušky byly provedeny opět siřičitanovou metodou. Pro ověření vhodnosti přenesení informací ze siřičitanových zkoušek na kvasné médium byly provedeny kvasné zkoušky s *Candidou utilis*.

Při provozních zkouškách byl použit přítokový způsob a technologický režim běžný v daném závodě při výrobě pekařského droždí.

### 3. Analytická metoda

Rychlost přenosu kyslíku z plynného do kapalného média se měřila jódometricky zjišťováním rychlosti oxidace siřičitanu na síran vzdušním kyslíkem za katalytického účinku měďnaté soli. Metodu popisuje řada autorů [8–10]. Experimentální zařízení a pracovní postup při analýze byl upraven tak, aby běžné potíže této metody (vliv koncentrace soli, teploty a zejména nečistot) byly eliminovány a metoda poskytovala reprodukovatelné výsledky. Maximální chyba byla 8 %, průměrné odchylky se pohybovaly v mezích 3 až 5 %.

Rychlost rozpouštění kyslíku v provozní kádi při kultivaci pekařského droždí se určovala polarografickou metodou, vyvinutou v MBU ČSAV, analyzátozem vyrobeným ve vývojových dílnách ČSAV. Při měření se používala kombinace elektrod Ag-Ag/AgCl s polypropylenovou membránou, při polarizačním napětí 0,85 V. Hodnoty  $k_L a$  byly určovány z okamžité koncentrace kyslíku, který byl rozpuštěn ve fermentoru, z rychlosti přijímání kyslíku mikroorganismem  $Q_{O_2}$  a z koncentrace kvasničné sušiny v kultivačním médiu vázkovou metodou. Z těchto dat byly určeny hodnoty specifické oxidace ( $\text{mol O}_2/\text{m}^3 \cdot \text{h}$ ) a celkové oxidace ( $\text{mol O}_2/\text{h}$ ). Metoda je nezávislá na aktuálním stavu kvasinek.

Rychlost přenosu kyslíku při kultivaci kvasinky *Candida utilis* v poloprovodním fermentoru byla vypočítána z hodinových přírůstků kvasničné sušiny v oblasti lineárního růstu, limitovaného přenosem  $\text{O}_2$ . Koncentrace kvasničné sušiny se určovaly vázkově a odstředivkou v hodinových intervalech. Pro přepočet byla předpokládána spotřeba asi 1 kg kyslíku na vznik jednoho kilogramu kvasničné hmoty. Polarografická metoda nebyla v daném případě vhodná, neboť není modifikována pro použití při vysokých přenosech kyslíku. Je nutno uvést, že určení rychlosti přenosu kyslíku siřičitanovou metodou a polarograficky poskytuje výsledky obecně vyšší než metoda produkční. První dvě uvedené metody poskytují informaci o maximálním možném přenosu kyslíku a tedy i o maximální možné produkci. Produkční metoda poskytuje hodnoty dané okamžitým technologickým stavem.

### 4. Měřené veličiny

Při pokusech byly kontrolovány a měřeny tyto veličiny: přenos kyslíku, průtok vzduchu (clona, rotametr), tlak vzduchu (U-trubice), teplota roztoku, příkon motoru (wattmetr, ampérmetr). U kvasných pokusů byla kontrolována sušina (vázkově a centrifugačně), pH, a veličiny dané v analytické části. Každý změřený bod (siřičitanová metoda) je výsledkem 5 až 10 analýz. Naměřené údaje jsou vedeny v tabulkách 1 až 3.

### Zhodnocení naměřených dat

#### 1. Siřičitanové zkoušky

Závislost přenosu kyslíku na průtoku vzduchu je zobrazena na obr. 3. Z naměřených dat je patrné, že pro podstatnou část proměřovaného rozsahu průtoku vzduchu, a to pro všechny uvedené druhy pokusů, platí, že přenos kyslíku je přímo úměrný průtoku vzduchu. Tato závislost počíná u nejnižších průtoků vzduchu a končí

Tabulka 1: Výsledky čtvrtprovodních zkoušek

Průtok vzduchu		Specifická oxidace		Spotřeba energie		
celkový [l/min]	specifický [m³/h · m³]	(mol O₂) m³ · h	vzduch [kW]	motor [kW]	celkem [kW]	specifická [kW/mol O₂/h]
1	2	3	4	5	6	7
a) $d = 8 \text{ cm}, n = 4270 \text{ ot/min}, w = 17,9 \text{ m/s}$						
42	25,2	143	0,063	1,190	1,252	0,0876
48	28,8	150	0,072	1,148	1,220	0,0821
77	46,2	186	0,116	1,060	1,176	0,0632
150	90,0	245	0,225	1,000	1,225	0,0500
242	145,2	280	0,363	0,990	1,353	0,0483
275	165,0	283	0,413	0,980	1,393	0,0492
b) $d = 15 \text{ cm}, n = 1900 \text{ ot/min}, w = 14,9 \text{ m/s}$						
31	18,6	115	0,047	1,010	1,057	0,0919
58	34,8	150	0,087	0,920	1,007	0,0671
122	73,2	208	0,183	0,900	1,083	0,0521
155	93,0	230	0,233	0,895	1,128	0,0490
240	144,0	244	0,360	0,890	1,250	0,0512
280	168,0	246	0,420	0,880	1,300	0,0528
c) $d = 15 \text{ cm}, n = 1350 \text{ ot/min}, w = 10,6 \text{ m/s}$						
35	21,0	87	0,053	0,550	0,603	0,0693
35	21,0	90	0,053	0,550	0,603	0,0670
48	28,8	100	0,072	0,540	0,612	0,0612
48	28,8	99	0,072	0,530	0,602	0,0614
61	36,6	109	0,092	0,520	0,612	0,0561
123	73,8	136	0,185	0,510	0,695	0,0511
150	90,0	146	0,225	0,480	0,705	0,0483
150	90,0	144	0,225	0,480	0,705	0,0490
155	93,0	150	0,233	0,480	0,713	0,0475
155	93,0	148	0,233	0,470	0,703	0,0475
238	142,8	160	0,357	0,460	0,817	0,0511
245	147,0	161	0,368	0,460	0,828	0,0514
279	167,4	160	0,419	0,450	0,869	0,0543
d) $d = 8 \text{ cm}, n = 1900 \text{ ot/min}, w = 7,9 \text{ m/s}$						
36	21,6	58,5	0,054	0,190	0,244	0,0417
48	28,8	64,0	0,072	0,178	0,250	0,0394
79	47,4	72,5	0,119	0,146	0,265	0,0365
120	72,0	84,0	0,180	0,110	0,290	0,0345
150	90,0	87,5	0,225	0,100	0,335	0,0370
220	132,0	91,0	0,330	0,100	0,430	0,0475
e) $d = 15 \text{ cm}, n = 682 \text{ ot/min}, w = 5,35 \text{ m/s}$						
34	20,4	43	0,051			
48	28,8	47	0,072			
48	28,8	47	0,072			
58	34,8	48	0,087			
113	67,8	56	0,170			
148	88,8	60,5	0,222			
238	142,8	62	0,357			
270	162,0	62	0,405			

Tabulka 2: Výsledky poloprovodních zkoušek

Průtok vzduchu		Využití O <sub>2</sub> [%]	Specifická oxidace		Spotřeba energie			
celkový [m <sup>3</sup> /h]	specifický [m <sup>3</sup> /h · m <sup>3</sup> ]		(mol O <sub>2</sub> ) m <sup>3</sup> · h	vzduch [kW]	motor [kW]	celkem [kW]	specifická [kW/mol O <sub>2</sub> /h]	
a) $d = 80 \text{ cm}, n = 190 \text{ ot/min}, w = 7,9 \text{ m/s}$								
205	31,6	58	185	5,1	20,5	25,6	0,0217	
310	48,5	49	206	7,7	16,0	23,7	0,0178	
470	73,5	34	229	11,7	12,1	24,5	0,0167	
650	100,2	26	242	16,2	9,6	25,8	0,0166	
810	126,5	22	254	20,2	7,6	27,8	0,0171	
1120	175,0	17	264	28,0	6,0	34,0	0,0201	



Tabulka 3: Výsledky provozních zkoušek

Čas od počátku kvašení [h]	Objem kapal. [m <sup>3</sup> ]	Průtok vzduchu					
		$Q_{O_2}$	mol O <sub>2</sub> g suš. · h	Sušina [g/l]	celkový [Nm <sup>3</sup> /h]	specifický [Nm <sup>3</sup> g/m <sup>3</sup> l]	Přenos kyslíku specifický [mol O <sub>2</sub> m <sup>3</sup> · h]
0	28						
1	31	78	8,2	1580	51	27	0,0470
1	31	78	8,2	1750	56,5	33	0,0427
2	34	116	9,6	1550	45,6	22	0,0525
2	34	116	9,6	2020	59,5	27	0,0550
3	37	87	10,5	2110	57	34	0,0417
3	37	87	10,5	2340	63	43	0,0368
6	46	138	15,0	3250	71	82	0,0214
6	46	129	12,9	4150	90	95	0,0239
6	46	138	15,0	4150	90	92	0,0236
6	46	190	16,9	5340	116	132	0,0219
7	49	150	14,7	3500	71,5	85	0,0210
7	49	150	14,7	5770	118	121	0,0245
7	49	136	16,4	5860	120	127	0,0237
8	52	190	16,9	3510	65	76	0,0223

Tabulka 4. Vzrůst specifické oxidace při změně průtoku vzduchu

Specifický průtok vzduchu [m <sup>3</sup> /h · m <sup>3</sup> ]	Přírůstek specifické oxidace (mol O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> · h) obvodová rychlost [m/s]:				
	17,9	14,9	10,6	7,9	5,3
20—40	45	36	23	13	7
40—60	36	29	17	9	5
60—80	30	24	13	7	4
80—100	20	19	11	4	3
100—120	12	10	6	1	0
120—140	8	4	3	0	0
140—160	6	1	1	0	0

Tabulka 5. Specifická oxidace jako funkce průtoku vzduchu

Specifický průtok vzduchu [m <sup>3</sup> /h · m <sup>3</sup> ]	Specifická oxidace [% max. hodnoty] obvodová rychlost [m/s]:				
	17,9	14,9	10,6	7,9	5,3
10	33,4	34,8	41,9	51,6	59,7
20	44,5	46,8	53,8	62,6	69,4
40	60,0	63,6	68,1	76,9	80,6
60	72,4	75,2	78,8	85,7	88,7
80	82,8	84,8	86,9	94,5	95,2
100	89,7	92,4	93,8	98,9	100,0
120	93,8	96,4	97,5	100,0	100,0
140	96,5	98,0	99,4	100,0	100,0
160	98,6	98,4	100,0	100,0	100,0

Tabulka 6. Hodnoty  $m$ ,  $b$  jako funkce obvodové rychlosti

Obvodová rychlost [m/s]	$m$	$b$	Model
5,3	21	0,24	1/4 provoz
7,9	24	0,29	1/4 provoz
10,6	29	0,36	1/4 provoz
14,9	32	0,435	1/4 provoz
17,9	35	0,445	1/4 provoz
7,9	81	0,24	1/2 provoz

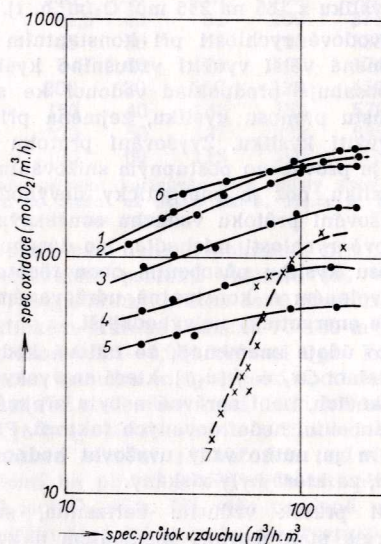
přibližně v oblasti 240 l/m<sup>3</sup>, tj. při specifickém průtoku 140 až 150 m<sup>3</sup>/h na 1 m<sup>3</sup> kapaliny, při lineární rychlosti vzduchu asi 1,3 cm/s (pro čtvrtprovozní model) a při průtoku asi 1300 m<sup>3</sup>/h, tj. při specifickém průtoku 200 m<sup>3</sup>/h · m<sup>3</sup> kapaliny, při lineární rychlosti vzduchu 8,75 cm/s (pro poloprovozní model). Ve všech uvedených případech se jedná o intenzivně míchané systémy, kdy celý obsah oxidátoru přecirkuloval přibližně v rozmezí 2 až 15 s (čtvrtprovozní zařízení) a v rozmezí 5 až 20 s (poloprovozní zařízení). Závislost přenosu kyslíku na specifickém průtoku vzduchu pro mechanicky míchané

systémy má tedy obecný tvar:  $Ox_s = m \cdot v_s^b$  pro hodnoty specifického průtoku vzduchu menší než 100 až 150 m<sup>3</sup>/h na m<sup>3</sup> kapaliny. Pro hodnoty specifického průtoku vzduchu větší než asi 200 m<sup>3</sup>/h · m<sup>3</sup> existuje oblast, kde průtok vzduchu nemá vliv na přenos kyslíku. Tato oblast však není, vzhledem ke stávajícím provozním poměrům při fermentacích, zajímavá pro průmysl.

O průběhu specifické oxidace v závislosti na specifickém průtoku vzduchu podává přehled *tabulka 4*. V této tabulce je uveden přírůstek specifické oxidace při změně specifického průtoku vzduchu o 20 m<sup>3</sup>/h · m<sup>3</sup>. Vidíme, že rychlost vzrůstu specifické oxidace ve všech zkoumaných případech plynule klesá až k nulové hodnotě.

Problém, do jaké míry je využita schopnost protékajícího vzduchu (kyslíku) zvyšovat rychlost přenosu kyslíku mezi fázemi, je nejlépe patrný z *tabulky 5*. Pro jednotlivé hodnoty průtoku vzduchu je zde uvedeno procentické vyjádření hodnoty přenosu kyslíku, vzhledem k maximální možné hodnotě, dosažitelné za daných podmínek.

Jednotlivé pokusy se prováděly při různém počtu otáček, různých obvodových rychlostech a průměrech míchadla. Bylo zjištěno, že u systémů míchaných rotačními míchadly má významný vliv obvodová rychlost míchadla. Tento parametr implicitně zahrnuje několik důležitých chemicko-inženýrských veličin. Pro diskutovaný problém však lze uvažovat souhrnný pojem obvodové rychlosti. Z grafu je zřejmé, že velikost obvodové rychlosti ovlivňuje jak absolutní hodnotu specifické oxidace, tak i rychlost stoupání specifické oxidace v závislosti na průtoku vzduchu. To znamená, že v rovnici:  $Ox_s = m \cdot v_s^b$  obě veličiny  $m$ ,  $b$  jsou funkcí obvodové rychlosti a nejsou tedy konstanty, jak se dosud uvažuje v literatuře. Hodnoty veličin  $m$ ,  $b$  pro použité obvodové rychlosti jsou uvedeny v *tabulce 6*.



Obr. 3. Závislost přenosu kyslíku na specifickém průtoku vzduchu

1/4 provoz: 1.  $w = 17,9$  m/s, 2.  $w = 14,9$  m/s, 3.  $w = 10,6$  m/s, 4.  $w = 7,9$  m/s, 5.  $w = 5,3$  m/s. 6. 1/2 provoz. 7. 1/1 provoz

Přes určitou rozkolísanost dat je vidět při grafickém zobrazení, že obě veličiny sledují přibližně exponenciální závislost. Přihlédneme-li k literárním údajům, je z tohoto hlediska pochopitelný velký rozptyl hodnot exponentu parametru  $v_s$ , a to až o několik set procent. Přitom je třeba si uvědomit, že uvedené konstanty jsou platné pouze pro daný konkrétní systém. Přechod ze čtvrtprovozního na poloprovozní systém je provázen změnami



nou hodnoty  $m$  i  $b$  (graf 3, tabulka 6). Rozhodující je však okolnost, že v logaritmických souřadnicích je zachována lineární závislost přibližně v rozmezí hodnot specifického průtoku vzduchu, jak bylo dříve zjištěno, dále pak následuje úsek, kde je přenos kyslíku nezávislý na průtoku vzduchu. Znamená to, že tyto, částečně zobecněné závěry mají obecnou platnost pro míchané systémy. Širší zobecnění při daném stavu základního chemicko-inženýrského výzkumu těchto systémů není dosud možné.

Skutečnost, že použitá obvodová rychlost míchadla ovlivňuje účinek průtoku vzduchu, má praktické důsledky. Tato data znamenají, že v případě, kdy u zařízení použijeme vyšších obvodových rychlostí míchadla, je užitečné zvyšovat průtok vzduchu do vyšších hodnot, než je třeba u téhož zařízení při nižších obvodových rychlostech míchadla. Jev má své fyzikální opodstatnění v růstu zádrže plynu v kapalině za podmínek syčení kapaliny bublinami vzduchu menšího průměru, čehož se dosáhne právě při vyšších obvodových rychlostech.

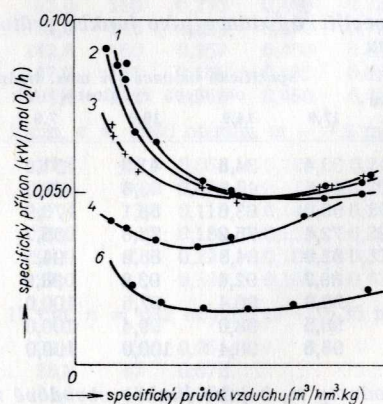
Pro vyšší obvodové rychlosti míchadla je při konstantním průtoku vzduchu vzrůst specifické oxidace vyšší, než při nižším průtoku vzduchu. To je opět patrné z tabulky 4. Zvýšení obvodové rychlosti o 350 % znamená zvýšení rychlosti vzrůstu specifické oxidace asi o 600 %. Změna obvodové rychlosti z 5,3 m/s na 17,9 m/s znamená zvýšení hodnoty specifické oxidace z hodnoty 43 na 129 mol  $O_2$ /m<sup>3</sup>.h, tj. o 200 % (pro průtok vzduchu  $v_s = 20$  m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup>), nebo z hodnoty 61 na 265 mol  $O_2$ /m<sup>3</sup>.h, tj. o 330 % (pro  $v_s = 100$  m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup>). Naopak, při konstantní obvodové rychlosti lze vlivem změny specifického průtoku vzduchu z hodnoty  $v_s = 20$  na 100 m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup> zvýšit přenos kyslíku z hodnoty 43 na 61 mol  $O_2$ /m<sup>3</sup>.h, tj. o 42 % (pro obvodovou rychlost 5,3 m/s) a z hodnoty 129 na 265 mol  $O_2$ /m<sup>3</sup>.h, tj. o 106 % (pro obvodovou rychlost 17,9 m/s) (čtvrtprovozní data). U poloprovozu byl při stejné změně specifického průtoku vzduchu zvýšen přenos kyslíku z 165 na 245 mol  $O_2$ /m<sup>3</sup>.h, tj. o 49 %.

Zvýšení obvodové rychlosti při konstantním průtoku vzduchu znamená větší využití vzdušného kyslíku, což již v sobě obsahuje předpoklad vedoucí ke snižování rychlosti vzrůstu přenosu kyslíku, zejména při vyšších hodnotách využití kyslíku. Zvyšování průtoku vzduchu samo o sobě je provázáno postupným snižováním využití vzdušného kyslíku, což je energeticky nevýhodné. Provázíme-li zvyšování průtoku vzduchu současným zvyšováním obvodové rychlosti míchadla, lze dosáhnout zvýšeného přenosu kyslíku působením obou těchto veličin při vhodně zvoleném a konstantně udržovaném využití kyslíku, což je energeticky nejvýhodnější.

Veškeré tyto údaje znamenají, že nulová hodnota exponentu  $\beta$  v relaci  $Ox_s = f(v_1\beta)$ , která se vyskytla v některých publikacích, není správná a byla zřejmě podmíněna spolupůsobením nedefinovaných faktorů. Při určení hodnoty  $b$  a  $m$  je nutno vždy uvažovat hodnotu obvodové rychlosti, za které byly získány.

Zvyšujeme-li průtok vzduchu zařízením, snižujeme množství energie spotřebované míchadlem a zvyšujeme množství energie dodávané se vzduchem. Snižování energie míchadla přibližně odpovídá údajům uváděným v literatuře [7, 8, 11, 12]. Množství energie dodávané vzduchem roste lineárně s množstvím vzduchu. Aby bylo možno srovnávat údaje z různých druhů zařízení se zřetelem na zkoumané veličiny, je nutno uvažovat jednotnou cenu 1 m<sup>3</sup> vzduchu. Zde je použita hodnota 0,025 kW/m<sup>3</sup> vzduchu, což odpovídá spotřebě energie moderních československých jednokolových radiálních turbomíchadel. Roste-li průtok vzduchu, pak celková spotřeba energie (energie na vzduch a na míchadlo) exponenciálně roste. V daném případě má význam energie spotřebovaná na přenos 1 molu kyslíku, tj. specifická

spotřeba energie  $E_s$  (kW/mol  $O_2$ /h). Grafické zobrazení závislosti specifického příkonu na specifickém průtoku vzduchu je uvedeno na obr. 4. Jsou zde uvedeny 4 závislosti zjištěné u čtvrtprovozního zařízení a jedna u poloprovozu. Z grafického znázornění vidíme, že v oblasti malých specifických průtoků vzduchu, tj.  $v_s = 0$  až asi 30 m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup>, je specifický příkon relativně značně vysoký, což je podmíněno nízkým přenosem kyslíku. Zvyšujeme-li průtok vzduchu (oblast  $v_s =$  asi 30 až 100 m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup>), pak se nalézáme v oblasti nejprudšího vzrůstu rychlosti přenosu kyslíku. Tento vzrůst převyšuje růst příkonu — výsledkem je rychlý pokles specifického příkonu. Dále však rychlost vzrůstu přenosu kyslíku rychle klesá, celkový příkon však exponenciálně roste. Výsledkem je nejprve malý vzestup specifického příkonu (oblast  $v_s =$  asi 100–150 m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup>). Při dalším vzrůstu specifického průtoku vzduchu se již nacházíme v oblasti, kde průtok vzduchu již prakticky nemá vliv na přenos kyslíku. V této části již specifický příkon sleduje vzrůst daný růstem celkové hodnoty příkonu, což při velmi vysokých průtocích vzduchu ( $v_s$  je větší než 200 m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup>) je dáno prakticky vzrůstem energie potřebné pro vzduch. Uvedená závislost specifického příkonu na průtoku vzduchu má tedy své minimum, které představuje energeticky nejvhodnější oblast. Oblast v okolí minimální hodnoty je dost plochá, což je vhodné pro provozní režim. Přesto však podstatné odchýlení se od specifického průtoku vzduchu, který přísluší minimu specifického příkonu, představuje značné ztráty na energii, jak je uvedeno v tabulce 7. Zde jsou v procentech uvedeny hodnoty specifického příkonu při jednotlivých hodnotách specifického průtoku vzduchu, přičemž za 100 % je považována minimální hodnota každé křivky.



Obr. 4. Závislost specifického příkonu na specifickém průtoku vzduchu

1/4 provoz — 1.  $w = 17,9$  m/s, 2.  $w = 14,9$  m/s, 3.  $w = 10,6$  m/s, 4.  $w = 7,9$  m/s 5. 1/2 provoz

Tabulka 7. Závislost specifického příkonu na specifickém průtoku vzduchu

Specifický průtok vzduchu [m <sup>3</sup> /h . m <sup>3</sup> ]	Specifický příkon jako procentický podíl min. hodnoty [%] obvodová rychlost [m/s]:				
	17,9	14,9	10,6	7,9	7,9 [1/2provoz]
20	201	173	140	120	188
30	167	147	127	112	146
40	142	128	114	106	119
60	126	112	104	100	102
80	106	104	100	103	100
100	102	100	100	109	100
120	100	100	102	118	103
140	100	102	106	118	103
160	102	106	110	126	113
180	106	112	118	144	138



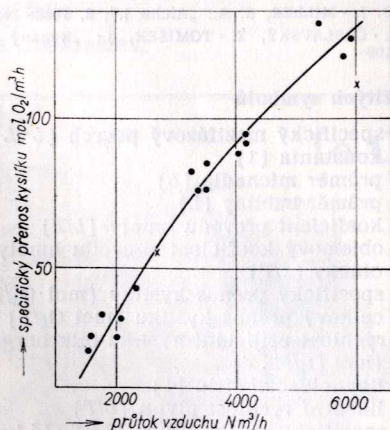
Uvedené minimum se vyskytuje jak u výsledků ze čtvrtprovozních zkoušek tak i u poloprovozních zkoušek. Tvar křivek i poloha minima jsou přibližně shodné. Uvedené minimum se pohybuje v rozmezí specifického průtoku vzduchu 60 až 120 m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup>.

## 2. Kvasné zkoušky

Na uvedeném poloprovozním zařízení byly provedeny zkoušky s kvasinkou *Candida utilis*, kmen č. 49 ze sbírky VÚKPS. Počáteční koncentrace kvasničné sušiny byla 1,15 g/100 ml, při celkovém objemu kapaliny 5 m<sup>3</sup>. Kultivace byla vedena při specifickém průtoku vzduchu 130 m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup>, vzhledem k tomu, že přibližně v této oblasti se nachází energetické optimum. Otáčky míchadla byly 145 ot/min, čemuž odpovídá obvodová rychlost 6,07 m/s. Po 7 hodinách kultivace byla konečná koncentrace kvasničné sušiny 4,54 g/100 ml a přírůstek sušiny činil 169 kg. Růst byl prakticky po celou dobu trvání zkoušky lineární.

Hodinová spotřeba energie na vzduch činila 16,2 kW, příkon motoru byl 9,9 kW. Celková hodinová spotřeba energie byla 26,1 kW. Specifická spotřeba energie činila 1,08 kWh na 1 kg kvasničné sušiny. Průměrná hodinová produkce z 1 m<sup>3</sup> celé kádě činila 2,41 kg/h.m<sup>3</sup>. Produkčně určená rychlost přenosu kyslíku je 151 mol O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.h. Údaj získaný při šifřičtanových zkouškách za stejných podmínek je 210 mol O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.h. Produkční hodnota je tak o 28 % nižší. Tento druh zkoušky byl opakován třikrát, prakticky se zcela shodnými výsledky. Zvyšování průtoku vzduchu až na hodnotu 1200 m<sup>3</sup>/h, tj.  $v_s = 240$  m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup>, bylo pouze krátkodobé. Cílem bylo ověřit, zda je možno u takto míchané kádě s plněním 50 % zvýšit průtok vzduchu na takto vysoké hodnoty, aniž bude pěna vytékat z kádě. Ukázalo se, že pěna u intenzivně míchaných systémů se do značné části zamíchá do kapaliny. Pěna je možno i za těchto podmínek udržet v kádi. Spotřeba odpěňovacího tuku (olein I) byla u všech pokusů (tj.  $v_s = 130$ – $240$  m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup>) prakticky stejná, a to 0,2 l/h, tj. asi 0,014 kg na 1 kg vytvořené kvas. sušiny.

Provozní zkoušky byly realizovány na zařízení odlišného typu. Při použití trubkového větrání se obsah fermentoru míchá pouze pneumaticky. Proto lze očekávat u některých závislostí zjištěných u předcházejících zkoušek změny s ohledem na to, že část energie se zde spotřebovává na míchání.



Obr. 5. Specifická oxidace jako funkce průtoku vzduchu [1/1 provoz]

V tabulce 3 jsou uvedena provozní experimentální data. Grafické zobrazení závislosti specifické oxidace na průtoku vzduchu je uvedeno na obr. 5. Aby byl částečně korigován vliv měnicího se objemu kapaliny vzhledem k průtoku vzduchu, je v grafu 6 uvedena závislost spe-

cifické oxidace na specifickém průtoku vzduchu. Objem kapaliny a tím i její výška se během pokusu prakticky zdvojnásobily. Tím se prodloužila i doba kontaktu fází. Tento faktor není korigován, zvyšuje poněkud hodnoty specifické oxidace při jinak konstantních podmínkách.

Bylo změřeno, že maximální průtok vzduchu, dosažitelný původním trubkovým větráním v kádi je asi 3000 až 3500 m<sup>3</sup>/h, tj. v průměru 3250 m<sup>3</sup>/h. Maximální průtok vzduchu při použití obou popsaných trubkových systémů byl asi 6000 m<sup>3</sup>/h. Pro tyto dvě hodnoty průtoku vzduchu byly z obr. 6 odečteny hodnoty specifické oxidace příslušející objemu kapaliny 30 – 40 – 50 – 60 m<sup>3</sup> (viz tab. 8).

Z uvedených údajů lze činit tyto závěry:

a) Vzdělání přenosu kyslíku v celém proměřeném rozmezí specifického průtoku vzduchu ( $v_s = 45$ – $120$  m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup>) je přímo úměrný průtoku vzduchu.

b) Vzhledem k přenosu kyslíku je užitečné zvyšovat průtok vzduchu minimálně až do hodnoty  $v_s = 120$  m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup>. Přenos kyslíku za těchto podmínek dosahuje při maximálním plnění kádě hodnoty 100 až 130 mol O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.h. Zvýšíme-li průtok vzduchu z 3250 na 6000 m<sup>3</sup>/h (při konstantním objemu kapaliny), pak se specifická i celková oxidace zvýší o 26 až 290 % v závislosti na plnění kádě (viz tab. 8). Čím je vyšší plnění kapaliny ve fermentoru, tím je vzestup přenosu kyslíku při zvýšení průtoku vzduchu vyšší.

Tabulka 8. Závislost specifické oxidace na specifickém průtoku vzduchu a objemu kapaliny

Průtok vzduchu			Přenos kyslíku			
celkový [m <sup>3</sup> /h]	specifický [m <sup>3</sup> /h . m <sup>3</sup> ]	Objem kapaliny [m <sup>3</sup> ]	specifický [mol O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> . h]	[%]	celkový [mol O <sub>2</sub> /h]	[%]
3250	108	30	119	100	3570	100
3250	81,5	40	94	100	3760	100
3250	65	50	57	100	2850	100
3250	54,5	60	29	100	1740	100
6000	200	30	150	126	4500	126
6000	150	40	142	151	5700	151
6000	120	50	127	223	6350	223
6000	100	60	113	390	6780	390

Pozn. V tabulce není korigován vliv změny doby kontaktu fází, která se změnila až asi o 100 %. Tímto je nutno korigovat data v přenosu kyslíku.

c) Za podmínek daných pokusem, při nižších hodnotách specifického průtoku vzduchu ( $v_s =$  asi 40–50 m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup>) je specifický příkon asi 0,04–0,05 kW/mol O<sub>2</sub>/h, při specifickém průtoku vzduchu 70–80 m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup> je specifický příkon 0,021–0,024 kW/mol O<sub>2</sub>/h. Při dalším zvýšení průtoku vzduchu se specifická spotřeba energie mírně zvyšuje (až na hodnotu asi 0,025 kW/mol O<sub>2</sub>/h). Pro srovnání je uvažována hodnota 0,025 kW/m<sup>3</sup> vzduchu.

d) Trubkové větrání za běžných podmínek dosahuje (v závislosti na plnění kádě) rychlosti přenosu kyslíku 25 až 40 mol O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.h. Při výše uvedené průměrné spotřebě energie na 1 m<sup>3</sup> vzduchu se provozní hodnota specifického příkonu pohybuje v mezích 0,035 až 0,050 kW/mol O<sub>2</sub>/h. Snížení specifické spotřeby energie na přenos 1 molu kyslíku zvýšením průtoku vzduchu tak představuje 40 až 60 % původní provozní hodnoty.

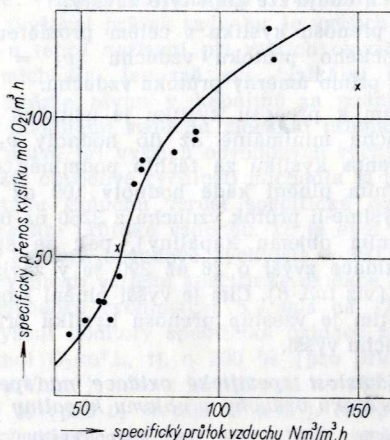
e) Údaje uvedené v grafech 5 a 6 byly ověřeny delší provozní zkouškou, provedenou na stejném zařízení. Celé kvašení bylo vždy provedeno za konstantních podmínek, tj. při konstantním objemu kapaliny a konstantního průtoku vzduchu. Zkoušky byly charakterizovány těmito daty a výsledky:

— objem kapaliny 43 m<sup>3</sup>, průtok vzduchu 2700 m<sup>3</sup>/h, specifický průtok vzduchu 63 m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup>, specifická oxidace 53 mol O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.h;



— objem kapaliny 40 m<sup>3</sup>, průtok vzduchu 6000 m<sup>3</sup>/h, specifický průtok 150 m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup>, specifická oxidace 110 mol O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.h. V obrázcích 5 a 6 jsou tyto hodnoty zobrazeny křížkem. Je zřejmé, že hodnota specifické oxidace 53 mol O<sub>2</sub> leží prakticky přesně na křivce, hodnota 110 mol O<sub>2</sub> leží asi o 20 až 30 mol O<sub>2</sub> níže.

f) V obrázku 3 je v logaritmických souřadnicích zobrazena závislost specifické oxidace na specifickém průtoku vzduchu. Vidíme, že opět přibližně do hodnoty  $v_s = 100$  m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup> se tato závislost řídí exponenciálním vztahem  $Ox_s = m \cdot v_s^b$ . Při vyšších průtocích vzduchu následuje přechodná oblast. Hodnoty  $m$  i  $b$  jsou odlišné, a to  $m = 0,004$ ,  $b = 2,28$ .



Obr. 6. Specifická oxidace jako funkce specifického průtoku vzduchu (1/1 provoz)

#### Celkové hodnocení

1. Závislost přenosu kyslíku na průtoku vzduchu se dělí na tři fáze. V první fázi ( $v_s \leq 100$ – $150$  m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup>) se závislost řídí exponenciálním vztahem  $Ox_s = m \cdot v_s^b$ , druhá fáze je přechodná oblast ( $v_s = 100$ – $200$  m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup>), v třetí fázi ( $v_s = 200$  m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup>) přenos kyslíku nezávisí na průtoku vzduchu.

2. Provozně je zajímavá první oblast. V příslušném vztahu pro přenos kyslíku nejsou veličiny  $m$  a  $b$  konstantní jak se dosud uvažovalo. Tyto veličiny jsou výrazně závislé na obvodové rychlosti míchadla.

3. Při hodnocení vlivu průtoku vzduchu na přenos kyslíku u různých zařízení je výhodnější charakterizovat průtok vzduchu specifickým průtokem, tj. průtokem vztaženým na m<sup>3</sup> kapaliny, než lineární rychlostí toku plynu.

4. Používáme-li rotační dispergátor vzduchu, pak při vyšší obvodové rychlosti má smysl zvyšovat průtok vzduchu do vyšších hodnot. Při zvyšování obvodové rychlosti míchadla je nutno současně zvyšovat i průtok vzduchu, aby bylo zachováno konstantní, optimálně nastavené, využití vzdušního kyslíku.

5. Závislost specifického příkonu na průtoku vzduchu má parabolický tvar. Minimum se nachází v oblasti průtoku vzduchu  $v_s = 60$ – $120$  m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup>. Toto minimum je nutno u každého zařízení zvlášť nalézt, aby fermentace probíhala v hospodárné oblasti.

6. Podle publikace o větracích systémech s turbínovými míchadly [13] je používáný specifický průtok vzdu-

chu [m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup>] u provozních zařízení tento: kád 100 m<sup>3</sup> s děrovanými trubkami Kolín 47, kád 100 m<sup>3</sup> s turbínou Kolín 41, kád 200 m<sup>3</sup> s turbínou Trenčín 45 a kád 200 m<sup>3</sup> s turbínou Libáň 11. U všech uvedených zařízení není tedy s největší pravděpodobností používaná hodnota specifického průtoku vzduchu optimální. V některých případech je odchylka velmi výrazná.

7. Zajímavé je srovnání experimentálních závěrů v této zprávě obsažených, provozních dat uvedených v předšlém bodě, s provozními daty zařízení typu Vogelbusch, kde se jedná o zařízení s rotujícím dispergátorem vzduchu a pneumaticky míchaným systémem. Toto zařízení používá vysokých specifických průtoků vzduchu  $v_s = 120$ – $130$  m<sup>3</sup>/h.m<sup>3</sup> a dosahuje specifické oxidace 130 mol O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.h. Obě tyto hodnoty se přibližně shodují jak se závěry, které byly určeny na menších modelech (tj. požadavek vysokého specifického průtoku vzduchu), tak i s hodnotou specifického přenosu kyslíku, zjištěnou v provozním měřítku v kádi s trubkovým větráním za podmínek vysokého specifického průtoku vzduchu. U Vogelbuschova zařízení byl příkon na míchání 16 kW, na vzduch 43 kW. Tomu odpovídá specifický příkon 0,016 kW/mol O<sub>2</sub>/h. Vezmeme-li v úvahu hodnotu 0,025 kW/m<sup>3</sup> [jak odpovídá našim turbodmychadlům], pak je specifický příkon 0,0268 kW/mol O<sub>2</sub>/h.

8. Provozní zkoušky byly provedeny v kádi s trubkovým větráním. Zjištěné výsledky v podstatě potvrzují obecné závěry menších modelů. Vlivem vysokého průtoku vzduchu lze u tohoto zařízení dosáhnout přenosu kyslíku přes 100 mol O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.h, při specifickém příkonu 0,020 až 0,025 kW/mol O<sub>2</sub>/h.

#### Literatura

- [1] SIEMENS, W.: „Chem. Ing. Techn.“, **26**, 1954: 479
- [2] LEIBSON, R. - HOLCOMB, W.: „Aiche J.“, **2**, 1956: 298
- [3] DAVIDSON, L. - AMICK, E. H.: „Aiche J.“, **2**, 1956: 337
- [4] RENIE, J. - EVANS, F.: „Brit. Chem. Eng.“, **7**, 1962: 498
- [5] SIDEMAN, S. - HORTASCU, O.: „Ind. Eng. Chem.“, **58**, 1966: 32
- [6] WESTERTERP, K. R.: „Chem. Eng. Sci.“, **18**, 1963: 18
- [7] FRIEDMAN, A. M. - LIGHTFOOT, E. N.: „Ind. Eng. Chem.“, **49**, 1957: 1227
- [8] COOPER, C. M. - FERNSTROM, G. A. - MILLER, S. A.: „Ind. Eng. Chem.“, **36**, 1944: 504
- [9] SCHULTZ, J. S. - GADEN, E. L.: „Ind. Eng. Chem.“, **48**, 1956: 2209
- [10] PHILLIPS, D. H. - JOHNSON, M. J.: „Ind. Eng. Chem.“, **51**, 1959: 83
- [11] FOUST, H. C. - MACK, D. E. - RUSHTON, J. H.: „Ind. Eng. Chem.“, **36**, 1944: 517
- [12] MICHEL, B. J. - MILLER, S. A.: „Aiche J.“, **8**, 1962: 262
- [13] ŠTROS, F. - ČÁSLAVSKÝ, Z. - TOMÍŠEK, J.: „Kvasný průmysl“, **14**, 1968: 109

#### Seznam použitých symbolů

$a$	... specifický mezifázový povrch ( $L^2/L^3$ )
$A'$	... konstanta [1]
$d$	... průměr míchadla [ $L$ ]
$d_b$	... průměr bubliny [ $L$ ]
$k_L$	... koeficient převodu hmoty [ $L/T$ ]
$k_v$	... objemový koeficient převodu hmoty [ $1/T$ ]
$n$	... otáčky [ $1/T$ ]
$Ox_s$	... specifický přenos kyslíku (mol O <sub>2</sub> /L <sup>3</sup> .T)
$Ox_t$	... celkový přenos kyslíku (mol O <sub>2</sub> /T)
$Q_{O_2}$	... rychlost přijímání kyslíku mikroorganismem (mol O <sub>2</sub> /M.T)
$Re$	... Reynoldsovo číslo [1]
$v_1$	... lineární rychlost plynu [ $L/T$ ]
$v_s$	... specifický průtok plynu [ $L^3/T \cdot L^3$ kapaliny]
$w$	... obvodová rychlost míchadla [ $L/T$ ]