

## Měření rychlosti sdílení kyslíku u velkoobjemových průmyslových fermentorů

653.14.033.2:546.21  
653.132

### I. Teoretická část

Ing. FRANTIŠEK MADRON, Chemopetrol, Výzkumný ústav anorganické chemie, Ústí n. L.  
Ing. MILOSLAV RUT, Ing. FRANTIŠEK ŠTROS, Výzkumný ústav krmivářského průmyslu a služeb,  
oddělení mikrobiálních výrob, Praha

#### Rozbor problému

Sdílení kyslíku, nezbytné živiny při aerobních fermentacích, je jedním z rozhodujících činitelů při navrhování, optimalizaci a řízení fermentačních procesů. Vzhledem k nízké rozpustnosti kyslíku ve fermentačních médiích je jeho zásoba v kapalně fázi tak nízká, že jeho plynulé doplňování je nezbytné pro úspěšné vedení fermentace.

Účinnost využití kyslíku při průmyslových fermentacích zřídka přesahuje 30 % a náklady na míchání a aeraci tvoří významnou část výrobních nákladů [1]. Například při výrobě krmných bílkovin z etanolu, která patří mezi středně náročné z hlediska spotřeby kyslíku, představují náklady přímo úměrné spotřebě kyslíku, přibližně 45 % z investičních nákladů a stejnou část nákladů na energie [2].

Měření přestupu kyslíku u laboratorních a poloprodučních fermentorů byl věnován značný počet prací. Od dob pionýrské práce *Coopera a spol.* [3] byla navržena řada metod pro měření koeficientů prostupu kyslíku  $K_{La}$  [4–7]. Vyvinutí spolehlivě pracujících kyslíkových elektrod, jež umožnily kontinuální měření a záznam koncentrace kyslíku v kapalně fázi, přispělo k rozšíření dynamických metod měření  $K_{La}$ , které se v dnešní době ve značné míře používají. Jejich výhodou

je značná rychlost, experimentální nenáročnost a to, že některé z nich jsou použitelné při probíhající fermentaci.

Dynamické metody vycházejí z předpokladu, že lze kontinuálně zjišťovat střední koncentraci kyslíku rozpustného v kapalně fázi fermentoru. U malých fermentorů lze tento předpoklad při dostatečné intenzitě míchání poměrně snadno splnit a měřit koncentraci kyslíku v libovolném místě fermentoru. Současně je však známo, že čas míchání (tj. doba potřebná pro úplné splnutí kapky kapaliny uvedené do systému s okolní kapalinou o stejných fyzikálních vlastnostech) roste se zvětšováním míchané nádoby [8]. U velkoobjemových průmyslových fermentorů, jejichž objemy se pohybují řádově ve stovkách  $m^3$ , setkáváme se potom zákonitě s významnými nehomogenitami jak teplotními, tak i koncentračními. Zjištění střední koncentrace rozpustného kyslíku za těchto podmínek by si vyžádalo současné měření koncentrace kyslíku na více místech fermentoru. Toto je také důvod, proč nebyly podle dostupných informací dynamické metody aplikovány na měření  $K_{La}$  u velkých fermentorů.

Cílem předložené práce je uvést metody vhodné pro získání spolehlivých údajů o sdílení kyslíku ve velkoobjemových průmyslových fermentorech. Tyto metody založené většinou na proměření fermentace v ustále-



ném stavu byly aplikovány při měření objemového součinitele prostupu kyslíku fermentoru o objemu 200 m<sup>3</sup> při výrobě krmných bílkovin z etanolu.

### Teoretická část

Rychlost prostupu kyslíku z hlavního proudu plynné fáze do jádra kapalné fáze bývá nejčastěji vyjádřena úhrnným součinitelem prostupu  $K_L$  definovaným na základě kapalné fáze

$$N = K_{La} V (C_{O^*} - C_O) \quad (1)$$

kde:

$N$  je rychlost prostupu kyslíku (kmol h<sup>-1</sup>),  
 $a$  — specifický mezifázový povrch (m<sup>-1</sup>),  
 $V$  — objem fermentoru (m<sup>3</sup>),  
 $C_{O^*}$  — koncentrace kyslíku v kapalně fázi rovnovážná s koncentrací kyslíku v jádru plynné fáze (kmol m<sup>-3</sup>),  
 $C_O$  — střední koncentrace kyslíku v jádru kapalně fáze (kmol m<sup>-3</sup>).

U fermentačních systémů se většinou předpokládá, že odpor proti prostupu kyslíku je soustředěn v kapalně fázi [8] a úhrnný součinitel prostupu  $K_L$  bývá často považován za totožný s dílčím součinitelem přestupu [9] v kapalně fázi  $k_L$ .

Vzhledem k potížím při zjišťování specifického mezifázového povrchu při probíhající fermentaci nelze většinou měřit přímo  $K_L$ , ale pouze součin  $K_{La}$ , tzv. objemový součinitel prostupu kyslíku.

Rovnice (1) může přímo sloužit za základ pro výpočet objemového součinitele prostupu kyslíku v případech, kdy jsou k dispozici údaje o  $N$ ,  $V$ ,  $C_O$  a  $C_{O^*}$ . Zabývejme se nyní problematikou měření a výpočtů uvedených veličin.

### Metody zjišťování rychlosti prostupu kyslíku

Zjištění množství kyslíku převedeného z plynné fáze k mikroorganismům představuje bezesporu nejdůležitější a experimentálně nejnáročnější část měření součinitele prostupu kyslíku. Rychlost prostupu kyslíku přes fázové rozhraní charakterizuje pro danou technologii funkci fermentoru z hlediska sdílení kyslíku a tato veličina bývá rozhodující pro výběr fermentoru ve stadiu projekce.

Dále budou uvedeny tři metody měření rychlosti prostupu kyslíku, založené postupně na látkové bilanci plynné fáze, kapalně fáze a komplexní látkové bilanci fermentace.

### Látková bilance plynné fáze

Základní údaje pro výpočet množství převedeného kyslíku jsou koncentrace kyslíku v plynných prouděch spojených s fermentorem a průtoky těchto proudů. Průtok plynů opouštějících fermentor není obvykle měřen a dopočítává se z látkové bilance. Pokud se provádí fermentace se vzduchem, odpadá měření koncentrace kyslíku na vstupu do fermentoru. Při výpočtech je třeba brát v úvahu kysličník uhličitý vznikající v průběhu fermentace.

Pro výpočet rychlosti prostupu kyslíku lze při fermentaci se vzduchem odvodit například vztah [10]:

$$N = \frac{(P - p\phi) v}{100 RT} \left[ 20,99 - \% O_2 \frac{78,98}{100 - \% O_2 - \% CO_2} \right] \quad (2)$$

kde:

$P$  je tlak vzduchu na vstupu do fermentoru (Pa),

$T$  — absolutní teplota vzduchu na vstupu do fermentoru (K),  
 $p$  — tense páry vody při teplotě  $T$  (Pa),  
 $\phi$  — relativní vlhkost vzduchu na vstupu do fermentoru,  
 $v$  — objemový průtok vzduchu měřený na vstupu do fermentoru (m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>),  
 $R$  — univerzální plynová konstanta (J kmol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>),  
 $\% O_2, \% CO_2$  — obj.  $\% O_2$  a  $CO_2$  v plynu opouštějícím fermentor (vztaheno na suchý vzduch).

Předpoklady, z nichž byl vztah (2) odvozen jsou:

1. plyny se řídí stavovou rovnicí ideálního plynu,
2. dusík a vzácné plyny procházejí fermentorem beze změny,
3. složení suchého vzduchu [11] je: 20,99 obj.  $\% O_2$ , 0,03 obj.  $\% CO_2$  a 78,98 obj.  $\% N_2$  a vzácné plyny,
4. analýza plynné fáze se provádí automatickými analyzátory, jež udávají složení vysušeného plynu.

### Látková bilance kapalně fáze

Metoda výpočtu rychlosti prostupu kyslíku z látkové bilance kapalně fáze vychází z předpokladu, že veškerý kyslík převedený do kapalně fáze je využit mikroorganismy. Vzhledem k nízké rozpustnosti kyslíku v kapalně fázi je tento předpoklad většinou oprávněný.

Byla publikována řada prací zabývajících se bilančními výpočty spotřeby kyslíku mikroorganismy v závislosti na výtěžnosti procesu, složení produktů fermentace apod. [13–18], jednotnou metodiku bilančních výpočtů fermentačních pochodů lze nalézt v práci [19].

Předpoklady, z nichž bilanční výpočty spotřeby kyslíku vycházejí, jsou:

1. Jsou známy všechny bilančně významné látky, jež se účastní fermentace.
2. Je známo elementární složení těchto látek.
3. Jsou měřeny rychlosti tvorby nebo spotřeby vybraných látek, jež se účastní fermentace. Počet a výběr těchto látek musí přitom umožňovat výpočet množství ostatních látek z rovnic látkové bilance.

Předpokládáme, že fermentace se účastní celkem  $I$  látek složených z  $J$  chemických prvků. Chemické složení těchto látek lze vyjádřit maticí elementárního složení  $E$ , jejíž prvky  $e_{ji}$  udávají počet atomů  $j$ -tého prvku v molekule  $i$ -té látky.

Základ bilančních výpočtů tvoří rovnice zachování chemických prvků v průběhu fermentace, jež lze zapsat jako:

$$\sum_{i=1}^I e_{ji} n_i = 0; \quad j = 1, \dots, J \text{ nebo } E \cdot n = 0 \quad (3)$$

kde:

$n_i$  je molová rychlost tvorby  $i$ -té látky v důsledku fermentace (kladná v případě produktu a záporná v případě výchozí látky).

Z rovnice (3) lze vypočítat neměřené veličiny  $n_i$  (tedy i rychlost spotřeby kyslíku) v případě, že byly změřeny rychlosti tvorby celkem pro  $I - r$  látek, kde  $r$  je hodnota matice  $E$  [20]. Volby těchto měřených látek musí přitom vyhovovat podmínce, že matice  $E_p$ , která vznikla z matice  $E$  výběrem  $r$  sloupců odpovídajících neměřeným látkám má přitom stejnou hodnotu jako původní matice  $E$ .

Při platnosti výše uvedených předpokladů je možno rovnice (3) řešit vzhledem k rychlosti tvorby neměřených látek, přičemž řešení lze většinou zapsat schématicky ve tvaru:



$$n_p = -E_p^{-1} \cdot E_m \cdot n_m = A \cdot n_m \quad (4)$$

kde:

$n_p$  je vektor rychlosti tvorby neměřených látek  
( $\text{kmol h}^{-1}$ ),

$E_p$  — matice stechiometrického složení neměřených látek,

$n_m$  — vektor rychlosti tvorby měřených látek  
( $\text{kmol h}^{-1}$ ).

Po rozepsání rovnice (4) pro jednotlivé složky získáme vztah pro výpočet rychlosti spotřeby kyslíku (předpokládáme zde bez újmy na obecnosti, že kyslík je prvním prvkem vektoru  $n_p$ ).

$$n_{O_2} = -N = \sum_{i=1}^{I-r} a_i n_i \quad (5)$$

kde:

$a_i$  jsou prvky prvního řádku matice  $A$ ,

$n_i$  jsou molové rychlosti tvorby měřených látek.

Výpočet množství spotřebovaného kyslíku podle vztahu (5) umožňuje též získat přibližnou informaci o přesnosti vypočtené hodnoty. Pro rozptyl rychlosti spotřeby kyslíku vypočtené podle vztahu (5) platí jednoduchý vztah:

$$\sigma_{O_2}^2 = \sum_{i=1}^{I-r} a_i^2 \sigma_i^2 \quad (6)$$

kde:

$\sigma_i^2$  jsou rozptyly měřených veličin  $n_i$  (za předpokladu, že chyby měření veličin  $n_i$  jsou nekorelované [21]).

Zabývejme se nyní faktory, jež mají vliv na přesnost výpočtu rychlosti spotřeby kyslíku z látkové bilance [17]. O platnosti základního principu, z něhož odvození těchto vztahů vychází, tj. zákona o zachování chemických prvků během fermentace, zřejmě nelze pochybovat. Zdroje možných chyb jsou v předpokladech, ze kterých odvození vztahu (5) vychází. Nejvýznamnější vliv zde mají nepřesnosti při měření rychlosti tvorby produktu (systematickou chybu může způsobit např. nerespektování buněčných složek rozpuštěných v kapalném médiu) a event. neznalost všech bilančně významných vedlejších produktů fermentace. Naproti tomu méně významný je vliv nepřesné znalosti složení biomasy [16, 17]. Vzhledem k tomu, že rychlosti spotřeby a tvorby kapalných a pevných látek se většinou měří se značnou přesností (jde o základní suroviny a produkty), je věrohodnost výpočtu rychlosti spotřeby kyslíku určována do značné míry tím, jak se podaří eliminovat systematické chyby v předpokladech, z nichž odvození vztahů (5, 6) vychází. Při pečlivé přípravě měření lze výpočtem podle vztahu (5) získat hodnoty, jež odpovídají rychlosti spotřeby kyslíku zjištěné na základě látkové bilance plynné fáze [17, 18].

### Komplexní látková bilance fermentace

V případě, že fermentace byla proměřena komplexně, setkáváme se často s případem, kdy naměřená data jsou v rozporu s obecně platnými zákony o zachování hmoty. Jestliže jsou například změřeny rychlosti spotřeby a tvorby u všech látek obsahujících uhlík, vlivem experimentálních chyb lze očekávat, že nebude možno uzavřít bilanci uhlíku. V takové situaci lze za předpokladu, že měření není zatíženo hrubými a systematickými chybami, provést statistické vyhlazení experimentálních dat.

Byla publikována řada prací zabývajících se statistickým vyhlazením dat látkové bilance [22–27], z nichž poslední je přímo aplikována na případ kontinuální kultivace mikroorganismů. Základem všech těchto metod je úprava naměřených hodnot tak, aby součet čtverců odchylek naměřených a vyhlazených hodnot byl minimální a přitom aby vyhlazené hodnoty vyhovovaly

základním rovnicím látkové bilance. Přínosem těchto metod zpracování experimentálních dat je to, že se tímto způsobem využijí při výpočtu spotřeby kyslíku veškeré naměřené údaje, což se projeví ve zvýšené přesnosti vypočtené hodnoty.

Podrobnosti o metodice statistického vyhlazení dat lze nalézt v uvedených pracích, zejména v [25–27]. Podstatné je, že rychlost spotřeby kyslíku lze vyjádřit vztahem obdobným vztahu (5):

$$n_{O_2} = -N = \sum_{i=1}^k a_i' n_i \quad (7)$$

kde:

$k$  je počet látek, pro něž byly změřeny rychlosti tvorby, resp. spotřeby během fermentace.

Vztah (7) se liší od běžného bilančního výpočtu (rov. 5) větším počtem látek, z nichž se spotřeba kyslíku počítá, ( $k > I-r$ ), další významný rozdíl je v tom, že koeficienty  $a_i'$  v rovnici (7) závisí nejen na rovnicích látkové bilance, ale i na statistických vahách, které ve výpočtu zvýrazňují data s vyšší přesností.

### Koncentrace kyslíku

Ve vztahu pro výpočet objemového součinitele prostupu kyslíku (1) se vyskytují střední koncentrace kyslíku v jádru kapalně fáze ( $C_O$ ) a koncentrace rovnovážná se střední koncentrací kyslíku v jádru plynné fáze ( $C_O^*$ ).

Skutečná koncentrace kyslíku rozpuštěného v kapalně fázi se může značně měnit v závislosti na prostorových souřadnicích. Důležité je, že u fermentací limitovaných kyslíkem (přitom právě v těchto případech má měření  $K_{La}$  největší význam) bývá koncentrace kyslíku nízká a lze ji často považovat za nulovou.

Pokud je fermentace limitována kyslíkem, je rychlost tvorby biomasy  $n_B$  dána Monodovou rovnicí [28]:

$$n_B = V C_B \frac{\mu_m \cdot C_O}{C_O + K_O} \quad (8)$$

kde:

$C_B$  je koncentrace biomasy ( $\text{kg m}^{-3}$ ),

$K_O$  — saturační konstanta pro kyslík ( $\text{kg m}^{-3}$ ),

$\mu_m$  — maximální růstová specifická rychlost ( $\text{h}^{-1}$ ),

$C_O$  — koncentrace kyslíku v kapalně fázi ( $\text{kg m}^{-3}$ ).

Jelikož parametry  $K_s$  a  $\mu_m$  jsou pro daný mikroorganismus charakteristické, je možno je zjistit v laboratoři. Z rovnice (8) lze pak střední koncentraci kyslíku vypočítat.

Zjištění koncentrace  $C_O^*$  vyžaduje jednak znalost parciálního tlaku kyslíku v jádru plynné fáze, dále výpočet rovnovážné koncentrace v kapalně fázi.

Střední parciální tlak kyslíku v plynné fázi závisí na koncentraci kyslíku v plynech na vstupu a výstupu z fermentoru a na způsobu toku plynné fáze fermentorem. Z měření *Hanharta*, *Kramerse* a *Westerterpa* [29] vyplývá, že při dostatečné intenzitě míchání lze považovat plynnou fázi za dokonale míchanou. Za tohoto předpokladu je střední koncentrace kyslíku totožná s koncentrací kyslíku v plynech na výstupu z fermentoru. Další faktor, který je třeba u velkoobjemových fermentorů brát v úvahu, je zvýšení tlaku kyslíku v důsledku hydrostatického tlaku ve spodní části fermentoru.

Rovnováha mezi kyslíkem v plynné a kapalně fázi se vyjadřuje Henryho konstantou  $H$ :

$$C_O^* = H \cdot p$$

kde:

$p$  je parciální tlak kyslíku v plynné fázi.



Hodnota Henryho konstanty závisí na teplotě a složení kapalné fáze. Obecně platí, že rostoucí teplota a koncentrace rozpuštěných látek má za následek snížení rozpustnosti kyslíku [30, 31].

### Fermentační objem

Pro aerobní fermentace je charakteristické značné zvětšení objemu kapaliny v důsledku provzdušnění. Při výpočtu  $K_L a$  lze získat rozdílné hodnoty podle toho, zda do výpočtu bereme objem kapalné fáze (tzv. plněný objem fermentoru) nebo celkový objem fermentoru.

Vztažení  $K_L a$  na celkový objem fermentoru je často výhodné, neboť skutečný objem kapalné fáze ve fermentoru může kolísat v důsledku různého plnění fermentoru (vliv odpěňování, aerace atd.).

### Diskuse a závěr

Měření objemového součinitele prostupu kyslíku u velkoobjemových fermentorů je komplikovaný problém. Naměřené hodnoty se mohou podstatně lišit podle předpokladů, z nichž použita metodika měření vychází, přičemž získané výsledky závisí především:

na zjištění rychlosti prostupu kyslíku přes fázové rozhraní,

definici hnací síly, jež závisí na středních koncentracích kyslíku v jádru plynné a kapalné fáze,

definici fermentačního objemu.

Je zřejmé, že skutečnost je složitější a že naměřené hodnoty  $K_L a$  představují střední integrální hodnoty pro celý fermentor. Dosud chybí dostatek experimentů, které by umožnily činit rozsáhlejší závěry o  $K_L a$  jako funkci prostorových souřadnic. Nejrozsáhlejší výzkumy v tomto směru podnikli Wilhelm, Donohue a Valesano [32], kteří zjistili, že podstatný vliv na rychlost absorpce mají pouze oblasti v okolí míchadla a distributoru plynu, zatímco vliv prostoru mezi míchadlem a hladinou je malý.

Závěrem je možno konstatovat, že spolehlivé informace o  $K_L a$  jsou nutnou podmínkou pro zvětšování měřítka fermentorů a pro optimální volbu fermentoru pro danou technologii. Problematika experimentálního zjištění  $K_L a$  v průmyslovém měřítku bude demonstrována v druhé části této práce na příkladu výroby jednobuněčných bílkovin z etanolu.

### Seznam symbolů

$a$	specifický mezifázový povrch [ $m^{-1}$ ]
$a_i$	koefficient v rov. (5)
$a_i'$	koefficient v rov. (7)
$A$	matice definovaná v rov. (4)
$c_O$	koncentrace kyslíku v jádru kapalné fáze [ $kg\ m^{-3}$ ]
$c_B$	koncentrace biomasy [ $kg\ m^{-3}$ ]
$C_O$	koncentrace kyslíku v jádru kapalné fáze [ $kmol\ m^{-3}$ ]
$C_O^*$	koncentrace kyslíku rovnovážná s jádrem plynné fáze [ $kmol\ m^{-3}$ ]
$e_{ji}$ ; $E$	počet atomů $j$ -tého prvku v molekule $i$ -té látky; matice koefficientů $e_{ji}$
$E_p$ ; $E_m$	matice koefficientů $e_{ji}$ počítaných, resp. měřených látek
$I$	počet látek v problému se vyskytujících
$k_L a$	dílčí objemový součinitel sdílení kyslíku v kapalné fázi [ $h^{-1}$ ]
$K_L a$	úhrnný objemový součinitel prostupu kyslíku [ $h^{-1}$ ]
$n_i$ ; $n$	rychlost vzniku počtu molů $i$ -té látky; vektor veličin $n$ [ $kmol\ h^{-1}$ ]
$n_p$ ; $n_m$	vektory veličin $n_i$ pro počítané, resp. měřené látky
$N$	rychlost prostupu kyslíku [ $kmol\ h^{-1}$ ]
$r$	hodnota matice $E$

$V$	objem fermentoru [ $m^3$ ]
$\mu_m$	maximální specifická růstová rychlost [ $h^{-1}$ ]
$\sigma_i^2$	rozptyl měření veličin $n_i$

### Literatura

- [1] BLAKEBROUGH, N.: Brit. Chem. Eng., **12**, 78, 1967
- [2] MADRON, F.: Matematické modelování a optimalizace výroby krmných kvasnic z etanolu, Kand. dis. práce, VÚAnCH Ústí n. L. 1975
- [3] CGOPER, C. M., FENSTROM, G. A., MILLER, S. A.: Ind. Eng. Chem., **36**, 504, 1944
- [4] RICHARDS, J. W.: Prog. Ind. Microbiol., **3**, 143 (1961)
- [5] DEINDOERFER, F. H., GADEN, E. L.: Appl. Microbiol., **3**, 253, 1955
- [6] HOSPODKA, J.: Biotechnol. Bioeng., **8**, 117, 1966
- [7] BANDYOPADHYAY, B., HUMPREY, A. E.: Biotechnol. Bioeng., **9**, 533, 1967
- [8] AIBA, S. aj.: Bioinženýrství, Academia, Praha 1972
- [9] PILAŘ, A. aj.: Chemické inženýrství III. Difúzní operace, SNTL Praha 197
- [10] RUT, M., MADRON, F.: Kvas. prům., **22**, 84, 1976
- [11] VALOUCH, M.: Pětimístné logaritmické tabulky a tabulky konstant, SNTL, Praha 1967
- [12] OKADA, H., TSUNODA, T.: Agricultur. Biol. Chem., **29**, 923, 1965
- [13] MAXON, W. D., JOHNSON, M. J.: Ind. Eng. Chem., **45**, 2554, 1953
- [14] DARLINGTON, W. A.: Biotechnol. Bioeng., **6**, 241, 1964
- [15] MATELES, R. I.: Biotechnol. Bioeng., **13**, 581, 1971
- [16] MINKEVIČ, I. G., EROŠIN, V. K.: Folia Microbiol., **18**, 376, 1973
- [17] MADRON, F., RUT, M.: Kvas. prům., **22**, 202, 1976
- [18] RUT, M., MADRON, F., ŠTROS, F.: Kvas. prům., **22**, 272, 1976
- [19] MADRON, F.: Biotechnol. Bioeng., v tisku
- [20] SCHMIDTMAYER, J.: Maticový počet a jeho použití v technice, SNTL, Praha 1974
- [21] FELIX, M., BLÁHA, K.: Matematickostatistické metody v chemickém průmyslu, SNTL, Praha 1962
- [22] KUEHN, D. R., DAVIDSON, H.: Chem. Eng. Progr., **57**, 44, 1961
- [23] Václavěk, V.: Coll. Czech. Chem. Commun., **34**, 2662, 1969
- [24] NOGITA, S.: Ind. Eng. Chem. Process Design Develop., **11**, 197, 1972
- [25] MURTHY, A. K. S.: Ing. Chem. Process Design Develop., **12**, 246, 1973
- [26] MADRON, F., VANĚČEK, V.: Coll. Czech Commun., **42**, 1805, 1977
- [27] MADRON, F., VEVERKA, V., VANĚČEK, V.: AIChE J., **23**, 482, 1977
- [28] MONOD, J.: Ann. Review of Microbiol., **3**, 371, 1949
- [29] HANHART, J., KRAMERS, H., WESTERTEP, K. R.: Chem. Eng. Sci., **18**, 503, 1963
- [30] MONTGOMERY, H. A. C., aj.: J. Appl. Chem., London, **14**, 280, 1964
- [31] PHILLIPS, D. H., JOHNSON, M. J.: J. Biochem. Microbiol. Technol. Engng., **3**, 277, 1961
- [32] WILHELM, R. H., aj.: Biotechnol. Bioeng., **8**, 55, 1966

Madron F., Rut M., Štros F.: Měření rychlosti sdílení kyslíku u velkoobjemových průmyslových fermentorů. I. Kvas. prům. **24**, 1978, č. 11, s. 249—257.

Je studována problematika měření objemového součinitele prostupu kyslíku u velkoobjemových průmyslových fermentorů. Experimentálně nejnáročnější je přitom přesné zjištění rychlosti spotřeby kyslíku během fermentace. Jsou uvedeny tři metody měření rychlosti spotřeby kyslíku založené na látkové bilanci plynné fáze, kapalné fáze a komplexní látkové bilanci fermentace.

Мадрон, Ф. — Рут, М. — Штрос, Ф.: Измерение скорости передачи кислорода в бродильных аппаратах большой емкости I. Квас. прум. **24**, 1978, № 11, стр. 249—257.

В статье рассматривается проблематика измерения объемного коэффициента передачи кислорода в промышленных бродильных аппаратах большой емкости. При экспериментальном изучении самой трудной задачей является точное определение скорости потребления кислорода в ходе сбраживания. Приведены три метода его измерения: первый основан на определении вещественного баланса газовой фазы, второй — баланса жидкой фазы, а третий — комплексного вещественного баланса процесса ферментаций в целом.



**Madron F., Rut M., Štros F.: Measuring the Rate of Oxygen Transfer in High-capacity Industrial Fermenters.**  
I. Kvas. prům. 24, 1978, No. 11, pp. 249—257.

The article deals with some problems connected with measuring volumetric coefficient of oxygen transfer in high-capacity industrial fermenters. The most difficult part of experiments is a reliable determination of oxygen consumption rate during fermentation. The authors outline three methods which can be used to measure it. One is based on the substance balance of the gaseous phase, the second on the balance of the liquid phase and the third on the complex balance of fermentation as a whole.

**Madron F., Rut M., Štros F.: Messung der Geschwindigkeit der Sauerstoffübertragung in industriellen Großraumfermentoren.** I. Kvas. prům. 24, 1978, No. 11, S. 249—257.

Es wird die Problematik der Messung des Volumkoeffizienten der Sauerstoffübertragung in industriellen Großraumfermentoren studiert. Experimentell am anspruchvollsten ist dabei die genaue Feststellung der Geschwindigkeit des Sauerstoffverbrauchs während der Fermentation. Es werden drei Methoden der Messung der Geschwindigkeit des Sauerstoffverbrauchs angeführt, die auf der Stoffbilanz der Gasphase, der flüssigen Phase und auf der komplexen Stoffbilanz der Fermentation basieren.