

# Kritická studie metod měření aerační kapacity ( $k_1a$ ) fermentorů

663

## I. Kvalitativní rozbor příčin chyb při měření $k_1a$ a ustálené metody

Ing. VÁCLAV LINEK, CSc., Ing. OLDŘICH HOLEČEK, CSc., VŠCHT Praha

**Klíčová slova:** aerační kapacita, fermentory, chyby měření, koeficient  $k_1a$

Článek se zabývá problematikou značné šíře, jsou v něm hodnoceny téměř všechny používané metody měření  $k_1a$ . To si vynutilo jeho rozdělení na dvě části. Každá část článku má vlastní seznam literatury a symbolů, aby ji bylo možno číst samostatně, číslování rovnic a obrázků je průběžné.

### 1. ÚVOD

Má-li být metoda měření  $k_1a$  použitelná například pro ověření úspěšnosti konstrukčních úprav fermentoru, musí poskytovat správné hodnoty  $k_1a$  v podmínkách, které v provozu obvykle existují.

Aerobní fermentace jsou často provozovány v probublávaných nádobách s mechanickým míchadlem. Vsádky mají vyšší viskozitu než voda a jsou v nich přítomny látky, které brzdí koalescenci bublin plynu. Aerobní mikroorganismy vyžadují udržení nenulové koncentrace rozpuštěného kyslíku ve vsádce. Kyslík se přitom dodává téměř výhradně vzduchem, jehož rozpustnost ve fermentačním médiu je malá, takže hnací síla pro přestup kyslíku z plynu do kapaliny není velká. Rychlost spotřeby kyslíku mikroorganismy není tak vysoká, aby docházelo ke zvýšení hodnoty  $k_1$  vůči čistě fyzikální absorpci. Při fermentacích také nedochází k prudkému smršťování bublin plynu v důsledku velmi

rychlé absorpce kyslíku. Oba posledně zmíněné efekty se však uplatňují v systémech, kde je kyslík spotřebováván v kapalině rychlou chemickou reakcí. Produkce požadovaného metabolitu je často limitována intenzitou toku kyslíku z plynu do kapalné vsádky. Při malé hnací síle je tedy nutné dosahovat poměrně vysokých hodnot  $k_L a$ . Pokud měříme  $k_L a$  přímo pro studovaný fermentační systém, jsou tyto podmínky samozřejmě splněny. Pro účely porovnání aerační účinnosti různých konstrukcí fermentorů, nebo při zjišťování vlivu fyzikálních vlastností vsádek a provozních podmínek na  $k_L a$  jsme odkázáni na použití nějakého modelového systému, protože přesné a reprodukovatelné měření  $k_L a$  při biologických pochodech je obtížné a nepohotové pro rychlé získání potřebných informací. Má-li být provedené porovnání hodnověrné, nesmí se podmínky v modelovém systému zásadně lišit od shora uvedených provozních podmínek fermentorů.

Je tedy zřejmé, že metoda aerační účinnosti musí dávat správné hodnoty především v nekoalescentních viskózních vsádkách, a to i za podmínek, při kterých je aerační účinnost vysoká. Naměřená hodnota musí odpovídat  $k_L a$  při čistě fyzikální absorpci, tj. nesmí být ovlivněna chemickou reakcí, která při některých metodách absorpci kyslíku doprovází.

K měření  $k_L a$  kyslíku se používají jednak ustálené, jednak dynamické metody. Při ustálených metodách je kyslík přiváděn v plynu spotřebováván v kapalině fází chemickou reakcí a  $k_L a$  se určuje z jeho spotřeby zjištěné buď přímo z úbytku kyslíku z plynu, nebo nepřímo ze změny koncentrace některé reakční komponenty a ze známé stechiometrie probíhající reakce. Při dynamických metodách je sledován většinou časový průběh koncentrace kyslíku rozpuštěného v kapalině jako odezva na známou změnu koncentrace kyslíku ve vstupujícím plynu. Porovnáním experimentálně zjištěné odezvy s odezvou vypočtenou na základě matematického modelu transportu kyslíku v zařízení se pak nalezne hodnota  $k_L a$ , která je jedním z parametrů modelu.

Hodnoty koncentrace kyslíku potřebné k výpočtu jsou většinou zjišťovány kyslíkovými sondami polarografického typu. Chyby v hodnotě  $k_L a$  v důsledku nevýstižného popisu zkrácení odezvy kyslíkové sondy její vlastní dynamikou dosahují desítek procent. Nebudeme se jimi zabývat, protože jsou podrobně analyzovány jinde [1, 2]. Dále budeme předpokládat, že vlastní dynamika kyslíkové sondy je popsána správně a to její přechodovou charakteristikou a soustředíme se na rozbor chyb ve stanovení  $k_L a$  způsobených použitím neadekvátního modelu transportu kyslíku v zařízení k interpretaci získaných dat. Hlavní pozornost věnujeme dynamickým metodám, jednak proto, že je lze snáze aplikovat na velká zařízení, jednak proto, že většina chybných hodnot  $k_L a$  publikovaných v literatuře byla změřena nevhodnými dynamickými metodami. Kritický rozbor dynamických metod a z něho vycházející doporučení pro experimentální práci budou uvedeny v druhé části článku.

## 2. PŘÍČINY CHYB PŘI VYHODNOCOVÁNÍ $k_L a$

Abychom mohli jednotlivé metody hodnotit přehledněji, popíšeme nejprve kvalitativně ty jevy v aeraované nádobě, které nejúžeji souvisí s chybami při vyhodnocování  $k_L a$ .

Při dynamických metodách měření se často na začátku pokusu uvede vstupující plyn do kontaktu se vsádkou, která byla předem nasycena plynou směsí o jiném složení. Při tom je v systému kromě kyslíku většinou přítomen (buď je přiváděn ve vstupujícím plynu, nebo je rozpuštěn ve vsádce) ještě nejméně jeden další plyn — nejčastěji dusík. Podle použitého experimentálního postupu se buď musí nejprve vytvořit zádrž plynu, nebo se původní zádrž musí nahradit bublinami nového plynu o jiném složení. V obou případech se koncentrační vzruch vyvolaný ve vstupním proudu plynu přenáší do jednotlivých bublin v disperzi konečnou rychlostí a nenastává v celém objemu vsádky současně, tj. není splněn obvyklý předpoklad o ideálním promíchávání plynné fáze v disperzi. Jak dobu potřebnou k vytvoření stabilizované zádrže, tak způsob šíření koncentračního vzruchu je přitom obtížné věrně popsat. Uživeme-li experimentální postup, při kterém se na začátku pokusu vytváří zádrž plynu v kapalině, je zřejmé, že v období vytváření zádrže je hodnota  $k_L a$  jiná než ve stavu, kdy objemový zlomek plynu ve vsádce má ustálenou hodnotu. Děj je dále komplikován tím, že malé bubliny mají delší dobu kontaktu s kapalnou vsádkou než velké (mají nižší vzestupnou rychlost) a složení plynu v nich se rychleji blíží rovnováze s kapalnou fází, protože poměr povrchu k objemu je u nich větší. Je-li přítomen inertní plyn, dochází k současnému přestupu kyslíku a inertu mezi plynem a kapalinou a právě popsaný rozdíl mezi chováním malých a velkých bublin způsobí, že složení uvnitř bublin přítomných ve stejném okamžiku ve vsádce je pro každou jejich velikost jiné. Dochází-li k četným koalescencím, mohou se tyto rozdíly vyrovnávat. V nekoalescentních vsádkách (tj. ve většině v průmyslu používaných) k vzájemnému promíchávání obsahů bublin téměř nedochází. Pak soubor bublin plynu právě opouštějících vsádku (vystupující plyn) se může podstatně lišit od toho, který v témž okamžiku vytváří zádrž plynu uvnitř vsádky.

Při ustálených metodách lze sice tento vliv počáteční neustálenosti distribuční funkce rozdělení dob prodloužení bublin ve vsádce potlačit dostatečně dlouhou dobou měření, protože se ale v kapalině fází spotřebovává pouze kyslík, může se v systému ustavit výraznější závislost složení plynu v bublinách na jejich velikosti, než při dynamických metodách. Zvyšující se viskozita vsádky zvyšuje dobu zdržení všech bublin zhruba ve stejném poměru, tedy rozdíl mezi dobou zdržení malých a velkých bublin se zvětšuje a zvyšování viskozity u nekoalescentních vsádek přispívá k zvýraznění popsaných efektů. Stejný vliv má rostoucí objem vsádky.

Při praktickém výpočtu  $k_L a$  z naměřených dat se u ustálených metod vychází z rovnice

$$N = k_L a V_L (c_L^0 - c_L) \quad (1)$$

a u dynamických metod je vždy součástí matematického modelu transportu kyslíku vztah

$$\frac{dc_l}{dt} = k_1 a (c_l^0 - c_l) \quad (2)$$

nebo nějaký jeho ekvivalent. U dynamických metod potřebujeme znát ještě počáteční podmínky, např. ve tvaru

$$c_l(t_0) = c \quad (3)$$

kde  $c$  je známá konstanta. Veličiny  $N$ ,  $dc_l/dt$  a  $c_l$  lze už v současné době změřit bez větších chyb. Otázkou zůstává, jak zjistit koncentraci  $c_l^0$ , která není přístupná přímému měření a představuje střední hodnotu koncentrace kyslíku na fázovém rozhraní v disperzi. Téměř všechny doposud v literatuře publikované hodnoty  $k_1 a$  jsou spočteny za předpokladu, že platí vztah

$$c_{g2} = m_0 p_2 = K_0 c_{g2} \quad (4)$$

kde  $c_{g2}$  je koncentrace kyslíku v plynu na výstupu z fermentoru. Jaké důsledky plynou z přijetí tohoto předpokladu ukázali Linek et al. [3]. Předpokládali, že disperze je v daném okamžiku tvořena souborem  $n$  kulových bublin s průměry  $d_i$  s parciálními tlaky kyslíku  $P_i$ . Střední hodnota koncentrace kyslíku na fázovém rozhraní (středovaná plochou bublin v disperzi) je potom dána vztahem

$$c_l^0 = m_0 \frac{\sum_{j=1}^n d_i^2 P_i}{\sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (5)$$

Plyn vystupující v daný okamžik z fermentoru je tvořen souborem  $k$  bublin s průměry  $d_j$  a parciálními tlaky kyslíku  $P_j$ . Koncentrace kyslíku v proudu plynu na výstupu je potom objemem středovaná hodnota

$$c_{g2} = m_0 \frac{\sum_{j=1}^k d_j^3 P_j}{\sum_{j=1}^k d_j^3} \quad (6)$$

V rovnici (5) je užito odlišného označení sčítacího indexu a horní meze sumace, aby se zdůraznilo, že se jedná o jiný soubor bublin než v rovnici (6). Dosazením rovnic (5) a (6) do (4) obdržíme vztah

$$\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2 P_i}{\sum_{i=1}^n d_i^2} = \frac{\sum_{j=1}^k d_j^3 P_j}{\sum_{j=1}^k d_j^3} \quad (7)$$

Některí autoři užívají v rovnici (1) střední logaritmickou hnačí sílu. Úvahami analogickými těm, které vedly k rovnici (7) se dá ukázat, že pokud má být tento postup oprávněn, dojde se rovněž k silně omezujícím požadavkům na tvar funkce, vyjadřující závislost koncentrace kyslíku v bublinách na jejich průměru. Uvedený rozbor [3] tedy ukázal, že hodnoty  $k_1 a$ , při jejichž výpočtu se použije rovnice

(4), aniž by přitom platila rovnice (7), jsou principiálně chybné. Podmínka (7) je zřejmě splněna jen tehdy, když je parciální tlak kyslíku ve všech bublinách disperze stejný. To nastane ve speciálních případech, kdy je ve zkoumaném systému přítomen (ve vstupujícím plynu, či rozpuštěn ve vsádce) jako jediný plyn čistý kyslík. Při absorpci směsi plynů (vzduch) nebo při dynamických metodách se záměnou jednoho plynu za jiný s odlišnou koncentrací kyslíku může být podmínka (7) splněna jen přibližně. Rozsah pokusných podmínek, při kterých je tím způsobená chyba nepřijatelně velká, je však třeba stanovit pokusně. Lze očekávat, že podmínka (7) bude splněna lépe ve vsádkách koalescentních, ve kterých dochází k častějšímu spojování bublin v disperzi a tím k lepšímu vyrovnání parciálních tlaků kyslíku v bublinách než ve vsádkách nekoalescentních.

Principiálně by hodnoty  $k_1 a$  neměly záviset na metodě, kterou k jejich měření použijeme. V rozporu s tímto principem bylo však zjištěno [4], že v identickém zařízení a vsádce a za stejných podmínek dávají různé varianty metod značně rozdílné hodnoty  $k_1 a$ . V druhé části článku uvedené testy korektnosti jednotlivých metod spočívají v porovnávání jimi naměřených hodnot  $k_1 a$  s hodnotami změřenými takovými variantami, při kterých je platnost podmínky (7) zaručena způsobem jejich provedení. Všechna měření jsou provedena v identické aparatuře, aby se do srovnávacích testů nepromítaly další artefakty.

### 3. POPIS APARATURY A EXPERIMENTÁLNÍCH PODMÍNEK

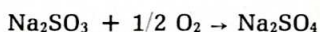
Reaktor byl válcový o průměru 0,29 m s rovným dnem a byl opatřen čtyřmi svislými narážkami šířky 0,03 m. Kapalínou byl plněn do výšky rovné jeho průměru (objem kapaliny 0,0182 m<sup>3</sup>). Standardní šestilopátková turbína s rovnými kolmými lopatkami (ON 69 1021) průměru 0,1 m byla umístěna 0,1 m nad dnem. Frekvence otáčení míchadla byla měněna v intervalu 4,17 až 17,5 s<sup>-1</sup> a jeho příkon byl měřen tenzometrem umístěným na hřídeli míchadla. Plyn byl přiváděn pod míchadlo přívodní trubicí fiktivní rychlostí 2,12 nebo 4,24 mm s<sup>-1</sup>. Jako plyny byly užity dusík, vzduch a kyslík. Teplota při pokusech byla 20 °C. Jako koalescentní kapalně vsádky byly užity destilovaná voda a roztoky KI a NaSCN a jako vsádky nekoalescentní vodné roztoky (0,2 a 0,5 mol.l<sup>-1</sup>) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> či K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> nebo (0,5 mol.l<sup>-1</sup>) Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> s přídavkem nebo bez přídavku 1 % hm. karboxymethylcelulosity a roztok 2,5 mol.l<sup>-1</sup> glukosy v 0,1 mol.l<sup>-1</sup> fosfátovém pufru s přídavkem enzymu glukosaoxidasu a katalasy. Koncentrace kyslíku v kapalně fázi byla měřena obvykle dvěma kyslíkovými sondami pokrytými 12 μm tlustými polypropylénovými membránami. Sonden byly umístěny ve dně reaktoru s katodami směřujícími vzhůru a dosahovaly do výšky 8 cm ode dna.

Aparatura byla opatřena dalšími zařízeními, která zde nepopisujeme, ale která umožňovala měřit  $k_1 a$  různými postupy. Jsou to zařízení umožňující

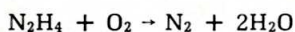
prostou záměnu jednoho přiváděného plynu za druhý, náhlou změnu tlaku v reaktoru při udržení konstantního objemového přítoku plynu (užívá se při tlakové dynamické metodě), naplnění reaktoru ve vakuu odplyněnou kapalinou nebo (v průtočném uspořádání) současně do několika míst vsádky přivádět roztok siřičitanu sodného. Signál sond používaných k měření  $k_1a$  tlakovou dynamickou metodou musí být nezávislý na tlakových změnách v okolní kapalině. Mnohé komerčně dostupné sondy tomuto požadavku nevyhovují, neboť signál je citlivý na malé změny polohy membrány o asi  $1\ \mu\text{m}$ . Je proto nutné vždy provést následující test tlakové nezávislosti signálu sondy [11]: sonda se umístí do promíchávané kapaliny (nesmí docházet k strhávání bublin do vsádky hladinou) a změni se náhle tlak nad hladinou kapaliny. Vhodné jsou pouze ty sondy, jejichž signál se při tomto testu nezmění.

#### 4. USTÁLENÉ METODY MĚŘENÍ $k_1a$

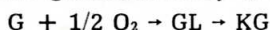
Roztřídíme-li ustálené metody podle reakčních systémů, je nejběžnější metoda sulfitová, založená na reakci



katalyzované ionty  $\text{Cu}^{++}$  nebo  $\text{Co}^{++}$ . Mnohem méně se užívá metoda hydrazinová, při které probíhá reakce



katalyzovaná například suspenzí  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  nebo rozpustnými komplexními sloučeninami mědi a glukosaoxidasová, založená na oxidaci glukosy za přítomnosti enzymů glukosaoxidasy a katalasy



V prvním kroku reakce vzniká lakton kyseliny glukonové (GL), který se dále hydrolyzuje na kyselinu glukonovou (KG). Jiné reakční systémy se v literatuře objevují sporadicky a nebudeme se jimi zabývat. Možnosti využití glukosaoxidasové metody byly podrobně experimentálně zkoumány [5]. Test spočívající v porovnání hodnot  $k_1a$  změřených absorpcí vzduchu a čistého kyslíku ukázal, že absorpce kyslíku je aplikovatelná jen v úzkém rozsahu experimentálních podmínek, protože lakton kyseliny glukonové inhibuje oxidaci glukosy již při koncentracích asi  $0,04\ \text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$  a dochází ke zkreslení výsledků při vyšších rychlostech absorpce kyslíku (již při  $k_1a > 0,01\ \text{s}^{-1}$ ). Kromě toho je tato metoda provozně drahá i v laboratorním měřítku a pro rozsáhlá rutinní měření tedy nepoužitelná.

Chemické metody stanovení  $k_1a$  se většinou realizují tak, že na začátku pokusu se do vsádky jednorázově přidá velké množství redukující látky. (Typická počáteční koncentrace  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  je  $0,5\ \text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ ). Při takovém vedení experimentu lze obvykle v rovnici (1) položit  $c_1 = 0$ . Pokud je měřena vysoká hodnota  $k_1a$ , nebo je-li do roztoku přidána karboxymethylcelulosa za účelem zvýšení viskozity vsádky, nemusí být tato podmínka splněna a hodnotu  $c_1$  je nutno určit experimentálně kyslíkovou sondou [4]. Chemické metody stanovení  $k_1a$  podrobili zevrubné analýze Schumpe a Deckwer [6] a

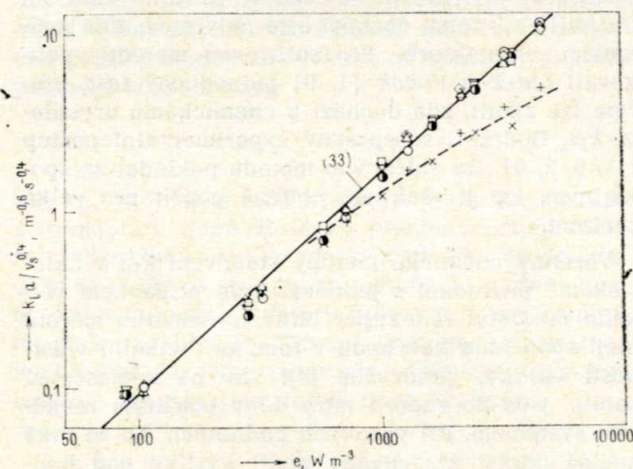
Midoux et al. [7]. Ukázali [6], že při aeraci směsi kyslíku s inertním plynem neovlivňuje stupeň promíchávání plynu v zádři hodnoty  $k_1a$  o více než 10 %, pokud pokles koncentrace kyslíku v nejmenších bublinách disperze nepřekročí 40 %. (Průměrný pokles koncentrace zjištěný z bilance plynu ovšem ani zdaleka nesmí být tak vysoký!). Při splnění této podmínky je tedy použitelná rovnice (4). Citovaní autoři [7] také ukázali, že při aeraci čistým kyslíkem nesmí zreagovaný podíl překročit 20 %, jinak dochází k natolik velkému smršťování bublin plynu, že výsledky nelze převést na systémy, u nichž je tento efekt malý. Velká rychlost doprovozní chemické reakce nutná k udržení  $c_1 = 0$  může způsobit chemické urychlení  $k_1a$ . Judat [8] ukázal, že u hydrazinové metody (s katalyzátorem  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ) k tomu dochází a je tedy nevhodná k simulaci bioreaktorů. Pro sulfitovou metodu publikovali Linek a Vacek [1, 9] jednoduchý test, kterým lze zjistit, zda dochází k chemickému urychlení  $k_1a$ . Dodrželi-li se správný experimentální postup [1, 6, 7, 9], lze sulfitovou metodu pokládat za spolehlivou, lze ji však jen obtížně použít pro velká zařízení.

Všechny chemické metody stanovení  $k_1a$  v „klasickém“ provedení s jednorázovým přidavkem velkého množství redukující látky na začátku měření mají společnou nevýhodu v tom, že fyzikální vlastnosti vsádky, především její vliv na koalescenci bublin, jsou do značné míry dány použitým reakčním systémem. Při vysokých hodnotách  $k_1a$  se také nedaří udržet zreagovaný podíl kyslíku pod hodnotou 20 %.

Nedávno byly publikovány [10–12] injekční modifikace hydrazinové a sulfitové metody. Při injekčním provedení se do vsádky kontinuálně přidává jen takové množství redukující látky, které stačí udržet koncentraci rozpuštěného kyslíku na požadované hodnotě. Jeho koncentrace se kontroluje kyslíkovou elektrodou a rychlost absorpce kyslíku  $N$  v rovnici (1) se snadno zjistí z průtoku přidávaného redukčního činidla. Přitom je tento přídavek tak malý, že neovlivňuje fyzikální vlastnosti vsádky a současně nemůže prakticky dojít k chemickému urychlení  $k_1a$ . Nežádoucím smršťování bublin je možno předejít tím, že se koncentrace rozpuštěného kyslíku udržuje tak vysoká, aby se snížením hnací síly v potřebném poměru snížila rychlost absorpce. Zvláště posledně uvedená vlastnost injekčních variant vzbuzovala naději, že by mohly být použitelnější pro měření vyšších hodnot  $k_1a$  než např. klasická varianta sulfitové metody, kde v důsledku vysoké rychlosti absorpce k významnému smršťování bublin dochází. Z tohoto hlediska byla injekční varianta sulfitové metody testována Linkem et al. [11]. Ukázalo se, že snížení hnací síly zvyšuje citlivost metody na přítomnost inertního plynu v systému do té míry, že rozdíl mezi hodnotou  $k_1a$  stanovenou při aeraci čistým kyslíkem a vzduchem může dosáhnout až 60 %. Průběh chyby je patrný z obr. 1, přitom hodnoty  $k_1a$  naměřené při aeraci kyslíkem je možno považovat za správné, protože souhlasí s hodnotami získanými nezávislou tlakovou dynamickou metodou,

označení		metoda měření $k_{La}$
$v_s = 2,12$	4,24 mm/s	
+	x	ISM, vzduch
◇	□	ISM, kyslík
△	▽	$(C_A, O_2 - O_2, 3)^*$
○	●	$(C_A, v_z - v_z, 3')^*$

\* Popis metody  $(C_A, O_2 - O_2)$  bude uveden v druhé části článku



Obr. 1. Porovnání  $k_{La}$  změřených injekční variantou sulfitové metody (ISM) a dynamickou metodou tlakového skoku  $(C_A, O_2 - O_2, 3)$  vsádka  $0,5 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1} \text{ Na}_2\text{SO}_4$   
Převzato z práce [11]

kteřá bude popsána později. Injekční sulfitová metoda není tedy použitelná pro rutinní měření na větších zařízeních, kde je obtížné zajistit nepřítomnost inertů v systému. Injekční hydrazinovou metodu jsme zvlášť netestovali, neboť v nekoalescentních vsádkách lze stěží očekávat podstatně odlišné chování od injekční sulfitové metody.

Lze tedy říci, že žádná z dostatečně podrobně ověřených ustálených metod stanovení  $k_{La}$  se nehodí pro měření na velkých zařízeních. Sulfitová metoda v klasickém provedení a její injekční varianta s absorpcí čistého kyslíku mohou však být používány v laboratorním měřítku jako nezávislé testovací metody k ověření korektnosti jiných, zejména dynamických metod.

#### Symbole

- $a$  měrný mezifázový povrch ( $\text{m}^{-1}$ )  
 $c_1$  koncentrace kyslíku v kapalině ( $\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}$ )  
 $c_{10}$  rovnovážná koncentrace kyslíku v kapalině ( $\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}$ )  
 $c_{g2}$  koncentrace kyslíku v plynu opouštějícím vsádku ( $\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}$ )  
 $d_i$  průměr  $i$ -té bubliny plynu (m)  
 $K_O$  konstanta v rovnovážném vztahu (4) pro rozpustnost kyslíku ve vsádce (—)  
 $k_1$  koeficient přestupu hmoty v kapalně fázi ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

- $k_{La}$  objemový koeficient přestupu hmoty (aerační kapacita) ( $\text{s}^{-1}$ )  
 $m_O$  konstanta v rovnovážném vztahu (4) pro rozpustnost kyslíku ve vsádce ( $\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3} \text{ Pa}^{-1}$ )  
 $N$  látkový tok kyslíku ( $\text{kmol} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
 $p_2$  parciální tlak kyslíku v plynu vystupujícím ze vsádky (Pa)  
 $P_i$  parciální tlak kyslíku v  $i$ -té bublině plynu (Pa)  
 $t$  čas (s)  
 $t_o$  okamžik, od kterého se odečte čas při dynamických metodách (s)  
 $V_1$  objem kapaliny v reaktoru ( $\text{m}^3$ )  
 $v_s$  fiktivní rychlost plynu v reaktoru ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

#### Literatura

- [1] LINEK V., VACEK V., SINKULE J., BENEŠ P.: Measurement of Oxygen by Membrane-Covered Probes. Guidelines for Applications in Chemical and Biochemical Engineering, Ellis Horwood, Chichester 1988.
- [2] LINEK V., VACEK V., SINKULE J., BENEŠ P.: Měření koncentrace kyslíku membránou pokrytými kyslíkovými sondami, Academia Praha 1987.
- [3] LINEK V., BENEŠ P., VACEK V.: Chem. Eng. Technol. **12**, 1989, s. 213.
- [4] LINEK V., VACEK V., BENEŠ P.: Chem. Eng. J. **34**, 1987, s. 11. Sborník VŠCHT Praha, K21, 1987, s. 179.
- [5] LINEK V. et al.: Biotechnol. Bioeng. **23**, 1981, s. 1467.
- [6] SCHUMPE A., DECKWER W. D.: Chem. Eng. Sci. **35**, 1980, s. 2221.
- [7] MIDOUX N., LAURENT A., CHARPENTIER J. C.: AICHE J. **26**, 1980, s. 157.
- [8] JUDAT H.: Ger. Chem. Eng. **5**, 1982, s. 357.
- [9] LINEK V., VACEK V.: Chem. Eng. Sci. **36**, 1981, s. 1747.
- [10] IMAI Y., TAKEI H., MATSUMURA M.: Biotechnol. Bioeng. **29**, 1987, s. 982.
- [11] LINEK V., BENEŠ P., VACEK V.: Biotechnol. Bioeng. **33**, 1989, s. 1406.
- [12] WEILAND P. et al.: Chem. Eng. Technol. **9**, 1986, s. 143.

Lektoroval Ing. J. Páca, CSc.

**Linek V. - Holeček O.: Kritická studie metod měření aerační kapacity ( $k_{La}$ ) fermentorů. I. Kvalitativní rozbor příčin chyb při měření  $k_{La}$  a ustálené metody.** Kvas. prům., **37**, 1991, č. 4, s. 104–109.

Návrh bioreaktorů pro aerobní fermentace obvykle vychází z požadavku dostatečné dodávky kyslíku do fermentačního média. Přitom pro experimentální stanovení hodnoty  $k_{La}$ , ze které se tok kyslíku počítá, se nejen používají metody, o kterých bylo již prokázáno, že dávají výsledky chybné až o stovky procent i v malých laboratorních aparátech, ale dokonce jsou publikovány stále nové, stejně nevhodné metody. Jsou-li chybné hodnoty  $k_{La}$  základem výpočtových rovnic, dochází k absurdním závěrům o vlivu provozních parametrů na hodnotu  $k_{La}$  (např. některé metody předpovídají pokles  $k_{La}$  s růstem intenzity míchání vsádky). Většina používaných metod nedovoluje ani správně experimentální porovnání aerační účinnosti dvou existujících zařízení. To má za následek, že v prakticky zaměřené části odborné veřejnosti se stále častěji objevuje názor, že většina  $k_{La}$  je pro návrh průmyslových zařízení nepoužitelná. Východisko z tohoto zmatku vidí autoři v důsledném používání několika málo standardních, dobře otestovaných metod měření  $k_{La}$ . Účelem článku je provést kritické zhodnocení dosud používaných metod a na jeho základě doporučit vhodné metody.

**Linek, V. - Голечек, О.: Критический обзор методов измерения аэрационной мощности  $k_{La}$  в ферменторах. I. Качественный анализ происхождения ошибок при измерении  $k_{La}$  и установившиеся методы его измерения.** Квас. прум., **37**, 1991, № 4, стр. 104–109.

Проектирование биохимических реакторов для аэробной ферментации обыкновенно создано исходя из предложения достаточной подачи кислорода в ферментную среду. Для экспериментального определения значения  $k_{ia}$ , из которого поток кислорода вычисляется, используются заведомо не корректные методы, но в печати все таки сообщается о новых одинаковых не подходящих методах. Как оказалось некоторые из них дают результаты, которые отличаются от правильных значений на 100 % и выше. Если ошибочные значения  $k_{ia}$  являются основой вычислительных уравнений, то приходится к абсурдным выводам о влиянии производственных параметров на значение  $k_{ia}$  (напр. некоторые методы с повышением интенсивности перемешивания предсказывают уменьшение  $k_{ia}$ ). Большинство использованных методов даже не разрешает правильное экспериментальное сравнение коэффициента полезного действия аэрации двух аппаратов. Отсюда следует что у некоторой части практически ориентированных специалистов все чаще встречается мнение, что большая часть экспериментальных значений  $k_{ia}$  неприменима для проектирования промышленных установок. Выход из этих затруднений авторы видят в последовательном применении небольшого количества стандартных хорошо проверенных методов измерения  $k_{ia}$ . Целью настоящей статьи является критический обзор и оценка до сих пор используемых методов определения  $k_{ia}$ . На основе этого обзора рекомендуются методы определения  $k_{ia}$ .

**Linek, V. - Holeček, O.: Critical Study of the Aeration Capacity ( $k_{ia}$ ) Measurement Methods for Fermentors. I: Qualitative Analysis of  $k_{ia}$  Measurement Errors and Steady-State Methods.** Kvas. prům., 37, 1991, No. 4, pp 104—109.

The design of bioreactors for aerobic fermentation is usually based upon the requirement of sufficient air feed to the fermentation medium. In the experimental determinations of  $k_{ia}$  values, from which the necessary oxygen flowrate is calculated, not only such methods, which were already proved to yield erroneous results with up to hundreds of percent errors, are used, but, unfortunately new methods are published which are equally unsuitable. When these erroneous  $k_{ia}$  values are substituted in the working equations, absurd conclusions

are reached on the effect of working parameters on the  $k_{ia}$  value [e.g. some methods predict drop of  $k_{ia}$  values with the rise of agitation intensity]. Most of the methods used are unable to allow a correct comparison of aeration capacities of two existing reactors. From this it follows, that the opinion, that most of the  $k_{ia}$  values published are inapplicable for the industrial design, gains popularity among the practically minded public. As an escape from this mess, the authors suggest the use of a few standard, well tested  $k_{ia}$  measurement methods. In this paper, the common methods used are critically evaluated and suitable methods selected on the basis of this analysis are recommended.

**Linek, V. - Holeček, O.: Kritische Studie der Meßverfahren der Belüftungskapazität  $k_{ia}$  bei Fermentoren. I. Qualitative Analyse von Fehlerquellen bei der  $k_{ia}$ -Messung und beständige Methoden.** Kvas. prům., 37, 1991, Nr. 4, S. 104—109.

Entwürfe von Bioreaktoren für aerobe Fermentation gehen gewöhnlich von der Forderung der ausreichenden  $O_2$ -Lieferung in das Fermentationsmedium aus. Für experimentelle  $k_{ia}$ -Bestimmung werden stets Methoden verwendet, welche — wie bewiesen ist — Ergebnisse mit einem Fehler von bis hunderte % liefern und zwar auch in kleinen Laboranlagen. Dazu werden neue, genauso ungeeignete Methoden veröffentlicht. Beruhen Berechnungsgleichungen auf Fehlerten von  $k_{ia}$ , werden absurde Schlussfolgerungen vom Einfluss der Betriebsparameter auf  $k_{ia}$ -Werte gezogen (es gibt z.B. Methoden, welche die  $k_{ia}$ -Senkung bei zunehmender Intensität des Rührens voraussagen). Die Mehrheit der verwendeten Methoden gestattet sogar keine korrekte Experimentalvergleichen der Belüftungswirksamkeit von zwei bestehenden Anlagen. Die Folge ist, daß die auf Praxis gerichteten Fachleute immer öfter behaupten, daß die  $k_{ia}$ -Grösse für den Entwurf von Industrieanlagen unanwendbar ist. Der Ausweg aus dieser Verwirrung liegt in folgerichtiger Verwendung der wenigen standarden, gut getesteten Methoden für  $k_{ia}$ -Messung. Der Artikel beurteilt kritisch die bisher verwendeten Methoden und empfiehlt auf Grund von dieser Beurteilung geeignete Meßmethoden.