

Analýza recyklu plynné fáze při produkci mikroorganismů z hlediska bilančního

57.083.13 57.043:531.78
663.13

Ing. KAREL LÍVANSKÝ, CSc., Mikrobiologický ústav ČSAV, Oddělení autotrofních mikroorganismů, Třeboň

Klíčová slova: mikrobiální kultura, kultivace mikroorganismů, plynná fáze, parciální tlak, analýza

V poslední době je věnována ve fermentačních procesech pozornost recyklu plynné fáze za účelem zvýšení konverze složky v plynné fázi přítomné a potřebné pro růst mikroorganismů [1—2]. Podle přehledné práce Hamerovy [1] může být tato konverze ovlivněna způsobem operace fermentoru, charakteristikami přenosu hmoty mezi fázemi, geometrií a některými provozními parametry fermentace. V obou citovaných pracích není recykl plynné fáze z hlediska bilance hmoty uspokojivě vypočten podrobněji, neboť tyto práce mají poněkud jiné zaměření. Pro posouzení vhodnosti recyklu z hlediska kvantitativního je nutné vycházet z bilančních vztahů, přičemž jasně vyniknou vazby mezi uvažovanými veličinami a předpoklady, za kterých byly odvozeny.

Hmotová bilance pro plynnou fázi v kultivačním zařízení s recyklem

Bilance hmoty pro látku, která je přítomna v recirkulující plynné fázi a je potřebná pro produkci mikroorganismů v zařízení je podle schématu na *obr. 1* dána vztahy:

$$Q_1 C_{1s} - Q_3 C_{3s} = PV/Y_S \quad (1)$$

$$Q_2 C_{2s} = Q_1 C_{1s} + Q_r C_{3s} \quad (2)$$

$$Q_2 = Q_1 + Q_r \quad (3)$$

Recirkulační poměr r definujeme vztahem:

$$r = Q_r / Q_2 \quad (4)$$

Pro koncentraci bilancované složky dále předpokládáme platnost stavové rovnice ideálního plynu:

$$C = p/RT \quad (5)$$

Rychlost spotřeby uvažované složky mikroorganismu v kultuře je v ustáleném stavu rovna rychlosti transportu této složky z plyné fáze do kultury, což můžeme vyjádřit takto:

$$P/Y_s = K_{gs} <\Delta p_s> \quad (6)$$

Střední hnací sílu transportu $<\Delta p_s>$ lze pro případ zanedbatelného gradientu parciálního tlaku složky v kultuře (dobře promíchávaná kultura) vyjádřit formálně stejným vztahem, používaným v teorii přestupu látky mezi plynou a kapalnou fází [3]:

$$<\Delta p_s> = (p_{2s} - p_{3s}) [\ln(p_{2s} - p_{ks}) / (p_{3s} - p_{ks})]^{-1} \quad (7)$$

kde p_{2s} , p_{3s} jsou parciální tlaky složky v plyné fázi na vstupu a výstupu z kultury a p_{ks} je parciální tlak složky v kultuře — obr. 1. Pro případ, že poměr $(p_{2s} - p_{ks}) / (p_{3s} - p_{ks}) < 2,2$, je možno aproximovat rovnici (7) vztahem [3]:

$$<\Delta p_s> = (p_{2s} + p_{3s}) / 2 - p_{ks} \quad (8)$$

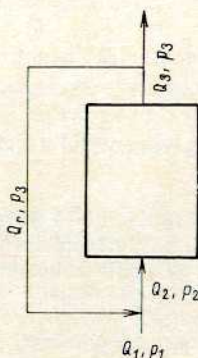
Dosazením této rovnice do rovnice (6) dostaneme:

$$P/Y_s = K_{gs} [(p_{2s} + p_{3s}) / 2 - p_{ks}] \quad (9)$$

Produkují-li mikroorganismy látku, která přechází z kultury do procházející plyné fáze (např. produkce oxidu uhličitého při aerobních pochodech) a obsahuje-li plyná fáze inertní složku (např. dusík), je podle Daltonova zákona součet parciálních tlaků všech složek plyné směsi roven tlaku celkovému a pak platí s ohledem na schéma v obr. 1 vztah:

$$p_{1s} + p_{1p} + p_{1i} = p_{1t} \quad (10)$$

$$p_{3s} + p_{3p} + p_{3i} = p_{3t} \quad (11)$$



Obr. 1. Schéma procesu s recyklem plyné fáze.

Q — objemový průtok plyné fáze, (Q_1 — vstup do zařízení, Q_2 — vstup do kultury, Q_3 — výstup z kultury, Q_r — recykl), p — parciální tlak substrátu v plyné fázi (p_1 — vstup do zařízení, p_2 — vstup do kultury, p_3 — výstup z kultury).

1. Vliv recirkulačního poměru r na parciální tlaky plynů rozpuštěných v kultuře

Dosazením z rovnice (3) a (4) do rovnice (2) obdržíme:

$$C_{3s} = [C_{2s} - C_{1s} (1 - r)] / r \quad (12)$$

Výpočtem p_{2s} z rovnice (9) a s přihlédnutím k rovnici (5) plyne:

$$C_{2s} = 2(P/K_{gs} Y_s + p_{ks}) / RT - C_{3s} \quad (13)$$

Dosazením C_{2s} z rovnice (13) do rovnice (12) obdržíme:

$$p_{3s} = [2(P/K_{gs} Y_s + p_{ks}) - p_{2s} (1 - r)] / (1 + r) \quad (14)$$

Parciální tlak p_{3s} můžeme vyjádřit též rovnicemi (1) a (5):

$$p_{3s} = (Q_1 p_{1s} - PRTV/Y_s) / Q_3 \quad (15)$$

Porovnáním rovnic (14) a (15) obdržíme vztah pro parciální tlak spotřebované složky v kultuře:

$$p_{ks} = \frac{p_{1s}}{2} \left[\frac{Q_1 (1+r)}{Q_3} + (1-r) \right] - \frac{PV}{Y_s} \left[\frac{1}{K_{gs}} + \frac{(1+r) RT}{2 Q_3} \right] \quad (16)$$

V této rovnici vystupuje objemový průtok plyné fáze Q_3 jenž je zřejmě závislý, vzhledem k obr. 1, na objemovém průtoku Q_1 a tlakových poměrech v zařízení, jímž plyná fáze prochází. Vztah mezi průtoky Q_1 a Q_3 v dalším vyjádříme kvantitativně.

Celkovou bilanci látky produkované mikroorganismy a přecházející do plyné fáze lze zapsat:

$$Q_3 C_{3p} - Q_1 C_{1p} = Y_p P \quad (17)$$

Dosazením z rovnice (5) do rovnice (1) obdržíme:

$$Q_1 = (PRTV/Y_s + Q_3 p_{3s}) / p_{1s} \quad (18)$$

a dosazením z rovnice (5) do rovnice (17) dostaneme:

$$PVY_p = (Q_3 p_{3p} - Q_1 p_{1p}) / RT \quad (19)$$

Dosazením za p_{3p} a p_{1p} z rovnic (10) a (11) do rovnice (19) máme vztah:

$$PRTVY_p = Q_3 (p_{3t} - p_{3i} - p_{3s}) - Q_1 (p_{1t} - p_{1i} - p_{1s}) \quad (20)$$

Vyjádřením p_{1s} z rovnice (18) a dosazením do rovnice (20) dostaneme hledaný vztah:

$$Q_3 = Q_1 / p_{1t} - p_{1i} / (p_{3t} - p_{3i}) + PRTVY_p (1 - 1/Y_p Y_s) / (p_{3t} - p_{3i}) \quad (21)$$

Z této rovnice vyplývá, že objemový průtok plynu vystupujícího z procesu Q_3 je větší než objemový průtok plynu Q_1 do procesu vstupujícího, vzhledem k tomu, že tlak p_{1t} je větší než tlak p_{3t} v důsledku hydraulického odporu při průchodu plynu zařízením.

V některých případech může být součin $Y_p Y_s$ velmi blízký jedničce (jedná-li se např. o kyslík jako substrát a oxid uhličitý jako produkt metabolismu u aerobních mikroorganismů). V takovém případě lze poslední člen rovnice (21) zanedbat. Další redukce této rovnice dosáhneme v případě, že poměr $(p_{1t} - p_{1i}) / (p_{3t} - p_{3i})$ bude blízký jedné a pak objemové průtoky Q_3 a Q_1 budou prakticky stejné. Předpoklad rovnosti $Q_1 = Q_3$ je v literatuře [1–2] také používán, třebaže bez diskuse

jeho platnosti. Pro technické výpočty je rovnost $Q_1 = Q_3$ lákavá ve zjednodušení a přehlednosti bilančních vztahů. Ve sporných případech, zvláště u velkých zařízení s velkým hydraulickým odporem pro průchod plynu kulturovou, bude lépe použít složitějšího vztahu daného rovnicí [21].

Z rovnic [3] a [4] vyplývá vztah:

$$Q_1 = Q_2 (1-r) \quad (22)$$

Za předpokladu, že $Q_1 = Q_3$ se redukuje rovnice [16] s ohledem na rovnici [22] do tvaru:

$$p_{ks} = p_{1s} - (PV/Y_S) [1/K_{gs} + (1+r)RT/2Q_2(1-r)] \quad (23)$$

Z bilančních rovnic strukturně podobných rovnicím výše uvedeným a opět s předpokladem $Q_1 = Q_3$, dostaneme obdobným způsobem pro parciální tlak složky, která je produktem metabolismu mikroorganismů v kultuře vztah:

$$p_{kp} = p_{1p} + PV/Y_P [1/K_{gp} + RT(1+r)/2Q_2(1-r)] \quad (24)$$

2. Konverze plynného substrátu v procesu

Ve shodě s literaturou [1–2] je tato konverze v naší symbolice dána vztahem:

$$X = PV/Y_S Q_1 C_{1s} \quad (25)$$

a představuje poměr rychlosti spotřeby plynného substrátu mikroorganismy v kultuře a rychlosti přísunu tohoto substrátu v plynné fázi vstupující do zařízení $Q_1 C_{1s}$.

Dosazením za Q_1 z rovnice [22] do rovnice [25] a vyjádříme-li C_{1s} v rovnici [25] pomocí rovnice [5], dostaneme:

$$X = PVRT/(1-r) Q_2 p_{1s} Y_S \quad (26)$$

Je-li $r = 0$ (není recykl) redukuje se tento vztah na tvar:

$$X' = PRT/Q_2 p_{1s} Y_S \quad (27)$$

Pro poměr konverze plynného substrátu v zařízení s recyklem a bez recyklu z rovnic [26] a [27] obdržíme:

$$X/X' = 1/(1-r) \quad (28)$$

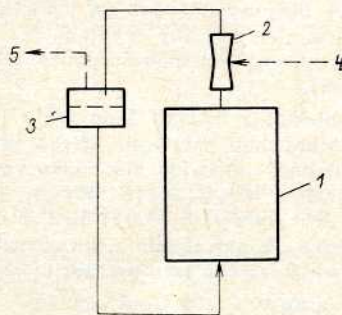
Podle tohoto vzorce tedy s rostoucím recirkulačním poměrem r vzrůstá i konverze.

Při odvozování uvedených rovnic byl mlčky činěn předpoklad, že rychlost produkce mikroorganismů P nezávisí na parciálních tlacích plynů rozpuštěných v kultuře p_{ks} , p_{kp} . Může však nastat případ, kdy nízká hodnota p_{ks} limituje růst mikroorganismů a vysoká hodnota p_{kp} jej zase inhibuje, byť i zčásti. Tuto skutečnost je možno vyjádřit početně podle známých vztahů tak, že P je funkcí p_{ks} , p_{kp} . Potom je v principu možné vypočítat p_{ks} , p_{kp} z rovnic [23] a [24] dosazením za $P = f(p_{ks}, p_{kp})$. V této práci příslušné výpočty vynecháme vzhledem k jejich nepřehlednosti.

Experimentální část

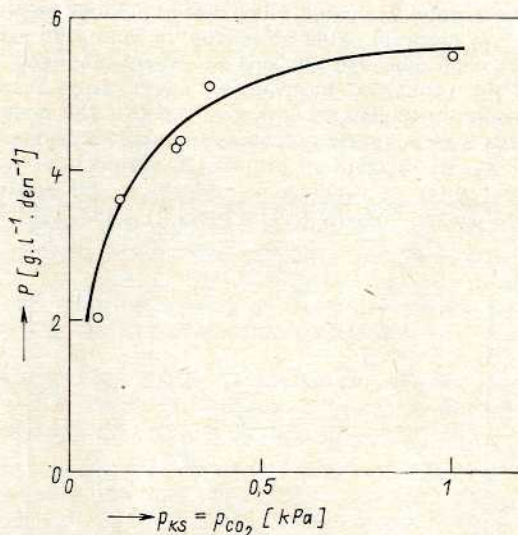
Řasa *Chlorella species K* byla námi pěstována v trubcovém kultivátoru v kontinuálním režimu při zředovací rychlosti $D = 2 \text{ den}^{-1}$ a teplotě 37°C v autotrofním režimu s použitím média o poloviční koncentraci

používané v naší laboratoři [4]. Jako zdroje světla bylo použito 25 světelných výbojek SHC 400. V kultivátoru se nacházelo celkem 66 litrů suspenze řas, z toho připadá 41 litrů na objem nacházející se v osvětlených skleněných trubicích s vnitřním povrchem velikosti 5 m^2 , zbytek objemu suspenze je v pomocných okruzích. Suspenze řas byla proháněna trubicemi o vnitřním průměru $3,2 \text{ cm}$ odstředivým čerpadlem přes osvětlený prostor 1 (viz obr. 2) a prochází sytičem 2, jenž je tvořen Herschelovou Venturiho trubicí [5]. V separátoru 3 se oddělí od kultury zbytek neabsorbované směsi oxidu uhličitého a vzduchu dávkované proudem 4 do sytiče a v proudu 5 tento zbytek vystupuje z kultivátoru ven. Oxid uhličitý je pro kulturu řas substrátem, přičemž při fotosyntéze vzniká v kultuře kyslík.



Obr. 2. Zjednodušené schéma trubcového kultivátoru.

1 — kultivační prostor se zdroji světla, 2 — sytič, 3 — separátor, 4, 5 — vstup a výstup plynné fáze



Obr. 3. Závislost rychlosti produkce biomasy (jako sušina) *Chlorella sp. K* na parciálním tlaku oxidu uhličitého rozpuštěného v kultuře v trubcovém kultivátoru.

(teplota 37°C , zředovací rychlost 2 den^{-1} , osvětlená plocha trubic 5 m^2 , zdroj světla 25 výbojek SHC 400, objem kultury 66 litrů).

Výsledky

Naměřená závislost rychlosti produkce biomasy řas (sušiny) na parciálním tlaku rozpuštěného oxidu uhličitého je uvedena v tabulce 1.

(Poznámka: třebaže je pro autotrofní kultivaci řas ob-

Tabulka 1. Rychlost produkce řasové biomasy P v trubcovém kultivátoru v závislosti na parciálním tlaku CO_2 v suspenzi

p_{ks} [kPa]	P [g.l ⁻¹ .den ⁻¹]
0,08	2,56
0,13	3,64
0,27	4,26
0,29	4,36
0,36	5,14
1,00	5,46

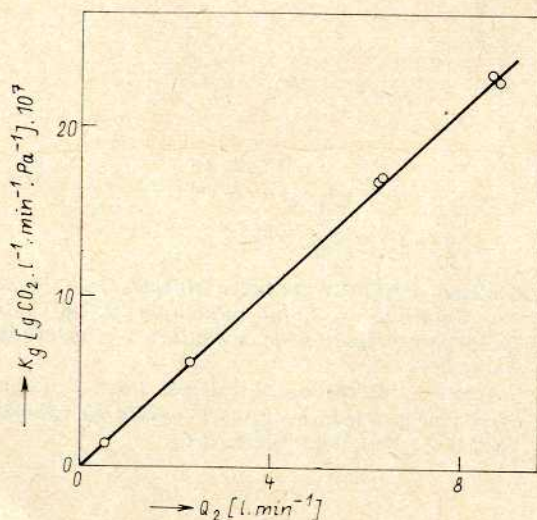
vykle produkce biomasy udávána na jednotku osvětlené plochy suspenze, činíme zde výjimku a produkci P vztahujeme na jednotku objemu suspenze, jak je to běžné u fermentací).

Vynesím hodnot z tabulky 1 do grafu (viz obr. 3), obdržíme hyperbolicou závislost. Křivka proložená experimentálními body odpovídá Monodovu vztahu pro limitující substrát $P = P_{\text{max}} p_{\text{ks}} / (K_s + p_{\text{ks}})$, s parametry $P_{\text{max}} = 6,29 \text{ g.l}^{-1}.\text{den}^{-1}$, $K_s = 0,11 \text{ kPa}$. Z obrázku 3 je zřejmé, že teprve při parciálním tlaku rozpuštěného CO_2 kolem 1 kPa přestává limitace rychlosti produkce P .

Potřebný recirkulační poměr plyné fáze r v kultivátoru vypočteme z rovnice (23):

$$r = \left[(p_{1s} - p_{ks} - \frac{PV}{V_s}) \left(\frac{1}{K_{gs}} + \frac{RT}{2Q_2} \right) \right] \left[p_{1s} - p_{ks} - \frac{PV}{V_s} \left(\frac{1}{K_{gs}} - \frac{RT}{2Q_2} \right) \right]^{-1} \quad (29)$$

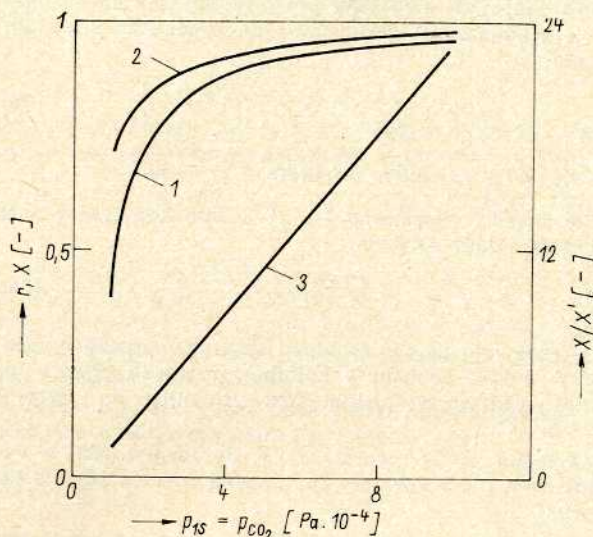
V této rovnici vystupuje mimo jiné součinitel prostupu hmoty pro absorpci oxidu uhličitého ve Venturiho sytiči. Ten byl námi stanoven pokusně za použití modelové kapaliny [6], proháňené kultivátorem místo řasové suspenze. Modelovou kapalinu tvořil roztok K_2CO_3 (50 mmol/l) a KHCO_3 (20 mmol/l) ve vodovodní vodě. Zjištěná závislost K_{gs} na objemovém průtoku Q_2 plyné fáze nasávané do sytiče je uvedena na obrázku 4. Při kultivaci řas bylo použito hodnoty $Q_2 = 8 \text{ l/min}$, tj. $1,152 \cdot 10^4 \text{ l/den}$,



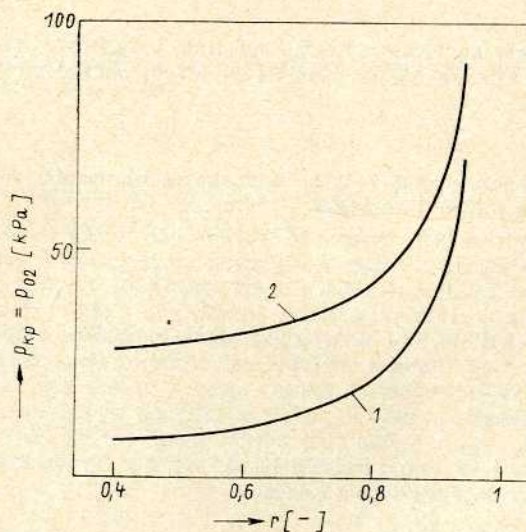
Obr. 4. Závislost součinitele prostupu hmoty K_{gs} na průtoku plynu nasávaného do Venturiho trubice. (Pro absorpci CO_2 v modelové kapalině — K_2CO_3 50 mmol/l + KHCO_3 20 mmol/l při teplotě 30°C . Průtok kapaliny sytičem 90 l/min.)

čemuž odpovídá v obr. 4 hodnota $K_{gs} = 21 \cdot 10^{-7} \text{ g CO}_2 \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1} = 3,02 \cdot 10^{-3} \text{ g CO}_2 \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{den}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$. Hodnoty dalších parametrů v rovnici (29) jsou: objem suspenze $V = 66 \text{ litrů}$, univerzální plynová konstanta $R = 8206 \text{ l} \cdot \text{Pa} \cdot \text{grad}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$, teplota kultivace 37°C ($T = 310^\circ\text{K}$) a rychlost produkce biomasy $P = 5,7 \text{ g.l}^{-1}.\text{den}^{-1}$ (odpovídající $p_{ks} = 1 \text{ kPa}$ v obrázku 3). Z 1 gramu CO_2 pohlceného buňkami řas se vyprodukuje odhadem 0,45 g řas (jako sušina), tj. $Y_s = 0,45$.

S uvedenými parametry byla podle rovnice (29) vypočtena závislost recirkulačního poměru r na parciálním tlaku CO_2 p_{1s} v plyné směsi dodávané do kultivátoru. Průběh této závislosti uvádí obr. 5. Odpovídající hodnoty konverze oxidu uhličitého vypočtené z rovnic (26) a (28) jsou rovněž uvedeny v obrázku.



Obr. 5. Vypočtené závislosti: 1 — podle rovnice (29), 2 — X podle rovnice (26), 3 — X/X' podle rovnice (28).



Obr. 6. Vliv recirkulačního poměru r na parciální tlak rozpuštěného kyslíku v trubcovém kultivátoru. Vypočteno podle rovnice (24).

1 — parciální tlak kyslíku ve vstupním plynu $p_{1p} = 0 \text{ kPa}$, 2 — parciální tlak kyslíku ve vstupním plynu $p_{1p} = 21 \text{ kPa}$.

Diskuse

Jak je z obrázku 5 patrné, vypočtený průběh konverze oxidu uhličitého v kultivátoru vzrůstá s parciálním tlakem p_{1s} oxidu uhličitého v plyné směsi a rovněž se vzrůstajícím recirkulačním poměrem plyné fáze r . Se zvětšováním recirkulačního poměru r lze však očekávat, že bude zhoršen i proces odvětrávání kyslíku z kultury řas, kde vzniká při fotosyntéze. To lze pro náš případ ukázat výpočtem parciálního tlaku rozpuštěného kyslíku v suspenzi, jenž podle rovnice (24) závisí též na recirkulačním poměru r . Parametr Y_p v této rovnici odhadneme ze vzorce $Y_p = \frac{1}{Y_s} (M_{O_2}/M_{CO_2}) = \frac{1}{0,45} (32/44) = 1,61$ g O_2 /g řas.

Při turbulentním toku plyné a kapalně fáze je součinitel prostupu hmoty úměrný odmocnině z molekulové difuzivity přestupující složky v kapalně fázi [7] pro případ, že odpor kapalně fáze je pro přestup hmoty rozhodující, tj. $K_{gp} \sim \sqrt{D_p}$, $K_{gs} \sim \sqrt{D_s}$. V našem případě $D_p = D_{O_2}$, $D_s = D_{CO_2}$. Z uvedených úměr plyne pro součinitele prostupu kyslíku $K_{gp} = K_{gs} (D_{O_2}/D_{CO_2})^{1/2} = 3,03 \cdot 10^{-3} \cdot (3,35 \cdot 10^{-5}/2,62 \cdot 10^{-5})^{1/2} = 3,43 \cdot 10^{-3}$ g $O_2 \cdot l^{-1} \cdot \text{den}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$. (Koeficienty difúze byly odhadnuty z Perryho [8] pro vodu jako kapalinu a teplotu 37 °C.)

Vypočtený průběh závislosti podle rovnice (24) je uveden v obrázku 6, s tím, že parametry Q_2 , R , T , P , V mají hodnoty již uvedené. Z obrázku 6 je skutečně patrný vzrůst parciálního tlaku kyslíku v suspenzi řas se vzrůstající hodnotou recirkulačního poměru plyné fáze. Při vyšších hodnotách parciálního tlaku kyslíku v suspenzi může dojít k částečné inhibici fotosyntézy a tedy není vhodné neomezeně zvětšovat recirkulační poměr. Z rovnice (24) vyplývá, že parciální tlak p_{kp} je nepřímo úměrný součiniteli prostupu hmoty K_{gp} . V našem případě je tedy výhodné použít ke snížení parciálního tlaku kyslíku v suspenzi řas co největší průtok plynu Q_2 do Venturiho sytiče, kdy je také součinitel prostupu hmoty maximální (obr. 4). Maximální kapacita průtoku plynu, jenž je do sytiče ještě samovolně nasávan, byla u trubcového kultivátoru v oblasti 9 litrů za minutu při průtoku suspenze trubicemi 90 l/min. Podle literárních údajů [9] tato kapacita závisí významně též na průtoku kapaliny sytičem.

Závěr

Jelikož vlastní výměna plynů nebyla u kultivátoru zcela proměřena (nebyl např. měřen parciální tlak kyslíku v suspenzi) a centrum pozornosti bylo soustředěno na vztah mezi produkcí řasové biomasy a parciálním tlakem oxidu uhličitého v suspenzi, je nutno vidět hlavní příspěvek této práce v její teoretické části. Výsledkem analýzy recyklu plyné fáze v zařízení produkujícím mikrobiální hmotu, jsou vztahy pro parciální tlak plyného substrátu rozpuštěného v kultuře — rovnice (23), vztah pro parciální tlak plyné složky, jež je produktem metabolismu mikroorganismů a jež je v kultuře rozpuštěna — rovnice (24) a vztah pro konverzi plyného substrátu v zařízení s recyklem plyné fáze — rovnice (26). Použití uvedených rovnic na proces autotrofní kultivace řas v trubcovém kultivátoru ukázalo, že konverzi dodávaného oxidu uhličitého lze recyklem plyné fáze významně zlepšit, pokud ovšem nedojde k omezení produkce biomasy parciálním tlakem kyslíku v kultuře při větším recirkulačním poměru plyné fáze.

Použité symboly

C — koncentrace
 K_g — součinitel prostupu hmoty
 p — parciální tlak

p_t — celkový tlak
 P — rychlost produkce biomasy
 Q — objemový průtok plyné fáze
 r — recirkulační poměr [[definován rovnicí (4)]]
 R — plynová konstanta
 T — absolutní teplota
 V — objem kultury
 Y_p — výtěžek produktu (g produktu/g biomasy)
 Y_s — výtěžek biomasy (g biomasy/g substrátu)
 X — konverze substrátu při recyklu plyné fáze
 X' — konverze substrátu není-li recykl plyné fáze

indexy:

1 — v plyné fázi na vstupu do zařízení
2 — v plyné fázi na vstupu do kultury mikroorganismů
3 — v plyné fázi na výstupu ze zařízení
 i — inertní plyn
 k — v kultuře mikroorganismů
 p — produkt (jiný než biomasa)
 r — v recyklu
 s — substrát

Literatura

- [1] HAMER G.: Biotechnol. Bioeng. **24**, 1982, s. 511.
- [2] TOPIWALA H. H., HAMER G.: Biotechnol. Bioeng. Symp. **4**, 1973, s. 547.
- [3] VAUCK R. A., MÜLLER H. A.: Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1978, s. 492.
- [4] ŠETLÍK I.: Ann. Rep. Algolog. Lab. Třeboň for 1987, kap. 6, s. 139.
- [5] PERRY J. H.: Chemical Engineers' Handbook. Mc Graw Hill, New York 1983, s. 5—8.
- [6] SMUTEK R., BENEŠ V., DITTRT F.: Závěrečná zpráva č. 546/Z/80. Ústav pro Hydrodynamiku ČSAV, Praha.
- [7] PERRY J. H.: Chemical Engineers' Handbook. Mc Graw Hill, New York 1983, s. 14—25.
- [8] MÍKA V.: Základy chemického inženýrství. SNTL Praha 1981, s. 546.
- [9] BAUER W. G., FREDRICKSON A. G., TSUCHIYA H. M.: IEC Proc. Design Develop. **2**, 1963, s. 178.

Lívanský, K.: Analýza recyklu plyné fáze při produkci mikroorganismů z hlediska bilančního. Kvas. prům. **30**, 1984, č. 10, s. 227—232.

Z bilančních rovnic jsou získány kvantitativní vztahy umožňující posoudit vliv recyklu plyné fáze na parciální tlaky plynů rozpuštěných v kultuře mikroorganismů a na konverzi plyného substrátu v zařízení. Tyto vztahy jsou aplikovány na autotrofní režim kultivace *Chlorella sp. K* v trubcovém kultivátoru.

Ливански, К.: Анализ рецикла газообразной фазы при продукции микроорганизмов с точки зрения баланса. Квас. прум. **30**, 1984, № 10, стр. 227—232.

На уравнений баланса получены количественные отношения, дающие возможность обсудить влияние рецикла газообразной фазы на парциальное давление газов, растворенных в культуре микроорганизмов и на конверсии субстрата в установке. Эти отношения приложены к автотрофному режиму культивирования *Chlorella sp. K* в трубкообразном культиваторе.

Lívanský, K.: Analyse des Rezyklus der Gasphase bei der Produktion von Mikroorganismen vom Standpunkt der Bilanz. Kvas. prům. **30**, 1984, Nr. 10, S. 227—232.

Aus den Bilanzgleichungen wurden quantitative Beziehungen errechnet, welche die Beurteilung des Einflusses des Rezyklus der Gasphase auf die Partialdrucke der in der Mikroorganismenkultur gelösten Gase und auf die Konversion des Gassubstrates in der Anlage ermöglichen. Diese Beziehungen werden auf das autotrofe Regime der Kultivierung von *Chlorella sp. K* im Röhrenkultivator appliziert.

Lívanský, K.: Analysis of Gas-Phase Recycle from the Standpoint of Balance in Production of Microorganisms.
Kvas. prům. **30**, 1984, No. 10, pp. 227—232.

The effect of gas-phase recycle on partial pressures of dissolved gases in the culture medium and on the con-

version of the gas substrate in the culture vessel can be described using formulae that author derived from balance equations. The derived formulae are applied to autotroph conditions of the culture of *Chlorella* sp. K in the tube apparatus.