

# Optimalizace výroby krmných kvasnic při použití vzduchu obohaceného kyslíkem

663.14:638.087  
518

## I. Matematické modelování

Ing. KAREL EDERER, Ing. FRANTIŠEK MADRON, CSc., Chemopetrol, VÚAnCh Ústí n. Labem, ing. FRANTIŠEK ŠTROS, CSc., VÚKPS Praha

### Úvod

Celosvětový nedostatek potravin, zejména bílkovin, vede k hledání nových netradičních zdrojů.

Jednou z perspektivních možností je kultivace mikroorganismů na petrochemických a jiných surovinách. Realizace velkokapacitních závodů však nejen u nás, ale i ve světě naráží na vážné ekonomické problémy.

Je to jednak neustálé zvyšování cen ropy, jednak poměrně vysoká investiční a energetická náročnost. Za těchto podmínek jsou výrobní náklady tak vysoké, že je třeba hledat technické prostředky ke zvýšení ekonomické efektivity procesu. V této práci jsme se pokusili prověřit vhodnost použití vzduchu obohaceného kyslíkem při výrobě krmných kvasnic ze syntetického ethanolu.

Výroba krmných kvasnic vycházející z původní čs. technologie [1] je založena na kontinuální kultivaci kvasinky *Candida utilis* na syntetickém ethanolu ve vodním prostředí s přidavkem anorganických živin (obr. 1).

Hlavní operace — rozmnožování a růst kvasinek probíhá ve fermentoru intenzivně míchaném a provětrávaném atmosférickým vzduchem. Získaná biomasa je od kvasného média oddělena na odstředivých separátorech, zahuštěna na odparce a v rozprašovací sušárně je konečně získán práškový produkt.

Použití kyslíku pro intenzifikaci aerobních způsobů čištění odpadních vod je už známo více než 25 let. Praktické použití v provozním měřítku bylo však umožněno teprve pokrokem ve výrobě kyslíku [3, 4, 5].

Přestože aerobní fermentace je z hlediska potřeby kyslíku velmi podobná biologickému čištění odpadních vod, existuje velmi málo prací o použití čistého kyslíku při fermentačních procesech [6–10]. O praktickém použití kyslíku při výrobě biomasy v provozním měřítku neexistují dostupné zprávy.

Dříve, než budou provedeny laboratorní experimenty, je účelné prověřit různé varianty přicházející v úvahu za použití matematického modelu.

V první části práce jsou proto řešeny otázky matematického modelování kultivace mikroorganismů. Jelikož použití kyslíku při fermentaci je v první řadě otázkou ekonomickou, druhá část práce se zabývá optimalizací výroby z ekonomického hlediska.

### Formulace problému

Z chemicko-inženýrského hlediska lze fermentor považovat za reaktor, ve kterém dochází ke styku tří fází — plynné, kapalně a mikrobiální. Faktory, na kterých závisí produkce fermentoru lze zhruba rozdělit do dvou skupin:

— Genetické vlastnosti a fyziologický stav mikroorganismu. Tyto vlastnosti v podstatě určují kinetiku a stechiometrii tvorby biomasy.

— Faktory určené konstrukcí zařízení a způsobem vedení procesu, tj. konstrukce fermentoru, způsob míchání, aerace, chlazení, průtok a koncentrace médií apod.

Faktory uvedené v první skupině lze ovlivnit jen dlouhodobým působením (šlechtěním) a při návrhu fermentoru je třeba považovat je za konstantní. Faktory uvedené ve

druhé skupině umožňují vhodnou volbou a vzájemnou kombinací intenzivně ovlivňovat proces fermentace.

### Matematické modelování

Pro sledování vlivu koncentrace kyslíku v provětrávacím médiu je možno sestavit matematický model, který je založen na stechiometrii a kinetice procesu, hmotové bilanci sledovaných veličin a přenosu hmoty.

Model vychází z poznatků a zkušeností získaných při výzkumu a výrobě krmných kvasnic ze syntetického ethanolu za provětrávání atmosférickým vzduchem [2].

Bilance biomasy je vyjádřena hodinovou produkcí (rov. 1)

$$G = Vr \quad (1)$$

$G [kg h^{-1}]$  je hodinová produkce biomasy

$V [m^3]$  je užitečný objem fermentoru

$r [kg m^{-3} h^{-1}]$  je specifická produkce

Kinetika růstu je dána Monodovým vztahem pro dva substráty, který má tvar

$$r = \mu_{\max} \frac{C_L}{K_0 + C_L} \cdot \frac{C_E}{K_E + C_E} \quad (2)$$

$\mu_{\max} [h^{-1}]$  je max. růstová rychlost

$C_E [kg m^{-3}]$  je koncentrace ethanolu v kultivačním médiu

$K_E [kg m^{-3}]$  je saturační konstanta ethanolu

$C_L [kg m^{-3}]$  je koncentrace kyslíku v kultivačním médiu

$K_0 [kg m^{-3}]$  je saturační konstanta kyslíku

$x [kg m^{-3}]$  je koncentrace biomasy

V bilanci ethanolu byly kromě spotřeby pro tvorbu biomasy uvaženy i ztráty úletem (rov. 3) [11]

$$E = \frac{Vr}{Y_{X/E}} - 0,44 \cdot 10^{-3} L_2 \quad (3)$$

$E [kg h^{-1}]$  je spotřeba ethanolu

$Y_{X/E} [1]$  je výtěžnost

$L_2 [m^3 h^{-1}]$  je množství plynu na výstupu

Množství vznikajícího kyslíčnicku uhlíkatého je vyjádřeno specifickou tvorbou  $CO_2$  (rov. 4)

$$l_{2C} = Vr Y_{CO_2/X} \quad (4)$$

$l_{2C} [kg h^{-1}]$  je množství vzniklého  $CO_2$

$Y_{CO_2/X} [1]$  je specifická tvorba  $CO_2$

Bilance kyslíku v kapalně fázi vyjadřuje rovnováhu mezi kyslíkem spotřebovaným kvasinkami a kyslíkem převedeným z plynné do kapalně fáze (rov. 5) [12]

$$r Y_{O_2/X} = (c_L^* - c_L) k_L a \quad (5)$$

$c_L^*$  [kg m<sup>-3</sup>] je rovnovážné koncentrace O<sub>2</sub> v kapalně fázi

$c_L$  [kg m<sup>-3</sup>] je koncentrace O<sub>2</sub> v kapalně fázi

$k_L a$  [h<sup>-1</sup>] je objemový součinitel přenosu hmoty

Koncentraci  $c_L^*$  lze stanovit použitím Henryho a Daltonova zákona

$$c_L^* = \frac{P_2 Y_2}{H} \quad (5a)$$

$P_2$  [Pa] je celkový tlak na výstupu

$Y_2$  [mol. zl.] je koncentrace O<sub>2</sub> na výstupu

$H$  [Pa m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>] je Henryho konstanta

Po úpravě rovnice [5a] obdržíme vztah [6], který vyjadřuje parciální tlak kyslíku na výstupu z fermentoru

$$c_L^* H = \frac{P_2 L_{20}}{32} \quad (6)$$

$$\frac{L_{20}}{32} + \frac{L_{2C}}{44} + \frac{L}{V} \frac{V(1-Y_1) \varphi_N}{28}$$

$L_{20}$  [kg h<sup>-1</sup>] je množství O<sub>2</sub> na výstupu

$L_{2C}$  [kg h<sup>-1</sup>] je množství CO<sub>2</sub> na výstupu

$L/V$  [Nm<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>] je specifická aerace

$\varphi_N$  [kg m<sup>-3</sup>] je měrná hmotnost dusíku

Bilance kyslíku v plynně fázi vyjadřuje rovnováhu mezi kyslíkem přivedeným provětrávacím médiem spotřebovaným kvasinkami a kyslíkem odvedeným do výdechu fermentoru

$$(L/V) V_{Y_1} \varphi_K = V r Y_{O_2/X} + L_{20} \quad (7)$$

$Y_1$  [obj. zl.] je koncentrace O<sub>2</sub> na vstupu

$\varphi_K$  [kg m<sup>-3</sup>] je měrná hmotnost kyslíku

Celkový objem plynů na výstupu je dán vztahem [8]

$$L_2 = \left( \frac{L_{20}}{32} + \frac{L_{2C}}{44} + \frac{L}{V} \frac{V(1-Y_1) \varphi_N}{28} \right) \frac{T_2 R}{P_2} \quad (8)$$

$L_2$  [m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>] je množství plynů na výstupu

$T_2$  [K] je teplota vystupujících plynů

$R$  [J kmol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>] je univerzální plynová konstanta

Matematický model fermentace je tedy tvořen soustavou 8 nezávislých rovnic, které obsahují 13 proměnných, z čehož vyplývá, že je možno volit 5 nezávisle proměnných veličin. Pro řešení daného problému byly jako nezávislé proměnné zvoleny

$x$  je koncentrace sušiny ve fermentoru

$Y_1$  je koncentrace O<sub>2</sub> v provětrávacím médiu

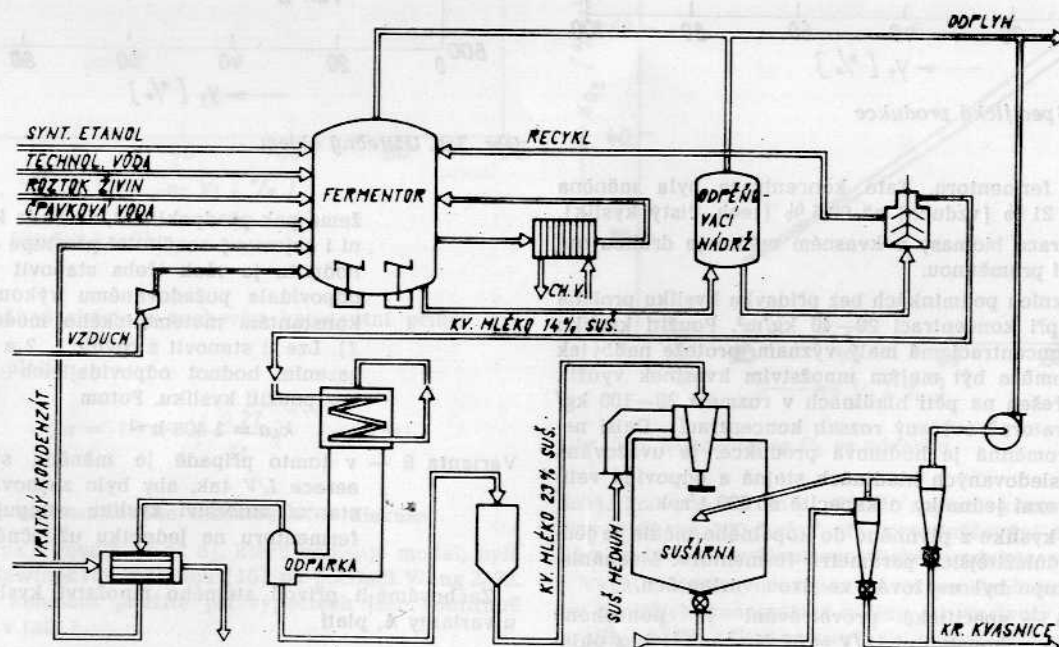
$L/V$  je specifická aerace, tj. množství provětrávacího média vztahované na užitečný objem fermentoru

$k_L a$  je objemový součinitel přestupu O<sub>2</sub>

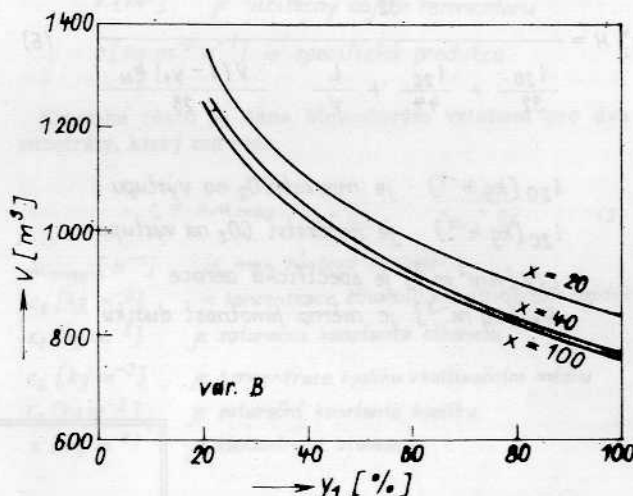
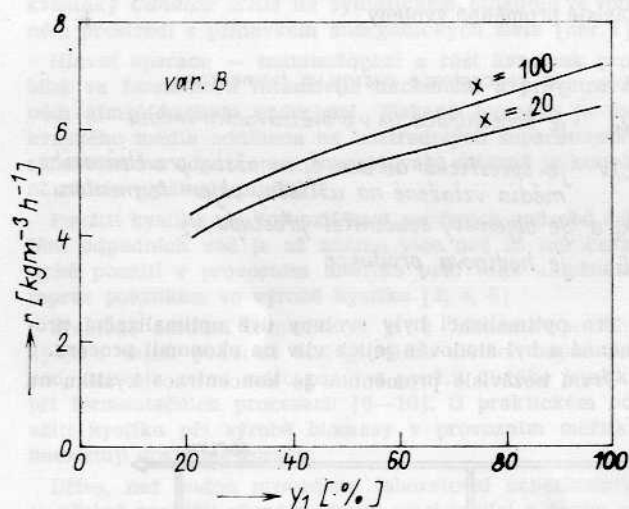
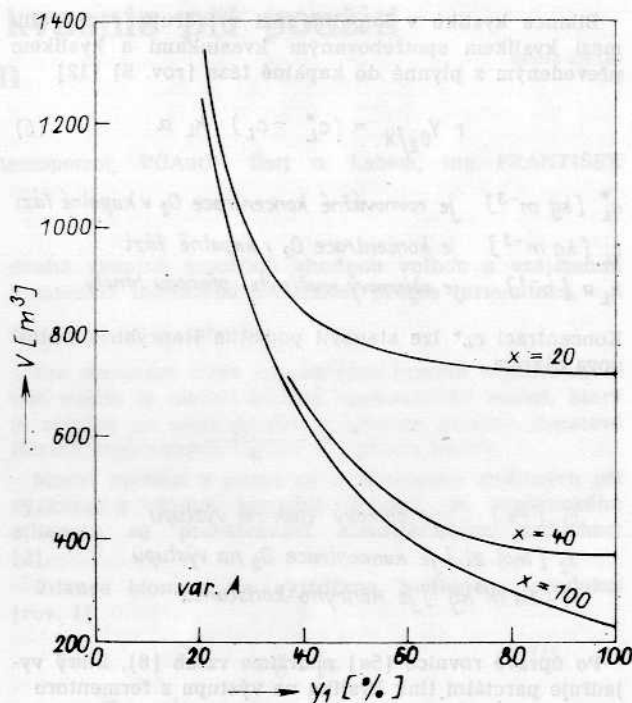
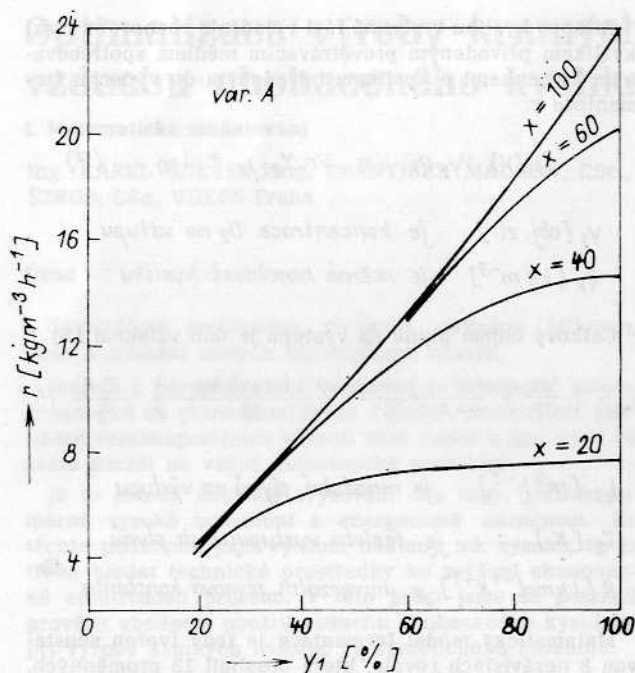
$G$  je hodinová produkce

Pro optimalizaci byly zvoleny dvě optimalizační proměnné a byl studován jejich vliv na ekonomii procesu.

První nezávisle proměnnou je koncentrace kyslíku na



Obr. 1. Výroba krmných kvasnic ze syntetického ethanolu



Obr. 2ab. Specifická produkce

Obr. 3ab. Užitečný objem

vstupu do fermentoru. Tato koncentrace byla měněna v rozmezí 21 % (vzduch) až 99,5 % (tech. čistý kyslík).

Koncentrace biomasy v kvasném médiu je druhou optimalizační proměnnou.

V provozních podmínkách bez přidavku kyslíku probíhá kultivace při koncentraci 20–40  $\text{kg/m}^3$ . Použití kyslíku při této koncentraci má malý význam, protože nadbytek kyslíku nemůže být malým množstvím kvasinek využit. Model je řešen na pěti hladinách v rozmezí 20–100  $\text{kg/m}^3$  (laboratorně ověřený rozsah koncentrací). Další nezávislá proměnná je hodinová produkce. Je uvažována na všech sledovaných hladinách stejná a odpovídá velikosti provozní jednotky o kapacitě 40 000 t/rok.

Přestup kyslíku z plynného do kapalného média je jedním z nejdůležitějších parametrů fermentoru. Mechanismus přestupu byl uvažován ve dvou variantách.

Varianta A — specifické provětrávání je ponecháno konstantní ( $L/V = 82 \text{ Nm}^3 \text{ m}^{-3}$ ) bez ohledu na změny koncentrace kyslíku. Podle běžných představ o přestupu kyslíku mů-

žeme pak předpokládat, že bude konstantní i objemový součinitel přestupu  $k_L a$ . Jeho hodnotu je však třeba stanovit tak, aby odpovídala požadovanému výkonu a konstantám matematického modelu (tab. 1). Lze ji stanovit z rovnic 1, 2 a 4–7 dosazením hodnot odpovídajících kultivaci bez použití kyslíku. Potom

$$k_L a = 1408 \text{ h}^{-1}$$

Varianta B — v tomto případě je měněna specifická aerace  $L/V$  tak, aby bylo zachováno konstantní množství kyslíku vstupujícího do fermentoru na jednotku užitečného objemu.

Zachováme-li přívod stejného množství kyslíku jako u varianty A, platí

$$L/V = 82 \frac{0,21}{y_1} \quad (9)$$



Změnou aerace se změní i  $k_L a$ . Je známa řada vztahů vyjadřujících závislost mezi aerací a  $k_L a$ , v našem případě použijeme výrazu, který publikoval Okabe a Aiba [13]

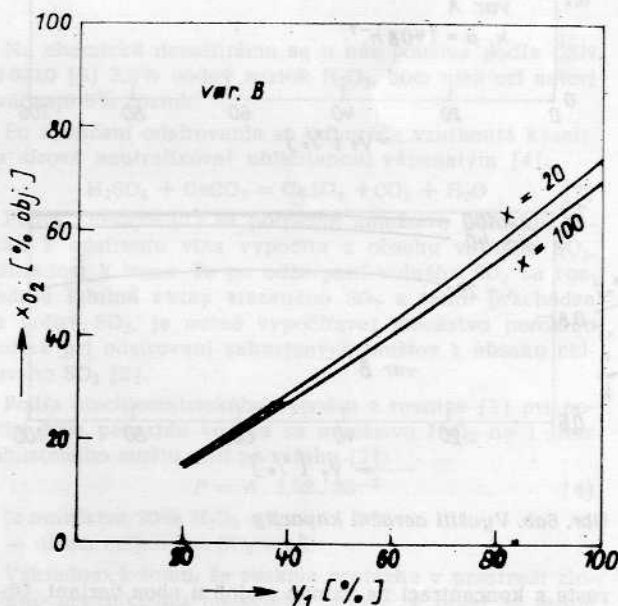
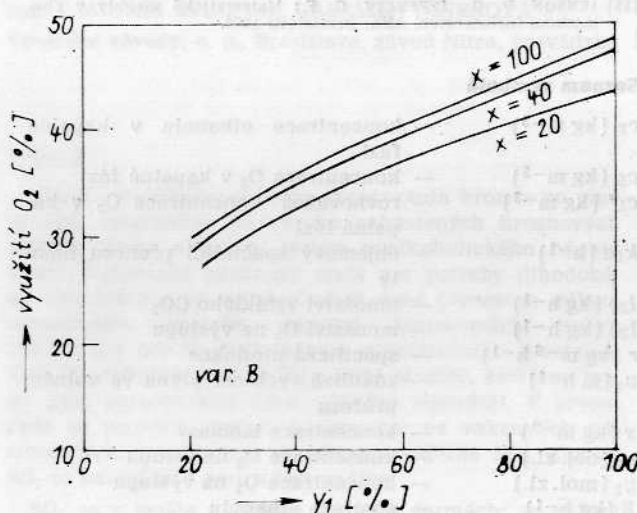
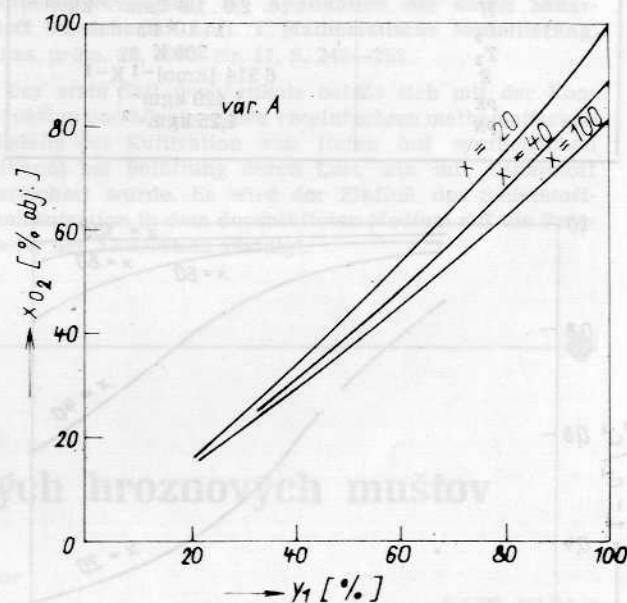
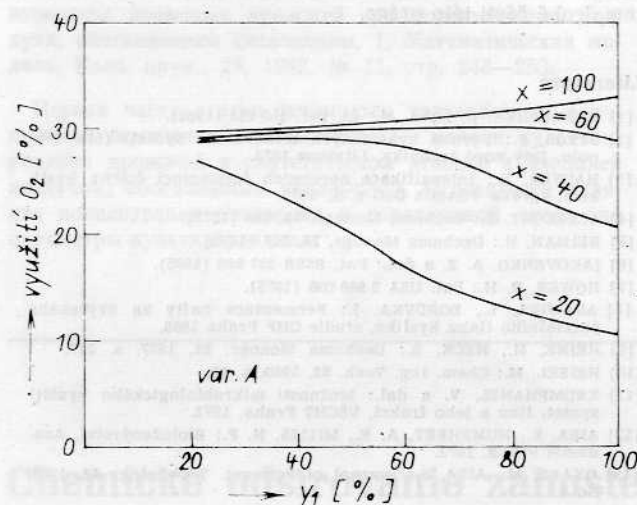
$$k_L a \sim (P_g/V)^{0,95} v_s^{0,67} \quad (10)$$

$P_g/V [\text{kW m}^{-3}]$  je specifický příkon míchadla  
 $v_s [\text{m h}^{-1}]$  je zdánlivá rychlost plynu ve volném průřezu

vacím médiu. Obě varianty se značně liší při vysokých koncentracích biomasy, při nízkých koncentracích biomasy jsou si blízké.

Při běžně používaném provětrávání atmosférickým vzduchem je růst mikroorganismů limitován nedostatkem kyslíku. Ukazuje se, že při zvýšené koncentraci  $O_2$  nastává omezení jinými parametry. U varianty A je omezujícím faktorem koncentrace sušiny  $x$ , jak je vidět z obr. 2a, 3a.

Jak roste specifická produkce, tak klesá potřebný užitelný objem, který je rozhodujícím parametrem pro investiční i provozní náklady fermentačního uzlu (obr.



Obr. 4ab. Využití kyslíku

Pro jednoduchost je zachován konstantní příkon míchadel.  
Potom platí

$$k_L a = 1408 \left( \frac{0,21}{y_1} \right)^{0,67} \quad (11)$$

#### Výsledky matematického modelování a diskuze

Soustava 8 rovnic (1 až 8), která popisuje model, byla řešena Newtonovou metodou [15] na počítači Wang 2200. Hodnoty konstant použité při výpočtech jsou souhrnně uvedeny v tab. 1.

Výsledky výpočtu i přes jistá zjednodušení přináší zajímavá zjištění o vlivu koncentrace  $O_2$  v provzdušňo-

vacím médiu. Pro obě varianty přináší zvýšení koncentrace sušiny z 20 na 100  $\text{kg m}^{-3}$  při provzdušňování atmosférickým vzduchem zvýšení specifické produkce asi o 10 %.

Využití kyslíku u varianty A je poměrně malé, zejména u nižších koncentrací sušiny. U varianty B využití kyslíku roste s koncentrací  $O_2$ , obsahem sušiny není příliš ovlivněno (obr. 4 ab). S nízkým využitím kyslíku je pak dána i koncentrace kyslíku na výstupu, která

Obr. 5ab. Koncentrace  $O_2$  ve výdechu

Tab. 1 — Seznam konstant matematického modelu

Symbol	Hodnota
$\mu_{max}$	$0,44 \text{ h}^{-1}$
$K_E$	$0,15 \text{ kg m}^{-3}$
$K_O$	$7 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^{-3}$
$C_E$	$1 \text{ kg m}^{-3}$
$Y_{X/E}$	$0,7$
$Y_{CO_2/X}$	$1,05$
$Y_{O_2/X}$	$1,86$
$H$	$2,9 \cdot 10^6 \text{ Pa m}^{-3} \text{ kg}^{-1}$
$P_2$	$1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
$T_2$	$306 \text{ K}$
$R$	$8314 \text{ J kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
$\rho_K$	$1,429 \text{ kg m}^{-3}$
$\rho_N$	$1,25 \text{ kg m}^{-3}$

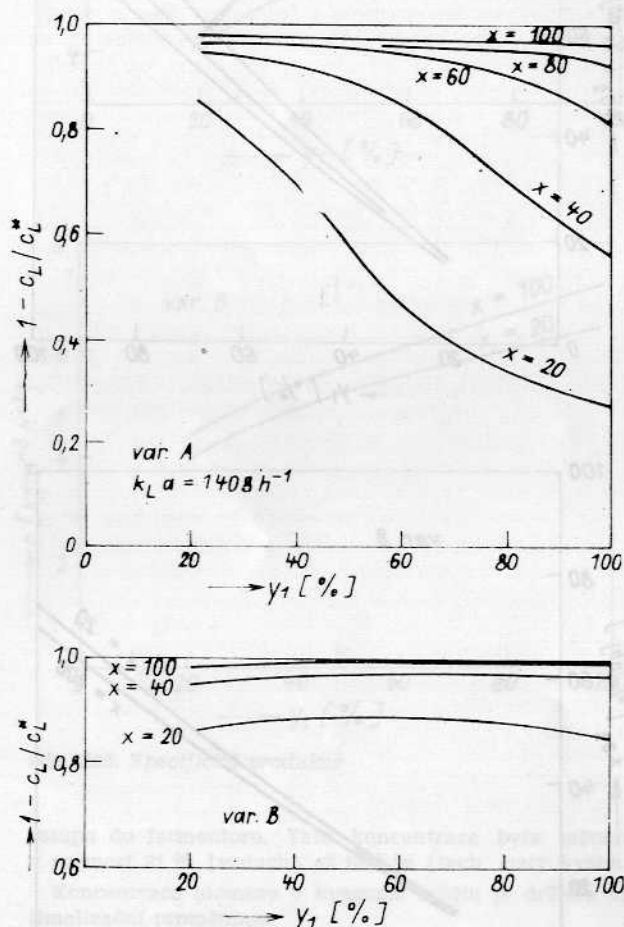
Výsledky obou variant se nejvíce liší právě v nejdůležitějším parametru, tj. ve specifické produkci (obr. 2 ab). Zatím co u varianty A je dosaženo maximálního zvýšení o 500 %, je u varianty B dosaženo zvýšení pouze o 80 %. Tento značný rozdíl je způsoben silným poklesem  $k_{LA}$  v závislosti na snižování aerace podle rov. 11. Exponent u  $v_s$  je diskutabilní a pro různé typy míchadel se pohybuje v širokých mezích. Pro křídlové turbíny nabývá hodnot 0,4–0,84 [14]. Je proto třeba počítat s tím, že vliv použití vzduchu obohaceného kyslíkem na fermentaci značně závisí na konstrukci fermentorů. Vliv koncentrace kyslíku na ekonomii výroby krmných kvasnic je předmětem druhé části této práce.

## Literatura

- [1] VERNEROVÁ, J., ROSA, M.: čs. pat. 109 658 (1962).
- [2] ŠTOS, F.: Výroba kvasničných bílkovin ze syntetického etanolu, Dny nové techniky, Litvínov 1978.
- [3] HAUSER, K.: Intenzifikace aerobních fermentací čistým kyslíkem, zpráva VÚAnCh Ústí n. L. 1979.
- [4] ALBRECHT, E.: Dechema Monogr. **75**, 343 (1973).
- [5] REIMAN, H.: Dechema Monogr. **75**, 327 (1973).
- [6] JAKOVENKO, A. Z. a dal.: Pat. SSSR 287 880 (1965).
- [7] HOWER, R. H.: Pat. USA 3 968 035 (1975).
- [8] ADAMÍRA, L., BORŮVKA, J.: Fermentace nafty za zvýšeného parciálního tlaku kyslíku, studie CHP Praha 1969.
- [9] HEINE, H., HECK, B.: Dechema Monogr. **81**, 1977, s. 217.
- [10] HEISEL, M.: Chem. Ing. Tech. **52**, 1980, s. 80.
- [11] KRUMPHANZL, V. a dal.: Možnosti mikrobiologického využití syntet. lihu a jeho frakcí, VŠCHT Praha, 1972.
- [12] AIBA, S., HUMPHREY, A. E., MILLIS, N. F.: Bioinženýrství, Academia Praha, 1972.
- [13] OKABE, M., AIBA, S.: Journal of Ferment. Technology **52**, 1974, No 4.
- [14] ŠTĚRBÁČEK, Z.: Tech. v chemii **66**, 1976, s. 22.
- [15] JENSON, V. G., JEFFREYS, G. F.: Matematické metody v chemickom inženýrstve, Alfa, Bratislava 1973.

## Seznam symbolů

$C_E$ (kg m <sup>-3</sup> )	— koncentrace ethanolu v kapalně fázi
$C_L$ (kg m <sup>-3</sup> )	— koncentrace O <sub>2</sub> v kapalně fázi
$C_L^*$ (kg m <sup>-3</sup> )	— rovnovážná koncentrace O <sub>2</sub> v kapalně fázi
$k_{LA}$ (h <sup>-1</sup> )	— objemový součinitel přenosu hmoty
$l_{2C}$ (kg h <sup>-1</sup> )	— množství vzniklého CO <sub>2</sub>
$l_{2O}$ (kg h <sup>-1</sup> )	— množství O <sub>2</sub> na výstupu
$r$ (kg m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup> )	— specifická produkce
$v_s$ (m h <sup>-1</sup> )	— zdánlivá rychlost plynu ve volném průřezu
$x$ (kg m <sup>-3</sup> )	— koncentrace biomasy
$y_1$ (obj. zl.)	— koncentrace O <sub>2</sub> na vstupu
$y_2$ (mol. zl.)	— koncentrace O <sub>2</sub> na výstupu
$E$ (kg h <sup>-1</sup> )	— spotřeba ethanolu
$G$ (kg h <sup>-1</sup> )	— produkce biomasy
$H$ (Pa m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> )	— Henryho konstanta
$K_E$ (kg m <sup>-3</sup> )	— saturační konstanta ethanolu
$K_O$ (kg m <sup>-3</sup> )	— saturační konstanta kyslíku
$L$ (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	— množství provětrávacího média na vstupu
$L_2$ (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	— množství plynů na výstupu
$P_g$ (kW)	— příkon míchadla
$P_2$ (Pa)	— celkový tlak na výstupu
$R$ (J kmol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	— univerzální plynová konstanta
$T_2$ (K)	— teplota vystupujících plynů
$V$ (m <sup>3</sup> )	— užitečný objem fermentoru
$Y_{CO_2/X}$ (l)	— specifická tvorba CO <sub>2</sub>
$Y_{E/X}$ (l)	— specifická spotřeba ethanolu
$Y_{O_2/X}$ (l)	— specifická spotřeba O <sub>2</sub>
$Y_{X/E}$ (l)	— výtěžnost vztažená na ethanol
$\mu_{max}$ (h <sup>-1</sup> )	— max. růstová rychlost
$\rho_K$ (kg m <sup>-3</sup> )	— měrná hmotnost kyslíku
$\rho_N$ (kg m <sup>-3</sup> )	— měrná hmotnost dusíku



Obr. 6ab. Využití aerační kapacity

roste s koncentrací na vstupu stejně u obou variant. Obsahem sušiny je ovlivněna více u varianty A, kde také dosahuje vyšších absolutních hodnot (obr. 5 ab).

Zajímavé jsou též výsledky závislosti veličiny  $1 - C_L/C_L^*$  na koncentraci kyslíku uvedené na obr. 6.

Velichina  $1 - C_L/C_L^*$  je totiž mírou využití fermentoru z hlediska přestupu hmoty. Pokud se  $C_L$  blíží  $C_L^*$ , je zřejmé, že přestup hmoty zajišťovaný fermentorem je vyšší, než kultivace nezbytně vyžaduje. V opačném případě ( $C_L$  blízké nule) je kultivace limitována rychlostí růstu mikroorganismů a fermentor je plně využit. Výsledky znázorněné na obr. 6a, b nepotřebují komentáře.

**Ederer, K. - Madron, F. - Štros, F.: Optimalizace výroby krmných kvasnic při použití vzduchu obohaceného kyslíkem. I. Matematické modelování.** Kvas. prům., 28, 1982, č. 11, s. 248—253.

1. část článku se zabývá sestavením a řešením zjednodušeného matematického modelu kultivace kvasnic na syntetickém ethanolu při provětrávání vzduchem obohaceným kyslíkem. Je sledován vliv koncentrace kyslíku v provětrávacím médiu na parametry kultivace.

Эдерер, К., Мадрон, Ф., Штрос, Ф.: Оптимализация производства кормовых дрожжей при использовании воздуха, обогащенного кислородом. I. Математическая модель. Квас. прум., 28, 1982, № 11, стр. 248—253.

Первая часть статьи занимается составлением и решением упрощенной математической модели культивирования дрожжей в синтетическом этаноле с аэрацией воздухом, обогащенным кислородом. Исследуется влияние концентрации кислорода в аэрационной среде на параметры культивирования.

**Ederer, K. - Madron, F. - Štros, F.: Optimization of Fodder Yeast Production Using Air Enriched by Oxygen. I. Mathematical Model.** Kvas. prům. 28, 1982, No. 11, p. 248—253.

The simplified mathematical model of yeast cultivation on synthetic ethanol with the aeration by air enriched by oxygen is set-up and solved. The effect of an oxygen concentration in the aeration gas on process parameters is observed.

**Ederer, K. - Madron, F. - Štros, F.: Optimisation der Futterhefeerzeugung bei Applikation der durch Sauerstoff bereicherten Luft. I. Mathematische Modellierung.** Kvas. prům. 28, 1982, Nr. 11, S. 248—253.

Der erste Teil des Artikels befaßt sich mit der Konstruktion und Lösung eines vereinfachten mathematischen Modells der Kultivation von Hefen auf synthetischen Äthanol bei Belüftung durch Luft, die mit Sauerstoff bereichert wurde. Es wird der Einfluß der Sauerstoffkonzentration in dem durchlüfteten Medium auf die Parameter der Kultivation verfolgt.