

Optimalizace výroby krmných kvasnic při použití vzduchu obohaceného kyslíkem

663.14:636.087
518

II. Ekonomická optimalizace

Ing. KAREL EDERER, Ing. FRANTIŠEK MADRON, Chemo petrol, VÚAnCH Ústí nad Labem,
Ing. FRANTIŠEK ŠTROS, CSc., Výzkumný ústav krmivářského průmyslu a služeb

Úvod

V první části této práce [1] byl prezentován zjednodušený matematický model kontinuální kultivace kvasinky *Candida utilis* na syntetickém ethanolu. Byl sledován vliv koncentrace kyslíku v provětrávacím médiu na specifickou produkci a z toho vyplývající stanovení potřebné velikosti fermentoru pro danou kapacitu.

V této části práce je posuzován vliv koncentrace kyslíku v provětrávacím vzduchu na ekonomiku celého procesu, tj. vliv na investiční a provozní náklady. Jako srovnávací základna byla zvolena výroba krmného droždí o kapacitě 40 000 t/rok při provětrávání atmosférickým vzduchem [2]. S touto výrobnou jsou porovnávána alternativní řešení se zvýšeným obsahem kyslíku, avšak při zachování stejné roční výroby. Zvýšená koncentrace kyslíku má za následek intenzifikaci výroby a tím i snížení investičních a provozních nákladů. Na druhé straně je však třeba vybudovat zařízení na výrobu kyslíku.

Vzhledem ke stejné výrobní kapacitě všech srovnávaných variant ponechává změna koncentrace kyslíku řadu výrobních souborů zcela beze změny, proto jsou také vypuštěny z ekonomického vyhodnocení. Rovněž spotřeba surovin kromě ethylalkoholu zůstává beze změny. Zásadně je ovlivněn ústřední článek výroby — fermentace spolu s čistírnou odpadních vod. Uvedené soubory spolu s výrobnou kyslíku jsou pak posuzovány z hlediska celkových nákladů.

Fermentační uzel

Provozní soubor fermentace je tvořen několika fermentory, z nichž každý spolu s vlastním doplňkovým zařízením tvoří samostatnou jednotku. Kapacita výroby je dána počtem a velikostí fermentačních jednotek. V našem případě je uvažován fermentor o objemu 900 m³ s užitečným pracovním prostorem 450 m³. Změny celkového užitečného kvasného prostoru vyvolané změnou koncentrace O₂ jsou v modelu realizovány změnou počtu fermentačních jednotek bez zřetele na to, že počet jednotek není celé číslo.

Počet fermentačních jednotek potřebný pro stanovenou kapacitu 40 000 t/rok určený potřebným fermentačním objemem je dán vztahem

$$n = \frac{V}{V_0} \quad (1)$$

kde n (—) je počet fermentačních jednotek,
 V (m³) — potřebný fermentační objem,
 V_0 (m³) — užitečný objem jednoho fermentoru.

Investiční náklady jsou pak n -násobkem investičních nákladů na jednu fermentační jednotku. Totéž platí o nákladech na energie s výjimkou chladicí vody pro chlazení fermentorů, jejíž množství je na počtu fermentorů nezávislé. U varianty B je pak ještě přihlédnuto ke snížení množství provětrávacího média při zvyšování koncentrace O₂.

Celkové vybrané náklady na provozní soubor fermentace jsou dány součtem odpisů, režie, nákladů na energie a nákladů na spotřebovaný ethylalkohol

$$NF = n \cdot NF_0 + NEt \quad (2)$$

Do vybraných nákladů nejsou zahrnuty položky, které se

nemění s počtem fermentačních jednotek nebo s množstvím provětrávacího vzduchu. Po vyčíslení dostane rov. (2) tvar

$$NF = n (4936 + 1413 L/Lo) + 28,0276 E \quad (2a)$$

NF (10³ Kčs) — celkové vybrané náklady na provozní soubor fermentace,
 NF_0 (10³ Kčs) — vybrané náklady na jednu fermentační jednotku,
 NEt (10³ Kčs) — náklady na ethanol,
 E (kg h⁻¹) — spotřeba ethanolu,

Poměr L/Lo v rov. (2a) vyjadřuje změnu množství provětrávacího média u varianty B, pro variantu A $L/Lo = 1$.

Jak bylo vysvětleno v první části této práce [1], je model řešen ve 2 variantách. Varianta A předpokládá provětrávání konstantním množstvím plynného média, a tedy i konstantní součinitel k_{La} . Varianta B pak zachovává konstantní množství kyslíku vstupujícího do fermentoru na jednotku užitečného objemu. Tím se mění specifická aerace L/V a s ní i součinitel k_{La} .

Čistírna odpadních vod

Odpadní vody v procesu vznikají jednak při likvidaci odseparovaného média po skončení operačního cyklu, jednak při mytí fermentorů. Další odpadní vody jsou v podstatě nezávislé na počtu fermentorů a nejsou tedy uvažovány. Roční množství odpadních vod je pak dáno vztahem

$$W = cn/V_0 \left(1 - \frac{x}{x_1} \right) + [W_m] \quad (3)$$

W (m³ rok⁻¹) — celkové množství odpadních vod,
 W_m (m³) — množství vody na jedno mytí,
 V_0 (m³) — užitečný objem fermentoru,
 c (rok⁻¹) — počet pracovních cyklů fermentoru,
 n (—) — počet fermentorů,
 x (kg m⁻³) — koncentrace sušiny ve fermentoru,
 x_1 (kg m⁻³) — koncentrace sušiny po separaci,

Z uvedeného vztahu vyplývá, že při dosažení pracovní koncentrace ve fermentoru rovné koncentraci po separaci ($x = x_1$) nebude vznikat žádná odpadní voda, odpadné separace a kvasničné mléko bude postupovat přímo na odparku. Odpadné rovněž vrácení odstředěného média do fermentoru a tím by měl být proces zcela kontinuální.

Celkové náklady na čistírnu odpadních vod dané součtem odpisů, příslušných režijních a energetických nákladů budeme pro jednoduchost považovat za přímo úměrné množství odpadní vody

$$NČ = NČ_0 \frac{W}{W_0} \quad (4)$$

$NČ$ (10³ Kčs . rok⁻¹) — množství odpadní vod bez použití kyslíku,
 $NČ_0$ (10³ Kčs . rok⁻¹) — celkové náklady na čistírnu bez použití kyslíku,
 W_0 (m³ rok⁻¹) — celkové náklady na čistírnu při použití kyslíku.

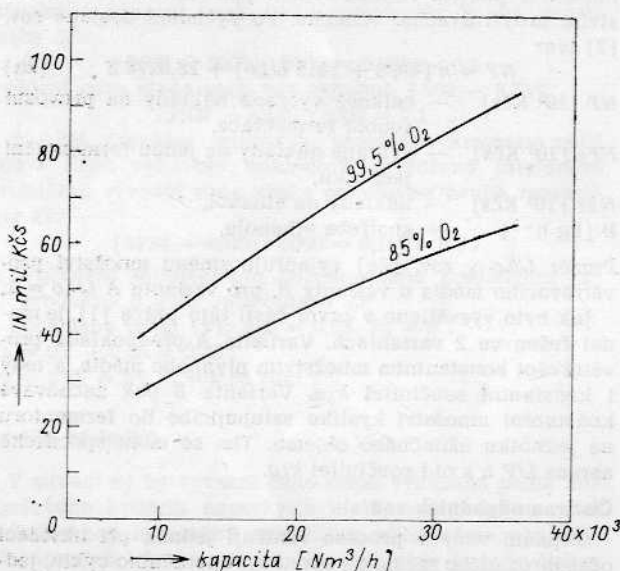
Spojením a vyčíslením rovnic (3) a (4) získáme konečný vztah pro výpočet celkových nákladů na čistírnu odpadních vod

$$NČ = n (2312,28 - 9,28 x) \quad (5)$$

Výroba kyslíku

Zvýšení koncentrace kyslíku provětrávacího plynu je zajištěno přidavkem kyslíku získaného nízkoteplotním dělením vzduchu. Jsou uváženy dvě alternativy koncentrace přidávaného kyslíku — 85 % a 99,5 % obj. Kyslík je dodáván v plynném stavu a směřován se vzduchem před vstupem do turbodmychadla.

Potřebné údaje o investiční a energetické náročnosti byly získány od výrobce — FEROX Děčín a projekční organizace CHEPOS IDZ Teplice.



Obr. 1. Investiční náklady pro výrobu kyslíku

Na základě získaných údajů byl vyneseno do grafu průběh celkových investičních nákladů na výrobu kyslíku v rozmezí od 10 000 do 35 000 Nm³ h⁻¹ kyslíku (obr. 1). Pro přepočítání celkových investičních nákladů pro jednotlivé sledované varianty bylo použito mocninového pravidla [3]

$$INK = INK_{20} \left(\frac{K}{K_{20}} \right)^{0,6} \quad (6)$$

přičemž za výchozí základnu jsou uvažovány náklady pro kapacitu 20 000 Nm³ h⁻¹.

INK (10³ Kčs) — celkové investiční náklady na kyslíkárnu,

INK₂₀ (10³ Kčs) — celkové investiční náklady na kyslíkárnu o kapacitě 20 000 Nm³ h⁻¹,

K (Nm³ h⁻¹) — kapacita kyslíkárny,

K₂₀ = 20 000 Nm³ h⁻¹ — kapacita referenční kyslíkárny

Exponent 0,6 použitý v mocninovém pravidle vyhovuje v daných mezích grafu na obr. 1 a lze předpokládat, že vyhovuje i mimo tyto meze. Výrobce běžně dodává zařízení do kapacity 35 000 Nm³ h⁻¹ a předpokládá možnost dodání výroby o kapacitě 50 000 Nm³ h⁻¹.

Větší kapacity lze dosáhnout násobením počtu výrobních zařízení. Pro výrobu krmného droždí o výkonu 40 000 t/rok se uvedené meze prakticky nepřekračují.

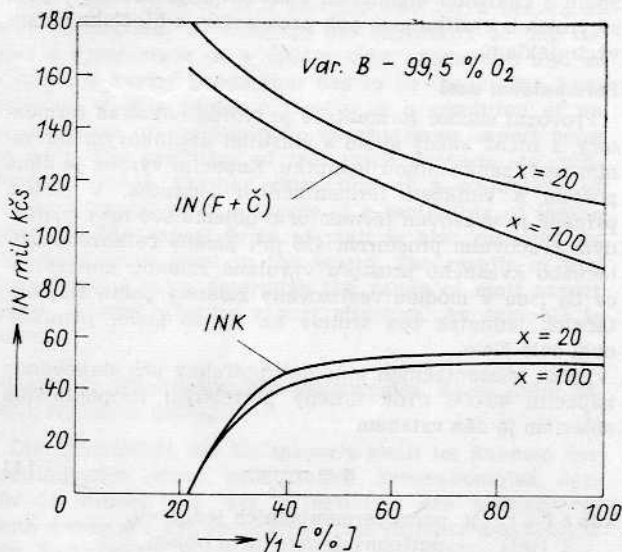
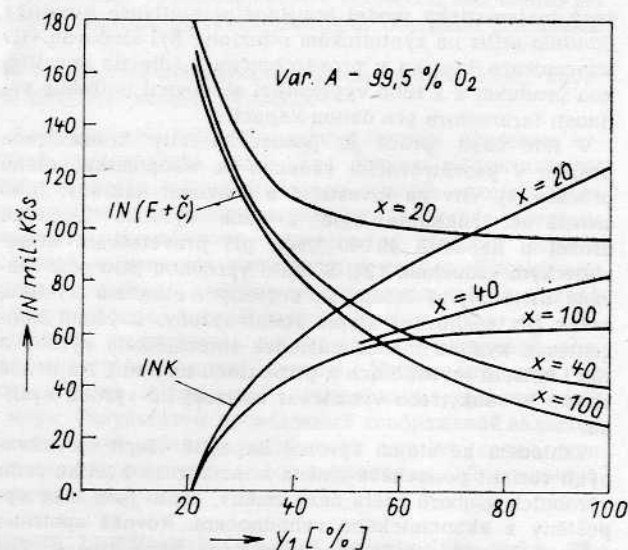
Pro stanovení energetických nákladů byl přijat předpoklad, že spotřeba energií je přímo úměrná kapacitě výroby kyslíku. Sledována je pouze spotřeba elektrického proudu a chladicí vody. V tab. 1 jsou shrnuty údaje o spotřebě energií pro obě uvažované koncentrace.

Roční náklady na energie jsou pak při fondu pracovní doby 6 836 h dány vztahem

$$NEK = 6,836 K [S_E O_E + S_V \cdot C_V] \quad (7)$$

Tab. 1. Spotřeba energií pro výrobu kyslíku

Koncentrace kyslíku [% obj.]	85	99,5
specifická spotřeba elektrického proudu [kWh Nm⁻³]	0,4	0,5
specifická spotřeba chladicí vody [m³ Nm⁻³]	0,030	0,053



Obr. 2ab. Investiční náklady na fermentační uzel, ČOV a kyslíkárnu

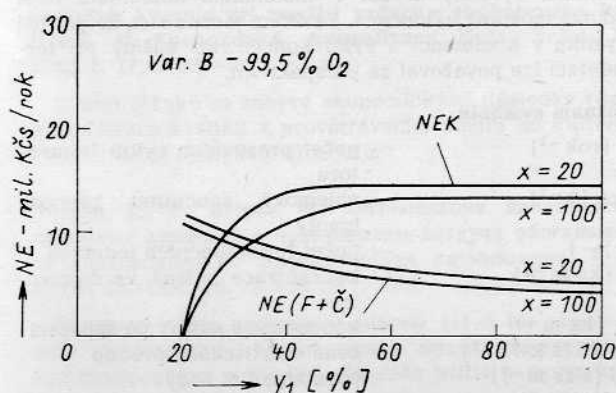
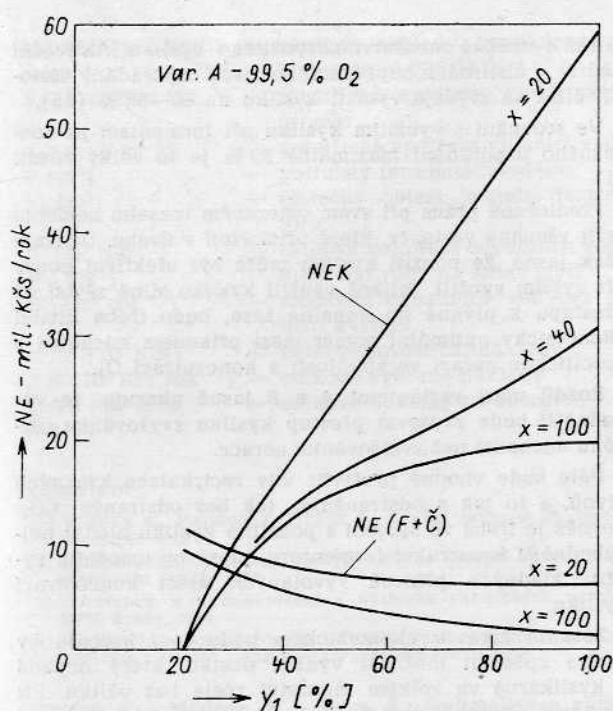
NEK (10³ Kčs rok⁻¹) — energetické náklady na kyslíkárnu,
S_E (kWh Nm⁻³) — spec. spotřeba elektrického proudu,

S_V (m³ Nm⁻³) — spec. spotřeba chladicí vody,

C_E (Kčs kWh⁻¹) — cena elektrického proudu,

C_V (Kčs m⁻³) — cena chladicí vody.

Ze vztahů (6) a (7) získáme výraz pro stanovení vybraných ročních nákladů pro koncentraci 65 %



Obr. 3ab. Energetické náklady na fermentační uzel, ČOV a kyslíkárnu

$$NK_{85} = 4,692 \left(\frac{K}{20\,000} \right)^{0,6} + 0,7875 K \quad (8)$$

a pro koncentraci 95,5 % kyslíku obdobně

$$NK_{95,5} = 6,630 \left(\frac{K}{20\,000} \right)^{0,6} + 1,0013 K \quad (9)$$

Celkové náklady

Celkové vybrané náklady byly vyčísleny po částech, aby bylo možno sledovat vliv jednotlivých položek a výsledky byly vyneseny do grafů.

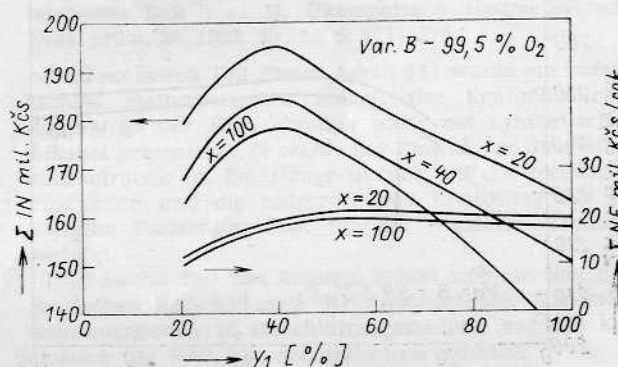
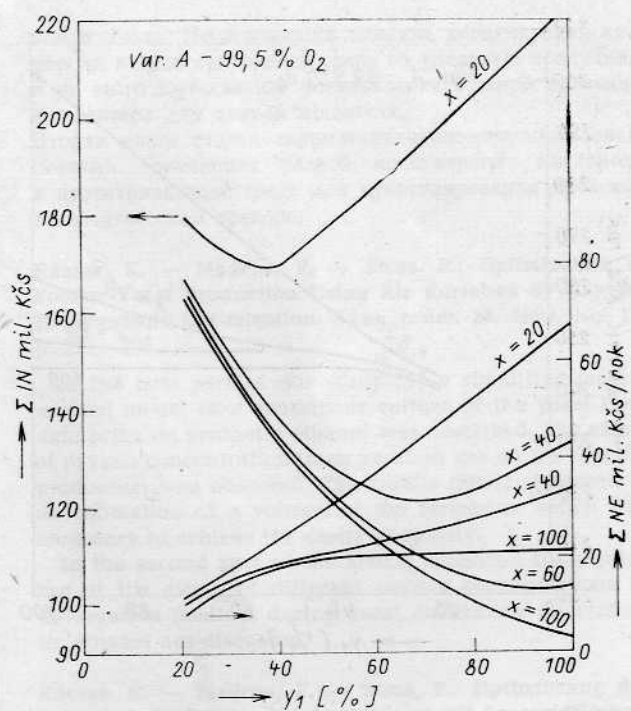
Investiční náklady na provozní soubor fermentace a čistírnu odpadních vod byly spojeny — $IN(F + Č)$ a vyneseny do společného grafu s investičními náklady na kyslíkárnu — INK v závislosti na vstupní koncentraci kyslíku (obr. 2 ab). Stejným způsobem byly spojeny náklady na energie potřebné pro provozní soubor fermentace a čistírnu odpadních vod — $NE(F + Č)$ a energie potřebná pro výrobu kyslíku — NEK (obr. 3 ab).

Celkové investiční a celkové energetické náklady dané vztahy

$$IN = IN(F + Č) + INK \quad (10)$$

$$NE = NE(F + Č) + NEK \quad (11)$$

jsou znázorněny ve společném grafu (obr. 4 ab) rovněž v závislosti na vstupní koncentraci kyslíku.



Obr. 4ab. Celkové náklady na investice a energie

Celkové vybrané náklady ovlivněné přidavkem čistého kyslíku do provětrávacího vzduchu jsou pak dány součtem celkových nákladů na fermentaci (rov. 2a), nákladů na čistírnu odpadních vod (rov. 5) a nákladů na kyslíkárnu (rov. 8, resp. 9):

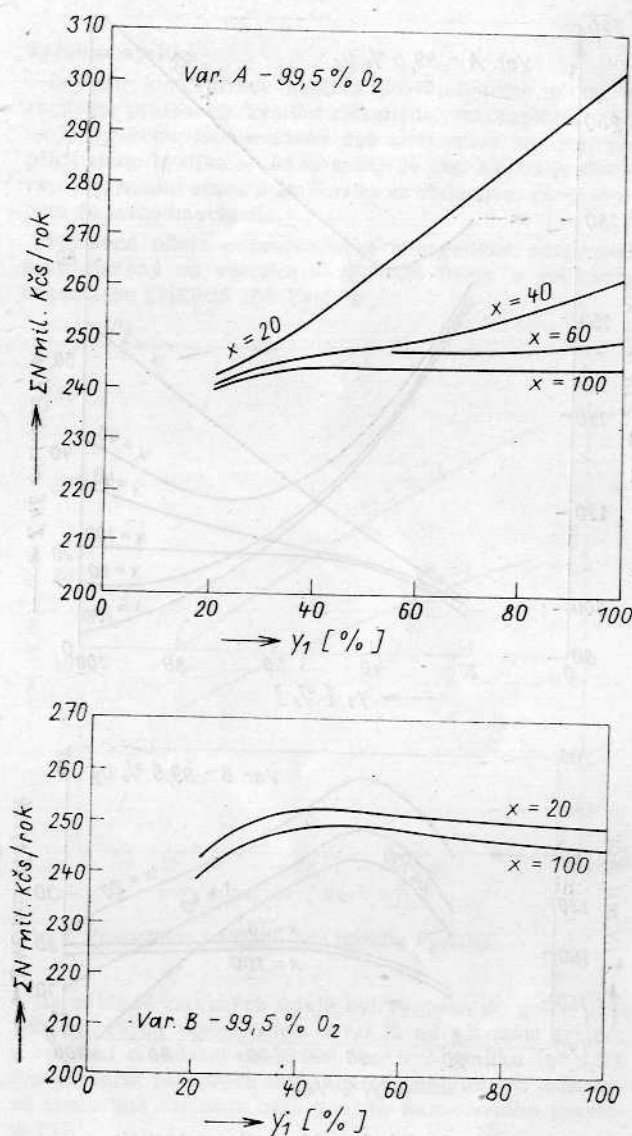
$$N = NF + NČ + NK \quad (12)$$

Průběh celkových vybraných nákladů je pro obě varianty zachycen na obr. 5 ab.

Zhodnocení a závěr

Vyčíslením účelové funkce (12) bylo zjištěno, že za podmínek určených modelem fermentace a použitými konstantami není využití kyslíku ekonomicky výhodné. Jak ukazuje obr. 5, způsobuje zvýšení koncentrace O_2 za všech koncentrací sušiny zvýšení celkových nákladů. K velkému zvýšení nákladů dochází u varianty A pro malé koncentrace sušiny (obr. 5a), pro koncentrace sušiny nad 60 kg/m^3 se varianty A a B prakticky neliší. Zjevně z toho vyplývá, že pro nízké koncentrace sušiny použití kyslíku nepřichází v úvahu. Oproti tomu koncentrace sušiny nad 60 kg/m^3 přináší už jen malé zlepšení.

V nejlepším případě dosahuje zvýšení sledovaných nákladů 0,7 % u varianty A a 1,4 % u varianty B, obou při koncentraci přidavného kyslíku 85 %. Při koncentraci přidavného kyslíku 99,5 % je zvýšení nákladů 1,7 % u varianty A a 1,5 % u varianty B.



Obr. 5ab. Celkové náklady

Příčiny těchto nepříznivých výsledků lze objasnit sledováním struktury celkových nákladů. Spotřeba ethylalkoholu ovlivňuje celkové rozdíly v nákladech relativně málo. Průběh investičních nákladů je ukázán na obr. 2. Se stoupající koncentrací O₂ klesají investice na fermentační uzel a ČOV a současně stoupají investice na kyslíkárnu. Pokles investic u fermentačního uzlu a ČOV je výraznější než vzrůst u kyslíkárny, jak ukazuje součet investičních nákladů na obr. 4. Pro vyšší koncentrace sušiny je celkový pokles investic patrný zejména u varianty A.

Opačný případ nastává u spotřeby energií. Se stoupající koncentrací O₂ sice klesá spotřeba energií pro fermentační uzel a ČOV, ale spotřeba pro kyslíkárnu roste rychleji, zejména u varianty A při nízké koncentraci sušiny (obr. 3). Součet spotřeby energií je pak uveden na obr. 4. Vzrůst spotřeby energií na kyslíkárnu tedy převážil pokles investic i energií způsobený zvýšením koncentrace O₂ v základní části výroby.

Po zvážení uvedených výsledků vzniká otázka, proč fermentace se zvýšenou koncentrací kyslíku není ekonomicky výhodná na rozdíl od čištění odpadních vod, když jde v podstatě o stejný proces. Odpověď na tuto otázku lze hledat především v rozdílném konstrukčním uspořádání. Odplyn z fermentoru odchází přímo do atmosféry a

s ním i značné množství nevyužitého kyslíku. Aktivační nádrže v čistírnách odpadních vod jsou uspořádány sériově, čímž se zvyšuje využití kyslíku na 90–95 % [15].

Ve srovnání s využitím kyslíku při fermentaci za současného uspořádání maximálně 30 % je to velký rozdíl [1].

Předložená práce při svém omezeném rozsahu nemohla řešit všechny varianty, které přicházejí v úvahu. Ukazuje však jasně, že použití kyslíku může být efektivní pouze při vyšším využití. Jelikož využití kyslíku silně závisí na přestupu z plynné do kapalně fáze, bude třeba hledat ekonomicky optimální poměr mezi příkonem míchadel a specifickou aerací ve spojitosti s koncentrací O₂.

Rozdíl mezi variantami A a B jasně ukazuje, že výhodnější bude zvyšovat přestup kyslíku zvyšováním příkonu míchadel než zvětšováním aerace.

Dále bude vhodné přezkoumat vliv recirkulace kvasných plynů, a to jak s odstraněním, tak bez odstranění CO₂. Rovněž je třeba ve spojení s použitím kyslíku hledat nejvýhodnější konstrukci fermentoru, která by umožnila využití kladných přínosů vyvolaných vyšší koncentrací kyslíku.

Zásadní zvrat v ekonomickém hodnocení procesu by mohla způsobit možnost využití dusíku, který odpadá v kyslíkárně ve velkém množství zcela bez užitku. Při realizaci výroby droždí v chemickém kombinátu není taková možnost vyloučena. Závěrem možno říci, že použití kyslíku v kombinaci s vyšší koncentrací sušiny při fermentaci lze považovat za perspektivní.

Seznam symbolů

c (rok ⁻¹)	— počet pracovních cyklů fermentoru
k_{La} (h ⁻¹)	— objemový součinitel přenosu hmoty
n (—)	— počet fermentačních jednotek
x (kg m ⁻³)	— koncentrace sušiny ve fermentoru
x_1 (kg m ⁻³)	— koncentrace sušiny po separaci
C_E (Kčs kWh ⁻¹)	— cena elektrického proudu
C_v (Kčs m ⁻³)	— cena chladicí vody
E (kg h ⁻¹)	— spotřeba ethanolu
IN (F + Č) (10 ³ Kčs)	— investiční náklady na fermentační jednotku a čistírnu odpadních vod
INK (10 ³ Kčs)	— celkové investiční náklady na kyslíkárnu
INK_{20} (10 ³ Kčs)	— celkové investiční náklady na referenční kyslíkárnu
K (Nm ³ h ⁻¹)	— kapacita kyslíkárny
K_{20} (Nm ³ h ⁻¹)	— kapacita referenční kyslíkárny
L (m ³ h ⁻¹)	— množství provětrávaného média s přísadkou O ₂
L_0 (m ³ h ⁻¹)	— množství provětrávaného média bez přísadky O ₂
$NČ$ (10 ³ Kčs rok ⁻¹)	— celkové náklady na čistírnu při použití kyslíku
$NČ_0$ (10 ³ Kčs rok ⁻¹)	— celkové náklady na čistírnu bez použití kyslíku
NE (F + Č) (10 ³ Kčs rok ⁻¹)	— energetické náklady na fermentační jednotku a čistírnu odpadních vod
NEt (10 ³ Kčs rok ⁻¹)	— náklady na ethanol
NF (10 ³ Kčs rok ⁻¹)	— celkové vybrané náklady na provozní soubor fermentace
NF_0 (10 ³ Kčs rok ⁻¹)	— vybrané náklady na jednu fermentační jednotku
NEK (10 ³ Kčs rok ⁻¹)	— náklady na energie pro kyslíkárnu
NK_{85} (10 ³ Kčs rok ⁻¹)	— výrobní náklady kyslíkárny při koncentraci 85 % O ₂

NK 95,5 (10^3 Kčs rok ⁻¹)	— výrobní náklady kyslíkárny při koncentraci 99,5 % O_2
S_E (kWh N m ⁻³)	— specifická spotřeba elektrického proudu
S_V (m ³ N m ⁻³)	— specifická spotřeba chladicí vody
V (m ³)	— potřebný fermentační objem
V_0 (m ³)	— užitečný objem jednoho fermentoru
W (m ³ rok ⁻¹)	— celkové množství odpadních vod
W_m (m ³)	— množství vody na jedno mytí
W_0 (m ³ rok ⁻¹)	— množství odpadních vod bez použití kyslíku
ΣIN (10^3 Kčs)	— celkové investiční náklady
ΣN (10^3 Kčs rok ⁻¹)	— celkové vybrané náklady
ΣNE (10^3 Kčs rok ⁻¹)	— celkové náklady na energie

Literatura

- [1] EDERER K., MADRON F., ŠTROS F.: Kvasný průmysl 28, 1982, č. 11, s. 248—253.
- [2] Výroba krmných kvasnic ze syntetického etanolu 40 000 t/r Chemoprojekt Praha, 1978
- [3] DOHNÁLEK R.: Projektování a výstavba chemických výroben, SNTL Praha, 1964
- [4] NECHVÁTAL J.: Studie využití čistého kyslíku v ČOV a pro spalování a pyrolýzu odpadů, Hydroprojekt Praha, 1978

Ederer, K. - Madron, F. - Štros, F.: Optimalizace výroby krmných kvasnic při použití vzduchu obohaceného kyslíkem. II. Ekonomická optimalizace. Kvas. prům., 28, 1982, č. 12, s. 271—275.

2. část článku se zabývá ekonomickými důsledky různé koncentrace kyslíku v provětrávacím médiu na kultivaci kvasnic na syntetickém ethanolu.

Эдерер, К., Ф., Штрос, Ф.: Оптимизация производства кормовых дрожжей с применением воздуха обогащенного кислородом. II. Экономическая оптимизация. Квас. prům., 28, 1982, № 12, стр. 271—275.

В первой части настоящей работы (1) была представлена упрощенная математическая модель непрерывного культивирования дрожжей *Candida utilis* в синтетичес-

ком этаноле. Исследовалось влияние концентрации кислорода в проветриваемой среде на удельную продукцию и из этого вытекающее установление нужной величины ферментера для данной мощности.

Вторая часть статьи занимается экономическими следствиями применения разной концентрации кислорода в проветриваемой среде для культивирования дрожжей в синтетическом этаноле.

Ederer, K. — Madron, F. — Štros, F.: Optimization of Fooder Yeast Production Using Air Enriched by Oxygen. II. Economic Optimization. Kvas. prům. 28, 1982, No. 12, p. 271—275.

In the first part of this study (1) a simplified mathematical model of a continuous culture of the yeast *Candida utilis* on synthetic ethanol was described. The effect of oxygen concentration in an aeration gas on the specific production was observed. The results obtained served to an estimation of a volume of the fermenter which was necessary to achieve the desired capacity.

In the second part of the article economic consequences of the effect of different oxygen concentrations in an aeration medium during yeast cultivation on synthetic ethanol are discussed.

Ederer, K. — Madron, F. — Štros, F.: Optimierung der Futterhefeherstellung bei Anwendung mit Sauerstoff angereicherter Luft . . . II. Ökonomische Optimierung. Kvas. prům. 28, 1982, Nr. 12, S. 271—275.

In dem ersten Teil dieser Arbeit (1) wurde ein vereinfachtes mathematisches Modell der kontinuierlichen Kultivation der Hefe *Candida utilis* auf synthetischem Äthanol präsentiert. Es wurde der Einfluß der Sauerstoffkonzentration im Belüftungs-Medium auf die spezifische Produktion und die entsprechende Ermittlung der benötigten Fermentorgröße für die gegebene Kapazität verfolgt.

Der zweite Teil des Artikels befaßt sich mit den ökonomischen Auswirkungen der verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen in Durchlüftungsmedium auf die Kultivation der Hefe auf synthetischem Äthanol.