

Konstrukce a ověření chování věžového více- stupňového fermentoru

663.52.033

Ing. JAN PÁČA, CSc., VŠCHT, katedra kvasné chemie a technologie, Praha

Do redakce došlo 20. září 1976

1. Úvod

V průběhu posledních deseti let se několik pracovišť ve světě začalo zabývat výzkumem věžových více-
stupňových fermentorů. Důvody, které motivovaly přechod od
klasických typů fermentorů na tyto systémy souvisí s po-
žadavky kladenými na aerobní kultivační procesy z hle-
diska dosažení žádané kvality produktu.

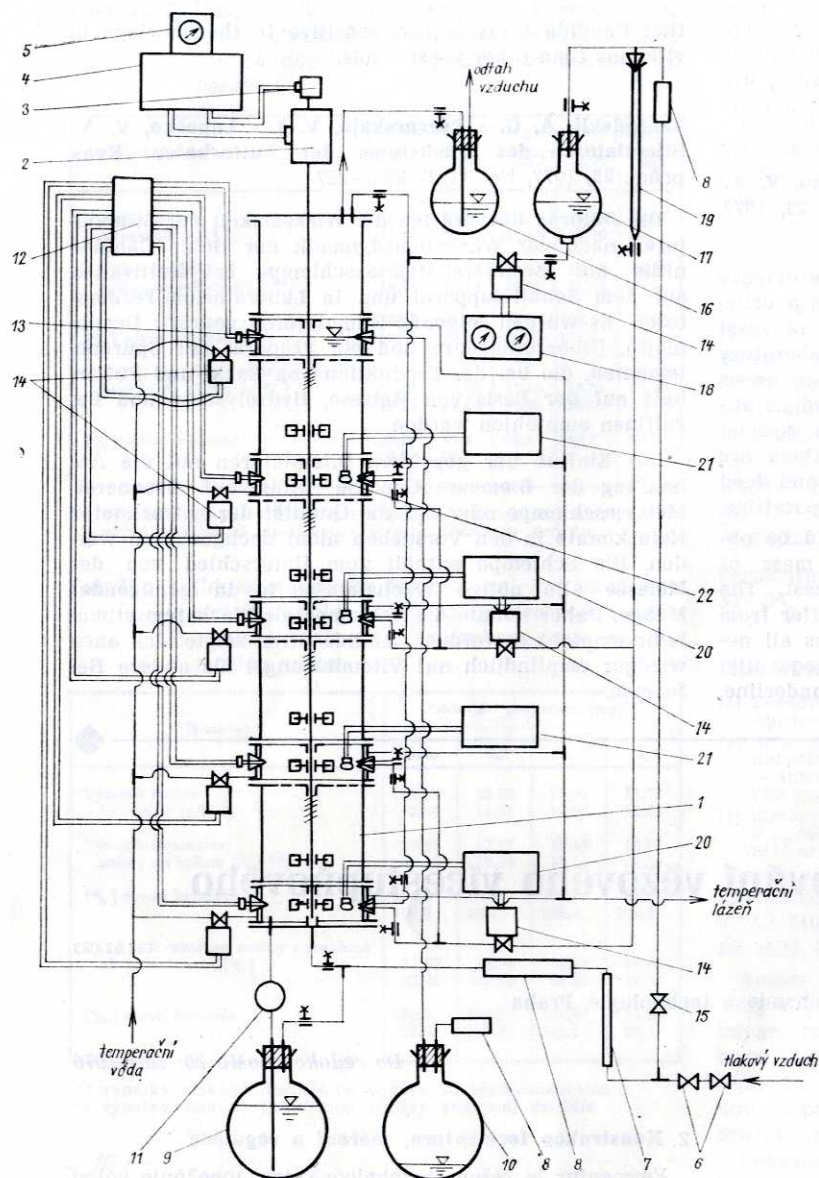
Převážná část prací byla zaměřena na věžový více-
stupňový systém s perforovanými přepážkami bez mechanic-
kého míchání [1—6]. Výzkumem věžových fermentorů
bez perforovaných přepážek se zabývali *Smith* a *Green-
shields* [7] a *Akiba* a *Fukimbara* [8]. Uvedené systémy
bez mechanického míchání vykazovaly určité nevýhody,
a to velkou spotřebu aeračního vzduchu pro dosažení
dostatečné rychlosti přenosu kyslíku a sedimentace bu-
něk. Aby se vyhnuli zmíněným nevýhodám, použili *Falch*
a *Gaden* [9] věžového více-
stupňového fermentoru s per-
forovanými přepážkami a mechanickým mícháním.
Vzhledem ke konstrukci však zvolili protiproudé uspo-
řádání toku kapalné a plynné fáze, což vedlo k limitaci
vstupní koncentrace zdroje uhlíku a energie, aby ne-
došlo k přechodu na anaerobní podmínky procesu.

Na katedře kvasné chemie a technologie VŠCHT v Pra-
ze je od roku 1973 v provozu laboratorní věžový více-
stupňový fermentor odlišné konstrukce než jsou výše
uvedené. Jeho popis a provozní vlastnosti jsou obsahem
této práce.

2. Konstrukce fermentoru, měření a regulace

Fermentor je řešen stavebnicově, tzn. umožňuje volbu
počtu stupňů v rozsahu od dvou do deseti. V základním
uspořádání je použito pěti stupňů. Stupeň se skládá ze
skleněného válce a mezikusů z nerezavějícího materiálu,
který je opatřen duplikátorem pro temperaci a tubusy
pro umístění elektrod, odběr vzorků, přidávání živin, pre-
kursorů, event. kyslíku či dusíku. Spodní čtyři stupně
jsou reakční, horní stupeň je přepadový a slouží sou-
časně jako pěnový prostor. V každém reakčním stupni
jsou na hřídeli umístěna dvě disková turbínová míchad-
la a čtyři míchací zarážky. Jednotlivé stupně jsou spojeny
běžnými přírubovými spoji. Vzájemné oddělení stupňů je
provedeno perforovanými přepážkami s určitým geo-
metrickým uspořádáním otvorů. Geometrické parametry
reakčních stupňů jsou: vnitřní průměr fermentoru
106 mm, průměr míchadel 50 mm, výška stupně 175 mm.
Systém je navržen pro souprroudé uspořádání toku ka-
palné a plynné fáze, může však pracovat i protiproud-
ně. Aby bylo možno fermentor sterilovat přímou párou
in situ, byly ke konstrukci použity materiály: sklo Si-
max, nerezavějící ocel třídy 17 347 a těsnění ze silikono-
vé pryže.

Schéma fermentoru včetně celkového zapojení pro
kultivační procesy je uvedeno na obr. 1. Živné médium
i vzduch se přivádějí do spodního stupně. Přívod vzdu-
chu je zaveden do radiálního ložiska hřídele umístěného
na spodním víku, což zabraňuje vzniku mrtvého prosto-



Obr. 1. Schéma zapojení věžového fermentoru

- 1 — fermentor
- 2 — elektromotor
- 3 — tachodynamo
- 4 — tyristorový regulátor
- 5 — voltmetr pro měření otáček
- 6 — automatický expanzní ventil
- 7 — rotametr
- 8 — filtr na vzduch
- 9 — zásobník živné půdy
- 10 — sběrná nádoba
- 11 — peristaltické čerpadlo
- 12 — regulátor teploty
- 13 — regulační teploměr
- 14 — solenoidový ventil
- 15 — jehlový regulační ventil
- 16 — kapalinový uzávěr
- 17 — zásobník odpěňovací látky
- 18 — časové relé
- 19 — byreta na louh nebo kyseliny
- 20 — pH-regulátor
- 21 — pH-metr
- 22 — pH-elektroda

3.3 Mezistupňový zpětný tok

Je definován jako poměr zpětného toku perforovanou přepážkou k přítoku živného média do fermentoru

$$\alpha = \frac{F'}{F} \quad (2)$$

Byl určen dynamickou metodou z odezvy na vnesený signál ve formě Diracovy funkce do 3. stupně [10]. Měření bylo provedeno konduktometricky, stopovací látkou byl roztok KCl, snímání odezvy bylo prováděno ve 3. a 2. stupni. Koeficient mezistupňového zpětného toku byl vypočten z poměru ploch pod odezвовými křivkami ze vztahu

$$\frac{\alpha_i}{1 + \alpha_i} = \frac{\int_0^{\infty} C_{i-1} dt}{\int_0^{\infty} C_i dt} \quad (3)$$

kde C je koncentrace stopovací látky [$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$],

i — stupeň fermentoru,

t — čas [s].

3.4 Distribuce střední doby zdržení

Charakter toku ve fermentoru byl určen metodou vzruchu a odezvy. Stopovací látkou byl opět roztok KCl, odezva se snímala konduktometricky. K vyhodnocení byl použit model ideálně míchaných tanků v sérii [11].

3.5 Rychlost přenosu kyslíku

Byla určena sifichitanovou metodou [12].

4. Výsledky a diskuse

4.1 Hydrodynamické chování systému

Dříve, než lze přikročit ke kultivačním pokusům, bylo nutno ověřit hydrodynamické chování systému.

Tlakový gradient

Tlaky v jednotlivých stupních fermentoru závisí na hydrostatickém tlaku disperze vzduchu v kapalně fázi a na tlakové ztrátě perforované přepážky. Tlaková ztráta přepážky je funkcí velikosti aerace zředovací rychlosti, geometrie přepážky a dynamických účinků proudu ka-

ru a zlepšuje čištění tohoto ložiska. Nakultivovaná suspenze buněk odchází přepadem z horního stupně, plyná fáze je odváděna horním víkem přes kapalinový uzávěr.

Každý stupeň je opatřen samostatnou regulací teploty, pH, pění, tenze kyslíku a dávkování živin. Pohon míchadel je proveden stejnosměrným motorem s derivačním vinutím, regulaci frekvence otáčení míchadel umožňuje tyristorový regulátor.

3. Metodika

3.1 Tlakový gradient fermentoru

Tlaky byly měřeny v jednotlivých stupních U-manometry.

3.2 Plynová zádrž

Plynová zádrž je definována jako poměr objemu plynu k celkovému objemu jednoho stupně nebo celého fermentoru

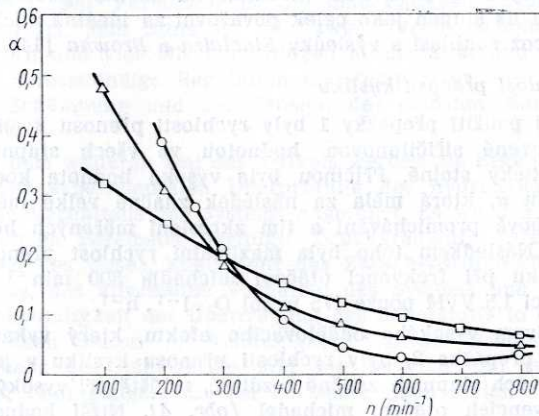
$$\varepsilon = \frac{V_g}{V_c} \quad (1)$$

paliny působených míchadlem. Dynamické účinky proudu kapaliny závisejí na umístění míchadel ve stupni, čímž ovlivňují zpětný a dopředný tok kapalné fáze přepážkou. Tlaky byly měřeny za podmínek obvykle používaných při kultivaci mikroorganismů: aerace v rozsahu 0–1,5 VVM (objem plynu na objem kapalné náplně za minutu) a v rozsahu zředovací rychlosti 0,1–1,8 h⁻¹. Bylo zjištěno, že za těchto podmínek jsou tlaky ve všech stupních konstantní, což souhlasí s výsledky zjištěnými u destilačních kolon, kde pro fiktivní rychlost plynu v rozsahu 1–5 cm.s⁻¹ jsou tlakové ztráty na patrech zanedbatelné [5].

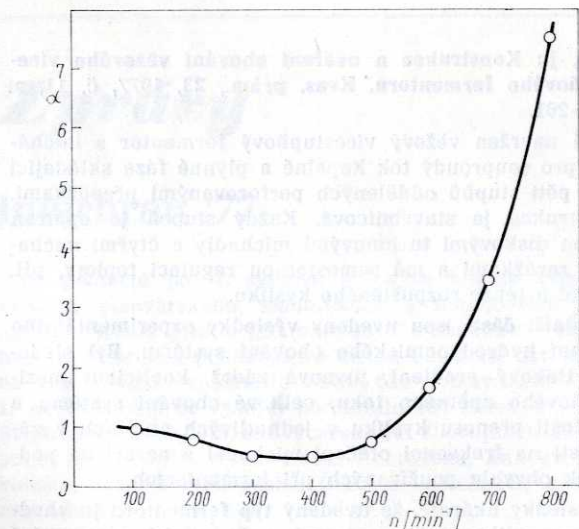
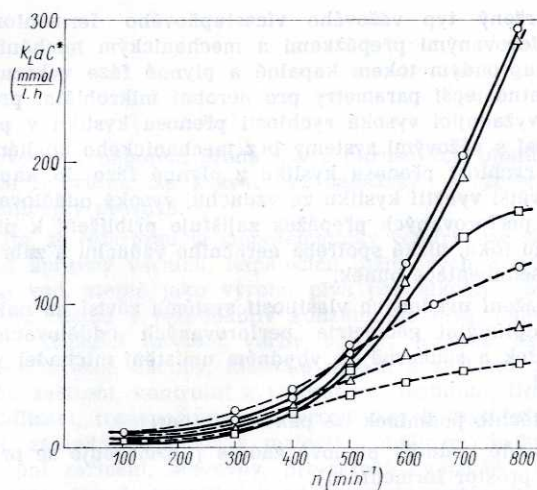
Plynová zádrž

Je významným parametrem k posouzení velikosti pracovního objemu věžového fermentoru. Zádrž plynu v tomto systému se skládá z plynu dispergovaného v kapalině a na rozdíl od konvenčního typu fermentoru ještě z vrstvy plynu pod perforovanou přepážkou. Množství dispergovaného plynu závisí hlavně na frekvenci otáčení míchadel a velikosti aerace. Výška vrstvy plynu nahromaděného pod přepážkou je funkcí tlakové ztráty přepážky, tzn. závisí na geometrii přepážky a velikosti aerace. Vzhledem k nízkým hodnotám zředovací rychlosti

pážka 1, s průměrem otvorů 2 mm a plochou otvorů vztahenou na celkový průřez věže 9,97 % vykazovala při zředovací rychlosti 0,6 h⁻¹ a aeraci 1,5 VVM závislost uvedenou na obr. 2. Minimální hodnoty α bylo dosaženo zhruba při frekvenci otáčení míchadla 300 min⁻¹. S dalším růstem otáček pak prudce vzrůstal koeficient α , což je nežádoucí z hlediska aplikace při aerobních procesech vyžadujících vysoké rychlosti přenosu kyslíku.



Obr. 3. Průběh koeficientu zpětného toku v závislosti na frekvenci otáčení míchadel pro přepážky 2 při zředovací rychlosti 0,6 h⁻¹ a aerace: o — 0,5 VVM, Δ — 1 VVM, \square — 1,5 VVM



Obr. 2. Průběh koeficientu zpětného toku v závislosti na frekvenci otáčení míchadel při aeraci 1,5 VVM a zředovací rychlosti 0,6 h⁻¹ pro přepážky 1

lze tuto veličinu zanedbat. Experimentálně bylo ověřeno několik typů přepážek v rozsahu parametrů shodném s výše uvedeným. Při nízkých intenzitách míchání (do 300 min⁻¹), kdy míchadla plní funkci distributorů vzduchu, ovlivňuje zádrž jen velikost aerace a celková plocha otvorů v přepážce. Při vyšších intenzitách míchání (nad 300 min⁻¹), vzrůstá plynová zádrž. Tento vzrůst souvisí se změnou proudění kapalné fáze ve stupni, tzn. s velikostí zpětného a dopředného mezistupňového toku, který je funkcí průměru otvorů a jejich umístění na určitém mezikruží v přepážce a kromě toho i na vektoru rychlosti proudu kapaliny nad perforovanou částí přepážky [13]. Porovnání výsledků zjištěných u optimálního návrhu přepážky ($\varepsilon = 4 - 15\%$) s výsledky Kitaie [1] a Falcha [9] ukazuje, že zádrž u optimálního návrhu přepážky je značně nižší, což je důležité z hlediska využití pracovního objemu fermentoru.

Mezistupňový zpětný tok

Je jedním z nejdůležitějších parametrů charakterizujících provoz věžového vícestupňového fermentoru. Přepážka 1, s průměrem otvorů 2 mm a plochou otvorů vztahenou na celkový průřez věže 9,97 % vykazovala při zředovací rychlosti 0,6 h⁻¹ a aeraci 1,5 VVM závislost uvedenou na obr. 2. Minimální hodnoty α bylo dosaženo zhruba při frekvenci otáčení míchadla 300 min⁻¹. S dalším růstem otáček pak prudce vzrůstal koeficient α , což je nežádoucí z hlediska aplikace při aerobních procesech vyžadujících vysoké rychlosti přenosu kyslíku.

Obr. 4. Rychlost přenosu kyslíku jako funkce frekvence otáčení míchadel pro přepážky 2 v prvním stupni (—) a ve čtvrtém stupni (---) při aeraci: \square 0,5 VVM, Δ — 1 VVM, o — 1,5 VVM

Při použití optimálně navržené přepážky 2 s průměrem otvorů 1,6 mm a plochou otvorů 2 % byly zjištěny zcela odlišné výsledky (obr. 3), kdy se vzrůstem frekvence otáčení míchadel klesala hodnota α . Je tedy zřejmé, že tento typ přepážek je vhodný pro použití při aerobních procesech.

Z podrobné analýzy výsledků bylo zjištěno, že pro dosažení minimální hodnoty je třeba dodržet určité limitní minimum velikosti aerace.

Distribuce střední doby zdržení

Celkové hydrodynamické chování věžového vícestupňového fermentoru bylo vypočteno z modelu kaskády tanků v sérii. Měření s oběma typy perforovaných přepážek byla provedena při minimálních hodnotách koeficientu α . Při použití přepážek 1 odpovídal systém 4 reakčních stupňů chování 3,7 ideálně míchaných tanků v sé-

rii. S přepážkami 2 vykazoval systém chování 6,5 ideálně míchaných tanků v sérii, což je více než skutečný počet reakčních stupňů. Toto chování vyplývá z charakteru proudění kapaliny v jednotlivých stupních, kdy při vyšších aeracích dvě radiální míchadla rozdělují stupeň do 3 zón. I přes značně vysokou výměnu hmoty mezi zónami vzniká zřejmě koncentrační gradient ve stupni, což má za následek větší počet teoretických stupňů zjištěných z použitého modelu. Za těchto podmínek nelze již stupeň jako celek považovat za ideálně míchaný, což souhlasí s výsledky *Sinclaira* a *Browna* [14].

Rychlost přenosu kyslíku

Při použití přepážky 1 byly rychlosti přenosu kyslíku stanovené srovnávací hodnotou ve všech stupních prakticky stejné. Příčinou byla vysoká hodnota koeficientu α , která měla za následek značně velké mezistupňové promíchávání a tím zkreslení měřených hodnot. Následkem toho byla maximální rychlost přenosu kyslíku při frekvenci otáčení míchadla 800 min^{-1} a aeraci $1,5 \text{ VVM}$ pouze $175 \text{ mmol O}_2 \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$.

Vlivem vysokého oddělovacího efektu, který vykazovala přepážka 2, byly rychlosti přenosu kyslíku v jednotlivých stupních značně rozdílné, zvláště při vysokých frekvencích otáčení míchadel (obr. 4). Nižší hodnoty rychlosti přenosu kyslíku ve vyšších stupních vyplývají z poklesu hnací síly přenosu hmoty, způsobené vyčerpáním kyslíku ze vzduchu.

4.2 Shrnutí výsledků

Navržený typ věžového více-
stupňového fermentoru s perforovanými přepážkami a mechanickým mícháním se souproutým tokem kapalné a plynné fáze vykazuje podstatně lepší parametry pro aerobní mikrobiální procesy vyžadující vysoké rychlosti přenosu kyslíku v porovnání s věžovými systémy bez mechanického míchání: větší rychlost přenosu kyslíku z plynné fáze do kapaliny, větší využití kyslíku ze vzduchu, vysoký oddělovací efekt perforovaných přepážek zajišťuje přiblížení k pístovému toku, nízká spotřeba aeračního vzduchu a zabránění sedimentace buněk.

Dosažení uvedených vlastností systému závisí na nalezení optimální geometrie perforovaných oddělovacích přepážek a současně na vhodném umístění míchadel ve stupni.

Za těchto podmínek lze pak dosáhnout:

- a) malé hodnoty plynové zadržky (nezmenšuje se pracovní prostor fermentoru),
- b) v rozsahu používaných aerací a zředovacích rychlostí je tlaková ztráta přepážek konstantní (týká se přírodního tlaku aeračního vzduchu),
- c) s růstem frekvence otáčení míchadel a aerace klesá hodnota mezistupňového promíchávání.

Všechny uvedené body zahrnují důležité ekonomické aspekty, které je třeba uvažovat při konstrukci a volbě vhodného typu fermentoru pro požadovaný typ fermentačního procesu.

4.3 Aplikace věžového více- stupňového fermentoru s mechanickým mícháním

Kromě studia základních otázek obecné mikrobiologie se ukazuje vhodná aplikace tohoto typu fermentoru v porovnání s konvenčním míchaným fermentorem pro:

1. technologie vyžadující zpracování vysoce koncentrovaných substrátů bez nutnosti většího zředování, což znamená úsporu technologické vody,
2. zpracování tekavých substrátů např. syntetického, drožděnského nebo sulfitového alkoholu jakožto jediného zdroje uhlíku a energie nebo ve směsi se sulfi-

tovými výluhy, hydrolyzáty dřevné hmoty, celulózy, syrovátkou, melasou a jinými kapalnými odpady.

Literatura

- [1] KITAI, A. - TONE, H. - OZAKI, A.: *Biotechnol. Bioeng.*, **11**, 1969, s. 911
- [2] PROKOP, A. - ERICKSON, L. E. - FERNANDEZ, J. - HUMPHREY, A. E.: *Biotechnol. Bioeng.*, **11**, 1969, s. 945
- [3] KITAI, A. - YAMAGATA, T.: *Proc. Biochem.*, **5**, 1970, č. 11, s. 52
- [4] SHORE, D. T. - ROYSTON, M. G.: *Chem. Eng. (London)*, 1968, č. 218, s. 99
- [5] KITAI, A. - OKAMOTO, R. - OZAKI, A.: *Proc. IV IFS: Ferment. Technol. Today*, Tokyo 1972, s. 147
- [6] GOTO, S. - KITAI, A. - OZAKI, A.: *J. Ferment. Technol.*, **51**, 1973, č. 8, s. 582
- [7] SMITH, E. L. - GREENSHILDS, R. N.: *Adv. Microb. Engng.*, Part 1 (Eds. B. Sikyta, A. Prokop, M. Novák), Interscience Publ., New York 1973, s. 519
- [8] AKIBA, T. - FUKIMBARA, T.: *J. Ferment. Technol.*, **51**, 1973, č. 2, s. 134
- [9] FALCH, E. A. - GADEN, E. L.: *Biotechnol. Bioeng.*, **11**, 1969, s. 927
- [10] PŘENOSIL, J. - NOVOSAD, Z.: *Coll. Czech. Chem. Comm.*, **33**, 1968, s. 376
- [11] LEVENSPIEL, O.: *Teorie a výpočty chemických reaktorů*. SNTL, Praha, 1976, s. 288
- [12] YOSHIDA, F. - AKITA, K.: *A. I. Ch. E. J.*, **11**, (1965), s. 9
- [13] ČSSR Přihláška vynálezu 4677-75
- [14] SINCLAIR, C. G. - BROWN, D. F.: *Biotechnol. Bioeng.*, **12**, 1970, s. 1001

**Páca, J.: Konstrukce a ověření chování věžového více-
stupňového fermentoru. Kvas. prům., 23, 1977, č. 11, s. 257—261.**

Byl navržen věžový více-
stupňový fermentor s mícháním pro souproutý tok kapalné a plynné fáze skládající se z pěti stupňů oddělených perforovanými přepážkami. Konstrukce je stavebnicová. Každý stupeň je opatřen dvěma diskovými turbínovými míchadly a čtyřmi míchacími zarážkami a má samostatnou regulaci teploty, pH, pění a tenze rozpuštěného kyslíku.

V další části jsou uvedeny výsledky experimentálního ověření hydrodynamického chování systému. Byl sledován tlakový gradient, plynová zadrž, koeficient mezistupňového zpětného toku, celkové chování systému a rychlosti přenosu kyslíku v jednotlivých stupních v závislosti na frekvenci otáčení míchadel a aeraci za podmínek obvykle používaných při fermentacích.

Výsledky ukázaly, že uvedený typ fermentoru je vhodný pro aplikaci při procesech vyžadujících zpracování vysoce koncentrovaných substrátů a tekavých substrátů.

Паца, Я.: Конструкция и свойства многоэтажного бродильного аппарата. Квас. прум. 23, 1977, № 11 стр. 257—261.

Был сконструирован многоэтажный бродильный аппарат, характеризованный агрегатной конструкцией, спутным потоком жидкой и газовой фаз и механической системой перемешивания. Аппарат состоит из пяти этажей, отделенных друг от друга дырчатыми перегородками. На каждом этаже предусмотрены две дисковые турбинные мешалки и дополнительные устройства для интенсификации перемешивания.

Гидродинамические свойства нового аппарата изучались экспериментально, причем определялись следующие величины: градиент давления, проход газов, коэффициент обратного течения между этажами, скорость переноса кислорода в отдельных этажах и ее зависимость от интенсивности перемешивания и аэрации. Эксперименты проводились в условиях обычных для бродильных установок. Результаты показали, что ферментер можно рекомендовать для процессов, где требуется обработка сильно концентрированных или летучих субстратов.

Páca, J.: Design and Properties of a New Multi-stage Tower Fermenter. Kvas. prům., 23, 1977, No. 11, pp. 257—261.

A new multi-stage tower fermenter, which has been recently developed, is characterized by unit construction, parallel flow of liquid and gaseous phases and mechanical mixing system. It consists of five stages separated by perforated plates. Each stage is fitted with two disc type turbine impellers and auxiliaries intensifying mixing. Temperature, pH, foaming and tension of dissolved oxygen are regulated in each of the stages individually.

A series of experiments have been carried out to evaluate hydrodynamic behaviour of the system and to study its components, i. e. pressure gradient, gas holdup efficiency, coefficient of back flow between stages, oxygen transfer rate in various stages and its relation to the impeller speeds and aerating conditions. Experiments were carried out under normal conditions typical for fermentation industry.

The results show, that the new fermenter is suitable for processing both highly concentrated and volatile substrates.

Páca, J.: Konstruktion und Überprüfung des Verhaltens des mehrstufigen Turmfermentors. Kvas. prům. 23, 1977, No. 11, S. 257—261

Es wurde ein mehrstufiger Turmfermentor mit mechanischer Mischung für gleichströmigen Fluß der flüssigen und gasförmigen Phase entworfen, der aus fünf durch perforierte Scheidewände abgetrennten Stufen besteht. Der Fermentor ist auf dem Baukasten-System konstruiert. Jede Stufe ist mit zwei Turbine-Scheibenrührern und vier Mischanschlägen ausgestattet und hat eine selbstständige Regulation der Temperatur, des pH, der Schäumung und der Tension des gelösten Sauerstoffs.

In dem weiteren Teil des Artikels werden die Ergebnisse der experimentalen Überprüfung des hydrodynamischen Verhaltens des Systems angeführt. Es wurden die folgenden Parameter verfolgt: Druckgradient, Zurückhalten des Gases, Koeffizient des Zwischenstufen-Rückflusses, das allgemeine Verhalten des Systems und die Geschwindigkeit der Übertragung des Sauerstoffs in den einzelnen Stufen in Abhängigkeit von der Drehungsfrequenz des Rührwerkes und der Aeration und zwar unter Bedingungen, die bei Fermentationen üblich sind.