

# Bioreaktory

579.16  
663

## III. Speciální reaktory s mechanickým mícháním

Ing. JAN PÁCA, CSC., Vysoká škola chemickotechnologická, katedra kvasné chemie a bioinženýrství, Praha

**Klíčová slova:** biotechnologie, reaktor, fermentor, rozdělení, typ, vícestupňové reaktory, vibrační míchání, reaktor pracující při podtlaku, reaktor s rotujícími disky, bubnový reaktor, princip, snížený tlak

### VÍCESTUPŇOVÉ REAKTORY

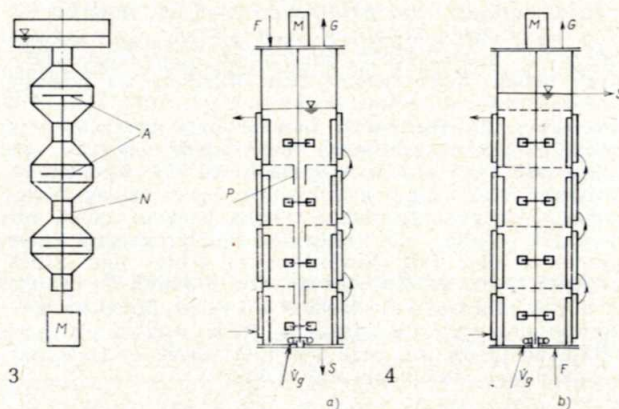
Vícestupňové reaktory lze rozdělit do dvou skupin podle způsobu vzájemného oddělení jednotlivých stupňů, které se kvantitativně popisuje hodnotou tzv. zpětného toku, resp. mezistupňového promíchávání.

Do první skupiny řadíme reaktory s malým oddělovacím efektem mezi stupni, tzn. s vysokou hodnotou zpětného toku. Patří sem **vícestupňový reaktor, model S, firmy Chemap A. G.** (obr. 1) pocházející z r. 1969. Jde o kombinaci reaktoru s násobnými míchadly a reaktoru s vnitřní cirkulací. Turbinová míchadla B vyvozují vysoké střížné síly. Účinek střížných sil od míchadel se ještě zvyšuje průtokem média malými (emulgačními) otvory v rovině míchadel. Cirkulaci kapalného média zajišťuje míchadlo A. Výhody: násobná míchadla zajišťují jak opakovanou dispergaci bublin, tak i emulgaci v případě použití nemísitelných kapalin. Cirkulační míchadlo zajišťuje eliminaci sedimentace tuhé fáze s vyššími hodnotami měrné hmotnosti. Proto je tento typ reaktoru vhodný pro suspenzní média. Původně byl emulgační efekt navrhován pro utilizaci n-alkanů mikroorganismy. Cirkulační trubky lze využít i jako přídavné teplosměnné plochy, kromě vnějšího pláště reaktoru.

Jiným typem vícestupňového reaktoru s velkým zpětným tokem je **věžový vícestupňový reaktor s vnější cirkulací** (obr. 2), [1]. Opět se jedná o kombinaci dvou typů reaktorů a to reaktoru s násobnými míchadly a tubulárního cirkulačního reaktoru. Pro dosažení určitého oddě-

lovacího efektu jsou v reaktoru instalovány horizontální oddělovací přepážky B. Díky jim se zde dosahuje vyššího oddělovacího efektu než u předchozího typu. Výhody tohoto reaktoru spojují v sobě výhody obou jednotlivých typů. Z hlediska vzájemného toku fází se u obou reaktorů této skupiny jedná o souprouté uspořádání.

Dalším typem vícestupňového reaktoru s velkým zpětným tokem je **věžový reaktor s diskovými míchadly podle autorů Brauer a Schmidt-Traub** (obr. 3) [2]. Reaktor je třístupňový. Každý se skládá z válcové a dvou kuželových částí s válcovými nástavci. Středem prochází hřídel opatřená v každém stupni diskovým míchadlem, které je na svém okraji perforováno. Otvory v disku slouží k tvorbě jemné disperze při malé spotřebě energie. V reakční části stupně dochází tedy k intenzivnímu míchání všech fází. Zúžené válcové nástavce slouží k vyvolání určitého separačního efektu mezi stupni. Tento aparát lze použít k provádění aerobních mikrobiálních procesů.

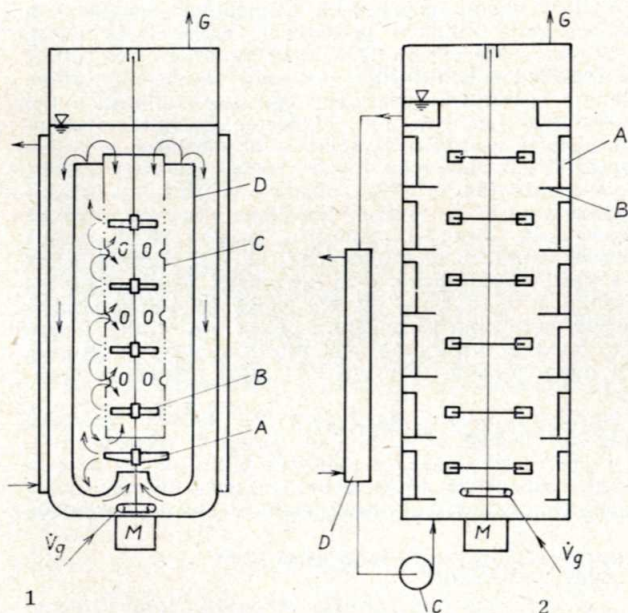


Obr. 3. Věžový třístupňový reaktor s diskovými míchadly. A — diskové míchadlo, M — motor, N — válcový nástavec.

Obr. 4. Věžové vícestupňové reaktory s perforovanými přepážkami.

a) Protiproudé uspořádání.  
b) Souprouté uspořádání.  
F — přítok média, G — odvod plynů, M — motor, P — přepážka, S — odtok buněčné suspenze, V<sub>g</sub> — přívod vzduchu.

Druhou skupinu vícestupňových reaktorů tvoří systémy s vysokým oddělovacím efektem mezi jednotlivými stupni, tzn. systémy s malým zpětným tokem. Jsou to **věžové vícestupňové reaktory s perforovanými přepážkami** oddělujícími jednotlivé stupně (obr. 4). Tyto systémy jsou vhodné pro kontinuální procesy, protože se v nich snažíme přiblížit ke dvěma protichůdným požadavkům: 1. ideálnímu míchání ve stupni, 2. pístovému toku tubulárním systémem. K dosažení prvního požadavku slouží turbínové míchadlo v každém stupni a přiblížení ke druhému požadavku závisí na návrhu perforované přepážky, který ovlivňuje hodnotu zpětného toku. Možné způsoby uspořádání toku jsou uvedeny na obr. 4. Výhodou u protiproudého uspořádání (3) je vyšší střední hodnota koncentračního gradientu. Nevýhodou je limitace zdrojem uhlíku a energie ve spodním stupni, kde je nejvyšší obsah kyslíku v aeračním plynu. Naopak v horním stup-



Obr. 1. Vícestupňový reaktor, model S, firmy Chemap A. G. Männedorf, Švýcarsko (s vnitřní cirkulací).

A — cirkulační míchadlo, B — otevřená disková turbína, C — trubka s emulgačními a sacími otvory, D — cirkulační trubka, G — odvod plynů, M — motor, V<sub>g</sub> — přívod vzduchu.

Obr. 2. Věžový vícestupňový reaktor s vnější cirkulací.

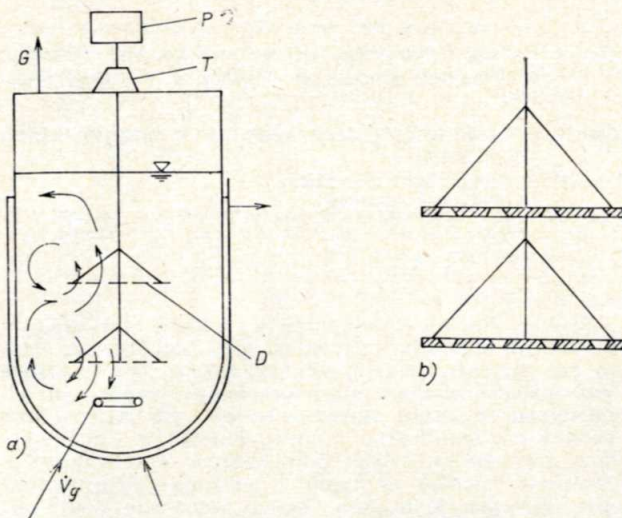
A — míchací narážky, B — oddělovací přepážky stupňů, C — cirkulační čerpadlo, D — výměník tepla, G — odvod plynů, M — motor, V<sub>g</sub> — přívod vzduchu.

ni s největším obsahem zdroje uhlíku a energie dochází k limitaci růstu kyslíkem. Souprůdné uspořádání toku odstraňuje uvedené nevýhody protiprůdného uspořádání (4). Další výhody tohoto typu reaktoru: malá spotřeba aeračního vzduchu a možnost přidávání malého množství čistého kyslíku (5, 6) do vyššího stupně (eliminace limitace kyslíkem, vysoké procento využití kyslíku ze vzduchu (opakovaná dispergace bublin nejen míchadly, ale i při průtoku otvory přepážek), eliminace sedimentace tuhé fáze a zkratového toku, dosažení vysoké koncentrace sušiny biomasy ve výtoku z reaktoru (úspora na separaci) nástřikem zdroje uhlíku a energie do několika stupňů (zabránění substrátové inhibice) (7), stabilní provoz při vysokých zředovacích rychlostech a při použití inhibičního substrátu (trvalá reinokulace malým zpětným tokem) (8) a možnost zpracování těkavých substrátů (methan, methanol, ethanol atd.) při minimálních ztrátách úletem. Nevýhody: složitá konstrukce, a proto větší poruchovost v provozu a obtížné čištění.

Extrémním případem této skupiny reaktorů je kaskáda míchaných reaktorů v sériovém zapojení. Při tomto uspořádání je hodnota zpětného toku nulová.

### REAKTORY S VIBRAČNÍM MÍCHÁNÍM

Při tomto způsobu míchání se energie kapalině předává jedním nebo dvěma kotouči umístěnými na společné ose, která vykonává axiální pohyb (obr. 5). Kmitavý pohyb je realizován elektromagnetem, amplituda je 0,1 až 3 mm, frekvence kmitů je 50 Hz. Pro dosažení čerpacího efektu a tím poněkud usměrněného proudění v reaktoru jsou otvory v kotoučích provedeny ve tvaru kuželu. Výhody: utěsnění osy membránou znamená zajištění vysoce aseptických podmínek, malé střižné síly v kapalině, proto se s úspěchem používá při kultivacích tkáňových buněk, které nemusí růst připojeny na povrchu nosiče (provozní velikost reaktoru 100 l, firma Monsanto Co., USA) [9], dostatečná čerpací kapacita zabraňuje shlukování tkáňových buněk, resp. sedimentaci tuhé fáze. Lze použít také pro imobilizované enzymy nebo buňky. Výhodou tohoto typu reaktoru pro vázané buňky je dostatečná dodávka kyslíku aerobním buňkám, dobrá homogenita obsahu a tím i aktivních buněk a snadný odvod produkovaného  $\text{CO}_2$ . Nevýhodou je velký otěr buněk z nosičů a tím jejich vyplavování z reaktoru. Nevhodné jsou pro procesy, kde dochází k inhibici kinetiky procesu produktem. Další nevýhodou je, že je zatím omezeno příkonem pouze pro reaktory o celkovém objemu 5 m<sup>3</sup> (vhodné také jako inokulační reaktory).

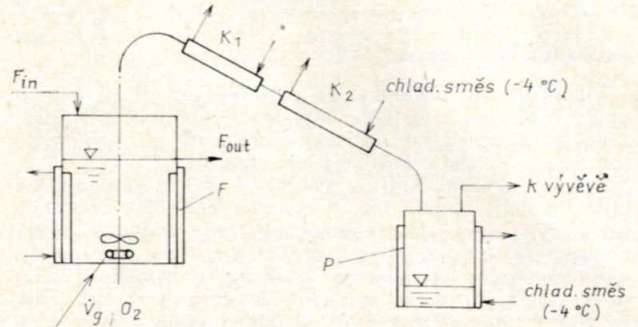


Obr. 5. VIBRO — reaktor firmy Chemap A. G., Männdorf, Švýcarsko.

- a) Uspořádání reaktoru.  
b) Způsob provedení otvorů v discích.  
D — děrovaný disk, G — odvod plynů, P — elektromagnetický pohon, T — vedení a utěsnění tyče, V<sub>g</sub> — přívod vzduchu,

### REAKTOR PRACUJÍCÍ ZA SNÍŽENÉHO TLAKU

Reaktoru pracujícího za sníženého tlaku lze s výhodou použít pro kontinuální produkci ethanolu [10]. Schéma zapojení tzv. VACUFERM procesu je na obr. 6. Reaktor je opatřen míchadlem a distributorem plynu. Plyny včetně par ethanolu se přes dva chladiče odsávají do sběrné nádoby na produkt, která je napojena na vývěvu.



Obr. 6. Reaktor pracující za sníženého tlaku (VACUFERM proces).

F — reaktor F<sub>in</sub> — přítok živného média, F<sub>out</sub> — odtok prokvašeného média, P — sběrná nádoba na produkt, K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> — chladiče, V<sub>g</sub> — přívod vzduchu, resp. O<sub>2</sub>.

Ke chlazení v chladiči K<sub>2</sub> a v předloze se používá chladicí směsi o teplotě -4°C. Po 12 až 16 h vsádkové kultivaci nutné pro nárůst biomasy se uzavře přívod vzduchu do reaktoru. Pomalu se snižuje tlak [3,33 kPa . min<sup>-1</sup>] a zahájí se aerace kyslíkem  $\dot{V}_{\text{O}_2} = 0,12 \text{ VVM}$  (objem plynu vztažený na objem kapalného média za minutu). Snížený tlak se udržuje na hodnotě odpovídající varu při 30 až 35°C.

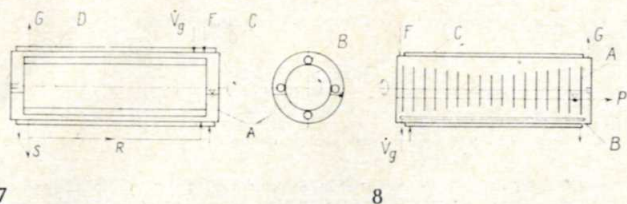
Výhody tohoto uspořádání: Odsáváním par ethanolu se eliminuje inhibice produktem. Koncentrace cukru v přítoku může být až 50%. Doba prokvašení se přitom ve srovnání s konvenčním procesem zkracuje na jednu třetinu. To vede ke značnému zmenšení velikostí a tím i cen nejen reaktoru, ale i čerpadel, zásobníků, výměníků tepla a destilačních kolon a k podstatně menšímu množství odpadní vody (menší ředění melasy). Vysoká koncentrace [16 až 20%] ethanolu v produktu. Aerace kyslíkem v průběhu kvašení umožňuje eliminaci přísadky ergosterolu, kyseliny olejové a Tweenu 80 do média (nutné za anaerobních podmínek) [11]. K separaci buněk lze použít odstředivky nebo usazovák. Místo přidávání kyslíku do reaktoru a vracení buněk lze použít předřazeného aerobního propagátoru buněk pro trvalou inokulaci reaktoru, ve kterém pak proces probíhá anaerobně. Při tomto procesu se ušetří 7% tepla nutného k destilaci.

Nevýhody tohoto uspořádání: Při kolísání podtlaku médium značně pění (nutno přidávat odpěňovadlo). V reaktoru se akumulují netěkavé látky — řeší se částečným neustálým odběrem prokvašeného média. Vytvořený  $\text{CO}_2$  musí být komprimován až na atmosférický tlak.

### HORIZONTÁLNÍ TUBULÁRNÍ REAKTORY

Jsou to reaktory se šetrným mícháním. První z těchto typů je uveden na obr. 7 [12]. Charakter toku se v tomto reaktoru přibližuje pístovému toku. Uspořádání toku kapalina-plyn může být souprůdné i protiprůdné. Pro dosažení ustáleného stavu je nutno recyklovat část média s buňkami. Frekvence otáčení válce je kolem 13 min<sup>-1</sup>. Při vyšších otáčkách médium silně pění. Reaktor lze použít pro vsádkové i kontinuální procesy, které vyžadují velmi mírné míchání.

Dalším typem je reaktor s rotujícími disky (obr. 8) [13]. Jedná se o reaktor s upoutanými buňkami na povrchu disků. Při průchodu kapalnou fází buňky metabolizují organické látky z média. Zařízení je vhodné pro



Obr. 7. Horizontální tubulární reaktor.

A — rotující válec, B — míchací elementy, C — těleso reaktoru, D — duplikátorový plášť pro teplotaci, F — přítok média, G — odvod plynů, R — recykl, S — odtok mikrobiální suspenze, V<sub>g</sub> — přívod vzduchu.

Obr. 8. Reaktor s rotujícími disky.

A — rotující disky, B — těleso reaktoru, C — duplikátorový plášť pro teplotaci, F — přítok média, P — odtok média, V<sub>g</sub> — přívod vzduchu, G — odvod plynů.

aerobní čištění odpadních vod [14]. Nevýhodou těchto horizontálních tubulárních reaktorů je velká zastavěná plocha.

Jiným typem je **rotující bubnový reaktor** vhodný pro kultivace volných tkáňových buněk a imobilizovaných buněk (i rostoucích na mikronosičích) (obr. 9). Jde o větší aplikaci rotujících lahví, používaných pro laboratorní kultivace těchto buněk [15]. Buben je uvnitř opatřen 2 až 8 narážkami, které zvyšují přenos kyslíku,

## Literatura

- [1] MEISTER, D., POST, J., DUNN, I. J., BOURNE, J. R.: Chem. Engn. Sci. **34**, 1979, s. 1367
- [2] BRAUER, H., SCHMIDT-TRAUB, E.: Chemie, Anlagen, Verfahren April 1974, s. 74
- [3] FALCH, E. A., GADEN, E. L.: Biotechnol. Bioeng. **11**, 1969, s. 927
- [4] PÁCA, J., GRÉGR, V.: Biotechnol. Bioeng. **18**, 1976, s. 1075
- [5] PÁCA, J.: Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol. **9**, 1980, s. 93
- [6] PÁCA, J.: Proc. Biochem. **16**, (6), 1981, s. 40
- [7] PÁCA, J.: Enzyme Microb. Technol. **3**, 1981, s. 123
- [8] PÁCA, J., GRÉGR, V.: Biotechnol. Bioeng. **21**, 1979, s. 1809
- [9] FEDER, J., TOLBERT, W. R.: Sci. Amer. **248**, (1), 1983, s. 36
- [10] RAMALINGHAM, A., FINN, R. K.: Biotechnol. Bioeng. **19**, 1977, s. 583
- [11] CYSEWSKI, G. R., WILKE, C. R.: Biotechnol. Bioeng. **19**, 1977, s. 1125
- [12] MOSER, A.: Tubular Fermentor for Aerobic Processes in Advances in Microbiol. Engn., Part 1, Interscience, Wiley, New York 1973, s. 399
- [13] MEANS, C. W., SAVAGE, G. M., REUSSER, F., KOEPEL, H. J.: Biotechnol. Bioeng. **4**, 1982, s. 5
- [14] STROM, P. F., CHUNG, J. C.: Adv. Biotechnol. Proc. **5**, 1985, s. 194
- [15] TANAKA, H., NISHIJIMA, F., SUWA, M., IWAMOTO, T.: Biotechnol. Bioeng. **25**, 1983, s. 2359

## Páca, J.: Bioreaktory. III. Speciální reaktory s mechanickým mícháním. Kvas. prům. 33, 1987, č. 4, s. 111–113.

Jsou popsány různé typy vícestupňových reaktorů, reaktor s vibračním mícháním, reaktor pracující za sníženého tlaku a různé typy horizontálních tubulárních reaktorů. U každého typu reaktoru je uveden princip, maximální velikost a možná aplikace.

## Паца, Я.: Биореакторы. III. Специальные реакторы с механическим перемешиванием. Квас. prům. 33, 1987, № 4, стр. 111–113.

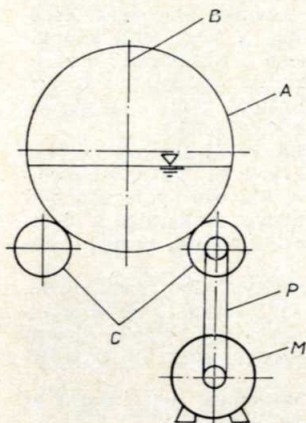
Описываются разные типы многоступенчатых реакторов, реактор с вибрационным перемешиванием, реактор, работающий при пониженном давлении и разные типы горизонтальных тубулярных реакторов. Для каждого типа реактора приводится принцип, максимальная величина и возможность применения.

## Páca, J.: Bioreactors. III. Special Reactors with Mechanical Agitation. Kvas. prům. 33, 1987, No. 4, pp. 111–113.

Various types of multistage reactors, a reactor with vibromixing, a vacuum fermentor and various types of horizontal tubular reactors are described in this article. The principle, the maximum vessel volume and possible applications are discussed with each type of the reactor.

## Páca, J.: Bioreaktoren. III. Spezialreaktoren mit mechanischer Mischung. Kvas. prům. 33, 1987, Nr. 4, S. 111–113.

Es werden verschiedene Typen mehrstufiger Reaktoren beschrieben: Reaktor mit Vibrationsmischung, bei vermindertem Druck arbeitender Reaktor, verschiedene Typen horizontaler Tubularreaktoren. Bei jedem Reaktortyp wird das Prinzip, die maximale Größe und die Applikationsmöglichkeit angeführt.



Obr. 9. Rotující bubnový reaktor.

A — rotující buben, B — narážky, C — hnací a opěrný válec, M — motor, P — řemenový převod.

ale i sřížné síly. Vzduch pro aeraci se přivádí i odvádí v podélné ose zařízení. Ve srovnání s reaktorem vybaveným mechanickým míchadlem lze v tomto typu reaktoru dosáhnout vyšší rychlosti přenosu kyslíku za podmínek vyšší viskozity při udržení nízkých sřížných sil. Rotující bubnový fermentor opatřený narážkami na vnitřním povrchu byl též otestován při kultivacích mikroorganismů na tuhých substrátech.

Lektoroval Ing. L. Chládek, CSc.