

II. Jednostupňové reaktory s mechanickým mícháním

Ing. JAN PÁČA, CSc., Vysová škola chemickotechnologická, katedra kvasné chemie a bioinženýrství, Praha

Klíčová slova: *radiální míchadlo, cirkulační reaktory, vrtulové míchadlo, kombinovaná míchadla, samonasávací míchadlo, násobná míchadla.*

Reaktory s radiálním míchadlem

Převážná většina mikrobiálních výrob je aerobního charakteru, tzn. vyžaduje dodávku kyslíku buňkám. Míchadlo musí plnit funkci homogenizační a dispergační. Nejčastěji se proto používá pro míchání otevřené diskové turbíny s dělicím kotoučem.

Klasické uspořádání tohoto systému ukazuje *obr. 1*. Poměr H/D je zde obvykle roven 1. Vzduch se přivádí do aeračního věnce umístěného pod míchadlem. Výhodou tohoto typu míchadla je vytvoření relativně vysokých střížných sil působících dispergaci vzduchových bublin a dále skutečnost, že dělicí kotouč zabraňuje zkratovému toku vzduchu kolem hřídele. Proto je toto míchadlo výhodnější pro aerované systémy než např. lopatkové míchadlo. Vzhledem k omezené velikosti čerpací kapacity turbínového míchadla je však tato konfigurace míchacího zařízení vhodná pouze pro malé jednotky (laboratorní až poloprovozní).

Cirkulační reaktory s vrtulovým míchadlem

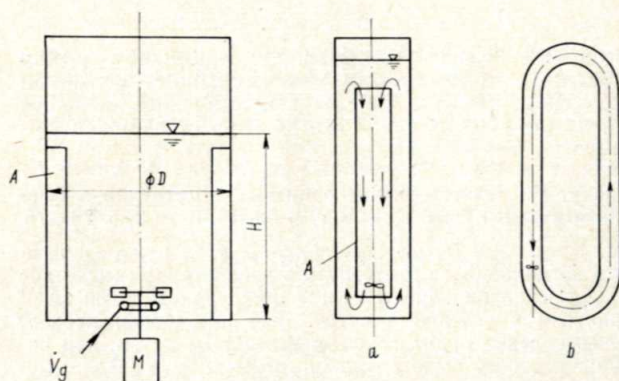
Na rozdíl od předchozího typu reaktoru používá se zde vrtulového míchadla vykazujícího vysokou čerpací kapa-

citu, ale menší střížné síly ve srovnání s míchadlem turbínovým.

Na *obr. 2* je uveden princip cirkulačního reaktoru. Jsou možné dvě varianty. Varianty s interní cirkulací média se používá častěji. *Obrázek 3* ukazuje různé způsoby umístění distributoru vzduchu v tomto typu reaktoru. Při uspořádání podle *obr. 3a* vstupují vzduchové bubliny do kultivačního média ve spodní části vzestupné sekce a vystupují vzhůru spolu s proudící kapalinou. V horní části kapaliny nad cirkulačním válcem dochází k oddělení většiny bublin, které odcházejí z reaktoru, zatímco kapalina proudí cirkulační trubicou zpět dolů.

Umístí-li se distributor plynu do cirkulační trubky (*obr. 3b*), prodlouží se sice doba zdržení bublin v kapalně fázi, ale naopak se ztrácí část čerpací kapacity míchadla nutná na průtok plynových bublin míchadlem. Proto při tomto uspořádání ovlivňuje intenzitu cirkulace kapalně fáze vzdálenost distributoru nad míchadlem.

Charakteristickou vlastností cirkulačních reaktorů je co nejlepší *usměrnění proudícího média*, aby se zabránilo disipaci energie zbytečným vířením. Proto se pro aplikaci na média s vysokou viskozitou osvědčila modifikace průřezu cirkulační trubky podle *obr. 4* [1].

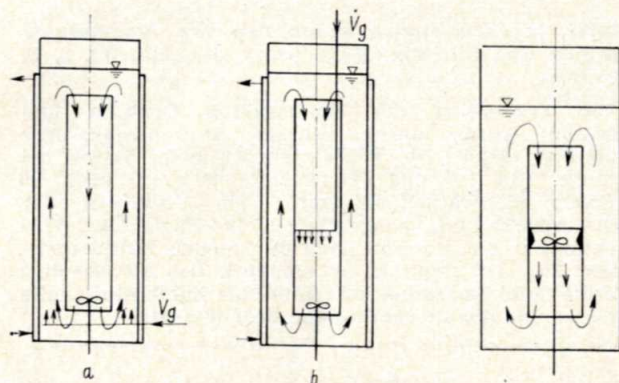


Obr. 1. Reaktor s turbínovým míchadlem

A... míchací narážky, D... vnitřní průměr reaktoru, H... výška kapalně náplně, M... motor, V_g ... přívod vzduchu.

Obr. 2. Princip cirkulačního reaktoru (Loop Reactor) s vrtulovým míchadlem

a) Interní cirkulace s centricky umístěnou cirkulační trubicí (A)
b) Tubulární cirkulační reaktor (externí cirkulace).



Obr. 3. Cirkulační systém s vrtulovým míchadlem a různým umístěním distributoru vzduchu

a) Ve spodní části vzestupné sekce.
b) V sestupné sekci.

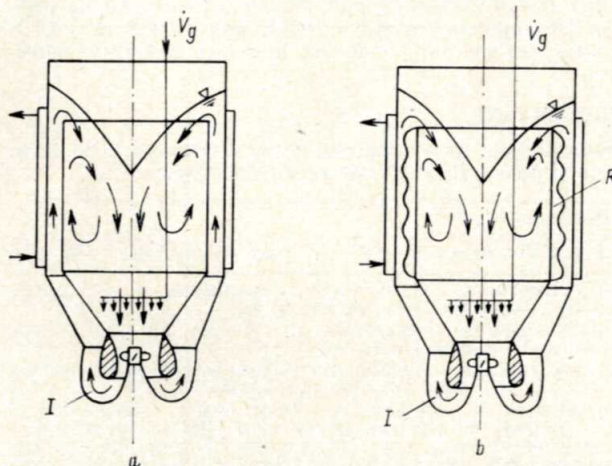
Obr. 4. Proudnicové zúžení průřezu cirkulační trubky (pro média s vysokou viskozitou)

Cirkulační systém s vrtulovým míchadlem firmy Giovanola Frères SA ukazuje obr. 5. Byl vyvinut asi v r. 1969. Obrácení směru proudění u dna [tzv. intensor] je řešeno proudnicovým tvarem tak, aby se vyhovělo zmíněné podmínce o plývání energií zbytečným vířením. Varianta uvedená na obr. 5b umožňuje zvýšení rychlosti přenosu kyslíku z plynné fáze do kapaliny. Změna průtočného průřezu vyvolává tlakové změny v proudícím médiu. Změny tlaku způsobují změnu průměru, tvaru fázového rozhraní a objemu bublin a tím také zvýšení turbulence plynu v bublinách [2]. Výhody tohoto typu reaktoru jsou: nízké střížné síly, vysoká turbulence toku, dobré sdílení tepla, dobrá separace bublin od kapaliny, částečná mechanická likvidace pěny nasáváním do cirkulační trubky. Teplosměnnými plochami u cirkulačních reaktorů jsou vnější plášť i cirkulační trubka. Tento typ reaktoru se staví do velikosti 5 m³ a lze jej použít pro aseptické procesy.

Cirkulační reaktory s kombinovanými míchadly

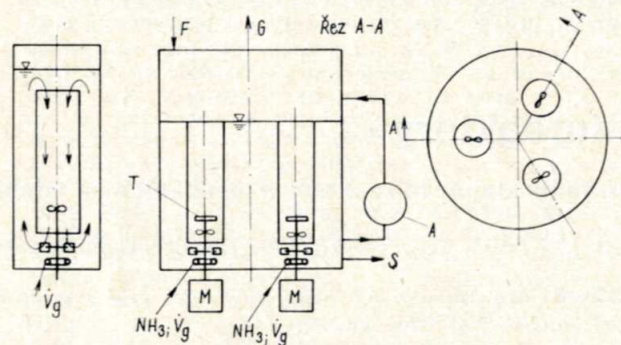
Tento systém uvedený v literatuře v r. 1966 využívá kombinace turbínového a vrtulového míchadla (obr. 6). Vrtulové míchadlo s vysokou čerpací kapacitou zajišťuje homogenizační míchání. Dispergaci bublin provádí otevřená turbína s dělicím kotoučem umístěná pod cirkulační

trubicí. Vzduch se přivádí do distributoru umístěného pod turbínovým míchadlem. Výzkumný ústav chemických zařízení Brno použil pro zvýšení odpěňovací účinnosti (nasáváním pěny do cirkulační trubky) ještě tangenciální míchadlo nad míchadlem vrtulovým. Tento typ reaktoru o celkovém objemu 800 m³ je od r. 1984 instalován v Severomoravských celulózkách, n. p., Paskov (obr. 7) pro výrobu kvasničné biomasy ze sulfitových výluhů. Zvláštností tohoto reaktoru je přívod plynného amoniaku pro úpravu pH spolu se vzduchem do distributoru plynu. Chlazení se provádí externím výměníkem tepla. Jde o variantu zvětšování měřítka, kdy poměr $H/D \leq 1$, systém



Obr. 5. Cirkulační systém firmy Giovanola Frères SA, Monthey, Švýcarsko

a) Systém s „intensorem“ (I)
b) Systém s „intensorem“ (I) a speciálním tvarem cirkulačního válce (R).



Obr. 6. Kombinace vrtulového a turbínového míchadla

Obr. 7. Zvětšování měřítka reaktoru s kombinovanými míchadly (VÚCHZ Brno)

A... tepelný výměník, F... přítok média, G... odvod plynu, M... motor, S... odtok buněčné suspenze, T... tangenciální míchadlo, V_g ... přívod vzduchu a NH_3 .

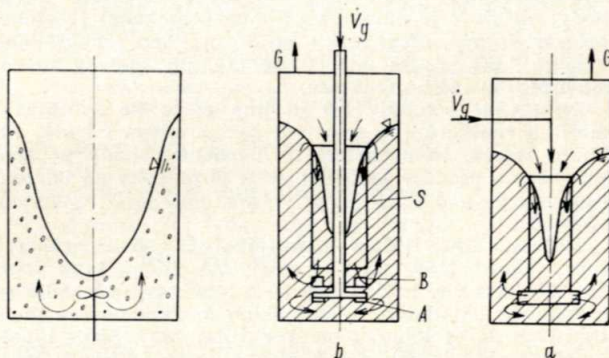
má 3 samostatné míchací jednotky se spodním pohonem. Výhody tohoto systému jsou: menší spotřeba energie na stlačování vzduchu — turbodmychadla (pro $H < 7$ m), větší provozní spolehlivost ve srovnání s reaktorem vybaveným pouze jednou míchací jednotkou [3]. Nevýhody: nelze použít pro procesy vyžadující dodržení aseptických podmínek, menší využití kyslíku ze vzduchu.

Reaktory bez distributoru vzduchu

Reaktory bez distributoru vzduchu lze rozdělit do dvou skupin. První skupina zahrnuje systémy, kde dochází k tzv. aeraci z hladiny. Nejstarším (asi z r. 1952) a nejjednodušším způsobem distribuce bublin do kapaliny je

vírový systém (obr. 8). Jde o reaktor vybavený vrtulovým nebo turbínovým míchadlem pracujícím v turbulentní oblasti proudění. Protože v reaktoru nejsou míchací narážky, tvoří se středový vír, v jehož spodní části je vzduch strháván míchadlem pod hladinu a distribuován do celého objemu kapaliny. Tento způsob je vhodný pouze pro malá laboratorní zařízení.

Dále do této skupiny patří tzv. **samonasávací míchadla (obr. 9).** Princip spočívá v nasávání vzduchu z prostoru nad hladinou sací (cirkulační) trubkou pevně spojenou např. s uzavřenou turbínou [4], za jejímiž lopatkami se při rotaci vytváří podtlak (obr. 9a). Homogenizační účinek míchadla podporuje cirkulace kapaliny sací trubkou.



Obr. 8. Vírový systém

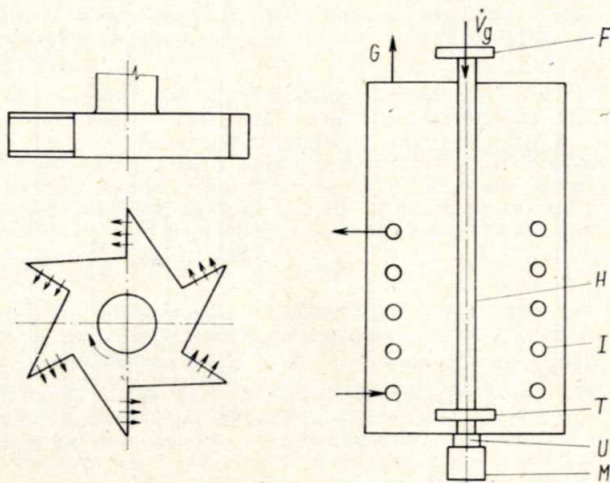
Obr. 9. Samonasávací míchadla

- a) Uzavřená turbínová míchadla s cirkulační trubkou
b) Upravený systém Waldhof
G... odvod plynů, S... statická cirkulační trubka,
V_g... přívod vzduchu.

Jinou variantou tohoto typu míchadla je **upravený systém Waldhof (obr. 9b)**. Rotující část tvoří dutá hřídel, na kterou jsou připojeny v dolní části radiálně trubky opatřené na spodní straně lopatkami. Nad trubkami je otevřená turbína s dělicím kotoučem a lopatkami pouze na horní části. Vlastní cirkulační trubka je zvlášť a nerotuje. Tento typ míchadla pracuje tak, že dutou hřídelí se přisává z vnějšího prostoru vzduch k aeraci a je distribuován do kapaliny radiálními trubkami. Cirkulační trubkou proudí kapalina a dále se přisává z prostoru nad hladinou vzduch a pěna. Je tedy systém Waldhof vlastně speciálním případem cirkulačního reaktoru podle obr. 3a. Systém na obr. 9b je výhodnější a použitelný i v průmyslovém měřítku, protože hmotnost rotujících částí míchadla je značně menší ve srovnání se systémem na obr. 9a. Výhodou samonasávacích míchadel je částečná likvidace pěny jejím nasáváním a vyloučením distributoru vzduchu. Nevýhodou je nezbytnost konstantního plnění reaktoru, aby míchadlo plnilo všechny předpokládané funkce.

Jiným typem samonasávacího míchadla vyvinutého kolem r. 1966, je **samonasávací turbína firmy Frings zvaná FRIBORATOR (obr. 10)**. Je to duté hvězdicové těleso, jehož rotací vzniká podtlak a vzduch je distribuován a dispergován v kapalině. Frekvence otáčení míchadla je v rozsahu od 1450 do 1750 min⁻¹. Dosahovaný průměr bublin je v rozsahu 0,02 až 3 mm. Pro zabránění roztočení kapaliny v reaktoru a pro rovnoměrnou distribuci bublin v radiálním směru od míchadla prochází disperze vytvořená míchadlem statorovými usměrňovacími lopatkami. V některých případech se navíc montují ještě míchací narážky na stěny reaktoru. Celkové uspořádání aerátoru Frings v reaktoru ukazuje obr. 11. Pohon míchadla je spodní. K rotoru je shora sací trubkou přiváděn vzduch přes filtr. Vzhledem na dosahované vysoké rychlosti přenosu kyslíku používají se aerátory Frings při výrobě pekařského droždí, v submerzních očetnicích a v čistírnách odpadních vod.

Samonasávací systém s dutou hřídelí opatřenou rameny a lopatkami, tzv. **Yeomans-Cavitator**, se používá v USA a v Japonsku pro kontinuální výrobu jablečného octa.



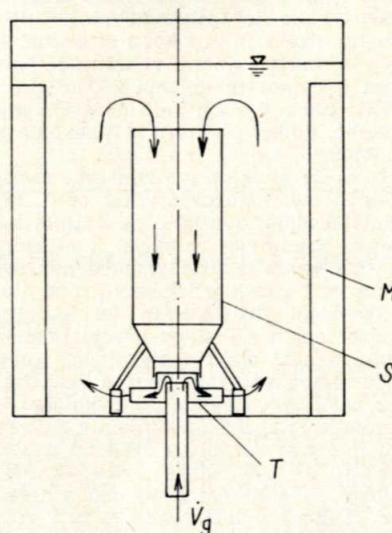
Obr. 10. Samonasávací turbínové míchadlo firmy Frings, Bonn, NSR (tzv. FRIBORATOR)

Obr. 11. Reaktor vybavený aeracním zařízením firmy Frings

- F... filtr, G... odvod plynů, H... sací trubka, I... chladič hady, M... motor, T... turbína včetně usměrňovacích statorových lopatek, U... ucpávka, V_g... přívod vzduchu.

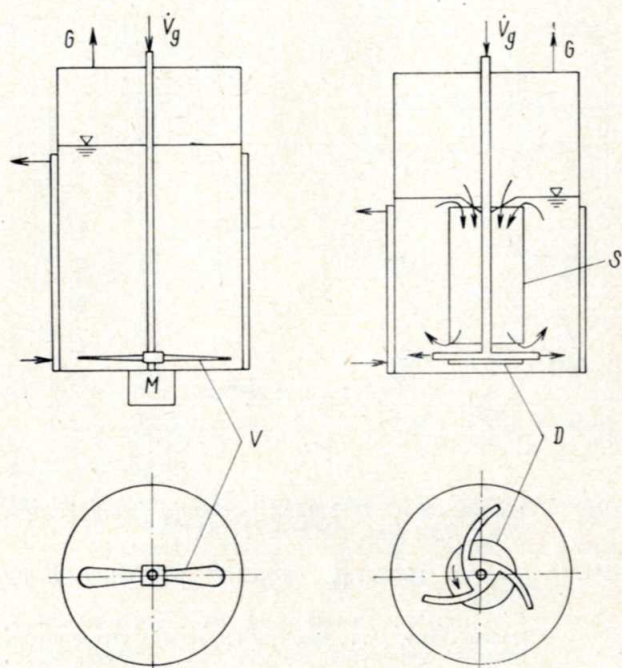
Jde vlastně o Clausův aerátor opatřený navíc lopatkami (obr. 14).

Další variantou je **samonasávací turbína EFFIGAS firmy Chemap A. G. (obr. 12)** pocházející asi z r. 1977. Do turbíny vytvářející podtlak se přisává dutou hřídelí ze spodu vzduch. Systém je dále vybaven statickou cirkulační trubkou. Vzduch s kapalným médiem se směšuje na vstupu do turbíny. Dosahovaná sací schopnost je 1 VVM (objem plynu na objem kapaliny za minutu). Regulace průtoku vzduchu se provádí Venturiho trubicí. Výrobce zaručuje úplnou asepticitu procesu. V médiích s vysokou viskozitou však tento typ míchadel nevykazuje dostatečnou čerpací kapacitu pro kapalnou fázi, tzn. nedochází k žádoucí homogenizaci náplně. Lze jej použít pro řadu mikrobiálních výrob včetně produkce biomasy a čištění odpadních vod. Vzhledem k omezení velikosti aerace hodnotou 1 VVM pro samonasávací tur-



Obr. 12. Turbínové míchadlo typu EFFIGAS firmy Chemap A. G., Männedorf, Švýcarsko

- M... míchací narážky, S... statická cirkulační trubka, T... turbína rotující s dutou hřídelí, V_g... přívod vzduchu.



Obr. 13. Aerační zařízení firmy Vogelbusch A. G., Vídeň Rakousko

M... motor, V... vrtule, V_g ... přívod vzduchu.

Obr. 14. Aerační zařízení systém Waldhof, Mannheim, NSR (aerátor podle Clause)

D... disk, G... odvod plynů, S... statická cirkulační trubka, V_g ... přívod vzduchu.

bínu, používá se v některých případech i přídatný přívod tlakového vzduchu do distributoru.

Do druhé skupiny reaktorů bez distributoru vzduchu patří systémy, do kterých je vzduch dutou hřídelí přiváděn pod tlakem.

Patří sem aerátor firmy Vogelbusch A. G. (obr. 13). První aerátory této firmy pocházejí z roku 1935. Dutou hřídelí se přivádí shora vzduch do duté vrtule se dvěma listy. V obou listech vrtule jsou navrtány otvory o průměru 0,5 až 1 mm. Vzdálenost otvorů se zvětšuje směrem od středu k okraji listu. Listy vrtule mají proudnicový tvar, a proto frekvence otáčení vrtule může být vysoká. Také průměr vrtule je velký. Pohon vrtule je spodní. Plyn vytékající otvory je vysokými střížnými silami účinně dispergován, takže vznikají velmi malé bubliny. Tento typ reaktoru o celkovém objemu 250 m³ pracuje v Heidenau (NDR). Jde o výrobu mikrobiální biomasy ze sulfitových výluhů. Plnění reaktoru se pohybuje kolem 30 % celkového objemu.

Jiným typem je reaktor s aeračním zařízením typu Waldhof. Jde o tzv. Clausův aerátor (obr. 14), který se skládá z duté hřídele, opatřené na dolním konci radiálně umístěnými zahnutými trubkami, pod kterými je disk o průměru shodném s centricky umístěnou statickou cirkulační trubkou. Vzduch přicházející pod tlakem dutou hřídelí je trubkami distribuován do kapaliny. Rotující zahnuté trubky spolu s diskem působí jako radiální míchadlo a působí sací efekt v cirkulační trubce. Dochází proto k částečnému nasávání pěny a vzduchu nad hladinou spolu s kapalným médiem do cirkulační trubky. První aerátor tohoto typu byl instalován v r. 1943. Tento typ bioreaktoru je starší variantou systému z obr. 9b a nejvíce se rozšířil do průmyslové praxe převážně pro produkci biomasy ze sulfitových výluhů v Německu, USA a Japonsku. Celkový objem reaktoru je v rozsahu 200–500 m³, plnění činí kolem 25–30 % celkového objemu.

Reaktory s násobnými míchadly

Za podmínek poměru $H/D > 1,4$ a při vyšší viskozitě kapalně fáze nestačí již uspořádání reak-

toru podle obr. 1. Za těchto podmínek se použijí tzv. násobná míchadla, což je umístění několika radiálních míchadel na společné hřídeli. Většinou se používá otevřených turbínových míchadel s dělicím kotoučem (obr. 15). Volba vzdálenosti mezi míchadly je velmi důležitá, neboť ovlivňuje homogenizaci náplně reaktoru. Aby nedocházelo k nepromíchávaným zónám mezi míchadly, doporučuje se volit [5]:

$B = 1,5 d$, pro viskozní média.

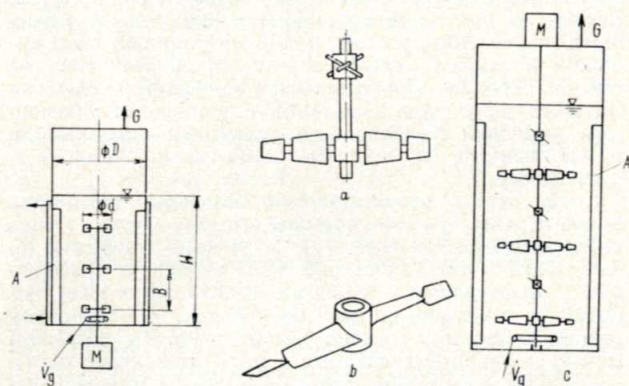
$B = 1,5 d$ pro viskozní média.

Násobná míchadla se tedy používají ve vysokých, stíhlých reaktorech. Výhody těchto reaktorů jsou: opakovaná dispergace bublin a tím lepší využití kyslíku ze vzduchu; v kontinuálním zapojení dochází k vytvoření koncentračního gradientu podél výšky reaktoru. Nevýhody: výška H je omezena příkonem míchadel (rostoucí průměr hřídele, převodovky jen do určitého přenášeného výkonu), při poruše motoru, spojky, převodovky se zastaví provoz celého reaktoru.

Zvětšování poměru H/D je jiná cesta ke zvětšování měřítka reaktorů (ve srovnání se způsobem na obr. 7). Tento způsob se vzhledem na uvedené výhody používá hlavně pro procesy kladoucí vyšší požadavky na udržení aseptických podmínek (např. výroba antibiotik, vitamínů, enzymů).

Systém MIG (Mehrstufen-Impuls-Gegenstromrührer) firmy Ekato, NSR, používá míchadla jiného typu (obr. 16). Pochází z r. 1975. Jedná se o lopatková míchadla se 2 šikmými lopatkami, jejichž sklon je však na cca dvou třetinách délky lopatky obrácen (obr. 16b). Šířka lopatky se se vzdáleností od osy míchadla zmenšuje (obr. 16a). Uspořádání míchadel v reaktoru ukazuje obr. 16c. Míchadla vyvozují vzhledem ke svému průměru vysoké střížné síly a intenzivní lokální turbulenci. Dispergace i distribuce bublin je dobrá. Problémem je separace bublin z kapaliny a nárosty mikroorganismů na všech vestavbách (míchadla, míchací narážky atd.) v důsledku malé frekvence otáčení míchadel. Celkově je náplň reaktoru nehomogenní, podobně jako u všech reaktorů s násobnými míchadly. Byl postaven reaktor o celkovém objemu 100 m³.

Násobná míchadla používá též aerační systém Phrix. Starší typ pocházející již z r. 1944 (uvedený na obr. 17) má celkem 3 míchadla na společné hřídeli. Spodní míchadlo (A) disperguje a distribuuje bubliny a vyvozuje radiální proudění. Horní míchadlo (B) zajišťuje opakovanou dispergaci bublin i radiální proudění v horní části náplně reaktoru. Míchadlo (C) (podle Hoesche) působí jako mechanický odpěňovač. Tento reaktor se používal k produkci biomasy z hydrolyzátů slámy a též ze sulfi-

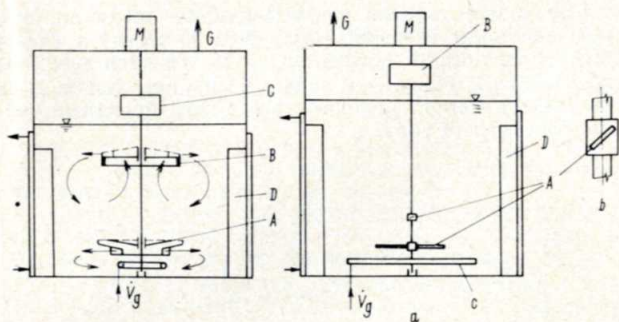


Obr. 15. Reaktor s násobnými míchadly

A... míchací narážky, B... vzdálenost mezi míchadly, d ... průměr míchadla, D ... vnitřní průměr reaktoru, G... odvod plynů, H ... výška kapalně náplně, M... motor, V_g ... přívod vzduchu.

Obr. 16. Reaktor s míchacím systémem MIG firmy Ekato, NSR

a) Umístění míchadel na hřídeli.
b) Míchadlo.
c) Umístění míchadel v reaktoru.
A... míchací narážky, G... odvod plynů, M... motor, V_g ... přívod vzduchu.



Obr. 17. Aerační systém Phrix firmy Phrix-Zellstoffwerke (starší typ)

A... perforovaný disk kombinovaný s turbínou, B... jiný tvar perforovaného disku s lopatkami, C... odpěňovací míchadlo podle Hoesche, D... míchací nárazky, M... motor, V_g... přívod vzduchu.

Obr. 18. Aerační systém Phrix (novější typ)

a) Uspořádání míchadel v reaktoru.
b) Míchadlo se dvěma šikmými lopatkami.
A... míchadlo, B... odpěňovací míchadlo podle Hoesche, C... distributor vzduchu (perforovaný had), D... míchací nárazky, G... odvod plynů, M... motor, V_g... přívod vzduchu.

ových výluhů. Novější varianta systému Phrix je uvedena na obr. 18. Tento systém se používá u firmy Filmfabrik Agfa Wolfen (NDR). Ve Wolfenu je celkový objem reaktoru 200 m³, v Zellstoffabrik v Rosenthalu (NDR) 250 m³. V obou případech se jedná o výrobu kvasničné biomasy ze sulfitových výluhů a plnění reaktorů je kolem 30 % celkového objemu. Vzduch se přivádí do distributoru tvořeného perforovaným hadem. Dispergace a distribuce vzduchových bublin spolu s axiálním směrem proudění kapalně fáze se dosahuje dvěma nad sebou umístěnými dvoulopátkovými míchadly se šikmými lopatkami. Nad hladinou je opět umístěno odpěňovací míchadlo podle Hoesche.

Literatura

- [1] BLENKE, H.: Adv. Biochem. Engn. **13**, 1979, s. 121.
- [2] HASENBÖHLER, A.: Instrumentierung von Fermentationsanlagen. Dissertation, Universität Tübingen 1978, s. 165.
- [3] PÁCA, J., KUJAN, P., MATĚJČ, V.: Enzyme Microb. Technol. **7**, 1985, s. 322.
- [4] ŘÍČICA, J.: Kontinuální kultivace mikroorganismů (Ed. Málek I.), NČSAV, Praha 1964, s. 183.
- [5] TAGUCHI, H.: Adv. Biochem. Engn. **1**, 1971, s. 1.

Páca, J.: Bioreaktory. II. Jednostupňové reaktory s mechanickým mícháním. Kvas. prům. **33**, 1987, č. 3, s. 75—79.

Jsou popsány tyto typy bioreaktorů: reaktor s radiálním míchadlem, cirkulační reaktory s vrtulovým míchadlem a kombinovanými míchadly, různé systémy bez distributoru vzduchu a reaktory s násobnými míchadly. U každého typu reaktoru je uveden princip, maximální velikost a možná aplikace. Uvádí se způsob zvětšování měřítka reaktoru z hlediska požadavků na udržení aseptičity prováděného procesu.

Паца, Я.: Биореакторы. II: Одноступенчатые реакторы с механическим перемешиванием. Квас. прум. **33**, 1987, № 3, с. 75—79.

Описаны следующие типы биореакторов: реактор с радиальной мешалкой, циркуляционные реакторы с пропеллерной мешалкой и комбинированными мешалками, разные системы без распределителя воздуха и реакторы с кратными мешалками. Для каждого реактора приведен принцип, максимальный размер и возможное применение. Далее приводится способ увеличения масштаба реактора с точки зрения требований к соблюдению асептичности проводимого процесса.

Páca, J.: Bioreactors II. One-Stage Reactors with Mechanical Agitation. Kvas. prům. **33**, 1987, No. 3, pp. 75—79.

The following types of bioreactors are described: reactor with a turbine impeller, loop reactors with a marine propeller or with combined impellers, various types of systems without gas spargers and reactors with multiple impellers. The principle, the maximum vessel volume and possible applications are discussed by each type of the reactor. With respect to the keeping of the process asepticity possible ways of the scale-up with respect to the reactor shape are mentioned.

Páca, J.: Bioreaktoren. II. Einstufige Reaktoren mit mechanischer Mischung. Kvas. prům. **33**, 1987, Nr. 3, S. 75—79.

Es werden folgende Bioreaktorentypen beschrieben: Reaktor mit Radialmischer, Zirkulationsreaktoren mit Propeller-Mischer und kombinierten Mischwerken, verschiedene Systeme ohne Luftdistributor und Reaktoren mit Multiplizitätsmischern. Bei jedem Reaktortyp werden das Prinzip, die maximale Größe und die mögliche Applikation angeführt. Weiter wird das Verfahren der Vergrößerung des Reaktormaßstabs mit der Hinsicht auf die Forderungen der Erhaltung der Aseptizität des durchgeführten Prozesses erörtert.