

## V. Airlift reaktory

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

**Klíčová slova:** bioreaktor, reaktory s vnitřní cirkulací, reaktor s vnější cirkulací, normální směr toku, reverzní směr toku, šachtový reaktor, tlakový airlift reaktor, hranolový airlift reaktor, mamutkový cirkulační reaktor

Charakteristickou vlastností airlift reaktorů je usměrněný tok kapalného média vysokou fiktivní rychlostí. Kapalina cirkuluje v uzavřeném okruhu. Cirkulace je podmíněna rozdílem hydrostatického tlaku kapaliny v aerované a neaerované sekci. Důsledkem pravidelné cirkulace buněčné suspenze procházejí všechny buňky periodicky všemi zónami reaktoru. Vzhledem na nehomogenní podmínky ve všech velkokapacitních reaktorech je však u cirkulačních reaktorů výsledné působení vnějších podmínek na všechny buňky stejné. Ve srovnání s probublávanými kolonami je u cirkulačních reaktorů snadnější převod do velkých rozměrů. Dalším významným rysem těchto reaktorů je vysoký poměr  $H/D$  (až 10). Důvodem volby velkého poměru  $H/D$  je dosažení značného využití kyslíku ze vzduchu, vysoké účinnosti sdílení hmoty a vysoké cirkulační rychlosti, která pozitivně ovlivňuje sdílení tepla a promíchávání náplně.

Podle způsobu cirkulace kapaliny rozlišujeme tzv. systémy s vnitřní nebo vnější cirkulací.

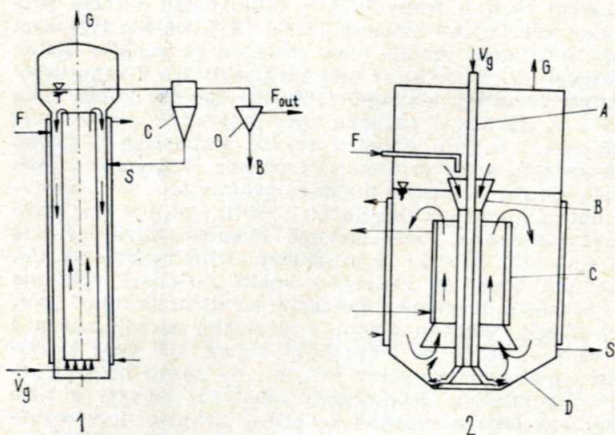
### REAKTORY S VNITŘNÍ CÍRKULACÍ

Na obr. 1 je uveden reaktor s normálním směrem toku kapalně fáze. Při tomto uspořádání je vzduch veden do distributoru pod cirkulační trubkou, takže vzestupné

proudění probíhá v této trubce. V mezikruhové ploše proudí kapalina zbavená bublin zpět dolů. Je tedy vnitřní cirkulace dosaženo v reaktoru složeném ze dvou koncentrických trubek. Tento typ reaktoru se používá k produkci ethanolu ze sacharidických surovin podle technologie Hoechst/Uhde (NSR). Katalyzátorem procesu jsou flokulující kvasinky, které jsou jednak vraceny do reaktoru a přebytek se po separaci používá ke zkrmování [1]. Tento typ reaktoru také pracuje již řadu let u firmy Hoechst AG (NSR) na produkci mikrobiální biomasy s mikroorganismy *Methylomonas clara* na methanolu jako zdroji uhlíku a energie. Dále byl tento typ reaktoru použit pro výrobu mikrobiální biomasy z n-alkanů firmou Gulf Oil [2], z plynového oleje firmou British Petroleum [3], pro oxosyntézu [4] a k výrobě octa [5]. Firma Hoechst AG doporučuje tento typ reaktoru také pro čištění odpadních vod [6, 7]. Lze je použít i pro kultivace rostlinných buněk [8].

Dalším typem tzv. airlift reaktoru s normálním směrem toku je **systém Lefrançois-Mariller** (obr. 2). Je znám již od roku 1955 [9, 10]. V reaktoru jsou centricky umístěny tři trubky různých délek. Vnitřní trubkou (A) se přivádí vzduch. Je distribuován šterbinou mezi rozšířenou trubkou (A) a dnem reaktoru. Trubka (B) nálevkovitě rozšířená je zakončena nad hladinou kapalně ná-





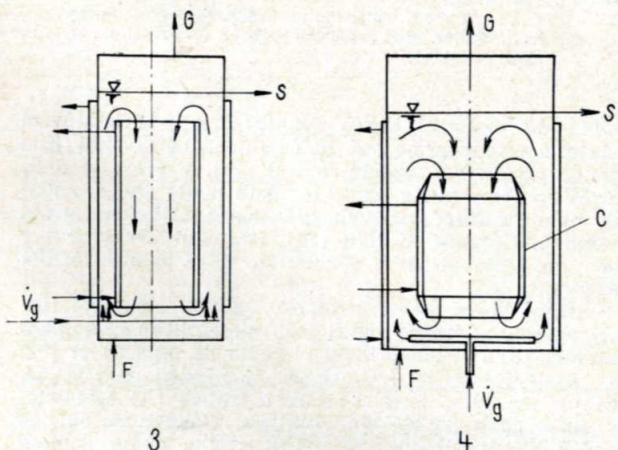
Obr. 1. Airlift reaktor s normálním směrem toku (technologie Hoechst/Uhde, NSR)

B... odtok koncentrované biomasy C... usazovák, F... přítok média, F<sub>out</sub>... odtok prokvašeného média, G... odvod plynů, O... odstředivka, S... recykl kvasinek, V<sub>g</sub>... přívod vzduchu.

Obr. 2. Airlift reaktor s normálním směrem toku typu Lefrançois-Mariller, Francie

A... trubka pro přívod vzduchu, B... kuželové rozšíření trubky pro nasávání pěny a přítok média, C... cirkulační trubka, D... dno ve tvaru kužele, F... přítok média, G... odvod plynů, S... odtok buněčné suspenze, V<sub>g</sub>... přívod vzduchu.

plně reaktoru, zatímco její spodní konec je též kuželovitě rozšířen a končí štěrbinou vytvořenou trubkami (A) a (B). Cirkulační trubka (C) je celá v prostoru pod hladinou. Výtoková rychlost vzduchu ze štěrbin u dna vyvolává podtlak v trubce (B), do které se nasává pěna a vzduch z prostoru nad hladinou. Navíc je do horní části trubky (B) zaústěn přívod živného média, které se při průtoku trubkou (B) směšuje s kapalinou vzniklou rozpadem pěny. Při výtoku z obou štěrbin u dna reaktoru dochází k distribuci a dispergaci bublin a intenzivní turbulenci kapaliny. Pro vzdušněná kapalina stoupá cirkulační trubkou (C) vzhůru. Nahoře se bubliny separují a kapalina proudí vnějším mezikružím zpět dolů. Pro usměrnění cirkulačního proudění je dno reaktoru za štěrbinami trubek (A) a (B) kuželovitě tvaru a spodní část cirkulační trubky (C) je kuželovitě rozšířena. Reaktory



Orb. 3. Airlift reaktor s reverzním tokem typu Wasco

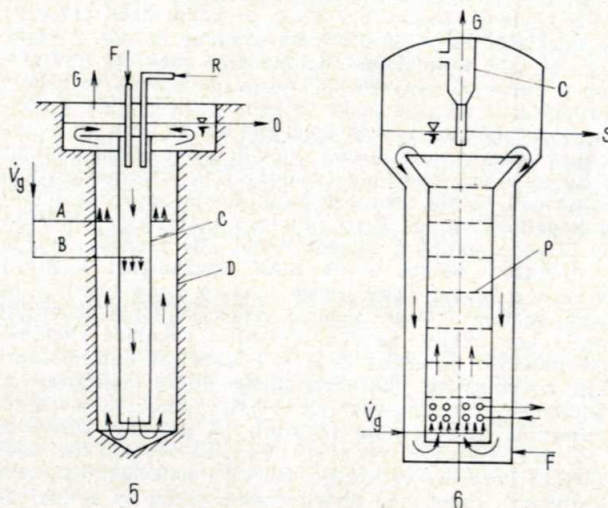
F... přítok média, G... odvod plynů, S... odtok buněčné suspenze, V<sub>g</sub>... přívod vzduchu.

Obr. 4. Airlift reaktor s reverzním tokem typu Lefrançois-Mariller

C... cirkulační válec, F... přítok média, G... odvod plynů, S... odtok buněčné suspenze, V<sub>g</sub>... přívod vzduchu.

tohoto typu dodává francouzská firma Sorice (Paříž) a pracují ve Francii, NSR, Rumunsku, SSSR a v Jižní Americe. Používají se k produkci biomasy na bázi různých substrátů, včetně sulfidových výluhů. Celkový objem těchto reaktorů je 300 m<sup>3</sup>. Pro chlazení se používá duplikované trubky (C) a pláště reaktoru.

Druhou skupinu airlift reaktorů s vnitřní cirkulací tvoří systémy s reverzním směrem toku. Patří sem reaktor typu Wasco [3] a jiný typ reaktoru Lefrançois-Mariller [4]. Při reverzním směru toku je distribuitor vzduchu umístěn pod mezikružím tvořeným cirkulační trubkou a pláštěm reaktoru. U typu Lefrançois-Mariller je k distribuci a dispergaci opět použito štěrbin u dna reaktoru. Přítok živného média a odtok buněčné suspenze je situován jinak než v reaktoru s normálním směrem toku. Jako teplosměnné plochy se opět využívá duplikované cirkulační trubky a pláště reaktoru. Při reverzním směru proudění v reaktoru se dosáhne lepšího přenosu tepla pláštěm reaktoru a menší tvorby pěny. Také firma Fried-Krupp (Essen, NSR) [11] se zabývala výzkumem těchto reaktorů s reverzním směrem toku hlavně z hlediska rychlosti sdílení hmoty a produkce kvasinkové biomasy na bázi melasy.



Obr. 5. Šachtové zařízení (s vnitřní cirkulací) firmy Imperial Chemical Industry Ltd., Billingham, Velká Británie

A... startovací přívod vzduchu, B... provozní přívod vzduchu, C... cirkulační trubka, D... šachta, F... přítok, G... odvod plynů, O... odtok, R... recykl kalu, V<sub>g</sub>... přívod vzduchu.

Obr. 6. Airlift reaktor s perforovanými přepážkami. Tlakový systém s vnitřní cirkulací firmy Imperial Chemical Industry Ltd., Billingham a John Brown Engineers and Constructors Ltd., Portsmouth, Velká Británie

C... cyklón, F... přítok média, G... odvod plynů, P... perforované přepážky, S... odtok buněčné suspenze, V<sub>g</sub>... přívod vzduchu.

Modifikací reaktoru s reverzním směrem toku je šachtový reaktor s vnitřní cirkulací [5]. Jde o zařízení vyvinuté britskou firmou Imperial Chemical Industries (I.C.I.) na čištění odpadních vod kolem roku 1977 [12, 13]. Reaktor tvoří šachta 100 až 135 m hluboká o průměru od 0,5 do 10 m. Asi v jedné třetině hloubky se do cirkulační trubky přivádí tlakový vzduch směrem dolů. Při startování se používá pomocná aerační větev (A) přivádějící vzduch do mezikruhového prostoru směrem vzhůru. Po uvedení kapaliny do cirkulačního proudění stačí pro udržení této cirkulace přívod vzduchu do cirkulační trubky (potrubí B).

Výhody: vysoké procento využití kyslíku ze vzduchu (až 90 %) [14], úspora zastavěné plochy, úspory na udržovacích nákladech (zavětrování, nátěry, proti věžovému řešení nad zemí).

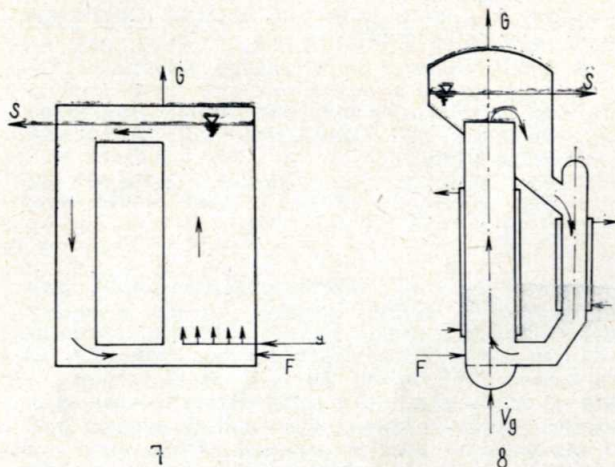
Třetí skupinu airlift reaktorů s vnitřní cirkulací tvoří



reaktory s perforovanými přepážkami umístěnými v cirkulační trubce, kde souprůdně prochází vzduch se suspenzí buněk. Jde tedy o normální směr toku. Britská firma I.C.I. spolu s firmou John Brown Ltd. vyvinula **tlakový airlift reaktor** uvedený na obr. 6. Perforované přepážky mají sloužit k redispergaci bublin i shluků buněk, které se mohou vytvářet při koalescenci bublin ve vzestupné sekci, a ke snížení rychlosti proudění kapaliny. Horní rozšířená část reaktoru slouží jako prostor na pěnu. Jedná se o největší reaktor pracující v současné době ve světě. Jeho celkový objem je 2 100 m<sup>3</sup>, celková výška 60 m, výška kapaliny 40 m, průměr věže v dolní části je 7 m. Používá se pro výrobu mikrobiálního proteinu (Pruteen) z methanolu. Produkčním mikroorganismem je bakterie *Methylophilus methylotrophus*, jež obsahuje více než 70 % bílkovin v sušině [15]. Proces je zcela aseptický. Roční produkce biomasy je 60 000 t. V současné době vyvíjí firma John Brown Ltd. (Velká Británie) nový reaktor o objemu 5 600 m<sup>3</sup> s kapacitou 100 000 t Pruteenu za rok [16].

### AIRLIFT REAKTORY S VNĚJŠÍ CIRKULACÍ

Airlift reaktory s vnější cirkulací se skládají ze dvou věží (kolon) spojených v horní a spodní části [17–19]. Principiálně se jedná o systém uvedený na obr. 7. Nazývají se také **tubulárními cirkulačními reaktory**. Průměry obou kolon se výrazně liší. Aerovaná kolona je většího průměru. V případě příliš velkého poměru plochy kolony aerované vůči vratné sekci (až 30) se však již systém chová jako probublávaná kolona s recyklem a nikoli jako tubulární cirkulační reaktor [20]. Charakteristické vlastnosti těchto reaktorů jsou: úplná separace bublin z kapaliny v horní části reaktoru (zabraňuje akumulaci CO<sub>2</sub> v kapalině a snížení hnací síly přenosu kyslíku přitopeností bublin s již nižší koncentrací kyslíku), v horní a spodní části nejsou zóny s nepravidelným tokem, snadné chlazení pomocí výměníku tepla ve vratné sekci bez bublin, snadné měření a regulace rychlosti cirkulačního proudění ve vratné sekci bez bublin. Tento typ reaktoru je charakteristický dobře definovanými podmínkami v reaktoru [18, 21–23]. Optimální návrh tubulárního cirkulačního reaktoru by měl být proveden tak, aby cirkulační rychlost byla sice vysoká, ale doba zdržení kapaliny ve vratné sekci co nejkratší (limitace kyslíkem). Ihned nad distributorem plynu by se měl na určité délce zvětšit průřez vzestupné (aerované) kolony. Tím vzroste doba zdržení kapaliny v oblasti s vysokým parciálním tlakem kyslíku, čímž se zvýší přenos kyslíku [24]. Jednou z prvních aplikací byl tlakový cir-



Obr. 7. Airlift reaktor s vnější cirkulací

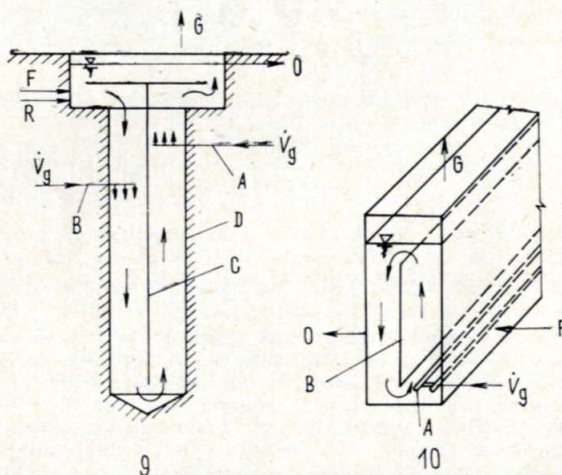
F... přítok média, G... odvod plynu, S... odtok buněčné suspenze, V<sub>g</sub>... přívod vzduchu.

Obr. 8. Airlift reaktor s vnější cirkulací firmy Kanegafuchi Chemical Industry Co. Ltd., Japonsko

F... přítok média, G... odvod plynu, S... odtok buněčné suspenze, V<sub>g</sub>... přívod vzduchu.

kulační reaktor firmy I.C.I. v Billinghamu s roční produkcí mikrobiální biomasy 1 000 t [25]. Dalším typickým představitelem tohoto typu reaktoru je **reaktor Kanegafuchi** na obr. 8, který měl být použit pro výrobu kvasničné biomasy z n-alkanů (100 000 t za rok) kolem roku 1975. K distribuci vzduchu byly testovány: perforovaná přepážka, porézní deska a tryska. Nejlepších výsledků se dosáhlo s perforovanou přepážkou. V Japonsku však byla výroba biomasy z n-alkanů zakázána.

Speciálními typy cirkulačních airlift reaktorů jsou **šachtové zařízení ve tvaru podélně děleného válce** vyvinuté firmou I.C.I. (obr. 9) a **hranolový airlift reaktor** na obr. 10 [26]. Šachtové zařízení s vnější cirkulací vykazuje ve srovnání se stejným zařízením s vnitřní cirkulací (obr. 5) menší tlakovou ztrátu v důsledku menší omočené plochy vztažené na jednotkový objem, což vede k vyšší rychlosti proudění kapaliny [27, 28]. Na rozdíl od typického tubulárního cirkulačního reaktoru dochází v něm podobně jako u systémů s vnitřní cirkulací k výraznému vstupu bublin do sestupné sekce reaktoru. Tím se zvyšuje zádrž plynu v systému. Ještě výraznější vstup



Obr. 9. Šachtové zařízení (s vnější cirkulací) firmy Imperial Chemical Industry Ltd., Billingham, V. Británie

A... startovací přívod vzduchu, B... provozní přívod vzduchu, C... přepážka, D... šachta, F... přítok, G... odvod plynu, O... odtok, R... recykl kalu, V<sub>g</sub>... přívod vzduchu.

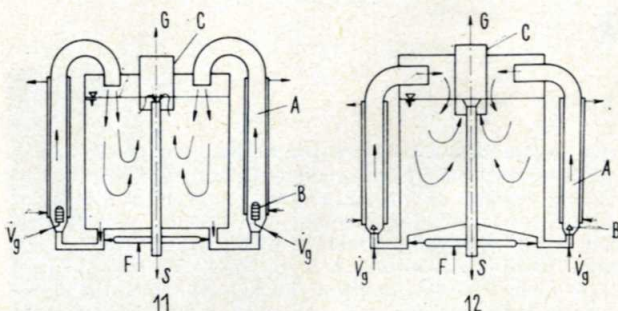
Obr. 10. Hranolový airlift reaktor (s vnější cirkulací)

A... trubkový distributor vzduchu, B... přepážka, F... přítok, G... odvod plynu, O... odtok, V<sub>g</sub>... přívod vzduchu.

bublin do sestupné sekce reaktoru je v hranolovém reaktoru uvedeném na obr. 10. Oba uvedené systémy jsou vhodné při čištění odpadních vod [29]. V praxi se dnes stavějí systémy podle obr. 9 a nikoli podle obr. 5, neboť jak bylo již uvedeno, vykazují menší tlakovou ztrátu a účinnější přenos kyslíku [30]. Hranolový reaktor (ve tvaru kanálu) byl zatím vyzkoušen jen v poloprovozním měřítku.

Starším typem airlift reaktorů s vnější cirkulací (nikoli však tubulárního typu) jsou **mamutkové cirkulační reaktory** [31]. Jejich princip je znám již přes 50 let [32, 33]. Systém Scholler-I. G. (NSR) je uveden na obr. 11. Reaktor má 10 až 12 cirkulačních trubek (A) symetricky umístěných po obvodu reaktoru. Tlakový vzduch se přivádí do distributorů ve tvaru svíčky podle Seidela (porézní keramické kroužky nebo perforovaný válec). Tím klesá hustota disperze a dochází ke vzestupnému proudění v cirkulačních trubkách. Pěna vytékající z cirkulačních trubek padá na hladinu. Nasávání suspenze do cirkulačních trubek je ze dna reaktoru. Přítok živného média je zaústěn do cirkulačních trubek. Trubka (C) má za úkol zabránit zkratovému toku média a pěny do přepadové trubky. Reaktor tohoto typu se používá pro kontinuální výrobu mikrobiální biomasy ze sulfátových





Obr. 11. Mamutkový cirkulační reaktor typu Scholler-I. G., NSR

A... cirkulační trubky, B... aerační svíčka podle Seidela, C... trubka pro eliminaci zkratového toku, F... přítok média, S... odtok buněčné suspenze, V<sub>g</sub>... přítok vzduchu.

Obr. 12. Mamutkový cirkulační reaktor s aeračními tryskami

B... vzduchová tryska, ostatní symboly shodné s legendou na obr. 11.

výluh [34]. Může být postaven jako otevřená nebo uzavřená nádoba. Celkový objem těchto reaktorů je až 600 m<sup>3</sup> [35], plnění je asi 30 %. Pracují v NDR, Švýcarsku a Polsku.

Podobný mamutkový systém pouze se dvěma cirkulačními trubicemi, ve kterých se jako distributoru vzduchu využívá trysky, byl také již ověřován (obr. 12). V provozní velikosti však tento injektorový systém nebyl realizován.

## Literatura

- [1] FAUST, U., PRÄVE, P., SCHLINGMANN, M.: Proc. Biochem. **18**, May/June, 1983, s. 31.
- [2] COOPER, P. G., SILVER, R. S., BOYLE, J. P. in Single-Cell Protein II (Eds. S. R. Tannenbaum, D. I. C. Wang), MIT Press, Cambridge 1975, s. 454.
- [3] LAINÉ, B. M., du CHAFFAUT, J. in Single-Cell Protein II (Eds. S. R. Tannenbaum, D. I. C. Wang), MIT Press, Cambridge 1975, s. 424.
- [4] BASF, DAS 1 205 514, 1963.
- [5] KUTEPOW, N., HIMMELE, W., HONENSCHUTZ, H.: Chem. Ing. Tech. **37**, 1965, s. 383.
- [6] MÜLLER, G. et al.: Chem. Tech. **7**, 1978, s. 257.
- [7] Firemní literatura Uhde Hoechst.
- [8] TOWNSLEY, P. M., WEBSTER, F.: Biotechnol. Lett. **5**, 1983, s. 13.
- [9] LEFRANÇOIS, M. L., MARILLER, C. G., MEJANE, J. V.: France Patent 1 102 200, (1955).
- [10] LEFRANÇOIS, M. L.: 34th Int. Conf. Ind. Chem., Belgrade 1963, Sec. 14.
- [11] PILEPP, E., SCHEFFLER, U., SCHMIDT-MENDE, P.: BMFT-Statusseminar „Bioverfahrenstechnik“, Braunschweig 1977, s. 99.
- [12] HINES, D. A., BAILEY, M., OUSBY, J. C., ROESLER, F. C.: Int. Chem. Eng. Symp. Series No. 41, D1, (1975).
- [13] HINES, D. A.: 1st Prepr. Eur. Congr. Biotechnol. 1978, s. 55.
- [14] WALKER, J., WILKINSON, G. W.: Ann. N. Y. Acad. Sci. **326**, 1979, s. 181.
- [15] SMITH, S. R. L.: Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B, **290**, 1980, s. 341.
- [16] ANONYM: Biotechnology New Watch **3** (4) 1983, s. 5.
- [17] WEILAND, P.: Untersuchung eines Airliftreaktors mit äuerem Umlauf im Hinblick auf seine Anwendung als Bioreaktor. Diss. Univ. Dortmund 1978.
- [18] WEILAND, P., ONKEN, U.: Ger. Chem. Eng. **4**, 1981, s. 42.

- [19] SCHÜGERL, K.: Adv. Biochem. Engn. **22**, 1982, s. 93.
- [20] BUCHHOLZ, H., LUTTMANN, R., ZAKRZEWSKI, W., SCHÜGERL, K.: Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol. **11**, 1981, s. 88.
- [21] LIN, CH., FANG, B. S., WU, C. S.: Biotechnol. Bioeng. **18**, 1976, s. 1557.
- [22] ONKEN, U., WEILAND, P.: Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol. **10**, 1980, s. 31.
- [23] MERCHUK, J. C., STEIN, Y.: AIChE J. **27**, 1981, s. 377.
- [24] ONKEN, U., WEILAND, P.: Adv. Biotechnol. Proc. **1**, 1983, s. 67.
- [25] GOW, J. S. in Single-Cell Protein II (Eds. S. R. Tannenbaum, D. I. C. Wang), MIT Press, Cambridge 1975, s. 370.
- [26] GASNER, L. L.: Biotechnol. Bioeng. **16**, 1974, s. 1179.
- [27] BELFIELD, A. R.: Experimental studies of oxygen transfer in a split cylinder airlift. M. S. Thesis, Univ. Maryland 1976.
- [28] KUBOTA, H., HOSONO, Y., FUJIE, K.: J. Chem. Eng. Japan **11**, 1978, s. 319.
- [29] BOLTON, D. H., BOUCHARD, J. P., HINES, D. A.: 31st Ann. Purdue Industrial Waste Conference, Lafayette, Indiana, 1976.
- [30] ORAZEM, M. E., ERICKSON, L. E.: Biotechnol. Bioeng. **21**, 1979, s. 69.
- [31] RIECHE, A.: Wiss. Ann. **3**, 1954, s. 705.
- [32] SCHOLLER, H., EIKEMEYER, R.: DB Patent 744'133 (1933).
- [33] SCHOLLER, H., SEIDEL, M.: US Patent 2 188 192 (1937).
- [34] REIFF, F. a spol.: Die Hefen, Bd. II, Carl Hans, Nürnberg 1962, s. 623.
- [35] SCHÖNHUTH, O. in 2. Symp. Tech. Mikrobiol. Berlin 1970 (Ed. H. Dellweg), Institut für Gärungsgewerbe und Biotechnologie, Berlin 1970, s. 81.

Lektoroval Ing. L. Chládek, CSc.

**Páca, I.: Bioreaktory. V. Airlift reaktory. Kvas. prům. 33, 1987. č. 6. s. 176—179.**

Jsou popsány airlift reaktory s vnitřní cirkulací, s vnější cirkulací (tubulární), reaktory s normálním a reverzním směrem toku, reaktor s perforovanými předázkami a mamutkové cirkulační reaktory. U každého typu reaktoru je uveden princip, maximální velikost a možná aplikace.

**Паца, Я.: Биореакторы. V. Airlift реакторы. Квас. прум. 33, 1987, № 6, стр. 176—179.**

Описаны реакторы airlift с внутренней циркуляцией, с внешней циркуляцией (тубулярные), реакторы с нормальным и реверсивным направлением потока, реактор с перфорированными перегородками и воздушно-циркуляционные реакторы. Для каждого типа реактора приведен принцип, максимальный размер и возможное применение.

**Páca, I.: Bioreactors. V. Airlift Reactors. Kvas. prům. 33, 1987. No. 6, pp. 176—179.**

Concentric draft tube (internal loop) reactors with normal flow, with inverse flow and with baffles, tubular loop (external loop) reactors and the Scholler — J. G. vat with mammoth pumps are briefly reviewed. The principle, the maximum vessel volume and possible applications are discussed with each type of the reactor.

**Páca, I.: Bioreaktoren. V. Airlift-Reaktoren. Kvas. prům. 33, 1987, Nr. 6. S. 176—179.**

Es werden folgende Zirkulationsreaktorentypen beschrieben: Airlift-Reaktoren mit innerer Zirkulation, mit äusserer Zirkulation (tabulare), Reaktoren mit normaler und reverser Flußrichtung, Reaktoren mit perforierter Scheidenwänden und Mammutpumpe-Zirkulationsreaktoren. Bei jedem Reaktortyp wird das Arbeitsprinzip, die Maximalgrösse und die Applikationsmöglichkeit angeführt.