

## **Návrhové parametry a separační účinnost flotace - ověření v provozu první vodárenské flotace v ČR na ÚV Mostiště**

*Doc. Ing. Petr Dolejš, CSc.*

**W&ET Team**, Box 27, Písecká 2, 370 11 České Budějovice  
a **FCh VUT, Brno**  
e-mail: petr.dolejs@cmail.cz

---

### **Úvod**

Flotace rozpuštěným vzduchem (DAF – dissolved air flotation) je separační proces, který slouží k oddělování suspendovaných nebo vločkovitých částic či organismů od kapaliny. Pro úpravu pitných vod je tento proces používán již zhruba 40 let a ve vodárensky vyspělých zemích je již dlouhou dobu považován za standardní proces. Postupně se v praxi ukázalo, že flotace je vynikající separační proces zejména při úpravě povrchových vod s nízkým zákalem, vyšším obsahem organických látek a zejména eutrofizovaných vod s vysokými počty organismů. V současné době jednoznačně tím nejlepším procesem pro první separační stupně upravených takových typů surové vody, s jakými se setkáváme v naprosté většině našich povrchových zdrojů.

Existují různé typy flotace. Flotace rozpuštěným vzduchem (čili vzduchem, který je ve vodě rozpuštěn za zvýšeného tlaku) byla patentována již roku 1924 Petersonem a Sveenem [1]. Použití flotace rozpuštěným vzduchem pro úpravu pitné vody se datuje od 60. let dvacátého století. Tento proces je úspěšně provozován na úpravárnách vody zejména ve Skandinávii a Velké Británii a dále pak v USA, Kanadě, Jižní Africe, Belgii, Holandsku, Austrálii a v řadě dalších zemí. Například v roce 1991 bylo ve Švédsku v provozu 50 úpraven vody s DAF [2] a ve velké Británii jich bylo přibližně 90 [3].

### **Princip flotace rozpuštěným vzduchem**

Nejnámějším procesem, který je využíván ve vodárenství pro první separační stupně upraven, je sedimentace. Sedimentace je založena na tom, že v gravitačním poli se částice těžší než kapalina pohybují ve směru gravitace.

Principem flotace rozpuštěným vzduchem je, že se částice (například vzniklé koagulací) spojují s mikrobublínkami a tyto agregáty mají výrazně nižší specifickou hmotnost než voda. Stoupají proto k hladině kapaliny tj. proti působení gravitace. Mikrobublínky jsou vytvářeny speciálními tryskami poblíž dna flotační nádrže v tzv. kontaktní (reakční) zóně. V ní dochází ke spojování částic (vloček) s mikrobublínkami, které jsou tam ve velkém početním přebytku v porovnání s počtem částic, které přicházejí ve vodě do kontaktní zóny z agregačních reaktorů (flokulace). Na hladině separační zóny se tvoří vrstva vyflotovaného kalu, která je mechanicky nebo hydraulicky odstraňována. Upravená voda je odebírána systémem sběrného potrubí nad dnem separační části flotační nádrže.

Schéma flotace rozpuštěným vzduchem je znázorněno na obr. 1. Tam vidíme, v jakém místě flotační jednotky dochází k interakci mezi suspenzí a mikrobublínkami, které jsou po průchodu tlakové vody s rozpuštěným vzduchem generovány speciálními tryskami. Tlakový vzduch se ve vodě rozpouští podle Henryho zákona o rozpouštění plynů v kapalinách. Při úniku vody (nasycené za tlaku několika stovek kPa rozpuštěným vzduchem) speciálními tryskami do prostoru, kde je již jen běžný hydrostatický tlak, vznikají milióny „mikrobublínek“ o průměru cca 30 - 100  $\mu\text{m}$ . Tyto bublinky obklopují částice přicházející do reakční zóny flotace, spojují se s nimi a vznikají agregáty částic a bublinek. Tyto agregáty jsou vynášeny na povrch kapaliny.

Ze Stokesovy rovnice (1), která nám postačí k ilustraci definice sedimentační rychlosti, vyplývá, že jsou jen dvě proměnné, které můžeme technologicky ovlivnit.

$$u_p = \frac{g (\rho_p - \rho) d_p^2}{18 \mu} \quad (1)$$

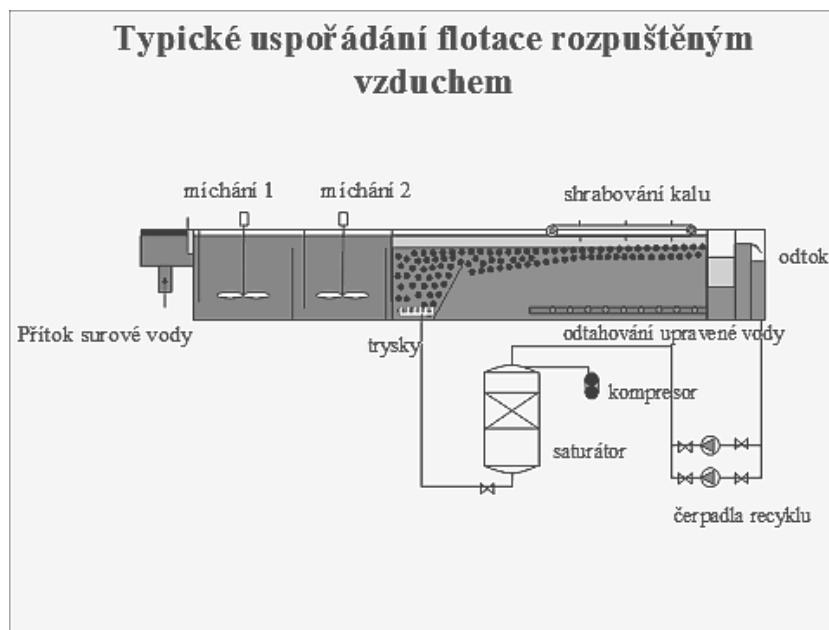
kde:  $u_p$  – sedimentační rychlost částice (nebo při změně znaménka vzestupná rychlost agregátu částice s mikrobublínkami vzduchu při flotaci)  
 $g$  – gravitační zrychlení  
 $\rho_p$  – hustota částice  
 $\rho$  – hustota kapaliny  
 $d_p$  – průměr částice  
 $\mu$  – dynamická viskozita kapaliny

Technologicky můžeme ovlivnit: 1) rozdíl mezi specifickou hmotností kapaliny a částice a 2) velikosti částice. Protože specifická hmotnost vloček, které vznikají při úpravě vody koagulací, se pohybuje někde v rozsahu od 1.01 do 1.05, což je číselně velmi blízko specifické hmotnosti vody, je tím dosti omezen hnací potenciál sedimentace. To se projevuje velmi výrazně zejména v obdobích úpravy chladné vody, kdy stoupá jak viskozita, tak hustota vody. To je také důvodem, proč je účinnost separace při flotaci podstatně méně ovlivněna změnami teploty vody. Pro dobré výsledky sedimentace je proto nezbytné vytvářet alespoň co největší vločky a umět je šetrně transportovat do sedimentační nádrže.

Pokud se při flotaci částice spojí např. jen s jednou stejně velkou bublinou vzduchu, relativní specifická hmotnost tohoto agregátu je rázem podstatně menší (zhruba poloviční) než specifická hmotnost vody a hnací potenciál tohoto separačního procesu (daný rozdílem specifických hmotností) je zhruba o jeden řád vyšší než v případě sedimentace. Z toho mj. vyplývá, proč flotace pracuje běžně při povrchovém zatížení o jeden řád vyšším než sedimentace. To pak následně znamená, že abychom dosáhli u flotace stejné separační účinnosti jako u sedimentace, bude zhruba potřebná jen desetina plochy, kterou by zabírala sedimentace. Dále to uvidíme na návrhových parametrech flotace.

### **Návrhové parametry flotace rozpuštěným vzduchem (DAF)**

V tabulce 1 jsou uvedeny základní návrhové parametry DAF jednotek, které se používají v praxi. Většina hodnot je uvedena v rozmezí, jak je možné je nalézt v různých aplikacích v praxi.



**Obr. 1. Schematické znázornění úpravy vody flotací rozpuštěným vzduchem**

Před flotací je třeba připravit suspenzi destabilizací dávkováním koagulantu podobně, jak je tomu před jinými běžnými prvními separačními stupni. Optimální dávka koagulantu je stejná a nezávisí na separačním postupu, který po stupni tvorby suspenze následuje. Závisí jen na chemické charakteristice surové vody a mírně také na dalších faktorech, jako je např. teplota či doba, která uběhne mezi homogenizací koagulantu a separací suspenze. Více je k problematice optimální dávky a optimalizace chemických parametrů koagulace možné nalézt například v publikacích [4-6].

Protože není nezbytné a dokonce to není ani žádoucí, aby se v agregačních reaktorech vytvářely velké vločky s vysokou sedimentační rychlostí, je možné u přípravy suspenze pro flotaci v některých případech zkrátit dobu zdržení v agregačních reaktorech (flokulaci). To může přinést další zmenšení celého zařízení, tentokrát na straně přípravy suspenze.

Porovnáme-li doporučené hodnoty povrchového zatížení sedimentace s flotací, vidíme že u flotace je povrchové zatížení o řád vyšší. Dokonce jsou již v provozu flotační jednotky, které pracují s povrchovým zatížením až 42 m/h [7].

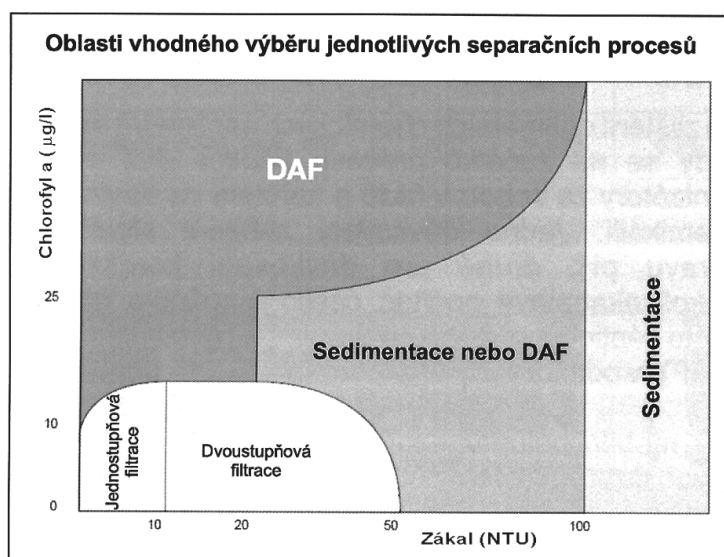
Pro přehlednou orientaci o vhodných oblastech použití DAF uvádím obr. 2, který je zpracován podle [8]. Protože naprostá většina našich povrchových vod má celoročně velmi nízký zákal, prakticky je pro nás zajímavá jen oblast těsně podél osy Y. Tato osa je označena na obrázku „chlorofyl a“, ale protože i přirozené organické látky (huminové látky) tvoří agregáty s podobnými separačními vlastnostmi jako organismy (tj. se specifickou hmotností, která se velmi málo liší od specifické hmotnosti vody), platí tento obrázek i v případě, že by na osu Y byla vynášena například CHSK, TOC či barva.

**Tabulka 1. Typické návrhové parametry flotace (DAF)**

návrhový parametr	rozměr	hodnota parametru
povrchové zatížení	m/h	10 – 20
doba zdržení v kontaktní zóně	s	60 – 240
doba zdržení v separační zóně	min.	5 – 15
hloubka	m	1.5 – 3.2
pracovní tlak v saturátoru	kPa	400 – 620
recirkulační poměr	%	6 – 15
velikost mikrobublin	μm	10 – 100
koncentrace mikrobublin	bublin/ml	1.0 – 2.0 · 10 <sup>5</sup>
účinnost saturátoru s náplní	%	90
sušina kalu	%	0.5 – 6.0

**Tabulka 2. Typické hodnoty povrchového zatížení sedimentačních nádrží podle druhu odstraňovaných částic**

odstraňování zákalu	1.7 m/h
odstraňování barvy	1.2 m/h
odstraňování řas	0.8 m/h



**Obr. 2. Oblasti vhodného výběru separačních procesů**

### Separční účinnost flotace

Výsledků, které prezentují separační účinnost flotace a případně i její srovnání s jinými jednotkovými procesy (sedimentací, různými druhy čističů) je v literatuře již velké množství. Uvedu zde v tabulce 3 pro ilustraci pouze jedno srovnání zahraničních výsledků dosažených při vzájemném porovnávání účinnosti odstranění různých řas sedimentací a flotací za stejných chemických parametrů koagulace (dávka koagulantu, typ koagulantu, pH) a identických podmínek přípravy suspenze [9, 10].

**Tabulka 3. Porovnání účinnosti separace některých řas sedimentací a flotaci**

druh organismu	počty v surové vodě buňky/ml	po sedimentaci buňky/ml	po flotaci buňky/ml
<i>Aphanizomenon</i>	179 000	23 000	2 800
<i>Microcystis</i>	102 000	24 000	2 000
<i>Stephanodiscus</i>	53 000	21 000	9 100
<i>Chlorella</i>	23 000	3 600	2 200

Z výsledků vidíme, že u některých druhů řas je separační účinnost o více než jeden řád lepší. Podobné výsledky potvrzuje řada dalších prací. Z provozního hlediska je jasné, že je veliký rozdíl, pokud na filtraci odchází voda z prvního separačního stupně s 20 000 a nebo jen 2 000 buňkami na ml. Pokud je filtrace dobře navržená a provozovaná, můžeme očekávat zhruba až 99% separační účinnost a je velká šance, že voda po flotaci a filtraci bude v takovém případě splňovat požadavky vyhlášky na kvalitu pitné vody. Pokud by byla předřazena prostá sedimentace, bude na filtraci její o jeden řád horší separační účinnost v tomto případě velmi chybět. Ukazují to i další výsledky z práce [10]. Zatímco v lince čiríč-filtrace bylo dosaženo z původních 102 000 buněk *Microcystis* v upravené vodě 4 600 buněk/ml, v lince flotace-filtrace to bylo jen 58. Tady se ukázala mj. i zajímavá synergie procesu flotace a filtrace, která prohloubila rozdíl mezi separačními účinnostmi obou porovnávaných linek téměř na dva řády.

Část našich prvních výsledků získaných při testovacím provozu nově postavené první flotace v ČR na ÚV Mostišť jsme publikovali již v [11]. Proto zde shrneme pro informaci závěry, které jsme zjistili.

Účinnost separace železa v období provádění zkušebních testů byla vynikající. Při dávce koagulantu, která odpovídala 14.8 mg/l (plus koncentraci železa v surové vodě kolem 0.5 mg/l) byla separační účinnost tohoto prvního separačního stupně přes 98 %. Koncentrace zbytkového železa v odtoku z flotace se pohybovaly od 0.18 do 0.35 mg/l.

Silnou stránkou flotace je účinnost odstranění organismů. Proto je ve světě navrhována i na úpravu silně eutrofizovaných vod, kde jiné separační procesy selhávají. V tomto případě se separační účinnost pohybuje mezi 98 – 99.9 %. Z počtů kolem 400 org/ml bylo v odtoku z flotace stabilně dosahováno počtů od 0 do 6 org/ml.

Účinnost odstranění organických látek vyjádřená jako CHSK(Mn) se pohybuje stabilně okolo 70 % a podobně je tomu i při vyjádření separační účinnosti parametry absorbance při 254 nm a barva. Na odtoku z flotace byl měřen kontinuálně zákal, který se stejně jako ostatní sledované hodnoty během několika desítek minut od spuštění provozu ustálil na hodnotách mezi 0.15 – 0.20 ZF. Velkou provozní výhodou flotace také je, že její spuštění nedává jakoukoli šanci průniku znečištění do upravené vody. Při najíždění flotace je vždy napřed spuštěn saturátor, který generuje mikrobublinky. Přicházející suspenze (přítok upravované vody do reakční zóny) je tak okamžitě v kontaktu s mrakem mikrobublinek, které působí separaci suspenze.

Zjistili jsme také vynikající provozní robustnost instalované flotace. Při zkušebním provozu jsme nastavovali různé extrémní provozní stavy a to zejména při testování funkce řízení a automatizace provozu. Získávané hodnoty zbytkových koncentrací prokázaly, že se separační proces chová při okrajových provozních podmínkách, které

by ale v praxi nikdy nastat neměly velmi dobře a zhoršení kvality vody na odtoku by nijak neohrozilo separační účinnost filtrace a kvalitu upravené vody. To dává provozovateli záruku velmi vysoké provozní bezpečnosti tohoto stupně úpravy vody.

## Závěr

Proces flotace rozpuštěným vzduchem (DAF) je velmi vhodný jako první separační stupeň v případě, že surová voda by byla obtížně upravitelná jednostupňovou úpravou a obsahuje zejména zvýšené koncentrace přirozených organických látek a organismů. Návrhové parametry flotace zaručují, že tento proces je oproti procesům založeným na sedimentaci velice kompaktní. Z provozního hlediska se jedná o proces velmi robustní, který provozovateli usnadňuje udržování vysoké separační účinnosti a dosahování vysoké kvality upravené vody. První úpravna pitné vody, kde byla v ČR realizovaná flotace rozpuštěným vzduchem, je ÚV Mostiště, kterou provozuje VAS, a.s. Bylo ověřeno, že separační účinnost této flotace je skutečně vynikající. Kvalita vody odcházející z tohoto prvního separačního stupně dokonce téměř splňovala požadavky normy na pitnou vodu. Při ustáleném provozu, který simuloval budoucí provozní podmínky, byly stabilně dosahovány hodnoty zbytkového zákalu mezi 0.15 – 0.20 NTU, koncentrace železa se pohybovaly od 0.18 do 0.35 mg/l a počty organismů se pohybovaly v intervalu od 0 do 6 org./ml. I při 50% hydraulickém přetížení flotace byly dosahované výsledky prakticky shodné s kvalitou upravené vody, která odcházela z flotace při provozu se jmenovitým výkonem úpravní. Realizací DAF na ÚV Mostiště udělalo celé české vodárenství významný krok kupředu.

## Literatura

1. Lungren H.: Theory and practice of dissolved-air flotation. J. Filtration and Separation, 13, No. 1, p. 24 (1976).
2. Dahlquist J.: The Scandinavian experience with DAF. Workshop on Dissolved air flotation (DAF) proceedings. IWSA-IAWPRC and TECHWARE, Antwerp, 1991.
3. Schofield T.: The Severn Trent water experience with DAF. Workshop on Dissolved air flotation (DAF) proceedings. IWSA-IAWPRC and TECHWARE, Antwerp, 1991.
4. Dolejš P.: Stanovení optimálních dávek při úpravě huminových vod koagulací. 1. Úvod a teorie. Vodní hospodářství - Ochrana ovzduší, 44, č. 3, s. 2-5 (1994).
5. Dolejš P.: Stanovení optimálních dávek při úpravě huminových vod koagulací. 2. Experimentální část. Vodní hospodářství - Ochrana ovzduší, 44, č. 7, s. 10-15 (1994).
6. Dolejš P.: Vliv teploty na koagulaci při úpravě huminových vod. Sborník konference „Pitná voda z údolních nádrží 1995“, s. 68-75. W&ET Team, Č.Budějovice 1995.
7. Amato T. a kol.: An integrated approach to dissolved air flotation. Wat. Sci. Technol., 43, 8, 19-26 (2001).
8. Janssens J., Buekens A.: Assessment of Process Selection for Particle Removal in Surface Water Treatment. Aqua, 42, No. 5, s. 279-288 (1993).
9. Rees A. a kol.: Water Clarification by Flotation-5, TR 114. Water Research Centre Medmenham, U.K., 1979.
10. Zabel T.F., Melbourne J.D.: Flotation. V knize: Developments in Water Treatment, vol. 1. W.M. Lewis (Ed.). Applied Science Publ. Ltd., London, 1980.
11. Dolejš P., Dobiáš P., Mazel L.: Provozní výsledky první vodárenské flotace v ČR realizované na ÚV Mostiště. Sborník konference Vodárenská biologie 2006, s. 92-97. Praha 31.1.-2.2.2006. VŠCHT Praha a Ekomonitor, s.r.o. Chrudim, Praha 2006.