

# PROCES VYSOKORYCHLOSTNÍHO ČIŘENÍ – MODERNÍ TECHNOLOGIE ÚPRAVY VODY

Martin PIVOKONSKÝ, Pavel POLÁŠEK, Bohuslav KNESL  
Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v.v.i. Praha, pivo@ih.cas.cz

*Tvorba separovatelných agregátů je podporována mechanickým nebo hydraulickým mícháním. Význam hydrodynamických podmínek, při kterých dochází k tvorbě agregátů, tj. vliv intenzity, charakterizované středním rychlostním gradientem  $\bar{G}$ , dobou míchání  $T$  a rozložením rychlostního pole v míchaném objemu vody, není zcela ujasněn. Proto ani přístup projektantů k navrhování flokulačních zařízení není jednotný. Pevně zakořeněn je názor, a to jak mezi projektanty, tak i mezi provozovateli, že rychle sedimentující jsou jen velké vločky, které vznikají jen při nízké ( $\bar{G} < 50 \text{ s}^{-1}$ ), případně postupně klesající ( $\bar{G} = 50\text{--}5 \text{ s}^{-1}$ ) intenzitě míchání. Tento mýtus byl vyvrácen provozními výsledky s HR čířičem ( $v = 25 \text{ m.h}^{-1}$ ), pracujícím na principu vysokorychlostního číření (High Rate Clarification – HRC – Technology), ve kterém flokulační proces probíhá při vysoké intenzitě míchání ( $\bar{G} = \text{cca } 330 \text{ s}^{-1}$ ).*

## Úvod

Kvalita upravené vody je závislá na reakčních podmínkách, za kterých probíhá proces úpravy vody, zatímco separační vlastnosti agregátů jsou rozhodujícím způsobem ovlivněny podmínkami míchání, při kterých jsou tvořeny. Výzkum vlivu podmínek míchání ukázal, že intenzita agregačního míchání charakterizovaná rychlostním gradientem je přirozeným prostředkem ovlivňujícím hustotu tvořených agregátů [1–9] a že zhuštěné vločky umožňují výrazné zvýšení hydraulického zatížení sedimentačního stupně [10–14].

Při provozu úpraven vody jsou běžně optimalizovány chemické faktory, které ovlivňují destabilizaci částic příměsí (především dávka destabilizačního činidla a reakční pH). Hydrodynamické podmínky, při kterých probíhá agregace destabilizovaných částic nečistot tj. intenzita míchání charakterizovaná rychlostním gradientem  $\bar{G}$ , časem  $T$  a rozložením rychlostního gradientu v míchaném objemu a dále metody separace vytvořených agregátů optimalizovány zpravidla nejsou. V praxi je obvykle suspenze tvořena při nízkých rychlostních gradientech, kdy dochází k tvorbě poměrně velkých agregátů s heterogenními vlastnostmi (velikostí, strukturou a hustotou). Tato skutečnost následně nepříznivě ovlivňuje sedimentační rychlost, na kterou mohou být gravitační separační systémy navrhovány. Důvodem je skutečnost, že sedimentační rychlost musí být navržena z hlediska nejmenší velikostní frakce agregátů, kterou má zařízení odstranit. V konečném důsledku tak musí být navrhovány velké a nákladné sedimentační systémy. Intensifikace procesu tvorby agregátů, která bude mít za následek zmenšení půdorysu úpraven a úsporu nákladů na jejich výstavbu i provoz, je v zájmu jak vlastníků, tak i provozovatelů těchto objektů. Existuje celá řada možností, jak dosáhnout tohoto cíle, ne všechny jsou ale praktické a bez vedlejších účinků. Nejvýhodnější je metoda zhušťování agregátů v průběhu procesu jejich tvorby a jejich následné spojování do velkých a těžkých aglomerátů. Tato metoda, vyvinutá zaměstnanci ÚH AV ČR, v.v.i., je známa jako HRC (High Rate Clarification) technologie (technologie vysokorychlostního číření).

## Proces vysokorychlostního číření (HRC technologie)

Úsilí vynaložené na intenzifikaci čířičího procesu vedlo k vyvinutí všeobecně aplikovatelné technologie vysokorychlostního číření, známé jako HRC (High Rate Clarification) technologie. Tato technologie zahrnuje dvě metody tvorby rychle sedimentující vločkovité suspenze, které mohou být aplikovány samostatně nebo v návaznosti za sebou. Jedná se o:

- IHDS (Inline High Density Suspension) – metoda průběžné tvorby agregátů vysoké hustoty,
- POA proces – metoda post-ortokinetické aglomerace vytvořených agregátů do velkých a rychle usaditelných aglomerátů působením pomocných organických flokulantů.

Na základě HRC technologie byly vyvinuty dva základní typy čířičů:

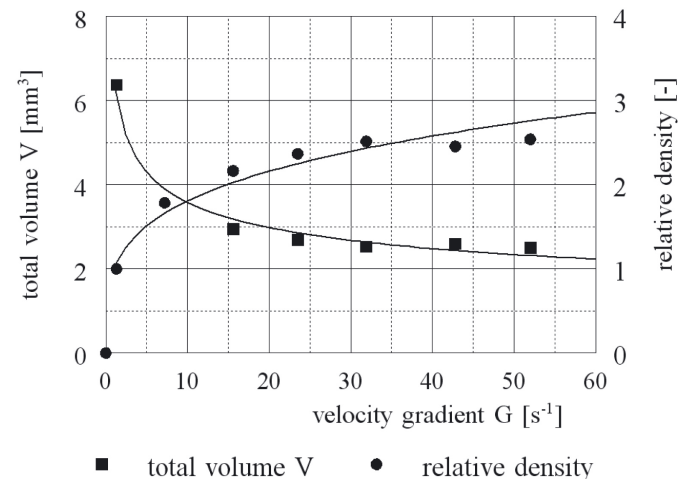
- Vysokorychlostní (HR-CSAV) čířič s dokonale vznášeným vločko-

- vým mrakem, který je vhodný pro kontinuální vyrovnaný provoz,
- Vysokorychlostní P-typ sedimentačního čířiče, který je vhodný pro přerušovaný provoz.

## Metoda průběžné tvorby agregátů vysoké hustoty (IHDS proces)

Teoretická analýza procesu agregace částic a výsledky získané z výzkumu vlivu intenzity míchání na vlastnosti tvořených agregátů ukázaly, že intenzita míchání je přirozeným prostředkem výrazně ovlivňujícím vlastnosti tvořených agregátů, které následně ovlivňují jejich separační vlastnosti, jako je jejich velikost, objem a tvar, vnitřní struktura, kompaktnost, pórovitost a tedy i hustota [2–7]. Závislost objemu a relativní hustoty tvořených agregátů na rychlostním gradientu je znázorněna na obr. 1. Jak je z obrázku zřejmé objem tvořených agregátů klesá s rostoucím  $\bar{G}$  a jejich relativní hustota se naopak s rostoucím  $\bar{G}$  zvyšuje.

Obr. 1 – Relativní hustota makro-agregátů agregovaných z mikro-agregátů ve flokulačním optimu při různých intenzitách míchání

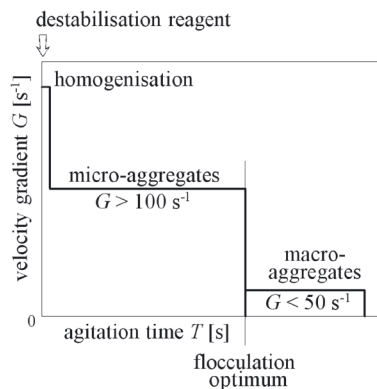


IHDS metoda tvorby vločkovité suspenze probíhá při vysokých rychlostních gradientech  $\bar{G}_H > 50 \text{ s}^{-1}$ , přednostně však mezi  $\bar{G}_H = 100\text{--}400 \text{ s}^{-1}$ , a to po celou dobu flokulačního procesu až do dosažení flokulačního optima. Rychlostní gradienty  $\bar{G}_H > 400 \text{ s}^{-1}$ , i když aplikovatelné, nemají již žádný praktický ani ekonomický přínos. Výslednými agregáty IHDS procesu jsou velmi kompaktní mikro-agregáty, které mají značně homogenní strukturu [3–5,8,9,13,15]. Průběh IHDS procesu z hlediska intenzity míchání je znázorněn na obr. 2.

IHDS proces nemění princip tvorby agregátů, tj. agregátní destabilizace částic znečišťujících příměsí a vlastní mechanismus tvorby vločkovitých agregátů. Při tomto procesu je pouze maximálně využíván vliv vysokých rychlostí pohybu agregátů k jejich kompaktnímu uspořádání. Vysokých intenzit míchání je tedy využíváno k zhušťování vytvářených agregátů, aniž by bylo nutné aplikovat

látku zatěžující agregáty (např. bentonit).

**Obr. 2 – Ilustrace metody průběžné tvorby agregátů o vysoké hustotě (IHDS proces)**

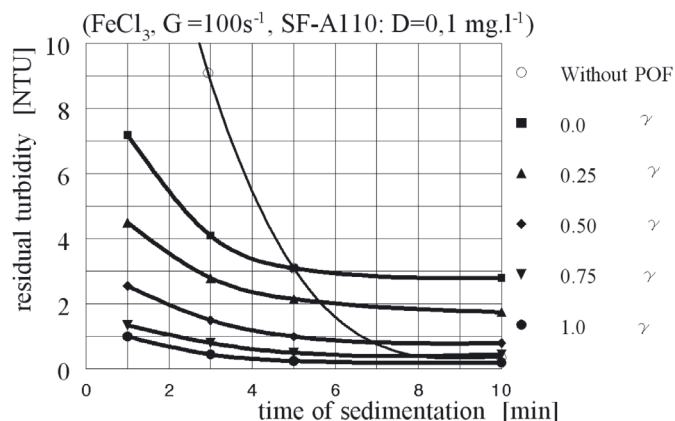


Pokud je v případě dvoustupňové separace vyžadována tvorba rychle sedimentujících makro-agregátů, potom mikro-agregáty vytvořené při IHDS procesu za vysokých hodnot gradientů rychlosti ( $\bar{G}_L = \text{cca } 300 \text{ s}^{-1}$ ) jsou dále agregovány při následné aplikaci nízkých gradientů rychlosti  $\bar{G}_L < 50 \text{ s}^{-1}$ , přednostně  $\bar{G}_L < 10 \text{ s}^{-1}$ . Nízké hodnoty gradientů jsou aplikovány cca 3–5 minut, během které mikro-agregáty dorostou do velikosti makro-agregátů.

#### Metoda post-ortokinetické aglomerace

Pomocné organické flokulanty (POF) jsou používány ve vodárenství pro jejich dominantní adhezní vlastnosti odstraňující náchylnost vytvořených agregátů k rozbíjení. Při jejich aplikaci vznikají rozměrné, velmi rychle sedimentující vločkovité aglomeráty. Riziko aplikace POF ale spočívá ve skutečnosti, že se jedná o silně hydrofilní koloidy, které jsou-li nesprávně aplikovány, významně zhoršují účinnost procesu agregace částic. Efekt POF přidaného do agregujícího systému v jeho různých stádiích vyjádřených poměrem k flokulačnímu optimu je znázorněn na obr. 3. POF dávkan do systému, ve kterém pokračuje proces agregace produkuje ochranný koloid, který brání kvantitativnímu průběhu agregačního procesu a snižuje tak jeho účinnost. Efekt ochranného účinku POF klesá s rostoucí mírou agregačního procesu dosaženého před přidáním POF. Optimální podmínky pro přidání POF, tj. nejvyšší možná dosažitelná kvalita upravené vody a nejrychleji usaditelná suspenze, jsou dosaženy, pokud je POF přidán v oblasti flokulačního optima. Tato metoda aplikace POF je známá jako proces post-ortokinetické aglomerace (POA) [8,9]. Dávkou POF je možné kontrolovat usaditelnost vytvořených aglomerátů v širokém rozsahu a aglomerační účinnost značně závisí na použitém POF a ředění jeho roztoku.

**Obr. 3. Efekt POF přidaného do systému v různých stádiích agregace ( $\gamma$ )**

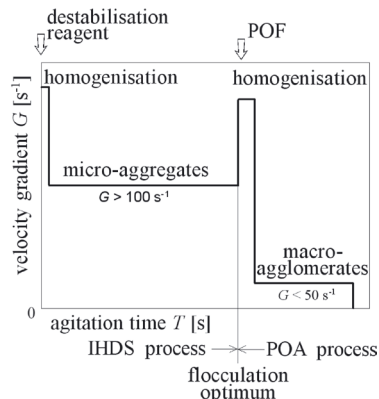


V procesu POA, který probíhá za podmínek pomalého míchání, tvoří agregáty vytvořené za podmínek IHDS procesu základní stavební jednotky, které jsou působením POF přemostěny do velkých aglomerátů. Tyto agregáty plně využívají strukturu a vysokou hustotu jednotlivých stavebních mikro-agregátů. Výsledné agregáty mají

nesrovnatelně vyšší sedimentační rychlost než agregáty vytvořené za nízkých  $\bar{G}$  běžně používaných ve flokulačním procesu.

Průběh POF technologie z hlediska intenzity míchání je znázorněn na obr. 4.

**Obr. 4 – Ilustrace metody vysokorychlostního čiření (HRC technologie)**



#### HR-ČSAV čirič

Nejvhodnějším typem čiriče s vločkovitým mrakem, který se hodí pro podmínky HRC procesu tvorby agregátů je ČSAV čirič. Tento čirič byl na základě nových poznatků o mechanismu tvorby agregátů při vysokých hodnotách  $\bar{G}$  modifikován a testován, s ohledem na možnosti jedno z autorů, v Rand Water Board úpravně Zuikerbosch a na úpravě v Bethlehemu v Jihoafrické republice. Tyto čiriče byly navrženy na následující provozní parametry:

- vzestupná rychlost v hladině vločkového mraku  $v = 10,8 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ ,
- celková doba zdržení v čiriči včetně zahušťovacího prostoru  $T = 28 \text{ min.}$ ,
- rychlostní gradient nastavitelný v rozsahu  $\bar{G} = 0\text{--}500 \text{ s}^{-1}$ ,
- IHDS proces tvorby mikro-agregátů probíhal při  $\bar{G} = 125$  až  $380 \text{ s}^{-1}$  – hodnota  $\bar{G}$  se nastavuje v závislosti na průtoku a použitém koagulantu.

Upravována byla voda z přehrady Saulspoor. Zákal surové vody se pohyboval v rozsahu 30–250 NTU,  $\text{KNK}_{4,5}$  v hodnotách 1,8–3,2  $\text{mval}\cdot\text{l}^{-1}$  a  $\text{CHSK}_{\text{Mn}}$  dosahoval hodnot cca 6,5  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ . Jako koagulant byl použit síran hlinitý, jako pomocný flokulant Superfloc SA-A110 nebo Allied Colloid LT-25. Provozní účinnost čiriče byla hodnocena pomocí zbytkového zákalu a  $\text{CHSK}_{\text{Mn}}$ .

Při provozu čiriče byly dosaženy následující výsledky:

- vzestupná rychlost v hladině vločkového mraku dosahovala hodnot  $v = 10\text{--}25,5 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ ,
- celková doba zdržení v čiriči včetně zahušťovacího prostoru  $T = 11,9\text{--}28,5 \text{ min.}$ ,
- IHDS proces tvorby mikro-agregátů probíhal při  $\bar{G} = 125\text{--}380 \text{ s}^{-1}$  – hodnota  $\bar{G}$  se nastavovala v závislosti na průtoku a použitém koagulantu,
- zbytkový zákal v odtoku z čiriče 4–9 NTU, zbytkové hodnoty  $\text{CHSK}_{\text{Mn}}$  1,5–2,1  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  (hodnoty závisí na dávkě pomocného organického flokulantu),
- koncentrace vypouštěného kalu byla 73,05  $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ,
- dosažená úspora v dávkě síranu hlinitého při porovnání s provozem tradičních čiričů (Clariflocculator, Pretreater) produkujícími stejnou kvalitu vody byla cca 13%.

Tyto vynikající provozní výsledky dosažené s HR čiričem umožnily postavení nové úpravně vody Saulspoor zásobující město Bethlehem s použitím HRC technologie. Tato úpravna má v současné době kapacitu 40000  $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ . V provozu jsou čtyři HR čiriče o vnitřním průměru 8,65 m a kapacitě 10000  $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ . Tyto čiriče jsou navrženy na vzestupnou rychlost 11  $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$  v hladině vločkového mraku. Při zkušebním provozu byl čirič provozován dokonce při vzestupné

Dokončení na další straně

rychlosti  $16,5 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ , což odpovídá 50% přetížení. Zbytkový zákal v odtoku z čířiče se pohyboval mezi 1,5–4,0 NTU, zbytkové  $\text{CHSK}_{\text{Mn}}$  okolo  $1,3 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ .

#### P-čířič

P-čířič o vnitřním průměru 13,0 m a kapacitě  $10000 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$  byl instalován na úpravně Hunyani (zásobující město Harare v Zimbabwe). Důvodem instalace bylo odvodnění a zpětné získání vody z kalu vypouštěného z Pulsatoru (přibližně 50 % vtokového množství vody je vypouštěno k udržení přijatelné stability jeho provozu). Požadavkem této instalace bylo získání 70 % vody z primárního kalu (zbytkový obsah sušiny –  $860 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ) s maximální obsahem sušiny menším než  $25 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  na odtoku z čířiče. Předpokládaná maximální dávka POF byla stanovena na  $1,5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ . V reálu pak bylo dosaženo 82% odvodnění kalu. Zbytkový obsah sušiny primárního kalu v upravené vodě dosahoval hodnot menších než  $4 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , a to při dávce POF pouhých  $0,5 \text{ mg/l}$  [16]. V průběhu času byl průtok tímto čířičem postupně úspěšně zvyšován až na trojnásobek původní kapacity, což odpovídá vzestupné rychlosti  $10,2 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ .

#### Závěr

Praktická aplikace HRC technologie a jejích dílčích IHDS a POA procesů plně ověřila vhodnost této technologie pro instalaci jak v nových úpravách vody, tak i pro zlepšení účinnosti a kapacity existujících provozů. Technologie umožňují intenzifikaci separačních procesů pomocí optimalizace hydrodynamických podmínek tvorby agregátů, a to prakticky bez ohledu na kvalitu či charakter surové vody. Principy IHDS a POA procesů jsou však plně aplikovatelné na provozy čistíren průmyslových odpadních vod či na jiné technologické postupy využívající agregace částic v kapalném prostředí.

*Poděkování: Výzkum, jehož dílčí výsledky jsou publikovány v tomto příspěvku, byl řešen v rámci projektu GA ČR 103/07/1016 a výzkumného plánu AV0Z20600510. Autoři děkují za poskytnutou finanční podporu.*

#### Literatura

- Polášek P., Mutl S. (1995a): Guidelines to coagulation and flocculation for surface waters, Volume 1: Design principles for coagulation and flocculation systems. PPA – Consulting Engineers, Johannesburg, South Africa.
- Mutl S., Knesl B., Pivokonský M., Polášek P. (2001): Vliv intenzity a doby míchání na účinnost separačních procesů. Sborník konference „Pitná voda 2001“ v Táboře, W&ET Team.
- Pivokonský M. (2002): Vliv intenzity a doby míchání na morfologické vlastnosti agregátů tvořených při úpravě vody. Doktorská disertační práce, PŘF UK, Praha.
- Mutl S., Pivokonský M. (2002): Vliv míchání na účinnost separačních procesů. Sborník 18. semináře Aktuální otázky vodárenské biologie. VŠCHT Praha, 18, 48-52.
- Mutl S., Polášek P., Pivokonský M., Klouček O. (2006). The influence of G and T on the course of aggregation at treatment of medium polluted surface water. Wat. Sci. Tech. – Water Supply. 6, 39-48.
- Pivokonská L., Pivokonský M. (2006). The influence of conditions of agitation on the properties of aggregates formed during treatment of water with content of humic substance. Wat. Sci. & Tech. – Water Supply. 6, 211-218.
- Pivokonská L. (2007): Vliv fyzikálních a chemických parametrů na úpravu povrchových vod s obsahem huminových látek. Doktorská disertační práce, ČVUT v Praze, Praha.
- Polasek P. (1970): S.A. Patents
- Polasek P. (1972): S.A. Patents
- Polasek P. a Van Duuren F.A. (1981): The performance results from the operation of High Rate clarifiers at Bethlehem municipal waterworks. Proc. Int. Conf. Water Industry 81, Brighton, UK.
- Polasek P. a Mangeot L.C.P. (1983): Design features and performance efficiency of Saulspoort waterworks. Proc. IWPC Biennial Conf. East London, UK.
- Polasek P. a Mangeot L.C.P. (1986): Systems for intensified sedimentation. J.WS&E 25, p.31–35, 1986.
- Polasek P. a Mutl S. (1995b): Guidelines to coagulation and flocculation for surface waters, Volume 2: Evaluation of treatment process efficiency of different waterworks – case studies. PPA – Consulting Engineers, Johannesburg, South Africa.
- Polasek P. a Mutl S. (2005b): Acceleration of gravity separation process. J.Filtration 5, 33–39.
- Polasek P. a Mutl S. (2005a): High Rate Clarification Technology. Proc. IWA Spec. Conf.: Particle Separation 2005, Seoul, South Korea.
- Polasek P. a Mutl S. (1995c): Appraisal of treatment process efficiency of modules 2 and 3 installed at Morton Jaffrey Waterworks, Harare municipality. Report to Hydroproject (Pvt) Ltd. Bulawayo, Zimbabwe

#### Abstract:

##### HIGH RATE CLARIFICATION – MODERN WATER TREATMENT TECHNOLOGY

**Summary:** Separable aggregates formation is sustained by mechanical or hydraulic agitation. The significance of hydrodynamic conditions whereat aggregate formation occurs (i.e. influence of agitation, characterized by the mean velocity gradient  $G$ , duration of agitation  $T$  and velocity field distribution in agitated volume) is not entirely explained yet. That's why the attitude of designers towards projecting of flocculation devices is not unified either. Amongst both designers and waterworks operators, there is the embedded opinion that only large flocs which are formed at low agitation intensity ( $G < 50 \text{ s}^{-1}$ ) or at gradually decreasing agitation intensity (tapered flocculation,  $G = 50\text{--}5 \text{ s}^{-1}$ ) can settle quickly. This myth was disproved by operating results with HR clarifier ( $v = 25 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ ) which works on the principle of High Rate Clarification (HRC) Technology where the flocculation process runs at high intensity agitation ( $G = 330 \text{ s}^{-1}$ ).

**Key words:** agitation, aggregation, high rate clarification, velocity gradient, water treatment