

# HYDRAULICKÉ ROZDÍLY MEZI AGREGAČNÍM MÍCHÁNÍM PÁDLY A DĚROVANÝMI PŘEPÁŽKAMI A JEJICH TECHNOLOGICKÉ A PROVOZNÍ DŮSLEDKY

RNDr. Bohumír Halánek

TZÚV - Brno, tel./fax: 543 245 266

---

Jednou z inovací, která se v poslední době často využívá při rekonstrukcích úpraven vod, je náhrada pádlových míchadel ve vložkových nádržích děrovanými přepážkami [8, 9]. Pro toto jejich použití hovořily zpočátku jen provozně-ekonomické důvody (úspory elektrické energie a nenáročnost děrovaných přepážek na údržbu a opravy), a později i poznatek, že agregační míchání děrovanými přepážkami má srovnatelné a někdy i lepší technologické účinky než agregační míchání pádly. Tento poznatek se opakovaně potvrzoval v řadě úpraven vod, avšak vyskytla se i jedna, v níž tato inovace způsobila nečekanou provozní závadu. Zmíněné případy jsou popsány v dalším textu příspěvku. Má-li se v dosud převážně úspěšném používání děrovaných přepážek jako zařízení na agregační míchání pokračovat bez rizika nepříjemných překvapení, je třeba specifikovat rozdíly mezi agregačním mícháním pádly a děrovanými přepážkami, popsat jejich pozitivní i negativní účinky a nalézt jejich příčiny. To nelze provést jen podle obvykle sledovaných technologických a provozních výsledků úpravy vody při obou těchto způsobech agregačního míchání, ale je třeba se podívat pod hladinu upravované vody, poznat hydraulické procesy, které zde probíhají při míchání pádly a děrovanými přepážkami, a porovnat je s teoretickými požadavky na průběh agregace i s dosud získanými poznatky a zkušenostmi z praxe .

Agregace je proces, během něhož se malé vločky postupně spojují ve stále větší až velké vločky, které lze z upravované vody efektivně odstraňovat jednostupňovou nebo dvoustupňovou separací. Aby mohlo dojít k agregaci, je třeba přiblížit vločky k sobě na vzdálenosti, v nichž se uplatní jejich povrchové přitažlivé síly. Disipaci k tomu potřebné energie zajišťují v upravované vodě mnohočetná turbulentní proudění, která se v ní vyvolávají mícháním. Jejich charakteristikou je rychlostní gradient, který se v praxi běžně vztahuje k větším objemům upravované vody (střední rychlostní gradient). Pro posouzení hydraulických procesů, které probíhají při agregaci, však tato jeho interpretace nepostačuje. Rychlostní gradient je definován jako „rychlostní spád mezi dvěma sousedními vrstvami kapaliny, které se pohybují různými rychlostmi“. Vzhledem k tomu, že agregující vločky jsou rozptýleny v celém objemu upravované vody, musí být i tyto vrstvy (přesněji řečeno vrstvičky) upravované vody a tudíž i rychlostní gradient (přesněji řečeno lokální rychlostní gradienty) distribuovány v celém jejím objemu. Podle svých hodnot a charakteru agregujících vloček mohou tyto lokální rychlostní gradienty buď podporovat agregaci tj. spojování malých vloček nebo ji rušit rozbíjením velkých vloček. Při agregaci však nejde jen o tvorbu jakýchkoli ale takových vloček, jejichž charakter bude umožňovat jejich efektivní jednostupňovou nebo dvoustupňovou separaci. Pro optimální účinek agregace je proto zapotřebí splnit požadavek, aby *rychlostní gradient byl v upravované vodě distribuován tak, aby jeho hodnoty byly v každém čase agregace přiměřené charakteru agregujících vloček a způsobu separace vytvořených vloček. To vyžaduje zajistit i rovnoměrný průtok upravované vody vložkovací nádrží a tím i regulerní časový průběh agregace* [9, 10] .

Pro posuzování hydraulických procesů, které probíhají v upravované vodě při jejím agregačním míchání je vhodné zavést některá **nová kritéria a pojmy**. Jako účelné se jeví posuzovat distribuci rychlostního gradientu samostatně v podélném profilu a v příčných profilech vložkovací nádrže. Podélným profilem se rozumí profil rovnoběžný se směrem průtoku upravované vody, do něhož se promítá časový průběh agregace. Příčné profily jsou kolmé na směr průtoku upravované vody a každý z nich – za předpokladu, že průtok upravované vody vložkovací nádrží je naprosto rovnoměrný (pístový) – odpovídá určitému času agregace. Praktický význam pro posuzování hydraulických procesů, které probíhají při průtoku upravované vody vložkovací nádrží, má pojem plynulost průtoku upravované vody. Plynulý je takový průtok upravované vody, který není rušen nárazem na překážku, kterou musí obtéci, nebo jejímiž otvory musí protéci, nebo která ho donutí změnit směr. Důležitým pojmem při posuzování hydraulických procesů při agregačním míchání děrovanými přepážkami je nárazová zóna. Označuje prostor před děrovanou přepážkou, který je charakterizován zvýšenými hodnotami rychlostního gradientu a vyšší koncentrací vloček v upravované vodě a tudíž i jejich intenzivnější agregací. Existence nárazových zón před děrovanými přepážkami je jedním z faktorů, jimiž lze vysvětlit nejen vyšší agregační účinky míchání děrovanými přepážkami v porovnání s mícháním pádly ale i usazování vloček před těmito přepážkami. Při posuzování agregačního míchání se dosud málo bere v úvahu pojem synergie, již se rozumí interakce turbulentních proudění vyvolaných míchacími zařízeními s turbulentními prouděními vyvolanými jinak, která může mít nečekané účinky [9, 10].

Při **míchání pádly** se *turbulentní proudění vytvářejí za otáčejícími se pádly, tj. obtokem pevného tělesa kapalinou* [1, 2, 9, 10]. Otáčení pádel způsobuje neustálé přesouvání zdroje turbulentních proudění v upravované vodě a tím přispívá k jejich disipaci v celém jejím objemu. Jinou záležitostí je distribuce rychlostního gradientu, na které se negativně projevuje skutečnost, že hodnoty rychlostního gradientu závisejí na relativních rychlostech pohybu pádel vůči rychlosti průtoku upravované vody. Rozmezí těchto rychlostí a v důsledku toho i hodnot rychlostního gradientu je velmi široké. To má dvě příčiny. Prvá spočívá v různosti skutečných i relativních rychlostí pohybu pádel : skutečné závisejí na vzdálenosti pádel od os otáčení míchadel a relativní na orientaci pádel, tj. na tom, zda jsou orientována kolmo na směr průtoku upravované vody (příčná pádla) nebo rovnoběžně s ním (podélná pádla). Druhou příčinou je skutečnost, že ve všech těchto případech se rychlostní gradient nejvyšších hodnot vytváří bezprostředně za otáčejícími se pádly, zatímco ve směru od nich jeho hodnoty klesají. Všechna turbulentní proudění se navíc navzájem nekontrolovatelně ovlivňují. Tyto vlastnosti míchání pádly jsou systémové povahy a proto je není možné odstranit ale jen poněkud zmírnit, např. použitím míchadel s podélnými pádly. Podmínky při míchání pádly dále komplikují *zkratová proudění upravované vody*, která existují ve vložkovacích nádržích, v nichž nebyla realizována opatření na jejich rušení. Zkratová proudění zkracují dobu působení rychlostního gradientu na část agregujících vloček

Důsledkem těchto podmínek je *chaotická, tj. velmi nerovnoměrná distribuce rychlostního gradientu v podélném i v příčných profilech vložkovací nádrže, která prakticky znemožňuje splnit požadavek na distribuci jeho hodnot, které by byly v každém čase agregace přiměřené charakteru agregujících vloček a způsobu separace vytvořených vloček. Produktem agregace probíhající při míchání pádly jsou méně homogenní suspenze, které kromě efektivně separovatelných vloček obsahují i nezanedbatelné podíly hůře separovatelných vloček, které vznikly buď rozbitím velkých vloček účinky rychlostního gradientu nepřiměřeně vysokých hodnot, nebo*

*nedokončenou agregací vloček, které se vytvořily působením rychlostního gradientu příliš nízkých hodnot nebo i jeho přiměřených hodnot ale příliš krátkou dobu [9, 10].*

Pro potlačení zkratových proudění se do vločkovacích nádrží instalují děrované přepážky. Přitom se obvykle nebere v úvahu skutečnost, že se jimi přidává do vločkovacích nádrží další míchací zařízení, a že se tím prosté míchání pádly mění na kombinované míchání pádly a děrovanými přepážkami. Hydraulické procesy, které při něm probíhají, jsou mimořádně složité a obtížně postižitelné. Toto konstatování však není argumentem proti instalaci děrovaných přepážek do vločkovacích nádrží míchaných pádly, poněvadž zajistit rovnoměrný průtok upravované vody těmito nádržemi je stejně důležité jako zajistit správnou distribuci rychlostního gradientu. Při jejich použití je však třeba správně dimenzovat případně i uspořádat obě míchací zařízení, aby synergie jejich účinků neměla negativní důsledky. Problémem, jemuž se zatím nevěnuje náležitá pozornost, jsou i hydraulické účinky různých vestaveb ve vločkovacích nádržích, např. podstavců, na nichž jsou uložena ložiska míchadel, jejichž obtékáním upravovanou vodou dochází k rušení plynulosti průtoku jejich dílčích objemů a vytváření dalších turbulentních proudění. Synergie takových turbulentních proudění s turbulentními prouděními vytvářenými mícháním pádly může být příčinou toho, že skutečné podmínky agregace se od těch, které jsou popsány v projektech, mohou i významně lišit [9, 10].

**Při míchání děrovanými přepážkami** se *turbulentní proudění vytvářejí rozpadem ponořených vodních paprsků, které vytékají z otvorů v děrovaných přepážkách [1, 2, 9, 10], tedy zcela jiným mechanismem než při míchání pádly.* Tato proudění jsou v upravované vodě disipována poměrně rovnoměrně ale jinak než při míchání pádly a jiná je i distribuce rychlostního gradientu. Při výtoku jednoho ponořeného vodního paprsku se za otvorem, z něhož vytéká, vytvářejí turbulentní proudění, v nichž působí rychlostní gradient klesajících hodnot. Oblast turbulentních proudění vytvářejících se rozpadem jednoho paprsku se postupně kónicky rozšiřuje, takže po protečení určité dráhy se tato proudění střetávají, při čemž dochází k jejich synergii s turbulentními prouděními vytvořenými rozpady paprsků vytékajících z okolních otvorů v děrované přepážce. Upravovaná voda, v níž jsou disipována turbulentní proudění, přitéká k další děrované přepážce, před kterou dochází ke třem hydraulicky významným procesům: směřování a vtoku dílčích objemů upravované vody do otvorů v této přepážce, nárazu jejich dalších dílčích objemů na plnou plochu této přepážky a jejich odrazu od ní a k jejich střetávání a mísení se s dalšími dílčími objemy upravované vody, které k této přepážce teprve přitékají. Stejně hydraulické procesy probíhají při výtoku všech vodních paprsků, které vytékají z ostatních otvorů v děrované přepážce. Důsledkem obou posledně uvedených procesů je, že se před touto přepážkou vytváří *nárazová zóna* s distribucí rychlostního gradientu zvýšených hodnot a vyšší koncentrací agregujících vloček v upravované vodě. Rozšíření popsaného mechanismu na celou vločkovací nádrž s více děrovanými přepážkami vede k závěru, že mezi kterýmikoli dvěma za sebou zařazenými děrovanými přepážkami dochází *k poměrně rovnoměrné distribuci rychlostního gradientu v příčných profilech vločkovací nádrže, zatímco v jejím podélném profilu je rychlostní gradient distribuován tak, že od jedné k další děrované přepážce jeho hodnoty nejprve postupně klesají, poté se v nárazové zóně a do určité vzdálenosti za další děrovanou přepážkou poněkud zvyšují, načež se tento průběh jeho hodnot opakuje [9, 10].*

Hodnoty rychlostního gradientu závisejí mj. i na velikosti průtočných ploch otvorů v děrovaných přepážkách. Ty patří k jejich návrhovým parametrům (např. [6]), takže lze zajistit, aby v upravované vodě protékající vložkovací nádrží – s odhlédnutím od popsaných opakujících se výkyvů – hodnoty rychlostního gradientu postupně klesaly při přípravě vloček pro dvoustupňovou nebo se udržovaly na stejné úrovni při přípravě vloček pro jednostupňovou separaci. V souvislosti s mícháním děrovanými přepážkami je proto možné hovořit o *řízené distribuci rychlostního gradientu v podélném profilu nádrže*. Ve vložkovacích nádržích pravouhlého půdorysu budou v případě dvoustupňové separace vloček instalovány děrované přepážky, jejichž průtočné plochy, případně i vzdálenosti mezi těmito přepážkami, se budou ve směru průtoku upravované vody zvětšovat, a v případě jednostupňové separace vloček děrované přepážky, jejichž průtočné plochy, případně i vzdálenosti mezi těmito přepážkami, budou ve směru průtoku upravované vody přibližně stejné [6]. Délce prostorů za děrovanými přepážkami by měly odpovídat i velikosti do nich navrtaných otvorů, aby se využily poznatky o rozpadu ponořeného vodního paprsku [1, 2]. Děrované přepážky plní vedle své funkce zařízení na agregační míchání i další funkci, jíž je *rušení zkratových proudění upravované vody*. Složitější je náhrada pádlových míchadel děrovanými přepážkami ve starších vložkovacích nádržích s horizontálně nebo vertikálně uspořádanými meandry. V těchto nádržích se děrované přepážky musí instalovat s ohledem na účinky průtoku upravované vody těmito meandry, aby synergie všech všech turbulentních proudění, která se budou ve vložkovací nádrží po instalaci těchto přepážek vytvářet, nezhoršila hydraulické podmínky agregace [9, 10].

Na lepších účincích agregačního míchání děrovanými přepážkami se nepochybně podílí i jeho *schopnost samovolně přizpůsobovat hodnoty rychlostního gradientu aktuálnímu průtoku upravované vody*. Tuto schopnost míchání pádly nemá, neboť příkon elektrické energie, která se využívá k pohonu míchadel, s průtokem upravované vody nijak nesouvisí. Při míchání děrovanými přepážkami se využívá gravitační energie z rozdílů hladin upravované vody před a za děrovanými přepážkami, tzv. výškových ztrát. *Hodnoty rychlostního gradientu přímo závisejí na průtoku upravované vody vložkovacími nádržemi ve smyslu definice Campova čísla ( $Ca = G \cdot t$ )*. Zvýší-li se průtok upravované vody vložkovací nádrží, zvýší se i hodnoty rychlostního gradientu v jejich objemech za děrovanými přepážkami a zkrátí se její zdržení v nádrží, a naopak, sníží-li se její průtok nádrží, sníží se i hodnoty rychlostního gradientu v jejich objemech za děrovanými přepážkami a prodlouží se její zdržení v nádrží. Campova čísla při vyšším i nižším průtoku upravované vody vložkovací nádrží budou v obou případech přibližně stejná [např. 3, 6]. V odborné literatuře jsou uvedena Campova čísla doporučená pro navrhování podmínek agregace diferencovaně pro železité a hlinité koagulanty a různé postupy separace vloček [např. 3], avšak diferenciace podle způsobu agregačního míchání zde chybí. Bylo zjištěno, že Campova čísla stanovená pro tíž koagulant a tutěž vložkovací nádrž míchanou nejprve pádly a poté děrovanými přepážkami se velmi výrazně (až o jeden řád) liší, při čemž jejich hodnotám doporučeným v odborné literatuře se více blíží ty, které byly zjištěny při míchání pádly. V daném případě [4] se však lépe separovatelné vločky vytvářely při míchání děrovanými přepážkami, přestože zjištěná Campova čísla byla podstatně nižší než ta, která jsou doporučena v literatuře [5]. To lze vysvětlit mj. i vyšší účinností agregace v nárazových zónách před děrovanými přepážkami.

Z popisu hydraulických procesů při *míchání děrovanými přepážkami* je zřejmé, že tento způsob agregačního míchání *splňuje lépe než míchání pádly požadavek na zajištění distribuce rychlostního gradientu, jehož hodnoty jsou v každém čase agregace přiměřené charakteru agregujících vloček a způsobu separace vytvořených vloček, takže produktem agregace probíhající při míchání děrovanými přepážkami jsou homogennější suspenze s vyššími podíly efektivně separovatelných vloček* [9, 10] .

Výrazně lepších účinků než při míchání pádly se dosáhlo při míchání děrovanými přepážkami např. v úpravnách vody Hřiňová a Hosov. Jakkoli se jedná o akce realizované již před řadou let je vhodné se zde o nich zmínit, poněvadž v nich se změna způsobu agregačního míchání projevila nejvýrazněji. Pádlová míchadla byla později úspěšně nahrazena děrovanými přepážkami i v dalších úpravnách povrchových vod. Jsou mezi nimi převážně velké úpravy, v nichž se úprava vod provádí malými dávkami hlinitého koagulantu a jednostupňovou separací vloček v rychlých filtrech. V těchto úpravnách se rozdíly technologických účinků agregačního míchání pádly a děrovanými přepážkami projevují méně výrazně, takže při rozhodování o realizaci této inovace mají větší váhu provozně-ekonomické ukazatele, především úspory elektrické energie [6] .

V úpravně vody Hřiňová (projektovaná kapacita  $260 \text{ l.s}^{-1}$ , úprava vody z vodárenské nádrže / $\text{KNK}_{4,5} = 0,35 \text{ mmol.l}^{-1}$ /, číření železitým koagulantem, dvoustupňová separace usazováním a rychlou filtrací) byla děrovanými přepážkami nahrazena nefunkční pádlová míchadla již v roce 1984. Inovace byla předmětem provozního pokusu, jehož výsledky prokázaly, že systém byl navzdory provizornímu provedení původních přepážek překvapivě účinný. Separáční účinnost usazovacích nádrží se zvýšila z 15 % na 30 %, přestože se během provozního pokusu využívaný výkon úpravy zvýšil z projektovaných  $260 \text{ l.s}^{-1}$  na maximálně průtočných  $320 \text{ l.s}^{-1}$ . Podstatně se zvýšila i účinnost odstraňování biosestonních organismů [8]. Lepší účinnost míchání děrovanými přepážkami byla prokázána v roce 1998 i v úpravně vody Hosov (projektovaná kapacita  $240 \text{ l.s}^{-1}$ , úprava vody z nádrží / $\text{KNK}_{4,5} = 0,7$  a  $1,1 \text{ mmol.l}^{-1}$ /, číření železitým koagulantem, dvoustupňová separace usazováním a rychlou filtrací), v níž bylo možné objektivně porovnat účinky přípravy vloček ve vločkovací nádrži, ve které se agregace prováděla postupně za různých podmínek. Obsah zbytkového koagulantu v odsazené vodě odtékající z usazovacích nádrží, byl v období, kdy ve vločkovací nádrži nebylo žádné míchací zařízení,  $1,22 \text{ mg.l}^{-1} \text{ Fe}$ , v období, kdy se ve vločkovací nádrži míchalo pádlovými míchadly  $1,06 \text{ mg.l}^{-1} \text{ Fe}$  a v období, kdy se v ní míchalo děrovanými přepážkami,  $0,77 - 0,68 \text{ mg.l}^{-1} \text{ Fe}$ . Přiměřeně se zkrátily i filtrační cykly rychlých filtrů [4, 6] .

Míchání pádly neruší plynulost průtoku upravované vody ale naopak ruší sedimentaci vloček. To se projevuje pozitivně tím, že ve vločkovacích nádržích míchaných pádly prakticky nedochází k usazování vloček, a pokud ano, pak jen v provozně přijatelném měřítku. K této skutečnosti se dosud příliš nepřihlíželo, neboť obvykle nezpůsobovala významnější problémy. Svůj význam však nepochybně má při úvahách o náhradě pádlových míchadel děrovanými přepážkami. Dosud méně známou skutečností totiž je, že *děrované přepážky mohou způsobovat specifickou provozní závadu, jíž je usazování vloček a vytváření kalových závalů před děrovanými přepážkami*. Příčinou této závady, ke které může docházet prakticky jen v úpravnách vod s dvoustupňovou separací suspenze, v nichž se používají vyšší dávky koagulantu, je *rušení plynulosti průtoku upravované vody a existence nárazových zón před děrovanými přepážkami* [např. 8] .

Dosud jedinou úpravnou, ve které usazování vloček ve vločkovacích nádržích přesáhlo provozně přijatelnou míru, je úpravna vody Štítary (projektovaná kapacita  $240 \text{ l.s}^{-1}$ , úprava vody z vodárenské nádrže / $\text{KNK}_{4,5} 1,5 \text{ mmol.l}^{-1}$ /, čiření železitým koagulantem, dvoustupňová separace usazováním a rychlou filtrací). Čtyři vločkovací v této úpravně (konstrukčně spojené s podélnými usazovacími nádržemi) byly původně vybaveny míchadly s podélnými pádly, které byly nahrazeny děrovanými přepážkami. Zatímco při míchání pádly se v těchto nádržích neusazoval prakticky žádný kal, došlo v nich po instalaci děrovaných přepážek k jeho masivnímu usazování. Příčinou byl nepochybně souběh tří skutečností: extrémně rychlé tvorby těžkých a rychle sedimentujících vloček (vločky separovatelné usazováním zde vznikají během necelé minuty po nadávkování koagulantu a po usazení vytvářejí rychle se zhutňující kal [7]), rušení plynulosti průtoku upravované vody a intenzivnější agregace v nárazových zónách. Instalací děrovaných přepážek a shrabováků kalu se nádrže původně vločkovací změnilly na předusazovací s mechanickým stíráním kalu [11]. Popsaný případ je ojedinělý a proto ho nelze zobecňovat. Navzdory tomu však lze doporučit, aby se před použitím děrovaných přepážek zejména v úpravných vod s dvoustupňovou separací suspenze uvážila i možnost opatřit vločkovací nádrže účinným a operativním odkalovacím systémem.

**Závěr:** Míchání pádly a děrovanými přepážkami nejsou libovolně zaměnitelnými způsoby agregačního míchání, neboť mají nejenom shodné ale i rozdílné účinky. Jejich příčinou jsou rozdíly v průběhu hydraulických procesů a v důsledku toho i v distribuci rychlostního gradientu, které je třeba znát a respektovat, aby se zvýraznily jejich pozitivní technologické účinky a předešlo se případným provozním závadám.

## Literatura a podklady

- [1] Boor, B. – Kunštátský, J. – Patočka, C. : Hydraulika pro vodohospodářské stavby, SNTL, Praha, 1968
- [2] Boor, B. - Kolář, V. – Patočka, C. : Hydraulika, SNTL, Praha – Alfa, Bratislava, 1983
- [3] Žáček, L. : Chemické a technologické procesy úpravy vody, NOEL 2000, Brno, 1999, str. 64
- [4] Halámek, B. – Zinec, J. : Příprava suspenze hydraulickým mícháním v úpravně vody Hosov, sborník z konference „VODA Zlín 1999“, Zlín, 1999, str. 95
- [5] Halámek, B. : Posuzování Campových čísel při přípravě suspenzí hydraulickým mícháním, sborník z konference „Pitná voda“, Tábor, 1999, str. 291
- [6] Halámek, B. : Poznatky z použití děrovaných přepážek ve vločkovacích a usazovacích nádržích úpraven vod, sborník z konference „VODA Zlín 2005“, Zlín, 2005, str.105
- [7] Halámek, B. : Okamžitá tvorba těžké suspenze a její důsledky, sborník z konference „VODA Zlín 2006“, Zlín, 2006, str.137
- [8] Halámek, B. : Náhrada pádlových míchadel děrovanými přepážkami – přínosy a rizika, sborník z konference „Pitná voda“, Trenčianské Teplice, 2006, str. 229
- [9] Halámek, B. : Distribuce rychlostního gradientu při různých způsobech agregačního míchání, sborník z konference „Pitná voda“, Trenčianské Teplice, 2007, str.159
- [10] Halámek, B. : Distribuce rychlostního gradientu – důležité kritérium podmínek přípravy vločkovitých suspenzí, sborník z konference „VODA Zlín 2008“, Zlín, 2008, str.119
- [11] Látal, M. – Hedbávný, J. – Drda, M. : Zkušenosti z projektování a výstavby rekonstrukce úpravny vody Štítary, sborník z konference „VODA Zlín 2008“, Zlín, 2008, str. 95