

## Použití injektorů pro aeraci vody

doc. Ing. Petr Dolejš, CSc.<sup>1,2</sup>, Ing. Pavel Dobiáš<sup>1</sup>

<sup>1</sup> W&ET Team, Box 27, Písecká 2, 370 11 České Budějovice  
a <sup>2</sup> FCh VUT, Brno  
petr.dolejs@wet-team.cz, pavel.dobias@wet-team.cz

**Abstrakt:** Příspěvek je věnován problematice využití injektorů při aeraci vody. Zejména při potřebě oxidace železa a manganu. Příspěvek též seznamuje s praktickými zkušenostmi s aplikací aeračních injektorů a to jak z poloprovozních experimentů, tak z plnohodnotných aplikací v provozech úpraven vody.

**Abstract:** The paper is focused on injectors use for water aeration mainly for iron and manganese removal. The paper shows some experiences with injectors in pilot plant and some experiences with using injectors in full scale water treatment plants.

**Klíčová slova:** aerace, injektor, mangan, oxidace, pitná voda, úprava vody, železo

**Keywords:** aeration, injector, iron and manganese removal, water treatment, drinking water, oxidation

### ÚVOD

Aerace neboli provzdušňování vody je nejčastěji využíváno při úpravě podzemní vody. Avšak i při úpravě vody z nádrží se můžeme setkat s případy, kdy hypolimnetická voda relativně dobré kvality nemá dostatek kyslíku a její provzdušnění by bylo důležité například při oxidaci manganu či by obecně zlepšilo její kvalitu. Současné normy kvality pitné vody již neobsahují doporučenou hodnotu nasycení kyslíkem (více jak 50 %), která byla obsažena ještě v normě ČSN 757111. Nicméně se asi shodneme, že pitná voda by měla kyslík obsahovat a čím „dále“ bude od anoxického stavu, tím lépe. Proto je důležité mít vhodná technologická zařízení, která je možné pro provzdušnění využít. V posledních letech se pro tento účel velmi výrazně uplatnily moderní injektory, které ve většině případů nahradí dříve používané metody (například aerátory typu Inka) a v mnoha provozních rysech je předčí. Zejména v jednoduchosti, bezúdržbovém provozu, úspoře energie a výrazném zmenšení zabrané plochy.

### POUŽITÍ AERACE V TECHNOLOGII ÚPRAVY PITNÉ VODY

Použití provzdušnění vody v technologické lince má několik možných cílů. Tyto cíle využívají podstaty procesu, kterým je přestup hmoty mezi plynnou fází a kapalinou. Řídí se Henryho zákonem, podle něhož je rozpustnost plynů při nízkých tlacích přímo úměrná parciálnímu tlaku daného plynu nad kapalinou:

$$x_A = K_H p_A,$$

kde  $x_A$  je molární zlomek složky  $A$  v kapalně fázi,  $K_H$  je Henryho konstanta [ $\text{Pa}^{-1}$ ] a  $p_A$  je parciální tlak složky  $A$  v plynné fázi. V případě látkové koncentrace má  $K_H$  rozměr [ $\text{mol l}^{-1} \text{Pa}^{-1}$ ].

V hydrochemii a technologii vody se rozpustnost plynů vyjadřuje obvykle jako hmotnostní koncentrace. Například při teplotě  $10\text{ }^\circ\text{C}$  a tlaku  $101,3\text{ kPa}$  je rozpustnost kyslíku  $54,3\text{ mg/l}$ . Pokud je voda ve styku se vzduchem, pak za stejných podmínek je rozpustnost kyslíku  $11,3\text{ mg/l}$ , protože parciální tlak kyslíku ve vzduchu je nižší a je úměrný jeho poměrnému zastoupení ve vzduchu ( $21\%$ ) [1].

Procesy, při kterých dochází k přestupu hmoty mezi plynnou fází a kapalinou mají několik technologických cílů. Jsou to jednak procesy absorpce plynů, mezi které patří rozpouštění látek, uvedených v tabulce 1. Nejčastějším bude pravděpodobně rozpouštění vzdušného kyslíku ve vodě.

Opačným procesem je odstraňování rozpuštěných plynů, které ve vodě vadí. Nečastějším případem může být v technologii úpravy vody odstraňování části agresivního oxidu uhličitého.

**Tabulka 1. Příklady rozpouštění plynů ve vodě pro různé technologické cíle úpravy vody**

| Látka-plyn     | Cíl úpravy vody   |
|----------------|---|
| $\text{O}_2$   | oxidace $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Mn}^{2+}$ , $\text{S}^{2-}$ , destratifikace nádrží |
| $\text{O}_3$   | Desinfekce, odbarvování, oxidace organických či anorganických látek                   |
| $\text{Cl}_2$  | Desinfekce, oxidace $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Mn}^{2+}$ , $\text{H}_2\text{S}$        |
| $\text{ClO}_2$ | Desinfekce  |
| $\text{CO}_2$  | Ztvrdování, řízení hodnoty pH   |
| $\text{NH}_3$  | Tvorba chloraminů při desinfekci  |
| $\text{SO}_2$  | Dechlorace  |

**Tabulka 2. Příklady stripování plynů z vody pro různé technologické cíle úpravy vody**

| Látka-plyn             | Cíl úpravy vody  |
|------------------------|--|
| $\text{CO}_2$          | Snižování koroze (agresivity vody)   |
| $\text{H}_2\text{S}$   | Odstraňování sensorických závad  |
| Těkavé organické látky | Odstraňování sensorických závad, odstraňování potenciálně toxických těkavých látek |

Pro účinnost procesu je nejvýznamnějším faktorem koeficient přestupu hmoty  $k_{La}$ . Z poměrně složité teorie přestupu hmoty mezi dvěma fázemi vyplývá, že koeficient přestupu hmoty je nepřímo úměrný velikosti bublin. Znamená to, že čím menší jsou bublinky plynu, tím se přestup hmoty z plynu do kapaliny zlepšuje.

Zajímavou tabulku velikosti koeficientů přestupu plynu do kapaliny uvádí Hendricks [2]. Z tabulky vyplývá, že zatímco probublávané kolony mají rozsah hodnot koeficientu přestupu

hmoty  $k_L a$  0,005-0,01  $s^{-1}$ , náplňové kolony 0,005-0,02  $s^{-1}$ , rozstřikovací věže jen 0,0007-0,015  $s^{-1}$ , injektory dosahují hodnot 0,1-3,0  $s^{-1}$ . Takto vysokých hodnot je dosahováno zejména proto, že v injektoru se přísávaný vzduch rozptýluje do mikrobublinek, které poskytují obrovskou mezifázovou plochu pro přestup hmoty ve srovnání se všemi ostatními metodami používanými pro aeraci. Zároveň nepotřebují injektory velké objemy kapaliny, ve kterých by probíhalo rozpouštění plynu (aerační věže, probublávané reaktory atp.) a z těchto charakteristik také vyplývá nižší energetická náročnost ve srovnání s klasickými metodami aerace. Navíc není potřeba mít v technologické lince dva motory (jeden pro čerpání, druhý pro dmychadlo) a vše zajistí jen vhodné dimenzování čerpadla provzdušňované vody. To dává injektorům vynikající potenciál pro využití v aeraci při úpravě vody.

## **PŘÍKLAD NÁVRHU AERACE SUROVÉ VODY INJEKTOREM**

Pro ověření možností aerace surové vody injektorem je nejprve potřeba stanovit potřebu kyslíku, který je třeba vnést to upravovaného proudu vody. Injektory Mazzei, se kterými máme z minulosti velmi dobré zkušenosti, a které jsme pro ověření vybrali, mají velmi podrobně zpracované tabulky účinnosti. Z nich je možné vycházet při teoretickém výpočtu a návrhu použití injektoru. Nicméně je velmi žádoucí ověřit výpočty experimentálním měřením přímo na konkrétní lokalitě.

Pro oxidaci je velmi významným parametrem hodnota pH vody. Pro oxidaci železa je vhodný rozsah pH nad 7,2, ideální hodnota pH je od 7,5 – 8,0. Vyšší hodnota pH samozřejmě nevádí.

V případně přítomnosti manganu v surové vodě velmi závisí na jeho formě výskytu. Pokud je mangan vázaný na organické látky huminového typu, je jeho oxidace obtížnější. Pokud je v iontové formě, je možné oxidovat mangan i kyslíkem a pro jeho oxidaci je vhodné pracovat při hodnotě pH okolo 9,0 či vyšším. Při nižších hodnotách pH je oxidace pomalejší a je třeba mít k dispozici delší doby zdržení v reaktorech, ve kterých oxidace probíhá.

Dalším významným faktorem je doba zdržení v reaktorech, kde oxidace probíhá. Při optimálních podmínkách je možné úspěšně oxidovat již při dobách od 5 do 15 minut.

Vydeme-li ze stechiometrie oxidačních reakcí, je pro oxidaci 1 mg/l železa potřeba 0,14 mg/l kyslíku. Pro oxidaci 1 mg/l manganu je potřeba 0,29 mg/l kyslíku.

Pro oxidaci kyslíkem je také potřebné dosáhnout ve vodě dostatečné koncentrace zbytkového kyslíku. Většinou je možné akceptovat koncentraci zbytkového kyslíku po proběhlé oxidaci na úrovni 5 mg/l. Je tedy potřeba v upravované vodě rozpustit tolik kyslíku, aby proběhly oxidační reakce a ještě zůstala tato požadovaná zbytková koncentrace. Ve výpočtech budeme počítat s tím nejméně příznivým stavem, kterým je nulová koncentrace kyslíku v upravované vodě. Pokud by nějaký kyslík byl přítomen, je možné ho v bilanci odečíst od hodnoty požadované zbytkové koncentrace.

### **Výpočet teoretické potřeby kyslíku pro oxidaci železa a manganu pro konkrétní podzemní vodu**

Pro výpočet vezmeme hodnoty odvozené z průběhu koncentrací železa a manganu v surové vodě, které jsou na dané lokalitě k dispozici.

Předpokládejme, že chceme oxidovat 20 mg/l železa a 1,5 mg/l manganu.

Z toho plyne, že bude potřeba:

$20 \cdot 0,14 = 2,8$  mg/l kyslíku na oxidaci železa

$1,5 \cdot 0,29 = 0,44$  mg/l kyslíku na oxidaci manganu

Celkem bude na oxidaci těchto koncentrací železa a manganu v surové vodě teoreticky spotřebováno 3,24 mg/l kyslíku. Aby bylo dosaženo požadovaného minima koncentrace kyslíku po oxidaci, bude potřeba do surové vody dodat  $5,0 + 3,24 = 8,24$  mg/l kyslíku.

Výpočet potřeba dodaného vzduchu do protékající kapaliny vychází z toho, že při 20 °C má vzduch hustotu 1,2 g/l. Za těchto podmínek obsahuje 20,95 % kyslíku. V každém litru vzduchu je tedy 252 mg kyslíku.

Pokud jako základní návrhový průtok zvolíme 20 l/s, čili 1200 l/min, vyjde nám, že teoretická potřeba vzduchu je:

$$\frac{1200 \text{ l/min} \cdot 8,24 \text{ mg/l}}{252 \text{ mg/l}} = 39,24 \text{ l/min vzduchu}$$

Skutečná potřeba vzduchu, který je třeba dodat do systému záleží na účinnosti aeračního zařízení. Aerační zařízení mají účinnost přestupu kyslíku někdy jen 5 %. Pro injektory Mazzei je v závislosti na konkrétním typu a aplikaci dosahována účinnost 25–35 %. Použijeme pro další výpočet konzervativní hodnotu 25 %, která je dobře ověřená jak laboratorními měřeními, tak mnoha provozními aplikacemi. Z toho tedy můžeme vypočítat potřebný přísun vzduchu injektorem do proudu upravované vody jako:

$39,24 \cdot 4 = 157$  l/min vzduchu.

Abychom tento průtok upravili ještě s ohledem na doporučený bezpečnostní faktor (například na vlivy teploty či výkyvy koncentrací oxidovatelných látek v surové vodě), je vhodné ho ještě navýšit o dalších 10 – 20%. Z toho tedy vyjde při 20% bezpečnostním faktoru:

$157 \cdot 1,2 = 189$  l/min vzduchu,

který je potřebný dodat do proudu surové vody při průtoku 20 l/s.

Z návrhových tabulek pro jednotlivé injektory je pak možné zjistit vhodný typ injektoru. Pro průtok od 500 do 1700 l/min je vhodný typ Mazzei 4091. U něj můžeme z výkonové tabulky odečíst, že např. při průtoku kapaliny 1200 l/min bude přísávat (při tlaku na vstupu 210 kPa a na výstupu 35 kPa) 842 l/min vzduchu. To je tedy zhruba 4.5 krát více než požaduje dříve provedený výpočet a je tedy zřejmé, že vzduch bude dodáván do systému ve velkém nadbytku. To bude působit pozitivně na kvalitu vody i tím, že přebytečný plyn bude stripovat ze surové vody jak agresivní oxid uhličitý, tak případné těkavé látky, které by se mohly ve vodě vyskytnout.

Z těchto hodnot je možné učinit závěr, že injektorem je možné do vody dodat dostatek kyslíku, který zaručí oxidaci železa a při vhodné hodnotě pH a době zdržení také manganu. Tyto výpočty byly také potvrzeny naším měřením a později také provozem úpravní vody Hajská, která získala letos ocenění Stavba roku. O ní bylo již referováno v příspěvku [3]. Na základě dosažených výsledků měření byla úpravna osazena dvěma injektory Mazzei 4091. Při nižším výkonu úpravní pracuje jen jeden, v případě potřeby zvýšeného výkonu úpravní je paralelně připojen i druhý injektor.



**Obr. 1. Provozní aplikace injektorů na ÚV Hajská**

### EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY AERACE PODZEMNÍ VODY INJEKTOREM

V tabulce 3 jsou shrnuty výsledky experimentálního měření aerace surové vody injektorem Mazzei 2081 (obr. 2). Ukázalo se, že injektor má potenciál zlepšit funkci současné provozní aerace a mohl by ve shodě s naměřenými výsledky zvýšit koncentraci rozpuštěného kyslíku v upravované vodě. Délka tohoto poloprovozně testovaného injektoru je 30 cm, má 2" připojení. Při tlaku 70 kPa jím teče 175 l/min a přisaje 204 l/min vzduchu.

**Tabulka 3.** Vnos kyslíku do upravované vody při různém průtoku vody injektorem a tlaku na vstupu. Porovnání s koncentrací kyslíku po oxidaci vodním skokem (ÚV Ostrava – Nová Ves)

| Tlak na vstupu injektoru [kPa] | Q [l/s] | O <sub>2</sub> [mg/l]              |                             |
|--------------------------------|---------|------------------------------------|-----------------------------|
|                                |         | Experimentální nádrž za injektorem | Provozní aerační nádrž č. 2 |
| 72                             | 2,86    | 9,3                                | 8,1                         |
| 90                             | 3,1     | 9,5                                | 8,1                         |
| 100                            | 3,3     | 9,6                                | 8,1                         |
| 90                             | 3,1     | 9,5                                | 8,1                         |
| 110                            | 3,4     | 9,5                                | 8,1                         |
| 110                            | 3,3     | 9,3                                | 8,1                         |

Injektory byly pro aeraci úspěšně aplikovány v posledních letech na několika úpravnách podzemní vody. Příkladem jsou ÚV Hajská, ÚV Ostrava-Nová Ves, ÚV Borovany. Bylo také úspěšně provozně vyzkoušeno nahrazení aerátoru Inka injektorem.



**Obr. 2. Experimentální poloprovozní aplikace injektoru na ÚV Ostrava-Nová Ves**

## **ZÁVĚRY**

Pro aeraci vody je možné s úspěchem aplikovat vysokoúčinné injektory. Jsou bezúdržbové, neobsahují žádné pohyblivé součástky a požadují zlomek místa ve srovnání s jinými zařízeními. Jsou také energeticky i provozně výhodné. Mohou ve většině aplikací nahradit dosud používané metody aerace probubláváním stlačeným vzduchem, protože zajistí dostatečný přívod kyslíku (vzduchu) do proudu upravované vody.

## **LITERATURA**

1. Pitter P.: Hydrochemie. Vydavatelství VŠCHT Praha, Praha 2009.
2. Hendricks D.: Water Treatment Unit Processes. CRC Press, Boca Raton, FL, 2006.
3. Drda M., Červenka J., Dolejš P., Dobiáš P., Drbohlav J.: Předprojektová příprava a realizace rekonstrukce úpravní vody Strakonice-Hajská. Sborník konference Pitná voda, s. 45-52. Hydrotechnológia Bratislava s.r.o., Bratislava 2011.