

Provozní optimalizace a vývojové trendy vodárenské filtrace

doc. Ing. Petr D o l e j š, CSc.

W&ET Team, Box 27, Písecká 2, 370 11 České Budějovice
a Fakulta chemická VUT v Brně
petr.dolejs@wet-team.cz

Abstrakt: Příspěvek se věnuje možnostem zkvalitnění provozu současných vodárenských filtrů, nastavení a řízení jejich provozu a měření separační účinnosti. Je stručně uveden vývoj filtrace a některé nově formulované poznatky. Zejména se to týká praní filtrů.

Abstract: Optimization of filtration is the main aim of this contribution. Some methods of full scale filters assessment are presented.

Vodárenská filtrace jako separační proces

Filtrace vrstvou zrnitého materiálu se jako technologický proces používá v moderní historii zřejmě od roku 1804 ve Skotsku. Roku 1829 byla uvedena do provozu první pomalá filtrace podle návrhu Jamese Simpsona pro zásobování Londýna a ta je běžně v literatuře uváděna jako první aplikace pomalé filtrace [1]. To, co bychom mohli nazývat jako rychlá filtrace bylo zaváděno jako postupné vodárenské inovace zhruba od roku 1880. Zásadním pokrokem bylo, když Fuller v roce 1897 v USA nahradil pomalý filtr (s jeho působením biologické vrstvy na povrchu) rychlofiltrem naplněným pískem, jehož působení je založené na fyzikálně-chemických procesech. Další vývoj pak již dopracovával tento objev např. modifikacemi řízení průtoku filtrem, způsoby praní filtrů, variantami drenážních systémů, změnami použité filtrační náplně atp.

I když dnes již existují procesy významně konkurující rychlofiltraci (zejména membránové procesy), stále ještě platí, co před několika roky prohlásil jeden z nejuznávanějších vědců v oboru vodárenských technologií, kterým je Prof. Ken Ives z University College London, autor několika významných a často citovaných knih z nichž jedna je přímo věnována vědeckým základům vodárenské filtrace [2]. Je třeba vyslovit uznání za pokoru vynikajícího teoretika před tím, co nazýváme praxí. V přednášce na konferenci a pak v navazující publikaci [3] napsal: I když je umění vodárenské rychlofiltrace zhruba jedno století staré, vědecké poznání v tomto oboru dosahuje méně než polovinu tohoto věku. I přes to, že bylo v oboru vykonáno mnoho velmi sofistikovaných výzkumných prací, umění vodárenské filtrace stále před vědeckým poznáním vede a vědci jen následují praxi vysvětlováním a objasňováním již fungujícího.

I další významní teoretici (např. D. M. Mintz, W. Stumm, C. R. O'Melia, J. Cleasby) se shodují v tom, že procesy, které probíhají při filtraci, jsou natolik složité, že bude vždy potřeba stanovovat parametry vodárenské filtrace experimentálně [1]. Je však třeba si také uvědomit, že i v tak relativně konzervativní oblasti, jakou je vodárenská filtrace, stále dochází k významným vývojovým posunům, které tento proces zkvalitňují a ekonomizují a i přes to, že základní koncept je dlouhá desetiletí stejný, jeho varianty ho vylepšují, přizpůsobují

různým podmínkám například v kvalitě surové vody či koncepcím technologické linky, umožňují filtraci optimalizovat pro různé požadavky investorů a provozovatelů atd.

Pokud se ohlédneme, abychom si připomenuli situaci v oboru vodárenské filtrace v našich zemích v minulosti, můžeme s hrдостí prohlásit, že 70. a 80. léta byla z tohoto hlediska opravdu velmi plodná a tehdejší úroveň poznání a intenzita výzkumných a inovačních prací byla na vynikající úrovni srovnatelné se světem. Dokládají to práce řady autorů a také úroveň poznání, která byla tehdy dostupná v naší odborné knižní literatuře [4-10]. Zdá se, jako by se v 90. letech tento vývoj přerušil a zřejmě k tomu negativně přispělo i to, že například Hydroprojekt Praha zrušil vlastní středisko vývoje, které bylo u nás tehdy jakýmsi motorem získávání prakticky využitelných poznatků ve vodárenské filtraci, kterou tam představoval zejména ing. František Hereit, CSc. a několik jeho dalších kolegů.

Protože jak v SR, tak ČR se v dnešní době již nové úpravní téměř nestaví, bude docházet k tomu, že v existujících úpravních budou probíhat rekonstrukce. Jejich cílem bude jednak obnova stavebních částí, ale s tou by měla jít ruku v ruce také aplikace procesních (technologických) inovací, které se objevily od doby, kdy byly původní úpravní koncipovány a projektovány. Pokud by docházelo jen k prosté obnově původních technologických souborů, bylo by to jednak popřením evidentního vývoje v oboru a jednak jakýmsi „technickým hříchem“ na vlastníkově vodárenské infrastruktury, stejně tak na provozovateli a samozřejmě hlavně na zákaznících – odběratelích pitné vody.

Jak již řadu let provozované, tak nově rekonstruované úpravní vždy potřebují také dobré nastavení a optimalizaci jejich provozu. Tím je možné dosáhnout jak ekonomických úspor, tak zkvalitnění dodávané pitné vody. Tomuto oboru se většinou bohužel nevěnuje patřičná pozornost a mnohdy provozovateli postačuje, že zařízení funguje, voda teče a „zjevně“ na něm nejsou vidět žádné problémy či vady. Aby bylo možné provoz filtrace vyladit do optima, je potřeba dobře zmapovat, co se ve filtrech v provozu děje.

Hlavní technologické parametry sledování a hodnocení funkce vodárenských filtrů

Vždy je třeba stanovit kvalitativní parametry filtrátu, do kterých jsou sledované fyzikální veličiny filtrace akceptovatelné. Jakmile kvalita filtrátu překročí jeden ze stanovených kvalitativních parametrů, filtrační cyklus je ukončen. První dva uvedené parametry jsou sice velmi dobře známé, neposkytují však pro optimalizaci filtrace vyčerpávající informace. Proto jsou uvedeny další dva parametry, které se zatím u nás prakticky nevyužívají. Proto jsou také jejich názvy zatím jen návrhem k diskusi.

- **Doba trvání filtračního cyklu** od jeho počátku do doby ukončení z důvodu zhoršení kvality filtrátu nad stanovenou mez nebo z důvodu vyčerpání disponibilní tlakové ztráty - Δt . Tato klasická hodnota (spolu s průtokem filtrem) udává snadno technologicky převoditelnou informaci např. na údaj o potřebné frekvenci praní filtrů při známém zatížení filtru suspenzí v přitékající vodě.
- **Filtrační rychlost** - v_f vychází z definice filtrační rychlosti jako objemu vody proteklé jednotkovou plochou filtru za hodinu.
- **Jednotková výroba filtru (suma jednotkové výroby filtru, filtrační „délka“)** při jednom filtračním cyklu L_f (m^3/m^2) je údaj, který poskytuje korektní možnost srovnání funkce filtrů při různých provozních podmínkách. Představuje objem vody proteklé jednotkovou plochou filtru od začátku filtračního cyklu, tedy výrobu filtru na jednotkovou

plochu. Srovnávání funkce filtrů (a stejně tak kvalitativních parametrů upravené vody z různých filtrů navzájem) by mělo být prováděno vždy vzhledem k identickým hodnotám proteklého množství vody určité kvality na jednotkovou plochu filtru.

- **Čistá jednotková výroba filtru** (net water production) za jeden filtrační cyklus je definována jako $L = L_f - L_p$, kde L_p je objem spotřebované prací vody na jedno praní dělené plochou filtru (m^3/m^2). Údaj o čisté jednotkové výrobě filtru by měl sloužit jako základní parametr pro srovnávání různých variant filtrů a filtrace. Je zřejmé, že vhodné bude takové uspořádání, které poskytne jeho nejvyšší hodnotu.

Měření průběhu tlakových ztrát v loži filtrů během filtračního cyklu

Pro sledování a hodnocení funkce provozních filtrů je možné využít některých měření, která poskytují základní informace o průběhu filtrace a zachycování suspenze v loži filtru. Technologický audit filtrace je založen na podrobném vyhodnocení filtračního cyklu a to jak kvality filtrátu, tak tlakových poměrů v loži filtru v průběhu celého filtračního cyklu. Měření tlakových poměrů v loži filtru spočívá v kontinuální analýze průběhu tlakových ztrát. Velice citlivé měřicí sondy, umístěné přímo v loži filtru, zaznamenávají hodnoty tlaku každých 10 vteřin do přenosného počítače. Z tohoto měření je možné získat tyto technologicky významné informace:

- Průběh zachycování suspenze ve vodárenském filtru a vhodnost suspenze pro daný typ filtru.

Na základě údajů o tlakových poměrech ve filtru v různých časech lze vyhodnotit, jakým způsobem filtr zachycuje suspenzi, zda filtr efektivně využívá profil filtračního lože a zda je příprava suspenze vhodná pro daný typ filtru a pro režim, v jakém je filtr provozován.

- Nalezení optimální délky filtračního cyklu

Měření tlakových ztrát jasně ukáže časový úsek, od kdy je provoz filtru díky zanesení filtračního lože již neefektivní. Spolu s hodnotami průniku zbytkového koagulantu, absorbance, organismů či ChSK je pak spolehlivou informací k určení optimální délky filtračního cyklu.

- Vliv nárazového zatížení filtru při regulaci průtoku

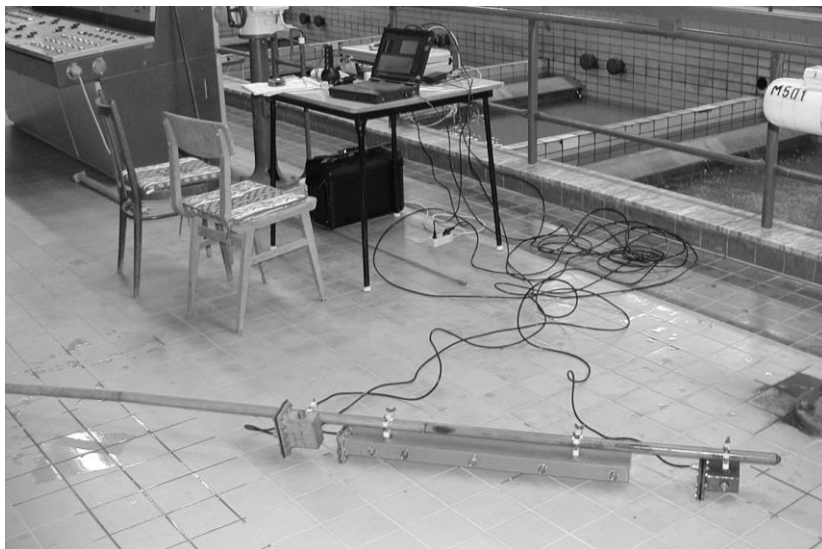
Při regulaci průtoku filtrem v některých případech dochází periodicky či náhodně v důsledku otevírání/zavírání odtoku z filtru (či přítoku na filtr) k výrazným nárazovým tlakovým změnám, které mohou negativně ovlivnit efektivitu filtrace. Měření tlakových ztrát dokáže tyto nedostatky odhalit a pomoci při jejich odstranění.

- Srovnání funkce jednotlivých filtrů

Některé problémy s kvalitou vody mohou být způsobeny nikoli stavem celé technologické linky, ale například chybnou funkcí jednoho z filtrů. Srovnání průběhu tlakových ztrát a proměření filtračního cyklu jednotlivých filtrů problémy tohoto druhu spolehlivě odhalí.

V sondě, umístěvané pro měření do filtru, je celkem 7 čidel. Sondy se umísťují do filtru při jeho praní. Po jejich kalibraci na hydrostatický tlak podle jejich polohy ve filtru se filtr spustí a vlastní měření tak začíná. Měření je vždy doplněno průběžným odběrem vzorků filtrátu. Zpočátku je frekvence vzorkování po 5 – 15 minutách, aby bylo zjištěno, jak se filtr chová při zafiltrování, později bylo vzorkováno v intervalech rovnajících se 5 – 10 % očekávané délky filtračního cyklu. Tím byl získán ucelený soubor informací o filtračním cyklu, jehož

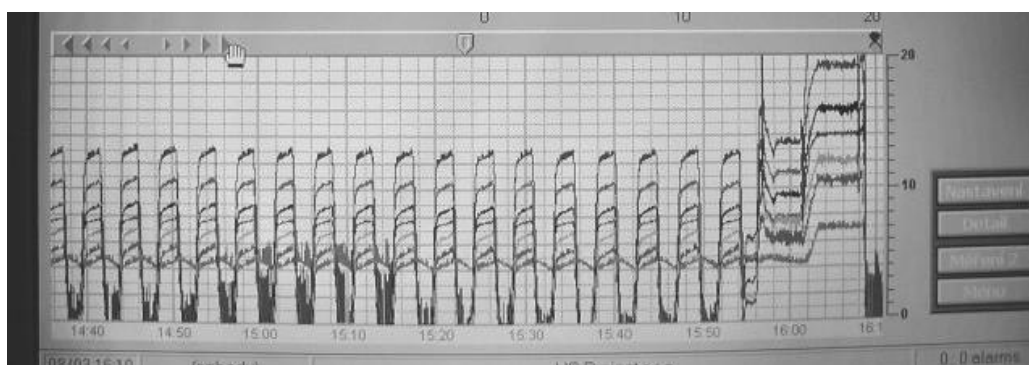
interpretací je možné najít úzká místa, jak v ve stupni přípravy suspenze, tak v její separaci filtrací.



Na obr. 1 vidíme sestavu přístroje pro měření průběhu tlakové ztráty ve filtrech. V popředí je měřící sonda se sedmi polovodičovými tlakovými čidly, která se umísťuje do měřeného filtru. Signály z čidel jsou v průběhu filtračního cyklu vedeny do převodníku, který je spojen s notebookem, kam se všechna měřená data ukládají.

Obr. 1 Sestava zařízení pro měření průběhu tlakové ztráty ve filtru

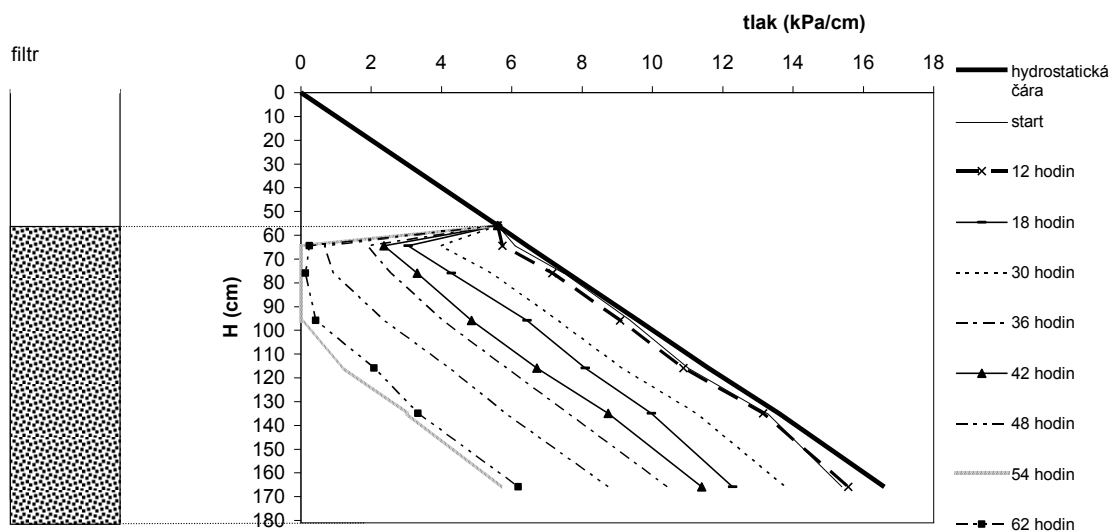
Obr. 2 ukazuje, jak vypadá část průběžné informace ze záznamu měření na monitoru notebooku. Na tomto obrázku je zachycen konec filtračního cyklu, který je velice zajímavý a nepříliš typický. Přibližně v 15.55 začalo praní filtru. Do té doby probíhala filtrace. V obr. 2 jsou uvedena data všech sedmi tlakových sond v loži filtru. Vidíme zcela zřetelné periodické změny tlakových poměrů ve filtru. Na konci filtračního cyklu vidíme, že celý filtr „kmitá“. Regulátory periodicky zvyšují a snižují průtok filtrem. To má za následek, že v takové situaci se separační účinnost filtrace zhoršuje. Při rychlejším zvyšování průtoku filtrem může docházet k utržívání separovaných nečistot z lože filtru a buď k jejich přesouvání do nižších pater filtrační náplně a nebo později k jejich strhávání do upravené vody. Toto měření tedy samo o sobě ukazuje, že filtrace na proměřované úpravně zasluhuje rekonstrukci.



Obr. 2. Záznam monitoru notebooku při vlastním měření - ukázka kmitání průtokové regulace filtrů při filtraci před začátkem praní filtru (záznam zcela vpravo).

Obr. 3 ilustruje průběh tlakové ztráty v loži filtru při celém filtračním cyklu formou Michauovy křivky. Významným údajem z hlediska provozu je především to, že v nejsvrchnější vrstvě filtrační náplně (zhruba 10–15 cm) dochází při filtraci k nejvýraznějšímu poklesu tlaku a tedy že v této vrstvě dochází k separaci podstatné části suspenze, která přichází na filtr. To také vede k tomu, že filtr přechází v druhé polovině filtračního cyklu

částečně do podtlaku. Nelze však odlišit, jak se na tomto vzrůstu tlakové ztráty podílí suspenze neseparovaná v předřazených sedimentačních nádržích a jakým dílem se podílí zbytky vápna dávkovaného do odtoku ze sedimentačních nádrží. Nic to však nemění na tom, že při takovémto průběhu tlakové ztráty ve filtru je velmi pravděpodobné, že by například aplikace dvouvrstvého filtru byla v tomto případě možným řešením.



Obr. 3 Michauovy křivky vynesené z hodnot klouzavých průměrů tlaků v různých hloubkách filtru v závislosti na čase.

Trendy a možnosti dalšího vývoje filtrace

Nad vývojovými možnostmi filtrace se velmi zamýšlel například Ives [3]. Došel k tomu, že neočekává žádný zásadní vývojový zlom, který by byl například výsledkem základního technologického výzkumu. Spíše budou procesy a zařízení dále vylepšována, a pokud bude možné zaznamenat nějaký zásadnější vývojový zlom spíše než z výzkumu je možné ho očekávat z realizace myšlenek technického rozvoje různých firem.

Podíváme-li se na významné návrhové parametry filtrace, jak byly uvedeny v předchozím textu, je mezi nimi filtrační rychlost. Hodnota filtrační rychlosti zaznamenala ve zhruba stoletém vývoji rychlofiltrace zajímavé posuny. Zatímco zhruba od roku 1900 do 1950 byly zcela konzervativně navrhovány filtry s filtrační rychlostí kolem 4 – 5 m/h, zejména práce Baylise [11] posunula vývoj ve světě postupně k využívání vyšších filtračních rychlostí. Od začátku 70. let se v řadě vodárensky rozvinutých zemí považovala za standard filtrační rychlost kolem 12 m/h. Na konci 80. let byla překročena hranice 24 m/h a důsledkem bylo také to, že vznikl zájem o např. studium alternativních filtračních náplní a jejich kombinací či obecně celkového uspořádání filtrů. V roce 1987 byly uvedeny do provozu filtry Los Angeles Aqueduct Plant v Sylmaru, které pracují s návrhovou filtrační rychlostí 32-34 m/h.

Z vlastních měření v rámci předprojektové přípravy na modelech filtrace na několika úpravách (a stejně tak z měření na později realizovaných provozních filtrech) mohu uvést, že kvalita filtrátu byla u dobře zvolené filtrační náplně i při rychlostech 22–25 m/h zcela shodná s kvalitou filtrátu při filtračních rychlostech pod 10 m/h. Tato skutečnost otevírá možnosti pro aplikaci režimu provozu filtrů se snižující se filtrační rychlostí, o které jsem již dříve referoval i u nás [12-15].

Je samozřejmé, že návrh filtrů s vyšší filtrační rychlostí vyžaduje kvalitní předprojektovou přípravu. Hendricks uvádí [1] zajímavou skutečnost, která ukazuje právě na význam poloprovozních experimentů v současnosti. Zatímco několik desetiletí od roku 1900 pracovali projektanti s konzervativními návrhovými parametry a potřebu poloprovozních pokusů nijak významně nepocítovali, jejich význam a požadavky na ně v posledních desetiletích stále stoupají, protože se ukazuje, že jednak exaktní poznání nestačí pro kvalitní návrh tohoto technologického stupně, jednak úspory, které je možné oproti konzervativním návrhům dosáhnout jsou tak vysoké, že se jak vlastníci infrastruktury, tak provozovatelé úpraven snaží využít všech potenciálních možností pro jejich dosažení. A to je možné jen kvalitními poloprovozními experimenty a dokonalým ověřením všech procesů, které mají být aplikovány.

Dalším prvkem, který se v teorii i praxi uplatňuje je tzv. „coarse to fine theory“, která zdůvodňuje výhody vícevrstvých filtrů anebo i výhody, které nabízejí obráceně protékající filtry. Obecně je možné říci, že v ideálním filtru by se měla filtrační náplň ve směru toku vody postupně zjemňovat. Z toho důvodu není opodstatněný kdysi formulovaný požadavek na přesné rozdělení filtračních náplní dvouvrstvých filtrů. Je proto dokonce pozitivní, když zejména podsítná písková frakce proniká do spodního patra antracitové filtrační náplně.

Pro sledování kvality filtrátu se velmi osvědčil počítač částic. O použití tohoto přístroje a zkušenostech při sledování filtrace a flotace byl publikován článek [16].

Praní filtrů

Mnoho autorů se shoduje v tom, že zatímco fázi, ve které filtr separuje suspenze, bylo věnováno mnoho úsilí (protože tím je primárně dána kvalita upravené vody) fázi praní filtrů bylo věnováno zatím dosti málo pozornosti [1-3, 8, 17-18]. Že optimalizaci praní filtrů je i u nás věnováno zatím stále málo pozornosti je jistě možné diskutovat, avšak jsem přesvědčen, že tomu tak je. V tabulce 1 uvádím například pro informaci, jak se mohou lišit expanze filtračních náplní měřené na jedné úpravně. Je zřejmé, že různé filtry jsou v tomto případě prány s různou účinností.

Tabulka 1. Expanze filtračních loží různých filtrů stejné úpravně

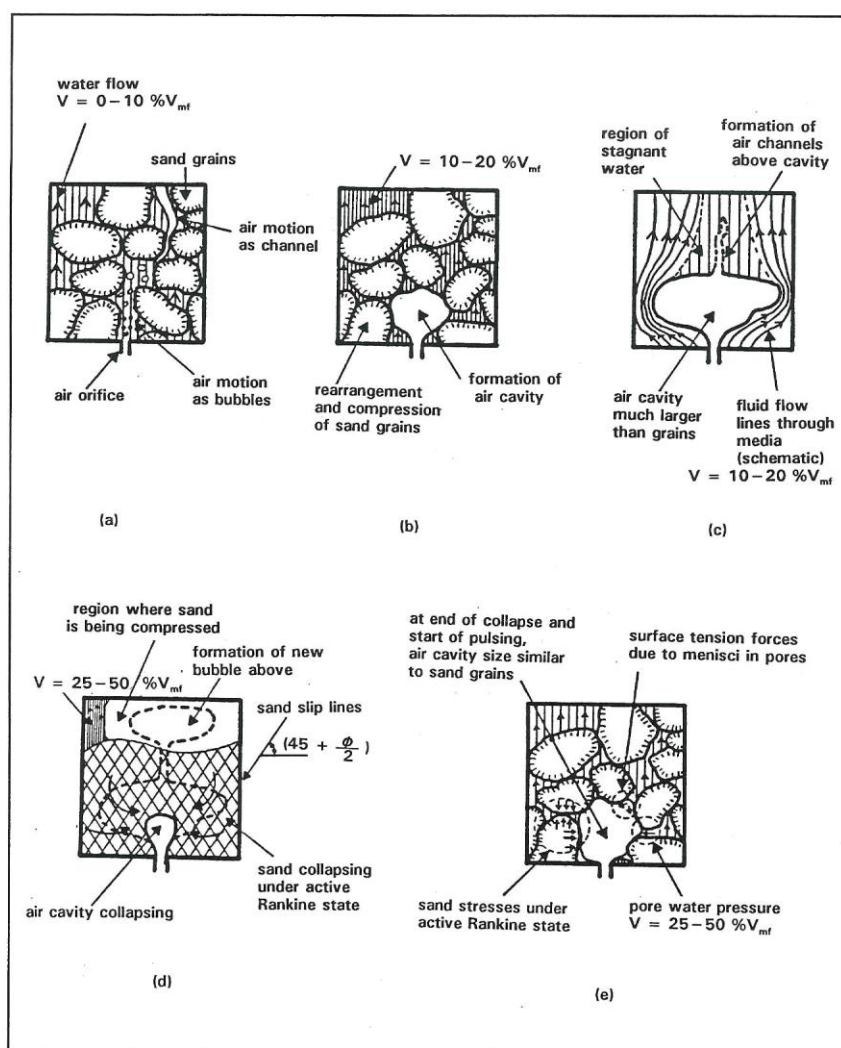
filtr	% expanze lože
F1	6,13
F3	12,32
F5	11,06
F7	12,41
F8	1,13
F9	3,06
F10	2,00
F11	1,84
F12	5,79

Tesařík například uvádí [8], že stejně důležitou funkci jako filtrační náplň má zařízení na rozdělení průtoku po ploše filtru. Při praní filtrační vrstvy je vzestupná rychlost vody až desetinásobná oproti rychlosti při filtraci. Tlaková ztráta roste při turbulentním proudění se čtvercem rychlosti. Proto se zařízení na rozdělení průtoku na dně filtru (drenážní systém) navrhuje s ohledem na potřeby praní filtrů.

Jak by měl ideální drenážní systém vypadat, uvádí Hendrics [1]. K tomu, co bylo uvedeno v předchozím odstavci, dodává, že by tento systém měl být spolehlivý, protože by ho neměl provozovatel vidět i několik desetiletí.

Ideální drenážní systém by měl splňovat tyto teoretické požadavky:

- Prací voda je distribuována co nejrovnoměrěji po celé ploše filtru
- Otvory pro vodu i vzduch jsou k sobě co nejbližší, aby mezi nimi nemohly vznikat nevyprané mrtvé kouty
- Otvory v drenážním systému nejsou náchylné k ucpávání
- Filtrát je odváděn co nejrovnoměrěji po celé ploše filtru
- Praní vzduchem a vodou může být provozováno současně
- Filtrační náplň může být umístěna přímo na porézní drenážní systém a nevyžaduje aby nad ní byla vrstva štěrku



Obr. 4 Ilustrace principu režimu praní při tzv. collapse pulsing [17].

Z praktického hlediska je možné poznamenat, že k ideálnímu drenážnímu systému se různé produkty více či méně blíží. V tomto příspěvku není možné se věnovat dalším detailům, zajímavé srovnání a informace z pohledu provozovatele však nedávno publikoval Fedor [19].

V naší literatuře se pravděpodobně dosud neobjevila informace o režimu praní, který Amirtharajah nazval „collapse pulsing“ [17,18]. Podrobný popis tohoto režimu je bohužel mimo rozsah tohoto příspěvku, avšak je ilustrován na obr. 4. Základem je zjištění, že

nejefektivnější praní je právě v tomto režimu, který se začíná objevovat v loži filtru při 10 – 20% prahové rychlosti (prahová rychlost je rychlost, nad kterou nastává expanze vrstvy zrnitého materiálu). Při zvýšení rychlosti prací vody na hodnoty mezi 25 – 50 % prahové rychlosti se režim collapse pulsing projevuje v celé hloubce filtračního lože a účinnost praní je nejlepší. Další zvyšování prací rychlosti vede naopak k režimu, který již není z hlediska praní filtru již tak účinný.

Závěr

Filtrace ve vodárenství prošla dlouhým vývojem. Základní princip rychlofiltrace je již zhruba jedno století starý, avšak teoretické poznatky nedovolují a spíše dokonce dokládají nezbytnost experimentálního přístupu k návrhu filtrů a optimalizaci jejich provozu. K tomu je možné používat různé metody, z nichž byla zmíněna zejména metoda měření průběhu tlakových ztrát v loži filtru a jednoznačný požadavek na kvalitní předprojektovou přípravu. Zatím byla v praxi opomíjena nejenom optimalizace procesu vlastní filtrace ale také praní filtrů.

Literatura:

1. Hendricks D.: *Water Treatment Unit Processes*. CRC Press, Boca Raton, FL, 2006.
2. Ives K.J.: *The Scientific Basis of Filtration*. Noordhoff, Leyden 1975.
3. Ives K.J.: *Water Supply*, 8, 151-155 (1990).
4. Bouchal A. Novák Z., Tesařík I.: *Navrhování úpraven vody*. SNTL, Praha, 1967.
5. Hereit F.: *Filtrace vody ve vodárenství*. MLVH ČSR, 1973.
6. Novák Z., Mega J., Kundera J.: *Aplikace černouhelného zrnitého materiálu při úpravě vody dvouvrstvou filtrací*. Zpráva VÚV Brno, 1976.
7. Tuček F., Chudoba J., Koniček Z. a kol.: *Základní procesy výpočty v technologii vody*, 499 str. SNTL, Praha 1988.
8. Tesařík I.: *Separácia suspendovaných častíc pri úprave vody*. VEDA, Bratislava 1980.
9. Šimko V.: *Využitie dvojmateriálovej filtračnej náplne pri úprave vody*. Príroda, Bratislava 1983.
10. Bálek M.: *Dvouvrstvá filtrace*. MLVH ČSR, 1989.
11. Baylis J.R.: *Seven Years of High Rate Filtration*. *J. AWWA*, 48, 585-596 (1956).
12. Dolejš P.: *Effects of pretreatment, declining and constant rate direct filtration on treatment of soft humic waters*. In: *Proceedings of Drinknet Workshop on Drinking Water Treatment*, pp.100-103 Water Research Centre Medmenham, UK, 1996.
13. Dolejš P.: *Výzkum a inovační aplikace technologických stupňů šitých na míru konkrétní úpravně vody – příklad realizace unikátních filtrů se snižující se filtrační rychlostí*. Sborník konference Rekonstrukce úpraven vody, s. 31-38. W&ET Team, Č.Budějovice 1998.
14. Dolejš P., Pácalt F. Kuchař M.: *Filtry se snižující se filtrační rychlostí – uvedení do chodu a provozní výsledky na ÚV Meziboří*. Sborník konference Rekonstrukce úpraven vody, s. 65-72. W&ET Team, Č.Budějovice 1998.
15. Dolejš P., Dobiáš P.: *První výsledky z rekonstruované filtrace na ÚV Hradiště*. Sborník konference „Pitná voda 2006“, s. 183-188. W&ET Team, Č.Budějovice 2006.
16. Dolejš P., Dobiáš P.: *Využití počítačů částic v technologii úpravy vody*. *Vodní hospodářství*, 57, č. 4, s. 111-113 (2007).
17. Amirtharajah A.: *Fundamentals and Theory of Air Scour*. *Jour. Envir. Eng.-ASCE*, 110, No. 3, 573-590 (1984).
18. Amirtharajah A., Fitzpatrick C.S.B., Ives K.J.: *Endoscope Studies on Optimum Backwashing of Filters with Air Scour*. *AWWA Annual Conference*, June 1990, Cincinnati, OH.
19. Fedor F.: *Zkušenosti s provozováním filtračních drenážních systémů bez mezidna*. Sborník konference „Pitná voda 2008“, s. 307-312. W&ET Team, Č. Budějovice, 2008.