Úprava pitné vody

Akademie věd
České republiky

věda 91
kolem
nás
výzvy
a otázky

Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v. v. i., založený v roce 1952, se zpočátku zaměřoval na problémy klasické hydrauliky, zejména v souvislosti s intenzivním budováním vodohospodářských staveb. V současnosti se orientuje především na úpravu vody, hydrologii, mechaniku tekutin a reologii, podílí se na řešení řady aktuálních celospolečenských problémů a témat.

Oddělení vodních zdrojů tvoří skupiny hydrologie a úpravy vody. Výzkumná činnost v oddělení vodních zdrojů se zaměřuje na problematiku vody v krajině (vodní režim, povodně × sucho) a její využití člověkem (kvalita, úprava a znovuvyužití vody). Mezi hlavní témata patří pohyb vody v krajině, retenční schopnost povodí, srážko-odtokové bilance, interakce půda–rostlina–voda, proudění vody, transport sedimentů či povrchový/podpovrchový odtok vody, dále pak kvalita zdrojů vody, procesy a technologie úpravy vody, kvalita pitné vody, odstraňování organických látek a mikropolutantů atd.

Hydrologická skupina se zabývá několika tématy. Prvním z nich je pohyb vody v půdě. Nasycení půdního profilu je jedním z klíčových faktorů vzniku povodní a jeho znalost je základním stavebním kamenem hydrologických předpovědí. Druhým tématem je vliv klimatických změn na hydrologický režim toků na území ČR. Jeho změna totiž může zásadním způsobem ovlivnit hospodaření s vodními zdroji. Dlouhodobým projektem je pak podrobný hydroekologický monitoring v pramenných oblastech ČR, jehož cílem je co nejpřesnější kvantifikace všech vstupů do povodí a výstupů z něj.

Skupina úpravy vody se zabývá studiem mechanismů odstraňování problematických znečišťujících příměsí z vody. Jsou to jednak tzv. AOM (*Algal Organic Matter*), organické látky pocházející z metabolické činnosti a rozkladu sinic a řas, odstraňované konvenční technologií, tj. koagulací, případně s použitím tzv. předoxidace (např. manganistanem draselným, ozonem, chlorem nebo UV zářením). Za druhé jsou to mikropolutanty (pesticidy, léčiva atd.), které jsou odstraňovány pomocí adsorpce na aktivním uhlí. Nově se skupina úpravy vody zabývá výskytem a charakterizací mikroplastů v pitné vodě. Jelikož se jedná o mikropolutanty s potenciálním negativním vlivem na lidské zdraví, je jejich přítomnost v pitné vodě nežádoucí. Výzkum v této oblasti se zaměřuje také na přítomnost mikroplastů ve zdrojích surové vody a na účinnost jejich odstranění jednotlivými procesy úpravy, které se při výrobě pitné vody používají. Je velmi důležité zaměřit výzkum tímto směrem, protože doposud není navržena žádná speciální technologie pro eliminaci mikroplastů. Dalším předmětem výzkumu je vliv fyzikálně-chemických parametrů (typ a dávka koagulačního činidla, pH, $KNK_{4,5}$, teplota) a hydrodynamických podmínek (především velikost a distribuce gradientu rychlosti) na vlastnosti vloček (velikost, struktura, porozita, tvar) při konvenční úpravě vody. Vlastnosti vloček (agregátů) zásadně ovlivňují účinnost jejich následné separace, a tím i úpravy vody. Vedle základního výzkumu se skupina úpravy vody zabývá také výzkumem aplikovaným včetně návrhu a realizací technologií přímo na míru konkrétním úpravnám vody.

Na obálce údolní nádrž Vrchlice – zdroj surové vody pro úpravnu vody U Sv. Trojice v Kutné Hoře (rozvoj vodního květu 14. 9. 2018)

Úvod

V několika posledních letech, včetně toho loňského, panovalo v České republice nebývalé sucho a bohužel hrozí i v letech následujících. V této souvislosti si všichni musíme klást otázku, zda si my lidé vody vážíme a uvědomujeme si její nepostradatelnost a naši absolutní závislost na ní? V souvislosti s vodou mne napadají dvě základní otázky: Máme vody dostatek? Jaká je její kvalita?

Máme vody dostatek?

Ale jistě, slýchávali jsme ještě před několika málo lety z úst odborníků i politiků. Toto přesvědčení vycházelo z opojení vlastními úspěchy a také z toho, že jsme v mnoha případech zcela ztratili kontakt s okolním světem, se skutečností, že jsme součástí přírody a krajiny a že bez nich nebude ani nás. V souvislosti s tím dnes chápeme pitnou vodu jako naprostou samozřejmost, jako produkt, jako zboží. Přestali jsme přemýšlet, kde a jak se voda „rodí", jak „putuje" biosférou; že je zdrojem života i radosti z něj. Přitom závislost lidské civilizace na vodě je zřejmá. Z celkových zásob vody jen cca 2,3 % tvoří voda sladká. Z tohoto množství pak celé 1,7 % je voda zmrzlá v ledovcích. Zbývá pouhých 0,6 % celkových zásob vody, které představují potenciál využitelný pro lidskou společnost (nepočítáme-li s nákladným odsolováním mořské vody). Nicméně i těchto 0,6 % nelze považovat za zásobu, kterou lze kdykoli jednoduše využít. Navzdory tomu množství vody spotřebované lidmi neustále stoupá. Lidstvo spotřebuje téměř 4000 km^3 sladké vody za rok, z toho celých 70 % v zemědělství, 20 % v průmyslové výrobě a 10 % v domácnostech. Spotřeba vody však není rovnoměrně rozložena. V České republice se pohybuje okolo 103 litrů na osobu a den, naopak ve Velké Británii, USA a Austrálii činí neuvěřitelných 300 litrů. Pak lze jen těžko uvěřit, že v subsaharské Africe musí lidé vystačit i s méně než 10 litry vody na den. A prognózy jsou nelichotivé. Některé odhady už nyní varují, že se špatným přístupem k pitné vodě se potýká až 40 % obyvatel planety. V roce 2025 by i kvůli klimatickým změnám a s tím spojenému rozšiřování pouští mělo téměř 1,8 miliardy lidí žít v oblastech bez trvalého přístupu k vodě.

Jaká je tedy odpověď na první otázku? Jednoduchá, ale mrazivá. **Vody máme nedostatek!**

Jaká je kvalita vody?

Tady je odpověď už mnohem složitější a je závislá především na výskytu a charakteru vodních zdrojů a také na zdrojích jejich znečištění. Omezme se tedy v odpovědi na náš domov – Českou republiku. I při tomto geografickém zúžení se nejedná o otázku s jednoznačnou odpovědí. Nicméně asi nikoho nepřekvapí, že se kvalita zdrojů povrchové i podzemní vody neustále zhoršuje. Hlavními příčinami tohoto stavu je především zvyšující se míra eutrofizace vodních zdrojů (do vody se splachují dusíkatá hnojiva, dostávají se do ní fosfáty z pracích prostředků atd.) a s ní spojený masivní rozvoj vodního květu a pak také zátěž antropogenními polutanty (pesticidy, léčiva, hormony, mikroplasty, produkty denní péče atd.), jejichž druhů neustále přibývá a koncentrace ve vodách rostou. Podle posledních analýz z roku 2018 se například ukazuje, že v cca 40 % podzemních zdrojů pitné vody se vyskytují nadlimitní koncentrace pesticidních látek. Nejinak na tom jsou i povrchové

zdroje vody. To je něco, nad čím už pochopitelně nelze zavírat oči. Podobný problém je na řadě míst i s dalšími látkami, třeba farmaky, prostředky osobní péče nebo mikroplasty. Jaká je tedy kvalita zdrojů pitné vody? Asi nikdo nechce slyšet vyhýbavou odpověď. Buďme tedy stateční a konečně to řekněme naplno. **Špatná!**

To jsou asi odpovědi, které jsme v koutku duše tušili, nicméně slyšet jsme je nechtěli. A co teď? Spousta dalších otázek. Mohly by nepochybně naplnit celý rozsah této publikace. Položme si ale jen tři nejzásadnější. Je v současné době vůbec ještě možné vyrobit pitnou vodu bez škodlivých chemických příměsí? A za jakou cenou? A bude to možné i v budoucnosti?

Pesticidy

Pesticidní látky jsou v posledních letech nejčastější příčinou překročení hygienických limitů daných vyhláškou MZ č. 252/2004 Sb. Nacházejí se v cca 75 % všech analyzovaných pitných vod v ČR, byť se většinou jedná o koncentrace nižší, než je stanovený limit. Podle studie zveřejněné ČHMÚ je cca 40 % zdrojů podzemní vody kontaminováno nadlimitními koncentracemi pesticidů, v povrchových vodách dosahují na mnoha lokalitách koncentrace pesticidů dokonce tisíců mikrogramů na litr.

Za přítomností pesticidů ve vodě stojí výhradně splach ze zemědělské půdy. Hlavním viníkem je tedy nešetrné zacházení s prostředky na ochranu rostlin v blízkosti vodních zdrojů a obecně pěstování plodin nevhodných pro tyto oblasti, jako jsou kukuřice či řepka. To vše je pak umocněno změnou klimatu. Stále častější období sucha, kdy dochází ke koncentrování pesticidů, střídají náhlé a vydatné srážky, které zapříčiňují intenzivní splach z půdy.

V takové situaci je nezbytné dbát na jejich odstraňování z pitné vody (jedná se především o adsorpci těchto látek na aktivním uhlí), ale také na snížení kontaminace zdrojů pitné vody. Proto by v jejich bezprostředním okolí měla být orná půda nahrazena extenzivně obdělávanými travními porosty a zcela zakázána aplikace nejen pesticidů, ale i hnojiv.

Úpravna vody – chemická továrna

Jak vlastně dnes ale taková úpravna vody vypadá? Vzpomínám, že když jsem jako student na střední škole měl poprvé možnost navštívit provoz úpravny vody, byl jsem překvapen, jak složitý je. Měl jsem obecně vžitou představu, že úpravna vody je vlastně jen objekt sloužící k jejímu jímání, kde nanejvýš probíhají nějaké „jednoduché“ procesy, sloužící k „vyčištění“ vody – prostě vodárna. Jak hluboce jsem se pletl, mi došlo během několika málo prvních minut strávených v provozu úpravny. Viděl jsem v podstatě velký chemický provoz, kde se do vody dávkovala řada chemikálií, vše se míchalo v obřích nádržích. Viděl jsem, jak se nečistoty obsažené v surové vodě shlukují do podivných agregátů (vloček), které se následně z vody odstraňovaly sedimentací a filtrací. Pochopil jsem, že získat pitnou vodu je náročný proces. Až o řadu let později, když jsem se rozhodl svůj odborný život zasvětit vodě, jsem si ale uvědomil mnohem podstatnější skutečnost, a sice že za těmi všemi zjevnými a na první pohled viditelnými procesy se skrývají děje na molekulární úrovni, které sice

nevnímáme, ale právě ony rozhodují o tom, jaká bude výsledná kvalita získané vody. Jenže to, co vidíme na vlastní oči, je nám vždy obecně přístupnější než něco, o čem se nemůžeme přesvědčit vlastními smysly. Možná proto dokonce i většina odborníků vnímá proces úpravy vody ryze inženýrským způsobem, skrze plány a výkresy budov, nádrží, potrubí. Vidím to pokaždé (respektive téměř pokaždé), když se rekonstruuje nějaká úpravna vody a ona „rekonstrukce" se omezí na stavební objekty, nikoli na procesy. Snad je to i proto, že navrhnout budovu či nádrž je v podstatě jednoznačné a srozumitelné zadání, zatímco popsat procesy probíhající při úpravě vody je velmi komplikované. „Projekt" popisující děje při úpravě vody na submikroskopické úrovni by totiž musel obsahovat velké množství dat, grafů, vzájemných závislostí různých proměnných, schémat chemických reakcí, popisů biologických dějů včetně mnoha druhů organismů, které se na nich podílejí. Rozsah takového popisu by pak pochopitelně významně přesahoval rozsah stavebních výkresů. V této souvislosti si také musíme uvědomit, že zatímco stavební a strojní objekty jsou po realizaci úpravny neměnné, procesy úpravy vody se musí neustále přizpůsobovat a optimalizovat. Nejběžnější důvod optimalizace je pak změna kvality surové vody. Parametrů popisujících kvalitu surové vody, podle kterých je nezbytné optimalizaci provádět, je celá řada, od teploty až po měnící se koncentrace a složení obsažených organických látek (např. huminové látky, organické látky produkované fytoplanktonem, antropogenní mikropolutanty a jejich rozkladné produkty).

Úpravna vody U Svaté Trojice v Kutné Hoře – nádrže pomalého agregačního míchání a sedimentační nádrže

Historie vodárenství a úpravy vody

Objekty sloužící k přepravě vody budovaly již staré civilizace v Mezopotámii a Egyptě, proslulé jsou římské akvadukty. První vodárenské objekty (vodárny) se v Evropě, a tedy i u nás, začaly budovat v období renesance. Jen v Praze v průběhu 15. a 16. století vznikly čtyři vltavské vodárny a tento systém sloužil s drobnými odchylkami až téměř do konce 19. století. Na sklonku roku 1902 byl představen projekt vybudování vodárny v Káraném, využívající podzemní vodu v oblasti soutoku Jizery a Labe. První opravdu pitná voda v historii Prahy byla z této vodárny puštěna 1. ledna 1914.

Další významný zlom nastal výstavbou nové podolské vodárny, která byla uvedena do provozu v roce 1929. Vltavská voda zde byla „upravována" pomocí vícestupňové pískové filtrace a následně „dočištěna" na pomalých biologických (anglických) filtrech. Vzhledem k tomu, že prognózy vývoje spotřeby pitné vody ukazovaly enormní nárůst, bylo v padesátých letech rozhodnuto o její rekonstrukci, která přinesla změnu technologie úpravy vody. Zavedena byla koagulace znečišťujících příměsí a dvoustupňová separace suspenze. První stupeň byl tvořen čiřiči typu Binar-Bělský, druhý pak pískovou filtrací.

Největším zdrojem pitné vody pro Prahu je dnes úpravna vody Želivka, která je i největší vodárnou v České republice a řadí se k největším v Evropě. Do provozu byla uvedena v roce 1972 s výkonem 3000 l pitné vody za sekundu. V roce 1987 byla rozšířena až na výkon 7000 l pitné vody za sekundu. Základní technologií úpravy vody je zde koagulace s jednostupňovou separací na otevřených pískových rychlofiltrech. V současné době probíhá výstavba dalšího stupně úpravy, spočívajícího ve filtraci vody přes granulové aktivní uhlí.

Úpravna vody U Svaté Trojice v Kutné Hoře – nádrž rychlého agregačního míchání

Celou touto úvahou jsem se snažil říct, že ve skutečnosti je tak trochu jedno, jak vlastně úpravna vody vypadá, ale vůbec není jedno, jaké děje v ní probíhají. A ty jsou závislé především na kvalitě surové vody a reakčních podmínkách. Jen samotná koagulace tak, jak ji při úpravě vody chápeme, je souborem velkého množství dílčích procesů. Probíhají při ní transportní mechanismy, jako je difuze molekul, transport částic (např. sedimentace), mezimolekulární – kovalentní interakce, částicové nekovalentní interakce – elektrostatické, hydrofobní i hydrofilní, nebo třeba interakce s polymery. Díky tomu je koagulace ovlivněna řadou parametrů, především pak charakterem a složením znečišťujících příměsí, použitým

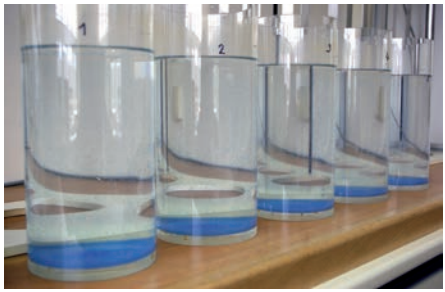
koagulačním činidlem, teplotou a pH vody. Je zřejmé, že optimalizovat takový proces je velmi náročné a že „optimalizaci" je třeba provádět neustále, s ohledem na průběžně se měnící kvalitu vody. Jak je tedy možné, že úprava vody je stále, a to i u značného množství profesionálů, chápána jako „vodárenství"? Převládá názor, že důležitá je nádrž, chemie vždycky nějak dopadne. Bohužel v praxi ale velmi často vidíme, že nedopadla.

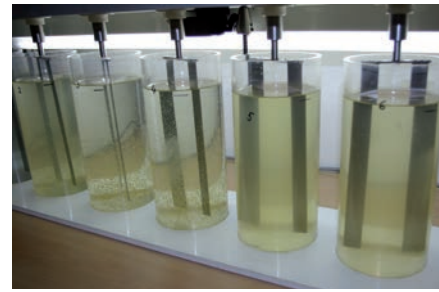
Neptejme se tedy, jak má **vypadat** úpravna vody. Ptejme se, jaké **procesy** v ní mají probíhat a jak je **nastavit** tak, aby výsledkem byla pitná voda nejen dnes, ale i v budoucnosti. Dívejme se na úpravnu vody jako na soubor složitých fyzikálních, chemických a biochemických procesů s vědomím, že neexistuje žádné jednotné schéma úpravny vody, které by bylo univerzálně použitelné vždy a všude. Při návrhu technologie úpravy vody totiž máme vždy jen dva pevné body – kvalitu surové vody a požadavky na vodu pitnou.

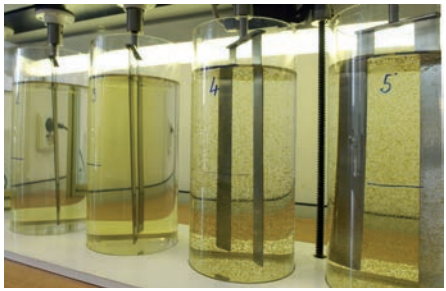
Výzkum versus realita

Úprava vody je složitý proces tvořený nepřeberným množstvím procesů fyzikální, chemické a biochemické povahy. V zásadě jde ale vždy o transport a interakce částic, tedy s trochou nadsázky vlastně o celou fyziku a chemii. Takto široký záběr si jistě žádá spolupráci řady odborníků nejrůznějších profesí, počínaje koloidními a fyzikálními chemiky, přes mikrobiology a hydrobiology až po odborníky na hydrauliku a mechaniku tekutin. Vývoj v oblasti úpravy vody je podmíněn nejen potřebou stále účinnějších způsobů odstranění znečišťujících příměsí, ale také rozvojem samotných vědeckých disciplín vedoucím k objevům umožňujícím zpětně ovlivňovat technologie samotné. Zpětnou vazbu mezi vědeckým poznáním a technologickými potřebami úpravy vody nelze ničím nahradit. Pokud nefunguje příliš dobře, dostáváme se do situace, která logicky vede ke stagnaci praxe v úpravě vody. Bohužel to je situace, kterou si do značné míry prochází obor úpravy vody v České republice v současné době. Přitom nejde jen o samotné rekonstrukce úpraven vody (tu více, tu méně povedené), ale především o využívání nejnovějších poznatků vědy pro provoz a optimalizaci procesů úpravy vody.

Vysvětleme si situaci na zdánlivě jednoduchém příkladu optimalizace reakčních podmínek (pH) koagulace různých znečišťujících příměsí obsažených v surové vodě při použití hlinitých a železitých solí jako koagulačních činidel. Hodnota pH ovlivňuje průběh hydrolýzy hliníku a železa a tím i charakter (kladný/záporný) a velikost náboje, který na svém povrchu nesou jejich částice. Vedle toho ovlivňuje obdobné vlastnosti i u znečišťujících příměsí. Protože znečišťujících příměsí je v surové vodě celá řada, je výsledné „optimální" pH pro jejich koagulaci jakýmsi průnikem dílčích „optimálních" reakčních podmínek odpovídajících povaze jednotlivých příměsí a použitého koagulačního činidla. Je zřejmé, že jak se, například v průběhu roku, mění charakter surové vody, mění se i „optimální" reakční podmínky. Jinými slovy, hodnota pH, která je vhodná pro koagulaci v únoru, nemusí a zpravidla ani není vhodná třeba v srpnu. Bohužel je na řadě úpraven praxe taková, že se do provozního řádu napíše jedna hodnota pH a ta se pak udržuje prakticky celou dobu provozu technologie. Pokud je ale na takové úpravně provedena optimalizace, ukáže se, že optimální pH v zimním období je 7,2 a v letním 5,5 (konkrétní případ z vlastní praxe). Dokud úpravna neměla tyto informace, řešila celé roky problém nízké kvality upravené vody v letních měsících zvýšením dávky







Laboratorní optimalizace úpravy vody pomocí sklenicové zkoušky (*jar test*)

koagulačního činidla a dávkováním pomocného polyflokulantu. To sice vedlo k dosažení odpovídající kvality pitné vody, ale zároveň to znamenalo zkrácení filtračních cyklů vlivem zvýšeného dávkování činidel, čímž došlo k nárůstu spotřeby prací vody a energie, o nárůstu spotřeby drahých koagulačních a flokulačních činidel ani nemluvě. Přitom řešení bylo tak jednoduché, tedy snížit pH pomocí kyseliny na hodnotu odpovídající letnímu období. Opatření vedlo k úsporám chemikálií, prodloužení filtračních cyklů, lepší separaci agregátů, k snížení zanášení aktivního uhlí (oddálení doby pro výměnu náplně), snížení množství zbytkových organických látek a tím i tvorby vedlejších produktů dezinfekce, především chloroformu. Jak je možné, že tato opatření nebyla na dané úpravně přijata hned na počátku provozu technologie úpravy vody? Jednoduše tam nikdo netušil, že existují různá reakční pH pro různé znečišťující příměsi. Zatímco v zimním období bylo třeba odstraňovat především částice tvořící zákal, pro které je optimální pH skutečně kolem hodnoty 7, v létě při výskytu organických látek produkovaných sinicemi a řasami (AOM – *Algal Organic Matter*) je naopak pro jejich účinné odstranění třeba pH snížit pod hodnotu 6. Protože jsou AOM posledních cca 20 let předmětem intenzivního vědeckého bádání, je tato skutečnost ve vědecké komunitě obecně známá. Do běžné praxe však očividně přenesena nebyla. Nejinak je tomu i s jinými znečišťujícími příměsemi. Řešení pro jejich opravdu účinné odstranění jsou obvykle známa, do praxe se však často nepromítnou. Přitom ve značné většině případů nejde o zavádění nových nákladných technologií, ale pouze o optimalizaci těch stávajících.

Dovolím si uvést ještě jeden příklad rozporu mezi stavem vědeckého poznání a praxí. Vedle koloidních částic hlinitokřemičitanů (jílů) a mikroorganismů (sinice, rozsivky, zelené řasy atd.) jsou dominantní složkou znečišťujících příměsí povrchových vod

organické látky přírodního původu, tzv. NOM (*Natural Organic Matter*). Jedná se především o látky huminového charakteru a již zmíněné AOM, pocházející z metabolické činnosti nebo rozkladu sinic a řas. Zatímco huminové látky byly dominantní složkou NOM v povrchových vodách vždy, AOM začínají dominovat v posledních cca 10–15 letech, a to především ve vegetačním období (rozsivky v březnu a dubnu, zelené řasy v od května do července a sinice obvykle od července až do září/října). Problém AOM je dalekosáhlý a bude podrobněji zmíněn v následujícím textu. Nicméně zde je nutné upozornit na skutečnost, že jsou obtížně odstranitelné a pokud nejsou dostatečně odstraněny, stávají se při následném hygienickém zabezpečení prekurzory velmi toxických vedlejších produktů dezinfekce vody, tzv. DBPs (*Disinfection By-Products*). Právě DBPs jsou v posledních letech nejčastější příčinou nedodržení hygienických limitů pitné vody, a to nejen u nás, ale i ve světě. Dnes je známo již téměř 800 těchto látek, ale hygienický limit je pochopitelně stanoven jen u několika. Je samozřejmě nereálné stanovit limit pro všechny, nicméně úprava vody musí být bezpodmínečně prováděna tak, aby zbytkové koncentrace jejich prekurzorů (organických látek) byly minimální. Je tedy nutné stanovovat relevantní metodou zbytkové koncentrace organických látek. To se dnes podle vyhlášky Ministerstva zdravotnictví č. 252/2004 Sb., kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody, děje pomocí ukazatele chemické spotřeby kyslíku ($CHSK_{Mn}$). Limit je stanoven na 3 mg/l. Tento ukazatel má ale jeden základní nedostatek. Sice dobře stanovuje (oxiduje) organické látky huminového charakteru, avšak velmi obtížně (anebo vůbec) postihuje organické biopolymery tvořící AOM, jako jsou proteiny a polysacharidy. Mnohdy pak dochází k situacím, že upravená voda sice splňuje vyhlášku v parametru $CHSK_{Mn}$, nicméně koncentrace organických látek v upravené vodě je i několikrát vyšší, než odpovídá stanovené hodnotě. Tyto „nezjištěné“ organické látky pak jsou potenciálním rizikem pro vznik DBPs. Míra stanovení (oxidace) např. neproteinové složky AOM je pouhých cca 20 %. Jediný relevantní parametr pro stanovení organických látek je tak pro pitné vody celkový nebo rozpuštěný organický uhlík (TOC/DOC – *Total/Dissolved Organic Carbon*). Ten je dnes však pouze „doporučeným“ parametrem s limitem 5 mg/l. Povinný je pouze v případě celkového rozboru vody (provádí se jen několikrát do roka v závislosti na velikosti zdroje pitné vody), a to ještě v případě, že celkové množství vyrobené vody přesahuje 10 000 m^3/den (cca 115 l/s). Příklad z praxe: úpravna vody s výkonem 80 l/s, tedy bez povinnosti stanovovat ukazatel TOC, hodnota $CHSK_{Mn}$ po úpravě 2,2 mg/l, hodnota TOC 6,3 mg/l. V této souvislosti podotýkám, že daná úpravna tento ukazatel vůbec nestanovuje a jeho hodnotu tedy běžně nezná. Podle dnešní zákonné úpravy je tak tato voda pitná (hodnota $CHSK_{Mn} < 3$ mg/l), realita je však poněkud jiná. Další otázkou je, zda jsou hodnoty obou limitů vhodně stanoveny? Domnívám se, že nikoli. Podle současných poznatků je ukazatel $CHSK_{Mn}$ prakticky zbytečný, nicméně levný, a naopak ukazatel TOC/DOC by měl být zaveden jako povinný a jeho hodnota snížena, ideálně na 3 mg/l.

Na těchto dvou příkladech jsem se snažil demonstrovat skutečnost, že transfer vědeckých poznatků do praxe úpravy vody je nedostatečný. Navíc o něj mnohdy ani není zájem. Voda přece odpovídá požadavkům vyhlášky. Obávám se ale, že jak se neustále kvalita surové vody zhoršuje, bude potřeba optimalizovat stávající a zavádět nové technologie. Upravit vodu na pitnou bude stále náročnější. Z tohoto důvodu je třeba

urychleně propojit vědu s praxí. Dnes jsou nůžky mezi výzkumem a realitou na řadě úpraven vody v České republice široce rozevřeny a je nutné je opět zavřít. Realita je taková, že i přes některé velmi povedené realizace technologií úpravy vody na několika úpravnách v posledních letech nelze čekat, až nastane problém. Začít je třeba hned.

Přírodní voda

Co je to „přírodní" voda? Voda pocházející z přírodních zdrojů, tedy veškerá voda na Zemi? Nebo voda bez obsahu cizorodých (umělých) látek? Poněkud jinak tento pojem budou asi vnímat běžní lidé a jinak vodárenský technolog. Pro většinu lidí bude „přírodní voda" nepochybně synonymem vody neznečištěné. Realita, s kterou dnes pracuje vodárenský technolog, je ale těmto představám na hony vzdálena. I ta nejčistší „přírodní voda" obsahuje určité množství antropogenních polutantů, byť třeba jen ve stopových koncentracích. Vodárenský technolog tak raději nahradí spojení „přírodní voda" termínem „surová voda". Surovou vodu tak zcela bez emocí chápe jako surovinu pro „výrobu" finální pitné vody. Surovinu, kterou je díky naší činnosti stále náročnější zpracovat na konečný výrobek. Upřímně, není vlastně takové uvažování tak trochu na škodu? Je voda skutečně jen surovina, třeba jako uhlí nebo ropa? Lidské tělo je z cca 60 % tvořené vodou.

Každá „přírodní," a tedy i „surová" voda obsahuje řadu anorganických i organických příměsí, z nichž v našich středoevropských podmínkách v povrchových vodách obvykle dominují koloidní jílovité částice (hlinitokřemičitany) a přírodní organické látky různorodé povahy, které se vyskytují jak ve formě koloidů (především micelárních), tak i v rozpuštěné formě. Zvláštní skupinu pak tvoří mikroorganismy, především sinice a řasy (nejčastěji rozsivky a zelené řasy). Podzemní vody jsou naopak chudé na výskyt koloidních částic a látky se zde vyskytují nejčastěji v rozpuštěné iontové formě. Z aniontů dominují hydrogenuhličitany, chloridy, sírany a dusičnany. Jako kationty se pak vyskytují především vápník, hořčík, železo nebo mangan.

Úprava vody v minulosti byla zaměřena především na odstraňování výše uvedených látek. U povrchových vod se jednalo o jílovité částice a huminové látky. Na tyto „znečišťující" příměsi pak byly nastaveny technologické postupy tvořené nejčastěji koagulací a následnou separací suspenze v jednom (filtrace) nebo dvou krocích (sedimentace a filtrace). Vše fungovalo velmi dobře a zdálo se, že na těchto procesech úpravy vody není co zlepšovat. Pak se však v polovině sedmdesátých let zjistilo, že upravená voda obsahuje velké množství toxických THM (trihalogenmetany). Výskyt THM v upravené vodě ukázal na skutečnost, že koagulace nefunguje, jak má, a že v „upravené" vodě se vyskytuje značné množství organických látek, které slouží jako prekurzory jejich tvorby při následné chloraci. Příčinou nízké účinnosti odstranění organických látek v té době byla skutečnost, že podmínky koagulace se obvykle nastavovaly na odstranění zákalotvorných látek (jílovité částice). Objev THM v pitné vodě vedl k opětovnému zájmu odborné veřejnosti o koagulaci, ale také k rozvoji dalších technik, jako je adsorpce na aktivním uhlí a membránová filtrace, s cílem eliminovat zbytkové koncentrace organických látek. Procesy úpravy vody se významně přeorientovaly na odstranění především huminových látek, které jsou významnými prekurzory THM. Koagulace byla vzkříšena nejen jako vědecké téma, ale pod termínem *enhanced coagulation* také jako moderní technologie úpravy vody. Vývoj nových

koagulačních technik vedl k eliminaci zbytkových huminových látek na únosnou mez, snížil se obsah THM a „vodárenství“ se opět ukolébalo v stojatých vodách. Ale to jen do doby, než se po celém světě začal ve zdrojích surové vody objevovat další strašák – sinice. Opět bylo třeba hledat nová řešení stávajících technologií a zároveň vyvíjet nové. Výzkum v oblasti koagulace se zaměřil na samotné buňky sinic a řas a stále častěji se začala uplatňovat separace agregátů pomocí flotace – DAF (*Dissolved Air Flotation*), která je velmi účinná i na separaci mikroorganismů. Postupem času se však ukázalo, že největší problém představují látky, které sinice a řasy produkují, tzv. AOM (*Algal Organic Matter*), které jsou nejen prekurzory vedlejších produktů dezinfekce vody, ale také zdrojem řady dalších obtíží (viz další text).

Na první pohled by se mohlo zdát, že „přírodní“ voda bude stále stejná – neměnná, nebo se bude měnit jen velmi pozvolna, a tak její úprava na vodu pitnou nebude činit velké problémy. Opak je však pravdou. Složení přírodní vody se mění neustále a mnohdy i velmi rychle, třeba během několika málo hodin. Rychlé a výrazné změny v kvalitě přírodní vody jsou velmi často způsobené právě i výskytem sinic a řas a uvolňováním AOM. Ty se nepochybně ve vodě vyskytovaly i v minulosti, nikdy však netvořily dominantní složku organických látek. Dnes na mnoha lokalitách ve světě, ale už i u nás, převládají. Zatímco dříve se problémy spojené

Údolní nádrž Švihov (Želivka) – rozvoj vodního květu sinic na profilu Vojslavice 2. 8. 2018

s výskytem sinic objevovaly jen okrajově, dnes ovlivňují úpravu vody prakticky na všech úpravnách využívajících povrchovou vodu. Protože se mění „složení“ přírodní vody, musí se změnit i technologické postupy pro její úpravu. Povahou jsou AOM značně odlišné od huminových látek, odlišné jsou tedy i mechanismy jejich koagulace. Přestože se odstranění AOM věnuje vědecká pozornost po celém světě, zdaleka neumíme všechny jejich složky jednoduše a účinně odstranit. Samostatnou kapitolou je pak uplatnění těchto výsledků v praxi.

Voda jako koktejl látek

Již před více než dvěma a půl tisíciletími si jeden z největších starověkých „mudrců“ Thalés Milétský (624–548 př. Kr.) povšimnul, že „podstatou všech věcí je voda, z vody vše pochází a vše se zase do vody vrací“. Je pozoruhodné, jak dokázal vystihnout „úlohu“ vody na Zemi. Vody jako zdroje života i vody jako nejvýznamnější transportní složky biosféry. To, že voda slouží jako nenahraditelný a velmi efektivní transportér v koloběhu látek, energie a informací v biogeochemických cyklech, však zároveň znamená, že velmi efektivně přijímá a transportuje i většinu antropogenních polutantů. Je tedy zcela mylné se domnívat, že dnes na světě existuje voda (snad s výjimkou hluboké podzemní vody), která by nebyla koktejlem cizorodých látek. Jejich výskyt je všudypřítomný a potvrzení jejich přítomnosti ve zdrojích vody je jen otázkou dostatečných a vhodných analýz a mezí jejich stanovitelnosti. S tím, jak se stále zdokonalují analytické postupy a přístroje, nacházíme stále další a další látky přítomné nejen ve vodě, ale i ve všech dalších složkách životního prostředí. „Je tedy naše pitná voda skutečně ‚pitná‘?“ ptá se stále větší množství lidí. Popravdě musím přiznat, že je to jedna z nejtěžších otázek, co znám. Není snadné přiznat, že nevím. Obvykle pak následuje podivný výraz na tváři tazatele a řada dalších otázek. Než se ale pokusím vysvětlit, proč na to není lehké odpovědět, pojďme se nejdříve podívat, co to vlastně ta „pitná voda“ je. Legislativně se jedná o zdravotně nezávadnou vodu, která ani při trvalém požívání nevyvolá onemocnění nebo poruchy zdraví přítomností mikroorganismů nebo látek ovlivňujících akutním, chronickým či pozdním působením zdraví fyzických osob a jejich potomstva, jejíž smyslově postižitelné vlastnosti a jakost nebrání jejímu požívání a užívání pro hygienické potřeby fyzických osob. Požadavky na její jakost jsou dány vyhláškou Ministerstva zdravotnictví České republiky č. 252/2004 Sb., kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody. Vyhláška stanovuje limity pro mikrobiologické a biologické ukazatele (celkem 10 ukazatelů) a dále pro ukazatele fyzikální, chemické a organoleptické (smysly vnímatelné, např. barva, chuť atd.), kterých je 55. Celkově se tak jedná o 65 hodnot, které „rozhodují“ o tom, zda daná voda je, nebo není pitná. Zamyslíme-li se nad tímto přístupem, je zjevné, že je čistě technokratický. Pro daný ukazatel se stanoví mezní hodnota. Obsah dané látky (např. pesticidů) nižší, než je mezní hodnota, pak indikuje, že voda je „pitná“. Rozumějme tomu tak, že splňuje příslušnou vyhlášku. Obsah vyšší než mezní hodnota naopak znamená, že voda pitná není. A takto se to v podstatě udělá pro všech 65 ukazatelů. Je to ale správný přístup? Co když překročení nějakého ukazatele vadí více než ukazatele jiného? Co když hodně ukazatelů jen těsně splní dané limity? Je pak voda ještě pořád pitná? A nemohou jednotlivé znečišťující látky spolupůsobit a násobit tak svou toxicitu, přestože ani jedna z nich není v nadlimitní koncentraci? A jsou

vybrané ukazatele ty pravé? Nechybí nám na seznamu nějaké? Jsou limitní koncentrace dostatečné? Neměli bychom přestat stanovovat jednotlivé látky a místo toho „nějak“ stanovovat celkovou „toxicitu“ pro každý zdroj vody? Opět spousta otázek a my jsme zase na začátku u otázky, zda je naše voda „pitná“. Pokud splňuje parametry dané vyhláškou „o pitné vodě“, tak z pohledu legislativy jistě je. Pokud bych ale měl odpovědět sám za sebe jako vědec, tak si už tak jistý nejsem. Z mého pohledu je totiž pitná ta voda, která neobsahuje žádné cizorodé látky. Zdůrazňuji žádné! Taková voda dnes ale neexistuje. Naopak víme, že zdroje vody obsahují kromě těch přírodních látek, které se ve vodě vyskytují zcela přirozeně, také nepřeberné množství takzvaných mikropolutantů. Jedná se především o pesticidní látky a jejich metabolické produkty, látky s hormonální aktivitou (především estrogeny), analgetika, kofein, neuvěřitelnou směs látek obsažených v prostředcích osobní péče atd. Nedávno jsme s kolegy připravovali detaily výzkumu mikropolutantů v pitné vodě s tím, že se zaměříme na látky s endokrinní aktivitou, perfluorované organické látky a pesticidy a jejich metabolity. Pro analýzy jsme vybrali 20 endokrinně aktivních látek, u kterých se v literatuře uvádí výskyt v pitné vodě (např. bisfenol F, nonylfenol, estriol, estron, daidzein atd.), dále 25 perfluorovaných organických látek (převážně směs karboxylových kyselin, sulfonátů, fosfátů a sulfonamidů) a 65 pesticidů a jejich metabolitů. Celkem tedy 110 chemických individuí. Na uvedeném seznamu chci pouze demonstrovat skutečnost, že zatímco před dvaceti lety jsme ve vodě stanovovali například dusičnany, dnes se musíme zaměřit na úplně jiné skupiny látek. Nevím, zda je v pitné vodě najdeme. Musíme je ale hledat, protože z literatury dnes víme, že na řadě míst ve světě nalezeny byly. Pokud bychom je ale ve vodě nalezli, tak z hlediska dnešní legislativy se nic neděje, protože většina těchto látek limity stanovené nemá. A nejsou stanoveny třeba ani pro léčiva, není limitována celková endokrinní aktivita vody a řada dalších ukazatelů. Pokud ve vodě některé látky nalezneme třeba i ve velmi malých koncentracích na hranici detekce, tak ani to není žádné vítezství. Víme zcela jistě, že tyto látky se v přírodě nevyskytují, jsou produktem lidské činnosti a vypovídají mnohé o našem životním stylu. Nevíme ale vůbec nic o tom, jaký je jejich dlouhodobý účinek na lidský organismus. Existuje nějaké řešení? Ano, existují technologická řešení, která jsou schopna eliminovat tyto látky na úpravnách pitné vody, ideálně i na čistírnách odpadních vod tak, aby vůbec nedocházelo k jejich vypouštění do životního prostředí. Ano, jsou to opatření nákladná, ale v dohledné době zcela nezbytná. Tím samozřejmě vstupujeme na pole nejen filozofické, ale i politické. V případě tak strategické suroviny, jakou pitná voda je, se musíme chovat podle principu předběžné opatrnosti, a to i v případech, kdy si třeba nejsme úplně jisti tím, zda je to nezbytné. Musíme přijmout nové zákonné normy, zpřísnit limity a zavést nové ukazatele pro kvalitu pitné vody. Nesmíme se vymlouvat na skutečnost, že to bude stát miliardy korun, které mnohdy vyhazujeme oknem, aniž bychom očekávali návrat. V případě pitné vody se nám investice vrátí mnohonásobně. Vedle toho je nezbytné investovat do výzkumu (tady se jedná o sumu řádově nižší), který nám dá odpověď na řadu výše vznesených otázek. Dnes se totiž chováme, jako bychom ji znali, ačkoliv tomu tak zdaleka není. Důsledkem pak obvykle bývá konstatování, že se sice to či ono ve vodě našlo, ale že to nevadí, protože to žádný účinek na lidské zdraví nemá. To je ale naprosté klamání. Čestná odpověď totiž zní, že se zatím neví, jaký ta či ona látka má na lidské zdraví účinek, protože to doposud nikdo nezkoumal.

Nové výzvy v úpravě vody

Dnes, více než jindy, existuje v oblasti úpravy vody řada výzev, které vyžadují řešení. Řešení propracovaná, sofistikovaná a zároveň prakticky proveditelná. Řešení, která si nepochybně vyžádají investice do technologií, ale zaručí nám, že i v budoucnu budeme mít vodu vysoké kvality a bez zdravotních rizik. Nutno v této souvislosti poznamenat, že řešení až na úpravnách vody je tak trochu hašení už rozpoutaného požáru. Ruku v ruce s opatřeními na úpravnách vody totiž musíme zajistit striktní ochranu vodních zdrojů, omezit intenzivní zemědělství v jejich ochranných pásmech, snížit chemizaci nejen zemědělství, ale životního prostředí celkově, snížit emisní limity vypouštění dusíku a fosforu z čistíren odpadních vod, na čistírnách odpadních vody zavést technologie eliminující antropogenní mikropolutanty atd. Jen těžko si dnes dovedu představit rekonstrukci úpravny vody bez sorpce na aktivním uhlí. Stejně tak si jen těžko dovedu představit úpravnu povrchové vody bez dvoustupňové separace suspenze. A trochu vizionářsky si do budoucna jen těžko dovedu představit úpravnu vody bez membránové filtrace. Ostatně tyto „moderní" technologie patří nejen na úpravny vody, ale i čistírny odpadních vod. Obzvláště pak uvažujeme-li o recyklaci odpadní vody. Vydáme-li se touto cestou – a je to cesta logická a nutná –, nezbyde nám nic jiného, než všechen ten „toxický" koktejl z našich domácností odstranit už na čistírnách odpadních vod. Jen mě v této souvislosti zaráží, že se na tom „u nás" už nepracuje. Standardem je dnes terciální stupeň ČOV umožňující snížení koncentrací fosforu na „únosnou" mez. Proč se ale nezavádí technologie na eliminaci hormonů, léčiv, drog a jiných látek? Bez eliminace všech těchto látek nebude recyklace vody možná.

Úprava pitné vody

O úpravě vody v pravém slova smyslu můžeme začít hovořit někdy od počátku 19. století, kdy byly poprvé použity pomalé (anglické) pískové filtry, paradoxně nikoli v Anglii, ale ve Skotsku. K jejich masivnímu rozvoji však došlo již díky „Angličanům", a to především zásluhou lékaře Johna Snowa, který jako první na světě v roce 1855 vypracoval studii přinášející jasné důkazy o závislosti výskytu epidemií cholery a břišního tyfu na kvalitě vody. Na základě toho bylo městskou radou v Londýně přijato nařízení přikazující veškerou distribuovanou vodu filtrovat přes pískové lože a provádět pravidelné kontroly kvality vody. Tato opatření skutečně vedla k značnému omezení infekčních onemocnění, jejichž příčinou je kontaminovaná voda. Dalším zásadním počinem bylo zavedení hygienického zabezpečení vody chlorem, tzv. chlorace. První pokusy s chlorací vody byly uskutečněny v roce 1893 v Hamburku v Německu. Skutečně první město, kde měli veškerou distribuovanou vodu zabezpečenou chlorací, bylo ale město Maidstone v Anglii. V českých zemích byla první chlorace vody instalována v roce 1924 v Praze ve Vršovické vodárně. V souvislosti s hygienickým zabezpečením vody jistě není bez zajímavosti, že ozon byl jako dezinfekční prostředek použit poprvé již v roce 1906 ve Francii.

Asi nejznámějším a nejběžnějším procesem spojeným s úpravou vody je koagulace. Počátky jejího použití sahají až do období vlády faraonů Amenhotepa II. a Ramesse II. před 2500 lety. Egypťané používali kamenec (síran amonno-hlinitý) ke koagulaci a usazení zákalu vody z Nilu. První „moderní" aplikace koagulace známe ale z Anglie poloviny 19. století.

Mikroplasty
Mikroplasty jsou plastové částice menší než 5 mm. Byly zjištěny nejen v mořské, ale i sladké povrchové vodě, dokonce v několika případech i ve vodě podzemní, dále pak v půdě, ovzduší, v potravinách, jako je mléko, sůl, cukr, pivo, med a balená pitná a minerální voda, zkrátka téměř všude. Alarmující je, že se nalézají již i v tělech živočichů, převážně ryb a ptáků, ale i člověka. Do životního prostředí se dostávají přímou cestou jako součást spotřebních výrobků (např. v kosmetice a čisticích prostředcích) nebo sekundárně rozpadem či rozkladem větších předmětů (např. vlákna uvolňující se při praní prádla), degradací nátěrových hmot atd. Uvádí se, že z jednoho pracího cyklu se uvolní cca sto tisíc plastových částeček (vláken) na jeden kilogram syntetického prádla. Ty se následně dostávají na čistírnu odpadních vod. Konvenční čistírny odpadních vod jsou však schopné odstranit pouze určitý podíl mikroplastů. Značné množství (stovky až tisíce částic na m^3 odpadní vody) zejména nižších velikostních frakcí čistírenská technologie nepostihne, a jsou tak vypouštěny do recipientů, čímž se dostávají zároveň i do zdrojů pro výrobu pitné vody a následně do samotné vyrobené pitné vody.

O jaké výzvy se tedy jedná? Každý může vidět jiné. Pro mě to jsou ale sinice a jejich produkty – AOM, mikropolutanty – především pesticidy, léčiva, hormony, perzistentní organické polutanty (POPs – *Persistent Organic Pollutants*) a jako samostatná kapitola pak mikroplasty. Každá skupina těchto látek by vydala na samostatnou knihu, v tuto chvíli se ale zaměřme na sinice a jejich produkty.

Sinice a jejich produkty

Sinice, jedny z nejstarších organismů na Zemi (stáří se odhaduje na cca 3,5 mld. let), známe pravděpodobně všichni a máme je spojené s tzv. vodním květem v letním období, jehož výskyt obvykle znamená stop radovánkám na našich přírodních koupalištích. Možná si řada z nás uvědomí i skutečnost, že sinice jsou i velmi prospěšné organismy – stojí na počátku potravních řetězců většiny vodních ekosystémů, jsou jedním z nejvýznamnějších producentů kyslíku na Zemi, využívají se v řadě biotechnologií, např. při výrobě biopaliv, uplatňují se jako doplňky stravy (jsou významným zdrojem proteinů a vitamínů), slouží k výrobě přírodních barviv, využívají se ve farmacii atd. Zaměřme se však teď spíše na negativní důsledky jejich výskytu v nádržích sloužících jako zdroje pitné vody, což je dnes zcela běžný jev.

Problémem při úpravě vody nejsou ani tak sinice samotné, jako látky, které produkují, ať již za svého života (EOM – *Extracellular Organic Matter*), nebo ty, které vznikají při jejich odumření (COM – *Cellular Organic Matter*). Souhrnně tyto látky označujeme jako AOM z anglického *Algal Organic Matter* a jsou tvořené převážně sacharidy, resp. polysacharidy a heteropolysacharidy; dusíkatými látkami ve formě aminokyselin, oligopeptidů a proteinů; organickými kyselinami, mezi nimiž převažuje kyselina glykolová; tuky a mastnými kyselinami; fenolovými sloučeninami; látkami obsahujícími fosfor (organické fosfáty) a dále také těkavými aldehydy a ketony. Zvláštní skupinu pak tvoří toxiny, které jsou charakteristické především pro sinice, tzv. cyanotoxiny. Protože se jedná o velmi různorodou směs látek, je také jejich dopad na procesy úpravy vody velmi různorodý.

Údolní nádrž Švihov (Želivka) – odběr vzorků sinic *Microcystis aeruginosa* (2. 8. 2018)

Na protější straně údolní nádrž Švihov (Želivka) – rozvoj vodního květu sinic na profilu Bělský mlýn (9. 8. 2018)

Inhibice koagulace (procesu úpravy vody)

Koagulace buněk sinic a řas je poměrně snadná a obvykle nečiní úpravnám velké problémy. Důvodem je především skutečnost, že buňky mikroorganismů nesou na svém povrchu prakticky v celém rozsahu pH kladný náboj a obdobně jako částice jílovitých minerálů se koagulují v oblasti pH 6–8, ve které se produkty hydrolýzy hlinitých i železitých solí vyskytují ve formě hydratovaných oxidů, respektive hydroxidů. Jsou to tedy především látky, které sinice produkují, co způsobuje poruchy koagulace. Nejenže účinnost jejich odstranění je obvykle velmi nízká, ale stojí také za poklesem účinnosti odstranění ostatních ve vodě se vyskytujících znečišťujících příměsí. Mechanismů, kterými AOM inhibují proces koagulace, je několik. Zde zmiňme alespoň jeden z nich – tvorbu povrchových ligandových komplexů s hlinitými či železitými kationty, které se používají jako koagulační činidla. Pomocí AOM jsou koagulační činidla vázána v rozpuštěné formě, a nemohou se tak zúčastnit koagulačních procesů. Tento jev mnohdy vede nejen k výraznému zvýšení dávek činidel potřebných pro koagulaci, ale způsobuje také nárůst zbytkového obsahu rozpuštěných proteinů a železa či hliníku v upravené vodě. Protože tvorbou těchto rozpuštěných sloučenin dochází ke spotřebě Al^{3+} nebo Fe^{3+} iontů, které se tak nemohou zúčastnit koagulačních reakcí s ostatními ve vodě přítomnými znečišťujícími částicemi (např. částice hlinitokřemičitanů, buňky mikroorganismů, huminové látky atd.), dochází k situaci, kdy se neodstraňují ani tyto za běžných podmínek snadno odstranitelné látky. Úpravny vody na tento stav obvykle reagují zvýšením dávek koagulačních činidel, případně dávkováním pomocných polymerních činidel (sloučeniny na bázi polyakrylamidu). Oba tyto způsoby však mohou být značně

kontraproduktivní, což se velmi často projeví zanášením pískových filtrů a zkrácením filtračních cyklů, přičemž k zásadnímu zvýšení účinnosti koagulace nedojde. Řešením tohoto stavu je obvykle radikální změna reakčních podmínek koagulace změnou pH do kyselé oblasti (pH 4–6), v níž je tvorba povrchových komplexů AOM s kovy minimální.

Protože se jedná o směs látek, především peptidů/proteinů a sacharidů/polysacharidů, je důležité zjistit, které z těchto látek ve směsi AOM převažují (sinice obvykle produkují větší množství peptidů/proteinů, zelené řasy a rozsivky naopak sacharidů/polysacharidů). Důvodem je skutečnost, že peptidy/proteiny se koagulují v kyselém pH (cca 4–6), zatímco sacharidy/polysacharidy v oblasti neutrální až slabě alkalické (cca 6,5–8) a navíc s velmi malou účinností. Optimální reakční pH pro celou směs AOM se pak nachází v rozmezí pH 6–7 pro hlinitá činidla a 5–6,5 pro činidla železitá. Je ale nutné konstatovat, že tyto reakční podmínky jsou výsledkem značného kompromisu a v praxi bývá obvykle výhodnější zaměřit se na odstranění jedné převažující složky AOM, obvykle peptidů/proteinů. Vzhledem k různorodému složení surové vody je zřejmé, že v podstatě neexistuje univerzální pH, při němž by bylo možné účinně koagulovat všechny znečišťující příměsi obsažené ve vodě. Naopak je zřejmé, že jak se mění kvalita (složení) vody (např. během roku), je nutná i změna reakčních podmínek koagulace. Smutnou praxí na úpravnách vody však bývá, že se na počátku nastaví jedny reakční podmínky a ty se následně „drží“ po celou dobu chodu dané technologie. Nejčastěji je v praxi aplikováno pH okolo hodnoty 7, což je, bohužel, hodnota vhodná jen pro koloidní zákalotvorné látky a buňky mikroorganismů. Proč tomu tak je? Proč se prostě na úpravně vody nepřenastaví podmínky koagulace při změně kvality vody (výskytu sinic a AOM)? Jednoduše proto, že se tento poznatek nepodařilo převést do praxe. Provozovatelé tak nevědí, že existují různé hodnoty pH pro koagulaci jednotlivých znečišťujících příměsí. Nevědí, že výzkum objasnil většinu reakčních mechanismů koagulace a že je možné její průběh optimalizovat a významně tak zvýšit účinnost úpravy vody a ještě ušetřit prostředky za chemikálie a energii. Neumí to, protože po přechodu úpraven vody do „soukromých“ rukou většinou zrušili provozní část laboratoří, která se optimalizací úpravy vody zabývala. A dnes, třeba po dvaceti letech „neoptimalizací“, jsou provozní laboratoře mnohde chápány jako něco zbytečného. Já osobně ale netuším, jak je bez laboratorních optimalizací možné úpravnu vody provozovat. Jak se pak nastavují provozní dávky koagulačních činidel, dávky činidel pro úpravu reakčního pH (kyselina nebo alkálie v závislosti na požadovaném pH), jak se nastavují dávky pomocných agregačních činidel? Tak nějak od oka, což je ale prakticky nemožné nastavit správně, protože existuje nepřeberné množství variant v kombinaci s měnící se kvalitou vody. Podmínky koagulace nelze stanovit jinak než empiricky. Důvodem je fakt, že voda může v různých obdobích vykazovat stejné hodnoty měřených parametrů, její „kvalita“ ale přesto bývá odlišná a odlišné pak jsou i podmínky koagulace. Pokud bych to měl říci poněkud přímočařeji, tak bez laboratorního „výzkumu“ podmínek koagulace je průběh vlastní koagulace téměř vždy „překvapením“. Přitom „učit se“ upravovat vodu ve sklenici v laboratoři je snazší a mnohem levnější, než za provozu přímo na úpravně vody.

Příklad z praxe

Před nějakou dobou jsem byl požádán, abych provedl nastavení reakčních podmínek na jedné úpravně vody v letním období při rozvoji vodního květu. Koagulace nefungovala. Na úpravně vody tuto situaci řešili zvyšováním dávek koagulačního činidla i vápenné vody pro udržení konstantního pH 7,2. Jako koagulační činidlo byl používán síran hlinitý o původní dávce 35 mg/l. Dávku koagulačního činidla postupně zvedli až na 2,5násobek obvyklé hodnoty. Přesto se účinnost úpravy vody nijak nelepšila. Naopak došlo ke zkrácení filtračních cyklů z původních cca 40 hodin na pouhých 12. Přitom se kvalita surové vody podle dostupných analýz nijak nezměnila. V zimním období byly průměrné koncentrace organických látek obsažených v surové vodě měřené jako $CHSK_{Mn}$ (chemická spotřeba kyslíku manganistanem draselným) 4,9 mg/l, v létě jen nepatrně stouply, a to na hodnotu 5,3 mg/l. Jak je tedy možné, že dávky činidel dostatečné pro účinnou koagulaci v zimě nefungovaly v létě? Jednoduše z toho důvodu, že se změnil charakter organických látek. V zimním období se jednalo především o huminové látky, zatímco v letním období se navíc objevily ve značném množství i AOM. V této souvislosti je nutné poznamenat, že hodnota pH okolo 7,2 nebyla vhodně nastavena ani pro koagulaci huminových látek, ale spíše pro koagulaci zákalu tvořeného především jílovitými koloidními částicemi. A jak už bylo konstatováno, $CHSK_{Mn}$ nedokáže AOM dostatečně stanovit. Výsledky rozborů tak indikovaly stále stejné koncentrace, ačkoliv ve skutečnosti byly výrazně vyšší. To potvrdilo stanovení celkového rozpuštěného organického uhlíku – DOC (*Dissolved Organic Carbon*), který dosahoval v letním období hodnot více než dvojnásobných oproti hodnotám $CHSK_{Mn}$, v průměru 10,9 mg/l. Po rozklíčování obsahu a původu organického znečištění byla provedena laboratorní optimalizace, která stanovila dávku síranu hlinitého na 45 mg/l a reakční pH na 5,4–5,6. Řešení tedy bylo relativně velmi jednoduché. Bohužel tento případ není ojedinělý a stále častěji se setkáváme s úpravnami, které provozují „neoptimalizované" technologie. Jak již bylo uvedeno, úpravna vody je chemická továrna a tu nelze provozovat bez „výzkumu" v laboratoři, bez hledání nejvhodnějších postupů, reakčních podmínek, bez neustálého zpětného kontrolování výsledků. A k tomu všemu je nezbytné, aby na úpravnách fungovaly provozní laboratoře a v nich byli lidé schopní tento „výzkum" provádět. V tomto směru je nelze zastoupit. My vědci hledáme obecně platná řešení a postupy. Jejich konkrétní aplikace však musí provádět konkrétní lidé přímo na konkrétních úpravnách vody.

Poruchy adsorpce, kompetice s mikropolutanty

Sorpce na aktivním uhlí je při úpravě vody využívána především pro eliminaci koagulací neodstranitelných nízkomolekulárních mikropolutantů (pesticidy, POPs atd.), zbytkových nízkomolekulárních organických látek – prekurzorů DBPs (aminokyseliny, jednoduché peptidy, cukry, fulvokyseliny, fenoly atd.), sinicových toxinů (mikrocystin, nodularin atd.) a látek ovlivňujících organoleptické vlastnosti vody (barva, zápach, chuť), tzv. *Taste & Odour Compounds* (geosmin, dimetyl trisulfid, 2-metylisoborneol, β -cyklocitral).

Koagulací nedostatečně odstraněné AOM však způsobují poruchy adsorpce výše uvedených skupin látek na aktivním uhlí. Jako velmi závažný problém se ukázalo např. snížení účinnosti odstranění pesticidů v situaci, kdy mezi AOM a pesticidy dochází k tzv. kompetitivní adsorpci. Zjistilo se, že AOM mohou s pesticidy soupeřit

přímým i nepřímým způsobem. V případě nepřímé kompetice obalují AOM svými molekulovými řetězci povrch aktivního uhlí a znemožňují tak prostup pesticidů do jeho vnitřní struktury a jejich následnou adsorpci. Při přímé kompetici pak dochází k soupeření AOM s pesticidy o vazebná místa na povrchu i ve vnitřní struktuře aktivního uhlí. Pokles účinnosti adsorpce pesticidů byl zaznamenán především při adsorpci probíhající při nižších hodnotách pH (cca pH 5), tedy právě za podmínek vysoké míry adsorpce AOM, což výskyt kompetitivní adsorpce mezi mikropolutanty a AOM potvrzuje. Důsledkem poruch adsorpce způsobených AOM jsou pak nežádoucí zvýšené koncentrace mikropolutantů a jiných problematických nízkomolekulárních látek v upravené vodě. Řešení tohoto problému nebývá snadné a často jedinou možností je co nejúčinnější odstranění AOM už při vhodně nastavené koagulaci. Tím dojde k minimalizaci koncentrace AOM ve vodě a pravděpodobnost projevu nepřímé či přímé kompetitivní adsorpce se významně sníží. A zase ta koagulace… Koagulace bez optimalizace!

Toxicita sinic

Zvláštní skupinu AOM tvoří toxiny, které jsou charakteristické především pro sinice. Jedná se o tzv. **cyanotoxiny**, mezi které patří například známé mikrocystiny nebo nodularin. Toxicita cyanotoxinů je poměrně značná. Uvádí se, že např. mikrocystiny (toxiny sinic rodu *Microcystis*) jsou cca 10krát toxičtější než kurare (toxin liány *Chondrodendron tomentosum*) a 40krát toxičtější než strychnin (toxin ze stromu kulčiba

Údolní nádrž Švihov (Želivka) – odebrané vzorky vodního květu sinice *Microcystis aeruginosa* (Bělský mlýn 2. 8. 2018)

dávivá – *Strychnos nux-vomica*). Z pohledu spotřebitele vody je však třeba zdůraznit, že např. tetan (toxin produkovaný bakterií *Clostridium tetani*) je cca 100 000krát toxičtější než nejnebezpečnější cyanotoxiny. To nicméně neznamená, že sinicové toxiny nemohou způsobit vážné zdravotní komplikace, jako jsou nejrůznější dermatitidy, průjmová onemocnění, žaludeční potíže, respirační problémy, v ojedinělých případech pak i smrt. Účinnost odstranění cyanotoxinů konvenční úpravou vody koagulací je velmi nízká, z tohoto důvodu se dnes používá téměř výhradně adsorpce na aktivním uhlí.

Caruaru syndrom

V souvislosti s cyanotoxiny je asi nejznámější případ otravy z brazilského Caruarua v roce 1996, kdy bylo 131 pacientů hemodialyzační kliniky při dialyzačním zákroku kontaminováno fyziologickým roztokem obsahujícím toxiny mikrocystin-ZR, -LR, -AR (cyklické heptapeptidy) a cylindrospermopsin (hepatotoxický alkaloid), pocházející z kontaminované vody. Následkem toho 52 pacientů zemřelo na poškození či selhání jater.

Tvorba karcinogenních DBPs

Vedle skutečnosti, že některé produkty sinicového vodního květu jsou toxické, mohou především polysacharidové a peptidové (proteinové) složky AOM tvořit vedlejší produkty dezinfekce vody prováděné na konci její úpravy před distribucí pitné vody ke spotřebiteli (a často i v jejím průběhu). Při dezinfekci vody činidly na bázi chloru dochází k tvorbě halogenovaných organických sloučenin, především trihalogenmetanů – THM (např. chloroform, trichloreten atd.) a chlorovaných alifatických kyselin, převážně pak halogenderivátů kyseliny octové – HAA (např. kyseliny dichloroctová a trichloroctová atd.), případně pak organických peroxidů, pokud je jako dezinfekční činidlo použit ozon. Sloučeniny THM i HAA se v pitné vodě vyskytují zpravidla v koncentracích jednotek až stovek μg/l, z nichž některé jsou toxické nebo karcinogenní. Vzniku těchto sekundárních, velmi nebezpečných kontaminantů lze účinně předcházet maximálně možným odstraněním AOM koagulací. Pokud je tento proces málo účinný, je třeba do technologie zařadit další stupeň úpravy vody (nejčastěji adsorpci na aktivní uhlí, případně membránovou filtraci) a až následně provádět hygienické zabezpečení vody.

Vyhláška 252/2004 Sb. stanoví limity pro čtyři nejčastěji se vyskytující THM: dichloretan (3 μg/l), tetrachloreten (10 μg/l), trichloreten (10 μg/l), trichlormetan (30 μg/l) a dále pro sumu všech THM (100 μg/l). Nicméně THM jsou typické svým bezprahovým účinkem – neexistuje žádná bezpečná dávka jejich příjmu. Limit 100 μg/l je tedy „jen" společenskou (politickou) dohodou. Z epidemiologických studií však vyplývá, že „bezpečný" limit je pouhých 15 μg/l. V roce 2017 bylo překročení mezní hodnoty 100 μg/l dosaženo ve dvou případech, nicméně hodnota 15 μg/l byla překročena již v 16 % všech zdrojů pitné vody. Má však cenu v případě těchto látek nějaké limity vůbec stanovovat? Respektive neměl by být limit THM 0 μg/l, když mají bezprahové účinky? Například ve Švýcarsku je limit pro sumu THM 25 μg/l, v Rakousku, Itálii, Belgii 30 μg/l, v Německu a Švédsku 50 μg/l a v USA 80 μg/l. Naopak v Austrálii je jen těžko uvěřitelných 250 μg/l.

Obdobně jako je tomu u řady THM, byly karcinogenní a mutagenní účinky prokázány také u HAA. Světová zdravotnická organizace doporučuje sledovat především

koncentrace kyselin mono-, di- a tri- chloroctových a mono- a di- bromoctových a jejich sumu (HAA5) a také koncentrace kyseliny bromchloroctové, bromdichloroctové, dibromchloroctové a tribromoctové. Jejich limit však česká vyhláška 252/2004 Sb. zatím vůbec neuvádí. V ČR tedy nejsou zařazeny mezi limitované ukazatele. Naopak limitní koncentrace má suma HAA5 například v USA (60 μg/l) nebo v Kanadě (80 μg/l).

Proč není limit pro HAA stanoven také v ČR? Důvodem, avšak velmi pochybným, je prý skutečnost, že jejich koncentrace v pitné vodě obvykle nejsou vysoké. Ale jak to můžeme vědět, když je pravidelně nesledujeme? Přitom ze zemí, které pro HAA limity mají, jsou známé případy mnohonásobného překročení mezních koncentrací. Například výsledky rozborů z Kanady (provincie Newfoundland a Labrador) za období zima 2017/2018 ukazují překročení kanadského limitu (80 μg/l) ve více než třetině všech testovaných pitných vod. U řady z nich se pak jednalo skutečně o významné koncentrace, které byly o řád vyšší než příslušný limit. Maximální dosažená hodnota byla 784 μg/l. Opravdu tedy nikdo nepředpokládá jejich výskyt v ČR? Pokud se skutečně vysoké koncentrace HAA v pitné vodě v minulosti nevyskytovaly, tak s rostoucím podílem AOM na koncentraci organických látek ve vodě se to může rychle změnit; AOM totiž představují „ideální" prekurzory pro vznik HAA.

V budoucnosti se ale možná vše změní, protože na evropské úrovni aktuálně probíhá diskuse o změně legislativy EU (Směrnice o pitné vodě) týkající se povinného zahrnutí HAA mezi stanovované parametry pitné vody. V tomto ohledu je třeba zdůraznit, že na Slovensku je již od října roku 2017 v platnosti vyhláška č. 247/2017, která zavádí HAA jako ukazatel kvality pitné vody s limitem pro HAA5 60 μg/l. Pro jejich povinné stanovování platilo přechodné období do konce roku 2018. Od 1. ledna 2019 již je stanovení HAA na Slovensku povinné. Slovensko tak, na rozdíl od České republiky, bude připraveno na plánované zavedení HAA do lokálních legislativ. A co Česká republika?

Závěr

Doufám, že předchozí text nezanechal ve čtenáři příliš pesimismu. Doufám ale také, že čtenář nenabyl dojmu, že vše se nějak „samo" vyřeší. Nesnažil se strašit, ale ani chlácholit. Zajistit, aby voda byla stále pitná, je nesnadný úkol. Ne ani tak kvůli odborné náročnosti, ale spíše kvůli všeobecnému přesvědčení, že vody je dostatek, vždy bude a ve stejné kvalitě jako doposud. Pokud ale nebudeme stále hledat nové možnosti, jak ze „surové" vody udělat pitnou, může se stát, že jednoho dne zjistíme, jak moc jsme se mýlili. Friedrich Nietzsche řekl: „Ještě nebezpečnějším nepřítelem pravdy nežli lži jsou přesvědčení." Opusťme tedy přesvědčení, že vody je dost, že je stále stejně kvalitní jako kdysi a že ji vždy a za všech okolností dokážeme upravit na vodu pitnou.

V úvodní kapitole jsme si položili tři zásadní otázky související s kvalitou pitné vody. Zda je dnes ještě možné vyrobit pitnou vodu bez škodlivých chemických příměsí? Za jakou cenu? A bude to možné i v budoucnosti? U první i poslední otázky jsem přesvědčen, že můžeme odpovědět ano. Jen musíme chtít a mít tyto tři otázky stále na paměti. Hledejme nové technologie úpravy vody. Zdokonalujme ty stávající. Zaveďme přísnější limity pro vypouštěné odpadní vody i přísnější hygienické limity pro pitnou vodu. Budujme nové zdroje vody a ochraňujme ty současné. Neplýtvejme vodou! Braňme vodu vždy a všude.

Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v. v. i., založený v roce 1952, se zpočátku zaměřoval na problémy klasické hydrauliky, zejména v souvislosti s intenzivním budováním vodohospodářských staveb. V současnosti se orientuje především na úpravu vody, hydrologii, mechaniku tekutin a reologii, podílí se na řešení řady aktuálních celospolečenských problémů a témat.

Oddělení vodních zdrojů tvoří skupiny hydrologie a úpravy vody. Výzkumná činnost v oddělení vodních zdrojů se zaměřuje na problematiku vody v krajině (vodní režim, povodně × sucho) a její využití člověkem (kvalita, úprava a znovuvyužití vody). Mezi hlavní témata patří pohyb vody v krajině, retenční schopnost povodí, srážko-odtokové bilance, interakce půda–rostlina–voda, proudění vody, transport sedimentů či povrchový/podpovrchový odtok vody, dále pak kvalita zdrojů vody, procesy a technologie úpravy vody, kvalita pitné vody, odstraňování organických látek a mikropolutantů atd.

Hydrologická skupina se zabývá několika tématy. Prvním z nich je pohyb vody v půdě. Nasycení půdního profilu je jedním z klíčových faktorů vzniku povodní a jeho znalost je základním stavebním kamenem hydrologických předpovědí. Druhým tématem je vliv klimatických změn na hydrologický režim toků na území ČR. Jeho změna totiž může zásadním způsobem ovlivnit hospodaření s vodními zdroji. Dlouhodobým projektem je pak podrobný hydroekologický monitoring v pramenných oblastech ČR, jehož cílem je co nejpřesnější kvantifikace všech vstupů do povodí a výstupů z něj.

Skupina úpravy vody se zabývá studiem mechanismů odstraňování problematických znečišťujících příměsí z vody. Jsou to jednak tzv. AOM (*Algal Organic Matter*), organické látky pocházející z metabolické činnosti a rozkladu sinic a řas, odstraňované konvenční technologií, tj. koagulací, případně s použitím tzv. předoxidace (např. manganistanem draselným, ozonem, chlorem nebo UV zářením). Za druhé jsou to mikropolutanty (pesticidy, léčiva atd.), které jsou odstraňovány pomocí adsorpce na aktivním uhlí. Nově se skupina úpravy vody zabývá výskytem a charakterizací mikroplastů v pitné vodě. Jelikož se jedná o mikropolutanty s potenciálním negativním vlivem na lidské zdraví, je jejich přítomnost v pitné vodě nežádoucí. Výzkum v této oblasti se zaměřuje také na přítomnost mikroplastů ve zdrojích surové vody a na účinnost jejich odstranění jednotlivými procesy úpravy, které se při výrobě pitné vody používají. Je velmi důležité zaměřit výzkum tímto směrem, protože doposud není navržena žádná speciální technologie pro eliminaci mikroplastů. Dalším předmětem výzkumu je vliv fyzikálně-chemických parametrů (typ a dávka koagulačního činidla, pH, $KNK_{4,5}$, teplota) a hydrodynamických podmínek (především velikost a distribuce gradientu rychlosti) na vlastnosti vloček (velikost, struktura, porozita, tvar) při konvenční úpravě vody. Vlastnosti vloček (agregátů) zásadně ovlivňují účinnost jejich následné separace, a tím i úpravy vody. Vedle základního výzkumu se skupina úpravy vody zabývá také výzkumem aplikovaným včetně návrhu a realizací technologií přímo na míru konkrétním úpravnám vody.

Na obálce údolní nádrž Vrchlice – zdroj surové vody pro úpravnu vody U Sv. Trojice v Kutné Hoře (rozvoj vodního květu 14. 9. 2018)

Oddělení mechaniky tekutin a disperzních soustav tvoří skupina mechaniky tekutin a tekutých soustav a skupina reologie.

Studium mechaniky tekutin a tekutých soustav je zaměřeno na teoretický a experimentální výzkum proudění suspenzí, pohybu částic a sedimentů v potrubí, v otevřených profilech a nádržích, procesy míchání tekutých soustav, dále na matematické modelování a numerickou simulaci, kalibraci a verifikaci modelů proudění na základě výsledků experimentálního výzkumu, experimentální metody a analýzu turbulentního proudění.

Reologická skupina se zabývá tokovými vlastnostmi zejména polymerních materiálů. Znalost reologických vlastností polymerních materiálů je důležitá nejen pro jejich výrobce a zpracovatele, ale i pro výrobce strojů a nástrojů v oblasti plastikářského průmyslu. Reologické vlastnosti polymerů (např. smyková a tahová viskozita) jsou důležitým vodítkem pro návrh nových materiálů se specifickými vlastnostmi vhodnými pro daný typ procesu (vytlačování, vyfukování, vstřikování, tváření) nebo pro finální výrobek (např. tlakové trubky, kloubní náhrady). Pro zpracovatele materiálů jsou reologické vlastnosti důležité pro přesné nastavení procesních hodnot během zpracovatelského procesu a slouží také pro návrh strojů a nástrojů v plastikářském průmyslu (např. vytlačovací a vstřikovací hlavy).

V rámci **Strategie AV21: Špičkový výzkum ve veřejném zájmu** a jejího programu Přírodní hrozby se Ústav pro hydrodynamiku podílí na zpracování tématu Voda pro život, zaměřeného na komplexní a systematický výzkum a spolupráci mezi odborníky a zainteresovanými subjekty v oblasti ochrany a využití vodních zdrojů a na problematiku zásobování vodou a zachování čistoty vod. V rámci tématu Voda pro život byla otevřena poloprovozní laboratoř v úpravně vody U Svaté Trojice v Kutné Hoře, provozované společně s Vodohospodářskou společností Vrchlice-Maleč, a. s. Tato laboratoř slouží k jednomu z hlavních poslání vědy, a sice transferu vědomostí a znalostí přímo do provozu úpraven vody. Z dalších významných výsledků je pak možné jmenovat například výzkum v oblasti úpravy vody, kde se Ústav zabývá odstraňováním nežádoucích buněk sinic a jejich metabolických produktů při úpravě vody a dále především výskytem mikroplastů ve zdrojích surové vody a ve vodě pitné. V hydrologii probíhá experimentální výzkum vlivu vegetačního krytu a půdních charakteristik na vodní režim v podmínkách měnícího se klimatu, v mechanice tekutin se pak naše pozornost zaměřuje například na proudění a procesy míchání v míchaných nádobách a reaktorech. Značný důraz je v současnosti kladen na přenos poznatků do praxe a také na interakce s odbornou i laickou veřejností. Proto Ústav spolupracuje s řadou průmyslových podniků a společností, např. Aqua-Styl, spol. s r. o., Pražské vodovody a kanalizace, a. s., nebo Úpravna vody Želivka, a. s., a prezentuje svou činnost v médiích, při dnech otevřených dveří, na Veletrhu vědy aj.