

DEKONTAMINAČNÍ TECHNOLOGIE VYUŽÍVAJÍCÍ PÁRY PEROXIDU VODÍKU

JIRÍ ŠVRČEK^a, PETR KAČER^a, MAREK KUZMA^b, ANTONÍN MARHOUL^a, LIBOR PÁNEK^c a LIBOR ČERVENÝ^a

^a Ústav organické technologie, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, 166 28 Praha 6,

^b Laboratoř charakterizace molekulární struktury, Mikrobiologický ústav AV ČR, v.v.i., Videňská 1083, 142 20 Praha 4, ^c BLOCK a.s., Stulíková 1392, 198 00, Praha 9
cervenyl@vscht.cz, kacerp@vscht.cz

Věnováno prof. Ing. Josefu Paškovi, DrSc. k jeho 80. narozeninám.

Klíčová slova: páry peroxidu vodíku, dekontaminace, likvidace biologických a chemických kontaminantů

Obsah

1. Úvod
2. Historie a současný stav dekontaminačních technik
3. Páry peroxidu vodíku – moderní dekontaminační činidlo
4. Dekontaminační cyklus metodou VPHP
5. Technická řešení dekontaminačního procesu VPHP
6. VPHP – biocidní činidlo
7. VPHP – degradace chemických kontaminantů
8. Materiálová kompatibilita s VPHP
9. Závěr

1. Úvod

Termín dekontaminace (odmoření, zbavení nečistot včetně choroboplodných zárodků) je obecně používán pro popis ošetřujícího procesu, jenž umožňuje bezpečně používat zařízení, instrumenty, nebo povrchy, a to především ve zdravotnickém, případně potravinářském, farmaceutickém a vojenském prostředí. Dekontaminační procedury v sobě zahrnují širokou škálu metod, počínaje prostým čištěním pomocí mýdla a konče procesy sterilizací či dezinfekcí. Sterilizace spočívá v užití fyzikálních nebo chemických procedur, vedoucích k likvidaci nebo eliminaci veškeré mikrobionální formy života, včetně vysoce odolných bakteriálních endospor. Podobnou, avšak v porovnání se sterilizací méně účinnou, nicméně bezpečnější metodou, je zmíněná dezinfekce, sloužící k eliminaci patogenních mikroorganismů z neživých objektů¹. Dekon-

taminace však není spjata pouze s odstraňováním biologických kontaminantů, ale je rovněž používána pro popis postupů vedoucích k detoxikaci a deaktivaci nebezpečných chemických látek. Dekontaminaci tak nalezneme všude tam, kde hrozí reálná možnost vzniku či přítomnosti nadlimitního množství nebezpečného nebo potenciálně nebezpečného kontaminantu, který by měl negativní vliv nejen na člověka, ale na živé organismy obecně.

2. Historie a současný stav dekontaminačních technik

Ačkoliv se vědecké aplikace dekontaminačních látek a postupů začaly objevovat zhruba před 150 lety, empirické praktikování se objevuje již mnohem dříve, a to ve starověku (prvotní zmínky lze nalézt v Bibli, v dílech řeckého básníka Homéra, filozofa Aristotela aj.). Za klíčový milník v oblasti dekontaminace lze označit rok 1438, kdy byl v Benátkách založen Magistrát zdravotnictví, jehož hlavní funkcí bylo provádění fumigace nákladů přivážených do přístavu. Vznikem této instituce byl položen základ prevence a aktivní ochrany proti nejrůznějším infekčním onemocněním, parazitům a jiným možným znečištěním. V roce 1676 byla poprvé k usmrcení mikroorganismu použita chemická látka (vinný ocet, A. van Leeuwenhoek, objevitel mikroskopu, poprvé pozorující mikroorganismy, které nazýval „animalkuly“), nicméně přelom v této oblasti nastává až v druhé polovině 18. století, a to objevením chloru (1774, C. W. Scheele) a chlornanů (1789, C. L. Berthollet), které velice rychle našly své uplatnění v oblasti dezinfekcí mární, kanálů, nemocničních oddělení, lodí, vězení a především při ošetření pitné vody. V roce 1810 Nicolas Appert vyvinul moderní sterilizační metodu potravin teplem – konzervací. Krátce poté zakladatel mikrobiologie Louis Pasteur objevil sterilizační efektivitu přehřáté vodní páry, jenž inspirovala Charlese Chamberlanda k sestrojení prvního parního autoklávu (1879). Souběžně s vývojem této excelentní dekontaminační techniky objevili v roce 1877 A. Downes a T. P. Blunt antimikrobiální efekt ultrafialového záření. Dalším „velikánem“ v oblasti vývoje dekontaminačních technik byl Robert Koch, jenž v roce 1881 sepsal ucelenou publikaci „On Disinfection“ v níž se zabýval schopností 70 chemikálií v různých koncentracích ve vodném, alkoholovém nebo olejovém roztoku, při různých teplotách, zlikvidovat spory antraxu. V roce 1897 B. Krönig a T. Paul položili základy chemické dezinfekce a jejich principy byly následně převedeny do praxe vytvořením slavné „fenol koeficientové metody“ testování účinnosti dezinfekčních látek. Následující 20. století znamenalo velké pokroky v oblasti chemie, především organické, což vedlo k objevu celé řady nových chemických dezinfekčních látek, směřovaných na nejrůz-

nější odvětví či oblasti lidské činnosti^{2,3}.

Do současné doby byla navržena a do praxe zavedena celá řada dekontaminačních technik, sloužících k likvidaci biologických a chemických látek z kontaminovaných povrchů^{4–7}. Dekontaminace se provádí několika různými postupy podle toho, co je znečišťující látkou, ale i v závislosti na prostředí a na tom, zda je potřeba ošetřit velké plochy, nástroje, osoby, venkovní nebo vnitřní prostory. Obecně lze dekontaminační metody rozdělit podle principu jejich působení na metody mechanické, chemické, fyzikální a fyzikálně-chemické. Velmi rozšířené jsou především chemické dekontaminační postupy, které lze aplikovat dvěma způsoby, a to mokrou cestou (vodný roztok ClO_2 , CH_3COOOH , H_2O_2 , NaOCl , kapalné detergenty, alkoholy, jodoform, Fentonovo činidlo aj.), nebo využitím plynné resp. parní fáze (oxid chloričitý, ethylenoxid, propylenoxid, β -propiolakton, formaldehyd, peroxid vodíku, methylenbromid, ozón, peroctová kyselina aj.). Neméně významnými a v praxi velice užívanými jsou metody fyzikální (rentgenové, gama, mikrovlnné a UV záření, teplo, zmrazení, plazma, fotochemické reakce) a fyzikálně-chemické (teplo nebo záření v kombinaci s vybraným chemickým činidlem). Aplikace výše uvedených metod však s sebou přináší značná rizika, spočívající jednak v nebezpečnosti samotného účinného činidla (např. toxicita, karcinogenita a potenciální výbušnost ethylenoxidu a formaldehydu, nebezpečnost spočívající v ozáření, popálení), tak v možnosti vzniku toxických reziduí, zatěžujících životní prostředí. Je tedy nezbytné vyvíjet nové technologie pro dekontaminaci, jejichž účinná látka by se svou charakteristikou co nejvíce přibližovala tzv. „ideálnímu dekontaminačnímu činidlu“⁸. Takové činidlo by mělo vykazovat vysoký stupeň účinnosti na širokou škálu biologických, popř. chemických kontaminantů, rychlý nástup účinku, dlouhotrvající výsledek, opakovatelnost použití, cenovou přijatelnost, odolnost vůči organickým materiálům, netoxicitu vůči lidem a životnímu prostředí, snadnou a bezpečnou manipulaci, dlouhodobou skladovatelnost, neomezenost nakládání při likvidaci, materiálovou snášenlivost, snadnou detekovatelnost, mělo by být rovněž nešpinitel (nezanechávající nevratné stopy na ošetřených materiálech) a nezapáchající, příp. příjemně vůně⁸. Zvláštní požadavek pak představuje dekontaminace velkých prostor a budov, a to zejména z důvodu rostoucí hrozby teroristických útoků, využívajících chemické a biologické zbraně. Pro připomenutí této reálné hrozby lze uvést sarinové teroristické útoky v Japonsku, jednak 27. června 1994 ve městě Matsumoto, ale především 20. března 1995 v tokijském metru, jenž představuje největší katastrofu způsobenou nervovým plynem v mírové historii z celosvětové perspektivy⁹. Odstrašující jsou rovněž teroristické útoky sporami antraxu provedené v USA 18. září a 9. října 2001, při nichž došlo uvolněním této látky z tzv. antraxových dopisů k rozsáhlé kontaminaci poštovních budov, redakcí zpravodajských společností a vládních úřadů¹⁰. Tyto teroristické útoky poukázaly jednak na nepřípravenost složek záchranného systému potýkat se s tak rozsáhlým stupněm kontaminace, ale také na nevhodnost použití standardních de-

kontaminačních metod. V rozsáhlých prostorech totiž mnoho běžných postupů selhává a jediným možným řešením je využití dekontaminačního prostředku v plynné fázi, jenž umožňuje díky snadné disperzi a penetraci dekontaminovat velmi těžko dostupné povrchy (např. praskliny ve zdech, podlaze a ostatních površích, prostory ventilace a klimatizace). Ovšem toxicita, materiálová kompatibilita, požadavky na koncentraci, dobu expozice a dobu aerace velkého množství plynného dekontaminačního činidla jsou nevýhodami doposud užívaných metod⁶.

3. Páry peroxidu vodíku – moderní dekontaminační činidlo

Jedním z velmi výhodných postupů pro dekontaminaci, splňujících řadu z výše uvedených požadavků „ideálního dekontaminačního činidla“, se jeví aplikace par peroxidu vodíku – VPHP (zkratka anglického sousloví „Vapour Phase Hydrogen Peroxide“) ^{11,12}. Jedná se o relativně novou, avšak vysoce progresivní metodu, mezi jejíž hlavní přednosti spadá především její šetrnost k životnímu prostředí (páry peroxidu vodíku se rozkládají na neškodnou vodu a kyslík a nezanechávají tak na površích žádná toxická rezidua), nízkoteplotní proveditelnost a aplikovatelnost na rozsáhlé prostory.

Ačkoliv užití kapalného peroxidu vodíku k likvidaci choroboplodných mikroorganismů je známo již více než 150 let (dezinfekční účinky peroxidu vodíku odhalil v roce 1858 anglický lékař B. W. Richardson, což vedlo k brzkému komerčnímu využití tohoto činidla pod obchodním názvem „Sanitas“¹²) a v literatuře lze nalézt mnoho úspěšných aplikací této látky jakožto dezinfekčního a sterilizačního agens pro chirurgické materiály, tepelně citlivé plasty, jemné hydrofilní kontaktní čočky, vesmírný hardware, in-line sterilizaci při balení kartonů a obalů potravin^{5,11,12}, koncepce aplikací VPHP se datuje přibližně od roku 1989, kdy bylo toto činidlo poprvé použito k rychlé sterilizaci těžko dostupných povrchů zubních instrumentů¹². Od této doby nastal prudký nárůst aplikací tohoto moderního dekontaminačního činidla, směřovaných především do oblasti biodekontaminace. O vhodnosti užití tohoto činidla k biodekontaminaci uzavřených prostor svědčí i jeho schválení americkou Agenturou pro ochranu životního prostředí (EPA)¹³. Stejně jako v roztoku, tak i v plynné formě vykazuje peroxid vodíku sterilizační účinnost vůči vegetativním bakteriím a vysoce odolným bakteriálním endosporám^{6,11,12,14–19}, virům²⁰, houbám²¹, plísním²², kvasinkám, měňavkám a infekčním bílkovinám^{11,23}. Páry peroxidu vodíku tak stále více nacházejí své uplatnění především ve farmaceutickém, zdravotnickém a potravinářském sektoru. Literatura^{8,11,12,16,20,24} popisuje využití tohoto činidla k dekontaminaci fermentorů, dialyzátorů, inkubátorů, izolátorů, rukavicových boxů, bezpečnostních kabinetů („hazard boxů“), zvířetníků, nemocničních oddělení, dále pro sterilizaci zařízení umožňujících lyofilizaci, ultracentrifugaci, pro aseptické procesy, sterilizační testy, nejrůznější výrobní zařízení a plnicí linky, rovněž pro ste-

rilizaci stomatologických a jiných zdravotnických nástrojů, hardware vesmírných systémů²⁵, ale také k ošetření ovoce a hub^{15,22,26}.

4. Dekontaminační cyklus metodou VPHP

Dekontaminace uzavřených prostor pomocí VPHP je obvykle prováděna ve čtyřech následných fázích^{20,27,28}. První fáze dekontaminačního cyklu, často označovaná jako „dehumidifikace“, spočívá v nastavení relativní vlhkosti na předem definovanou hodnotu uvnitř uzavřeného prostoru a také ve stabilizaci teploty zařízení (VPHP generátoru). Další stupeň („kondicionace“) spočívá v převedení roztoku peroxidu vodíku do parní fáze, jenž je následně pomocí nosného média (vzduchu) zavedena do prostoru tak, aby došlo ke vzrůstu koncentrace par dekontaminačního činidla (peroxidu vodíku) na požadovanou hodnotu, při které má být dekontaminace vedena. Během třetí fáze (vlastní „dekontaminace“) dochází stále k odpařování roztoku peroxidu vodíku do proudu vzduchu, který však již proudí nižší rychlostí, aby bylo možné udržet požadovanou koncentraci plynu uvnitř zařízení. Čtvrtá a poslední fáze („aerace“) spočívá v zavedení čistého (aseptického) vzduchu do dekontaminovaného prostoru, za účelem odstranění par peroxidu vodíku zředěním na bezpečnou koncentrační úroveň.

V současné době existují dva základní názory na provedení dekontaminace povrchů pomocí par peroxidu vodíku^{13,19,27}. Tradiční názor zastává provádět dekontaminaci „suchým“ způsobem, tedy bez kondenzace během dekontaminační fáze cyklu. Podle tohoto názoru se peroxid vodíku rozkládá na základě svého poločasu rozkladu, jenž lze definovat a díky němuž je možné řídit průběh dekontaminace a vyvarovat se tak případnému výskytu nežádoucí kondenzace, která se může vyskytnout pouze z nekontrolovatelných příčin. Kondenzace je nežádoucí, jelikož je příčinou koroze řady materiálů, prodlužuje aeraci fázi dekontaminačního cyklu a nelze ji kontrolovat, tedy v případě jejího výskytu se jedná o nehomogenní dekontaminaci. Druhý názor, jenž se zcela vzdaluje od předešlého, naopak říká, že páry peroxidu vodíku jsou stabilní, a proto je kondenzace za obvyklých pracovních podmínek nevyhnutelná. Tento názor rovněž věří, že právě kondenzace je primární (prvotní) příčinou dekontaminace pomocí par peroxidu vodíku. Tuto teorii rovněž potvrzují teoretické a experimentální analýzy, z nichž rovněž jasně vyplývá, že kondenzace, a to zejména kondenzace v malé míře, tedy „mikrokondenzace“ (okem nepozorovatelná), je klíčovým a kritickým parametrem pro rychlou a reprodukovatelnou inaktivaci mikroorganismů pomocí VPHP¹⁹.

5. Technická řešení dekontaminačního procesu VPHP

Mezi hlavní obtíže dekontaminačních metod založených na využití par peroxidu vodíku patří obtížná regulovatelnost obsahu par peroxidu vodíku v kontaminovaném prostoru, stanovení koncentrace par peroxidu vodíku a vody v kontaminovaném prostoru, zabránění kondenzace, tedy práce nad rosným bodem směsi par peroxidu vodíku a vody, nebo naopak vytváření tenkého filmu kondenzujících složek na povrchu kontaminovaného materiálu a rychlá a účinná aerace dekontaminovaného prostoru. Je tedy zřejmé, že se jedná o velice problematickou oblast výzkumu, a proto je velká část informací o technickém řešení aparátů a postupů sloužících k dekontaminaci materiálů a prostor pomocí tohoto dekontaminačního činidla součástí patentů.

Většina komerčních generátorů par peroxidu vodíku pracuje jako uzavřené cyklické zařízení (nabízející snadnou manipulaci a vysokou mobilitu), které je propojeno s prostorem (izolátor, místnost), který má být dekontaminován²⁹. Propojení je provedeno tak, aby objem vzduchu nebo plynu se vzduchem, který je vehnán do prostoru, byl stejný jako množství, které se navrácí zpět do generátoru. Hnací silou pohybu nosného plynu s dekontaminačním činidlem uvnitř kontaminovaného prostoru bývá většinou výkonný větrák, popř. vývěva, a je-li to možné, tak jsou využívány i ventilační systémy daných prostor. Páry peroxidu vodíku a vody jsou generovány různými způsoby, např. řízeným odpařováním roztoku peroxidu vodíku v odpařovačce do kontinuálně cirkulujícího vzduchu, jenž jej následně dopravuje do kontaminovaného prostoru (jedná se o „suchý“ způsob dekontaminace)^{30,31}. Obdobný způsob spočívá v „bleskovém“ odpaření („flash“ destilace) peroxidu vodíku do předem předehřátého a vysušeného vzduchu, jenž se parami zcela nasytí a poté je takto převeden do kontaminovaného prostoru, kde dochází jeho ochlazením k řízené kondenzaci dekontaminačního činidla v tenkém povrchovém filmu („mokrý“ způsob dekontaminace)^{32–35}. Převod kapaliny do plynné fáze se rovněž provádí nastříkáním přesně definovaných infinitezimálních objemů odpařované směsi na vyhřívání povrch odpařovací komory, která je propojena s vakuovou komorou, odkud je vzniklá plynná fáze odváděna do příslušného prostoru. Každá další dávka směsi je nastříknuta až po úplném odpaření té předchozí, čímž je zajištěn homogenní tok par o konstantním složení, stejném jako je složení vstupující kapaliny, a předchází se tak možným komplikacím s nestabilním složením par způsobeným přednostním odpařováním těžavějších komponent (např. vody)³⁶. Zajímavé je rovněž využití koaxiálně orientovaných trysek, umožňujících za dostatečně vysokého proudu vzduchu rozpráší kapičky vodného roztoku peroxidu vodíku do plynné fáze a to i při nízké teplotě³⁷. Jiný významný po-

stup pro převedení vodného roztoku peroxidu vodíku do plynného stavu využívá ultrazvukové atomizéry. V nich je přiváděný vodný roztok peroxidu vodíku atomizován pomocí ultrazvuku na velmi malé kapičky, které jsou dále převedeny do proudu nosného plynu^{38,39}. Takto získané kapičky je pak možné v následující části zařízení působením elektrického napětí nabit a elektrostaticky deponovat na sterilizovaném povrchu. Tento postup nejen dovoluje řízenou depozici peroxidu vodíku na kontaminovaném povrchu, ale rovněž zajišťuje, že kontaminovaný povrch je dostatečně homogenně pokryt peroxidem vodíku, a tak je zajištěna vysoká efektivnost procesu. Rovněž další způsob převedení peroxidu vodíku do plynné fáze spočívá v atomizaci roztoku peroxidu vodíku sprejem, avšak jeho následné odpaření je prováděno pomocí mikrovlnné energie⁴⁰.

Pro zvýšení účinku peroxidu vodíku je možné atmosféru obsahující rozprašený peroxid vodíku ionizovat za tvorby plazmy. Nejčastěji je plazma generována z plynů působením elektrického pulzu, přičemž je možné vytvářet plazmu za atmosférického tlaku, ale vysoké teploty, nebo je možné snížit tlak plynu a pak již postačuje teplota nižší^{41–43}. Jiným postupem pro zvýšení účinnosti par peroxidu vodíku je jeho kombinace s ultrafialovým zářením¹¹. Ultrafialové záření jako samostatný dekontaminační postup vyžaduje poměrně dlouhou expozici, proto kombinace s dalším agens může vést k zesílení jeho působení. Kombinace UV/H₂O₂ se řadí mezi tzv. pokročilé oxidační procesy, které jsou vysoce efektivní k degradaci mikroorganismů a těžko odbouratelných organických polutantů^{44–46}. V tomto případě spočívá postup dekontaminace v primární expozici kontaminovaného povrchu peroxidem vodíku a jeho následném vystavení působení ultrafialového záření^{47,48}.

Další možnost, jak zvýšit efektivnost VPHP dekontaminačního procesu, spočívá buďto v přidavku dalšího oxidačního činidla, např. ozónu⁴⁹, nebo v zakonzentrování roztoku peroxidu vodíku před jeho vaporizací⁵⁰. Druhý z uvedených způsobů naráží na problém přebytku vody, jenž při odpařování roztoku vede ke kondenzaci, v níž je voda určitou bariérou pro peroxid vodíku, a to zejména při jeho penetraci v případě velmi komplikovaných profilů (např. lékařských nástrojů). Je jednoznačné, že tento problém není možné řešit použitím roztoku peroxidu vodíku o vyšší koncentraci, neboť neúměrně roste riziko možné exploze. Peroxid vodíku je však schopen vytvářet bezvodé komplexy s celou řadou organických a anorganických sloučenin (v těchto látkách je obvykle vázán vodíkovou vazbou k elektronegativnímu atomu v molekule druhé části komplexu), jejichž příprava je obecně známá a není příliš složitá. Uvolnění peroxidu vodíku z takového komplexu je poměrně jednoduché a nejčastěji je využíváno tepelného rozkladu nebo vakua, za kterého jsou některé komplexy nestabilní^{51–53}. Posledním, avšak rovněž velice zajímavým způsobem poukazujícím na možnost zesílení působení peroxidu vodíku, spočívá v přidavku iontů, a to v kovové formě nebo ve formě oxidů, hydroxidů a popř. jejich směsí. Je však nutné zajistit dostatečně vysoký po-

vrch těchto částic, čehož je možné dosáhnout využitím nanočástic celé řady kovů nebo oxidů kovů (např. Ag, Al, Ca, Ce, Cu, Mg, Sr, Sn, Ti a Zn)^{54,55}.

Během VPHP dekontaminačního procesu je nutné neustále monitorovat koncentraci par peroxidu vodíku v daném prostoru, a to z důvodu zajištění optimálního a reprodukovatelného průběhu, jenž spočívá především v udržování efektivní koncentrace par peroxidu vodíku na předem definované hodnotě. Historicky první užívané izolátory, které aplikovaly VPHP, byly založeny na monitorování rychlosti nástřiku kapalného peroxidu vodíku a průtoku vzduchu, kdy na základě znalosti těchto parametrů byla stanovována teoretická koncentrace VPHP. Díky adsorpci, absorpci a rozkladu VPHP na stěnách a na vnitřních komponentách izolátoru však tato teoretická hodnota neodpovídala skutečné koncentraci uvnitř izolátoru. V současné době se jak k prosté detekci, tak ke stanovení přesné hodnoty koncentrace par peroxidu vodíku uvnitř kontaminovaného prostoru využívají různé detekční systémy.

Primární a nejjednodušší způsob detekce par peroxidu vodíku je založen na užití chemických indikátorů, pracujících na principu změny barvy, vyvolané chemickou reakcí par peroxidu vodíku s oxidovatelně redukovatelnými substancemi, jenž jsou v indikátoru obsaženy (např. Cr₂O₇⁻ a CrO₄⁻ ionty nanesené na porézní matici)^{56,57}, nebo užití biologických indikátorů, sloužících k verifikaci této dekontaminační metody (bude diskutováno dále)⁵⁸. Mezi pokročilejší způsoby, umožňující měřit skutečnou koncentraci par peroxidu vodíku v daném prostoru, lze zařadit blíže nepopsané detekční jednotky vydávající elektrický popř. frekvenční signál, korespondující s koncentrací par peroxidu vodíku^{59,60}, nebo mikroprocesorové jednotky, vyhodnocující koncentraci par peroxidu vodíku na základě měření známých závislostí rosného bodu při různých relativních vlhkostech vzduchu⁶¹. On-line měření koncentrace VPHP v přítomnosti vodní páry lze rovněž provádět spektrofotometricky⁶², a to jak v ultrafialové oblasti (v rozsahu 200 až 400 nm)⁶³, tak ve střední (7500 až 8400 nm)⁶⁴ nebo blízké infračervené oblasti záření (1200 až 1600 nm)^{65–67}. Princip stanovení je založen na detekci a následné kvantifikaci absorbovaného elektromagnetického záření příslušné vlnové délky, které je generováno elektromagnetickým zářičem, jenž se nachází v kontaminovaném prostoru. Signál absorbance, jenž generuje detektor, je úměrný koncentraci par dekontaminačního činidla v plynné směsi.

Po úspěšné dekontaminaci daného zařízení či prostoru následuje aerace par peroxidu vodíku, tedy snížení koncentrace par peroxidu vodíku na bezpečnou koncentrační úroveň. Z důvodu relativně vysoké stability tohoto plynného sterilizačního činidla je doba potřebná na aeraci nejdelší fází VPHP sterilizačního procesu. V současné době je rychlé a účinné aerace par peroxidu vodíku z prostoru dosahováno dvěma způsoby. Prvý způsob spočívá v prosté výměně atmosféry v dekontaminovaném prostoru proudícím aseptickým vzduchem (tento způsob je většinou užíván na malé izolátory). Toto „ředění“ probíhá většinou ve dvou stupních, kdy v druhém stupni je používán vzduch s daleko nižší relativní vlhkostí, než ve stupni prvním²⁹.

Mnohem efektivnější je však užití katalytických konvertorů, které jsou většinou umístěny v potrubí, jímž vstupuje vzduch z dekontaminovaného prostoru do pumpy, zajišťující dostatečnou cirkulaci vzduchu se sterilizační složkou v daném prostoru, a mezi výstupní částí pumpy a výstupem do atmosféry. Ačkoliv lze v literatuře nalézt hned několik odlišných typů těchto katalytických konvertorů, princip jejich působení je zcela identický – rozklad par peroxidu vodíku na vodu a kyslík. Katalytické konvertory mohou být například vytvořeny z hydrofobního nosiče, na jehož povrch je nanášena tenká katalytická vrstva tvořená z oxidů manganu, železa nebo mědi⁶⁸. V literatuře⁶⁹ je, pro výše uvedené účely, rovněž popsáno užití platinových a palladiových katalyzátorů, nicméně jejich aplikaci vylučuje jednak celková ekonomická náročnost daného procesu, ale také značný pokles efektivity těchto katalyzátorů v poměrně krátkém časovém horizontu. Tyto obtíže však lze vyřešit použitím katalyzátoru na bázi uhlíkatých částic s anorganickými katalyticky aktivními substancemi, jimiž jsou většinou vzácné kovy a jejich sloučeniny^{70,71}.

6. VPHP – biocidní činidlo

Peroxid vodíku je oxidační činidlo, které je známo svým vysokým stupněm biocidního účinku. Tento účinek spočívá v produkci volných hydroxylových radikálů (příp. superoxidových aniontů a jiných reaktivních kyslíkatých druhů), které mohou destruktivně atakovat membránu lipidů, DNA a jiné buněčné komponenty⁸. Inaktivace mikroorganismu je závislá na teplotě daného procesu a na koncentraci oxidačního činidla. Pro antimikrobiální aplikace je lepší účinnosti dosaženo při vyšší koncentraci tohoto činidla, která je velice důležitá zejména pro udržení sporicidní aktivity, nicméně při vysokých koncentracích je kapalný peroxid vodíku značně nestabilní, vysoce reaktivní a může explodovat, nebo se spontánně rozkládat hořením v závislosti na tom, jak je s ním zacházeno. Proto je pro

kapalné preparace především používán zředěný vodný roztok peroxidu vodíku (obvykle o nízké koncentraci od 3 až do 60 hm.%) a velice často v synergickém užití s jiným biocidem (např. peroctová kyselina). Antimikrobiální aktivita peroxidu vodíku dramaticky vzrůstá užitím jeho plynné fáze¹¹. Studie⁷² zabývající se účinností peroxidu vodíku na likvidaci spor bakterií ukázala, že podobných výsledků bylo dosaženo při užití koncentrace plynného peroxidu 400× nižší než v případě užití jeho kapalného roztoku.

Jako modelový biologický kontaminant, sloužící k validaci účinnosti VPHP procesu, jsou používány bakteriální spory *Bacillus (resp. Geobacillus) stearothermophilus*^{11,12,16,19,73–75}. Jedná se o vysoce rezistentní mikroorganismus vůči parám peroxidu vodíku, který lze považovat, z důvodu jeho podobného chování na VPHP, za surogát antraxu (*Bacillus anthracis*).

Rovněž existuje řada dalších komerčních biologických indikátorů designovaných pro VPHP proces (např. spory *Bacillus subtilis*), jenž jsou velice často využívány k verifikaci této dekontaminační metody^{6,11,18,21,74}. Tabulka I uvádí souhrn mikroorganismů, na nichž byla testována jejich inaktivace pomocí VPHP^{6,11,16,18,20–22}.

7. VPHP – degradace chemických kontaminantů

Znečištění chemickými látkami nemusí být nutně spjato s průmyslovou havárií, popř. s již dříve zmiňovanými teroristickými útoky. Během posledních tří desetiletí se významně začíná projevovat dopad znečištění akutně toxickými a karcinogenními pesticidy a průmyslovými intermediiaty, jimiž jsou ve většině případů špatně odbouratelné látky, přetrvávající v životním prostředí po dlouhou dobu. Tato skupina však tvoří pouze malou část široké skupiny rizikových látek. Druhou, z hlediska chemické struktury rozmanitou skupinou bioaktivních chemických substancí,

Tabulka I
Souhrn testovaných mikroorganismů

Zařazení	Mikroorganismus
Bakterie (+ spory)	<i>Acholeplasma laidlawii</i> ; <i>Actinetobacter baumannii</i> ; <i>Asperigillus spores</i> ; <i>Bacillus anthracis</i> ; <i>Bacillus alvei</i> ; <i>Bacillus cereus</i> ; <i>Bacillus circulans</i> ; <i>Bacillus firmus</i> ; <i>Bacillus licheniformis</i> ; <i>Bacillus megaterium</i> ; <i>Bacillus pumilus</i> ; <i>Bacillus sphaericus</i> ; <i>Bacillus stearothermophilus</i> ; <i>Bacillus subtilis</i> ; <i>Bacillus thuringiensis</i> ; <i>Clostridium botulinum</i> ; <i>Clostridium difficile</i> ; <i>Clostridium piliforme</i> ; <i>Clostridium sporogenes</i> ; <i>Enterobacter cloacae</i> ; <i>Enterococcus faecium/faecalis</i> ; <i>Escherichia coli</i> ; <i>Lactobacillus caesei</i> ; <i>Legionella pneumoniae</i> ; <i>Klebsiella pneumoniae</i> ; <i>Methicillin-resistant Staphylococcus aureus</i> ; <i>Mycobacterium smegmatis</i> ; <i>Mycobacterium tuberculosis</i> ; <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ; <i>Salmonella choleraesuis</i> ; <i>Staphylococcus epidermidis</i> ; <i>Salmonella typhimurium</i> ; <i>Serratia marcescens</i>
Viry	<i>Adenoviridae</i> ; <i>Caliciviridae</i> ; <i>Coronaviridae</i> ; <i>Flaviviridae</i> ; <i>Herpesviridae</i> ; <i>Iridoviridae</i> ; <i>Orthomyxoviridae</i> ; <i>Paramyxoviridae</i> ; <i>Parvoviridae</i> ; <i>Picornaviridae</i> ; <i>Poxviridae</i> ; <i>Reoviridae</i> ; <i>Rhabdoviridae</i>
Houby	<i>Alternaria</i> ; <i>Aspergillus niger</i> ; <i>Blastomyces dermatitidis</i> ; <i>Botrytis cinerea</i> ; <i>Candida albicans</i> ; <i>Candida parapsilosis</i> ; <i>Coccidioides immitis</i> ; <i>Histoplasma capsulatum</i> ; <i>Penicillium</i>
Další	<i>Caenorhabditis elegans</i> ; <i>Cryptosporidium parvum</i> ; <i>Lactococcal bacteriophage</i> ; <i>Syphacia muris</i>

kteřá dosahuje úrovně znečištění dříve uvedených látek, tvoří farmaceutika a aktivní ingredience osobních pečovatelských produktů pro lidi i zvířata, zahrnující nejenom léčiva na lékařský předpis, ale také látky diagnostické, vyživující, vonné a mnoho dalších. Farmaceutické látky jsou chemické substance užívané pro diagnózu, léčbu, prevenci proti onemocnění, pro udržení optimálního zdravotního stavu a správné funkce lidského těla. Definice je rovněž rozšířena na veterinární farmaceutika a může být také aplikována na ilegální drogy⁷⁶. Tyto sloučeniny a jejich bioaktivní metabolity se postupně dostávají do životního prostředí, zejména jako komplexní směsi jak v ošetřených, tak v neošetřených odpadních vodách. Ačkoliv se koncentrace těchto látek v životním prostředí pohybuje v rozmezí ng l^{-1} až $\mu\text{g l}^{-1}$, tedy nejeví se jako akutně riziková, mohou tyto látky například při jejich nahromadění nebo kombinaci s jinými látkami vyvolat řadu nežádoucích účinků. Většina farmaceutických substancí je navržena cíleně (specifický účinek na určité receptory daného organismu), avšak tyto látky mohou mít často i mnoho neznámých vedlejších účinků, které nelze predikovat⁷⁶. Všechny tyto okolnosti vedou k tomu, že se významně rozvíjí způsoby ochrany proti těmto látkám.

Ideální postup pro odstranění chemických kontaminantů by měl zahrnovat fyzikální odstranění daného kontaminantu z povrchu a jeho následnou přeměnu na méně toxické látky. V současné době však není známo, že by existovalo pouze jedno činidlo, které by bylo schopné degradovat tak širokou škálu chemických struktur, které reprezentují skupinu látek nazývanou farmaceutické substance. Navíc, při degradaci léčiv vznikají rezidua různých forem, jejichž identifikace je velice obtížná, a to nejen z důvodu možného počtu vzniklých rozkladných produktů, ale také proto, že cena některých výchozích látek je na toto studium příliš vysoká. Z tohoto důvodu je dekontaminace těchto biologicky aktivních látek směřována především k užívání povrchů na jedno použití, z nichž jsou následně chemické kontaminanty mechanicky odstraněny např. omytí čistícím činidlem (detergentem).

Přestože atmosféra o vysoké koncentraci par peroxidu vodíku, tedy silné oxidační prostředí, vytváří solidní předpoklad pro možnou aplikaci tohoto činidla k degradaci takovýchto organických kontaminantů, informace z této oblasti využití tohoto činidla jsou zcela nedostatečné a omezují se pouze na několik málo informačních zdrojů, v nichž jsou pomocí par peroxidu vodíku odbourávány vybrané farmaceutické substance (cytostatika)²⁸ a bojové otravné látky⁷⁷. Přesto z těchto prací jasně vyplývá, že i zde páry peroxidu vodíku vykazují daleko vyšší účinnost k degradaci daných organických kontaminantů než jeho kapalná roztok^{28,77,78}.

Páry peroxidu vodíku vykazují vysokou účinnost při likvidaci zpuchýřujících látek (např. sulfidický yperit – HD) a nervově paralytických látek třídy V (např. VX), nicméně jsou inaktivní vůči látkám typu G (např. tabun, sarin, soman). Jednoduchým přidáním plynného amoniaku k tomuto dekontaminačnímu činidlu vzniká reaktivní agens, jenž je schopno degradovat i bojové otravné látky

typu G. Toto kombinované degradační činidlo si zachovává svou účinnost k zpuchýřujícím látkám (HD) a navíc dochází k zvýšení účinnosti pro látky třídy V. Modifikací par peroxidu vodíku amoniakem vzniká fumigační dekontaminační činidlo použitelné pro nejrůznější scénáře, např. fumigace budov, letišť, dopravních interiérů a citlivých materiálů. Rychlá účinnost fumigačního činidla je zejména důležitá pro vojenské účely (např. rychlá očista kontaminovaného bojového vozidla, letiště a zařízení sloužících k ochraně vojáků), ale také pro nečekané události v oblasti civilní (např. již dříve zmíněné teroristické útoky). Je zajímavé, že komerční činidla obsahující jako čistící složku pouze amoniak jsou velice účinné na látky třídy G, nicméně jsou inaktivní pro látky VX a HD (cit.⁷⁷).

8. Materiálová kompatibilita s VPHP

Na úspěšnou likvidaci spor organického kontaminantu pomocí VPHP má vliv především koncentrace par peroxidu vodíku, doba expozice, teplota, vlhkost, případně výskyt kondenzace, ale také fyzikální a chemické vlastnosti materiálů, na nichž se spory nacházejí^{19,25}. V literatuře lze nalézt řadu prací^{6,14,75,79} zabývajících se právě studiem vlivu kontaminovaného povrchu na úspěšnou inaktivaci spor biologického indikátoru (*Bacillus stearothermophilus*) pomocí VPHP. Nejenom chemické složení daného materiálu, tedy jeho případná katalytická nebo adsorpční charakteristika směrem k plynnému peroxidu vodíku, ale také odlišnosti v jeho výrobě a jeho povrchovém ošetření, mají vliv na rezistenci testovaného organismu vůči tomuto dekontaminačnímu činidlu. Z uváděných dat vyplývá, že existuje jistá závislost mezi rychlostí inaktivace modelového mikroorganismu, drsností (pórovitostí) a smáčivostí daného povrchu⁷⁵. VPHP je zejména účinný pro sterilizaci hladkých povrchů, proto se jako standardní testovací materiály pro stanovení účinnosti VPHP na inaktivaci daného mikroorganismu používají různé typy nerez oceli, dále Cr-Ni ocel a sklo^{75,79}. V případě dekontaminace pórovitého materiálu, v němž se mohou spory ukrývat v kavitách a tím pádem být chráněny proti sporicidnímu činidlu, hraje významnou roli difuze peroxidu vodíku do daného materiálu⁷³. Některé materiály mohou dokonce vykazovat samotný inhibiční efekt na daný mikroorganismus i při absenci dekontaminačního činidla (např. ethylen-propylen-dienové kaučuky). Na výše uvedené poznatky naráží ve své Směrnici pro průmysl Americký Úřad pro léčiva a potraviny (FDA), jenž konstatuje, že: „při navrhování jakéhokoliv aseptického procesu je nutné vybírat vhodné materiály, které vykazují dostatečnou odolnost (kompatibilitu), jsou snadno čistitelné a dekontaminovatelné. Při konstrukci daného aseptického procesu by měla být pozornost zaměřena především na vliv textury a porozity daných konstrukčních materiálů, na validaci daného dekontaminačního cyklu“⁷⁵.

Ačkoliv byly úspěšně aplikace VPHP provedeny pro širokou řadu povrchů, toxikologické vyhodnocení takto ošetřených materiálů je prozatím velice omezené a odka-

zuje se jen na několik málo prací^{5,80}. Peroxid vodíku vykazuje silnou cytotoxicitu (látka škodlivá pro buňky), proto reziduální zbytky této látky obsažené v ošetřených materiálech mohou vyvolat podráždění očí, pokožky, sliznice a v případě dlouhodobé inhalace akutní plicní edém. Evropská agentura pro bezpečnost a ochranu zdraví při práci (OSHA) stanovuje expoziční limit pro peroxid vodíku na hodnotu 1 ppm, což odpovídá koncentraci 1,4 mg m⁻³. Právě z důvodu zabránění výše jmenovaným nežádoucím cytotoxickým účinkům peroxidu vodíku by měl být při volbě materiálů rovněž kladen důraz, vedle již výše zmíněné materiálové kompatibility s peroxidem vodíku a inaktivační charakteristiky, na účinnost aerace reziduálního peroxidu vodíku z těchto materiálů. Doposud provedené studie jsou zaměřeny především na polymerní materiály z důvodu jejich masivního užívání ve zdravotnictví. Permeace plynů do plastických materiálů je známa jako dvoukrokový proces, spočívající v rozpuštění plynu v tenkém filmu na povrchu materiálů a jeho následné difuzi skrz tento materiál. Bylo zjištěno, že u polyethylenu a polypropylenu dochází k velice nízké migraci peroxidu vodíku v těchto materiálech a lze tedy tyto materiály snadno aerovat. Naopak polystyren, polyuretan, polymethylmethakrylát (PMMA), poly(2-hydroxyethylmethakrylát) (HEMA), vykazují po standardní aeraci stále silnou cytotoxicitu. Jelikož jsou PMMA a HEMA používány pro výrobu hydrofilních kontaktních čoček a oči jsou velice citlivým orgánem, je nutné dávat při sterilizaci těchto materiálů pomocí VPHP veliký pozor. Kritickým materiálem je rovněž PVC, u nějž dochází k vysoké permeaci VPHP skrz tento materiál. Jelikož jsou jak PVC, tak výše jmenované polyolefiny využívány k výrobě obalů pro infuzní roztoky, které při kontaktu se silným oxidačním činidlem mohou podléhat nežádoucím degradačním (oxidačním) změnám, je nutné při dekontaminaci takovýchto materiálů pomocí VPHP dbát zvýšené opatnosti⁵.

9. Závěr

Užití par peroxidu vodíku, jakožto dekontaminačního činidla, je velice žádanou oblastí současného výzkumu. Hlavní orientace většiny aplikací je směřována především na dekontaminace povrchů od biologických agens, kde se VPHP jeví jako velice dobrá náhrada za doposud užívaná karcinogenní fumigační činidla, např. ethylenoxid nebo formaldehyd. V literatuře byla nalezena celá řada technických řešení VPHP dekontaminačního procesu a rovněž také popis již užívaných aplikací tohoto činidla. Informace o dekontaminaci povrchů od organických látek jsou minimální a omezují se pouze na několik málo informačních zdrojů.

Zavedení par peroxidu vodíku do oblasti biodekontaminace povrchů a prostorů ve farmaceutickém, zdravotnickém a potravinářském sektoru však s sebou přináší řadu nových požadavků. Především je nutné zajistit ochranu zdraví a bezpečnosti pro veškerý personál (páry peroxidu vodíku vykazují značnou cytotoxicitu). Kontrola by proto

měla zahrnovat jednak monitorování procesu pomocí senzoru příslušného pro páry peroxidu vodíku, který by byl schopen odhalit případný únik, ale rovněž by měla být přítomna zařízení pro okamžitou aeraci prostoru, pokud by to bylo nezbytné. Předměty, zařízení či prostory, které by měly být tímto činidlem dekontaminovány, by měly vykazovat jednak materiálovou kompatibilitu s peroxidem vodíku, a z důvodu úspěšné a rychlé dekontaminace by rovněž měly mít hladký povrch a jednoduchou strukturu.

Tento projekt vznikl za podpory GA ČR (Grant 203/08/H032) a MPO ČR (Grant FT-TA 4/071).

LITERATURA

1. Favero M. S., Bond W. W., v knize: *Disinfection, Sterilization, and Preservation* (Block S. S., ed.), kap. 35. Lea & Febiger, Philadelphia 1991.
2. Block S. S., v knize: *Disinfection, Sterilization, and Preservation* (Block S. S., ed.), kap. 1. Lea & Febiger, Philadelphia 1991.
3. Fraise A. P., v knize: *Russell, Hugo & Aylliffe's Principles and Practice of Disinfection, Preservation & Sterilization* (Fraise A. P., Lambert P. A., Maillard J. Y., eds.), kap. 1. Blackwell Publishing, Oxford 2004.
4. Russell A. D., v knize: *Disinfection, Sterilization, and Preservation* (Block S. S., ed.), kap. 3. Lea & Febiger, Philadelphia 1991.
5. Ikarashi Y., Tsuchiya T., Nakamura A.: *Biomaterials* 16, 177 (1995).
6. Rogers J. V., Sabourin C. L. K., Choi Y. W., Richter W. R., Rudnicki D. C., Riggs K. B., Taylor M. L., Chang J.: *J. Appl. Microbiol.* 99, 739 (2005).
7. McDonnell G., Russell A. D.: *Clin. Microbiol. Rev.* 12, 147 (1999).
8. Rutala W. A., Weber D. J.: *Infect. Control Hosp. Epidemiol.* 20, 69 (1999).
9. Okumura T., Ninomiya N., Ohta M.: *Prehosp. Disaster Med.* 18, 189 (2003).
10. Jernigan D. B., Raghunathan P. L., Bell B. P., Brechner R., Bresnitz E. A., Butler J. C., Cetron M., Cohen M., Doyle T., Fischer M., Greene C., Griffith K. S., Guarner J., Hadler J. L., Hayslett J. A., Meyer R., Petersen L. R., Phillips M., Pinner R., Popovic T., Quinn C. P., Reefhuis J., Reissman D., Rosenstein N., Schuchat A., Shieh W. J., Siegal L., Swerdlow D. L., Tenover F. C., Traeger M., Ward J. W., Weisfuse I., Wiersma S., Yeskey K., Zaki S., Ashford D. A., Perkins B. A., Ostroff S., Hughes J., Fleming D., Koplan J. P., Gerberding J. L., and the National Anthrax Epidemiologic Investigation Team: *Emerg. Infect. Dis.* 8, 1019 (2002).
11. Klapes N. A., Vesley D.: *Appl. Environ. Microbiol.* 56, 503 (1990).
12. Block S. S., v knize: *Disinfection, Sterilization, and Preservation* (Block S. S., ed.), kap. 9. Lea & Febiger, Philadelphia 1991.

13. U.S. Environmental Protection Agency: Compilation of Available Data on Building Decontamination Alternatives, EPA Contract No. 68-C-02-067 (U.S. EPA, 2005).
14. Hall L., Otter J. A., Chewins J., Wengenack N. L.: *J. Clin. Microbiol.* **45**, 810 (2007).
15. Sappers G. M., Walker P. N., Sites J. E., Annous B. A., Eblen D. R.: *J. Food Sci.* **68**, 1003 (2003).
16. Johnston M. D., Lawson S., Otter J. A.: *J. Microbiol. Methods* **60**, 403 (2005).
17. French G. L., Otter J. A., Shannon K. P., Adams N. M. T., Watling D., Parks M. J., *J. Hosp. Infect.* **57**, 31 (2004).
18. Kokubo M., Inoue T., Akers J.: *PDA J. Pharm. Sci. Technol.* **52**, 228 (1998).
19. Unger-Bimczok B., Kottke V., Hertel Ch., Rauschnabel J.: *J. Pharm. Innov.* **3**, 123 (2008).
20. Heckert R. A., Best M., Jordan L. T., Dulac G. C., Eddington D. L., Sterritt W. G.: *Appl. Environ. Microbiol.* **63**, 3916 (1997).
21. Bioquell: *Hydrogen Peroxide Vapour Biological Efficacy*. Bioquell, Andover 2003. <http://www.sebsa.org/BIOQUELL%20Biological%20Efficacy.pdf>, staženo 15. července 2009.
22. Forney Ch. F., Rij R. E., Denis-Arrue R., Smilanick J. L.: *HortScience* **26**, 1512 (1991).
23. Fichet G., Comoy E., Duval Ch., Antloga K., Dehen C., Charbonnier A., McDonnell G., Brown P., Lasmézas C. I., Deslys J. P.: *Lancet* **364**, 521 (2004).
24. Childers R. W., Cockerham C. C., Dixon M. S., Johnson J. W., Mielnik T. J., Steiner M. M. (American Sterilizer Company): US 5837193 (A61L 7/00).
25. Chung S., Kern R., Koukol R., Barengoltz J., Cash H.: *Adv. Space Res.* **42**, 1150 (2008).
26. Dalmasso J., Mielnik T. (American Sterilizer Company): US 5460845 (A23B 9/30).
27. Watling D., Ryle C., Parks M., Christopher M.: *PDA J. Pharm. Sci. Technol.* **56**, 291 (2002).
28. Roberts S., Khammo N., McDonnell G., Sewell G. J.: *J. Oncol. Pharm. Practice* **12**, 95 (2006).
29. Mielnik T. J., Krieger E. W., Eddington D. L., Koss G. C. (Steris Inc.): US 7354551 (A61L 9/00).
30. Hill A. L. (Steris Inc.): US 2007/0253859; *Chem. Abstr.* **147**, 491766 (2007).
31. Edwards S. J., Geist S. G., Steen P. A. (Steris Corporation): WO 98/57673 (A61L 2/24).
32. Adams N. M. T., Watling D. (Bioquell UK Limited): WO 03/082355 (A61L 2/18).
33. Watling D. (Microflow Limited): WO 00/74734 (A61L 2/20).
34. Adams N. M. T. (Bioquell UK Limited): WO 2007/012866, *Chem. Abstr.* **146**, 190715 (2007).
35. Koubek E. (American Sterilizer Company): US 4512951, *Chem. Abstr.* **101**, 43658 (1984).
36. Bier M. E. (American Sterilizer Company): US 4642165, *Chem. Abstr.* **106**, 122302 (1987).
37. Khorzad D., Thrash R. J., Fischer J., Cullen T. F. (Pharmaceutical Systems): US 2003007916, *Chem. Abstr.* **138**, 92160 (2003).
38. Hoshino M. (Dai Nippon Insatsu Kabushiki Kaisha): US 4296068 (B08B 3/12).
39. Blidschun B., Lierke E. G. (Kolbus GmbH & Co. KG): DE 3414268, *Chem. Abstr.* **104**, 50132 (1985).
40. Voyten S. M., Bacik M. A., Adams P. R., Centanni M. A. (Steris Inc.): US 2005/0260096, *Chem. Abstr.* **143**, 483276 (2005).
41. Campbell B. A. (Abtox, Inc.): EP 0456135 (A61L 2/14).
42. Penna T. Ch. V., Ferraz C. A. M., Cassola M. Á.: *Infect. Control Hosp. Epidem.* **20**, 465 (1999).
43. Johnson & Johnson Medical, Inc.: *Compatibility of Medical Devices and Materials with Low-Temperature Hydrogen Peroxide Gas Plasma*. Johnson & Johnson Medical, Inc., Irvine 1997. <http://www.devicelink.com/mddi/archive/97/12/011.html>, staženo 28. července 2009.
44. Lopez A., Bozzi A., Mascolo G., Kiwi J.: *J. Photochem. Photobiol., A* **156**, 121 (2003).
45. Beltrán F. J., Ovejero G., Rivas J.: *Ind. Eng. Chem. Res.* **35**, 883 (1996).
46. Esplugas S., Giménez J., Contreras S., Pascual E., Rodríguez M.: *Water Res.* **36**, 1034 (2002).
47. Swank R., Palaniappan S. (Tetra Laval Holdings & Finance, SA): US 6039922 (A61L 2/10).
48. Palaniappan S., Swank R., Erickson T., Lees J., Cicha J., Robertson M. (Tetra Laval Holdings & Finance): US 6056918 *Chem. Abstr.* **132**, 307585 (2000).
49. Centanni M. A. (Steris Inc.): US 2005129571, *Chem. Abstr.* **43**, 12356 (2005).
50. Cummings A. L., Young J. H., Makinen R. W. (American Sterilizer Company): US 4744951 (A61L 2/20).
51. Merianos J. J., Lieberman H. A., Login R. B. (GAF Chemicals Corporation): US 5008106, *Chem. Abstr.* **115**, 142367 (1991).
52. Lin S. M., Swanzy J. A., Jacobs P. T. (Johnson & Johnson Medical, Inc.): US 5674450, *Chem. Abstr.* **127**, 322836 (1997).
53. Jacobs P. T., Lin S. M., Chen X. (Ethicon, Inc.): EP 1473044 (A61L 2/20).
54. Carnes C. L., Klabunde K. J., Koper O., Martin L. S., Knappenberger K., Malchesky P. S., Sanford B. R. (United States Air Force): US 2004067159, *Chem. Abstr.* **140**, 298882 (2004).
55. Yehuda N. B., Margalit E. (Pimi Marion Holdings, Ltd.): US 7147872 (A01N 37/16).
56. Grack S. J. (American Sterilizer Company): US 5139957, *Chem. Abstr.* **118**, 116006 (1992).
57. Read D. M. (3M Innovative Properties Company): US 6790411, *Chem. Abstr.* **135**, 37230 (2004).
58. McDonnell G. E., McVey I. F., Geanous M. (Steris Inc.): US 6936434 (C12Q 1/22).
59. Akai T., Shibata M., Nishino H. (Shikoku Kakoki Co., Ltd.): EP 0384535 (A61L 2/20).
60. Centanni M. A., Li Ch. Ch., Zhao D., Yu J. (Steris Inc.): US 7232545 (G01N 29/02).

61. Cummings A. L. (American Sterilizer Company): US 4843867 (A61L 2/00).
62. Thrash R. J., Cullen T. F., Khorzad D., Fischer J. (Pharmaceutical Systems, Inc.): US 6794649 (A61L 2/08).
63. Prieve J. F., Jacobs T. P., Lin S. M., Timmons R. B. (Ethicon, Inc.): US 6269680, Chem. Abstr. 131, 2532 (2001).
64. McVey I. F. (Steris Inc.): US 6875399 (A61L 2/00).
65. Van D. B. R., Zetter M. S., Miller K. L., Todd T. R. (UOP, Inc.): EP 744615, Chem. Abstr. 126, 42040 (1996).
66. Corveleyn S., Vandebossche G. M. R., Remon J. P.: Pharm. Res. 14, 294 (1997).
67. Adams D., Brown G. P., Fritz C., Todd T. R.: Pharm. Eng. 18, 1 (1998).
68. Nobis U. (Dillinger Stahlbau): EP 0882492 (B01D 53/86).
69. Dekato K., Smith D., Coler J., Jacobs P. (Ethicon Inc.): JP 11221443, Chem. Abstr. 131, 148437 (1999).
70. Martin A. (Bioquell UK Limited): US 7132083 (A62B 11/00).
71. Wirling-Niesing R., Cooray R., Durst M. (Schumacher'sche Fabrik GMBH & Co. KG): WO 88/04197 (B01D 53/36).
72. Hultman C., Hill A., McDonnell G.: Pharm. Eng. 27, 22 (2007).
73. Bounoure F., Fiquet H., Arnaud P.: Am. J. Health. Syst. Pharm. 63, 451 (2006).
74. Bässler H.-J., Nieth K. F., Herbig E.: Eur. J. Parenter. Sci. 1, 55 (1996).
75. Unger B., Rauschnabel U., Dühorn B., Kottke V., Hertel Ch., Rauschnabel J.: PDA J. Pharm. Sci. Technol. 61, 255 (2007).
76. Daughton Ch. G., Ternes T. A.: Environ. Health Perspect. 107, 907 (1999).
77. Wagner G. W., Sorrick D. C., Procell L. R., Brickhouse M. D., Mcvey I. F., Schwartz L. I.: Langmuir 23, 1178 (2007).
78. Castegnaro M., De Méo M., Laget M., Michelon J., Garren L., Sportouch M. H., Hansel S.: Int. Arch. Occup. Environ. Health 70, 378 (1997).
79. Sigwarth V., Stärk A.: PDA J. Pharm. Sci. Technol. 57, 3 (2003).
80. Müller H. J., Sommermeyer K., Cech F.: Hosp. Pharm. 10, 84 (2003).

J. Švrček^a, P. Kačer^a, M. Kuzma^b, A. Marhou^a, L. Pánek^c, and L. Červený^a (^a Department of Organic Technology, Institute of Chemical Technology, Prague, ^b Laboratory of Molecular Structure Characterization, Institute of Microbiology, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague, ^c Block Co., Prague, Czech Republic): **Decontamination Technology Utilizing Hydrogen Peroxide Vapour**

A variety of decontamination techniques are utilized to remove biological and chemical contaminants from surfaces. Nevertheless, new physical and chemical methods and agents are still being developed. The main reason is toxicity of the common used agents. This review summarizes recent findings on a new promising decontamination agent, hydrogen peroxide vapour (VPHP), with almost ideal properties. Decontamination using VPHP has become the method of choice in pharmacy, biomedical applications and health care. The VPHP method is reliable, rapid, leaves no residues (decomposes into water and oxygen) and can be validated. So far only limited information has been published about decontamination of chemical and biologically active compounds using VPHP. The definitive knowledge of its action and the influence of various factors are yet to be discovered.