

NANOTEXTILNÍ MEMBRÁNY PRO ZACHYCENÍ BAKTERIÍ *Escherichia coli*

J. Lev, L. Kalhotka, M. Černý

Došlo: 15. března 2010

Abstract

LEV, J., KALHOTKA, L., ČERNÝ, M.: *Nanotextile membranes for bacteria Escherichia coli capturing*. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2010, LVIII, No. 5, pp. 239–246

The article describes an experimental study dealing with the possibility of nanotextile materials usage for microbiologically contaminated water filtration. The aim of the study is to verify filtration ability of different nanotextile materials and evaluate the possibilities of practical usage. Good detention ability of these materials in the air filtration is the presumption for nanotextile to be used for bacteria filtration from a liquid. High nanotextile porosity with the nanotextile pores dimensions smaller than a bacteria size predicates the possibility of a successful usage of these materials. For the experiment were used materials made from electrospinning nanofibres under the label PA612, PUR1, PUR2 s PUR3 on the supporting unwoven textiles (viscose and PP). As a model simulation of the microbial contamination, bacteria *Escherichia coli* was chosen. Contaminated water was filtered during the overpressure activity of 10⁵ Pa on the input side of the filter from the mentioned material. After three-day incubation on the nutrient medium, cultures found in the samples before and after filtration were compared. In the filtrated water, bacteria *E.coli* were indicated, which did not verify the theoretical presumptions about an absolut bacteria detention. However, used materials caught at least 94% of bacteria in case of material PUR1 and up to 99,996% in case of material PUR2. These results predict the possibility of producing effective nanotextile filters for microbiologically contaminated water filtration.

Recommendation: For the production of materials with better filtrating qualities, experiments need to be done, enabling better understanding of the bacteria detention mechanisms on the nanotextile material, and parameters of the used materials that influence the filtrating abilities need to be verified.

nanotextile membranes, water purification, bacteria capturing

Pojmem nanotechnologie lze označit termín pro skupinu vzájemně propojených moderních věd a technologií, zabývajících se vytvářením a studiem objektů s rozměry 1–100 nm. Při těchto rozměrech se vlastnosti látek dramaticky mění a nabízejí nové možnosti pro uplatnění v mnoha oborech (cit. OECD 2009 a nano.tul.cz).

Nanotextilie jsou perspektivním materiálem, který může najít uplatnění v mnoha oblastech lidské činnosti. Strukturu lze přirovnat k netkané textilii tvořené velmi jemnými vlákny. Průměr vláken se pohybuje v rozmezí 50–500 nm. První technologie produkující nanovlákná započaly v letech 1934 až 1944. Společnost Formulas v tu dobu publikovala řadu patentů popisujících experimentální technologie pro výrobu polymerových vláken při použití elektrostatické síly. Na výzkum a vývoj dalších tech-

nologií navazovali v letech – 1952 Vonnegut a Neubauer (General Electric Research Laboratory, Schenectady, New York, USA) – technologie výroby vysoce elektrifikovaných uniformních kapiček o průměru 0,1 mm, 1955 Drozin (Department of Chemistry, Columbia University, New York, USA) – rozptylování řad tekutin do aerosolů při vysokém elektrickém potenciálu, 1966 Simons – přístroj na výrobu ultratenkých a ultralehkých nanovláknenných tkanin s různými vzorky při použití elektrického zvláknování, 1971 Baumgarten – přístroj k elektrosvláknování akrylických vláken s průměrem v rozmezí 0,05–1,1 mikronů. Na tyto badatele a především na jejich následníky ve firmách Reneker a Chun (Reneker, 1996; Chun, 1998, 1999; Fong, 2001) a Larronda a Manley (Larronda a Manley, 1981) navázal výzkumnou činnost tým prof. Oldřicha Jir-

sáka z Technické univerzity v Liberci. Ten ve spolupráci s firmou Elmarco vyvinul technologii elektrostatického zvlákňování Nanospider, která umožňuje vysokou produkci nanovláken a je použitelná v průmyslové výrobě (patent PV 2003-2421). Předchozí technologie byly schopny výroby nanovláken pouze v laboratorním měřítku. Velký měrný povrch, vysoká pórovitost a malá velikost pórů nanotextilie v porovnání s komerčními textilními materiály nabízí využití ve filtraci (Hrůza, 2004), pro výrobu biomedicínských materiálů (Eugene, 2005; Sell, 2009; Li W-J, 2001), nanokompozitů (Zheng-Ming Juany, 2003) a pro membránové aplikace (Jing-Wen Chen, 2006; Reneker, 2005). V případě filtrace je využita vysoká porozita nanotextilií s malými rozměry pórů. Filtrační parametry jsou ovlivněny průměrem, morfologií a tloušťkou vrstvy nanovláken apod. Vhodné parametry nanotextilie, plynoucí z teoretických předpokladů pro dané filtrační médium, je nutno experimentálně ověřit. Cílem experimentů, které jsou popsány v tomto článku, je vytipovat vhodný nanotextilní materiál, na nosném médiu, schopný detence bakterií při filtraci kontaminované vody (plošná hmotnost, morfologie vrstvy, složení vrstev, vhodné nosné médium).

Technologie výroby nanovláken a nanotextilií

Jedním z procesů výroby nanovláken je elektrostatické zvlákňování. V tomto procesu je využito vysokého napětí k vytvoření elektricky nabitého proudu polymerního roztoku nebo taveniny, přičemž elektroda vysokého napětí je spojena přímo s polymerním roztokem. Jedním z možných způsobů se následně zvlákňuje roztok kapilárou (Frenot, 2003) (obr. 1). Díky vysokému elektrickému napětí mezi špičkou kapiláry a uzemněným kolektorem vzniká tzv. Taylorův kužel na špičce kapiláry, z něhož jsou produkována submikronová vlákna. Vlákna ztuhnou po odpaření rozpouštědla a vytvoří vláknennou vrstvu na povrchu kolektoru. Rychlost produkce touto technologií je $0.1\text{--}1\text{ g.hod}^{-1}$.

Tento postup je málo produktivní a není vhodný pro průmyslovou výrobu nanovláken.

Produktivnější způsob výroby, nazvaný NANO-SPIDER, byl vyvinut týmem prof. Jirsáka na univerzitě v Liberci (Jirsák, 2003). Technologie Nanospider nepoužívá pro tvorbu vláken trysky ani kapiláry, ale válec částečně ponořený v roztoku polymeru (obr. 2). Válec se otáčí kolem své osy a na jeho povrchu se vytváří tenký film roztoku polymeru. V horní úvrati rotačního pohybu válce, což je současně místo s nejnižší vzdáleností od kolektoru – protilehlé elektrody, se v důsledku maximální intenzity elektrického pole začínou vytvářet mnohačetná ohniska Taylorových kuželů, která dále vyústí v proces zvlákňování. Taylorovy kužely a následně proudy hmoty jsou vytvářeny v husté síti pokrývající horní část válce. Tím je dosaženo vysoké výrobní kapacity zvlákňovací hlavy Nanospideru ($1\text{--}5\text{ g.min}^{-1}\text{.m}^{-1}$ pracovní šíře). Proudů roztoku polymeru jsou poté zbaveny rozpouštědla a stávají se pevnými nanovláknými těsně před tím, než dosáhnou kolektoru. Vrstva nanovláken je většinou nanášena na nosný materiál (PP netkaná textilie, viskóza, papír apod.), který umožňuje bezpečnější manipulaci s jemnou vrstvou nanovláken.

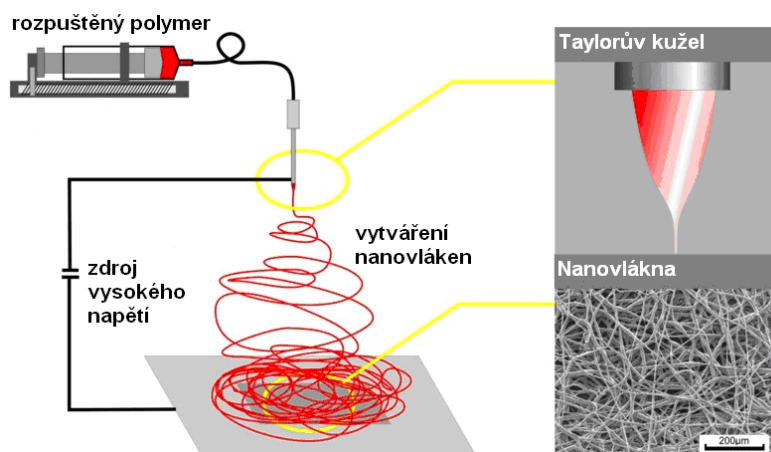
Technologií nanospider bylo zvlákňováno již přes 50 druhů polymerů. Přehled nejvíce používaných zvlákňovaných materiálů je uveden v Tab. I (Emarco.com).

Vlastnosti nanovláken, nanotextilií

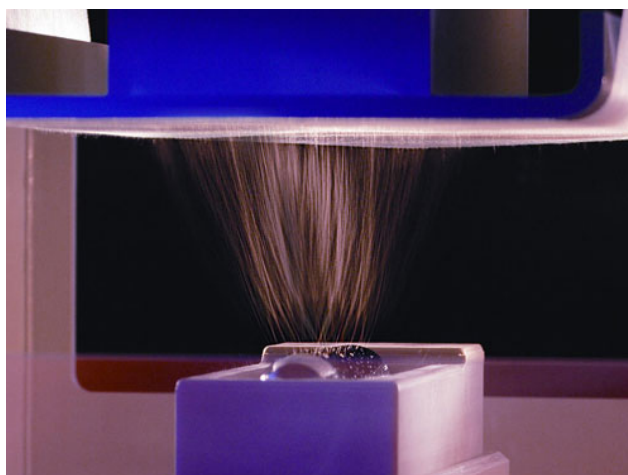
- obrovský měrný povrch
- vysoká pórovitost a současně malé velikosti pórů
- průměry vláken: $50\text{--}500\text{ nm}$
- plošná váha: $0.5\text{--}5\text{ g/m}^2$
- výborné mechanické vlastnosti v poměru k jejich váze

Výrobní náklady nanotextilií jsou poměrně nízké. Cena za metr čtvereční se pohybuje v řádech korun. Cena je funkcí druhu zvlákňovaného materiálu, plošné hmotnosti a počtu nanášených vrstev, druhu nosného média apod.

Struktura nanotextilie je ovlivněna mnoha faktory (materiál, rozpouštědlo, vzdálenost elektrod,



1: Schéma přípravy nanovláken tryskou (Frenot, 2003)
1: Nanofibres preparation by capillary (Frenot, 2003)

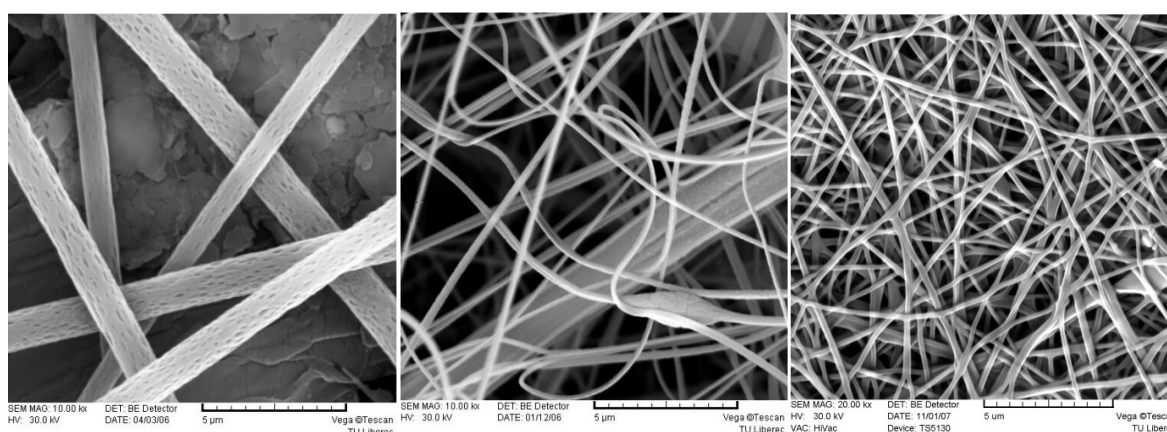


2: Elektrostatické zvláknění polymeru metodou Nanospider (nano.tul.cz)
2: Electrospinning by Nanospider (nano.tul.cz)

I: Nejpoužívanější materiály zvlákněné metodou elektrosponingu

I: Most used materials prepared by electrospinning

Organická nanovláknna	Anorganická nanovláknna	Biopolymerní nanovláknna
PA6 (Nylon 6)	TiO ₂	Gelatin
PA 6/12 (Polyamid)	SiO ₂	Chitosan
Polyamid	Al ₂ O ₃	
PUR (Polyurethane)	ZnO	
PES (Polyethylsulfide)	TiO ₂	
PVA (Polyvinylacohol)	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	
PAN (Polyakrylnitril)	ZrO ₂	
PEOX	MgAl ₂ O ₄	
PESO		
PS		
PVP		
PVP-I		



3: Různé morfologie nanovláken připravených metodou elektrosponingu (nano.tul.cz) Porézní elektrostaticky zvlákněná vlákna, Polyakrylonitril, Polycaprolacton

3: Example of different morphology of electrospinnig nanofibres (nano.tul.cz)

tvár elektrod, napětí mezi elektrodami atd.), pro každou aplikaci je vyvíjena a testována optimální tloušťka vrstvy, průměr a morfologie vláken (Bölen,

2005; Yördem, 2006). Na obr. 3 jsou uvedeny příklady morfologie různých druhů nanotextilií (TU Liberec).

Do vrstvy nanovláken lze dále navázat další látky podporující funkci v dané oblasti aplikace (antibakteriální prostředky, látky urychlující hojení ran, léčiva apod.).

Filtrace

Jemná a zároveň poměrně pevná struktura nanotextilií umožňuje využití pro filtrační účely (Gopal, 2006). V současnosti jsou tyto materiály nejčastěji aplikovány pro filtraci vzduchu. Použití struktur tvořených nanovláky pro filtraci kapalin je obtížnější, vzhledem k vyšším tlakům na membránu, rychlejšímu zanášení pórů apod. Byla již však provedena řada experimentů, kde jsou membrány z nanovláken použity, a bylo prokázáno možné využití v oblasti mikrofiltrace kapalin. Tento nový přístup by mohl konkurovat konvenčním procesům úpravy kapalin, jako jsou destilace, reverzní osmóza (Feng, 2008; Hijnen, 2000).

Tento článek se zaměřuje na využití detenčních vlastností nanotextilií pro filtraci vody kontaminované bakteriemi. Velikost pórů nanotextilie se pohybuje v řádu desítek nanometrů, rozměry bakterie *E. coli* jsou 1,1–1,5 × 2–6 μm. Podle teoretických předpokladů by tedy nanotextilní membrány měly být schopny zachytit bakterie *E. coli*. Do procesu filtrace však vstupuje řada faktorů ovlivňujících detenční schopnosti. Při vyšším tlaku může dojít k deformaci a zvětšení pórů nebo k perforaci nanovlákené vrstvy, proto je pro účinnou filtraci kapalin velmi důležité zvolit materiál s vhodnými parametry, zejména optimální průměr nanovláken, plošnou hmotnost a vhodné nosné médium.

MATERIÁL A METODY

Použité materiály

Pro experiment byly použity materiály viz tab. II.

II: Použité materiály
II: Used materials

Materiál	Plošná hmotnost [g.m ²]	Průměr vláken [nm]
PA 612	0,92	100–400
PUR1	8,1	400–600
PUR2	1,6	133
PUR3	0,98	104

Vzorek byl kruhového průřezu o průměru 48 mm (funkční část 38 mm).

Jako testovací mikroorganismy byly použity bakterie *Escherichia coli* CCM 2024. Tyto bakterie jsou jedním z indikátorů fekálního znečištění vody.

Velikosti bakterie:

Escherichia coli: rozměry bakterie 1,1–1,5 × 2–6 μm (Garrity, 2005).

Sterilizace nanotextilie UV zářením po dobu čtyř hodin.

Živná média:

Živný bujón č. 2 (Imuna, Šarišské Michaľany).

Endo – agar (Merck, Germany) pro stanovení *Escherichia coli*.

Metoda

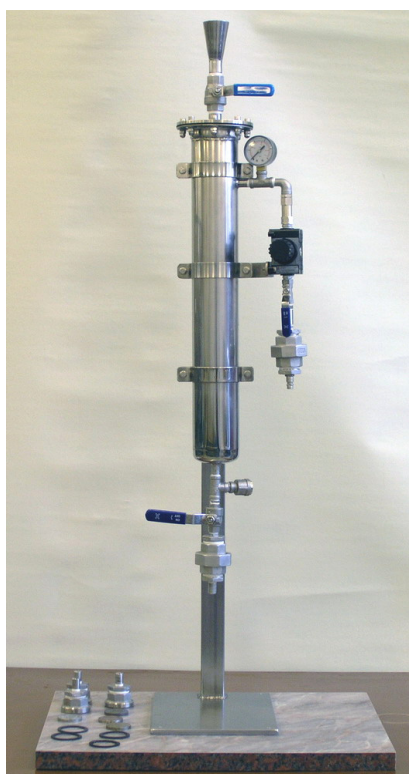
Sterilní bujón byl inokulován *E. coli*. Po 24hodinové kultivaci při 37 °C bylo 10 ml kultury inokulováno do 1000 ml sterilní destilované vody. Tento roztok byl vpraven do filtračního zařízení (viz obr. 4) napouštěcím otvorem v horní části zařízení. Napouštěcím ventilem tlakového vzduchu byl přiveden tlakový vzduch, pomocí regulačního ventilu byl nastaven na manometru přetlak 10⁵ Pa. Nanotextilní materiál na nosném médiu byl upnut do filtrační hlavy. Vypouštěcím ventilem ve spodní části zařízení byla kapalina přivedena na filtr a po filtraci 100 ml filtrátu byl vypouštěcí ventil uzavřen. Pro orientační výpočet průtoku přes filtr byl zaznamenáván čas filtrace. Přefiltrované i nepřefiltrované médium bylo podrobeno mikrobiologickému rozboru na přítomnost *E. coli*. Po přípravě desetinného ředění vzorků byl vždy 1 ml příslušného ředění inokulován do sterilní Petriho misky a zalit živným médiem. Jako živné médium byl použit Endo – agar (Merck, Germany), vzorky byly poté inkubovány 72 h při 37 °C. Po uplynutí doby kultivace byly na miskách odečteny narostlé kolonie *E. coli* a stanoven počet bakterií v KTJ/ml. Pro každý materiál byla provedena dvě měření.

VÝSLEDKY

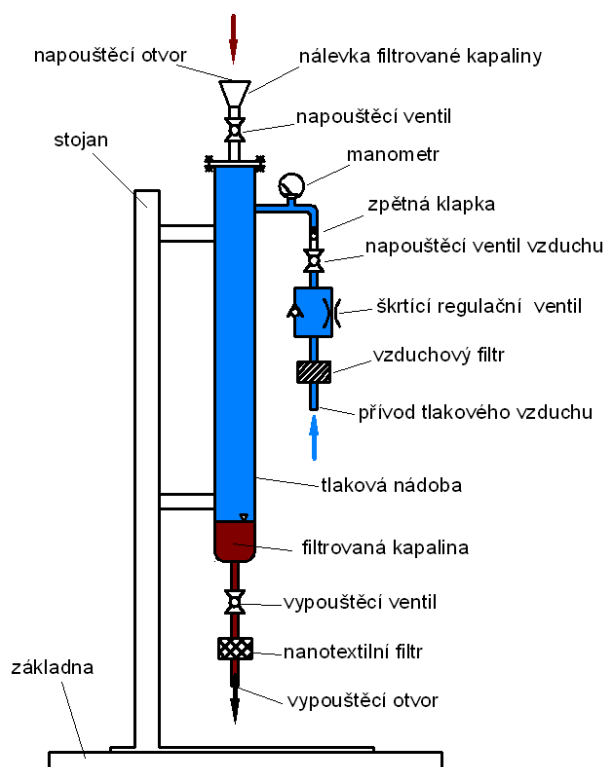
Počet *E. coli* v původním vzorku podle mikrobiologického rozboru byl 1,7.10⁶ KTJ/ml.

Výsledky experimentu jsou znázorněny v Tab. III. Zkoumané materiály vykazovaly poměrně velkou filtrační účinnost. Účinnost filtrace se pohybovala od 94,866–99,996%. Částečně se tak potvrdily teoretické předpoklady experimentu vycházející z rozměrů pórů v nanotextilním materiálu a rozměrů bakterií *E. coli*. Nejlepší filtrační účinnost byla zaznamenána při použití materiálu pod označením PUR2, kde se účinnost filtrace blížila sto procentům. Průtok kapaliny byl však několikanásobně menší než v případě ostatních materiálů, což lze přisuzovat jemnější struktuře nanotextilie, menším průměru nanovláken a větší plošné hmotnosti vrstvy oproti PA612 a PUR3. Tuto domněnku jsme potvrdili provedením snímků bakteriálně znečištěné nanotextilie (obr. 5) na rastrovacím elektronovém mikroskopu (Philips XL-30). Na snímku je znázorněna nanotextilní vrstva z materiálu PA612. Ze struktury je patrné, že je zde možnost, že by bakterie mohla proniknout vrstvou náhodně položených nanovláken.

Výsledky nižší filtrační účinnosti a vyšších hodnot průtoku u materiálu PUR lze přisuzovat větším průměrům nanovláken a z nich vycházející větší prostorové porozitě. Výrazné ovlivnění filtračních parametrů použitím různých nosných textilií (viskóza, PP spunbond) nebylo pozorováno. Pro lepší mani-



4: Filtrační zařízení
4: Filtration device



III: Výsledky experimentu III: Results

Označení vzorku/nosný materiál	plošná hmotnost [g.m ⁻²]	průměr vláken [nm]	čas filtrace [s] (100ml roztoku)	průměrný průtok (pro 100ml) [l.s ⁻¹]	počet bakterií po filtraci [KTJ. ml ⁻¹]	Účinnost filtrace [%]
3 vrstvy PA 612 / viskóza	0,92	100–400	9,26	0,0108	7.1×10^3 (7136)	99,580
PUR1 / PP spunbond	8,1	400–600	3,56	0,0281	8.7×10^4 (87273)	94,866
PUR2 / PP spunbond	1,6	133	30,7	0,0033	65	99,996
PUR3 / viskóza	0,98	104	10,28	0,0097	1.8×10^4 (17591)	98,965



5: Bakterie *E. coli* zachycené na nanotextilii z PA612
5: Captured bacteria *E. coli* on PA612 nanotextile

pulaci a lepší adhezi nanovrstvy na nosné textilii lze doporučit podklady vyrobené z viskózy.

Rozdílné filtrační vlastnosti nanotextilních materiálů mohou být ovlivněny také možnými defekty nanotextilní vrstvy. Pro experimentální měření zde popsané byly vzorky nejprve vizuálně kontrolovány. Výskyt defektů však nelze zcela vyloučit. Pro praktické využití by bylo vhodné použít automatizované vyhodnocování kvality nanofiltrů. Relevantní metodou by mohlo být použití *Particle Image Velocimetry* (Jašíková, 2009 – vyhodnocování nanofiltrů vizualizačními metodami).

Hygienický limit pro obsah *E. coli* v pitné vodě je 0 KTJ ve 100, resp. 250 ml (Vyhláška č. 252/2004 Sb.).

Marendiak a kol. (1987) uvádějí limity počtů *E. coli* v 1000 ml a celkové počty mikroorganismů (CPM) v 1 ml pro zatřídění povrchových vod. Velmi čistá voda obsahuje 1 000 KTJ/1000 ml *E. coli* a méně jak 106 CPM, čistá voda obsahuje 10 000 *E. coli* v 1 000 ml a $5,0 \times 106$ CPM v 1 ml, znečištěná voda 100 000 *E. coli* v 1000 ml a do $25,0 \times 107$ CPM v 1 ml. Podobné hodnoty pro avšak pro koliformní bakterie v 1 litru v jednotlivých saprobitách uvádějí také Lellák a Kubíček (1991), xenosaprobní vody do 10 000/l, oligosaprobní do 50 000/l, beta-mezosaprobní do 100 000 v 1 litru.

Námi zjištěné počty *E. coli* ve filtrovaných vzorcích by tedy řadily vodu do kategorie vody znečištěné, vezmeme-li ale v úvahu *E. coli* jako jediný kontaminující mikroorganismus, pak samozřejmě půjde o vody velmi čisté.

Ambrožová (2004) uvádí jako limitní hodnotu pro koliformní bakterie 100 KTJ/ml ve vodách vhodných ke koupání ve volné přírodě a dále směrné a nepovinné hodnoty koliformních bakterií ve 100 ml surové vody pro jednotlivé kategorie standardních metod úpravy surové vody na pitnou vodu. Tyto hodnoty jsou 50 KTJ/100 ml pro kategorii A1, 5000 KTJ/100 ml pro kategorii A2 a 50000 KTJ/100 ml pro kategorii A3. Námi zjištěný nejvyšší počet *E. coli*, tj. 65 KTJ/ml se po přepočtu blíží hranici pro kategorii A2.

Úprava vody kontaminované bakteriemi *E. coli* pomocí materiálů použitých v tomto experimentu není dostatečná pro pitnou vodu, avšak lze předpokládat, že při použití víceúrovňové filtrace přes tyto materiály by mohla být dosažena stoprocentní účinnost filtrace. V případě vysoké účinnosti a spolehlivosti této technologie úpravy vody by bylo možno zcela nahradit současnou chemickou úpravu pitné vody, či významně ovlivnit množství chemikálií potřebných pro úpravu. Na rozdíl od klasické chemické úpravy vody by v upravené vodě nebyly přidané chemické látky a mrtvé bakterie. Výsledky naznačují, že použití membrán z nanotextilních materiálů pro úpravu vody je reálné. Je však zapotřebí otestovat, zda je možné přizpůsobit experimentální technologii filtrace také na reálné použití, např. outdoorové použití, pro vodárny, čističky odpadních vod apod.

SOUHRN

Práce popisuje experimentální práci zabývající se možností využití nanotextilních materiálů pro filtraci mikrobiologicky znečištěné vody nanotextilií. Cílem práce bylo ověřit filtrační schopnosti vybraných nanotextilních materiálů vyrobených metodou elektrospinningu a zhodnotit možnosti využití v praxi. Pro experiment byly použity nanotextilní vzorky z PA a PUR s rozdílnými materiálovými parametry a na různých nosných materiálech. Vzorky byly označeny (materiál nanovláken / nosná textilie) PA612/viskóza, PUR1/PP spunbond, PUR2/PP spunbond, PUR3/viskóza. Přes vzorky kruhového průřezu o průměru 48 mm (funkční průměr 38 mm) bylo filtrováno pomocí filtračního zařízení 100 ml mikrobiologicky znečištěné vody za přetlaku 10^5 Pa (1 Bar). Pro simulaci mikrobiologického znečištění byly použity bakterie *E. coli*. Po filtraci byly vzorky inkubovány 72 hod při teplotě 37 °C. Po inkubaci byl proveden mikrobiologický rozbor vzorků před a po filtraci. Všechny nanotextilní materiály vykazovaly filtrační účinnost nad 94%. Konkrétněji tři vrstvy PA612–99,580%, PUR1–94,866%, PUR2–99,996%, PUR3–98,965%. Podle výsledků nemá nosné médium podstatný vliv na účinnost filtrace, vzhledem k lepší adhezi nanotextilní vrstvy lze pro filtraci kapalin doporučit materiál nosného média z viskózy. Výsledky experimentu jsou dobrým předpokladem pro další experimenty s nanotextilními materiály pro filtraci kapalin a naznačují možné reálné použití membrán z nanotextilních materiálů pro úpravu vody v praxi.

nanotextilie, čištění vody, zachycení bakterií

SUMMARY

The study describes an experimental work dealing with the possibility of nanotextile materials usage for microbiologically contaminated water filtration through a nanotextile. The basic theoretical presumption for an effective filtration is the smaller dimensions of nanotextile pores when compared to the dimension of bacteria. The aim of the study was to verify the filtration abilities of the chosen nanotextile materials made by the electrospinning method and evaluate the possible usage in practice. For

the experiment, nanotextile samples from PA and PUR were used, with different material parameters and on different supporting materials. The samples were labelled (nanofibres material/supporting textile) PA612/viscose, PUR1/PP spunbond, PUR2/PP spunbond, PUR3/viscose.

100ml microbiologically contaminated water was filtrated with help of filtration mechanism through the samples of circular section with 48mm diameter (functional diameter 38mm), during the overpressure 10^5 Pa (1Bar). For the microbiological contamination simulation, bacteria *E. Coli* were used. After the filtration, the samples were incubating for 72 hours in the temperature of 37 °C. After the incubation, a microbiological analysis of the samples before and after the filtration was carried out. All nanotextile materials showed a filtration ability above 94%. Particularly three layers PA612–99,580%, PUR1–94,866%, PUR2–99,996%, PUR3–98,965%. According to the results, the supporting medium does not influence the effectiveness of the filtration. With respect to better adhesion of the nanotextile layer, material of the supporting medium made from viscose can be recommended for the filtration of liquids. The results of the experiment are a good presumption for next experiments with nanotextile materials in water filtration and they indicate a possible practicable usage of membranes from nanotextile materials for water modification in practice.

Poděkování

Príspevek byl financován s podporou Interní grantové agentury Mendelovy univerzity v Brně – Agonomické fakulty č. 2102/IG290161.

LITERATURA

- AMBROŽOVÁ, J., 2004: *Mikrobiologie v technologii vod*. VŠCHT Praha, 244 s., ISBN 80-7080-534-X.
- BAUMGARTEN P. K., 1971: *Electrostatic spinning of acrylic microfibers*, J of Colloid and Interface Science 1971; 36: p. 71–79.
- BOLGEN, N., MENCELOGLU, Y. Z., ACATAY, K., VARGEL, I. P., 2005: *E. In vitro and in vivo degradation of nonwoven materials made of poly(e-caprolactone) nanofibers prepared by electrospinning under different conditions*. Journal of Biomaterials Science PE, J Biomater Sci Polym;16: p. 1537–55.
- DROZIN, V. G., 1955: *The electrical dispersion of liquids as aerosols*, Journal of Colloid Science, Volume 10, Issue 2, p. 158–164.
- EUGENE, D. et al., 2005: *Electrospinning polydioxanone for biomedical applications*. Acta Biomaterialia, Volume 1, Issue 1, p. 115–123.
- FENG, C. et al., 2008: *Production of drinking water from saline water by air-gap membrane distillation using polyvinylidene fluoride nanofiber membrane*. Journal of Membrane Science, Volume 311, Issues 1–2, p. 1–6.
- FONG, H., RENEKER, D. H., 2001: *Electrospinning and formation of nanofibers*. In: Salem DR, editor. Structure formation in polymeric fibers. Munich: Hanser; p. 225–46.
- Formhals A. US patent 1,975,504, 1934.
- Formhals A. US patent 2,160,962, 1939.
- Formhals A. US patent, 2,187,306, 1940.
- Formhals A. US patent, 2,323,025, 1943.
- Formhals A. US patent, 2,349,950, 1944.
- FRENOT, A., CHRONAKIS I. S., 2003: *Polymer nanofibers assembled by electrospinning*, Current Opinion in Colloid & Interface Science, Volume 8, Issue 1, p. 64–75.
- GARRITY, M. G. et al., 2005: *Bergey's Manual of Systematic bacteriology*, second edition, Volume two, The Proteobacteria. Michigan State University, ISBN-10: 0-387-24144-2.
- HIJNEN, W. A. M. et al., 2000: *Enumeration of faecal indicator bacteria in large water volumes using on site membrane filtration to assess water treatment efficiency*. Water Research, Volume 34, Issue 5, p. 1659–1665.
- CHUN I, RENEKER, D. H. et al., 1999: *Carbon nanofibers from polyacrylonitrile and mesophase pitch*, Journal of Advanced Materials 1999; 31 (1): p. 36–41.
- CHUN, I., RENEKER D. H. et al., 1998: *Carbon nanofibers from polyacrylonitrile and mesophase pitch*, International SAMPE Symposium and Exhibition, p. 718–29.
- JING-WEN, CH. et al., 2008: *Preparation of biocompatible membranes by electrospinning*, Desalination, Volume 233, Issues 1–3, p. 48–54.
- JAIŠKOVÁ, D. a kol., 2009: *Nanofilter evaluation usány visualization methods*. Nanocon 2009, s. 186–190. ISBN 978-80-87294-13-0.
- JIRSÁK, O. a kol., 2004: *Nanofibres and filtration*, Sborník NANO04, Brno VUT, s. 134–148, ISBN 80-214-2793-0.
- JIRSÁK, O. a kol., 2003: *Production and Properties of Nanofibres*, Sborník NANO03, s. 142–147, Brno VUT, ISBN 80-214-2527-X.
- LARRONDO, MANLEY R., ST J., 1981: *Electrostatic fiber spinning from polymer melts. I. and Experimental observations on fiber formation and properties*, Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition 1981; 19: p. 909–20.
- LARRONDO, MANLEY R., ST J., 1981: *Electrostatic fiber spinning from polymer melts. II. Examination of the flow field in an electrically driven jet*, Journal of Polymer Science: Polymer Physics Ed 1981; 19: p. 921–32.
- LARRONDO, MANLEY R., 1981: *Electrostatic fiber spinning from polymer melts. III. Electrostatic deformation of a pendant drop of polymer melt*. Journal of Polymer Science: Polymer Physics Ed 1981; 19: p. 933–40.

- LELLÁK, J., KUBÍČEK, F., 1991: *Hydrobiologie*. Karolinum Praha, 260 s., ISBN 80-7066-530-0.
- LI W-J, LAURENCIN C. T., CATERSON E. J., TUAN R. S., 2001: *Electrospun nanofibrous structure: a novel scaffold for tissue engineering*, Journal of Biomed. Mater. Res. 2001; 60: p. 613–21.
- MARENDIAK, D., KOPČANOVÁ, L., LEITGEB, S., 1987: *Polnohospodářská mikrobiologie*. Příroda Bratislava, 444 s.
- NEUBAUER, R. L., VONNEGUT, B., 1953: *Supplement to "production of monodisperse liquid particles by electrical atomization"*, Journal of Colloid Science, Volume 8, Issue 5, p. 551–552.
- PATENT (NANOSPIDER) PV 2003–2421.
- RENEKER, DH, CHUN, I., 1996: *Nanometre diameter fibres of polyme produced by electrospinning*. Nanotechnology 1996; 7: p 216–23.
- RENEKER, D. H., SHIN, C., CHASE G. G., 2005: *Recycled expanded polystyrene nanofibers applied in filter media*. Colloid Surf A: Physicochem Eng Aspects 2005; 262: p. 211–5.
- RENUGA, G. *et al.*, 2006: *Electrospun nanofibrous filtration membran*, Journal of Membrane Science, Volume 281, Issues 1–2, p. 581–586.
- SCOTT, A. S. *et al.*, 2009: *Electrospinning of collagen/biopolymers for regenerative medicine and cardiovascular tissue engineering*, Advanced Drug Delivery Reviews, Volume 61, Issue 12, p. 1007–1019.
- SIMONS H.L. 1966: US patent 3, 280, 229.
- VONNEGUT, B., NEUBAUER, R. L., 1952: *Production of monodisperse liquid particles by electrical atomization*, Journal of Colloid Science, Volume 7, Issue 6, p. 616–622.
- VONNEGUT, B., NEUBAUER, R. L., 1952: Journal of Colloid Science 1952; 7: 616.
- YÖRDEM, O. S., PAPILA, M., MENCELOĞLU, Y. Z., 2008: *Effects of electrospinning parameters on polyacrylonitrile nanofiber diameter: An investigation by response surface methodology*, Materials & Design, Volume 29, Issue 1, p. 34–44.
- ZHENG-MING HUANG *et al.*, 2003: *A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites*, Composites Science and Technology, Volume 63, Issue 15, p. 2223–2253.
- NANOFIBROUS MATERIÁL FOR TISSUE ENGINEERING, [on-line], Imperial college London, [cit. 2. 3. 2010], [<http://www.centropede.com/UKSB2006/ePoster/background.html>].
- VLÁKENNÉ NANOMATERIÁLY [on-line] TU Liberec, [cit. 2. 3. 2010], [<http://nano.tul.cz/assets/files/knt/thumb.html>].

Adresa

Ing. Jaroslav Lev, doc. Ing. Michal Černý, CSc., Ústav techniky a automobilové dopravy, Ing. Libor Kalhotka, Ph.D. Ústav agrochemie, půdoznalství, mikrobiologie a výživy rostlin, Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika, e-mail: jarlev@centrum.cz, michalc@mendelu.cz, libor.kalhotka@mendelu.cz