

- upravit' zboru pro testovan' predem
(metrad)
- vliv Nr na E a Δp u 2 zboru
u skladacel' zboru
- pristup do $\langle$ ^{slabost} _{seplev} $\rangle$ na efektivity
u elektrizac'ch filtru
- vliv $\langle$ křivce' kledu' $\rangle$ na slohy
(α, E) skuta
spedl, se. "doz p'itroce" (kinetle)
- vliv plošni' křivce' na Δp a E
u navor filtru
- urovn'ování čiste - kinetle
(program)

Kandidátská disertační práce

ZLEPŠOVÁNÍ FILTRAČNÍCH VLASTNOSTÍ VLÁKENNÝCH MATERIÁLŮ

Ing. Jakub Hrůza

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146115290

LNT

2005

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Univerzitní knihovna
Voroněžská 1322, Liberec 1
PSČ 461 57

U 603 T

POS. 62-1000
81. 10. 11. 2005

Anotace:

Tato práce se zabývá suchou filtrací a novými, nebo nepříliš prozkoumanými možnostmi zlepšení vlastností vlákenných filtrů. Autor stručně uvádí vybrané kapitoly z teorie filtrace, které jsou důležité pro pochopení jednotlivých metod zlepšování filtračních vlastností. Hlavní důraz je kladen na vztah mezi filtračními vlastnostmi, kterých chceme dosáhnout a filtračními charakteristikami, které můžeme měnit. Samostatná kapitola je věnována popisu testování filtračních vlastností. Studovanými způsoby zlepšování filtračních vlastností jsou: skládané filtry, elektrizované filtry, filtry s různou orientací vláken vzhledem ke směru toku proudění filtrovaného vzduchu a filtry obsahující nanovlákná. Dále se autor zabývá málo známým a nebezpečným projevem kinetiky filtrace, který způsobuje pokles efektivity zachytu částic ve filtru.

Title: Development of fibrous filters properties

Annotation:

This work deals with new possibilities how to improve properties of air fibrous filters. Author describes four methods, which are new or still are not described enough. The first method named "pleated filters" leads to bigger filter surface. In the second method named "charged filters" is possible to use the electrostatic field to capture particles in filter. The third method named "filters with specific fibre orientation" change the air flow inside the filter. The fourth method named "filters with nanofibers" leads to bigger efficiency of particle capturing due to bigger specific surface of fibers and different air flow inside the filter. Furthermore author describes one dangerous phenomenon of filters caused by instability during the filtration process.

Poděkování:

Především děkuji prof. Davidu Lukášovi za odborné vedení a cenné rady po celou dlouhou dobu tvorby této práce. Dále děkuji Filipu Sanetrníkovi za pomoc při experimentech a tvorbě laboratorního zařízení.

Věnování:

Tuto práci věnuji Tereze a Bětce.

OBSAH

1	Úvod:	3
2	Předmět a cíl práce	5
3	Vybrané kapitoly teorie filtrace	6
3.1	Filtrační mechanismy	6
3.1.1	Mechanismy hloubkové filtrace	7
3.2	Filtrační vlastnosti	8
3.2.1	Efektivita	8
3.2.2	Tlakový spád:	9
3.2.3	Životnost filtru	9
3.2.4	Odolnost vůči vnějším vlivům	9
3.2.5	Další vlastnosti související s filtrací	10
3.3	Charakteristiky filtrace	10
3.3.1	Charakteristiky filtračního materiálu	10
3.3.2	Charakteristiky filtrovaných částic:	12
3.3.3	Charakteristiky procesu filtrace:	14
3.4	Typy filtrů podle jejich konstrukce	15
3.4.1	Dělení podle mechanismu filtrace na filtry povrchové a hloubkové	15
3.4.2	Dělení podle testování filtračních vlastností	15
3.4.3	Dělení podle použité technologie	15
3.4.4	Dělení podle konstrukce	15
3.5	Testování filtrů	18
4	Podmínky experimentu	22
4.1.1	Test aerosolem NaCl	22
4.1.2	Test syntetickým prachem – přístroj DFT-2	24
5	Skládané filtry	27
5.1	Teoretický náhled na vztah mezi skládaným filtrem a filtračními charakteristikami	27
5.2	Hustota skladů	28
5.3	Experimentální ověření vlivu hustoty skladů na filtrační charakteristiky	30
6	Elektrizované filtry	34
6.1	Mechanismy elektrostatického zachytu částic	34
6.2	Životnost filtrů	35
6.3	Experimentální hodnocení vlivů působících na stabilitu náboje	37
6.3.1	Hodnocení vlivu vlhkosti, teploty a zachytávaných částic	37
6.3.2	Hodnocení vlivu vodivých nanovláken	41
7	Vliv orientace vláken na filtrační vlastnosti	42
7.1	Vliv orientace vláken na tok tekutiny filtrem	42
7.2	Vliv orientace vláken na kinetiku filtrace	44
7.3	Experiment	45
7.3.1	Popis experimentu	46
7.3.2	Výsledky testů	48
7.4	Shrnutí:	52
8	Využití nanovláken	53
8.1	Výhody nanovláken při procesu filtrace	53
8.1.1	Měrný povrch nanovláken	53
8.1.2	Skluz plynu po povrchu vlákna	54
8.2	Výroba nanovláken	56
8.2.1	Elektrospinning a jeho modifikace Nanospider	56
8.2.2	Vlastnosti použitých nanovláken	59

8.3	Filtrační vlastnosti nanovláken.....	59
8.3.1	Optimalizace vybraných technologických parametrů	60
8.3.2	Porovnání nanovláken s ostatními filtračními materiály	62
8.3.3	Aplikace nanovláken I.: Respirátorové filtry obsahující nanovlákná	64
8.3.4	Aplikace nanovláken II.: Skládané filtry obsahující nanovlákná	67
8.3.5	Shrnutí experimentů	68
9	Kinetika procesu filtrace.....	69
9.1	Uvolňování zachycených částic	69
9.2	Princip samoorganizovaného kritického chování systému.....	71
9.2.1	Model hromady písku.....	71
9.2.2	Počítačová simulace:	73
9.2.3	Výsledky počítačové simulace:	76
9.3	Samoorganizované kritické chování filtru.....	76
9.4	Shrnutí:	77
10	Citace	78
11	Příloha	81

nanovláken v kombinaci s aktivními uhlíky, baktericidními, vlnami a slunečním zářením. Vzhledem k tomu, že nanovlákná mají velmi vysokou povrchovou plochu, mohou být použita jako biologická senzory. Vzhledem k tomu, že nanovlákná mají velmi vysokou povrchovou plochu, mohou být použita jako biologická senzory. Vzhledem k tomu, že nanovlákná mají velmi vysokou povrchovou plochu, mohou být použita jako biologická senzory.

8.3.1 Optimalizace vybraných technologických parametrů

8.3.2 Porovnání nanovláken s ostatními filtračními materiály

8.3.3 Aplikace nanovláken I.: Respirátorové filtry obsahující nanovlákná

8.3.4 Aplikace nanovláken II.: Skládané filtry obsahující nanovlákná

8.3.5 Shrnutí experimentů

9 Kinetika procesu filtrace.....

9.1 Uvolňování zachycených částic

9.2 Princip samoorganizovaného kritického chování systému.....

9.2.1 Model hromady písku.....

9.2.2 Počítačová simulace:

9.2.3 Výsledky počítačové simulace:

9.3 Samoorganizované kritické chování filtru.....

9.4 Shrnutí:

10 Citace

11 Příloha

1 Úvod:

Zajímáme-li se o trendy v oblasti textilního průmyslu, nelze si nevšimnout stoupajícího významu technických textilií a v jejich rámci růstu významu filtrace vzduchu. Tento trend lze očekávat i v budoucnosti. Stále náročnější aplikace vyžadují širokou škálu specifických filtrů. Obecně můžeme rozdělit aplikace vzdušné filtrace na tyto oblasti: průmyslová výroba, ochrana životního prostředí a ochrana života a zdraví lidí.

V průmyslové oblasti je filtrace vzduchu zaměřena především na tvorbu čistých prostor pro některé technologie a procesy (například výroba elektroniky).

Stále roste význam ochrany životního prostředí a tím i nutnost stále účinnějšího odstranění zplodin produkovaných lidskou činností, zejména průmyslem a dopravou. Potřeba nových druhů filtrů je daná růstem těchto aktivit, vývojem technologií, ale také potřebou lepší filtrace u technologií stávajících. Důkazem jsou celosvětové snahy o zavedení a zpřísnování emisních limitů obecně.

Důležitý je vývoj v oblasti medicíny a hygieny, kde jako příklad lze uvést potřebu čistých prostor v nemocnicích, chemických a biologických laboratořích při vývoji, tvorbě i aplikaci různých léčebných preparátů. Dalším příkladem je nutnost ochrany lidstva proti nebezpečným chemikáliím, radioaktivním látkám, bakteriím, virům a alergenům, ať jsou vzniklé přirozenou cestou, nehodou, nebo použity jako biologická zbraň. V důsledku stále se zvyšujícího počtu lidí s různými alergickými reakcemi je třeba stále kvalitněji filtrovat vzduch v obytných místnostech a uvnitř automobilů. Jedním příkladem mohou být pylová zrnka: průměrná velikost pylu je zhruba $50\text{ }\mu\text{m}$ a pro alergickou reakci stačí koncentrace 10-15 zrn v 1 m^3 vzduchu, přičemž v letních měsících dosahuje koncentrace pylu 100–500 zrn/ m^3 [Brown HM, 1973]. Zdá-li se nám velikost pylových zrn dostatečně velká pro záchyt jednoduchým filtrem, pak se nabízí příklad jiný: V prostředí s hustou automobilovou dopravou roste i význam emisí zplodin. Emise plynů, zejména oxidy dusíku, se daří částečně omezovat použitím katalyzátorů, ale stále zbývá velké množství tuhých nespálených zplodin, které mohou mít karcinogenní účinky a jejichž velikost se pohybuje v rozmezí $0,3 - 1\text{ }\mu\text{m}$ [Fiala, 2003]. Tento rozsah velikostí zachytávaných částic je obecně pokládán za nejhorší z hlediska efektivity procesu filtrace.

Důsledkem těchto skutečností je neustálý růst trhu s filtračními výrobky a snaha hlavních výrobců filtrů hledat nové možnosti vývoje filtrů. V podstatě lze říci, že každý rok je na trh uveden nějaký nový typ filtru [Bitz, 2004].

Tato práce se zaměřila na čtyři způsoby zlepšení filtračních vlastností vláknenných materiálů pro suchou filtraci a jedno nebezpečí číhající na některé typy filtrů při jejich použití. V kapitole 3. nazvané „Vybrané kapitoly teorie filtrace“ jsou krátce shrnuty a vysvětleny pojmy nutné pro pochopení jednotlivých způsobů zlepšení filtračních vlastností. Pojmy jsou rozděleny do podkapitol: filtrační vlastnosti, filtrační charakteristiky, filtrační mechanismy, druhy filtrů a způsoby testování filtrů. Výběr jednotlivých položek podkapitol odpovídá dosavadním autorovým zkušenostem v oboru suché filtrace a je proveden s ohledem na praktické použití filtrů. Vzhledem k tomu, že většina experimentů byla provedena na dvou základních testovacích zařízeních při stejných, nebo podobných podmínkách měření, je kapitola 4. nazvaná „Podmínky experimentů“ určena jejich popisu. Tím je zjednodušen popis jednotlivých experimentů uváděných v následujících kapitolách. Kapitola 4. zároveň slouží k seznámení s přístrojem DFT-2 navrženým autorem práce a zkonstruovaným ve spolupráci s Katedrou netkaných textilií. Kapitola 5. nazvaná „Skládané filtry“ se věnuje metodě zvyšování plochy filtru, jež je dlouho prakticky používaná, nicméně teoreticky málo prozkoumaná. Tato metoda se jeví velmi zajímavou zejména v kombinaci s dalšími zmiňovanými způsoby zlepšení filtračních vlastností (elektrizované filtry, využití nanovláken). Kapitola 6. nazvaná „Elektrizované filtry“ navazuje na disertační práci Marcely Kolínové [Kolínová, 2004] a zabývá se zejména

reálnými vlivy působícími na elektrizovaný filtr v průběhu procesu filtrace. Elektrizované filtry mohou vykazovat jedinečné vlastnosti nedosažitelné jinými technikami, nicméně jejich chování v reálných podmínkách lze těžko předpovídat. Tento fakt dosud brání jejich širšímu využití. Kapitola 7. zvaná „Změna prostorové orientace vláken filtru“ řeší vliv orientace vláken vzhledem ke směru proudění disperze na filtrační vlastnosti. Pomocí modelových i komerčně vyráběných filtrů je zkoumán teoretický předpoklad změny tlakového spádu při změně orientace vláken uváděný Brownem [Brown RC, 1993]. Dále jsou porovnávány filtrační vlastnosti komerčně vyráběných objemných filtrů lišících se způsobem kladení vláken. V kapitole 8. nazvané „Využití nanovláken“ se autor zaměřil na zcela nový typ filtračního materiálu vyznačujícího se velmi malými průměry vláken. Sledovány jsou optimální parametry výroby nanovláken určených pro filtraci a vyrobené vrstvy dále porovnávány s ostatními filtračními materiály. V kapitole lze nalézt i náhled na dvě možné konkrétní aplikace nanovlákených vrstev v oblasti filtrace. Kapitola 9. zvaná „Kinetika procesu filtrace“ se zabývá nebezpečím zhoršení filtračních vlastností v průběhu procesu filtrace, kdy dochází uvnitř filtru k sekundárním procesům. Většina sekundárních procesů je popsána např. Pichem [Pich, 1964], nicméně autor se setkal s novým jevem nebezpečným pro některé druhy filtrů. Tento jev zvaný „uvolňování zachycených částic“ je zkoumán experimentálně i pomocí simulace založené na principu samoorganizovaného kritického chování systému.

2 Předmět a cíl práce

Tato práce je zaměřena na nové možnosti zlepšení vlastností vlákenných filtrů určených pro suchou filtraci. Autor se snaží komplexně rozebrat a hodnotit jednotlivé způsoby zlepšení vzájemné bilance efektivity a tlakového spádu filtru. Vybranými metodami se zabývá hlouběji. Některé metody již byly řešeny a autor je zkoumal především z hlediska porovnání výhod a nevýhod a určení jejich vzájemného vztahu. Příkladem je zkoumání elektrizovaných filtrů navazujících na disertační práci Marcely Kolínové.

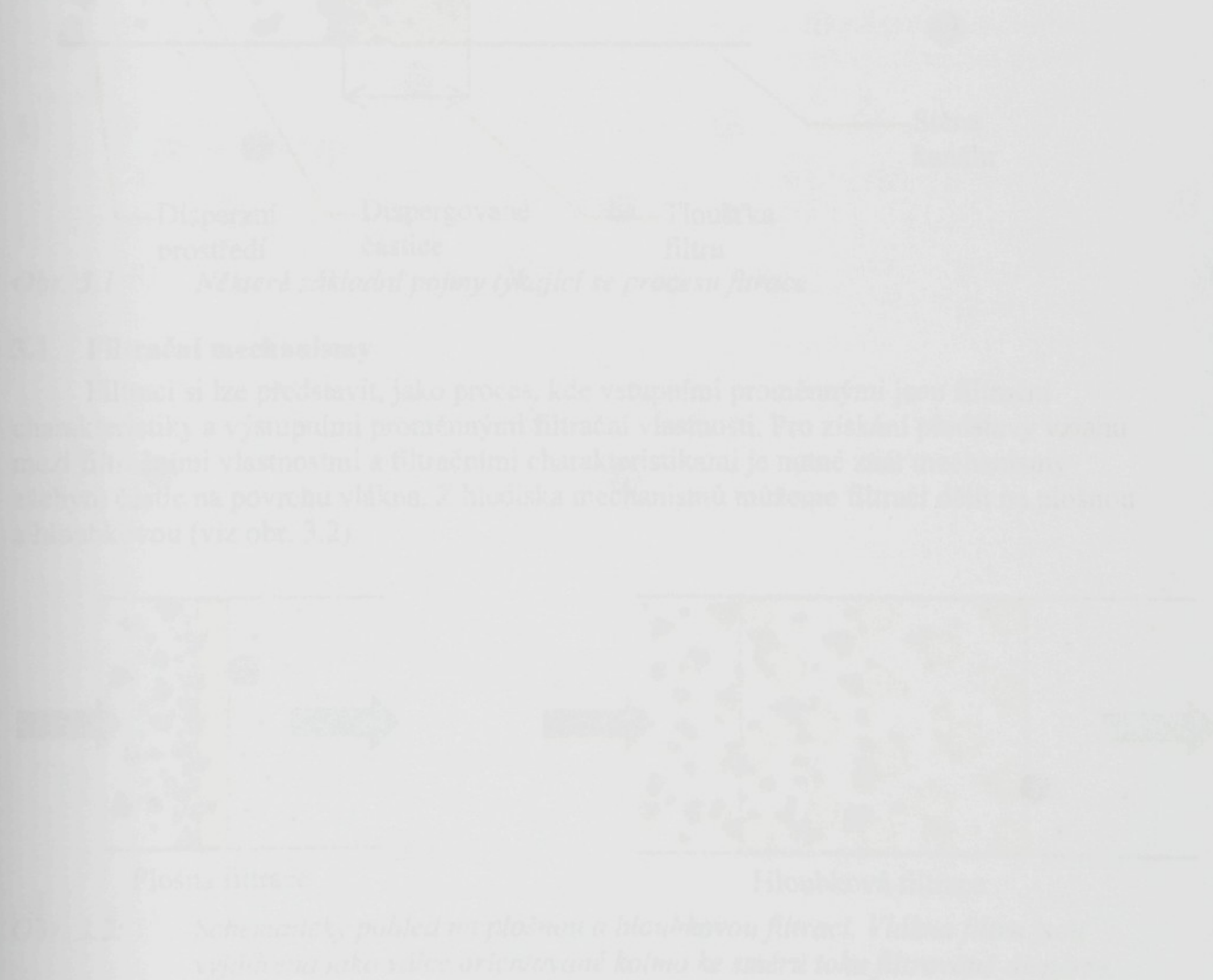
Konkrétní metody zlepšení filtračních charakteristik, kterými se práce zabývá podrobněji jsou:

- Skládané filtry.
- Elektrizované filtry.
- Změna prostorové orientace vláken filtru.
- Využití nanovláken.

Dále je popsáno možné nebezpečí výrazného zhoršení vlastností filtru v důsledku kinetiky procesu filtrace.

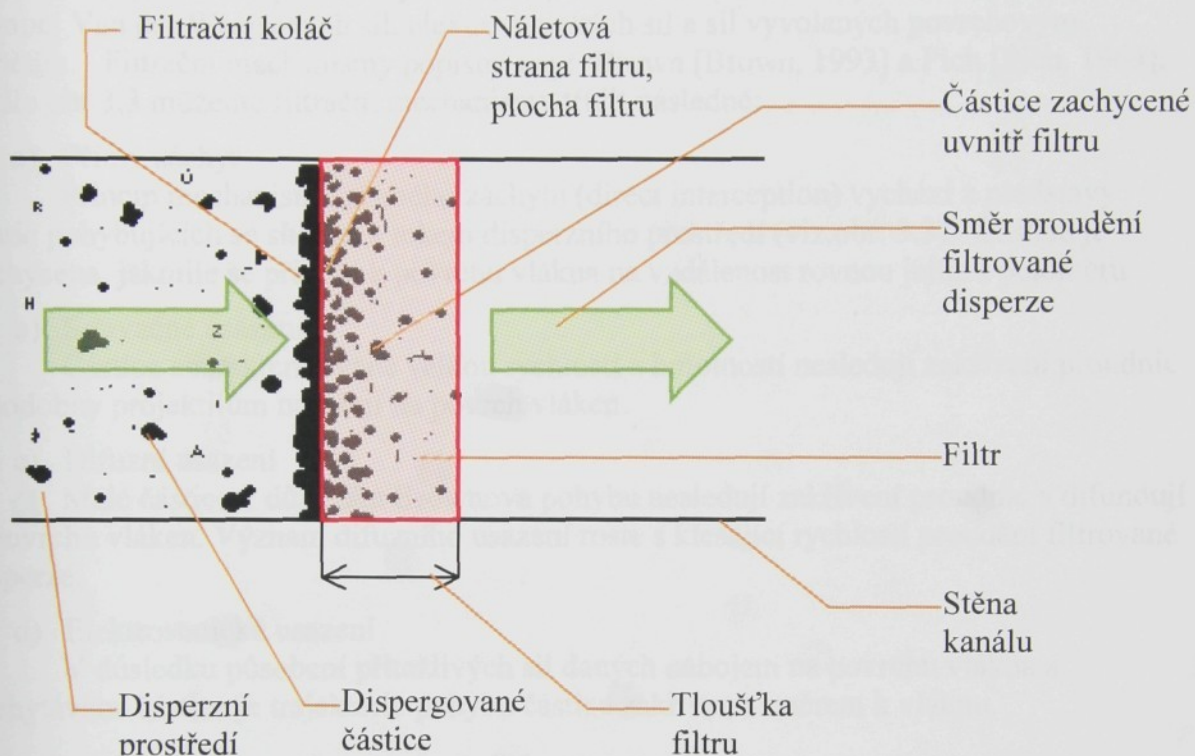
Cílem práce není nalezení „nejlepší metody“ zlepšení filtračních charakteristik, ale analýza jednotlivých metod vzhledem ke konkrétní aplikaci filtru. Pro umožnění testování průběhu procesu filtrace byl autorem navržen a na Katedře netkaných textilií zkonstruován přístroj DFT–2 pro měření filtračních vlastností syntetickým prachem.

Další pokračování této práce autor spatřuje zejména ve výzkumu využití nanovláken v oblasti filtrace a hledání dalších možností zlepšování filtračních vlastností.



3 Vybrané kapitoly teorie filtrace

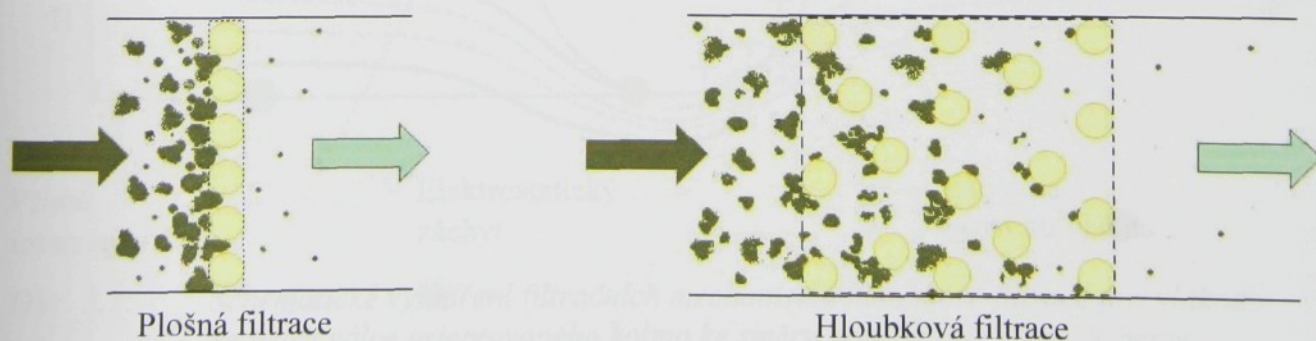
Vzhledem k tomu, že teorie filtračního procesu byla již popisována například Brownem [Brown RC, 1993] a Pichem [Pich, 1964], obsahuje tato práce pouze vybrané kapitoly týkající se dané problematiky. Proto jsou nejprve uvedeny základní filtrační mechanismy, filtrační vlastnosti a důležité filtrační charakteristiky, které je mohou ovlivnit. Následující kapitoly se týkají konkrétních možností zlepšení filtračních vlastností z hlediska filtračních teorií. Nakonec jsou popsány normované metody hodnocení filtračních vlastností. Základní představu procesu filtrace a pojmů, jež se jí týkají, ukazuje obr. 3.1.



Obr. 3.1: Některé základní pojmy týkající se procesu filtrace

3.1 Filtrační mechanismy

Filtraci si lze představit, jako proces, kde vstupními proměnnými jsou filtrační charakteristiky a výstupními proměnnými filtrační vlastnosti. Pro získání představy vztahu mezi filtračními vlastnostmi a filtračními charakteristikami je nutné znát mechanismy zachytu částic na povrchu vlákna. Z hlediska mechanismů můžeme filtraci dělit na plošnou a hloubkovou (viz obr. 3.2).



Obr. 3.2: Schematický pohled na plošnou a hloubkovou filtraci. Vlákná filtru jsou vyjádřena jako válce orientované kolmo ke směru toku filtrované disperze.

V případě filtrace plošné je mechanismus velmi jednoduchý. Filtrem je mechanicky zachycena každá částice větší, než prostor mezi vlákny. Efektivita záchytu je tudíž jednoznačně dána distribucí velikostí porů textilie. Hlubkovou filtraci charakterizuje skutečnost, že velikost zachytávaných částic je řádově menší, než velikost prostorů mezi vlákny. Zde se uplatňuje více filtračních mechanismů najednou.

3.1.1 Mechanismy hlubkové filtrace

Uvedené mechanismy vyjadřují modelovou představu přiblížení částice k povrchu vlákna. Pro tyto úvahy platí předpoklad, že po kontaktu s vláknem je částice zachycena pomocí Van der Waalsových sil, elektrostatických sil a sil vyvolaných povrchovým napětím. Filtrační mechanismy popisují např. Brown [Brown, 1993] a Pich [Pich, 1964]. Podle obr.3.3 můžeme filtrační mechanismy třídit následně:

a) Přímý záchyt

Princip mechanismu přímého záchytu (direct interception) vychází z představy částic pohybujících se shodně s tokem disperzního prostředí (viz.obr. 3.3). Částice je zachycena, jakmile se přiblíží k povrchu vlákna na vzdálenost rovnou jejímu poloměru.

b) Setrvačné usazení

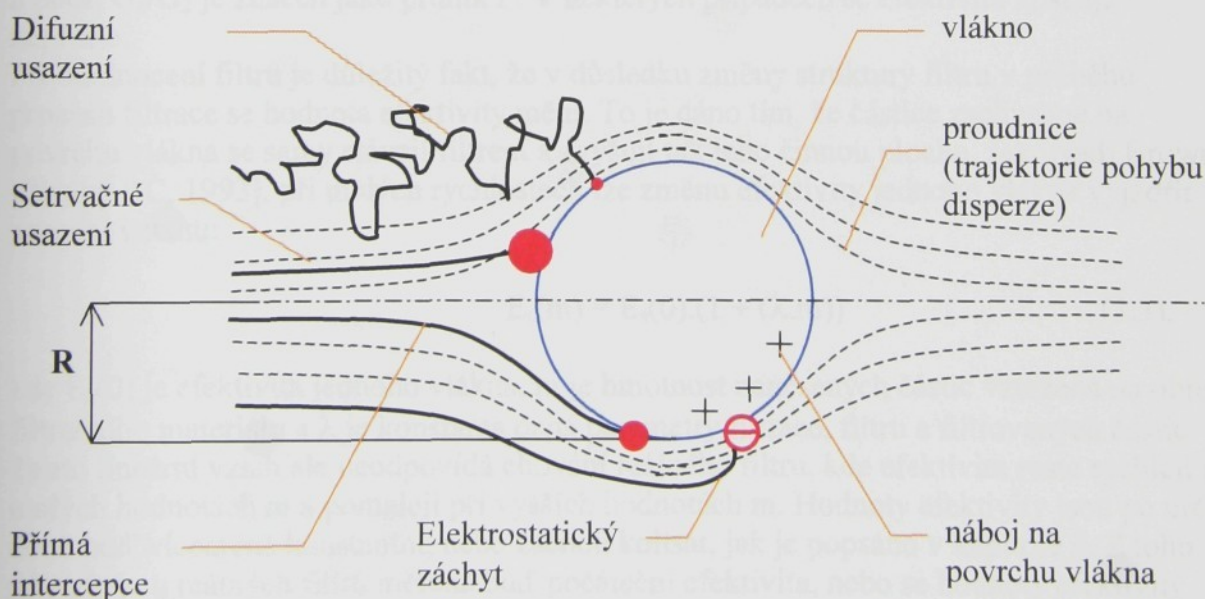
Částice charakterizované velkou rychlostí a hmotností nesledují zakřivení proudnic a podobny projektilům narážejí na povrch vláken.

c) Difuzní usazení

Malé částice v důsledku Brownova pohybu nesledují zakřivení proudnic a difundují k povrchu vláken. Význam difuzního usazení roste s klesající rychlostí proudění filtrované disperze.

d) Elektrostatické usazení

V důsledku působení přitažlivých sil daných nábojem na povrchu vlákna a zachytávané částice je trajektorie pohybu částice zakřivena směrem k vláknu.



Obr. 3.3: Schematické vyjádření filtračních mechanismů hlubkové filtrace pro vlákno ve tvaru válce orientovaného kolmo ke směru pohybu filtrované disperze.

Brown i Pich zmiňují také mechanismus gravitačního usazení, jež však přímo nesouvisí se zachytem částic v porézním prostředí. Každý filtrační mechanismus lze charakterizovat pomocí bezrozměrného parametru, který závisí na jednotlivých filtračních charakteristikách. Celková efektivita zachytu filtru je dána dílčími efektivitami zachytu, které jsou funkcí parametru filtračního mechanismu. Tento vztah lze vyjádřit pomocí rovnice:

$$E_c = E_c \{E_r(N_r), E_i(Stk), E_d(Pe), E_e(Nq)\} \quad (3.1),$$

kde E_c je celková efektivita filtru, E_r je efektivita daná přímým zachytem, N_r je parametr přímého zachytu, E_i je efektivita daná setrvačným usazením, Stk je parametr setrvačného usazení, E_d je efektivita daná difuzním usazením, Pe je parametr difuzního usazení, E_e je efektivita daná elektrostatickým zachytem a Nq je parametr elektrostatického zachytu.

3.2 Filtrační vlastnosti

Vlastností textilních filtrů je více a uvádějí se podle potřeby použití. Autor se zaměřil na popis těch vlastností, které jsou známy mezi výrobcí a uživateli komerčních filtrů. Vlastnosti se v průběhu procesu filtrace mění v důsledku zaplňování mezivláknenných prostor částicemi. Tento jev se nazývá kinetika filtrace a působí jako důležitý faktor procesu filtrace (viz kap.9). Hlavní filtrační vlastnosti jsou:

3.2.1 Efektivita

Efektivita, neboli odlučivost je daná vztahem.

$$E = \left(1 - \frac{G_1}{G_2}\right) \cdot 100 \quad (\%) \quad (3.2),$$

kde G_1 je množství disperzního podílu za filtrem, G_2 celkové množství disperzního podílu a podíl G_1/G_2 je značen jako průnik P . V některých případech se efektivita zjišťuje nepřímě.

Pro hodnocení filtru je důležitý fakt, že v důsledku změny struktury filtru v průběhu procesu filtrace se hodnota efektivity mění. To je dáno tím, že částice zachycené na povrchu vlákna se samy stávají filtrem a zvyšují tak jeho činnou plochu. Jak uvádí Brown [Brown RC, 1993], při malých rychlostech lze změnu efektivity jednoho vlákna vyjádřit pomocí vztahu:

$$E_s(m) = E_s(0) \cdot (1 + (\lambda \cdot m)) \quad (3.3),$$

kde $E_s(0)$ je efektivita jednoho vlákna, m je hmotnost nanesených částic vztažená na objem filtračního materiálu a λ je konstanta daná parametry filtrace, filtru a filtrovaných částic. Tento lineární vztah ale neodpovídá chování reálného filtru, kde efektivita roste rychleji při malých hodnotách m a pomaleji při vyšších hodnotách m . Hodnoty efektivity jsou po určité době buď víceméně konstantní, nebo začnou kolísat, jak je popsáno v kapitole 9. Z toho důvodu je u reálných filtrů měřena buď počáteční efektivita, nebo se hodnoty efektivity měří opakovaně až do okamžiku, kdy filtr dosáhne zadaného tlakového spádu. Z takto získaných hodnot se střední hodnota vypočítá podle normy EN 779 [EN 779, 1993] váženým průměrem podle vztahu:

$$E_c = \frac{1}{w} \cdot \left(\frac{w_2 \cdot (E_1 + E_2)}{2} + \frac{w_3 \cdot (E_2 + E_3)}{2} + \dots + \frac{w_n \cdot (E_{n-1} + E_n)}{2} \right) \quad (3.4),$$

logika!
indexat

kde E_c je střední hodnota efektivity, w_n je n -tá hodnota množství podaného prachu, E_n je n -tá hodnota efektivity a w je celkové množství podaného prachu dané součtem w_2 až w_n . Index n značí pořadí opakování měření jednoho filtru.

3.2.2 Tlakový spád:

Tlakový spád, jež bývá někdy označován jako tlaková ztráta, určuje rovnice:

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad (3.5),$$

kde p_1 a p_2 jsou tlaky filtrovaného média před a za filtrem. Vyjadřuje odpor vůči toku vzduchu skrz filtr. Pro seriózní hodnocení tlakového spádu je nutné uvést i rychlost toku vzduchu těsně před filtrem, neboť s jejím růstem roste i tlakový spád (většinou lineárně). Také hodnota tlakového spádu se v průběhu procesu filtrace mění v důsledku zaplňování mezivláknových prostor zachycenými částicemi. Brown [Brown RC, 1993] uvádí výsledky počítačové simulace i testy reálných filtrů, ze kterých vyplývá zhruba exponenciální závislost tlakového spádu na relativním množství nanesených částic. Uvedený vztah plně koresponduje s výsledky všech měření autora této práce. Při hodnocení reálného filtru se proto uvádí pouze počáteční tlakový spád, kdy filtr ještě neobsahuje zachycené částice.

3.2.3 Životnost filtru

Životnost filtru je daná dobou, kdy je třeba filtr vyměnit. Z hlediska životnosti známe filtry jednorázové a filtry s čištěním. Pro jednorázové filtry je životnost ovlivněna koncentrací částic ve vzduchu a množstvím částic, které je schopen pojmout do chvíle, kdy je tlaková ztráta příliš vysoká. Norma EN 779 [EN 779, 1993] definuje životnost pomocí jímavosti:

$$J = E_s \cdot m \quad (3.6),$$

kde J je jímavost filtru, E_s je střední hodnota efektivity a m je množství prachu naneseného na filtr do okamžiku překročení mezního tlakového spádu. Pro některé filtry však může být reálná životnost výrazně nižší v důsledku kinetiky filtrace, viz kap.9. Pro filtry s čištěním je životnost dána délkou intervalu mezi čištěním a počtem čištění do okamžiku, kdy pevnost filtru neodpovídá požadavkům procesu filtrace.

3.2.4 Odolnost vůči vnějším vlivům

Obecně známe tyto vlivy působící na filtr:

- a) chemické vlivy,
- b) mechanické vlivy,
- c) vliv teploty,
- d) kombinace výše uvedených vlivů.

Pro některé aplikace je odolnost vůči vnějším vlivům stejně důležitá, jako hodnoty efektivity a tlakového spádu. Klasickým příkladem jsou hadicové filtry v teplárnách a ve vápenkách. V rámci této práce byla sledována především stabilita náboje elektrizovaných filtrů a odolnost PVA vláken použitých v respirátorech vůči vlhkosti.

3.2.5 Další vlastnosti související s filtrací

Další vlastnosti souvisí s kvalitou filtrů a jsou často udávány při specifikaci vláknenných filtrů. Jsou to:

a) Prodyšnost

Prodyšnost vyjadřuje množství tekutiny, které projde skrz 1 m^2 filtru za 1 minutu při definovaném tlakovém spádu (obvykle 196 Pa). Udávané jednotky jsou: $\text{l/m}^2/\text{min}$.

b) Pórovitost

Pórovitostí lze vyjádřit velikost póru určenou obvykle střední, či maximální hodnotou, nebo distribucí velikostí. Nevýhodou hodnocení je problematická definice póru. Pro uspořádané vláknenné systémy s velkým zaplněním lze póry aproximovat válcovými kanály a celý vláknenný systém popsat pomocí Poiseuilleova zákona [Neckář, 2005].

c) Odolnost vůči bakteriím

Bakterie byvší zachyceny filtrem jsou stále aktivní a mohou časem prorůstat jeho strukturou a následně být uvolněny do čištěného prostoru. Při filtraci bakterií musíme tedy řešit nejen jejich záchyt, ale i schopnost filtru zabít je, nebo alespoň zastavit jejich růst [Morávek, 2005].

3.3 Charakteristiky filtrace

Jedním z velmi důležitých pohledů na proces filtrace je vztah mezi filtračními charakteristikami a filtračními vlastnostmi. Filtrační charakteristiky jsou vstupní proměnné, které určují průběh procesu filtrace a tím i výsledné filtrační vlastnosti [Pich, 1964]. Tato práce se zaměřila především na studium vlivu plochy filtru (skládané filtry), elektrických vlastností vláken (elektrizované filtry), orientace vláken v prostoru a průměr vláken v kombinaci s ostatními charakteristikami. Uvedené oblasti budou detailněji popsány v kapitolách 5 až 8. V této kapitole se autor snažil o co nejúplnější stručný výčet filtračních charakteristik. Obecně lze filtrační charakteristiky dělit do tří skupin na charakteristiky filtračního materiálu, charakteristiky filtrovaných částic a charakteristiky procesu filtrace.

3.3.1 Charakteristiky filtračního materiálu

Charakteristiky filtračního materiálu lze podle jeho mikroskopických i makroskopických parametrů třídit do následujících bodů:

a) Plocha filtru

Velikost filtrační plochy má výrazný vliv na tlakový spád. Detailní popis této charakteristiky najdeme v kapitole 5.

b) Tloušťka filtru

Tento přístup je možný aplikovat zvyšováním počtu vrstev, tedy zvyšováním plošné hmotnosti. Vliv tloušťky filtru na proces filtrace (při konstantní objemové hmotnosti) je popsán v jednoduchém odvození efektivity hloubkového filtru. Z této úvahy vyplývá, že tloušťka filtru zvyšuje efektivitu záchytu částic, nicméně s přibývajícím tloušťkou se její vliv na zlepšení filtrace zmenšuje [Lukáš, 2005].

c) Plošná a objemová hmotnost filtru

Jde o velmi jednoduchý způsob zvýšení filtrační účinnosti, který je však zároveň provázen růstem tlakového spádu. Vliv zvýšení zaplnění filtru na jeho tlakový spád je popsán mnoha autory [Brown RC, 1993]. Důležitá je hodnota zaplnění také pro jednotlivé teorie filtrace (často se užívá předpoklad velmi malého zaplnění).

d) Stejnoměrnost materiálu

Hmotová stejnoměrnost má na proces filtrace výrazný vliv. Tvar proudění filtrovaného média je určován minimalizací odporové síly vzniklé protékáním viskózního média porézním prostředím. Z toho důvodu místem s lokálně nižším zaplněním projde v čase větší množství částic, než místem se zaplněním lokálně vyšším. Velké množství problémů s komerčně vyráběnými filtry plyne právě ze zhoršení jejich hmotové stejnoměrnosti.

e) Materiál a jeho parametry

Mezi důležité parametry materiálu můžeme zařadit povrchovou interakci s částicemi, elektrické vlastnosti, odolnost vůči negativním vlivům, mechanické charakteristiky apod... Částice jsou na povrchu vlákna drženy pomocí Van der Waalsových sil, elektrostatických sil, případně povrchového napětí [Pich, 1987]. Interakce mezi vlákněným materiálem a filtrovanou částicí určuje míru pevnosti zachycení a udržení částice, která se dostala do těsné blízkosti povrchu vlákna. V případě elektrostatických sil je u vlákněného materiálu důležitá schopnost polarizace a stability udržení náboje. Elektrické vlastnosti filtračního materiálu jsou důležité ze dvou důvodů. Jedním důvodem je využití elektrostatického pole pro záchyt filtrovaných částic. Detailnější popis elektrizovaných filtrů lze nalézt v kapitole 6. Druhým důvodem je naopak použití filtrů antistatických používaných v prostorách s nebezpečím požáru, nebo výbuchu. Filtr neupravený antistaticky se totiž může elektrizovat i působením průtoku vzduchu obsahujícího filtrované částice.

Vnější vlivy, které mohou negativně ovlivnit vlákněný materiál filtru lze rozdělit na chemické (působení kyselin, zásad, oxidačních činidel, vlhkosti apod...) a fyzikální (především působení tepelné energie a záření). Tyto vlivy mohou vlákněný materiál zcela zničit, nebo snížit jeho mechanické vlastnosti tak, že dojde k protržení filtru vlivem toku filtrovaného média. Nebezpečná je zejména kombinace faktorů, například současné působení tepla, kyselého prostředí a kolísání vlhkosti, které může nastat v teplárnách.

Mechanické charakteristiky materiálu mají zásadní vliv na mechanické vlastnosti vláken (viz bod f)).

f) Parametry vláken

Do parametrů vláken zahrnujeme především jejich průměr, tvar průřezu, preparace, mechanické charakteristiky apod...

Oba parametry: průměr vláken i tvar průřezu určují velikost specifického povrchu vlákna, který se vyjadřuje v m^2/g . Při větším specifickém povrchu vlákna je větší pravděpodobnost interakce mezi vlákněným povrchem a zachytávanou částicí. Kromě toho větší specifický povrch vláken ve filtru má za následek více turbulencí vzduchu obtékajícího vlákna, což také přispívá k větší efektivitě filtru. Tento přístup je oproti změně objemové hmotnosti výhodný především nižším nárůstem tlakového spádu filtru. Vliv průměrů vláken se projevuje při všech filtračních mechanismech [Pich, 1964] a podrobněji je sledován v kapitole 8.

Preparace má vliv na interakci mezi zachytávanou částicí a povrchem vlákna, tedy na schopnost zachytit a udržet částici dopadnuvší na povrch vlákna. Pro antibakteriální filtry je obvykle také používána preparace hubicí bakterie, nebo alespoň zastavující jejich růst.

Mechanické charakteristiky jsou důležité zejména u filtrů silně namáhaných, například hadicové filtry s pulzním čištěním. Modul pružnosti vlákna spolu s jeho obloučkovitostí má také vliv na schopnost udržet zachycenou částici, neboť se podílí na

zachování geometrické stability struktury filtru v průběhu namáhání vlivem proudění viskozního média.

g) Struktura filtru

Z hlediska struktury je důležitá zejména orientace vláken v prostoru, gradient hustoty, geometrická stabilita apod... Většina teoretických modelů vychází z představy válcového vlákna umístěného kolmo ke směru proudění filtrované disperze (viz obr. 3.3). Nicméně již dříve byla odvozena předpověď tlakového spádu filtru majícího vlákna orientována rovnoběžně se směrem proudění [Brown RC, 1993]. Tlakový spád takového filtru by měl být poloviční. Ověřování tohoto teoretického modelu a další výzkum vlivu orientace vláken na filtrační vlastnosti je součástí této práce (viz kapitola 7).

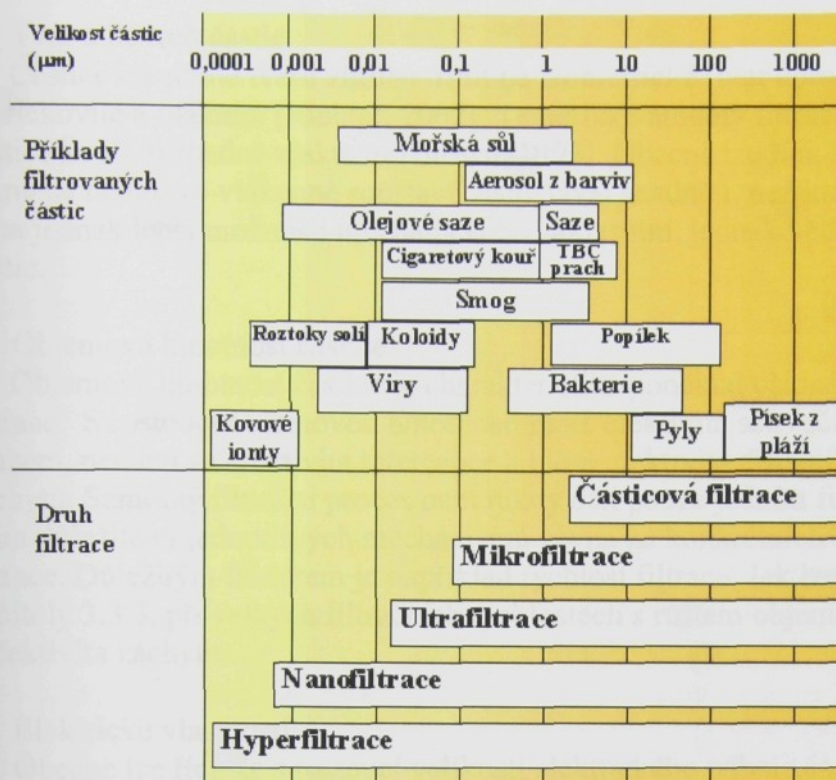
Gradient hustoty vlákenného materiálu je pro proces filtrace velmi důležitý, neboť umožňuje výrazně zvýšit životnost filtrační soustavy. Gradientem hustoty filtru je míněna lokální změna jeho zaplnění, přičemž zaplnění je definováno jako podíl objemu vláken v prostoru tvořeném vlákny a vzduchem. Pokud je pro filtraci většího množství částic použit jeden filtr s konstantním zaplněním, pak (má-li dostatečnou filtrační účinnost) dojde na jeho povrchu k tvorbě tzv. „filtračního koláče“, což je neprodyšná vrstva zachycených částic (viz obr.3.1). V případě filtru s protiproudým čištěním je to tak správné a žádoucí, neboť pomocí zpětného tlaku lze vzniklý filtrační koláč odstranit (viz kapitola 7.2). Jednorázový filtr však musíme vyměnit, aniž by došlo k plnému využití jeho objemu. Jedním řešením je použití soustavy filtrů, kde na vstupu filtrovaného média umístíme filtr s nejnižší účinností a na výstupu filtr nejučinnější. Jinou možností je výroba filtru s gradientem hustoty, u kterého se hustota vláken zvyšuje od strany náletové ku straně výstupní. Tento způsob je nicméně uplatňován zřídka, neboť výrobci vlákenných materiálů mají snahu vyrábět textilie s homogenní strukturou.

Orientace vláken a způsob jejich propojení má také vliv na geometrickou stabilitu filtru a tím na schopnosti filtrovat a udržet již zachycené částice. Vlivem proudění viskozního média je na vlákna vyvíjen tlak, který může způsobit jejich posuv a tím i změnu rychlostního pole uvnitř filtru a také uvolnění již zachycených částic.

3.3.2 Charakteristiky filtrovaných částic:

a) Velikost částic disperzního podílu

Velikost zachytávaných částic je hlavním faktorem určujícím typ použitého filtru a parametry procesu filtrace. Jak uvádí Brown [Brown, 1994], je z pohledu efektivity filtrace nejkritičtější velikost filtrovaných částic od 0,1 do 1 μm . Pro částice větší, než 1 μm platí, že s růstem velikosti částic roste i efektivita zachytu. Pro částice menší, než 0,1 μm se efektivita zachytu zvyšuje se zmenšováním zachytávaných částic. S přibývajícím rychlostí filtrace se minimum efektivity posunuje směrem k nižším hodnotám velikosti částic. Obr. 3.4 ukazuje příklady velikostí běžných filtrovaných částic a typy filtrace [Richter, 2002], [Morávek, 2005]. U filtrů plošných (využívajících síťového mechanismu) lze nastavením porózity materiálů přesně určit zachyt částic s definovanou velikostí.



Obr. 3.4: Příklady filtrovaných částic, jejich velikosti a typy filtrace. Údaje jsou čerpány z Richtera [Richter, 2002] a prospektů firmy Freudenberg.

b) Distribuce velikosti částic disperzního podílu

Obecně lze říci, že většina teoretických modelů pro popis procesu filtrace a konstrukce filtrů počítá buď s filtrací monodisperzních částic, nebo částic s úzkou distribuční křivkou velikostí. Nezabýváme-li se však filtrací částic určitého druhu, musíme počítat s velmi širokou distribuční křivkou velikosti částic. Jak vyplývá z obr. 3.4, pohybují se velikosti částic ve vzduchu od 0,001 do 100 μm. Z toho důvodu je při tvorbě čistých prostor výhodné používat více různých filtrů. Při průchodu vlákněným filtrem dochází k separaci částic podle velikosti. V závislosti na filtrační rychlosti se nejprve oddělují částice velké, respektive malé (viz. bod a)), čímž se distribuční křivka zužuje. Použijeme-li proto soustavu filtrů, můžeme na konci této soustavy použít filtr přesně navržený pro filtraci částic s nejmenší efektivitou zachytu. Takový filtr je obvykle drahý a za pomoci soustavy levnějších předfiltrů se mnohonásobně zvýší jeho životnost.

Často se v rámci průmyslového provozu filtruje jeden typ částic s úzkou distribuční křivkou velikostí (například prach ve vápenkách). V takovém případě je mnohem snadnější navrhnout vhodný typ filtru.

c) Koncentrace částic

Koncentrace částic ve vzduchu má zásadní vliv na sekundární jevy procesu filtrace, kdy částice zaplňující mezivlákněné prostory mění výrazně filtrační vlastnosti. Je jasné, že s přibývajícím koncentrací částic ve vzduchu se zvyšuje i míra růstu tlakového spádu a efektivity. Jinými slovy koncentrace částic určuje životnost filtru. Kromě toho při velké koncentraci částic dochází k jejich samovolné koagulaci a tím k dalšímu navýšení efektivity filtrace. V případě průmyslové filtrace částic s velkou koncentrací je velmi výhodné použití filtrů čištěných zpětným protlakem (viz kapitola 3.4).

d) Tvar a povrch částic

Částice lze podle tvaru zhruba třídit na izometrické (tvar aproximovatelný koulí), destičkovité a vláknité [Richter, 2002]. Teoretické modely filtrace obvykle aproximují tvar částice koulí, případně vláknem [Brown, 1993]. Obecně lze říci, že částice složitějšího tvaru se budou ve vláknenné soustavě zachytávat snadněji, než kulovité. Tato skutečnost je dána jednak lepší možností mechanického zaklesnutí, jednak větším specifickým povrchem částic.

e) Objemová hmotnost částice

Objemová hmotnost částice je charakteristika poněkud ošidná a závisí na mechanismu filtrace. S rostoucí objemovou hmotností roste efektivita setrvačného a gravitačního usazení, nemění se efektivita intercepce a klesá efektivita difuzního a elektrostatického zachytu. Samotný filtrační proces není nikdy dán pouze jedním filtračním mechanismem. Míra důležitosti jednotlivých mechanismů závisí na konkrétních charakteristikách procesu filtrace. Důležitým faktorem je například rychlost filtrace. Jak lze odvodit z bodu a) kapitoly 3.3.3, při velkých filtračních rychlostech s růstem objemové hmotnosti částic roste i efektivita zachytu.

f) Elektrické vlastnosti

Obecně lze říci, že s rostoucí velikostí elektrického náboje částic roste i efektivita filtrace. Na základě Coulombova zákona lze odvodit přitažlivou sílu mezi nabitou částicí a nenabitým (resp. nabitým) vláknem. Detailněji se touto problematikou zabývá například Pich [Pich, 1964].

3.3.3 Charakteristiky procesu filtrace:

a) Rychlost náletu částic na filtr.

Rychlost filtrace má výrazný vliv na jednotlivé mechanismy filtrace. S rostoucí rychlostí toku média filtrem roste význam mechanismu setrvačného usazení, klesá význam mechanismu difuzního zachytu, elektrostatického zachytu a setrvačného usazení. Hodnota zachytu přímou intercepčí se nemění (zanedbáme – li vliv turbulencí za vláknem). Přesný vztah mezi rychlostí filtrace a celkovou efektivitou zachytu je složitý. Nicméně s jistou dávkou zjednodušení lze říci, že pro velké částice s velkou měrnou hmotností je vhodnější větší filtrační rychlost, zatímco pro malé částice (průměry řádově mikrometry a menší) efektivita jejich zachytu s rostoucí rychlostí filtrace klesá. V tomto faktu je skryta jedna z výhod skládaných filtrů (viz kapitola 5).

Z teoretického hlediska nesmíme zapomínat, že velké množství filtračních teorií a modelů vychází z předpokladu velmi malé filtrační rychlosti [Brown, 1993]. Příkladem je hodnota Reynoldsova čísla, která se u mnoha teorií blíží k nule (není-li přímo položeno rovné nule). Bezrozměrné Reynoldsovo číslo je dané vztahem:

$$\text{Re} = \frac{d_f \cdot \rho_g \cdot U}{\eta} \quad (3.7),$$

kde d_f je průměr vlákna, ρ_g hustota proudícího média, U je rychlost a η je dynamická viskozita. V případě velmi nízkého Reynoldsova čísla můžeme předpokládat, že rychlostní pole uvnitř filtru se v čase nemění (resp. nevykazuje žádné turbulence). Vztah mezi rychlostí filtrace a tlakovým spádem je lineární, jak plyne mimo jiné z D'Arcyho rovnice [Lukáš, 2004]. Tento vztah platí pro většinu filtračních aplikací.

rychlost filtrace x rychlost proudění ?

b) Viskozita protékajícího média.

Při filtraci vzduchu nemá jeho viskozita takový význam, jako u kapalinové filtrace, nicméně s rostoucí viskozitou vzduchu roste i tlakový spád filtru a zhoršuje se jeho odlučivost. Ze vztahů uvedených Brownem [Brown, 1993] lze odvodit, že efektivita zachytu setrvačným usazením pro jedno vlákno je nepřímě úměrná viskozitě prostředí. Tlakový spád je viskozitě přímo úměrný. Viskozita roste mimo jiné s teplotou, kdy při teplotě 20 °C je kinematická viskozita vzduchu $15,35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$, zatímco při teplotě 160 °C se zvýší na $30,46 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ – tedy dvojnásobně.

c) Teplota, tlak, vlhkost

Teplota prostředí působí na filtrační proces z více hledisek:

Prvním hlediskem je použitelnost filtračního materiálu vzhledem k jeho odolnosti vůči teplu, záření a působení chemikálií. Druhým hlediskem je fakt, že se změnou teploty dochází ke změně viskozity prostředí a tím i tlakového spádu a efektivit. Za třetí má teplota vliv na mechanismus zachytu difuzí. Z rovnic uvedených v Brownovi [Brown, 1993] lze vysledovat, že efektivita zachytu jednoho vlákna difuzním mechanismem je úměrná teplotě prostředí umocněné na dvě třetiny. Za čtvrté má teplota značný negativní vliv na stabilitu náboje na povrchu vláken elektrizovaných filtrů (viz kapitola 6).

Vlhkost prostředí je také důležitá z hlediska odolnosti filtračního materiálu vůči prostředí a kromě toho má také zcela zásadní vliv na stabilitu náboje na povrchu vláken (viz kapitola 6).

Tlak vzdušného prostředí před filtrem má většinou velikost atmosférického tlaku, ke kterému je třeba v určitých případech připočítat hodnotu tlakového spádu filtru. To činíme v těch málo případech, kdy ventilátor pohánějící vzduch je umístěn před filtrem. Lze však též filtrovat při tlaku nižším, než je tlak barometrický. V tomto režimu při použití filtrů s jemnými vlákny se můžeme dostat do oblasti molekulárního působení mezi vlákny a filtrovaným médiem [Brown, 1993], jež je detailněji popsána v kapitole 8.

3.4 Typy filtrů podle jejich konstrukce

Vláknité filtry pro vzdušnou filtraci lze klasifikovat podle následujících kritérií:

3.4.1 Dělení podle mechanismu filtrace na filtry povrchové a hloubkové

Povrchové filtry pracují na principu síťového mechanismu, kdy jsou zachyceny částice větší, než póry mezi vlákny. V případě hloubkových filtrů lze zachytávat i částice řádově menší, než mezivláknenné prostory. Při zachytu působí filtrační mechanismy zmíněné v kapitole 3.1. Detailní popis funkce hloubkového filtru uvádí např. Brown [Brown, 1993].

3.4.2 Dělení podle testování filtračních vlastností

Normovaným testováním a klasifikováním jsou filtry přiřazovány do filtračních tříd. Tento způsob třídění je uveden v kapitole 3.5.

3.4.3 Dělení podle použité technologie

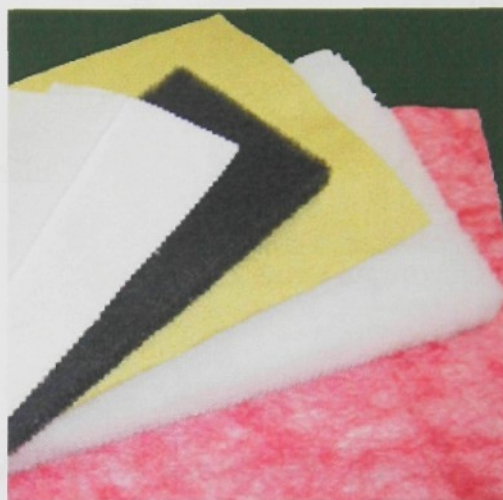
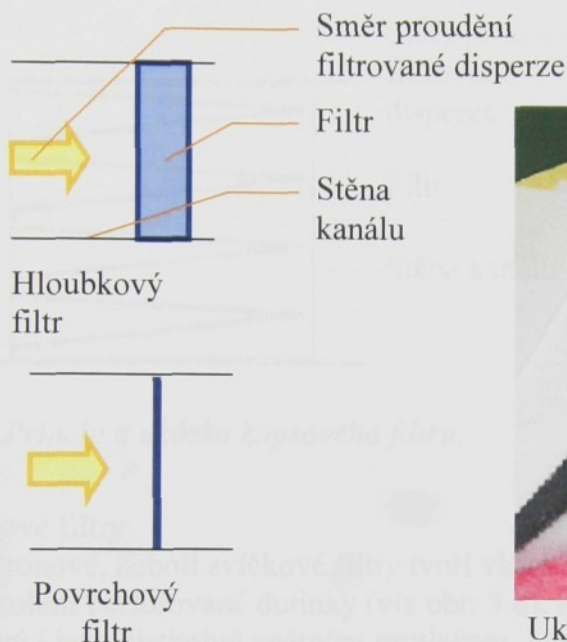
Textilní materiály použitelné pro tvorbu vláknenných filtrů jsou tyto: tkaniny, naplavované textilie, vpichované textilie, spunbond, meltblown, spunlace, objemné filtry kladené vzduchem, nebo mechanicky a pojené termicky, nebo chemicky, kolmo kladené textilie, kombinace, ostatní.

3.4.4 Dělení podle konstrukce

Jedná se o využití podle výsledného tvaru filtru. Známe tyto konstrukce filtrů:

a) Ploché filtry.

Jedná se o nejjednodušší typ filtru z hlediska požadavků na konstrukci filtru a jeho instalaci. Princip a ukázka je na obrázku 3.5. Z hlediska mechanismu filtrace můžeme plochý filtr dělit na hloubkový a povrchový. Tloušťka je obvykle do 40 mm, ostatní rozměry libovolné. Typickými představiteli jsou hrubé filtry, předfiltry, vysavačové filtry apod...

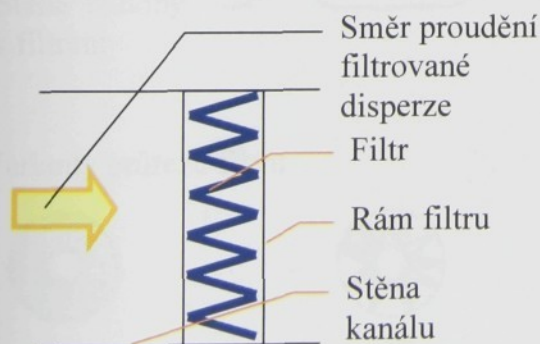


Ukázka plochých filtrů

Obr. 3.5: Schéma a ukázka plochého filtru.

b) Skládané filtry

Jedná se o filtr plochý poskládaný do tvaru harmoniky, jak ukazuje obr. 3.6. Jeho výhody popisuje kapitola 5. Z hlediska konstrukce je nutná dostatečná tuhost skládaného materiálu. Jeho rozměry jsou obdobné, jako u plochého filtru. Příklad jejich použití: vysoce účinné filtry a HEPA filtry.

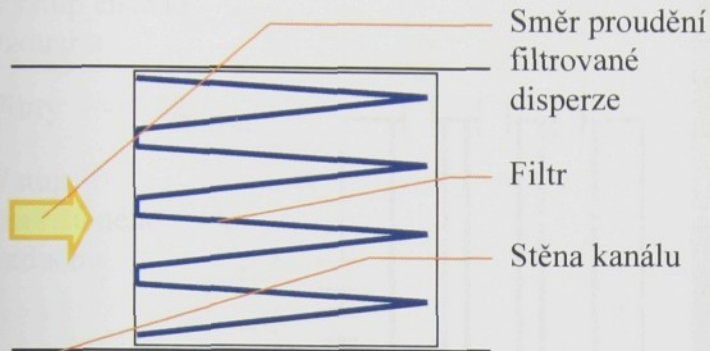


Ukázka skládaných filtrů

Obr. 3.6: Schéma a ukázka skládaného filtru.

c) Kapsové filtry

Jedná se o filtry ploché skládané tak, že jejich tloušťka je zhruba odpovídá ostatním rozměrům (viz. obr. 3.7). Výhodou je použití materiálů, ze kterých nelze vytvořit skládané filtry, nevýhodou velké rozměry. Příkladem aplikace je filtr do klimatizační jednotky.

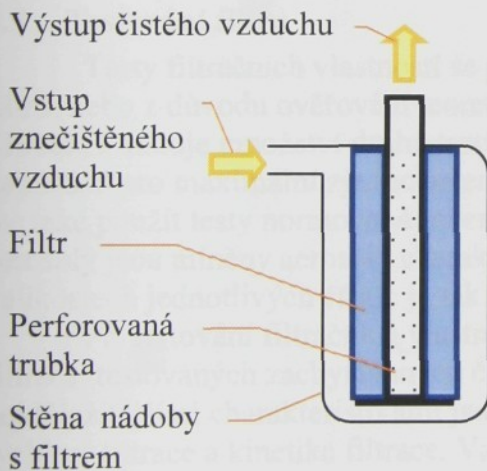


Ukázka kapsového filtru

Obr. 3.7: Princip a ukázka kapsového filtru.

d) Patronové filtry

Patronové, neboli svíčkové filtry tvoří vlákenný filtr plochý, nebo skládaný obtočený kolem perforované dutinky (viz obr. 3.8). Může být konstruován jako jednorázový i jako čistitelný zpětným protlakem. Lze jej získat i křížovým návinem prástu.² Výhodou jsou jeho rozměry, využívá se především v průmyslu a to pro suchou i mokrou filtraci.



Varianty průřezu filtru



Hlubkový patronový filtr



Skládaný patronový

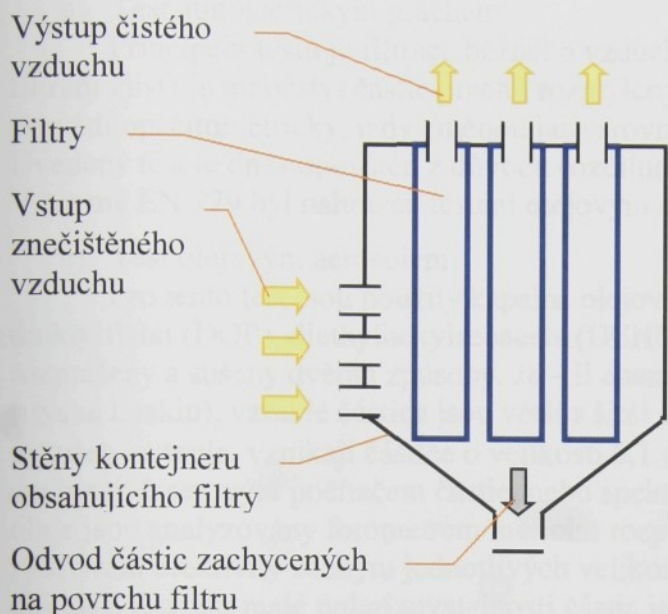


Ukázka patronového filtru

Obr. 3.8: Schema a ukázka patronového filtru.

e) Hadicové filtry

Fungují na podobném principu jako patronové, ale jejich délka může být i několik metrů. Téměř vždy jsou čištěny zpětným protlakem, umístěny vedle sebe ve větším počtu a slouží k filtraci většího množství zachytávaných částic. Schéma ukazuje obr. 3.6, částice uvolněné při zpětném protlaku padají do prostoru pod filtry a jsou vysypávány.



Ukázka hadicových filtrů

Obr. 3.6: Schéma a ukázka hadicových filtrů.

3.5 Testování filtrů

Testy filtračních vlastností se provádějí z důvodu hodnocení vlastností reálných filtrů, nebo z důvodu ověřování teoretických předpokladů na modelových, nebo reálných filtrech. Existuje množství druhů testů pro ověření teoretických předpokladů, kdy se například pro maximální zjednodušení používají monodisperzní aerosoly [Brown, 1993], lze také použít testy normované určené k hodnocení reálných filtrů. Monodisperzními aerosoly jsou míněny aerosoly charakterizované jednou velikostí částic (rozdíl ve velikostech jednotlivých částic je tak malý, že jej lze zanedbat).

Při testování filtračních vlastností je velmi důležité nastavení charakteristik procesu filtrace, testovaných zachytávaných částic a typu filtru z hlediska jeho konstrukce. Vůbec nejdůležitějšími charakteristikami jsou: velikost, koncentrace a typ zachytávaných částic, rychlost filtrace a kinetika filtrace. Vzhledem k široké oblasti využití filtrů existuje velké množství norem týkajících se testování suché filtrace. Kromě norem mezinárodních má mnoho států své vlastní. Například národních norem Spojených států, Kanady, Austrálie, Velké Británie, Francie, Německa a Japonska je dohromady 50. Mnoho těchto norem se nicméně obsahově překrývá buď zcela, nebo alespoň zčásti. Pro testování porozity, prodyšnosti a antibakteriálních vlastností existují speciální normy. Obecně lze současné užívané testovací metody shrnout následujícím způsobem [Brown, 1993] [Gustavsson, 1999], [Scroth, 1999]:

a) Test syntetickým prachem

Při tomto druhu testu je použit prášek z rozemletých anorganických částic, případně jeho směs s dalšími částicemi. Nejznámější je prach typu ASHRAE tvořený směsí

syntetického prachu, bavlněných vláken a sazí, jehož parametry odpovídají prachu nalézajícího se v okolí arizonských cest [ASHRAE 52,2, 1999]. Tento test se obvykle používá pro hrubší filtry, kdy není zjišťován záchyt jednotlivých velikostí částic (proto není velikost částic uváděna). Důraz je brán spíše na kinetiku filtrace, kdy jsou sledovány hodnoty efektivity záchytu, tlakového spádu a jímavosti v závislosti na množství podaného prachu.

b) Test atmosférickým prachem

Principem testu je filtrace běžného vzduchu testovaným filtrem, kdy se před a za filtrem zjišťuje množství částic prachu rozptýlených ve vzduchu. Analýza vzduchu se provádí opacitometricky, tedy změnou jasů srovnávacího bílého filtru [EN 779, 1993]. Uvedený test je dnes opouštěn z důvodu rozdílné kvality vzduchu používaného pro měření. V normě EN 779 byl nahrazen testem olejovým aerosolem [Gustavsson, 1999] .

c) Test olejovým aerosolem

Pro tento test jsou použity kapalné olejovité chemikálie, ze kterých nejznámější jsou dioktylfthalát (DOP), diethylhexylsebacate (DEHS) a parafinový olej. Olejové částice jsou rozprášeny a sušeny dvěma způsoby. Je – li chemikálie rozprášena ve vzduchu zastudena (tryska Laskin), vzniklé částice jsou větší s širší distribuční křivkou velikostí, je – li aerosol vysušen za tepla, vznikají částice o velikosti 0,1 až 0,3 μm . Vzniklé kulovité částice se analyzují laserovým počítacem částic, nebo spektrofotometricky. Částice parafinového oleje jsou analyzovány fotometrem měřícím rozptýl světla. Test umožňuje kvalitní zjišťování efektivity záchytu jednotlivých velikostí částic (kromě částic parafinového oleje). Z důvodu malé polarizovatelnosti částic je také vhodný pro případy, kdy nechceme, aby výsledky testu byly příliš ovlivněny elektrostatickým nábojem filtru [Scroth, 1999]. Metoda je spíše vhodná pro jemné a vysoce účinné HEPA (high efficiency particulate air filter) a ULPA (ultra low penetration air filter) filtry.

d) Test aerosolem NaCl

Částice jsou získány rozprášením a vysušením vodného roztoku soli NaCl. Vzniklé heterodisperzní částice se střední hodnotou velikosti 0,65 μm jsou analyzovány spektrofotometricky. Tato metoda umožňuje rychle měřit počáteční hodnotu tlakového spádu a efektivity [BS 4400, 1969]. Je také vhodná pro jemné a vysoce účinné filtry.

e) Metylen blue test

Roztok methylenové modři je rozprášen a vysušen. Vzniklé částice o střední hodnotě velikosti zabarvují kontrolní filtry před a za testovaným filtrem a jsou hodnoceny porovnáváním intenzity modré barvy. Test umožňuje relativně přesné hodnocení efektivity při průniku částic v rozsahu od 0,01 do 10 %. Zejména vzhledem k úzkému rozsahu je tato metoda nahrazována testem aerosolem NaCl [BS 4400, 1969].

Tab. 3.1 ukazuje zjednodušený souhrn nejdůležitějších testovacích metod. Některé normy jsou zaměřeny pouze na jednu, nebo dvě metody. Příkladem je EN 143 [EN 143, 2000], norma zabývající se filtry pro respirátory. Použitou metodou je aerosol NaCl a parafinový test. Pro klasifikaci do filtračních tříd je měřen tlakový spád a efektivita při zadané filtrační rychlosti a pro oba typy filtrovaných částic.

metoda	Název typu normy	Testovací materiál	Průměr částic	Technika přípravy test. Mat.	Detektor proniknuvších částic
Test syntetický m prachem	ANSI/AHAM	Prach z Arizonských silnic	0,5 - 3	Aerosolový generátor	Aerodynamický třídič částic
	ASHRAE EN CAN	72% fine dust 23% molocco black 5% cotton linters	-	Dávkovač prachu, injektor	vážením
	ISO SAE	Testovací prach	2 – 125 10 - 40	injektor	Vážením
Test atmosf. prachem	ASHRAE CAN	Atmosférický aerosol	Cca. 0,3	Přímo ze vzduchu	Opacitometr (propustnost světla)
Test olejovým aerosolem	ASTM ASME/ANSI IES MIL-STD UL	DOP test; Di-oktyl ftalát (syntetický olej)	0,3 0,2 – 0,3	Vypařování, kondenzace	Optický počítač částic Spektrofotometr
			0,3 – 2	Tryska Laskin	Optický počítač částic Spektrofotometr
	EN	DEHS aerosol diethylhexylsebacate	0,1 – 0,3	Vypařování, kondenzace	Optický počítač částic Spektrofotometr
			0,2 – 3	Tryska Laskin	Optický počítač částic Spektrofotometr
	EN BS	Parafinový olej CP27 DAB7	0,4±0,26	Rozprašování, kondenzace	Fotometr měřící rozptyl světla
	BS EUROVENT EN NF	Částice NaCl	0,02-2 medián 0,6	Rozprašení roztoku a vysušení	spektrofotometr
Methylene Blue test	BS	Částice metylénové modři	-	Rozprašování vodního roztoku	Velikost skvrny

Tab. 3.1: Souhrn metod pro testování filtračních vlastností suchých filtrů.

Existují normy zaměřené na obecné testování a klasifikování filtrů, které pokrývají širší spektrum typů. Příkladem jsou normy ASHRAE 52.2 [ASHRAE 52.2, 1999] a EN 779 [EN 779, 2003]. Obě normy jsou určeny pro testování a klasifikaci hrubých a jemných filtrů. Normy EN 1822: 1998 a IES –RP-CC-021 jsou určeny pro vysoce účinné tzv. HEPA filtry. Pomocí evropských norem EN 779 a EN 1822 lze tudíž obecně klasifikovat celou šíři typů suchých filtrů, jak ukazuje tab. 3.2. Pro klasifikaci podle tab 3.2 jsou zapotřebí dvě až tři testovací metody.

Nejhrubší filtry tříd G1 až G4 jsou testovány syntetickým prachem typu ASHRAE a výstupními vlastnostmi jsou: počáteční tlakový spád, průměrná efektivita zachytu při tlakovém spádu 150 a 250 Pa, průběh hodnot tlakového spádu a efektivitu během procesu zanášení a jímavost. Jemnější filtry tříd F5 až F9 jsou testovány olejovým aerosolem (buď DOP test, nebo DEHS generované tryskou Laskin). Zjišťované vlastnosti jsou: tlakový spád při různých filtračních rychlostech, počáteční efektivita filtru v závislosti na velikosti zachytávaných částic, střední hodnota efektivitu zachytu částic velikosti 0,4 při tlakovém spádu 250, 350 450 Pa, průběh hodnot tlakového spádu a efektivitu během procesu zanášení a jímavost. Nejjemnější filtry tříd H10 až U17 jsou testovány olejovým aerosolem

(DOP, nebo DEHS), kdy je nejprve zjištěna velikost částic, které nejvíce pronikají filtrem a efektivita těchto částic je lokálně testována. Lokální testy na malé ploše filtru jsou důležité pro eliminování nebezpečí lokálně vyššího průniku částic v důsledku otvoru ve filtru. Zjišťované vlastnosti jsou: Tlakový spád při různých filtračních rychlostech, celková a lokální efektivita zachytu částic s maximálním průnikem (MPPS – most penetrating particle size). Pro testování elektrizovaných filtrů je možné také určit hodnotu „nejmenší možné efektivity“ (MLE), což je efektivita daného filtru, ze kterého byl nejprve definováním způsobem odstraněn elektrostatický náboj [Gustavsson, 1999].

Norma	Třída filtru	Průměrná odlučivost syntetického prachu Am (%)	Průměrná odlučivost DEHS částic o velikosti 0,4 µm Em (%)	Odlučivost částic s největším průnikem - MPPS (%)	Konečný tlakový spád (Pa)
EN 779	G1	Am < 65			250
	G2	65 < Am < 80			250
	G3	80 < Am < 90			250
	G4	90 < Am			250
	F5		40 < Em < 60		450
	F6		60 < Em < 80		450
	F7		80 < Em < 90		450
	F8		90 < Em < 95		450
	F9		95 < Em		450
EN 1822	H10			85	
	H11			95	
	H12			99,5	
	H13			99,95	
	H14			99,995	
	U15			99,9995	
	U16			99,99995	
	U17			99,99995	

Tab. 3.2: Způsob zatřídění filtrů vzduchu podle norem EN 779 a EN 1822.

Detailní popis experimentálních metod použitých v této práci lze nalézt v následující kapitole.

4 Podmínky experimentu

Pro realizaci experimentů obsažených v této práci byly použity dvě metody: Metoda měření pomocí aerosolu NaCl a pomocí syntetického prachu. Tato volba umožnila testování celého spektra vzdušných filtrů a mimo jiné i kinetiku filtrace.

4.1.1 Test aerosolem NaCl

Test aerosolem NaCl byl použit pro měření počáteční efektivitu zachytu a tlakového spádu především u filtrů vyšších filtračních tříd. Všechny testy byly provedeny v souladu s normami týkajícími se dané testovací metody. Většina testů odpovídala normě BS 4400 [BS 4400, 1969], hodnocení vlivu nanovláken na vlastnosti respirátorů bylo prováděno podle normy EN 143 [EN 143, 2000].

Schéma principu metody ukazuje obr. 4.1. Roztok 10% NaCl je rozprášen a zbaven vody ve vypařovací trubici. Výsledkem jsou částice soli definované velikosti. Tyto částice nalétávají definovanou rychlostí na testovaný vzorek (zároveň je snímán tlakový spád vzorku). V hořáku 9 hoří modrý plamen směsi vodíku a vzduchu. Projdou – li testovaným filtrem částice NaCl, obarví plamen do žluta. Čím více částic, tím větší intenzita žluté barvy plamene. Intenzitu žluté barvy plamene snímá spektrofotometr. Výstupem je hodnota napětí v mV, hodnota průniku P částic testovaným vzorkem je určena vzorcem:

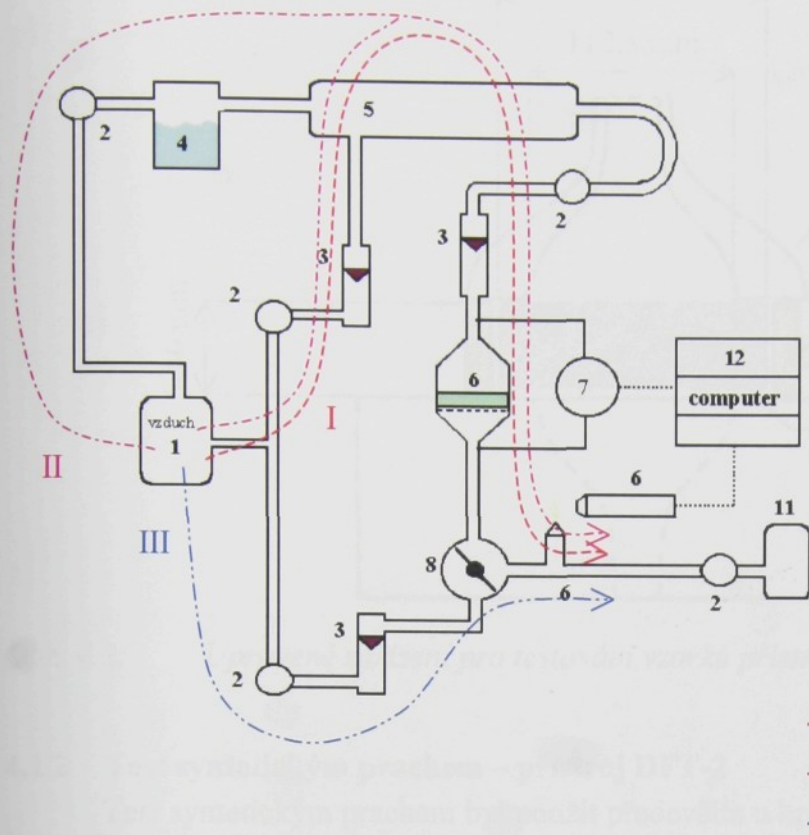
$$P = U_1/U_2 [\%] \quad (5.1),$$

kde U_1 je napětí naměřené na testovaném vzorku, U_2 je maximální napětí naměřené na tzv. 100% vzorku, tedy za situace, kdy v měřicí cele není upnut žádný vzorek.

Pro přesné měření je nutné určit nulový stav přístroje, kdy v hořáku hoří pouze vodík a vzduch přicházející cestou I.

Vzduch může v přístroji procházet v zásadě 3 cestami:

- I. cesta je pro určení nulového stavu přístroje a pro výměnu testovaného filtru - vzduch neprochází filtrem.
- II. cesta je pro určení tlakového spádu filtru a vyčištění přístroje – vzduch prochází filtrem, ale neobsahuje částice soli.
- III. cesta pro měření průniku částic filtrem.



- 1 přívod stlačeného vzduchu
- 2 regulační ventil
- 3 průtokoměr
- 4 rozprašovač
- 5 vypařovací trubice
- 6 měřicí cela se vzorkem filtru
- 7 měření tlakového spádu
- 8 přepínací ventil
- 9 hořák
- 10 spektrofotometr snímající intenzitu žlutého světla
- 11 láhev se stlačeným vodíkem
- 12 počítač

- cesta I
 cesta II
 - - - - - cesta III

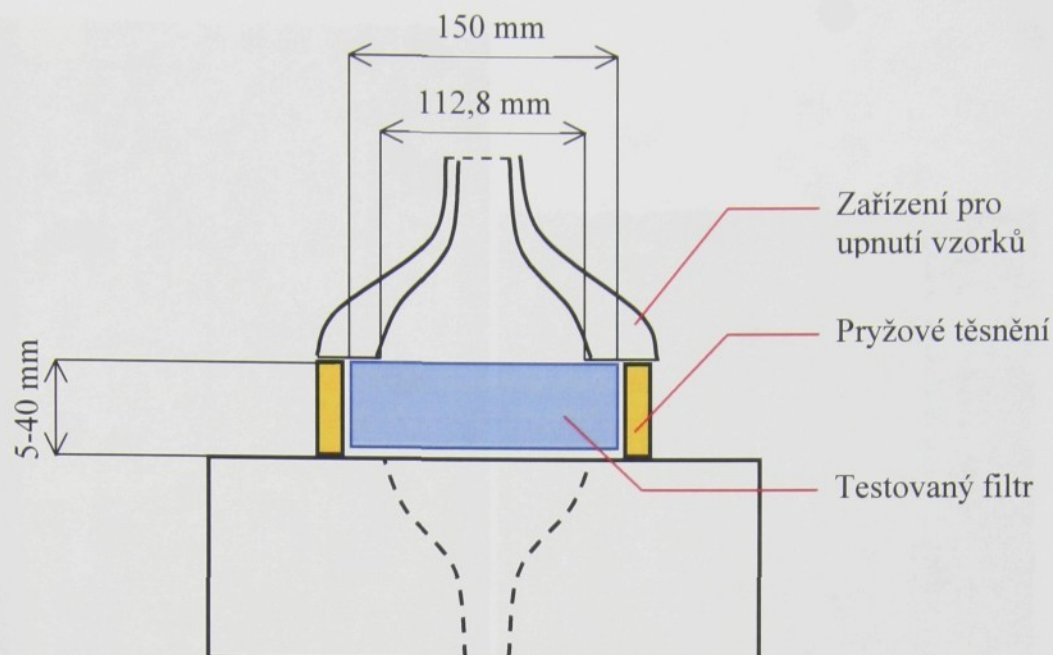
Obr. 4.1: Schéma principu přístroje pro testování aerosolem NaCl.

Parametry testu odpovídají uvedeným normám shrnuje tab. 4.1:

Velikost částic	Od 0,02 do 2 μm se střední hodnotou 0,65 μm (medián)
Koncentrace částic	13 mg/m^3
Rozsah měření	1 – 99,9997 %
Rychlost náletu částic na filtr podle normy BS 4400	1,5 – 9,5 m/min (0,025 – 0,158 m/sec). Nanovlákné filtry testovány při rychlosti 5 m/min , ostatní filtry při rychlosti 7 m/min
Rychlost náletu částic na filtr podle normy EN 143	9,5 m/min (jednalo se o nanovlákné filtry použité pro respirátory)
Testovací plocha (průřez potrubí těsně před filtrem)	100 cm^2 , tedy kruhový otvor o průměru 112,8 mm

Tabulka 4.1: Parametry testu aerosolem NaCl.

Pro testy byl použit přístroj Bench Rig C.E.N. 1100 konstruovaný tak, aby svými parametry odpovídal uvedeným normám. Přístroj mohl měřit vzorky plochých filtrů s tloušťkou do 18 mm. Vzhledem k potřebě testovat objemné filtry mající tloušťku až 40 mm bylo Ing. Hrůzou zařízení pro upnutí vzorku přepracováno a pro testované vzorky vyvinuto kruhové vysekávací zařízení o průměru 150 mm. Detail změny na testovacím přístroji ukazuje obr. 4.2:



Obr. 4.2: Upravené zařízení pro testování vzorků přístroje Bench Rig C.E.N. 1100.

4.1.2 Test syntetickým prachem – přístroj DFT-2

Test syntetickým prachem byl použit především u hrubších filtrů a v případech, kdy byla vyšetřována kinetika filtrace (tedy změna filtračních vlastností v průběhu procesu). Při porovnávání testovacích metod vyšlo najevo, že standardizované metody měření syntetickým prachem jsou velmi nákladné co do pořizovací ceny a údržby a mají velké nároky na prostor i na velikost testovaného vzorku. Normy EN 779 i ASHRAE 52 vyžadují vzorek o rozměrech 0,6 x 0,6 m. Vzhledem k tomu, že proud vzduchu procházející testovaným filtrem a odebíraný dvěma sondami musí být ustálený, má měřicí trať délku minimálně 6 m. Řešit experiment posíláním vzorků do akreditované zkušebny by bylo příliš nákladné. Z těchto důvodů bylo rozhodnuto vyvinout a zkonstruovat testovací zařízení schopné měřit filtrační materiály menších velikostí, které by jinak co nejvíce odpovídalo té části normy EN 779 (respektive ASHRAE 52), jež pojednává o testování syntetickým prachem. Vývoj přístroje probíhal na Katedře netkaných textilií ve spolupráci s firmou MITOP a.s., která disponovala starším zařízením na testování atmosférickým prachem a součástkami na testování prachem syntetickým. Ing. Hrůza navrhl konstrukci přístroje a s pomocí Filipa Sanetrníka ji i realizoval. Pro konstrukci byly použity některé součástky ze staršího zařízení Katedry netkaných textilií měřícího na podobném principu. Vzniknuvší přístroj byl pojmenován DFT-2, neboli Dust Filter Tester (second generation) [Hrůza, 2000]. Na základě úspěšného využití přístroje ve výzkumu i výuce byla později týmž autorem navržena a zkonstruována jednodušší verze nazvaná DFT-3 a určená pouze pro výuku (viz. obr 4.3).

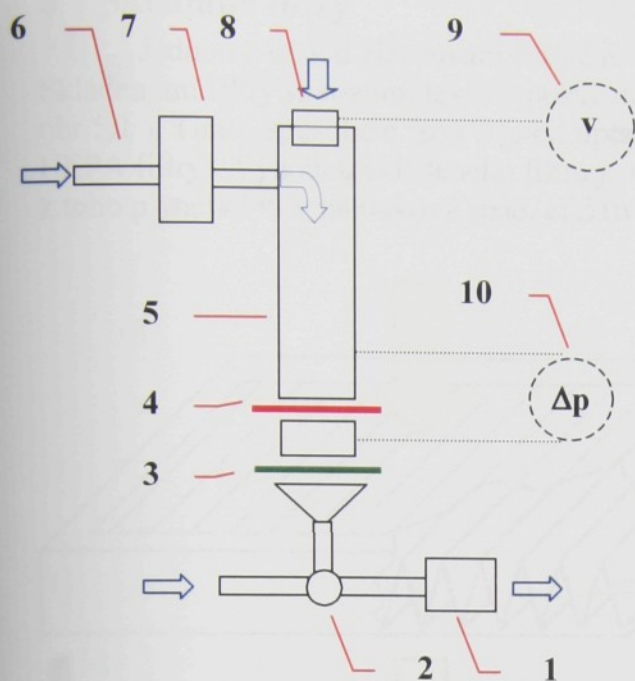


Obr. 4.3: Testovací přístroje DFT-2 a DFT-3.

Schéma přístroje DFT-2 ukazuje obr. 4.4: Princip měření je následující: Testovaným filtrem prochází směs vzduchu a testovacího prachu. Částice prachu, které proniknou testovaným filtrem jsou zachyceny filtrem absolutním. Měří se tlakový spád, efektivita a jímavost filtru. Efektivita záchytu částic je zjištěna gravimetricky zvážením prachu proniklého testovaným filtrem a prachu neproniklého podle vztahu (3.2). Měření probíhá za definované náletové rychlosti prachu (např. 1 m/sec), koncentrace prachu (cca. 120 mg/m^3) a ploše filtru ($0,01767 \text{ m}^2$). Na jednom vzorku se jednotlivá měření opakují až do dosažení tlakové ztráty 250 Pa pro filtry tříd G a 400 Pa pro filtry tříd F. Z naměřených hodnot efektivity se počítá průměr podle vztahu (3.3). Parametry testů obsahuje tab. 4.2.

Složení prachu	Standardizovaný prach typu ASHRAE: - 72% syntetický prach - 23% saze - 5% krátká bavlněná vlákna
Velikost částic	Od 0,3 do 50 μm
Koncentrace částic	70 mg/m^3
Rozsah měření	1 – 99 %.
Rychlost náletu částic na filtr podle normy EN 779	0,6 – 3,8 m/sec Pro většinu testů byla použita náletová rychlost 1 m/sec (pro testy nestacionarity též 0,6 a 1,5 m/sec).
Testovací plocha (průřez potrubí těsně před filtrem)	100 cm^2 , tedy kruhový otvor o průměru 112,8 mm
Maximální měřitelný tlakový spád	10 kPa

Tab. 4.2: Parametry testu syntetickým prachem.



Legenda:

- 1) ventilátor
- 2) regulační ventil
- 3) filtr třídy F6 (absolutní)
- 4) testovaný filtr
- 5) mísicí trať
- 6) přívod stlačeného vzduchu
- 7) zařízení dávkující prach s regulátorem dávkování
- 8) sonda snímající rychlost vzduchu
- 9) počítač rychlosti vzduchu
- 10) zařízení měřící tlakový spád testovaného filtru

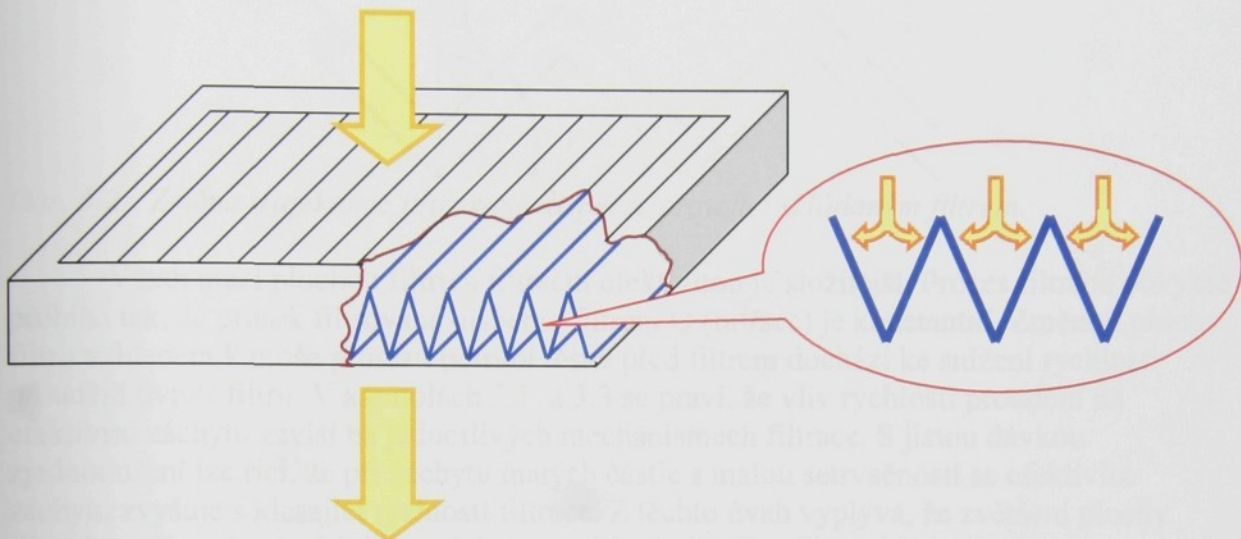


.... Směr proudění vzduchu

Obr. 4.4: Schéma přístroje DFT-2.

5 Skládané filtry

Jednou z metod zlepšování filtračních charakteristik je použití skládaných filtrů. Skládanými filtry se rozumí textilie poskládaná do tvaru harmoniky a zpevněná rámem (viz obr.5.1). Tímto způsobem jsou v praxi upravovány zejména vysoce účinné filtry (například HEPA filtry). Výhodou skládaného filtru je několikanásobné zvýšení filtrační plochy a z toho plynoucí vliv na tlakový spád, efektivitu a životnost filtru.



Obr. 5.1: Konstrukce skládaného filtru, způsob proudění filtrované disperze.

5.1 Teoretický náhled na vztah mezi skládaným filtrem a filtračními charakteristikami

Plocha filtru má značný vliv na výsledné filtrační vlastnosti. Zvýšení filtrační plochy by mělo snížit tlakový spád, zvýšit životnost filtru a má i vliv na efektivitu filtru. Vztah mezi filtrační plochou a tlakovým spádem vhodně vyjadřuje jednoduchá D'Arcyho rovnice:

$$Q = \frac{A \cdot k \cdot \Delta p}{h \cdot \eta} \quad (5.1),$$

kde Q je průtok (m^3/sec), Δp je tlakový spád (Pa), A je plocha filtru (m^2), h je tloušťka filtru (m), η je dynamická viskozita ($\text{Pa} \cdot \text{sec}$) a k je koeficient propustnosti filtru (m^2) [Brown, 1993]. Tento vztah platí pro jakýkoliv porézní materiál, jehož struktura je zahrnuta v koeficientu k . Vyplývá z něj, že pro stejný materiál se stejnou tloušťkou a konstantním průtokem je vztah mezi tlakovým spádem a plochou filtru lineární. Musíme si ale uvědomit, že u skládaných filtrů dochází se změnou plochy také ke změně struktury filtru. Jak ukazuje obrázek 5.2, filtrovaná disperze nenalétává na plochu filtru kolmo ale pod úhlem α , který se zmenšuje s rostoucí hustotou skladů. Jak uvádí Brown [Brown, 1993], tvar rychlostního pole tekutiny protékající porézní látkou je dán minimální hodnotou disipace kinetické energie vlivem viskozního tření. Jednoduše řečeno tekutina se pohybuje cestou nejmenšího odporu. Z toho důvodu se tok filtrované disperze snaží orientovat kolmo k ploše filtru tak, aby vzdálenost, kterou musí urazit v prostoru vyplněném porézní látkou, byla co nejmenší. Výsledná trajektorie filtrované disperze je složitější a v důsledku dynamiky tekutiny a vzniku turbulencí dochází k jejímu brždění. V rámci D'Arcyho rovnice je tento jev možné vyjádřit poklesem hodnoty koeficientu propustnosti filtru k . Kromě toho dochází k poklesu koeficientu propustnosti filtru v situaci, kdy je hustota

skladů natolik velká, že se jednotlivé sklady z větší části dotýkají a dochází k růstu zaplnění filtru. S rostoucí hustotou skladů tedy dochází k poklesu koeficientu propustnosti vláknenného materiálu, přičemž tento pokles je dán změnou tvaru proudnic filtrované disperze a změnou zaplnění filtru.

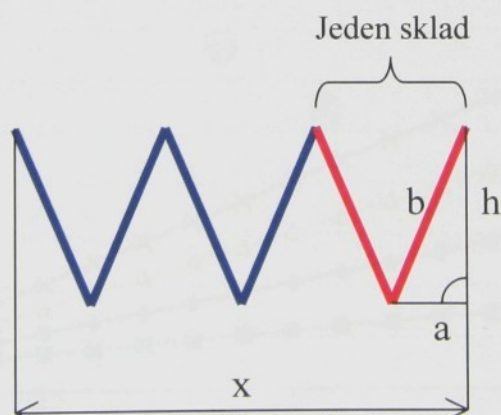


Obr. 5.2: Změna trajektorie filtrované disperze proudící skládaným filtrem.

Vztah mezi plochou filtru a filtrační efektivitou je složitější. Proces filtrace obvykle probíhá tak, že průtok filtrované disperze filtrem Q (m^3/sec) je konstantní. Změnou plochy filtru vzhledem k ploše průřezu potrubí těsně před filtrem dochází ke snížení rychlosti proudění uvnitř filtru. V kapitolách 3.1 a 3.3 se píše, že vliv rychlosti proudění na efektivitu záchytu závisí na jednotlivých mechanismech filtrace. S jistou dávkou zjednodušení lze říci, že při záchytu malých částic s malou setrvačností se efektivita záchytu zvyšuje s klesající rychlostí filtrace. Z těchto úvah vyplývá, že zvětšení plochy filtru by mělo mít na efektivitu záchytu pozitivní vliv. Pro filtry skládané musíme navíc uvažovat i vliv změny směru toku filtrované disperze (viz. obr. 5.2). Dynamika dispergovaných částic je odlišná od disperzního prostředí a každé zakřivení trajektorie přispívá k lepší efektivitě filtrace.

5.2 Hustota skladů

Důležitým parametrem uváděným u skládaných filtrů je počet skladů na 1 m délky, někdy též označovaný jako hustota skladů [Brown, 1993]. Pro určení vztahu mezi počtem skladů a filtračními vlastnostmi je nutno znát vztah mezi počtem skladů a filtrační plochou. Vzhledem k tomu, že v praxi jsou pro skládání používány materiály mající tuhost podobnou papíru, můžeme průřez skládaného filtru zjednodušit podle schématu na obr. 5.3.



Obr. 5.3: Schéma výpočtu skutečné délky poskládané hrany filtru.

Pro určení plochy skládaného filtru ve tvaru obdélníku o stranách x a y je nutno určit skutečnou délku filtru l skládaného podél strany x . Z obr. 5.3 lze odvodit, že délka l je rovna $2 \cdot n \cdot b$, kde n je počet skladů. Délku b lze získat z pravoúhlého trojúhelníka a, h, b podle vztahu:

$$b = \sqrt{h^2 + \frac{x^2}{4 \cdot n^2}} \quad (5.2),$$

kde strana h je daná tloušťkou skládaného filtru a strana a je daná délkou poskládaného filtru x a počtem skladů n . Po úpravě výsledný vztah pro skutečnou délku filtru zní:

$$l = n \cdot 2b = n \cdot \sqrt{4 \cdot h^2 + \frac{x^2}{n^2}} \quad (5.3),$$

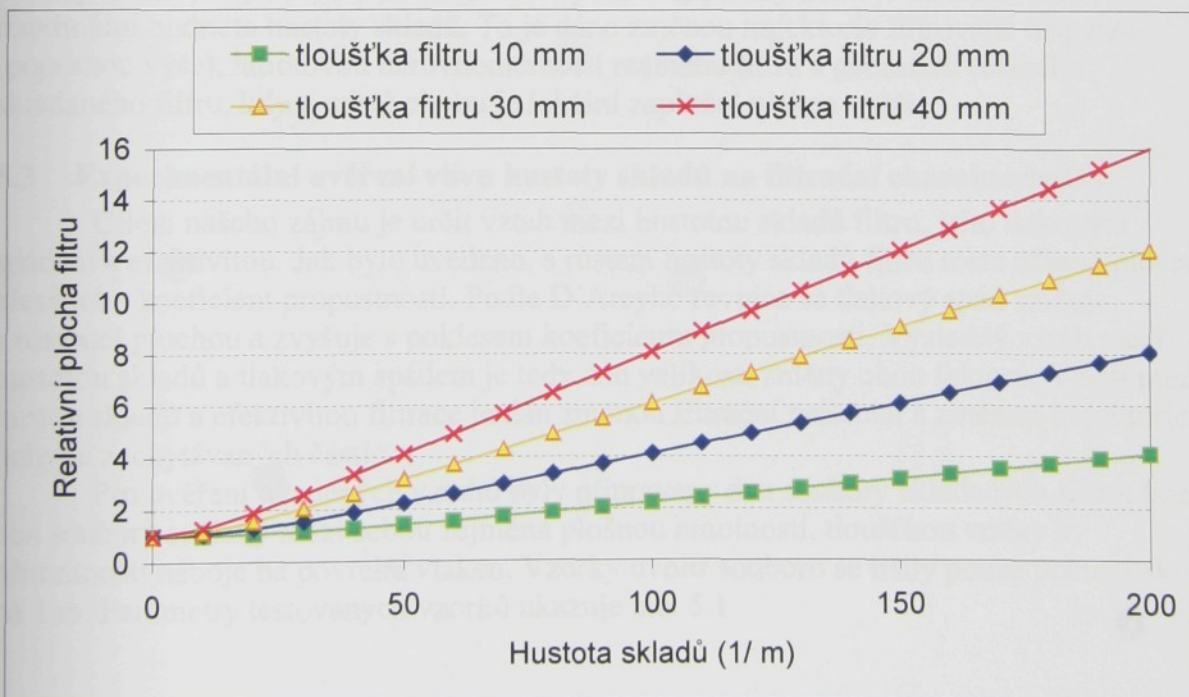
kde l je skutečná délka filtru, n je počet skladů, h je tloušťka filtru a x je délka poskládaného filtru. Skutečná plocha filtru je pak dána vztahem:

$$A = y \cdot n \cdot \sqrt{4 \cdot h^2 + \frac{x^2}{n^2}} \quad (5.4), \quad \text{„kvadrát“}$$

kde A je skutečná plocha skládaného filtru o rozměrech $x \cdot y$. Pro získání bezrozměrné veličiny lze vyjádřit poměr mezi skutečnou plochou filtru a plochou danou jeho rozměry:

$$N_r = \frac{n}{x} \quad A_{rel} = \frac{A}{x \cdot y} = \frac{n \cdot \sqrt{4 \cdot h^2 + \frac{x^2}{n^2}}}{x} = \sqrt{\frac{4 \cdot n^2 \cdot h^2}{x^2} + 1} = (5.5).$$

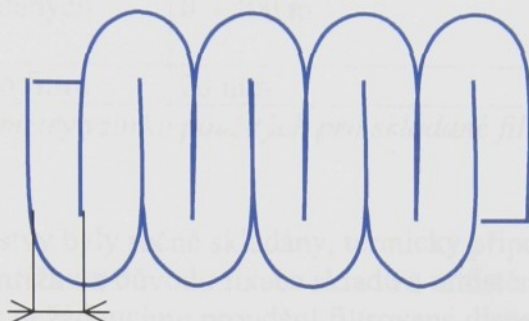
Vztah mezi relativní plochou filtru A_{rel} a počtem skladů na jednotku šíře filtru, nazývaném též hustota skladů N_r (m^{-1}), vyjadřuje obr. 5.4. Závislost je uvedena pro obvykle používané tloušťky skládaných filtrů.



Obr. 5.4: Vztah mezi hustotou skladů a relativní plochou filtru danou poměrem skutečné plochy skládaného filtru a plochy dané jeho rozměry podle vztahu (5.5).

Z grafu je patrné, že pro malou hustotu skladů (méně než $50 \text{ (m}^{-1}\text{)})$ je vhodné data proložit exponenciální rovnicí, zatímco pro vyšší hodnoty počtu skladů můžeme uvažovat zhruba lineární závislost mezi počtem skladů a plochou filtru.

Nicméně je nutno vzít také v úvahu růst zaplnění filtru. Jak ukazuje obr. 5.5, vrstva ve skládaném filtru má určitou tloušťku a při zvyšování počtu skladů dochází k postupnému zaplňování prostoru určeného pro skládaný filtr. Růst využitelné plochy filtru se zpomaluje a po překročení kritické hustoty skladů klesá.



Tloušťka skládané vrstvy

Obr. 5.5: Limitní situace při skládání filtru, kdy se již jednotlivé sklady navzájem dotýkají.

Z obrázku lze zároveň odvodit jednoduchý vztah pro limitní počet skladů, kdy se jednotlivé sklady vzájemně dotýkají:

$$N_{r \max} = 1 / (2 \cdot h^*) \quad (5.6),$$

kde $N_{r \max}$ je maximální hustota skladů a h^* je tloušťka skládané vrstvy. Hodnota kritické hustoty skladů, kdy dochází ke snižování využitelné plochy filtru je nicméně nižší, než maximální hodnota hustoty skladů. To je dáno změnou trajektorie filtrované disperze (popsanou výše), hmotovou nerovnoměrností reálného filtru a geometrií reálného skládaného filtru, kdy v místě ohybu je lokální zaplnění vláken vyšší.

5.3 Experimentální ověření vlivu hustoty skladů na filtrační charakteristiky

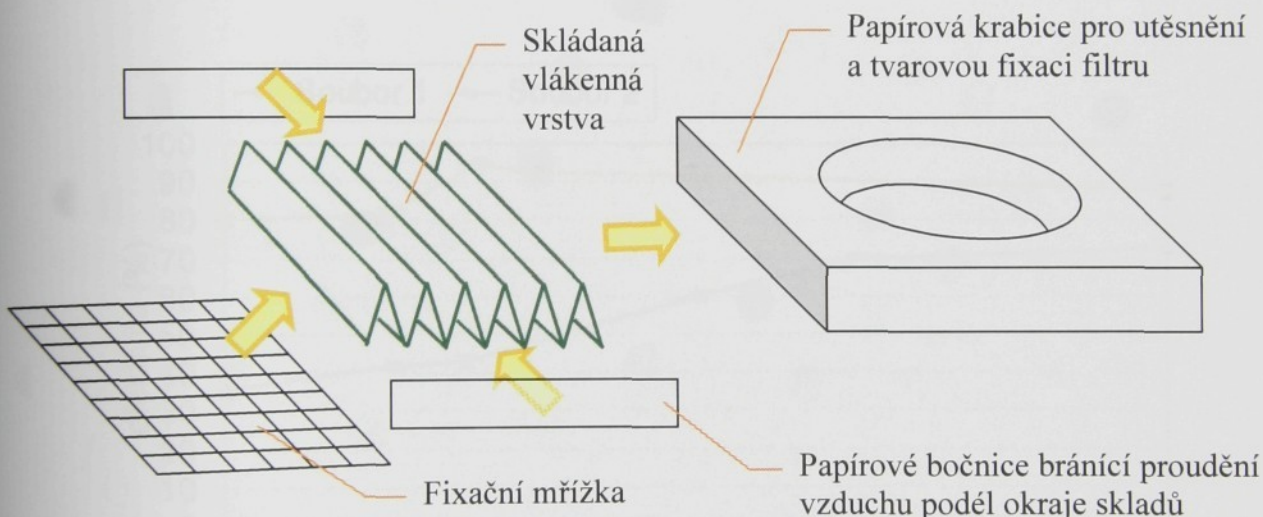
Cílem našeho zájmu je určit vztah mezi hustotou skladů filtru, jeho tlakovým spádem a efektivitou. Jak bylo uvedeno, s růstem hustoty skladů filtru roste účinná plocha a klesá jeho koeficient propustnosti. Podle D'Arcyho rovnice se tlakový spád snižuje s rostoucí plochou a zvyšuje s poklesem koeficientu propustnosti. Výsledný vztah mezi hustotou skladů a tlakovým spádem je tedy dán velikostí změny obou faktorů. Vztah mezi hustotou skladů a efektivitou filtrace je dán změnou filtrační rychlosti a změnou trajektorie pohybu zachytávaných částic.

Pro ověření uvedených vztahů byly připraveny dva soubory skládaných filtrů, kde oba soubory se lišily mezi sebou zejména plošnou hmotností, tloušťkou vrstvy a přítomností náboje na povrchu vláken. Vzorky uvnitř souboru se lišily pouze počtem skladů na 1 m. Parametry testovaných vzorků ukazuje tab. 5.1.

	Soubor 1	Soubor 2
Výrobce	Ecotex Hornátky s.r.o.	Pegas a.s.
Technologie výroby	spunbond/meltblown	spunbond/meltblown
Materiál	polypropylen	polypropylen
Plošná hmotnost	100/17 g/m ²	15/20 g/m ² <i>geom. 2.</i>
Průměr vláken	1,8 μm <i>0,0018 mm</i>	11 / 1,98 μm
Tloušťka vrstvy	1,13 mm	0,85 mm
Speciální úpravy	elektrizace pomocí korony	-
Hustota skladů skládaných filtrů	0 – 300 m ⁻¹	0 – 300 m ⁻¹
Tloušťka skládaného filtru	20 mm	20 mm

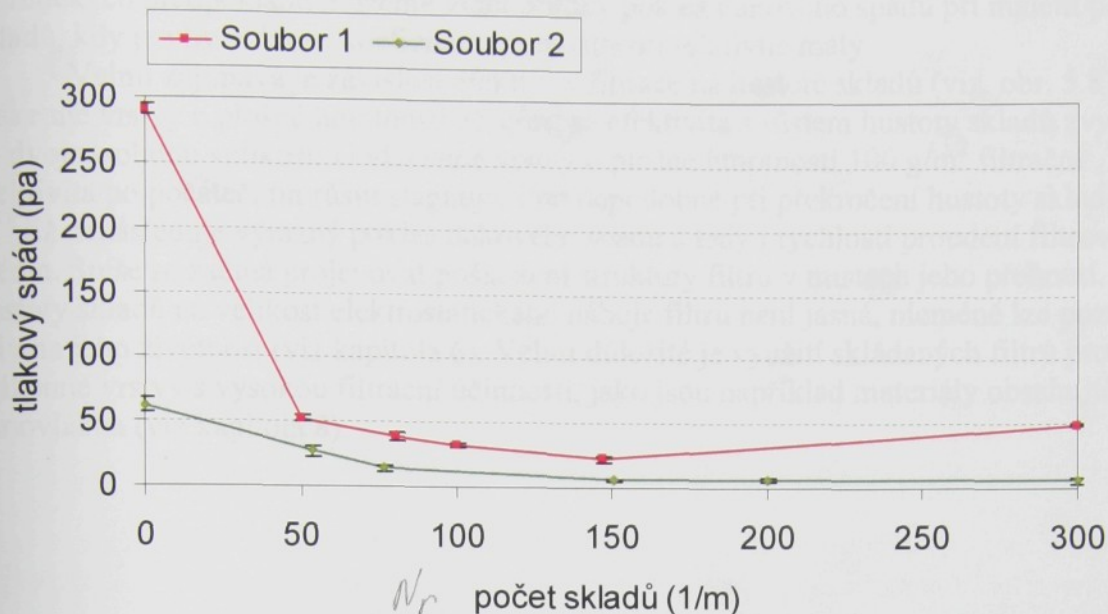
Tab. 5.1: Parametry vzorků použitých pro skládané filtry a parametry skládaných filtrů.

Vláknenné vrstvy byly ručně skládány, termicky připojeny na řídkou polypropylenovou mřížku z důvodu fixace skladů a umístěny do papírové krabice tak, aby nemohlo docházet k nežádoucímu proudění filtrované disperze podél boku filtru, jak ukazuje obr. 5.6. Fixační mřížka neměla žádný vliv na filtrační vlastnosti.

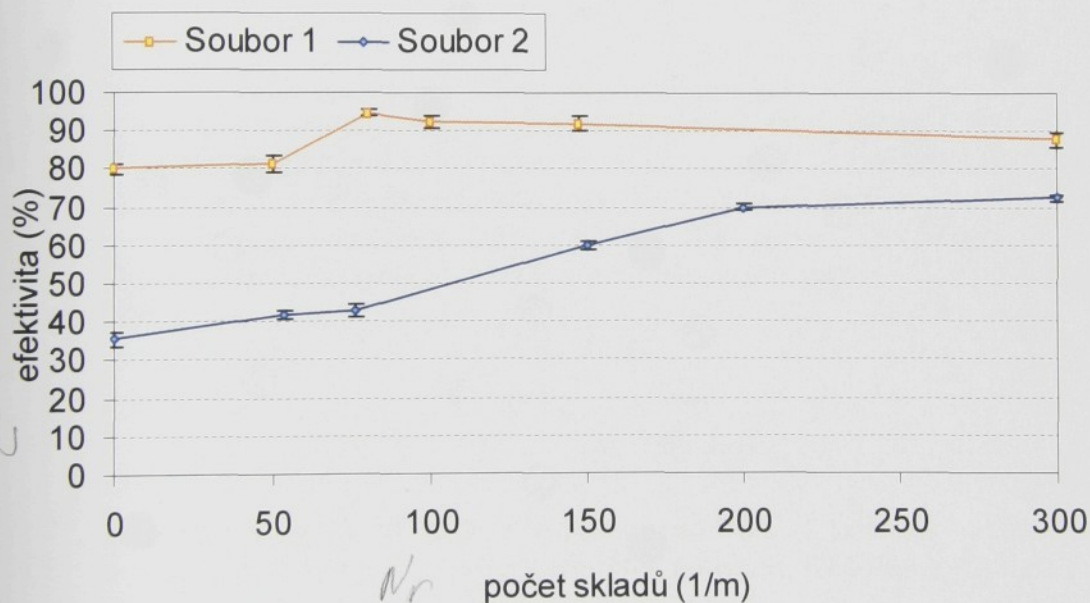


Obr. 5.6: Princip přípravy vzorku skládaného filtru

Vzhledem k technicky i časově náročné přípravě se pro každý skládaný filtr daných parametrů připravily vždy pouze tři vzorky. Všechny vzorky byly testovány pomocí aerosolu NaCl při filtrační rychlosti 5 m/min.. Zjišťován byl vliv hustoty skladů na tlakový spád filtru a na efektivitu zachytu částic. Výsledky testu ukazují obrázky 5.6 a 5.7. Grafy na obrázcích obsahují směrodatné odchylky jednotlivých měření.



Obr. 5.7: Vztah mezi hustotou skladů a tlakovým spádem dvou filtrů při filtrační rychlosti 5 m/min. Parametry vzorků viz tab. 5.1.



Obr. 5.8: Vztah mezi hustotou skladů a efektivitou zachytu dvou filtrů při filtrační rychlosti 5 m/min. Parametry vzorků viz tab. 5.1.

Jak vyplývá z obr. 5.7, vlákenná vrstva menší plošné hmotnosti vykazuje pouze exponenciální pokles tlakového spádu v závislosti na hustotě skladů, zatímco u vlákenné vrstvy vyšší plošné hmotnosti můžeme pozorovat překročení kritické hustoty skladů zhruba u hodnoty 200 m^{-1} . Takový průběh popisuje také Brown [Brown, 1993]. Tloušťka této vrstvy je 1,13 mm (měřeno při přítlaku 100 Pa), což znamená, že maximální hustota skladů je 450 m^{-1} . To je více, než polovina změřené hodnoty kritické hustoty skladů. Velmi důležitá je míra poklesu tlakového spádu. Skládáním lze dosáhnout až desetinásobného poklesu tlakového spádu a u materiálu o plošné hmotnosti 35 g/m^2 a více než třináctinásobného poklesu u materiálu o plošné hmotnosti 100 g/m^2 . Při ověření

teoretických předpokladů můžeme vidět prudký pokles tlakového spádu při malém počtu skladů, kdy je vliv poklesu koeficientu propustnosti relativně malý.

Velmi zajímavá je závislost efektivit filtrace na hustotě skladů (viz. obr. 5.8). U vlákně vrstvy o plošné hmotnosti 35 g/m^2 se efektivita s růstem hustoty skladů zvyšuje až na dvojnásobnou velikost. U vlákně vrstvy o plošné hmotnosti 100 g/m^2 filtrační efektivita po počátečním růstu stagnuje. Pravděpodobně při překročení hustoty skladů 100 m^{-1} již nenásleduje výrazný pokles tlakového spádu a tedy i rychlosti proudění filtrovaného média. Spíše se začíná projevovat poškození struktury filtru v místech jeho přehnutí. Vliv hustoty skladů na velikost elektrostatického náboje filtru není jasná, nicméně lze pozorovat vliv na jeho životnost (viz kapitola 6). Velmi důležité je využití skládaných filtrů pro vlákně vrstvy s vysokou filtrační účinností, jako jsou například materiály obsahující nanovlákná (viz kapitola 8).

6 Elektrizované filtry

Elektrizovanými filtry se rozumí vláknenné systémy využívající při procesu filtrace mechanismus elektrostatického zachytu. Podrobněji princip a použití elektrizovaných filtrů popisuje například Brown [Brown, 1993], Pich [Pich, 1964] a Kolínová [Kolínová, 2004]. V této práci se autor zaměřil především na komplexní zhodnocení vlivů působících negativně na tento druh filtrů a na možnosti kombinace elektrizovaných filtrů s jinými způsoby zlepšení filtračních vlastností.

6.1 Mechanismy elektrostatického zachytu částic

Princip elektrostatického mechanismu zachytu vychází ze známého Coulombova zákona $F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot r^2}$, kde F je síla vzájemného působení bodových nábojů velikosti Q_1 a Q_2 ve vzdálenosti r . Konstanta ϵ_0 se nazývá permitivita vakua a ϵ_r relativní permitivita prostředí, ve kterém na sebe náboje působí. Permitivita prostředí je určena součinem ϵ_0 a ϵ_r a závisí mimo jiné na vlhkosti, vodivosti, teplotě a struktuře vláken. V případě elektrizovaných filtrů lze podle Natanson a Gilespie [Natanson, 1957], [Gilespie, 1955] vyjádřit Coulombův zákon pro dvě situace: V situaci, kdy se náboj nachází na vlákně i na zachytávané částici, lze přitažlivou sílu vyjádřit podle vztahu:

$$F = \frac{2 \cdot Q \cdot q}{x} \quad (7.1),$$

kde Q je náboj vztažený na délku vlákna (C/m) (někdy se můžeme setkat s výrazem měrný náboj vlákna), q je náboj zachytávané částice a x vzdálenost částice od povrchu vlákna. Jasnější představu o podílu elektrostatického zachytu na celkové efektivitě zachytu částic získáme při vyjádření bezrozměrného parametru N_{Qq} , který určuje míru působení elektrostatického zachytu vzhledem k parametrům filtrace. Pro nabité vlákno a nabitou částici platí vztah:

$$N_{Qq} = \frac{4 \cdot Q \cdot q \cdot B}{d_f \cdot U_0} = \frac{4 \cdot Q \cdot q}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_p \cdot d_f \cdot U_0} \quad (7.2),$$

kde B je mechanická pohyblivost částic, η viskozita prostředí, d_p poloměr částice, d_f poloměr vlákna a U_0 rychlost proudění vzduchu před vláknem. Detailní popis vztahu mezi výrazy (7.1) a (7.2) uvádí Pich [Pich, 1987].

V případě nabitého vlákna a neutrální částice platí pro přitažlivou sílu vztah.:

$$F = 4 \cdot Q^2 \cdot \frac{\epsilon_1 - 1}{\epsilon_1 + 2} \cdot \frac{r^3}{x^3} \quad (7.3),$$

kde ϵ_1 je dielektrická konstanta částice a r je poloměr částice [Natanson, 1957]. Pro nabité vlákno a neutrální částici má parametr N_Q tvar:

$$N_Q = \frac{D_1 - 1}{D_1 + 2} \cdot \frac{4 \cdot Q^2 \cdot d_p^2}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_f^3 \cdot U_0} \quad (7.4).$$

Z obou vztahů vyplývá, že efektivita daná elektrostatickou silou je přímo úměrná měrnému náboji a nepřímo úměrná třetí mocnině průměru vláken a rychlosti proudění vzduchu před vláknem. Tento závěr je v souladu s praktickým využitím, kdy pro elektrizované filtry jsou s úspěchem použity vrstvy meltblown vyznačující se malým průměrem vláken. Výhodné je též použití skládaných filtrů, kdy s rostoucím počtem skladů při konstantní rychlosti proudění před filtrem klesá rychlost proudění před jednotlivými vlákny.

6.2 Životnost filtrů

Jak uvádí Kolínová [Kolínová, 2002], hlavní výhodou elektrizovaných filtrů je významné zvýšení efektivity filtrace při nezměněném tlakovém spádu. Zvýšení efektivity filtrace může být přitom až dvojnásobné. Nicméně dalším důležitým faktorem určujícím kvalitu elektrizovaných filtrů je stabilita jejich vlastností v čase. V mnoha případech může v průběhu procesu filtrace dojít k významnému poklesu měrného náboje vláken a tím i poklesu filtrační efektivity (viz vztahy 6.1 až 6.4). Tento fakt dosud brání rozšíření elektrizovaných filtrů do mnoha oblastí filtrace. Především při použití snadno dostupných materiálů jako jsou polypropylen a polyetylen u kterých je náboj umístěn na povrchu vlákna, může reálná životnost filtru kolísat řádově mezi hodinami a roky. Jak uvádí Vineyard [Vineyard, 1957], změnu náboje elektrizovaného filtru lze vyjádřit pomocí vztahu

$$P_{\tau}(t) = e^{\left(-\frac{t}{\tau}\right)} \quad (6.5),$$

kde $P_{\tau}(t)$ je pravděpodobnost nalezení nosiče náboje ve stejném stavu v čase t , v jakém se nacházel na počátku a τ je životnost stavu vztažená k jeho energii. Lze tedy očekávat exponenciální pokles měrného náboje vláken a tím i efektivity filtrace. Tento předpoklad ověřil například Brown [Brown, 1993], kdy elektrizované filtry byly opakovaně měřeny při různých teplotách.

Životnost elektrostatického náboje vláken odvisí přímo od jeho podstaty a především způsobu vzniku.

Brown [Brown, 1993] uvádí tři způsoby vzniku elektrostatického náboje vláken:

f) Triboelektrický proces

Tento proces je založen na tření, tedy na mechanickém působení polymerů. Z fyzikálního hlediska dochází k vzájemnému působení polárních skupin dvou materiálů a jejich následné polarizaci. Velikost vzniklého náboje přímo závisí na volbě použitých materiálů. Tento vztah byl experimentálně vyjádřen pomocí tzv. triboelektrické řady [Brown, 1993].

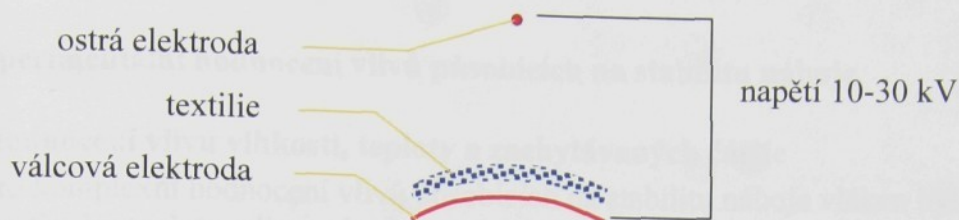
g) Elektrostatické zvláknění

Při působení silného elektrostatického pole na polymer ve formě roztoku, nebo taveniny a následného odstranění rozpouštědla, nebo ochlazení, dochází k nevratné orientaci polárních částí makromolekul a tím i nabíjení vláken.

h) Působení korony

Koronou je nazýván jev, kdy působením silného elektrostatického pole dochází k ionizaci molekul vzduchu, neboli k tvorbě plazmy. Princip elektrizace ukazuje obr. 6.1 vycházejícího z patentu elektrizačního zařízení podaného Univerzitou v Tennessee [US Patent, č: 5,401,446]. Elektrostatické pole je tvořeno dvěma elektrodami, přičemž jedna z nich má velmi malý průměr (označuje se jako „ostrá“). V důsledku velkého zakřivení ostré elektrody dochází v jejím okolí k výraznému zvýšení intenzity elektrostatického pole a tím i k ionizaci molekul vzduchu. Ionty vzniklé oddělením elektronů od jádra se pohybují

k protější elektrodě a nabíjejí vláknenný materiál vložený do prostoru mezi elektrody. Pro další experimenty byl použit právě tento uvedený způsob.



Obr. 6.1: Princip elektrizování vláknenného filtru pomocí korony

Podle Kolínové se elektrizovaný filtr chová jako elektret, tedy látka vyznačující se přítomností permanentních nábojů navzájem opačného znaménka [Kolínová, 2002]. Nicméně nesmíme zapomínat, že vláknenný filtr je porézní látka s vysokým podílem vzduchu a komplikovanou strukturou. Otázkou tedy zůstává, zda za elektret je vhodné považovat jednotlivá vlákna, nebo filtr jako celek. Experimentálně byla měřena intenzita elektrostatického pole na obou plochách vláknenných filtrů vyrobených různými technologiemi a elektrizovanými pomocí korony. Intenzita elektrostatického náboje byla měřena pomocí přístroje Hand E-STAT firmy SIMCO, kde velikost testované plochy pro jedno měření byla $0,12 \text{ cm}^2$. Měření ukázala, že zhruba z devadesáti procent se na jedné straně filtru vyskytují náboje kladné a na druhé straně náboje záporné. Téměř vždy však lze nalézt na jedné ploše náboje vzájemně opačného znaménka. Po určité době (několik dnů) se tato situace stabilizuje a filtr vykazuje na každé straně nižší náboj a zároveň minimální počet nábojů vzájemně opačného znaménka. Nebylo možné měřit intenzitu elektrostatického pole jednotlivých vláken, nicméně lze usuzovat, že jejich polarizace není vždy v souladu s polarizací filtru jako celku. Z uvedených údajů je dále patrné, že u vláknenného filtru dochází záhy po elektrizování pomocí korony ke snížení elektrostatického náboje díky redistribuci nábojů na povrchu jednotlivých vláken.

Jak uvádí Brown [Brown, 1993], stabilitu elektrostatického náboje ovlivňují nepříznivě tyto vnější faktory:

- a) Působení vnější energie tepelné, nebo energie ve formě záření

Náboj na povrchu vláken má přirozenou tendenci přemístit se tak, aby dosáhl stavu charakterizovaného nižší energií. Jeho přesunu ale brání tzv. energetická bariéra daná působením molekul na povrchu vlákna [Brown, 1993]. Působením vnější energie může dojít k překonání energetické bariéry a přesunu náboje.

- b) Působení vzdušné vlhkosti

Vzdušná vlhkost zvýší výrazně vodivost vlákna a umožní tak přesun náboje.

- c) Působení zachytávaných částic

Podobně jako vzdušná vlhkost i částice mající určitou vodivost jsou zachyceny na povrchu vlákna způsobují úbytek náboje. Dochází tak ke dvěma protichůdným jevům. Na jedné straně zachycované částice zvyšují zaplnění filtru a tím i jeho filtrační efektivitu, na straně druhé způsobují snížení efektivitu vlivem úbytku náboje na povrchu vláken.

- d) Přítomnost jiného materiálu o vyšší vodivosti

Příkladem může být vláknenná směs obsahující vlákna s větší vodivostí a tím i s větší možností přesunu náboje do polohy s nižší energií. Prakticky se tento problém vyskytl při použití nanovláknenných vrstev vyrobených z polyvinylalkoholu.

Z praktického hlediska je důležité, že všechny citované faktory působící na stabilitu náboje mohou při výrobě i používání elektrizovaných filtrů reálně nastat. Proto byl následující experiment zaměřen na komplexní hodnocení těchto vlivů.

6.3 Experimentální hodnocení vlivů působících na stabilitu náboje

6.3.1 Hodnocení vlivu vlhkosti, teploty a zachytávaných částic

Pro komplexní hodnocení vlivů působících na stabilitu náboje vláken byl testován vliv vlhkosti, vliv teploty, vliv zachytávaných částic a kombinace uvedených faktorů. Tímto tématem se zabývala diplomová práce Pokorné na Katedře netkaných textilií [Pokorná, 2004]. Testy se zaměřily na dva typy vlákenných vrstev. První typ reprezentovala vrstva ze staplových vláken připravená mykáním a příčným kladením a zpevněná vpichováním. Druhý typ reprezentovala textilie tvořená vrstvou spunbond a meltblown zpevněných rastrovaným kalandrem. Parametry obou typů filtrů uvádí tab. 6.1 . Pro ověření vlivu vlhkosti, teploty a jejich kombinace byla testována efektivita filtrace pomocí aerosolu NaCl při filtrační rychlosti 7 m/sec. Ověřování vlivu zachytávaných částic a kombinace všech vlivů byla testována pomocí syntetického prachu (popis a parametry testů viz kapitola 4). Proběhlo pět měření pro každý vzorek, směrodatné odchylky jsou uvedeny v grafech na obr. 6.2 až 6.5.

Vzorek	vpichovaná textilie	Spunbond / meltblown (SM)
Výrobce	Vyrobeno na poloprovozní lince Katedry netkaných textilií	Pegas a.s., vzorek určený pro testování filtračních vlastností
Plošná hmotnost	270 g/m ²	35 g/m ² (15 g/m ² /20 g/m ²)
Materiál	PP	PP
Jemnost vláken	6,7 dtex a 1,3 dtex v poměru 70/30	0,012 dtex a 2,8 dtex
Tlakový spád (průtok 70 l/min)	5 Pa	39 Pa
Efektivita zachytu nenabitého filtru	8,1 %	33 %

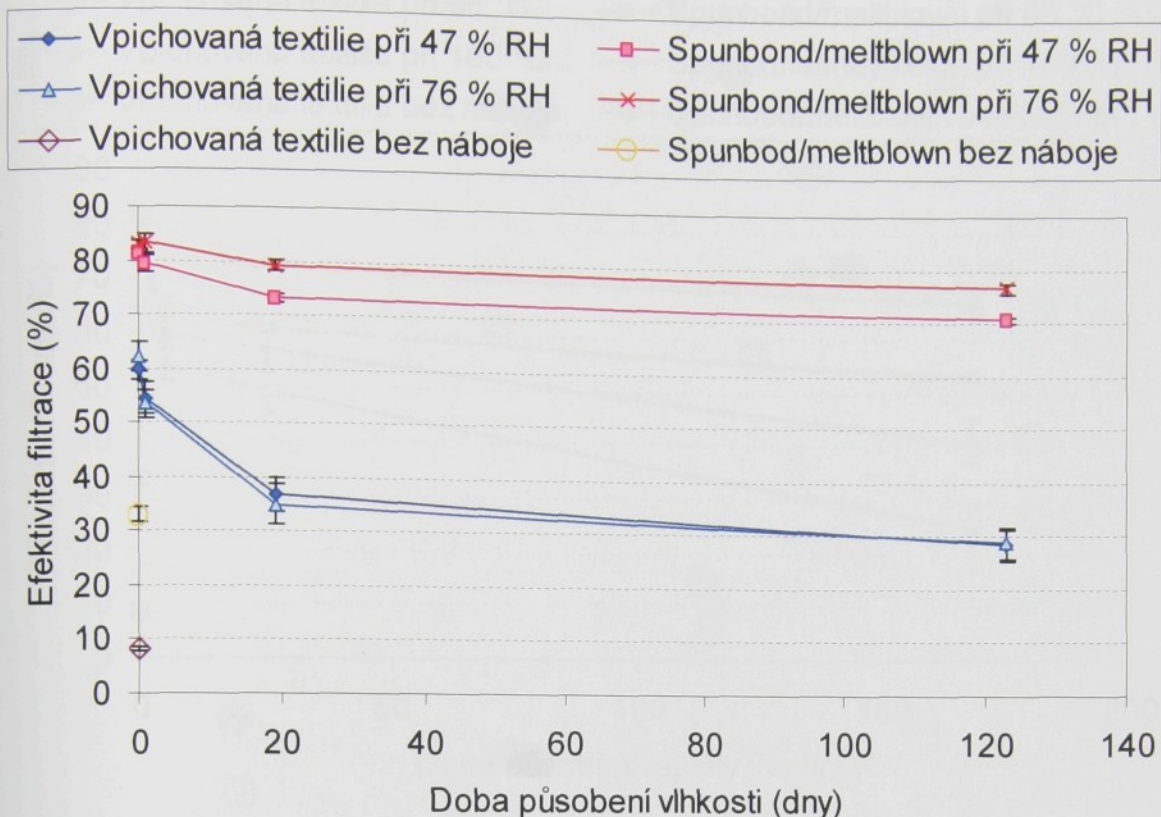
Tab. 6.1: Parametry testovaných elektrizovaných filtrů.

Obě textilie byly elektrizovány pomocí koronového výboje na patentovaném zařízení University of Tennessee [26] při nastavení následujících parametrů: napětí horní „ostré“ elektrody 25 kV, napětí spodní válcové elektrody –5 kV, vzdálenost elektrod 5 cm a rychlost posuvu 0,5 m/min.

a) Vliv vlhkosti

Elektrizované filtry byly umístěny do dvou exikátorů o relativních vlhkostech 47 % RH a 76 % RH. V tomto prostředí za teploty 20 °C relaxovaly po dobu 20, 456 a 2952 hodin. Obr. 6.2 ukazuje závislost efektivy uvedených filtrů v závislosti na době pobytu v prostředí s definovanou vlhkostí.

Z obr. 6.2 lze vyčíst výrazný počáteční pokles efektivy vlivem vlhkosti a jeho následnou stabilizaci. V případě filtru spunbond/meltblown obsahujícího jemná vlákna můžeme pozorovat výraznější pokles efektivy při působení vyšší vlhkosti, zatímco u textilie ze staplových vláken je rozdíl téměř nezatelný. Ve všech případech je efektivita po zhruba čtyřech měsících působení vlhkosti výrazně vyšší oproti efektivitě před elektrizací.

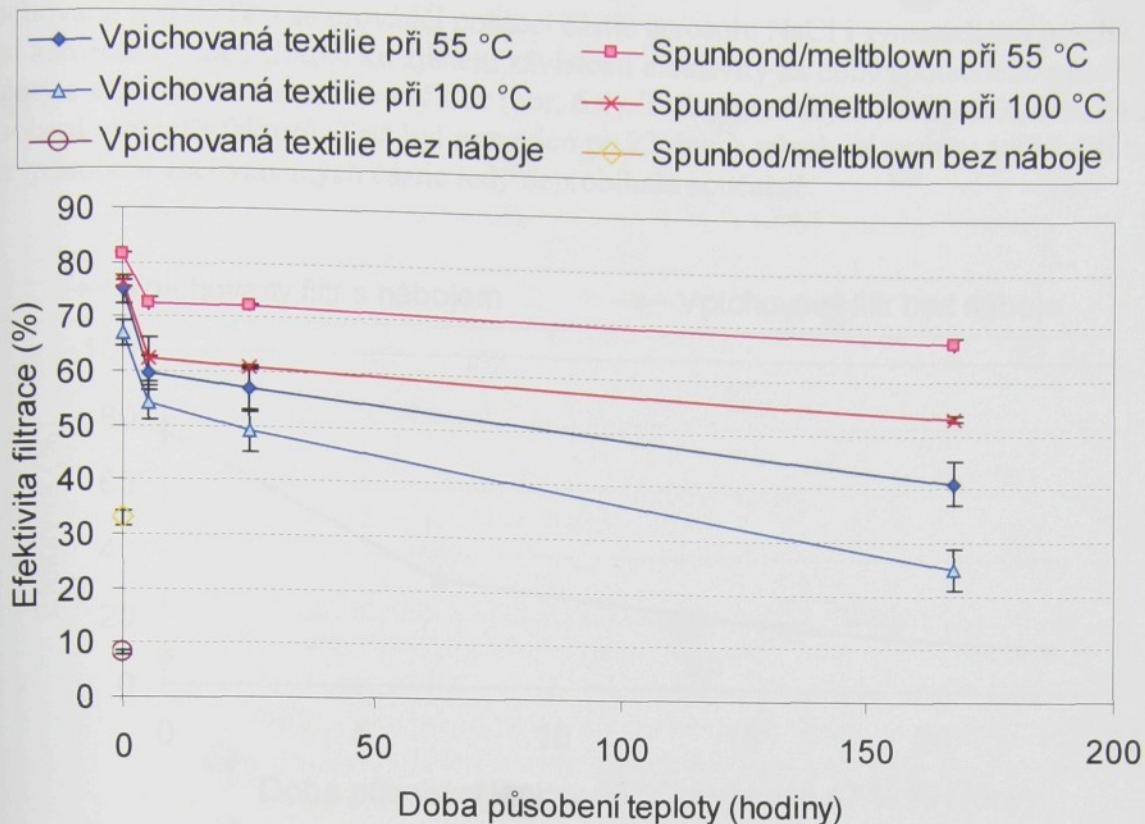


Obr. 6.2: Změna efektivity elektrizovaných filtrů v průběhu relaxace v prostředí s definovanou vlhkostí.

Vliv teploty

Elektrizované filtry byly rozděleny do dvou skupin a vloženy do horkovzdušné komory. Na jednu skupinu působila teplota 55 °C, na druhou teplota 100 °C. Způsob elektrizace a testování filtračních vlastností odpovídá předešlým vzorkům. Výsledný vliv teploty na efektivitu elektrizovaných filtrů popisují tabulka a obrázek.

Na obr. 6.3 můžeme pozorovat výrazný pokles efektivity filtrace již při působení teploty 55 °C. Z toho lze usuzovat na nevhodnost použití elektrizovaných filtrů v prostředí se zvýšenou teplotou. Problému mohou nastat například i při jejich použití uvnitř automobilu, kde teplota může dosahovat až 70 °C. [Jahoda, 2004]. Nicméně i v tomto případě dochází k postupné stabilizaci hodnot efektivity na vyšší úrovni, než tomu bylo u filtrů bez náboje.



Obr. 6.3: Změna efektivity elektrizovaných filtrů při působení dvou různých teplot.

Vliv zachytávaných částic

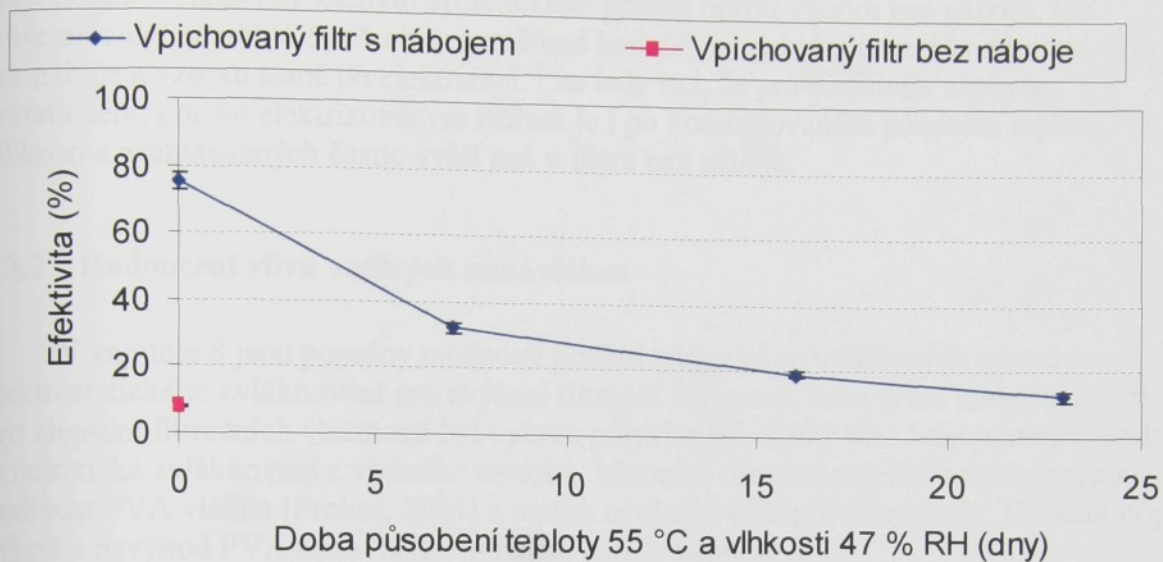
Pro určení vlivu zachytávaných částic se jako velmi vhodná jevila metoda testování syntetickým prachem. Metoda testování aerosolem NaCl není vhodná z důvodu malé velikosti částic a jejich nízké koncentrace ve vzduchu. Kromě toho pro tento typ testu je vhodné i složení syntetického prachu, neboť uhlíkové částice v něm obsažené zvyšují vodivost vláken [Prokeš, 2001] a tím přispívají k přesunu náboje do polohy s nižší energií. V časových intervalech tří minut byl vnášen do filtru syntetický prach a měřena jeho efektivita a tlakový spád (viz kapitola 4). Z důvodu použité metody nebylo možno testovat textilii spunbond/meltblown, neboť i bez náboje vykazuje zachyt 99 % částic syntetického prachu a tlakový spád přesahuje 1000 Pa. Obr. 6.5 ukazuje změnu efektivity a tlakového spádu pro vpichovaný filtr neelektrizovaný a elektrizovaný.

Z výsledku je patrný vztah mezi elektrostatickým nábojem na povrchu vláken a kinetikou filtrace. V průběhu zanášení filtru bez elektrostatického náboje dochází k zaplňování mezivláknenných prostor a tím alespoň zpočátku k růstu efektivity filtrace a tlakového spádu. U filtru elektrizovaného je tento proces doplněn procesem snižování velikosti elektrostatického náboje vlivem usazování vodivých částic, který vede k snižování efektivity filtrace. Výsledkem těchto protikladných působení je pak mnohem stabilnější chování elektrizovaného filtru. Můžeme pozorovat vyšší počáteční efektivitu než u filtru bez náboje a její nižší změnu v průběhu procesu filtrace. Popsané chování bylo autorem pozorováno také u mnoha jiných textilních filtrů.

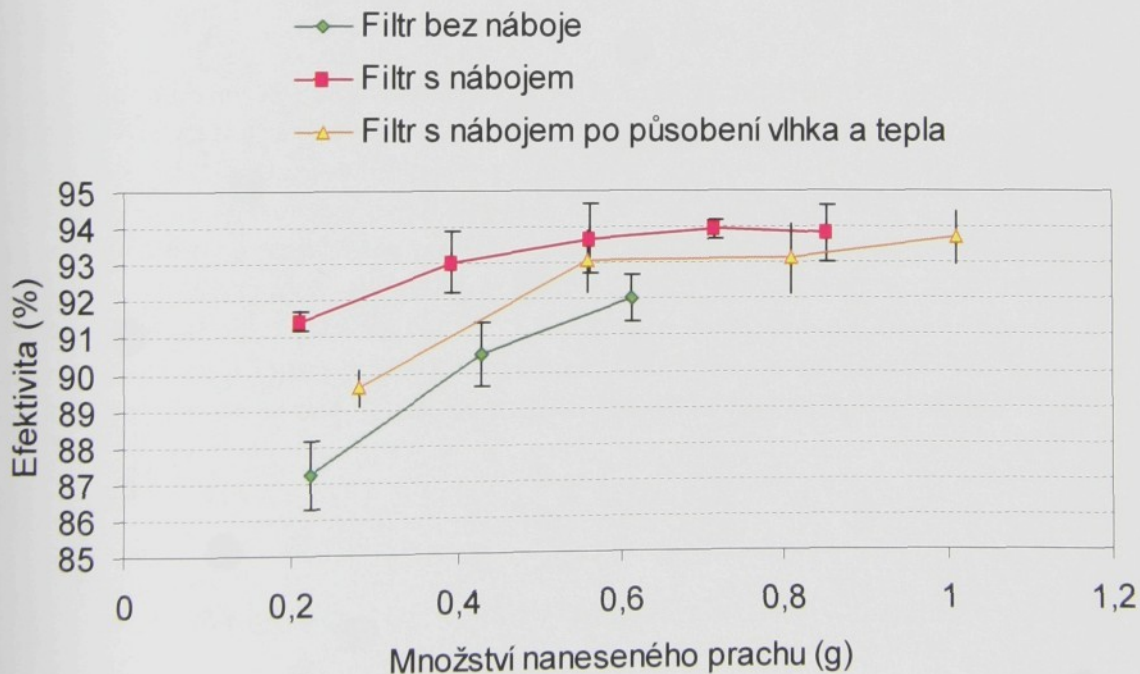
Vliv kombinace faktorů

Zajímala nás kombinace vlivu teploty, vlhkosti i zachytávaných částic na stabilitu náboje. Použita byla teplota 55 °C a vlhkost 47 % RH. Realizace současného působení obou vlivů proběhla umístěním exikátoru se vzorky do horkovzdušné komory. Z výše uvedených důvodů způsobivosti pro test syntetickým prachem byla hodnocena pouze

vpichovaná textie. Test se prováděl pomocí částic aerosolu NaCl i syntetického prachu. Test aerosolem NaCl sloužil ku zjištění závislosti efektivity na době společného působení teploty a vlhkosti na elektrizovaný filtr (obr. 6.4). Test syntetickým prachem kombinoval působení všech tří faktorů. Test byl proveden po 23 dnech působení teploty a vlhkosti na filtr, působení zachytávaných částic tedy neprobíhalo současně.



Obr. 6.4: Změna efektivity zachytu částic NaCl u elektrizovaného filtru při kombinovaném působení vlhkosti 47 % RH a teploty 55 °C.



Obr. 6.5: Změna efektivity zachytu syntetického prachu v závislosti na množství prachu. Testován byl vzorek bez elektrostatického náboje, vzorek po nánosu náboje a vzorek po nánosu náboje a po 23 dnech působení teploty 55 °C a vlhkosti 47 % RH. Všechny vzorky byly testovány do okamžiku dosažení tlakového spádu 250 Pa.

Z obr. 6.4 je patrné, že při kombinovaném působení vlhka a tepla dochází po 25 dnech ke snížení efektivity zachytu částic NaCl téměř na úroveň, kterou měl filtr před nanesením náboje. Tento fakt je varovný i z důvodu relativně nízké použité teploty a vlhkosti.

Stejný vzorek vystavený vlhku a teplotě po dobu 23 dnů nicméně vykazuje stále vyšší hodnotu efektivity zachytu syntetického prachu oproti vzorku bez náboje. Jak můžeme vidět na obr. 6.5, všechny naměřené hodnoty se pohybují mezi hodnotami vzorku bez náboje a vzorku těsně po elektrizaci. Lze tedy říci, že pro efektivitu zachytu syntetického prachu elektrizovaným filtrem je i po kombinovaném působení teploty, vlhkosti a zachytávaných částic vyšší než u filtru bez náboje.

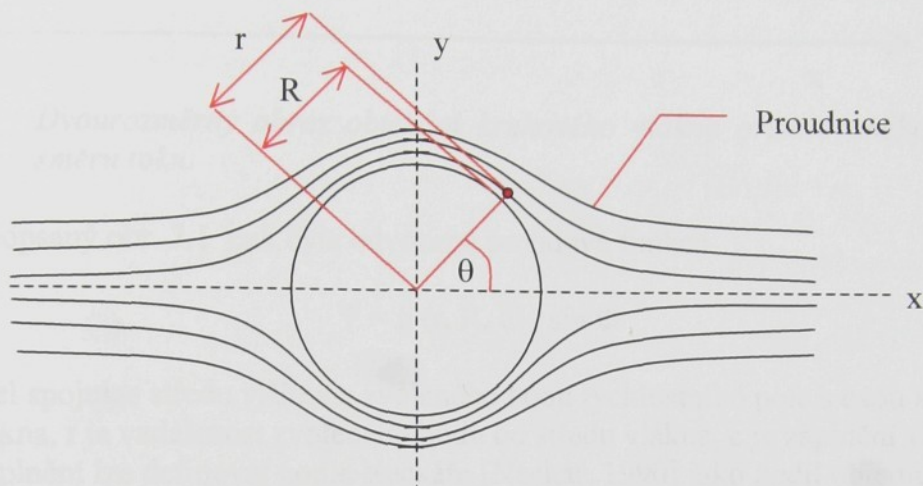
6.3.2 Hodnocení vlivu vodivých nanovláken

V kapitole 8 jsou popsány možnosti použití nanovláken vyrobených metodou elektrostatického zvlákňování pro zvýšení filtrační účinnosti. Jako první materiál používaný pro zlepšení filtračních vlastností byl vybrán polyvinylalkohol PVA. Jeho hlavní výhodou je netoxické zvlákňování z vodného roztoku. Nicméně musíme mít na paměti značnou vodivost PVA vláken [Prokeš, 2001] a malou odolnost vůči působení vody. Detailní popis výhod a nevýhod PVA nanovláken můžeme najít v kapitole 8.

7 Vliv orientace vláken na filtrační vlastnosti

7.1 Vliv orientace vláken na tok tekutiny filtrem

Pro teoretické odvozování filtračních vlastností je nutné znát pole rychlosti, neboť na rychlosti v každém místě filtru závisí jednotlivé mechanismy filtrace jakož i tlakový spád celého filtru. Dále uvedené vztahy autor převzal z práce Browna [Brown, 1993] a Picha [Pich, 1964, 1987]. Pro odvozování pole rychlosti je jako filtr obvykle uvažováno vlákno, nebo soubor vláken kruhového průřezu umístěných kolmo ke směru toku. Příkladem, který znázorňuje obr. 7.1, může být teorie samostatného vlákna, která řeší obtékání jednoho vlákna při započítání vlivu vláken okolních.



Obr. 7.1: Obtékání kruhového vlákna o průměru R . Proudnice zobrazují trajektorii pohybu myšlených bodů filtrovaného média. Hodnota proudové funkce je dána směrnici tečny proudnice v bodě B daném polárními souřadnicemi r a θ .

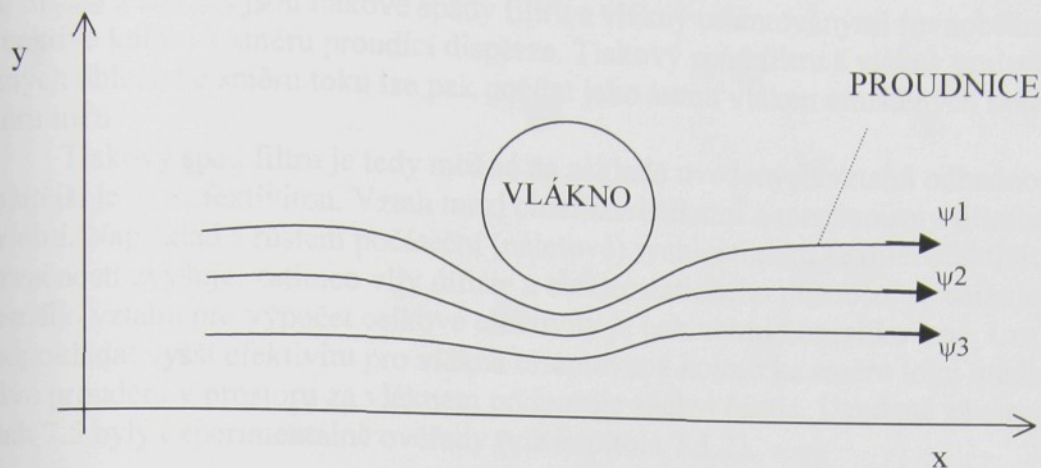
Často užívaným předpokladem při výpočtech je ustálený tzv. Stokesův tok [Brown, 1993], který je charakterizován osovou symetrií proudnic (viz obr. 7.1) a neměnností tvaru proudnic při změně rychlosti proudění filtrované disperze před vláknem. Stokesův tok je podmíněn hodnotou Reynoldsova čísla Re blízkí se nule (viz vztah 3.6). Pro další úvahy musíme mít tedy na paměti, že použité vztahy neplatí zcela přesně, neboť již při malých rychlostech se v prostoru za vláknem tvoří víry a tok filtrované disperze není zcela ustálený. Při hustotě vzduchu zhruba $1,2 \text{ kg/m}^3$, viskozitě zhruba $1,81 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{sec}$ a průměru vláken do $20 \text{ }\mu\text{m}$ lze použít odvozené vztahy pro rychlosti nižší, než 1 m/sec .

Pole rychlosti se zde vyjadřuje pomocí proudové funkce určené vztahy

$$v_x = \frac{\partial \Psi}{\partial y}, v_y = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (7.1),$$

kde Ψ je proudová funkce, x a y jsou složky souřadnic, v_x a v_y jsou rychlosti ve směrech x a y .

Proudová funkce definovaná v určitém bodě vyjadřuje pohyb tekutiny mezi tímto bodem a zvoleným počátkem [Brown, 1993]. Spojením bodů se stejnou hodnotou proudové funkce získáme křivky vyjadřující trajektorii pohybu tekutiny. Tyto nazývají se proudnice. Můžeme je vidět na obr. 7.2, jež vyjadřuje dvourozměrný obraz obtékání kruhového vlákna orientovaného kolmo ke směru toku.



Obr. 7.2: Dvourozměrný obraz obtékání kruhového vlákna orientovaného kolmo ke směru toku.

Pro model popsaný obr. 7.1 pak byla odvozena proudová funkce

$$\Psi = g(r, R, c) \cdot \sin \Phi \quad (7.2),$$

kde Φ je úhel spojnice středu vlákna a zvoleného bodu rychlostního pole s osou x, R je poloměr vlákna, r je vzdálenost zvoleného bodu od středu vlákna, c je zaplnění vlákenného systému. Zaplnění lze definovat podle Neckáře [Neckář, 1990] jako podíl objemu vláken a celkového objemu filtru. Funkce g je závislá na použitém modelu filtru a obecně ji lze popsat vztahem:

$$g = A.r + \frac{B}{r} + C.r \cdot \ln\left(\frac{r}{R}\right) + D.r^3 \quad (7.3),$$

kde A, B, C, D jsou konstanty závislé na r a zaplnění, které se u jednotlivých autorů liší. Z tohoto předpokladu vycházejí například práce Happela a Kuwabary [Brown, 1993].

Výše uvedené rovnice lze nicméně použít i pro vlákno umístěné paralelně se směrem hlavního toku. V tom případě je nenulová pouze jedna složka rychlosti (paralelní s osou vlákna) a tu lze vypočítat podle rovnice:

$$U_z = \frac{-U_c \left(r^2 - R^2 - \frac{2R^2}{c} \cdot \ln\left(\frac{r}{R}\right) \right)}{2.R^2 \cdot \left(-\frac{1}{2} \cdot \ln(c) - 0,75 + c - \frac{c^2}{4} \right)} \quad (7.4),$$

kde U_z je rychlost ve směru toku a U_c rychlost počáteční.

Tlakový spád filtru lze vypočítat z Navier-Stokesovy rovnice vyjádřené v kapitole 8 vztahem 8.1. Tlakový spád Δp vypočítaný podle modelu vlákna rovnoběžného s tokem má zhruba poloviční velikost oproti tlakovému spádu počítaného podle Kuwabarova modelu vlákna umístěného do směru kolmého k toku. Platí tedy vztah

$$\frac{\Delta p_{kolmo}}{\Delta p_{podél}} = 2 \quad (7.5),$$

kde $\Delta p_{\text{podél}}$ a Δp_{kolmo} jsou tlakové spády filtru s vlákny orientovanými rovnoběžně respektive kolmo k směru proudící disperze. Tlakový spád filtru s vlákny umístěnými v různých úhlech ke směru toku lze pak počítat jako sumu vláken umístěných kolmo a podél směru toku.

Tlakový spád filtru je tedy možné na základě uvedených vztahů odhadnout. Složitější je to s efektivitou. Vztah mezi charakteristikami a mechanismy filtrace není triviální. Například s růstem počáteční (náletové) rychlosti toku se dílčí efektivita daná setrvačností zvyšuje, zatímco vliv difuze a elektrostatického působení se snižuje. Zjištění přesného vztahu pro výpočet celkové efektivy je pak velmi komplikované. Lze nicméně předpokládat vyšší efektivitu pro vlákna orientovaná kolmo ke směru toku média, neboť vířivé proudění v prostoru za vláknem podporuje zachyt částic. Uvedené závěry, zejména vztah 7.5 byly experimentálně ověřeny (viz kapitola 7.3.2).

7.2 Vliv orientace vláken na kinetiku filtrace

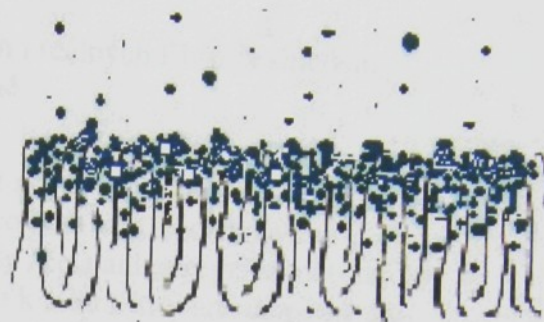
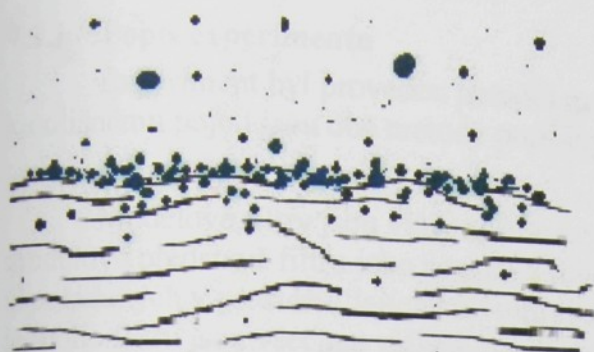
Veškeré doposud uvedené vztahy platí pro tzv. statickou fázi filtrace, kdy se hodnoty efektivy a tlakového spádu nemění. Tato fáze vystihuje začátek procesu filtrace, kdy částice zachytávané vlákny nemění ještě výrazně strukturu filtru a tím i jeho vlastnosti. S tím, jak jsou částice zachytávány na vláknech, dochází k mnoha dějům zároveň. Těmi nejvýraznějšími je jednak k zaplňování mezivláknenných prostor, jednak zachyt nalétávajících částic již zachycenými částicemi [Pich, 1964]. Zachycené částice tvoří nepravidelné útvary zvané dendrity, které se v podstatě stávají účinnou součástí filtru. Z této skutečnosti vyplývá již zmiňovaný růst efektivy filtrace a tlakového spádu v průběhu procesu filtrace. Tento předpoklad ale neplatí vždy, v důsledku zmenšování mezivláknenných prostor dochází ke zvyšování rychlosti v okolí vlákna, následnému uvolnění již zachycených částic a tedy i k poklesu efektivy a tlakového spádu (viz kapitola 9).

Lze očekávat, že orientace vláken má na uvedený proces vliv. Při filtraci naplavovanými filtry, jež mají vysoké zaplnění a u kterých jsou vlákna plošně izotropní a zároveň orientována kolmo k toku, se zachycené částice koncentrují na povrchu filtru a tvoří tzv. filtrační koláč. Tento jev lze pozorovat též u tkanin, vrstev spunbond, vrstev meltblown, vpichovaných vrstev s nataveným povrchem a v menší míře též u běžných vpichovaných vrstev a textilií termicky, nebo chemicky spojených. Vznik filtračního koláče je podmíněn velkým zaplněním v blízkosti povrchu filtru, kdy zachycené částice „přemostí“ prostory mezi vlákny a způsobí další růst zaplnění v blízkosti povrchu [Wakeman, 1999]. U filtrů čistitelných je jeho tvorba žádoucí, neboť se snadno odstraňuje. Čištění je možno provést pulzně s velmi krátkým přerušením procesu filtrace. U filtrů jednorázových však způsobuje prudký nárůst tlakového spádu a ekonomickou neefektivnost, neboť ve filtru je vlastně využita je pouze část vláknenné hmoty (viz obr.7.3).

U vláken orientovaných paralelně s tokem je zaplnění v těsné blízkosti povrchu nižší a proudění vykazuje nižší turbulence. Částice tak mohou pronikat hlouběji do filtru. Obr. 7.3 ukazuje vrstvu s vlákny orientovanými kolmo a paralelně s tokem a představu, jak dochází k zaplňování mezivláknenných prostor částicemi. Obr. 7.4 pak ukazuje řez skutečnými vláknennými filtry s odlišnou orientací vláken. Parametry filtrů zobrazených na obr.7.4 jsou uvedeny v kapitole 7.3.1.

VLÁKNA KOLMÁ K TOKU VZDUCHU

VLÁKNA PARALELNÍ S TOKEM VZDUCHU



Směr toku

Směr toku

Obr. 7.3: Představa zaplňování odlišně orientovaných vlákenných vrstev částicemi v průběhu procesu filtrace.



Obr. 7.4: Zaplňování filtrů lišících se pouze orientací vláken. Snímky pocházejí z řezů kolmo a příčně kladených vrstev stejných parametrů, které byly zaneseny stejným množstvím standardizovaného syntetického prachu. Parametry prachu ASHRAE popisuje kapitola 3.4, parametry filtrů lze nalézt v tab. 7.1.

Lze tedy očekávat, že vlákenná vrstva mající vlákna orientovaná paralelně s tokem bude mít větší životnost, otázkou zůstává jak dalece. Dále není jisté, jak se změna orientace vláken projeví na efektivitě. Vzhledem k technologickým možnostem Katedry netkaných textilií byla tato problematika řešena experimentálně.

7.3 Experiment

Cílem experimentu bylo ověřit tři základní předpoklady. Za prvé se vyšetřovala platnost vztahu pro modelové i komerčně vyráběné filtry. Jinými slovy platnost úvahy, že tlakový spád materiálu s vlákny orientovanými paralelně s tokem filtrované disperze je poloviční vzhledem k tlakovému spádu materiálu s vlákny orientovanými kolmo k toku. Za druhé byl ověřován předpoklad vlivu orientace vláken reálného filtru na kinetiku filtrace. Konkrétně se jednalo o vliv orientace vláken na změnu tlakového spádu v průběhu procesu filtrace a

tím i životnost filtru. Třetím předpokladem byl vliv orientace vláken na efektivitu zachytu částic.

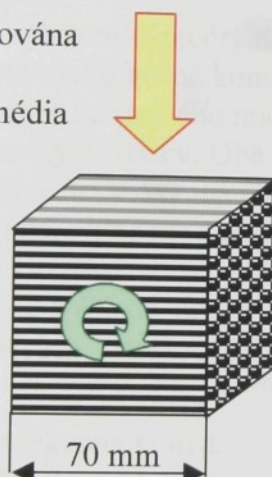
7.3.1 Popis experimentu

Experiment byl proveden pomocí modelových i reálných filtrů. Vzhledem k odlišnému pojetí jsou obě metody popsány odděleně.

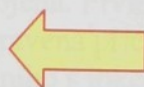
a) Modelové filtry

Modelové filtry jsou vlákenné útvary, které se svou strukturou co nejvíce blíží modelové představě filtru jako soustavy rovných válcových vláken definované uspořádáním v prostoru. Jejich hlavním rysem je tedy zcela anizotropní struktura, kdy u jednoho filtru jsou všechna vlákna orientována kolmo k toku filtrované disperze a u druhého filtru jsou všechna vlákna orientována paralelně s tokem. Schéma modelového filtru ukazuje obr. 7.5. Svazek definovaného množství rovných vláken je umístěn v krychli, což umožňuje u jednoho vzorku testovat počáteční filtrační vlastnosti (vlastnosti na počátku procesu filtrace) pro obě uspořádání vláken vzhledem k toku filtrované disperze. Tím jsou zcela vyloučeny neblahé vlivy dané zejména lokální hmotovou nestejnoměrností. Pro omezení okrajových vlivů na proudění v blízkosti stěn krychle je důležitá dostatečná velikost filtru. Jako výhodná se experimentálně ukázala krychle o délce hrany 70 mm.

Vlákna orientována
kolmo k toku
filtrovaného média



Vlákna orientována
paralelně s tokem
filtrovaného média



Obr. 7.5 : Schéma modelového filtru s definovaným uspořádáním vláken vzhledem ke směru toku filtrovaného média.

Výhodou modelového filtru je definovaná struktura, což umožňuje poměrně přesně ověřit teoretické předpoklady. Nevýhodný je z důvodu praktické nereálnosti některých jeho parametrů. Především je to vysoká objemná hmotnost modelového filtru a nemožnost dosáhnout u reálných filtrů struktury, u které jsou všechna vlákna orientována rovnoběžně s tokem filtrovaného média. Vysoká objemná hmotnost je daná tím, že vlákna nemohou být ukotvena žádným pojivem a pro dosažení homogenního struktury jsou uspořádána těsně u sebe.

Experiment byl proveden tak, že svazek monofilních vláken byl umístěn do papírové krychle s otevřenými dvěmi protilehlými stranami (viz obr. 7.5) a u připraveného filtru změřen tlakový spád na přístroji DFT-2. Poté se otevřené strany krychle zaslepily a naopak prořízly jiné dvě tak, aby orientace vláken filtru byla odlišná. Následovalo další měření tlakového spádu [Hrůza, 2003]. Parametry modelového filtru a testu ukazuje tab.7.1:

Průměr vláken:	35 μm .	
Materiál:	polypropylen	0,035 mm
Objemová hmotnost:	72,2 kg/m^3	
Délka hrany krychle:	70 mm	$\mu = \frac{72,2}{1000} = \text{asi } 0,08$
Rychlost filtrace:	1 m/sec	
Testovací metoda:	syntetický prach ASHRAE	

Tab. 7.1: Parametry modelových filtrů a testu jejich filtračních vlastností.

b) Reálné filtry s řízenou strukturou

Druhým způsobem ověření uvedených předpokladů byly testy komerčně připravených objemných filtrů, které se díky odlišné technologii kladení vláknenné vrstvy lišily pouze mírou orientace vláken vzhledem k toku filtrované disperze. Anizotropie uložení vláken je však u obou reálných filtrů pouze částečná. Nevýhodou je, že zkoumaná vláknenná vrstva neodpovídá přesně modelové představě. V tomto konkrétním případě je důležitý fakt, že vlákna nejsou orientována přesně kolmo, nebo paralelně s tokem. Lze tedy očekávat, že naměřené hodnoty reálných filtrů se u odlišně orientovaných vláken budou lišit méně, než hodnoty získané pomocí modelových systémů. Výhodou naopak je fakt, že výsledky odpovídají realitě. Ve skutečnosti mají všechny vláknenné filtry jen částečně orientovaná vlákna. Navíc by bylo velmi obtížné vytvořit modelový filtr mající vlákna umístěna paralelně s tokem.

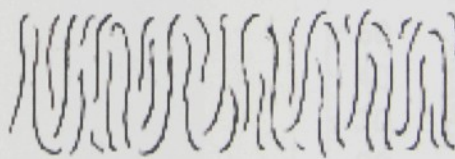
Díky strojnímu vybavení Katedry netkaných textilií byla možná příprava vzorků majících stejné parametry, jako běžné komerčně vyráběné filtry. Porovnávány byly objemné textilie připravené ze stejného materiálu, mající stejné parametry a lišící se pouze způsobem kladení vláknenných vrstev. Obě textilie byly připraveny ze směsi staplových vláken základních a pojivých. Vláknenná surovina byla namíchána, mykáním ojednocena, vzniklá vláknenná vrstva dále kladena a tepelně pojena. První textilie mající vlákna orientována spíše kolmo ke směru toku byla připravena příčným kladením. Druhá textilie mající vlákna orientována spíše do směru paralelního s tokem byla připravena kolmým kladením, viz obr.7.6 [Hrůza, Jirsák, 2002] .

Příčně kladená vláknenná vrstva.
Vlákna kolmo k toku vzduchu.

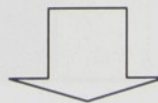
Kolmo kladená vláknenná vrstva.
Vlákna orientovaná paralelně
s tokem vzduchu.



Směr
toku



Směr
toku



Obr. 7.6.: Rozdíly mezi příčným a kolmým kladením ve smyslu orientace vláken k toku.

U získaných vláknenných filtrů se nejprve měřila závislost tlakového spádu na náletové rychlosti. Poté byla v časových odstupech na obou filtrech měřena efektivita zachytu standardizovaného syntetického prachu a tlakový spád. Měření bylo ukončeno po dosažení tlakového spádu 250 Pa, což je omezující podmínka používaná u normy EN 779 [EN 779, 1993]. Parametry připravených filtrů ukazuje tab. 7.2.

Materiálové složení	50 % PET	30 % PET	20 % PET
Jemnost vláken	6,7 dtex	3,5 dtex	2,2 dtex
Délka vláken	67 mm	60 mm	30 mm
Tloušťka filtru	20 mm		
Plošná hmotnost	Od 350 g/m ² do 510 g/m ² . Srovnávány byly materiály stejných plošných hmotností.		
Hustota	Od 17,5 kg/m ³ do 25,5 kg/m ³ .		

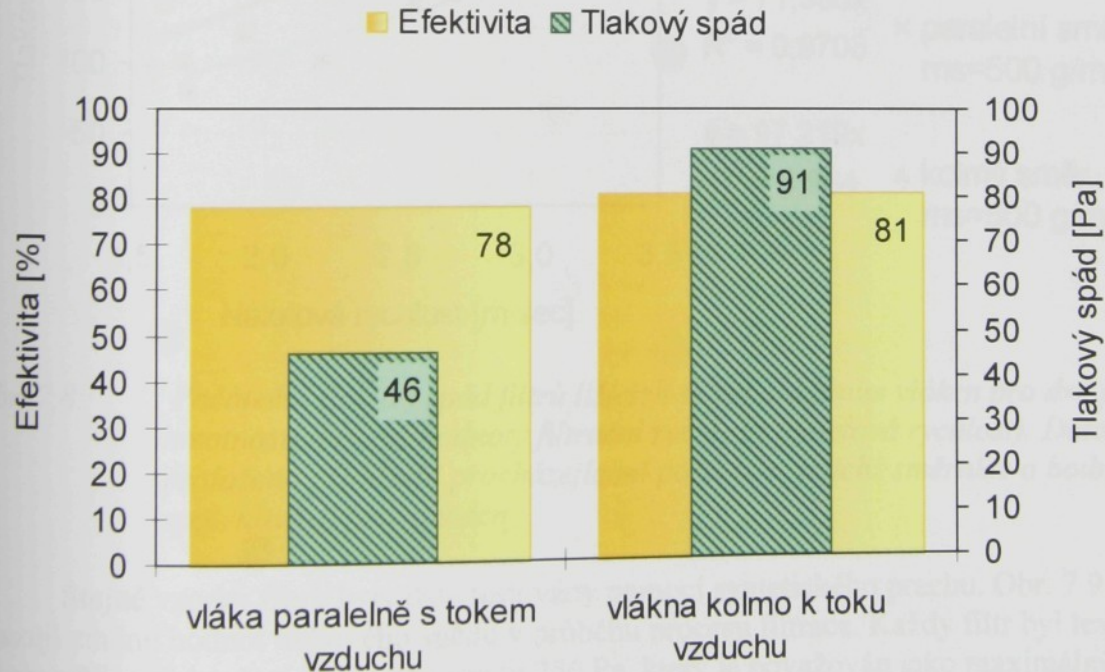
Tab. 7.2 : Materiálové složení vlákenných filtrů. Materiál Pl/coPl značí bikomponentní pojivé vlákno v uspořádání jádro /plášť.

7.3.2 Výsledky testů

Nejprve byl ověřován vztah 7.5 pomocí modelových filtrů. Obr. 7.7 ukazuje tlakový spád a počáteční efektivitu modelového filtru testovaného syntetickým prachem při filtrační rychlosti 1 m/sec. Tab. 7.3 obsahuje průměrné hodnoty a směrodatné odchylky z pěti měření.

	vlákna orientována rovnoběžně s tokem vzduchu		Vlákna orientována kolmo k toku vzduchu	
	průměrná hodnota	směrodatná odchylka	průměrná hodnota	směrodatná odchylka
Efektivita (%)	78	1,2	81	2,01
Tlakový spád (Pa)	46	1,5	91	2,3

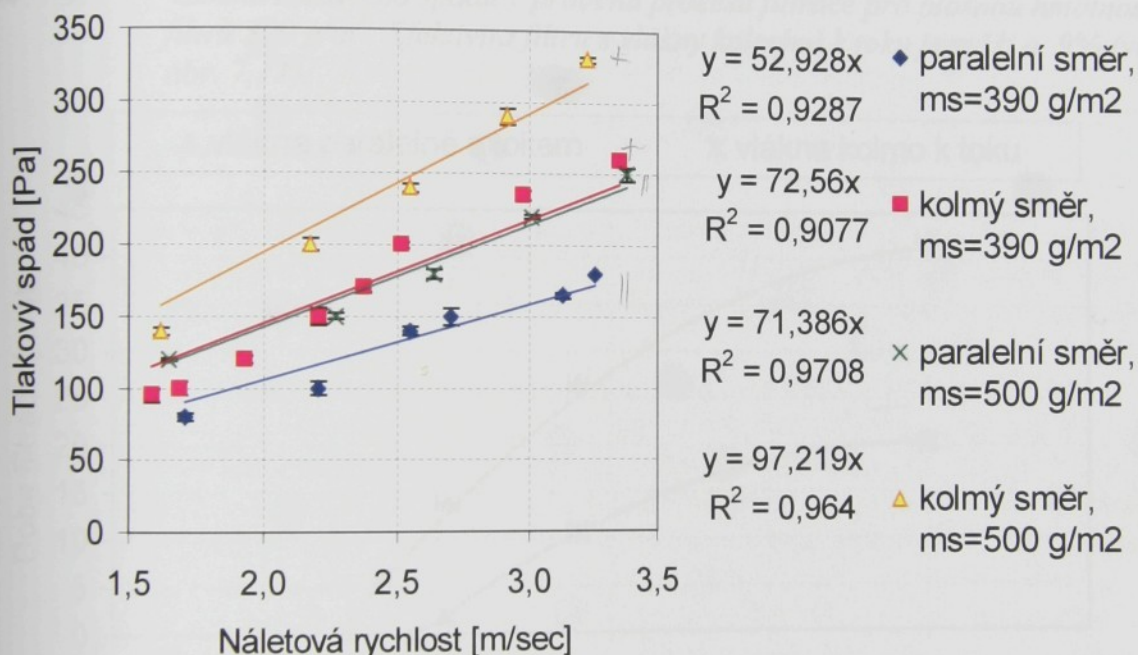
Tab. 7.3: Filtrační vlastnosti modelových filtrů lišících se orientací vláken vzhledem ke směru toku filtrované disperze.



Obr. 7.7 : Počáteční tlakový spád a efektivita modelových filtrů lišících se orientací vláken.

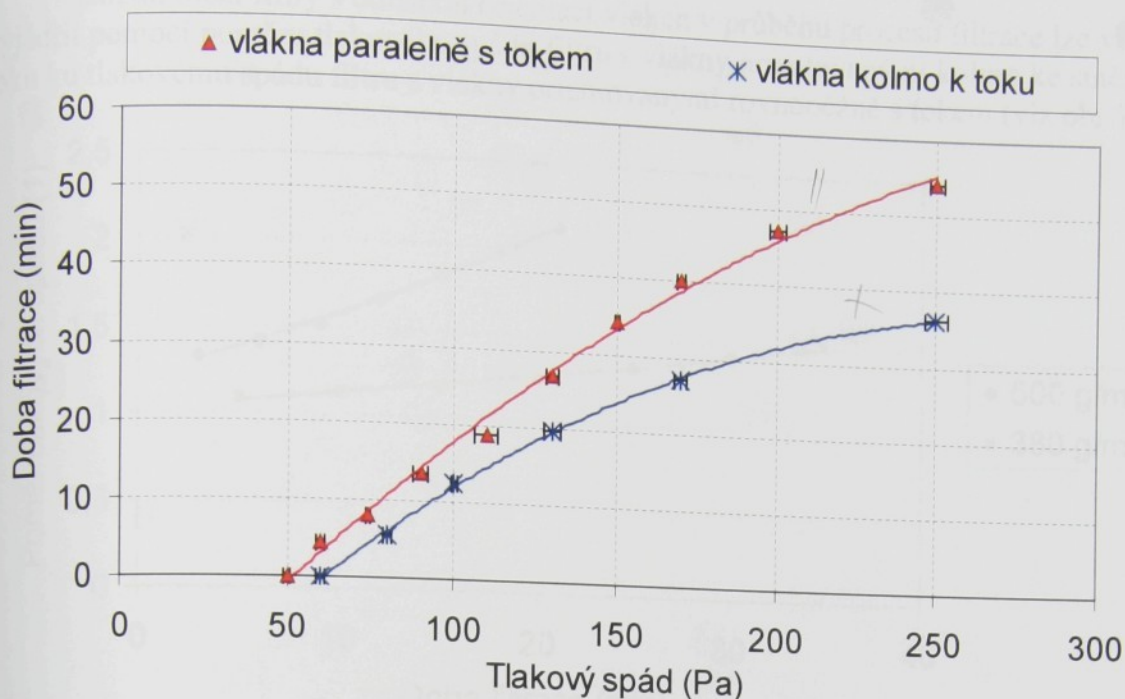
Z výsledků je patrné, že tlakový spád vláknenného systému orientovaného kolmo k toku filtrovaného média je skutečně dvojnásobný oproti systému orientovaného paralelně. Hodnota efektivity zachytu částic se přitom liší jen minimálně. =40%

Zcela odlišných hodnot však dosáhneme u filtrů reálných. Na obrázku 7.8 je počáteční tlakový spád dvou typů filtrů lišících se orientací vláken měřený při různých filtračních rychlostech. Testovány byly dvě dvojice filtrů o různých plošných hmotnostech. Graf obsahuje průměrné hodnoty a směrodatné odchylky z pěti měření každého vzorku. Z výsledků vyplývá, že tlakový spád filtrů s vlákny orientovanými kolmo k toku vzduchu je vyšší, než u filtrů s vlákny orientovanými rovnoběžně. Nicméně poměr mezi tlakovými spády u filtrů je menší, než u filtrů modelových. Proložíme-li metodou nejmenších čtverců změřené hodnoty přímkou, nalezneme poměr tlakových spádů 1,36 až 1,37. Tento poměr platí pro obě plošné hmotnosti filtrů a pro použitý rozsah filtrační rychlosti od 1,6 do 3,2 m/sec. Nabízí se myšlenka, zda lze tento experimentálně získaný poměr odvodit z poměru teoretického (vztah 7.5) a ze znalosti míry orientace vláken testovaných filtrů. Je však velmi obtížné stanovit míru orientace vláken, neboť vlákna jsou u těchto druhů filtrů obloučkována a orientována v prostoru. Při pokusech o stanovení orientace vláken pomocí Steinerova kompaktu [Lukáš, 1999] se ukázalo, že s růstem zvětšení získáme menší míru anizotropie vláken testovaného obrazu a je obtížné definovat, které zvětšení je optimální.

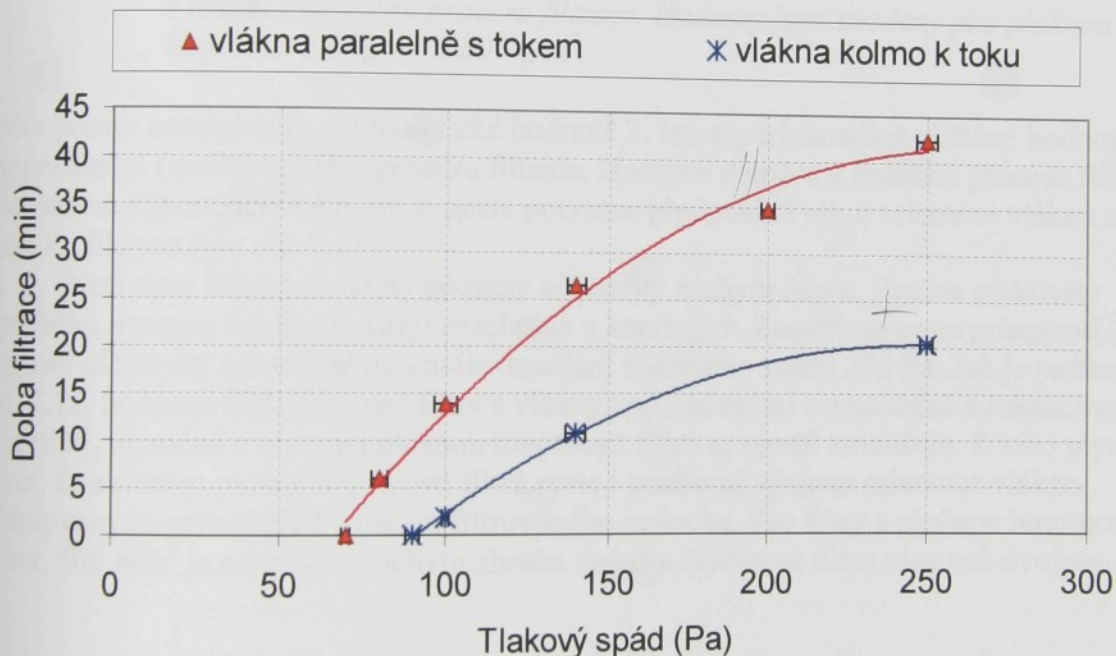


Obr. 7.8: Počáteční tlakový spád filtrů lišících se uspořádáním vláken pro dvě plošné hmotnosti a různé hodnoty filtrační rychlosti (náletová rychlost). Data jsou proložena přímkami procházejícími počátkem, jejichž směrnice a hodnoty spolehlivosti jsou uvedeny.

Stejně vzorky filtrů byly dále testovány pomocí syntetického prachu. Obr. 7.9 a 7.10 ukazují změnu hodnot tlakového spádu v průběhu procesu filtrace. Každý filtr byl testován do okamžiku překročení tlakového spádu 250 Pa, který je považován jako maximální [EN 779, 1993]. Vzhledem ke konstantní koncentraci podávaného prachu lze jeho množství chápat též jako dobu filtrace. Grafy obsahují i směrodatnou odchylku z pěti měření.



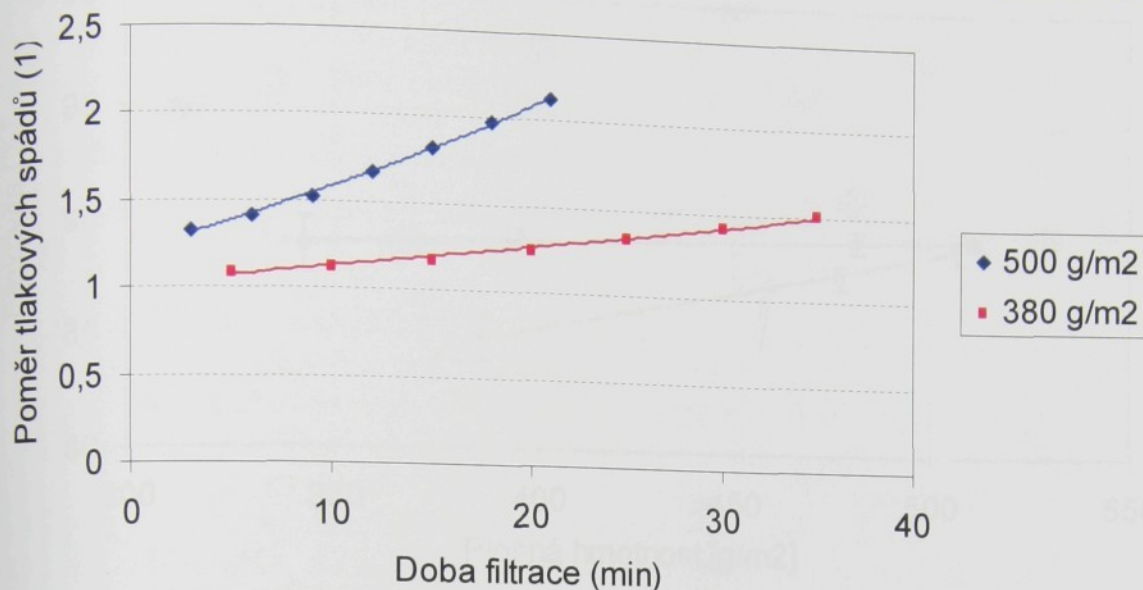
Obr. 7.9: Změna tlakového spádu v průběhu procesu filtrace pro plošnou hmotnost filtrů 390 g/m^2 . Efektivita filtru s vlákny kolmými k toku je vyšší o 9% (viz obr. 7.11).



Obr. 7.10: Změna tlakového spádu v průběhu procesu filtrace pro plošnou hmotnost filtrů 500 g/m^2 . Efektivita obou filtrů je zhruba stejná (viz obr. 7.12).

Z obou obrázků je patrné, že vliv orientace vláken se zvyšuje s rostoucím množstvím podaného prachu. Důležitý je především vztah mezi orientací vláken a životností filtrů. U vzorků o plošné hmotnosti 380 g/m^2 je životnost filtru s vlákny orientovanými rovnoběžně s tokem zhruba 1,5 krát větší než životnost filtru s vlákny orientovanými kolmo k toku. Vzorky o plošné hmotnosti 500 g/m^2 mají dokonce více než dvojnásobnou životnost při orientaci vláken rovnoběžně s tokem!

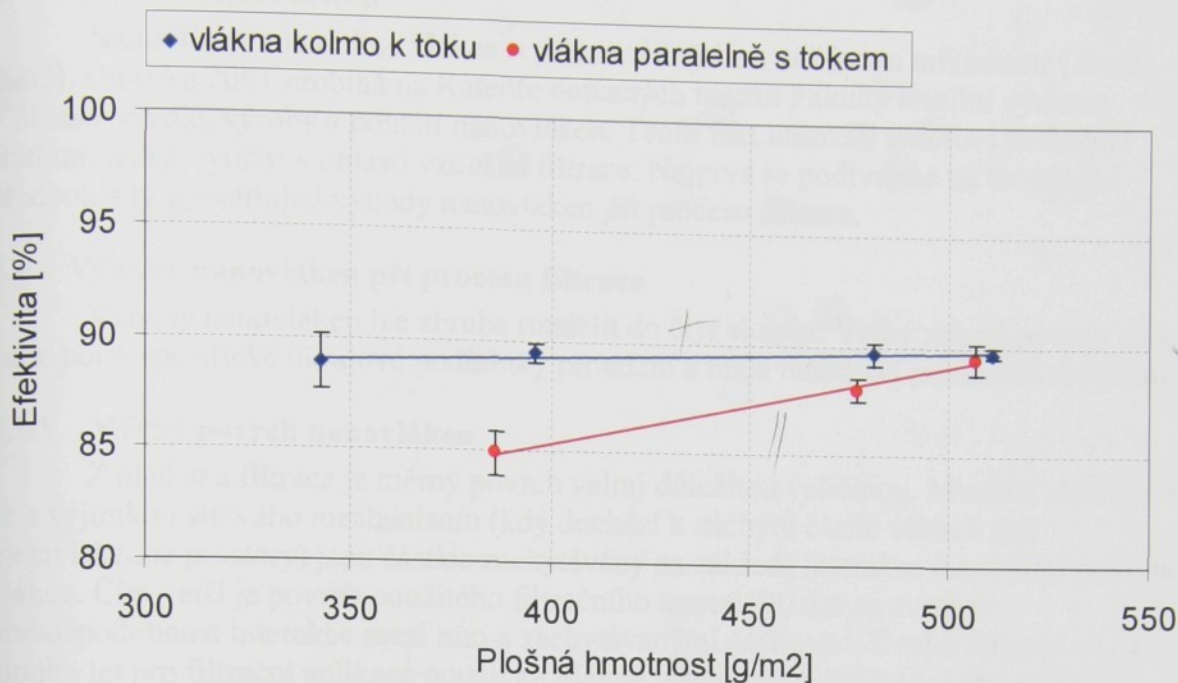
Rozdíl mezi filtry s odlišnou orientací vláken v průběhu procesu filtrace lze vhodně vyjádřit pomocí poměru tlakového spádu filtru s vlákny orientovanými kolmo ke směru toku ku tlakovému spádu filtru s vlákny orientovanými rovnoběžně s tokem (viz obr 7.11).



Obr. 7.11: Změna poměru tlakového spádu filtru s vlákny orientovanými kolmo ke směru toku ku tlakovému spádu filtru s vlákny orientovanými rovnoběžně s tokem v průběhu procesu filtrace. Hodnoty jsou uvedeny pro plošnou hmotnost 380 g/m² a 500 g/m².

Tento poměr neodpovídá ani teoretické hodnotě 2, ani experimentálně zjištěné hodnotě 1,36 pro počáteční (statickou) fázi procesu filtrace. Hodnota poměru v průběhu procesu filtrace roste mírně exponenciálně a tím je zcela potvrzen předpoklad vlivu orientace vláken na kinetiku filtrace (viz obr.7.11).

Nesmíme zapomenout na hodnoty efektivity zachytu částic. Změna efektivity v průběhu procesu filtrace je širěji rozebrána v kapitole 9. Zaměříme se na průměrné hodnoty efektivity naměřené do chvíle dosažení tlakového spádu 250 Pa. Jak je patrné na obr. 7.12, hodnoty efektivity pro filtry s vlákny uspořádanými rovnoběžně s tokem vzduchu jsou nižší, nicméně s rostoucí plošnou hmotností filtrů se rozdíl zmenšuje. Z toho plyne závěr, že s růstem plošné hmotnosti filtrů roste i pozitivní význam orientace vláken orientovaných rovnoběžně s tokem filtrovaného vzduchu. Pro filtry s plošnou hmotností kolem 500 g/m² je efektivita zachytu zhruba stejná a životnost filtru více než dvojnásobná.



Obr. 7.12: Průměrné hodnoty efektivity zachytu pro různé plošné hmotnosti a různou orientaci vláken filtru. Hodnoty byly počítány váženým průměrem podle normy EN 779.

7.4 Shrnutí:

Orientace vláken má podle teoretických předpokladů vliv především na tlakový spád filtru. Tento předpoklad a dále její působení na efektivitu zachytu a kinetiku filtrace bylo ověřováno pomocí modelových i reálných filtrů.

Při testování modelových filtrů byl potvrzen vztah (7.5), z něhož plyne dvojnásobný tlakový spád u systému s vlákny orientovanými kolmo ke směru proudícího vzduchu vzhledem k systému s vlákny orientovanými rovnoběžně s tokem. Efektivita zachytu se lišila jen minimálně. Tyto modelové filtry nicméně neodpovídají filtrům reálným, anžto objemová hmotnost modelových filtrů je příliš velká a u filtrů reálných nelze dosáhnout úplné anizotropie vláken, navíc bez přítomnosti vazných míst.

Dále byly testovány reálné filtry lišící se pouze orientací vláken. Jednalo se o objemné filtry termicky spojené připravené buď kolmým, nebo příčným skládáním na Katedře netkaných textilií. Filtry použité pro testy měly plošnou hmotnost 380 a 500 g/m². Při testování v počáteční (statické) fázi filtrace byl zjištěn poměr mezi tlakovými spády při odlišné orientaci vláken 1,36 (pro filtrační rychlost 1,6 – 3,2 m/sec). Nižší hodnota je daná především faktem, že anizotropie vláken reálných filtrů je jen částečná. Vliv orientace vláken v této fázi tedy není příliš výrazný.

Zcela zásadní je však vliv orientace vláken na kinetiku filtrace. Pro vlákna orientovaná spíše paralelně s tokem vzduchu je růst tlakového spádu filtru znatelně pomalejší a jeho životnost mnohem větší. Důvodem je zachytávání částic v celém objemu filtru a nikoliv pouze na povrchu, kdy hmota filtru je jen částečně využita. Efektivita zachytu částic je u takového filtru o něco menší, nicméně s růstem plošné hmotnosti se rozdíl zmenšuje a u filtrů s plošnou hmotností kolem 500 g/m² je zanedbatelný.

8 Využití nanovláken

Nanovlákný rozumíme vlákna o průměru menším, než jeden mikrometr [Jirsák, 2003]. Od roku 2001 probíhá na Katedře netkaných textilií Fakulty textilní výzkum v oblasti vývoje, výroby a použití nanovláken. Tento fakt umožnil autorovi podrobné studium jejich využití v oblasti vzdušné filtrace. Nejprve se podívejme na teoretické předpoklady vysvětlující výhody nanovláken při procesu filtrace.

8.1 Výhody nanovláken při procesu filtrace

Výhody nanovláken lze zhruba rozdělit do čtyř skupin: Velký měrný povrch vláken, malé póry, specifické okrajové podmínky proudění a malé množství použitého materiálu.

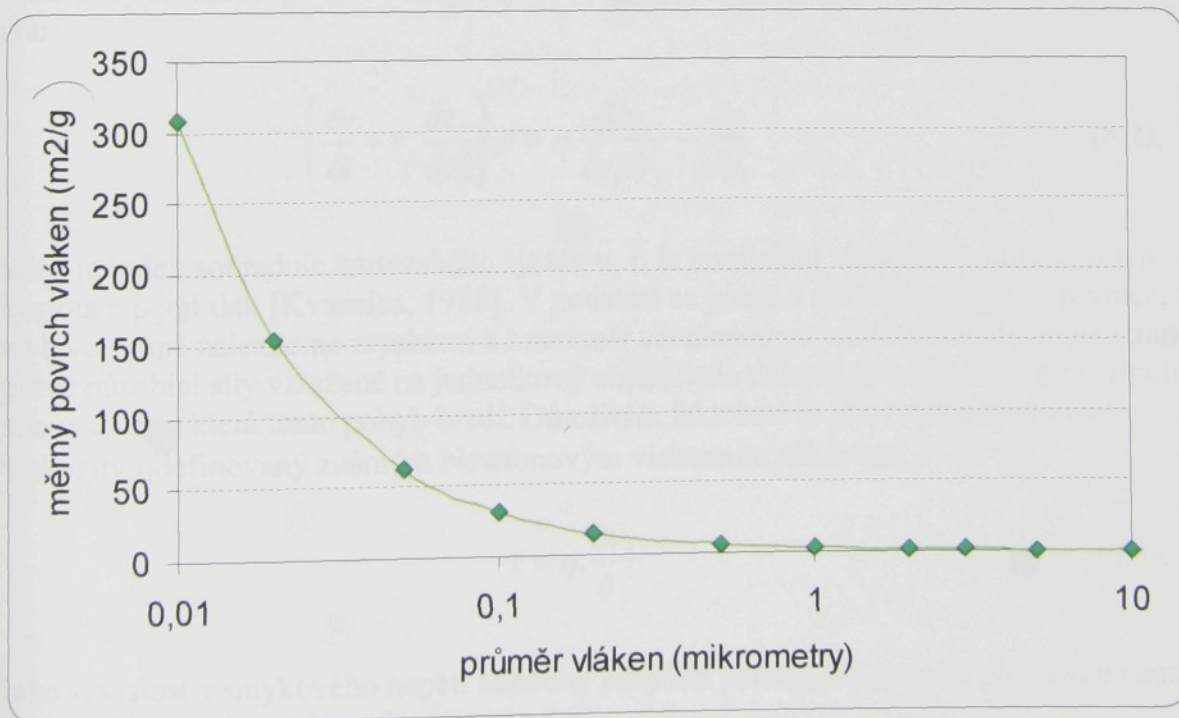
8.1.1 Měrný povrch nanovláken

Z hlediska filtrace je měrný povrch velmi důležitou veličinou. Musíme si uvědomit, že s výjimkou síťového mechanismu (kdy dochází k záchytu částic větších než mezivláknenné prostory) jsou částice zachytávány na základě interakce mezi nimi povrchem vláken. Čím větší je povrch použitého filtračního materiálu, tím se zvětšuje pravděpodobnost interakce mezi ním a zachytávanými částicemi. Z toho důvodu se již mnoho let pro filtrační aplikace používají vlákna tvarovaných průřezů, nebo malých průměrů vyráběná například technologiemi meltblown, flash spinning a zvláknování bikomponentních vláken. Využití nanovláken je v tomto kontextu dalším krokem ke zvýšení měrného povrchu. Pro jednoduchou představu můžeme použít výpočet měrného povrchu jako plochy jednoho gramu kruhového vlákna podle vztahu

$$A_{SP} = \frac{S_{PL}}{m} = \frac{4}{\rho \cdot d} \quad (8.1),$$

Handwritten calculation: $\frac{\pi d \cdot 8}{\frac{\pi d^2 \cdot 8}{4} \cdot 1.5} =$

kde A_{SP} je měrný povrch, S_{PL} je plocha pláště vlákna (plochu kruhových podstav můžeme zanedbat), m je hmotnost vlákna, ρ je hustota vlákna a d průměr vlákna.



Obr. 8.1: Vztah mezi měrným povrchem kruhových PVA vláken o hustotě 1300 kg/m^3 a jejich průměrem.

Obr. 8.1 ukazuje vztah mezi průměrem vláken kruhového průřezu a jejich měrným povrchem vyjádřeným podle vztahu (8.1). Můžeme pozorovat prudký pokles měrného povrchu při překročení hodnoty jednoho mikrometru průměru vláken, kdy i po zlogaritmování jedné osy zůstává vztah exponenciální. Z tohoto obrázku vyplývá, že v oblasti průměrů vláken do 1 μm je malé snížení průměru vlákna provázeno výrazným zvýšením měrného povrchu. Měrný povrch skutečných nanovláken bude pravděpodobně o něco nižší, neboť musíme uvažovat mezivláknenné kontakty. Na záběru z elektronového mikroskopu obr. 8.7 vidíme polyvinylalkoholová nanovlákná vyrobená na zařízení Nanospider. Můžeme pozorovat, že většina mezivláknenných kontaktů je víceméně bodových, nicméně lze nalézt i vlákna navzájem spojená. Průměry vláken se pohybují v rozmezí 50 až 500 nanometrů.

Vysoký měrný povrch vláken nicméně vede také ke zvýšení tlakového spádu vláknenného systému, neboť filtrované médium se chová jako viskozni kapalina a je tudíž povrchem obtékaných vláken bržděno. Nicméně tento neblahý efekt omezují další specifické vlastnosti nanovláken, jak je uvedeno dále.

8.1.2 Skluz plynu po povrchu vlákna

Chceme-li správně pochopit vztah mezi vstupními parametry procesu filtrace a výslednými filtračními vlastnostmi, potřebujeme znát způsob, jak se filtrované médium pohybuje uvnitř filtru. Na základě znalosti rozdělení rychlostí, neboli rychlostního pole uvnitř filtru můžeme předpovídat tlakový spád, filtrační mechanismy, z nichž následně vyplývá efektivita filtrace, a životnost filtru. Jednou z možností vyjádření rychlostního pole je tzv. „proudová funkce“ vyjádřená vztahem 7.1 a v kapitole 7.1, která je funkcí pozice.

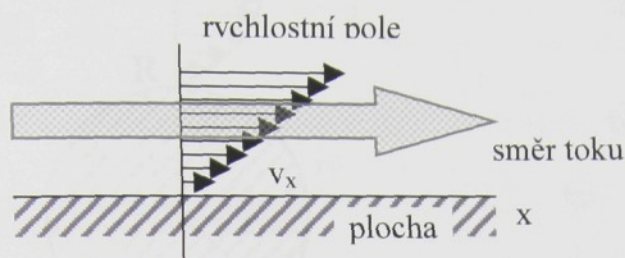
Pro určení rychlostního pole pomocí proudové funkce je třeba mnoho zjednodušujících předpokladů. Jednou možností je použít model ustáleného Stokesova toku popsáno v kapitole 7.1. Nicméně pro přesný popis procesu filtrace je vhodné pohyby filtrovaného média nahradit obtékáním soustavy pevných překážek viskozni tekutinou, kterou lze při nízkých tlakových spádech považovat za nestlačitelnou a stálou v čase [Brown, 1993]. Tento pohyb lze vyjádřit pomocí dvou rovnic: rovnice kontinuity a Navier-Stokesovy rovnice. Navier-Stokesova rovnice pro nestlačitelnou ustálenou tekutinu má tvar:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_j}{\partial y_j} \right) \cdot \rho = \eta \cdot \frac{\partial^2 v_i}{\partial y_j \partial y_j} - \frac{\partial p}{\partial y_i} \quad (8.2),$$

kde i je index souřadnic kartézského systému, η je koeficient viskozity tekutiny, ρ její hustota a p její tlak [Kvasnica, 1988]. V podstatě se jedná o obdobu pohybové rovnice, kde na levé straně nalezneme zrychlení a hmotnost vztaženou na jednotkový objem na straně pravé působící síly vztažené na jednotkový objem: síla tlaková uvádějící tekutinu v pohyb a síla viskozni, která tento pohyb brzdí. Důležitým faktorem je jak vidíme koeficient viskozity η definovaný známým Newtonovým viskozním zákonem

$$\tau = \eta \cdot \frac{\partial v_x}{\partial y} \quad (8.3),$$

jako závislost τ smykového napětí kapaliny proudící paralelně s pevnou plochou na změně rychlosti kolmo ke směru toku (viz obr.8.2).



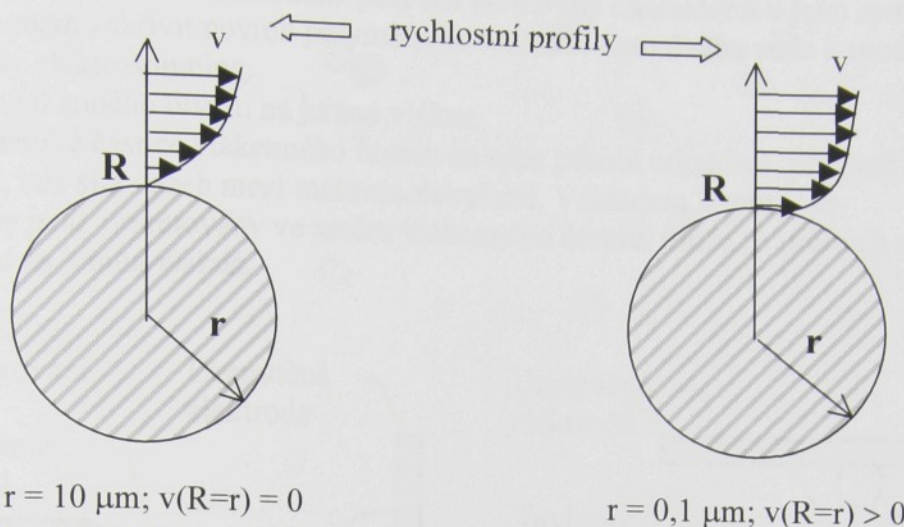
Obr. 8.2: Newtonův viskozitní zákon.

Důležitou okrajovou podmínkou tohoto vztahu je podmínka nulové rychlosti tekutiny v nulové vzdálenosti od nepohyblivé plochy. Nicméně, jak uvádí například Pich [Pich, 1964], tento předpoklad neplatí vždy. Začne-li se rozměr obtékané překážky blížit střední volné dráze molekul použitého plynu, nastává tzv. „skluz po vlákne“, kdy rychlost na nepohyblivém povrchu nabývá malých, nikoliv však nulových hodnot. Jak popisuje Brown, lze tento jev vysvětlit odlišným odrazem molekul plynu [Brown, 1993]. Při obtékání větší překážky je v těsné blízkosti povrchu (vzdálenost střední volné dráhy) rychlost odražených molekul opačná oproti rychlosti molekul nalétávajících na povrch. Výsledná rychlost je tedy nulová. V případě překážky blíží se rozměry právě uvedené vzdálenosti dochází k tzv. „difusnímu odrazu“, kdy součet rychlostí nalétávajících a odražených molekul je nenulový. Klouzání plynu po povrchu se v případě vláken ve tvaru válce definuje pomocí Knudsenova čísla vyjádřeného vztahem

$$Kn = \frac{\lambda}{r_f} \quad (8.4),$$

kde λ je střední volná dráha molekul a r_f je poloměr obtékaného vlákna (Pich jej uvádí jako charakteristický rozměr obtékaného tělesa). Střední volná dráha molekul pro vzduch za atmosférického tlaku je $0,067 \mu\text{m}$, přičemž s klesajícím tlakem se zvyšuje. Pich definuje tři (respektive čtyři) režimy filtrace. Za první klasický režim filtrace pro $Kn < 0,001$, kde lze použít vztahy klasické hydrodynamiky. Za druhé oblast klouzání plynů (oblast zředěných plynů a přechodová) pro $0,001 < Kn < 10$, kdy musíme uvažovat podmínku nenulové rychlosti na povrchu. Za třetí molekulární oblast filtrace pro $Kn > 10$.

Pro vlákna o průměru menším, než $1 \mu\text{m}$ je minimální hodnota Knudsenova čísla $0,134$, můžeme tedy předpokládat, že se nacházíme v oblasti klouzání plynů. Obr. 8.3 ukazuje rychlostní profil (rozložení rychlosti kolmo ke směru toku) pro klasické vlákno a pro nanovlákno.



Obr. 8.3: Rychlostní pole v okolí klasického vlákna a nanovlákna.

Díky okrajové podmínce skluzu po vlákně je protékající médium méně bržděno povrchem vláken a to se projeví na hodnotě tlakového spádu. Nelze tvrdit, že bude nižší, nebo stejný při porovnání vláken klasických a nanovláken, neboť vliv měrného povrchu zvyšujícího se s poklesem průměru vláken je výrazný. Přinejmenším lze očekávat, že růst tlakového spádu při zmenšování průměrů vláken bude nižší.

Dalším důsledkem tohoto jevu je těsnější uspořádání proudnic v okolí vlákna a tím zvýšení filtrační efektivity [Graham, 2002].

8.2 Výroba nanovláken

Existuje více způsobů přípravy nanovláken. Patří mezi ně zejména využití technologie meltblown (rozfukování taveniny horkých vzduchem) s nastavením pro tvorbu velmi jemných vláken o průměru $0,5 - 2 \mu\text{m}$, tvorba bikomponentních vláken typu „islands in the sea“ s následným rozpuštěním matrice a elektrospinning [Jirsák, 2003]. Dále se budeme zabývat pouze metodou elektrospinningu a jejími modifikacemi.

8.2.1 Elektrospinning a jeho modifikace Nanospider

Elektrospinning je metoda tvorby vláken z roztoku (nebo taveniny) za přítomnosti silného elektrostatického pole. Princip známý ve své podstatě od roku 1910 [Zeleny, 1914] ukazuje obr. 8.4. Roztok je dávkovacím zařízením vytlačen z trysky, která je zároveň jednou z elektrod elektrostatického pole. Působením elektrostatického pole dochází k vytažení vláknenného útvaru směrem k opačné elektrodě a následnému rozštěpení na jemná vlákna. Jejich měrný povrch je natolik velký, že ještě před dopadem na opačnou elektrodu jsou vlákna vysušena. Detailní popis působení elektrostatického pole v zásadě lze popsat dvěma efekty:

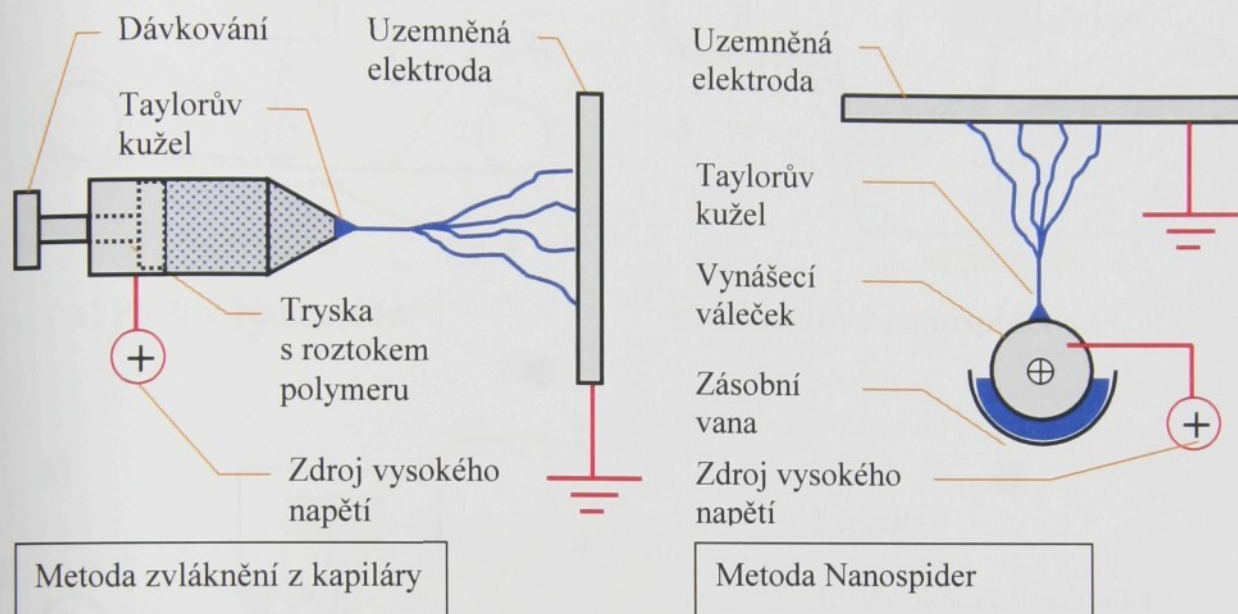
1. Tvorba a transport vláknenného útvaru k opačné elektrodě

Je známo, že elektrostatické pole může být velmi nehomogenní, jeho intenzita závisí mimo jiné na geometrii elektrod. Čím menší je poloměr křivosti, tím vyšší intenzita elektrostatického pole. Umístíme-li tedy polymerní roztok na špičku tzv. „ostré“ elektrody (elektroda s malým poloměrem křivosti), působí na něj mnohem větší síla, než na jiném místě elektrostatického pole. Působením této síly se malá plocha hladiny roztoku deformuje, pročež s růstem její deformace roste i intenzita elektrostatického pole na ni působící. Vzniklá špička je tažena k protější elektrodě a lavinovitě s sebou strhává další

polymer. Vzniklý útvar se nazývá Taylorův kužel [Taylor, 1964]. Z uvedeného popisu je vidět, že působení síly elektrostatického pole má lavinovitý charakter a k jeho spuštění stačí vhodným způsobem zakřivit povrch polymerního roztoku. Tato úvaha vede k modifikaci původní metody elektrospinning.

2. Rozštěpení vláknenného útvaru na jemná vlákna

Stejně nabitě částice vláknenného útvaru na sebe působí odpudivě, přičemž tato síla může být větší, než síla vazeb mezi makromolekulami. Vzhledem k tomu, že makromolekuly jsou orientovány ve směru vláknenného útvaru, může za určitých podmínek dojít ke štěpení na jemná vlákna.



Obr. 8.4: Princip zvláknění pomocí metody elektrospinning a její modifikace Nanospider.

Nevýhodou takto popsané metody je velmi malá výrobnost zvláknovacího zařízení a hmotová nestejnoměrnost vzniklé vrstvy. Proto byla na Katedře netkaných textilií vyvinuta metoda Nanospider v různých variantách. Počátky metody Nanospider sahají do roku 2001. Jejím principem, jak ukazuje obr. 8.4, je elektroda ve tvaru válečku brodícího se v polymerním roztoku. Polymer je válečkem vynášen blíže opačné elektrodě, pročež se na pohybující hladině polymeru samovolně vytvářejí skupiny Taylorových kuželů. Následný postup tvorby nanovláken je stejný, jak bylo uvedeno výše. Výrobnost technologie Nanospider se pohybuje mezi 1 až 5 g.min⁻¹.m⁻¹ (metr šíře role), což je ve srovnání s výrobností 0,1 až 1 g. hod⁻¹ původní metody elektrospinning výrazný pokrok.

Dalším rysem metody nanospider je využití proudu vzduchu pro efektivní odstranění rozpouštědla ze vznikajících vláken, případně dosažení lepší hmotové stejnoměrnosti a objemnosti vzniklé vláknenné vrstvy. Vzniklá nanovláknna se ukládají na odváděcí pás, nebo na pokladovou textilií. Z hlediska technologického rozlišujeme tři varianty metody nanospider (viz obr 9.6 .):

a) Plošný nanospider

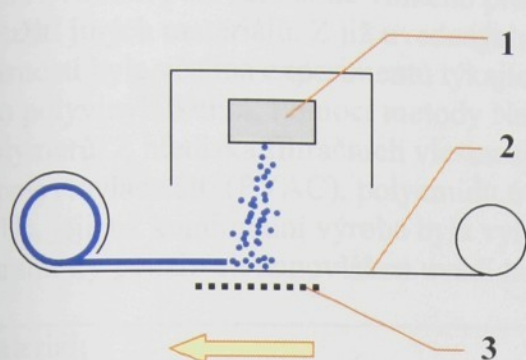
Nanovláknna jsou působením elektrostatického pole ukládány na pokladovou textilií posunovanou po plošné elektrodě (proud vzduchu působí ve směru pohybu vláken a slouží pouze k udržení pokladové textilie na elektrodě).

b) Objemový nanospider

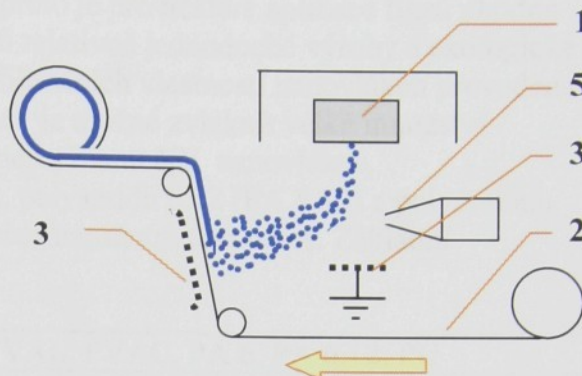
Nanovláknna jsou před dopadem na elektrodu zachycena proudem vzduchu a dopadají na elektrodu třetí.

c) Plošný nanospider bez podkladu

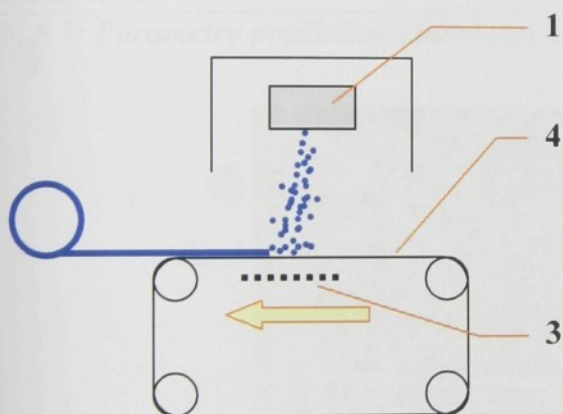
Nanovláknna dopadají na odváděcí pás, ze kterého jsou posléze sejmuta.



a) Plošný Nanospider



b) Objemový nanospider



c) Plošný Nanospider bez podkladu

Legenda:

1. Zvláknovací jednotka
2. Podkladová textilie
3. Elektroda
4. Odváděcí pás
5. Ventilátor

Obr. 8.5: Technologické varianty metody Nanospider.

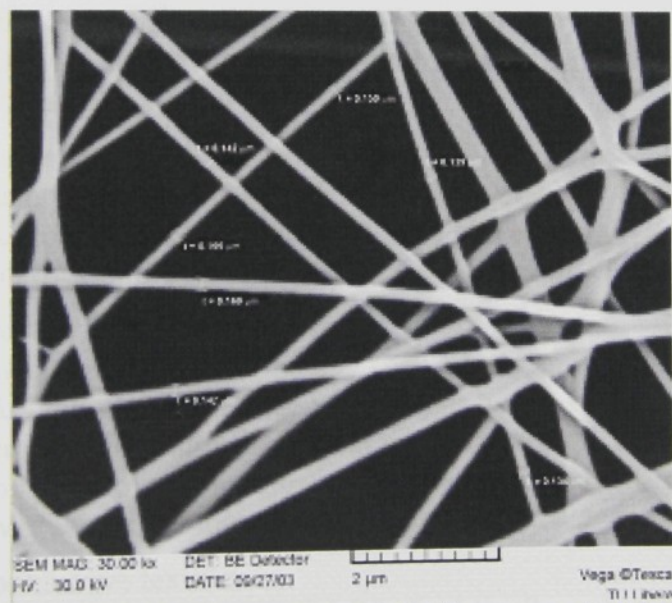
Základní technologické parametry nastavované u metody Nanospider jsou následující: napětí nastavená na jednotlivých elektrodách, vzdálenost elektrod, geometrie elektrod (velikost vynášecího válečku a zásobní vaničky), rozmístění a tvar elektrod v případě objemného nanospideru, rychlost a směr otáčení vynášecího válečku, odváděcí rychlost podkladové textilie, rychlost proudění vzduchu v případě objemného nanospideru, elektrické vlastnosti podkladové textilie a vlastnosti použitého polymerního roztoku (zejména elektrická vodivost, viskozita a povrchové napětí). Jak bude uvedeno v experimentální části, uvedené varianty metody Nanospider mají zcela zásadní vliv na filtrační vlastnosti nanovlákných vrstev.

8.2.2 Vlastnosti použitých nanovláken

Prvními nanovlákný získanými ve větší míře metodou nanospider byla vlákna z polyvinylalkoholu (PVAL). Jejich velikou výhodou je rozpustnost PVAL ve vodě a z toho plynoucí snadné zpracování bez toxických výparů. Příklad vrstvy PVAL nanovláken je na obr. 8.6. Připravená nanovlákná je nutno síťovat, aby byla odolná vůči působení vody. K tomu účelu se obvykle používá kyselina polyakrylová, nebo glyoxal (C₂H₂O₂). Experimentálně byly nicméně prokázány změny vlastností zesíťovaných nanovláknenných vrstev vlivem působení silně vlhkého prostředí, proto je pro některé aplikace filtrů vhodné použití jiných materiálů. Z již uvedených důvodů relativně jednoduché výroby a ekologické šetrnosti byla většina experimentů týkajících se filtračních vlastností nanovláken provedena pro polyvinylalkohol. Pomocí metody Nanospider je možné zvláknit velké množství polymerů. Z hlediska filtračních vlastností jsou nejvýznamnější nanovlákná z polyvinylacetátu (PVAC), polyamidu 6 (PA 6), polyamidu 6.12 (PA 6.12) a polyuretanu (PU), jejichž kontinuální výroba byla vyřešena před napsáním této práce. Základní parametry použitých nanovláken uvádí tab. 8.1.

materiál:	PVAL, PVAC, PA 6, PA 6.12, PU
průměr vláken:	50 – 500 nm
specifický povrch:	6 – 60 m ² /g
plošná hmotnost vrstev:	0,5 – 4 g/m ²
tloušťka vrstev	řádově mikrometry

Tab. 8.1: Parametry použitého nanovláknenného materiálu.



Obr. 8.6: Příklad vrstvy PVAL nanovláken. Získáno pomocí elektronového mikroskopu.

8.3 Filtrační vlastnosti nanovláken

Experimentální vyšetřování filtračních vlastností nanovláken se zaměřilo na tři základní cíle: Optimalizace vybraných technologických parametrů pro filtrační účely, porovnání nanovláken s ostatními filtračními materiály a konkrétní možnosti využití nanovláken pro respirátory a vysoce účinné skládané filtry.

8.3.1 Optimalizace vybraných technologických parametrů

Obecně vliv technologických parametrů na vlastnosti PVAL nanovláken byl řešen na Katedře netkaných textilií od počátku jejich vývoje. Z hlediska filtračních vlastností je důležité především dosažení co nejmenšího průměru nanovláken při co největší hmotové stejnoměrnosti vláknenné vrstvy a co největší výrobnosti stroje, dosažení vhodně objemné vrstvy a nalezení plošné hmotnosti optimální pro filtrační aplikace. Autor se zaměřil především na optimalizaci plošné hmotnosti, nastavení ostatních parametrů je většinou přejato z diplomových a jiných prací. Všechny uvedené parametry týkající se PVAL nanovláken byly zkoumány pomocí laboratorní linky Nanospider katedry netkaných textilií. Nejdůležitější sledované parametry jsou následující:

a) Složení zvlákňovaného roztoku

Tímto tématem se zabývalo mnoho prací, zejména s ohledem na schopnost zvlákňování [Gottwaldová, 2005]. Pro filtrační testy byl proto nejprve použit již odzkoušený roztok obsahující 12 % PVAL a 3 % síťovadla glyoxal. Vzhledem k problémům s životností nanovláken ve vlhkém prostředí se zkoušely i roztoky obsahující 12 – 25 % síťovadla glyoxal nebo 50 % kyseliny polyakrylové (viz experiment týkající se aplikací nanovláken pro respirátory).

b) Napětí mezi elektrodami

Jako optimální se ukázalo maximální napětí, kdy ještě nedochází k průbojům mezi elektrodami a částmi stroje [Gottwaldová, 2005]. V našem případě se jednalo o 45 kV. S rostoucím napětím roste výrobnost a zmenšuje se průměr vláken.

c) Vzdálenost elektrod

S rostoucí vzdáleností se zmenšuje průměr vláken a klesá výrobnost [Gottwaldová, 2005]. Vzorky pro filtrační testy byly připraveny při vzdálenosti 90 – 100 mm, tedy blízko maxima, kdy již nedochází ke zvlákňování.

d) Geometrie elektrod

Při pokusech s různou velikostí vynášecích válečků a zásobovacích van (viz. obr. 8.5) bylo zjištěno, že jejich větší rozměry vzhledem k ostatním částem zvlákňovacího zařízení neblaze působí na elektrické pole mezi elektrodami, což se projeví na výrobnosti.

e) Parametry pro tvorbu objemných vrstev

Výhodou objemných vrstev je nižší tlakový spád a lepší hmotová stejnoměrnost vzniklých vrstev. Jak vyplývá z obr. 8.5, je zařízení pro tvorbu objemných vrstev podstatně složitější. Tomuto tématu byla věnována práce Čejkové [Čejková, 2005], přičemž jeho zkoumání nadále probíhá. Pro tvorbu objemných vrstev je důležité nastavení rychlosti a geometrie proudění vzduchu a kombinace vzdálenosti, napětí a geometrie elektrod.

f) Parametry podkladové textilie

Pro filtrační aplikace je vhodné použití podkladové textilie, neboť samotná nanovláknenná vrstva nemá dostatečnou pevnost. Z hlediska technologického je vhodná hydrofilní textilie o malé tloušťce a plošné hmotnosti, která nezasahuje nepříznivě do elektrického pole. Pro naše experimenty byl použit spunbond o plošné hmotnosti 17 g/m² tvořený hydrofilizovanými polypropylenovými vlákny.

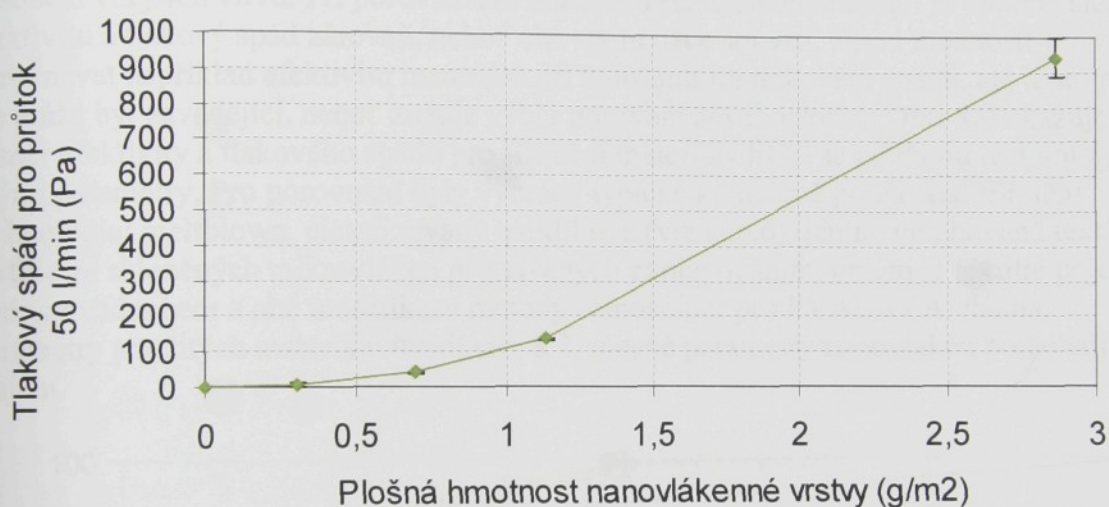
g) Odtahová rychlost

Tak jako u mnoha jiných technologií, odtahovou rychlostí lze měnit plošnou hmotnost vzniklé vrstvy. Podrobné výsledky zjišťování optimální plošné hmotnosti jsou uvedeny dále:

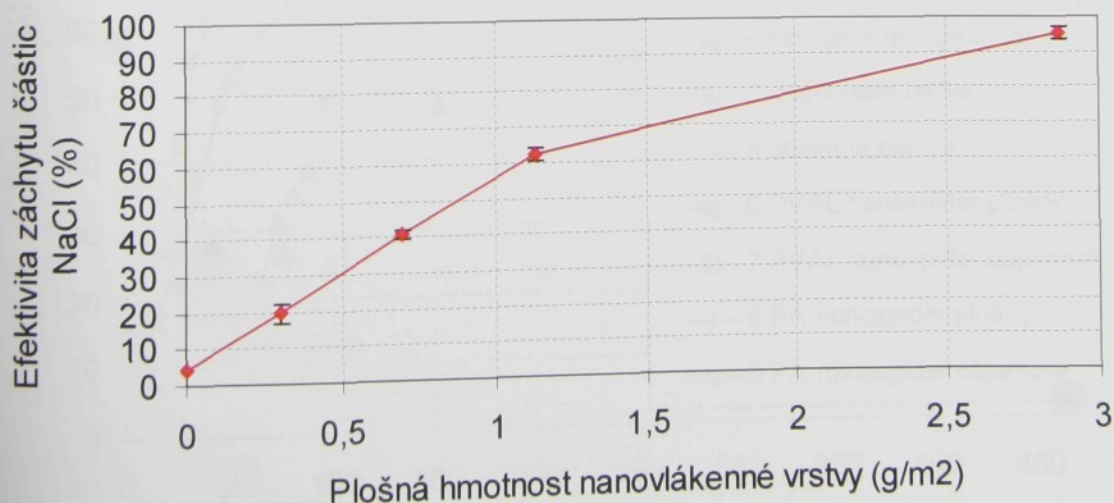
Lze očekávat, že s růstem plošné hmotnosti poroste i tlakový spád, efektivita i cena a klesá výrobní rychlost nanovláknenné vrstvy. Naším cílem je proto získat rámcový odhad

plošné hmotnosti vhodné pro filtrační aplikace. Jako prvotní kritérium pro posuzování plošné hmotnosti byl vybrán tlakový spád, neboť jeho velikost je u jednotlivých aplikací limitována možnostmi vzduchotechnických zařízení. V tomto kontextu je zajímavá oblast respirátorů, neboli ochranných prostředků dýchacích orgánů bez nuceného přívodu [EN 143, 2000], kde je tlakový spád určený možnostmi lidského dechu. Podle normy EN 143 je například pro průtok 95 l/min (náletová rychlost 9,5 m/min) a třídu filtrace P3 maximální tlakový spád 420 Pa. Zajímáme – li se o filtry běžné ventilace tříd G a F (hrubá a středně jemná filtrace), pak podle normy EN 779 [EN 779, 1993] je pro náletovou rychlost 0,6 – 2,3 m/sec maximální měřený tlakový spád 250 Pa pro filtry třídy G a 400 Pa pro filtry třídy F.

Na obr. 8.7 a 8.8 můžeme vidět závislost tlakového spádu a efektivity na plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy. Nanovlákněná vrstva byla nanášena na podklad spunbond z PP vláken o plošné hmotnosti 17 g/m² a tloušťce. Test byl proveden aerosolem NaCl podle normy BS 4400 při průtoku 50 l/min (náletová rychlost 5 m/min).



Obr. 8.7: Závislost tlakového spádu filtru na plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy. Graf obsahuje směrodatné odchylky 7 měření.

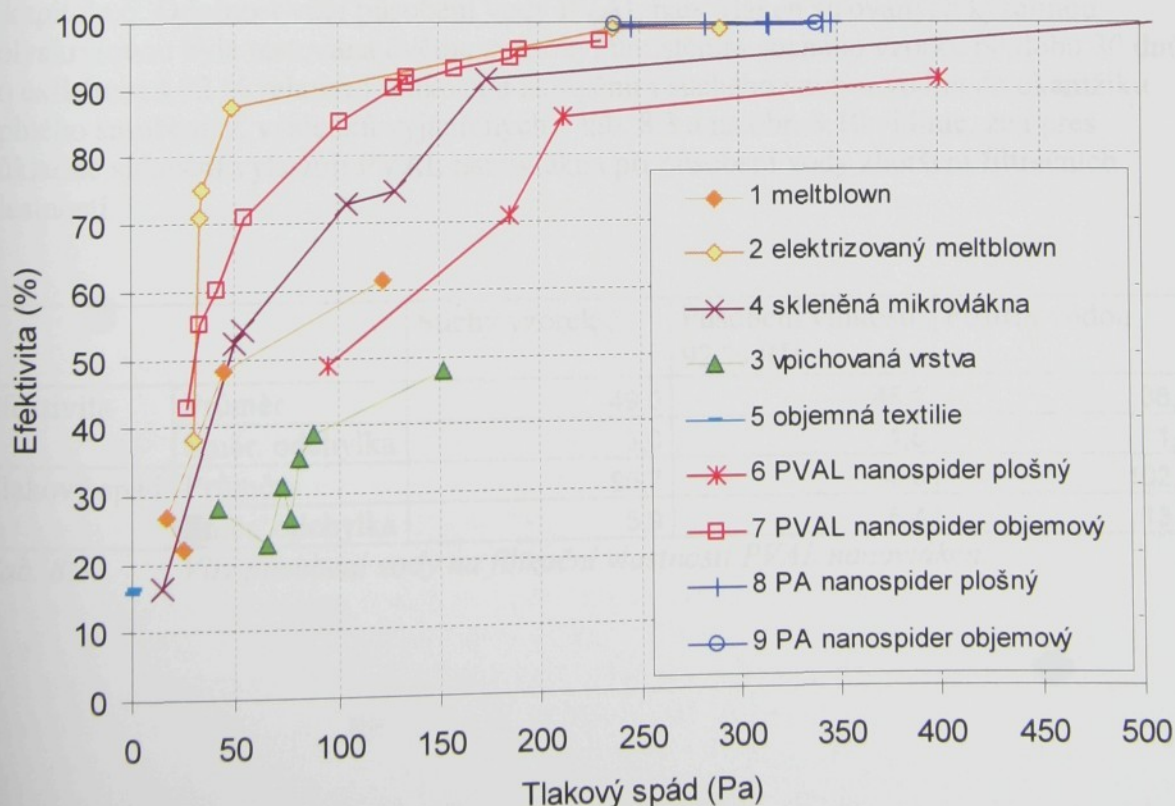


Obr. 8.8: Závislost efektivity filtru na plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy. Graf obsahuje směrodatné odchylky 7 měření.

Jak vyplývá z obr. 8.7 a 8.8, již při velmi malém množství nanovláknenné vrstvy dochází k prudkému růstu efektivity a tlakového spádu. V podstatě lze říci, že optimální plošná hmotnost se pohybuje v rozmezí 0,5 až 2 g/m². Tlakový spád je sice poměrně vysoký, nicméně je možné jej výrazně snížit metodou skládání filtru (viz kapitola 5). To je ostatně nejvíce používaná metoda při výrobě vysoce účinných filtrů, kdy efektivita zachytu aerosolu NaCl má být vyšší, než 99 %. Uvedený rozsah plošných hmotností je zároveň únosný ve vztahu k výrobní rychlosti a ceně nanovláknenné vrstvy.

8.3.2 Porovnání nanovláken s ostatními filtračními materiály

Je velmi obtížné porovnávat obecně filtrační materiály, neboť podmínky jednotlivých filtračních aplikací se velmi liší hodnotami požadovaných vlastností i jejich důležitostí. Zároveň parametry materiálů vyrobených různými technologiemi se liší. Z toho důvodu považujeme uvedené srovnání za orientační, dávající hrubý náhled možností použití nanovláknenných materiálů. Kritéria pro porovnávání materiálů vycházejí z filtračních vlastností, především z hodnot efektivity, tlakového spádu, životnosti a odolnosti vůči působení vnějších vlivů. Při porovnávání materiálů různých technologií je vhodné sledovat efektivitu a tlakový spád zároveň, neboť oba spolu úzce souvisí. Jinou možností je porovnávat například efektivitu materiálů při konstantním tlakovém spádu, ale tento přístup ale může být zavádějící, neboť zužuje výběr porovnávaných vzorků. Obr. 8.9 ukazuje poměr efektivity a tlakového spádu pro filtrační materiály lišící se použitou technologií i svými parametry. Pro porovnání byly vybrány typické komerčně používané filtrační technologie: meltblown, elektrizovaný meltblown (viz kap.6), jemně vpichovaná textilie, textilie ze skleněných mikrovláken připravených naplavováním, objemné textilie pojené horkým vzduchem a obě modifikace metody Nanospider pro PVAL a PA vlákna. Parametry použitých materiálů uvádí tab. 8.2, přesné parametry nanovláken podléhají utajení.



Obr. 8.9: Porovnání tlakového spádu a efektivity různých filtračních materiálů. Jejich parametry uvádí tab. 8.2.

Typ textilie	Plošná hmotnost	Průměry vláken	Tloušťka vrstvy
Meltblown	15 – 100 g/m ²	1,01 – 2,5 μm	0,21 – 1,5 mm
Elektrizovaný meltblown	35 – 80 g/m ²	1,01 – 2,5 μm	0,2 – 2 mm
Vpichovaná vrstva	100 – 400 g/m ²	11 – 30 μm	2,1 – 3,5 mm
Skleněná mikrovlákná	65 – 200 g/m ²	1,01 – 3,5 μm	0,41 – 1 mm
Objemné textilie	100 – 200 g/m ²	20 – 30 μm	10,5 – 15 mm

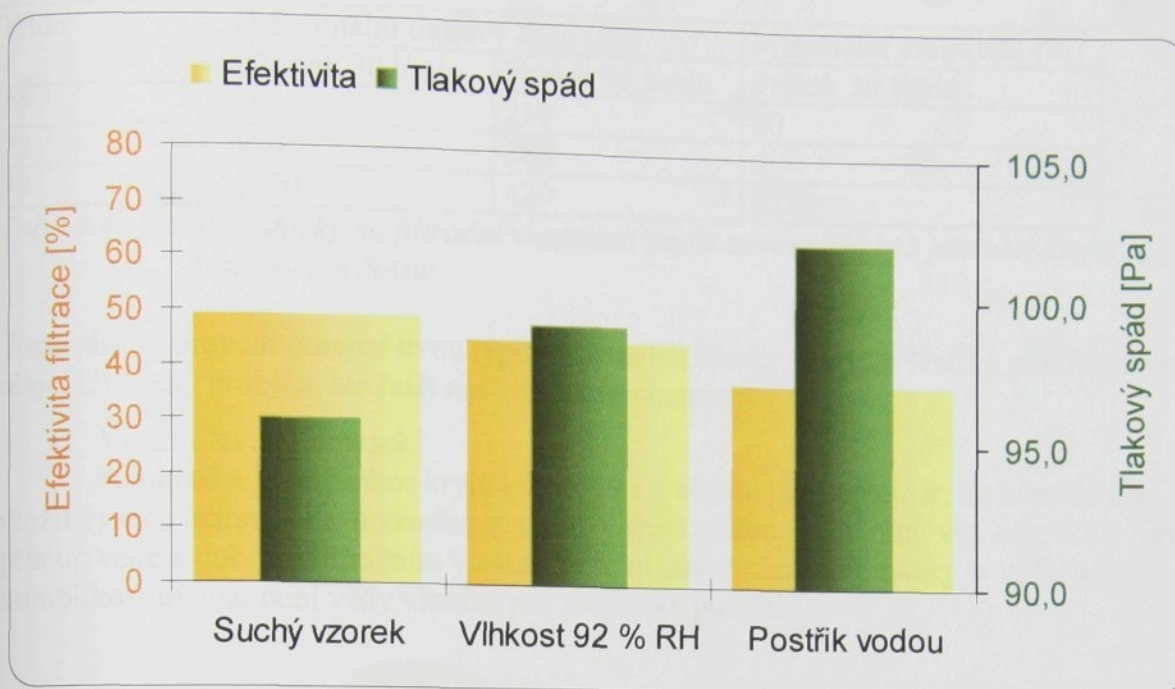
Tab. 8.2: Parametry materiálů porovnávaných s nanovlákný.

Posun po diagonále z levého spodního rohu do pravého horního nám udává změnu filtračních aplikací od hrubé filtrace s nízkými tlakovými spády do velmi jemné filtrace s tlakovými spády velkými. Posun po diagonále z pravého spodního rohu do levého horního uvádí změnu kvality filtru v rámci určité filtrační aplikace. Z obrázku je patrné, že nejlepší poměr efektivity a tlakového spádu vykazují filtry z elektrizovaného meltblownu. Tento výsledek však nezohledňuje fakt, že elektrostatické pole nepůsobí stejně na všechny částice (aerosol NaCl je na elektrostatické pole citlivý) a navíc u elektrizovaných filtrů může dojít ke ztrátě náboje a tím i efektivity filtrace. Reálně se tedy hodnoty elektrizovaných filtrů budou pohybovat mezi křivkami elektrizovaného a neelektrizovaného meltblownu (viz obr. 8.9). Důležitý je fakt, že pouze nanovláknenné vrstvy vyrobené variantou Objemný nanospider vycházejí lépe v porovnání s vrstvami meltblown a vrstvami z naplavovaných skleněných mikrovláken. Vláknenné vrstvy objemné zpevněné horkým vzduchem a vrstvy vpichované vykazují nižší hodnoty efektivity i tlakového spádu.

Dalším parametrem pro porovnání filtračních vlastností je odolnost vůči okolním vlivům. V případě PVAL nanovláken byla zatím testována odolnost vůči působení tepla a vody. PVAL nanovlákná odolávají teplotě do 140 °C, krátkodobě do 160 °C. Odolnost vůči teplu vrstev elektrizovaného meltblownu je mnohem nižší, jak ukazuje experiment v kapitole 6. Odolnost vůči působení vody PVAL nanovláken síťovaných kyselinou polyakrylovou byla testována dvěma způsoby: umístěním suchého vzorku po dobu 30 dnů do exikátoru s 92 % relativní vlhkosti a zkrápěním suchého vzorku vodou do okamžiku úplného smočení. Z výsledků vyjádřených v tab. 8.3 a na obr. 8.10 vidíme, že i přes důkladné síťování vykazují PVAL nanovlákná při působení vody zhoršení filtračních vlastností.

		Suchý vzorek	Působení vlhkosti 92 % RH	Postřik vodou
Efektivita	Průměr	49,0	45,1	38,0
	Směr. odchylka	3,0	1,5	1,8
Tlakový spád	Průměr	95,7	99,0	102,0
	Směr. odchylka	5,9	6,4	13,8

Tab. 8.3: Vliv působení vody na filtrační vlastnosti PVAL nanovláken.



Obr. 8.10: Vliv působení vody na filtrační vlastnosti PVAL nanovláken.

Ještě nepříznivějších výsledků dosahovala nanovlákná síťovaná pomocí glyoxalu, protože byly provedeny pokusy o zlepšení odolnosti použitím většího množství glyoxalu. Při testech s 3, 12, 20 a 25 % glyoxalu ve zvlákněném roztoku došlo sice ke zlepšení odolnosti vůči působení vody, nicméně za cenu značného snížení výrobnosti v porovnání s kyselinou polyakrylovou jako síťovadlem. Další zvětšování množství kyseliny polyakrylové také nevedlo k lepším výsledkům. Na základě uvedených testů se proto PVAL nanovlákná jeví jako nevhodná pro použití v prostředí s výskytem většího množství vody, například jako respirátory. Toto omezení ovšem neplatí pro nanovlákná polyamidová. V jejich případě lze dokonce úpravou pomocí plazmy dosáhnout hydrofobnosti nanovláknenné vrstvy. Odolnost vůči působení vody elektrizovaného meltblownu popisuje experiment v kapitole 6.3.1. I zde musíme počítat se zhoršením efektivity filtrace. Vzhledem k malým vzdálenostem mezi vlákny, které se brzo ucpávají zachycenými částicemi, nelze počítat s velkou životností nanovláknenných filtrů. Proto musíme předpokládat použití předfiltrů před nanovláknem, respektive využití nanovláken jako tenké vrstvy kombinované s jiným materiálem a zlepšující jeho vlastnosti. Vhodným materiálem pro kombinaci s nanovláknem je například vrstva meltblown, nebo vrstva naplavovaných skleněných mikrovláken.

8.3.3 Aplikace nanovláken I.: Respirátorové filtry obsahující nanovlákná

Respirátor lze definovat jako zařízení kryjící ústní, případně lícní část obličeje a chránící dýchací orgány proti částicím rozptýleným ve vzduchu [EN 143, 2000]. Velikosti typických filtrovaných částic, jak vidíme v tabulce, se s výjimkou pylů a bakterií pohybují v submikronovém rozsahu. Uvážíme-li, že efektivita zachytu těchto velmi malých částic musí být vysoká a zároveň tlakový spád nízký, vyplývá z toho nutnost použití filtrů s vysokým poměrem efektivity a tlakového spádu (viz obr.8.9). Konkrétní požadavky kladené na respirátory podle normy EN 143 uvádí tab. 8.4.

Třída	Maximální tlakový spád (Pa)		Minimální efektivita (%)
	Průtok 30 l/min	Průtok 95 l/min	Průtok 30 l/min
P1	60	210	20
P2	70	240	6
P3	120	420	0,05

Tab. 8.4: Požadavky na filtrační vlastnosti podle normy EN 143 pro oba druhy testovacích částic.

Testování se provádí pomocí dvou typů testovacích částic: aerosolu NaCl a parafinového oleje. Uvedený problém lze řešit následujícími postupy:

a) Využití tzv. polomasek

Polomaska je respirátor kryjící ústa i nos a obsahující kontejner, do kterého lze vložit vysoce účinný filtr, u kterého je tlakový spád snížen skládáním, viz. obr. 8.11. Tento přístup vede k dobrým filtračním vlastnostem, nicméně cena polomasky je vyšší a její komplikovaný tvar není vždy vhodný pro praktické použití.



Obr. 8.11: Ukázky tvaru polomasky, kde kruhová kazeta obsahuje skládaný filtr.

b) Využití vrstvy elektrizovaného meltblownu

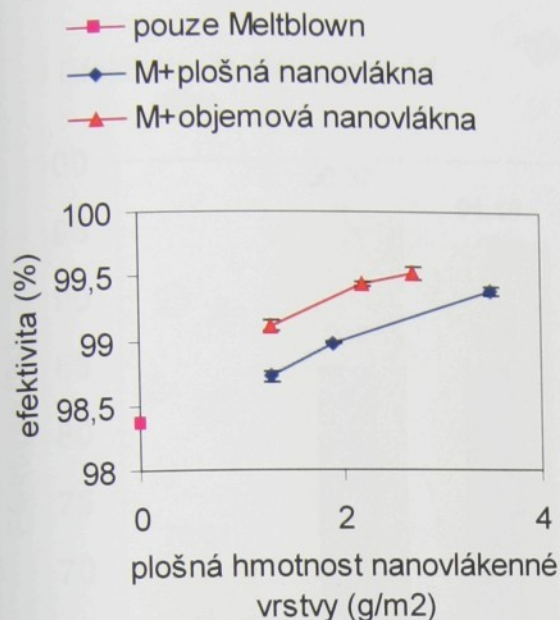
Nevýhodou tohoto často užívaného přístupu je malá efektivita zachytu některých částic a nestabilita náboje ve vlhkém prostředí, neboť lidský dech obsahuje značné množství vody. V rámci normy EN 143 se nevýhoda vrstvy elektrizovaného meltblownu projeví zejména při testu částicemi parafinového oleje, které nejsou citlivé na elektrostatické pole.

c) Kombinace vrstvy elektrizovaného meltblownu a tenké vrstvy nanovláken

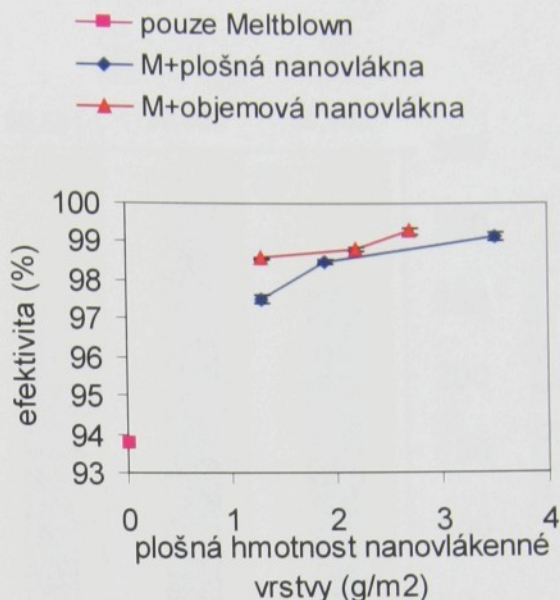
Tento přístup byl podroben dalšímu zkoumání.

Nejprve byla vybrána vhodná vrstva elektrizovaného meltblownu o plošné hmotnosti 100 g/m^2 komerčně používaného pro respirátorové filtry. Uvedený filtr splňuje požadavky na zachyt částic aerosolu NaCl, nikoliv však částic parafinového oleje. Tato vrstva se laminovala vrstvou PVAL nanovláken nesených na podkladu spunbond, kdy vrstvy byly ve směru náletu částic seřazeny: elektrizovaný meltblown, nanovlákná, spunbond. Testy probíhaly pro různé plošné hmotnosti nanovláken připravených variantami plošného i objemného nanospideru. Výsledky jsou uvedeny na obr. 8.12 a 8.13.

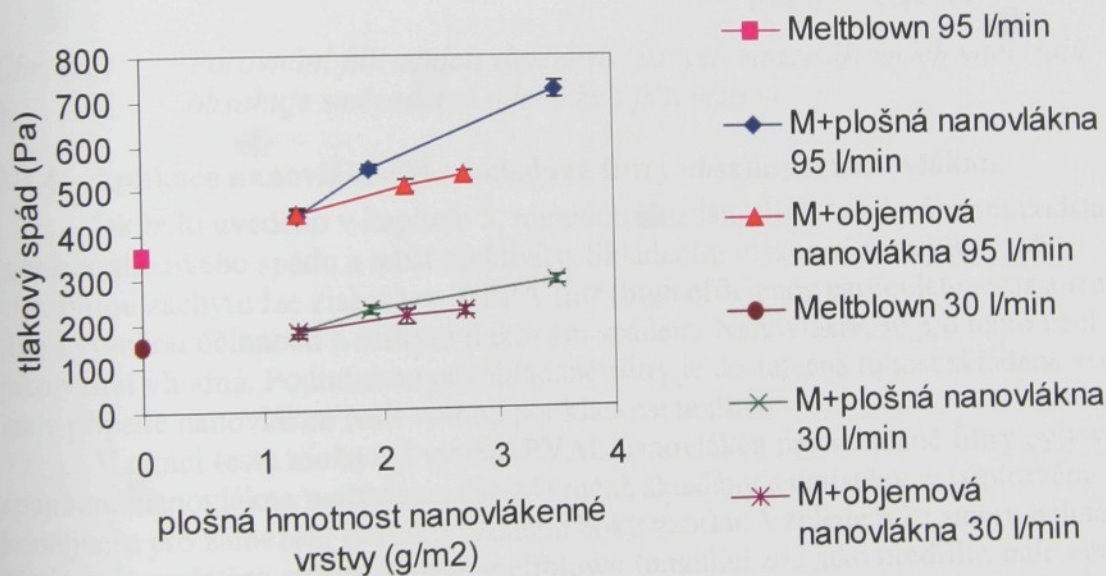
Efektivita částic NaCl



Efektivita částic paraf. oleje



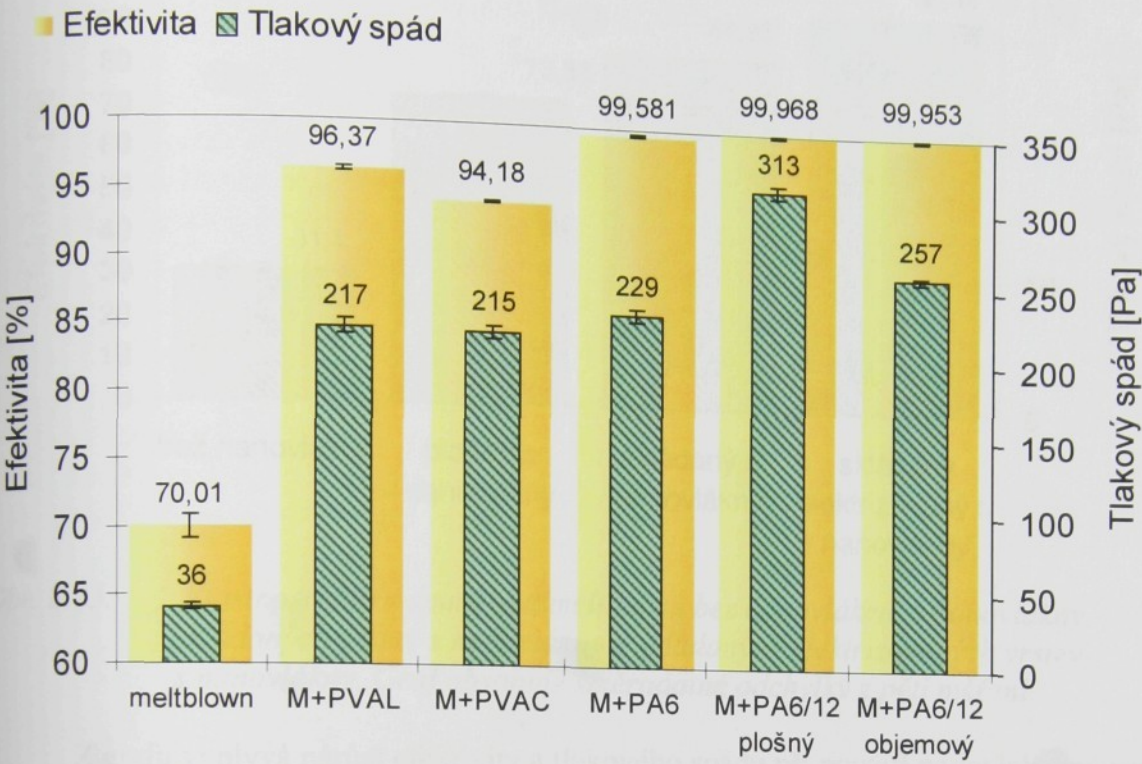
Obr. 8.12: Efektivita zachytu částic aerosolu NaCl a parafinového oleje pro různé plošné hmotnosti nanovláken respirátorového filtru.



Obr. 8.13: Tlakový spád pro průtok 30 a 95 l/min respirátorového filtru obsahujícího různé množství nanovláken.

Jak vyplývá z výsledků testu, lze pomocí nanovláken vhodně upravit filtrační vlastnosti respirátorového filtru tak, aby nedošlo k přílišnému růstu tlakového spádu. Zejména růst zachytu částic parafinového oleje je rapidní. Testy odolnosti PVAL nanovláken vůči vodě nicméně ukázaly nevhodnost jejich použití pro respirátory. Teprve v průběhu roku 2005 bylo možné nahradit PVAL jinými materiály, zejména PA. Výsledky porovnání různých materiálů ukazuje obr. 8.14. Tvorba polyamidových nanovláken metodou objemného nanospideru je stále ve fázi vývoje, nicméně již první zkušební vzorky se jeví nadějně, jak ukazují dva pravé sloupce na obr. 8.14 (další podrobnosti týkající se nanovlákených vrstev vyrobených metodou objemného nanospideru podléhají utajení). Lze

tedy říci, že nanovláknenná vrstva může vhodně zlepšit filtrační vlastnosti respirátorových filtrů.

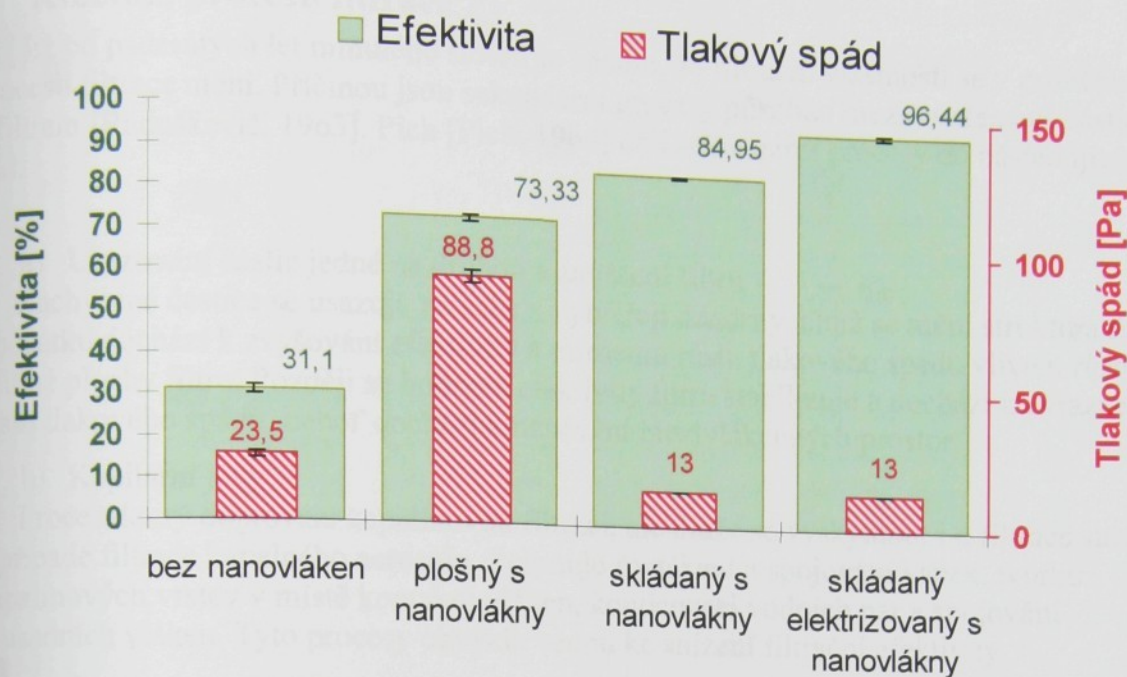


Obr. 8.14: Porovnání filtračních vlastností různých nanovláknenných materiálů. Graf obsahuje směrodatné odchylky z pěti měření.

8.3.4 Aplikace nanovláken II.: Skládání filtry obsahující nanovláknena

Jak bylo uvedeno v kapitole 5, metodou skládání filtru lze dosáhnout podstatně menšího tlakového spádu a lepší efektivit. Skládáním vláknenné vrstvy s vysokou efektivitou zachytu lze získat tzv. HEPA filtr (high efficiency particulate arrestance), tedy filtr s vysokou účinností a nízkým tlakovým spádem. Nanovláknena se pro tento účel jeví jako velmi vhodná. Podmínkou pro skládání filtry je dostatečná tuhost skládané vrstvy, což lze v případě nanovláken řešit volbou podkladové textilie.

V rámci testu možnosti využití PVAL nanovláken pro skládání filtry byly vrstvy spunbond/nanovláknena/meltblown (SNM) ručně skládány a umístěny v papírovém kontejneru pro zamezení průtoku vzduchu boky vzorku. Vzhledem ke směru nalétávajících částic byla umístěna nejprve vrstva meltblown fungující zde jako předfiltr, dále vrstva nanovláken zachytávající částice prošlé meltblownem a nakonec vrstva spunbond sloužící jako vrstva nosná . Parametry skládání jsou: hustota skladů 120 m⁻¹, tloušťka filtru 20 mm. Pro porovnání byla též použita technika elektrizace skládaného filtru pomocí koronového nabíjení popsaného v kapitole. Test filtračních vlastností pomocí aerosolu NaCl byl proveden na vrstvě spunbond/meltblown (SM) bez nanovláken, na ploché vrstvě SNM, na skládané vrstvě SNM a na skládané elektrizované vrstvě SNM. Plošná hmotnost spunbondové vrstvy byla 17 g/m², meltblownové vrstvy 30 g/m² a nanovláknenné vrstvy 0,6 g/m². Vzhledem k rozměrům testovaného vzorku nebylo možné použít metodu Objemného nanospideru, který ještě neumožňoval vzorky širší, než 200 mm. Použit byl proto Plošný nanospider, ačkoliv jeho vlastnosti jsou horší. Výsledky ukazuje obr. 8.15 .



Obr. 8.15: Vlastnosti filtru spunbond/meltblown bez nanovláken, s nanovlákný, skládaných vrstev s nanovlákný a skládaných elektrizovaných vrstev s nanovlákný. Graf obsahuje směrodatné odchylky z pěti měření.

Z grafu vyplývá nárůst efektivit a tlakového spádu při použití nanovláknenné vrstvy, snížení tlakového spádu a mírné zvýšení efektivit při poskládání vrstvy a zvýšení efektivit při nezměněném tlakovém spádu při elektrizaci vláknenné vrstvy. Z výsledků experimentu můžeme odvozovat vhodnost použití nanovláken pro tento typ aplikace. Lepší výsledky navíc můžeme očekávat při použití Objemného nanospideru a polyamidových nanovláken.

8.3.5 Shrnutí experimentů

Byly provedeny experimenty sledující porovnání nanovláken s ostatními filtračními materiály a využití nanovláken pro konkrétní aplikace. Pro výrazné zvýšení efektivit filtrace stačí minimální množství nanovláken – zhruba $0,5$ až 2 g/m^2 , proto je využití nanovláken výhodné i z hlediska ekonomického. Vzhledem k malým pórům a malému množství vláken není životnost nanovláknenných vrstev velká, proto je jejich kombinace s jinými filtračními materiály, které působí jako předfiltry. Při použití nanovláken musíme být opatrní na odolnost použitého materiálu vůči působícímu prostředí. Příkladem jsou vlákna PVAL, která navzdory síťování mají malou odolnost vůči působení vody. Při vhodné volbě materiálu lze nanovlákn kombinovat s elektrizovaným materiálem, neboť efektivita jejich zachytu není citlivá na typ zachytávaných částic a nedochází k jejímu snižování vlivem ztráty elektrostatického náboje. Obecně lze z výsledků usoudit, že nanovlákn mohou v kombinaci s jinými filtračními materiály výrazně přispět k tvorbě filtrů s vysokou efektivitou a nízkým tlakovým spádem.

9 Kinetika procesu filtrace

Již od padesátých let minulého století je známo, že filtrační vlastnosti se v průběhu procesu filtrace mění. Příčinou jsou sekundární procesy působící mezi usazenými částicemi a filtrem [Raduškevič, 1963]. Pich [Pich, 1964] dělí sekundární procesy do následujících tříd:

- a) Usazování částic jedné na druhou a zanášení filtru
Zachycené částice se usazují na sebe a vytvářejí dendrity, čímž se mění struktura filtru. Zpočátku dochází k zvyšování efektivity a mírnému růstu tlakového spádu vlivem růstu účinné plochy filtru. Později se hodnota efektivity filtru stabilizuje a dochází k výraznému růstu tlakového spádu, neboť dochází k ucpávání mezivláknenných prostor.
- b) Kapilární jevy
Proces, který doprovází kapalinovou filtraci, ale může se vyskytnout i u filtrace suché v případě filtrace kapalného aerosolu. Zahrnuje roztékání a spojování kapek, tvorbu kapalinových vrstev v místě kontaktu vláken, kondenzaci vodních par a spojování sousedních vláken. Tyto procesy obvykle vedou ke snížení filtrační efektivity.
- c) Ztráta elektrostatického náboje
Tento jev, který způsobuje pokles efektivity filtrace je více popsán v kapitole 6. Destrukce filtru. Růst tlakového spádu díky zanášení filtru může vést až k jeho destrukci.

Nicméně při některých filtračních aplikacích byl zaznamenán ještě jeden velmi nebezpečný proces nazvaný autorem „uvolňování zachycených částic“. Zkoumání uvedeného procesu je věnována tato kapitola.

9.1 Uvolňování zachycených částic

Obvykle se v rámci kinetiky filtrace hovoří o růstu hodnot efektivity a tlakového spádu, nicméně za určitých reálných podmínek se autor setkal i s jevem opačným. Podívejme se na příklad, který stál na počátku tohoto výzkumu. Jedná se o vláknenný filtr třídy G2 určený pro hrubou filtraci a zařazený podle normy EN 779 [EN 779, 1993]. Jeho parametry uvádí tabulka 9.1.

Materiál	PET
Technologie výroby	Aerodynamické kladení, termické pojení
Plošná hmotnost	66 g/m ²
Průměr vláken	Průměr 19,9 μm, směr. odchylka 3,35 μm

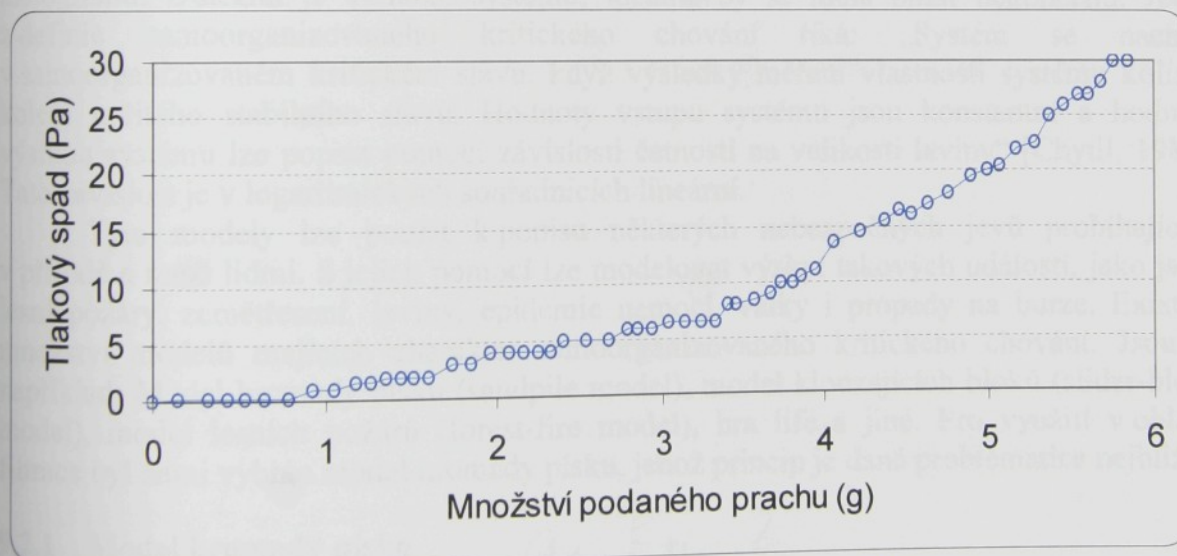
Tabulka 9.1: Parametry vzorku na kterém bylo zkoumáno uvolňování zachycených částic.

Do uvedeného filtru byl za definovaných konstantních podmínek vnášen testovací prach a v pravidelných intervalech se měřila efektivita a tlakový spád. K testování se používal syntetický prach s velikostí částic 0,3 až 10 μm, rychlost filtrace byla 0,5 m/sec. Celkem proběhlo 60 měření na třech vzorcích. Obr. 9.1 popisuje, jak v průběhu procesu filtrace nejprve hodnoty efektivity rostou, po určité době ale začnou kolísat. Efektivita může být dokonce nižší, než na počátku procesu filtrace. Je velmi nepravděpodobné, že tak velké rozdíly hodnot jsou způsobeny chybou měření. Zapamatujme si tento obrázek, ještě se k němu vrátíme. Oproti tomu změna tlakového spádu (jak ukazuje obr. 9.2) odpovídá již známým teoriím. Drobné odchylky jsou způsobeny malou citlivostí měřicího přístroje, kdy nejmenší měřitelná hodnota je 2 Pa.

Podle Picha [Pich, 1964] se filtrované částice zachytávají na vlákno i samy na sebe a tvoří rostoucí dendrity. Dendritem míníme objekt velmi nepravidelného rozvětveného tvaru. Ukázka vlákna se zachycenými částicemi je na obr. 9.3. Je možné, že po překročení určité kritické velikosti dendritu dojde k uvolnění celého dendritu, nebo jeho části. To se projeví snížením efektivity filtru. Lze očekávat, že tento jev souvisí zejména s rychlostí proudění vzduchu filtrem, povrchem vláken, velikostí mezivláknenných prostor, charakteristikami filtrovaných částic a dalšími parametry [Hrůza, 2002]. Vysvětlení tohoto jevu může poskytnout model samoorganizovaného kritického chování.



Obr. 9.1: Změna efektivity filtru v průběhu procesu filtrace. Vzhledem k víceméně konstantnímu dávkování prachu můžeme zaměňovat množství podaného prachu časovou osou. Za laviny popisované v kapitolách 9.2 a 9.3 zde můžeme považovat pokles dvou po sobě naměřených efektivit.



Obr. 9.2: Změna tlakového spádu filtru v průběhu procesu filtrace



Obr. 9.3: Mikroskopický snímek vlákna s nánosem syntetického zkušební prachu tvořícího dendrity. Průměr vlákna $24\ \mu\text{m}$, materiál PET. Syntetický zkušební prach podle normy EN 779.

9.2 Princip samoorganizovaného kritického chování systému.

Základ samoorganizovaného kritického chování byl navržen roku 1987 Turcotte [Turcotte, 1999] pro vysvětlení některých projevů tehdy navržených lineárních automatů.

Principem tohoto chování je opakované uvádění rozsáhlého systému do nestabilního stavu, kdy se systém skokem samovolně stabilizuje. Přechod systému do stabilního stavu je obvykle provázen jevem nazývaným „lavina“ [Turcotte, 1999]. Lavinou míníme buď změnu, která nastává uvnitř systému, nebo projev systému vůči jeho okolí. Velikost laviny má charakter náhodné veličiny a lze ji popsat statisticky, například pomocí histogramu. Důležitá je velikost systému, ideálně by se měla blížit nekonečnu. Jedna z definic samoorganizovaného kritického chování říká: „Systém se nachází v samoorganizovaném kritickém stavu, když výsledky měření vlastností systému kolísají kolem určitého stabilního stavu. Hodnoty vstupu systému jsou konstantní a hodnoty výstupu systému lze popsat pomocí závislosti četnosti na velikosti laviny“ [Chytil, 1987]. Tato závislost je v logaritmických souřadnicích lineární.

Tyto modely lze použít k popisu některých nebezpečných jevů probíhajících v přírodě a mezi lidmi. S jejich pomocí lze modelovat výskyt takových událostí, jako jsou: lesní požáry, zemětřesení, laviny, epidemie nemocí, války i propady na burze. Existuje množství modelů majících charakter samoorganizovaného kritického chování. Jsou to například: Model hromady písků (sandpile model), model klouzajících bloků (slider-block model), model lesních požárů (forest-fire model), hra life a jiné. Pro využití v oblasti filtrace byl námi vybrán model hromady písků, jehož princip je dané problematice nejbližší.

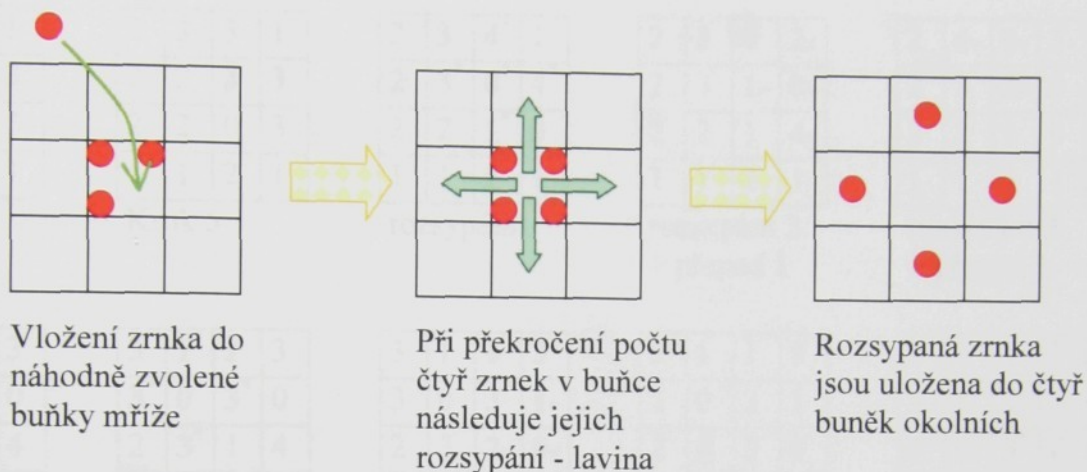
9.2.1 Model hromady písků

Princip:

Příkladem samoorganizovaného kritického chování je model hromady písků. Vychází z představy hromady písků na rovné desce stolu. V daných časových intervalech je do libovolných míst hromady opakovaně přidáno zrno písků. Po určité době se na některém místě vlivem gravitace přidané zrno uvolní, posune se směrem dolů a cestou může začít strhávat zrnka ostatní. To je jeden způsob definování laviny. Při opakování kroků přidání zrnka na hromadu tak časem dochází k samovolné redistribuci zrnků na ploše

hromady. Během redistribucí některá zrnka přepadnou přes okraj stolu a to je druhý způsob definice lavin. Uvedenou jednoduchou úvahu lze vyjádřit dvourozměrným modelem. Jeho princip je popsán na obr. 9.4 a 9.5.

Základem tohoto modelu je čtvercová mříž tvořená jednotlivými buňkami. V jednom kroku simulace je náhodně zvolena buňka mříže a do ní se umístí „zrnko písku“. Hodnota buňky tak vzroste o hodnotu jedna (viz obr. 9.4).



Obr. 9.4: Základní mechanismus redistribuce zrněk v buňce po překročení jejich kritického množství.

Kroky se opakují a v okamžiku, kdy jedna z buněk obsahuje čtyři zrnka, následuje jejich přemístění do čtyř okolních buněk. Toto přemístění bývá nazýváno rozsypaním. Okolními buňkami rozumíme 4 buňky přiléhající ku zkoumané buňce. V případě, kdy sousední buňka obsahuje před rozsypaním tři zrnka, je i ona nyní naplněna a následuje její rozsypaní. Tato rozsypaní se v rámci jednoho kroku opakují až do té doby, kdy žádná buňka neobsahuje čtyři zrnka. Pak následuje další krok. Je – li buňka obsahující 4 zrnka umístěna na okraji pole, dochází při rozsypaní k tzv. přepadu, kdy 1, nebo 2 zrnka z pole mizí. Lavinou (neboli velikostí stabilizace systému) nazýváme buď počet rozsypaní v jednom kroku, nebo počet přepadlých zrněk v jednom kroku (viz obr. 9.5).

Výstupem takového modelu po provedení mnoha kroků simulace je relativní četnost velikostí lavin. Při předpokladu nekonečně velkého modelu platí vztah:

$$N = c \cdot T^{-\alpha}, \quad (9.1),$$

kde $\alpha \approx 1$, N je počet lavin, T je velikost lavin a c je konstanta.

Vyjádřeno jinými slovy: Sestrojíme-li histogram velikostí lavin a převedeme-li obě osy do logaritmického měřítka, obdržíme přímku se směrnici jedna. Tento vztah platí pro velké systémy při vykonání dostatečně velkého počtu kroků. Jak se výsledná přímka mění se změnou velikostí systému a počtu kroků ukazuje počítačová simulace, viz obr. 9.6 až 9.9.

1	2	3	1
2	1	2	3
2	1	3	2
1	1	1	1

Počát. stav

1	3	3	1
2	1	2	3
2	1	3	2
1	1	1	1

Krok 1

1	3	3	1
2	1	2	3
2	1	4	2
1	1	1	1

Krok 2

1	3	3	1
2	1	3*	3
2	2*	0*	3*
1	1	2*	1

rozsypání 1

1	3	3	1
2	2	3	3
2	2	0	3
1	1	2	1

Krok 3

2	3	3	1
2	2	3	3
2	2	0	3
1	1	2	1

Krok 4

2	3	3	1
2	2	4	3
2	2	0	3
1	1	2	1

Krok 5

2	3	4*	1
2	3*	0*	4*
2	2	1*	3
1	1	2	1

rozsypání 1

2	3	4	2*
2	3	1*	0*
2	2	1	4*
1	1	2	1

rozsypání 2

+ přepad 1

2	4*	0*	3*
2	3	2*	0
2	2	1	4
1	1	2	1

rozsypání 3

+ přepad 2

3*	0*	1*	3
2	4*	2	0
2	2	1	4
1	1	2	1

rozsypání 4

+ přepad 3

3	1*	1	3
3*	0*	3*	0
2	3*	1	4
1	1	2	1

rozsypání 5

3	1	1	3
3	0	3	1*
2	3	2*	0*
1	1	2	2*

rozsypání 6

+ přepad 4

3	1	1	3
3	0	3	1
2	4	2	0
1	1	2	2

Krok 6

3	1	1	3
3	1*	3	1
3*	0*	3*	0
1	2*	2	2

rozsypání 1

Obr. 9.4 :

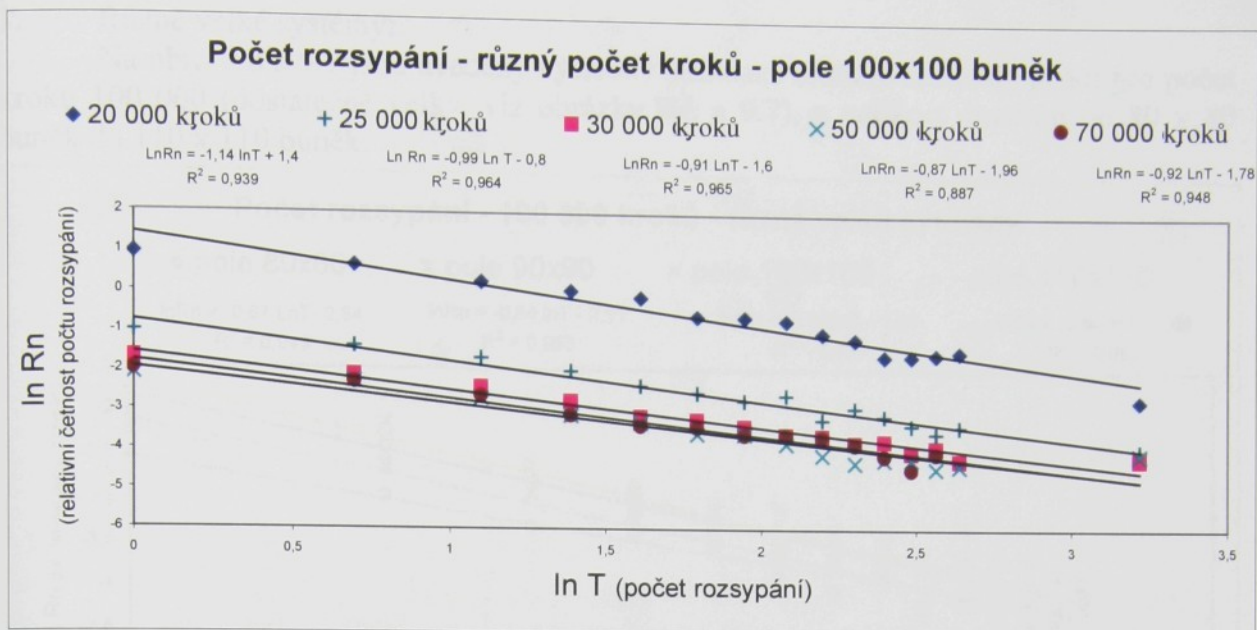
Ukázka modelu hromady písku pro čtvercovou mříž ze 16 buněk. Čísla v jednotlivých polích představují počty zrněk písku. Šedé pole značí přidání zrnka, symbol * značí rozsypání (redistribuci) a symbol * značí přepad zrněk. Počet přepadů je zároveň počtem přepadlých zrněk. Příkladem je lavina v pátém kroku, jejíž velikost je buď 6 (redistribucí), nebo 4 (přepadlých zrněk).

9.2.2 Počítačová simulace:

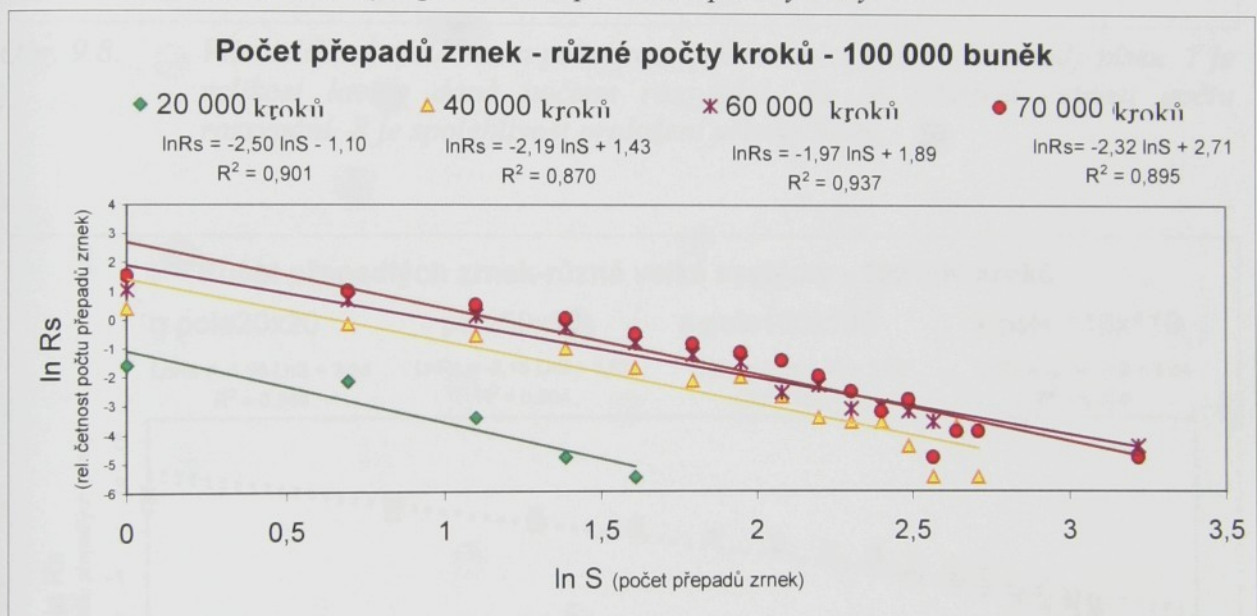
Cílem počítačové simulace bylo ověření platnosti vztahu (9.1) vzhledem k velikosti systému a počtu kroků. Důvodem vyšetřování velikosti systému a počtu kroků je fakt, že vztah (9.1) platí pouze pro velké systémy a pro statistické zpracování dat je vhodnější větší počet kroků simulace. Při ověření platnosti (9.1) pro zvolený model se za velikost laviny T považoval buď počet přepadlých zrněk v jednom kroku, nebo počet rozsypání v jednom kroku. Pro simulaci byl použit programovací jazyk C^{++} . Autorem programu simulace je Ing. Hruža, výpis textu programu lze nalézt v příloze II.

1. Různě velký počet kroků:

Na obrázcích 9.6 a 9.7 jsou uvedeny výsledky simulace modelu hromady písku pro systém o velikosti 100×100 buněk (téměř maximální velikost) a počet kroků od 20 000 do 70 000. Výstupy počítačové simulace jsou proloženy přímkou s udáním jejích parametrů a její spolehlivosti.



Obr. 9.6: Vliv počtu kroků simulace na počet rozsypání zrněk v modelu hromady písku. T je velikost laviny daná počtem rozsypání, R_n je relativní četnost počtu rozsypání, R je spolehlivost proložení přímky body.



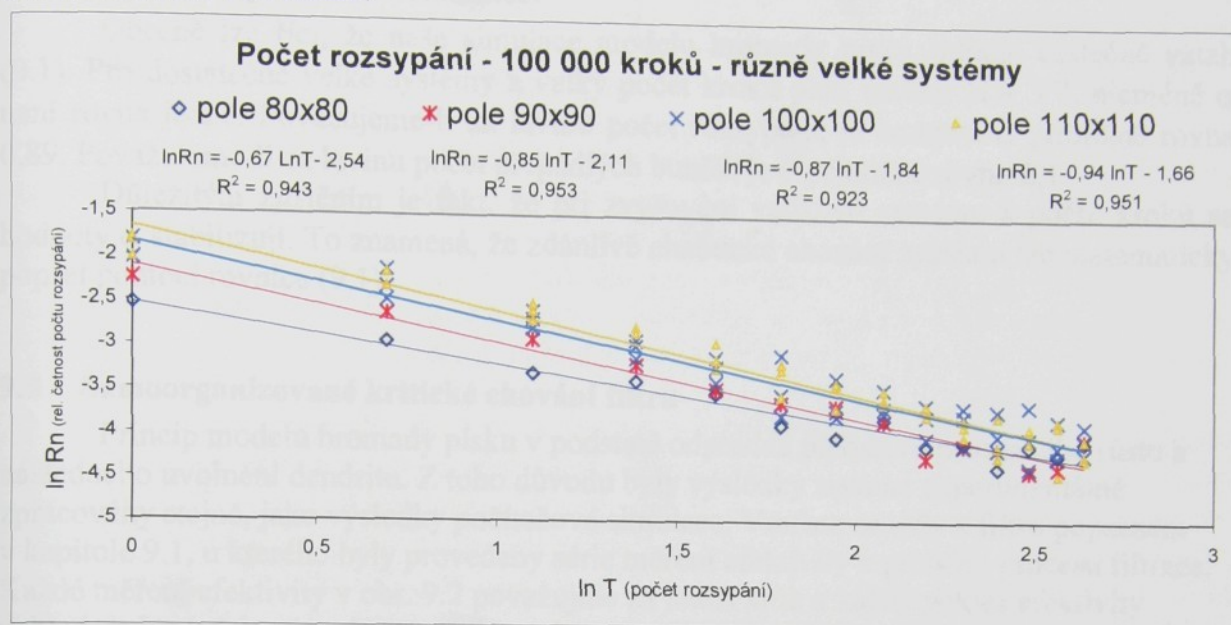
Obr. 9.7: Vliv počtu kroků simulace na počet přepadlých zrněk v modelu hromady písku. S je velikost laviny daná počtem přepadů zrněk, R_s je relativní četnost počtu přepadů zrněk, R je spolehlivost proložení přímky body.

Z obr. 9.6 vyplývá: považujeme-li za lavinu počet rozsypání, lze s rostoucím počtem kroků sledovat stabilizaci výsledků, kdy průměrná hodnota směrnic proložených přímk α je rovna 0,88 (viz vztah (9.1)) a přímky nejsou navzájem posunuty.

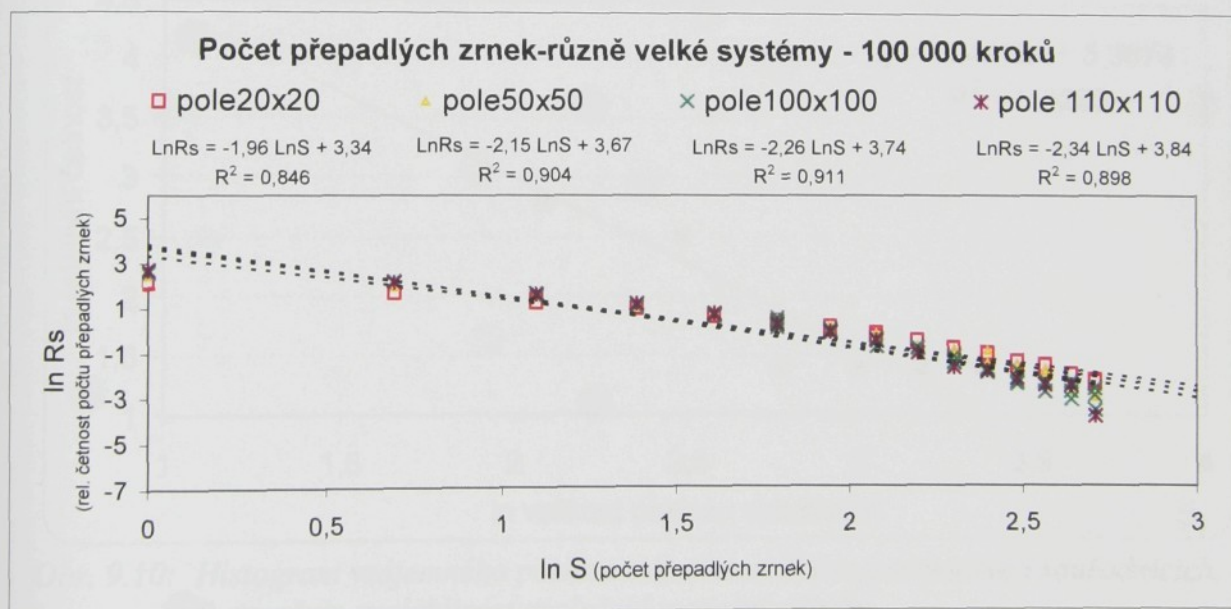
Z obr. 9.7 vyplývá: považujeme-li za lavinu počet přepadlých zrněk, lze s rostoucím počtem kroků sledovat postupnou stabilizaci absolutního členu rovnic proložených přímk, při zhruba stejné směrnic α vyjádřené průměrnou hodnotou 2,1.

1. Různě velké systémy:

Na obr. 9.8 a 9.9 jsou uvedeny výsledky simulace modelu hromady písku pro počet kroků 100 000 (dostatečně velký, viz obrázky 9.6 a 9.7), a velikost systému od 80 x 80 buněk do 110 x 110 buněk.



Obr. 9.8: Vliv velikosti systému na počet rozsypání zrněk v modelu hromady písku. T je velikost laviny daná počtem rozsypání, R_n je relativní četnost počtu rozsypání, R je spolehlivost proložení přímky body.



Obr. 9.9: Vliv velikosti systému na počet přepadlých zrněk v modelu hromady písku. S je velikost laviny daná počtem přepadlých zrněk, R_s je relativní četnost počtu přepadlých zrněk, R je spolehlivost proložení přímky body.

Z obr. 9.8 vyplývá: považujeme-li za lavinu počet rozsypání, pak u systémů větších, než je 80 x 80 buněk roste se zvětšováním systému hodnota směrnice α . Přímky jsou od sebe navzájem posunuty. Stejný růst směrnice α s růstem velikosti systému lze pozorovat i v případě, kdy považujeme za lavinu počet přepadlých zrněk (viz. obr. 9.9). Pro systém o

velikosti 10 x 10 buněk je směrnice $\alpha = -1,9$ a pro systém o velikosti 110 x 110 buněk je směrnice $\alpha = -2,3$. Posunutí přímek zůstává stejné.

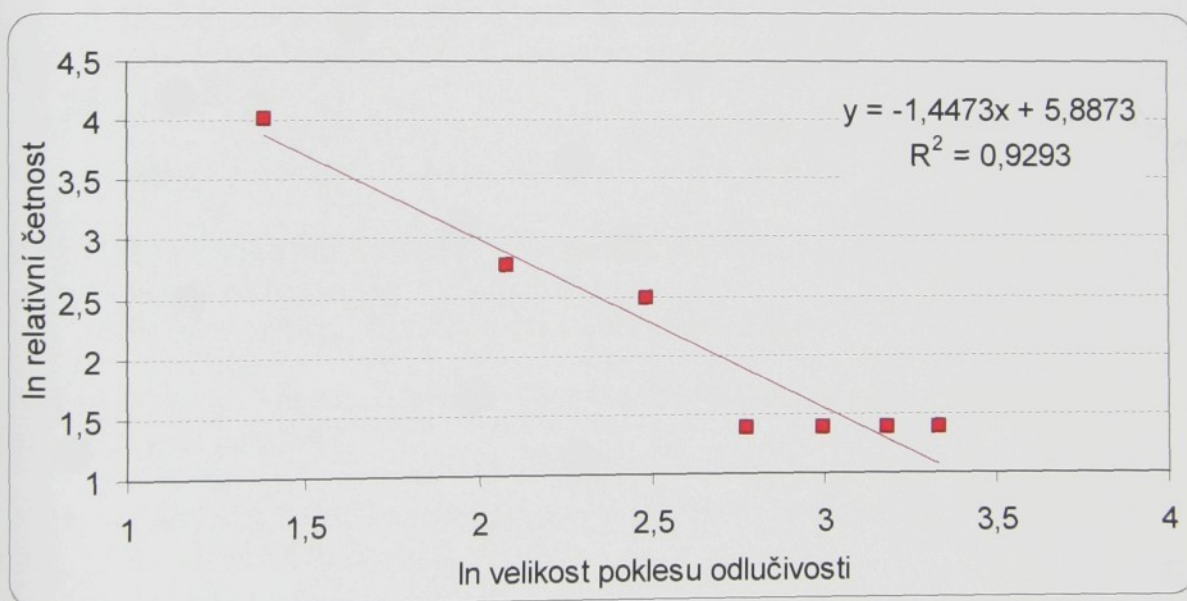
9.2.3 Výsledky počítačové simulace:

Obecně lze říci, že naše simulace modelu hromady písku splňuje částečně vztah (9.1). Pro dostatečně velké systémy a velký počet kroků platí úměra: $N \sim T^{-\alpha}$, nicméně α není rovna jedné. Považujeme-li za lavinu počet rozsypání, je hodnota α přibližně rovna 0,89. Považujeme-li za lavinu počet přepadlých buněk, je α přibližně rovno 2,1.

Důležitým zjištěním je fakt, že při zvyšování velikosti systému a počtu kroků se hodnoty α stabilizují. To znamená, že zdánlivě chaotické chování systému lze matematicky popsat pomocí rovnice (9.1).

9.3 Samoorganizované kritické chování filtru

Princip modelu hromady písku v podstatě odpovídá představě postupného růstu a následného uvolnění dendritu. Z toho důvodu byly výsledky získané experimentálně zpracovány stejně, jako výsledky počítačové simulace. Vraťme se tedy k filtru popsaném v kapitole 9.1, u kterého byly provedeny série měření efektivity v průběhu procesu filtrace. Každé měření efektivity v obr. 9.2 považujeme za jeden krok a každý pokles efektivity vzhledem k předchozí hodnotě nazvěme lavinou. K velikostem jednotlivých lavin lze přiřadit jejich četnosti. Převědeme-li osy histogramu velikosti lavin do logaritmické stupnice a provedeme lineární regresi, získáme přímku se směrnicí, viz. obr. 9.10.



Obr. 9.10: Histogram vzájemného poklesu odlučivosti E v logaritmických souřadnicích. R označuje spolehlivost proložení regresní přímky.

Z obr. 9.10 vyplývá, že takto zpracovaná data částečně odpovídají vztahu (9.1), pouze exponent α je roven 1,45. Závislost exponentu α na konkrétních parametrech filtrace bude předmětem dalšího zkoumání.

9.4 Shrnutí:

Během filtrace se v důsledku zanášení filtru zachycenými částicemi mění jeho vlastnosti. Většinou dochází ke zlepšení efektivity filtru a k růstu tlakového spádu. Za určitých podmínek však po určité době nastává opačný efekt, kdy filtrační účinnost klesá. Pokles filtrační účinnosti filtru v průběhu procesu filtrace může způsobit vážné problémy a je proto důležité znát příčiny tohoto jevu a umět jej vhodným způsobem kvantifikovat.

Pravděpodobným vysvětlením poklesů efektivity je opětovné uvolnění částic již usazených na vlákne. Podstatu tohoto uvolňování vhodně vystihuje a statisticky popisuje model hromady písku, který je jedním z modelů popisujících samoorganizované kritické chování systému. Modely kritického chování jsou zaměřeny na popis systémů, které se dostanou do mezního (kritického) stavu a následně se skokem samovolně stabilizují. Velikost této změny má charakter náhodné veličiny a lze ji statisticky popsat pomocí relativní četnosti.

Experimentálně bylo zjištěno, že výsledky získané testováním vlákenného filtru do značné míry odpovídají výsledkům získaným simulací modelu hromady písku. Neplatí sice přesně vztah (9.1), neboť hodnota α je v případě testování filtru 1,4 a v případě simulace buď 0,89, nebo 2,1 podle toho, jak výsledky vyhodnocujeme. Nicméně data získaná simulací i měřením vykazují velmi podobné závislosti. V podstatě lze říci, že lze potvrdit logaritmickou závislost vztahu 9.1, nikoliv konkrétní hodnoty exponentu, které závisí na velikosti systému a dalších jeho podrobnostech. Z uvedených výsledků vyplývá, že samoorganizované kritické chování systému lze použít pro popis poklesu efektivity filtru v průběhu procesu filtrace.

10 Citace

- ASHRAE 52.2. 1999: Method of testing general ventilation air - cleaning devices used in for removal efficiency by particle size. American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Atlanta, GA, 1999.
- BITZ, K.: Filtration: a market increasing its efficiency. Nonwovens industry. Vol 35, No 11, 2004
- BROWN, HM. 1973. The size and weight of common allergenic pollens. An investigation of their number per microgram and size distribution. *Acta Allergol.* 1973 Jul;28(2):132-7.
- BROWN, R. C. 1993: Air filtration. 1st edition. Sheffield, 1993. ISBN 0 08 041274 2
- BS 4400. 1969. Method for Sodium Chloride Particulate Test for Respirator Filters. British Standards institution. London, 1969. UDC 614.894.24
- ČEJKOVÁ, 2005: Příprava objemných vrstev z nanovláken. Diplomová práce, Technická univerzita v Liberci 2005
- EN 143:2000: Respiratory protective devices-Particle filters-Requirements, testing, marking. European Comitee for Standardization, Bruxelles 2000, Belgium.
- EN 779 1993. Particulate air filters for general ventilation. Requirements, testing, marking. European Comitee for Standardization, Bruxelles, Belgium, 1993.
- EN 779 2003. Particulate air filters for general ventilation. Requirements, testing, marking. European Comitee for Standardization, Bruxelles, Belgium, 1993.
- FIALA, J. 2003: Emise tuhých znečišťujících látek. ČSAV Praha 2003.
http://www.chmi.cz/uoco/prj/vav_740_3_02/dp1dod.pdf
Filtration efficiency testing. <http://tinworks.com/tw/filtest1.htm>
- GILESPIE, T. 1955: The role of electric forces in the filtration of aerosols by fibre filters. *J.Coll. Sci.* 1955, 299-304
- GOTTWALDOVÁ, A. 2005: Technologie elektrostatického zvlákňování. Diplomová práce, Technická univerzita v Liberci 2005
- GRAHAM, C., Ouiang, M., Raether, T., Grafe, T., Donald, B., Knauf, Polymeric nanofibers in air filtration applications., 15. Annual Conference & Expo of the American Filtration & Separations Society, Texas, 2002
- GUSTAVSSON, J. 1999: Air filters for ventilating systems-laboratory and in situ testing. *International Nonwovens Journal*, Vol 8, No 2, 1999.
- HRŮZA, J. 2000: Přístroj DFT-2 pro testování filtračních vlastností textilií. STRUTEX 2000, ISBN 80-7083-442-0

- HRŮZA, J. 2002: Samoorganizované kritické chování filtrů. STRUTEX 2002, 495-503, Liberec. ISBN 80-7083-668-7
- HRŮZA, J., HAVLÍČEK, P. 2003: Relations between the location of fibres and filtration properties. Research Journal of Textile and Apparel, Hong Kong 2003. Vol. 7, No. 2, Page 18-26.
- HRŮZA, J., JIRSÁK, O. 2002: Influence of fibre orientation on fibrous filter properties, STRUTEX, TU-Liberec, listopad 2002
- CHYTIL, M. 1984: Automaty a gramatiky. 1. vydání. SNTL Praha 1984. L11-E1-IV-41f/11 878
- JAHODA, J. 2004: Faktory ovlivňující zdravotní stav oběhového a dýchacího systému u psů. <http://www.veterina-info.cz/script/articledetail.asp?rid=95>
- JIRSÁK, O., aj. 2003: Production and properties of nanofibres. NANO 03, Brno University of Technology 2003. Page 142-148. ISBN 80-214-2527-X
- KOLÍNOVÁ, M. 2004: Permanentní elektrizace filtračních vláknenných materiálů. (dis.práce). Liberec: TU, 2004. TU Liberec-fakulta textilní
- KVASNICA, J. a kolektiv.: Mechanika. Academia ČSAV Praha 1988. 21-047-88
- LUKÁŠ, D. 2004.: Teorie netkaných textilií, Liberec 2004.
http://www.ft.vslib.cz/depart/knt/nove/index.php?obsah=studium/studijni_podklady
- LUKÁŠ, D. 1999: Stereologie textilních materiálů, Technická univerzita v Liberci, 1999, ISBN 7083-362-9
- MORÁVEK, P. 2005: Problémy mikroklimatu obytných domů. Můj dům, květen 2005.
http://www.atrea.cz/?download=cz/napsali/2005_05_muj_dum_problemy_mikroklimatu.pdf
- NATANSON, G.L. 1957: Deposition of aerosol particles by electrostatic attraction upon a cylinder around which they are flowing. Akad. Nauk, SSSR, 696-699, 1957
- NECKÁŘ, B. 1990: Příze, tvorba, struktura, vlastnosti. SNTL Praha 1990, ISBN 80-03-00213-3
- NECKÁŘ, B. and SAID, I. 2003. Theoretical approach for determining pore characteristics between fibers. Textile Research Journal, červen 2003.
- PICH, J. 1987: Gas filtration theory, edited by M.J. Matteson and C. Orr, published by Marcel Dekker, inc. New York 1987, 1-132.
- PICH, J. 1964: Teorie filtrace. Kandidátská disertační práce. ČSAV Praha 1964
- POKORNÁ, J. 2004: Komplexní hodnocení stability filtrační účinnosti elektrizovaných filtrů. Diplomová práce, Technická Univerzita v Liberci 2004

PROKEŠ, J., NEŠPŮREK, S., STEJSKAL, J. 2001: Vodivé polymery. Vesmír 80, leden 2001. http://www.vesmir.cz/soubory/2001_V035-038.pdf

RADUŠKEVIČ, L.V. 1963. Izv. AN SSSR, oddělení chemických věd, 7, 1963.

RICHTER, M 2002.: Technologie ochrany životního prostředí. Univerzita J.E. Purkyně, Ústí nad Labem 2002. <http://www.zlatokop.cz/CKZ/clanky/cesky/Skripta/Technologie.pdf>

SCHROTH, T., CAESAR, T.: Standard offers guide to in situ HEPA/ULPA filter testing. http://www.airtesters.com/EN_1822.pdf

TURCOTTE, D. L. 1999: Self-organized criticality, Reports on Progress in Physics, pages 1377–1429, Ithaca, USA, 1999

UNITED STATES PATENT Nr. 5,401,446. 1995. Method and apparatus for the electrostatic charging of a web of film. The University of Tennessee research corporation. 28. březen 1995.

TAYLOR, G. 1964: Disintegration of water drops in an electric field. Proceedings of the Royal Society of London, Series A280, 1964

VINEYARD, G.H. 1957: Frequency factors and isotope effects in solid state rate processes. J. Phys. Chem. Solids, 1957, 121-127

WAKEMAN, R.J., TARLETON, E.S. 1999: Filtration. First edition. Elsevier Advanced Technology 1999. ISBN 1 85617 345 3.

ZELENY, J. 1914. The electrical discharge from liquid points and a hydrostatic method of measuring the electric intensity at their surfaces. Physical Review, Vo III, No.2, 1914

11 Příloha

Program v jazyce C++ pro simulaci modelu hromady písku

Hromada písku

verze z 25.3. 2002 pro určení počtu přepadlých zrnek
a počtu nestabilních buněk

```
# include <graphics.h>
# include <stdlib.h>
# include <stdio.h>
# include <conio.h>
# include <math.h>
# include <float.h>
# include <time.h>

int
s1 [110] [110], s2 [110] [110], x, y, xmax=108, ymax=108,
//xmax=ymax=x-2
a,b,i,j,jmax=100,imax=100,e,f,g,
x0,x1,xx1,xx2,x2,x3,x4,x5,x6,x7,x8,x9,x10,x11,x12,x13,x14,x15,x25,
y1,y2,y3,y4,y5,y6,y7,y8,y9,y10,y11,y12,y13,y14,y15,
nbunky1,nbunky2,nbunky3,nbunky4,nbunky5,nbunky6,nbunky7,nbunky8,nb
unky9,nbunky10,nbunky11,nbunky12,nbunky13,nbunky14,nbunky15,nbunky
16,nbunky17,nbunky18,nbunky19,nbunky20,celkem1,celkem2,celkem3,cel
kem4,celkem5;

int main ()
{
randomize();
//_____
/*nastaveni grafickeho vystupu */
int gdriver = DETECT, gmode, errorcode;
int grxmax, grymax;
/* initialize graphics and local variables */
initgraph(&gdriver, &gmode, "c:\\TC\\BGI");

/* read result of initialization */
errorcode = graphresult();
/* an error occurred */
if (errorcode != grOk)
{
printf("Graphics error: %s\n",
grapherrormsg(errorcode));
printf("Press any key to halt:");
getch();exit(1);
}
grxmax=getmaxx();grymax=getmaxy();
//_____

//nulovani poli s1
```



```

for (x=0;x<xmax+1;x++)
    {for (y=0; y<ymax+1;y++)
        {s1[x][y]=0; //putpixel (x,y,2*s1[x][y]);
        }
    };//getch();
//nastaveni cyklu opakovani cele operace jednoho kroku(pro vetsi
pocet
//opakovani jsou cykly dva jdouci po sobe)
for (j=0;j<jmax;j++)
{
for (i=0;i<imax;i++)
{// zacatek jednoho kroku

//vynulovani pocitadla prepadych a nestabilnich bunek
e=0;g=0;

//iniciace nahodneho vyberu bunky v poli
a=xmax;b=ymax;

nav3:
x=1+random (xmax-1); y=1+random (ymax-1);
    putpixel (x,y,s1[x][y]);

//zaplnovani vybranych bunek hodnotou 1
s1[x][y]=s1[x][y]+1;putpixel (x,y,s1[x][y]) ;
//kontrola bunky
if (s1[x][y]<=3) goto nav1;
else

//hlavni operace rozsypani bunky a kontrola bunek jejího okolí
{
    //nacteni poctu nestabilnich bunek
    g=g++;

    //sypani
    s1[x][y]=0;
    s1[x+1][y]=s1[x+1][y]+1;
    s1[x-1][y]=s1[x-1][y]+1;
    s1[x][y+1]=s1[x][y+1]+1;
    s1[x][y-1]=s1[x][y-1]+1;
    if (x>=xmax) {e=e++;f=f++;s1[x+1][y]=0;};
    if (x<=1) {e=e++;f=f++;s1[x-1][y]=0;};
    if (y>=ymax) {e=e++;f=f++;s1[x][y+1]=0;};
    if (y<=1) {e=e++;f=f++;s1[x][y-1]=0;};

    nav2:
    //vynulovani pocitadla spadlych castic
    f=0;
    //vynulovani pole s2
    for (x=0;x<xmax+1;x++)
        {for (y=0;y<ymax+1;y++)
            {s2[x][y]=0;}} ;
    //kontrola pole s1 a jeho prepis do pole s2
    for (x=0;x<xmax+1;x++)
        {for (y=0;y<ymax+1;y++)

```



```

        {if (s1[x][y]<=3) s2[x][y]=s2[x][y]+s1[x][y];
        else
            {
                //nacteni poctu nestabilnich bunek
                g=g++;
                //sypani
                s2[x][y]=s2[x][y]+s1[x][y];
                s2[x][y]=0;
                s2[x+1][y]=s2[x+1][y]+1;
                s2[x-1][y]=s2[x-1][y]+1;
                s2[x][y+1]=s2[x][y+1]+1;
                s2[x][y-1]=s2[x][y-1]+1;
                if (x>=xmax) {e=e++;f=f++;s2[x+1][y]=0;};
                if (x<=1) {e=e++;f=f++;s2[x-1][y]=0;};
                if (y>=ymax) {e=e++;f=f++;s2[x][y+1]=0;};
                if (y<=1) {e=e++;f=f++;s2[x][y-1]=0;};}
            }}
        //prepis pole s2 do s1
        for (x=0;x<xmax+1;x++)
            {for (y=0;y<ymax+1;y++)
                s1[x][y]=s2[x][y];
            }
        //getch();
        //kontrola,zda je treba opakovat kontrolu pole,nebo ukoncit
krok    if (f>0) goto nav2;
        else
            //urceni celkoveho propadu a nacteni hodnot propadu do
            //jednotlivych kategorii
            {
                //pro velke hodnoty je celkovy propad rozepsan do vice
kategorii
                if (celkem1<20000) celkem1=celkem1+e;
                else if (celkem2<20000) celkem2=celkem2+e;
                else if (celkem3<20000) celkem3=celkem3+e;
                else if
(celkem4<20000) celkem4=celkem4+e;
                else celkem5=celkem5+e;

                //pro velke hodnoty jsou x0 a x1 rozepsany

                if (e==1) { if (x1<10000)x1=x1++;else xx1=xx1++;}
                else if (e==2) { if (x2<10000)x2=x2++;else xx2=xx2++;}
                else if (e==3)x3=x3++;
                else if (e==4)x4=x4++;
                else if (e==5)x5=x5++;
                else if (e==6)x6=x6++;
                else if (e==7)x7=x7++;
                else if (e==8)x8=x8++;
                else if (e==9)x9=x9++;
                else if (e==10)x10=x10++;
                else if (e==11)x11=x11++;
                else if (e==12)x12=x12++;
                else if (e==13)x13=x13++;
                else if (e==14)x14=x14++;
                else if (e==15)x15=x15++;
                else if (e==20)x25=x25++;
            }
    
```



```

objem      //urceni celkoveho poctu nestabilnich bunek,pro velky
           //je rozepsan-nutno secist rucne
           if(nbunky1<22000)nbunky1=nbunky1+g;
           else if (nbunky2<22000)nbunky2=nbunky2+g;
           else if (nbunky3<22000)nbunky3=nbunky3+g;
           else if (nbunky4<22000)nbunky4=nbunky4+g;
           else if (nbunky5<22000)nbunky5=nbunky5+g;
           else if (nbunky6<22000)nbunky6=nbunky6+g;
           else if (nbunky7<22000)nbunky7=nbunky7+g;
           else if (nbunky8<22000)nbunky8=nbunky8+g;
           else if (nbunky9<22000)nbunky9=nbunky9+g;
           else if (nbunky10<22000)nbunky10=nbunky10+g;
           else if (nbunky11<22000)nbunky11=nbunky11+g;
           else if (nbunky12<22000)nbunky12=nbunky12+g;
           else if (nbunky13<22000)nbunky13=nbunky13+g;
           else if (nbunky14<22000)nbunky14=nbunky14+g;
           else if (nbunky15<22000)nbunky15=nbunky15+g;
           else if
(nbunky16<22000)nbunky16=nbunky16+g;
           else if (nbunky17<22000)nbunky17=nbunky17+g;
           else if (nbunky18<22000)nbunky18=nbunky18+g;
           else if
(nbunky19<22000)nbunky19=nbunky19+g;
           else nbunky20=nbunky20+g;
           //rozepsani poctu nestabilnich bunek do jednotlivych
           kategorii
           if (g==1)y1=y1++;
           else if (g==2)y2=y2++;
           else if (g==3)y3=y3++;
           else if (g==4)y4=y4++;
           else if (g==5)y5=y5++;
           else if (g==6)y6=y6++;
           else if (g==7)y7=y7++;
           else if (g==8)y8=y8++;
           else if (g==9)y9=y9++;
           else if (g==10)y10=y10++;
           else if (g==11)y11=y11++;
           else if (g==12)y12=y12++;
           else if (g==13)y13=y13++;
           else if (g==14)y14=y14++;
           else if (g==25)y15=y15++;
           }
           // getch();

           nav1:
           //konec jednoho kroku
           }

           // for (i=0;i<imax;i++)goto nav1;
           }
           putpixel(x,y,s1[x][y]); //getch();
           }
           getch();
           //zobrazeni vysledku:

```



```

printf("jedno prepadle zrnko          %d\n",x1);
printf("jedno prepadle zrnko          %d\n",xx1);
printf("dve prepadla zrnka           %d\n",x2);
printf("dve prepadla zrnka           %d\n",xx2);
printf("tri prepadla zrnka            %d\n",x3);
printf("ctyri prepadla zrnka          %d\n",x4);
printf("pet prepadlych zrnek           %d\n",x5);
printf("sest prepadlych zrnek          %d\n",x6);
printf("sedum prepadlych zrnek         %d\n",x7);
printf("osum prepadlych zrnek          %d\n",x8);
printf("devet prepadlych zrnek         %d\n",x9);
printf("deset prepadlych zrnek         %d\n",x10);
printf("jedenact prepadlych zrnek      %d\n",x11);
printf("dvanact prepadlych zrnek       %d\n",x12);
printf("trinact prepadlych zrnek       %d\n",x13);
printf("ctrnact prepadlych zrnek       %d\n",x14);
printf("patnact prepadlych zrnek       %d\n",x15);
printf("dvacetpet padlych zrnek       %d\n",x25);
printf("celkovy propad                 %d\n",celkem1);
printf("    celkovy propad              %d\n",celkem2);
printf("        celkovy propad           %d\n",celkem3);
printf("            celkovy propad        %d\n",celkem4);
printf("                celkovy propad    %d\n",celkem5);
getch();

```

```

printf("1 bunka    %d\n",y1);
printf("2 bunky    %d\n",y2);
printf("3 bunky    %d\n",y3);
printf("4 bunky    %d\n",y4);
printf("5 bunek     %d\n",y5);
printf("6 bunek     %d\n",y6);
printf("7 bunek     %d\n",y7);
printf("8 bunek     %d\n",y8);
printf("9 bunek     %d\n",y9);
printf("10 bunek    %d\n",y10);
printf("11 bunek    %d\n",y11);
printf("12 bunek    %d\n",y12);
printf("13 bunek    %d\n",y13);
printf("14 bunek    %d\n",y14);
printf("25 bunek    %d\n",y15);getch();
printf("celkem nestabilnich bunek 1  %d\n",nbunky1);
printf("celkem nestabilnich bunek 2  %d\n",nbunky2);
printf("celkem nestabilnich bunek 3  %d\n",nbunky3);
printf("celkem nestabilnich bunek 4  %d\n",nbunky4);
printf("celkem nestabilnich bunek 5  %d\n",nbunky5);
printf("celkem nestabilnich bunek 6  %d\n",nbunky6);
printf("celkem nestabilnich bunek 7  %d\n",nbunky7);
printf("celkem nestabilnich bunek 8  %d\n",nbunky8);
printf("celkem nestabilnich bunek 9  %d\n",nbunky9);
printf("celkem nestabilnich bunek 10 %d\n",nbunky10);
printf("celkem nestabilnich bunek 11 %d\n",nbunky11);
printf("celkem nestabilnich bunek 12 %d\n",nbunky12);
printf("celkem nestabilnich bunek 13 %d\n",nbunky13);
printf("celkem nestabilnich bunek 14 %d\n",nbunky14);
printf("celkem nestabilnich bunek 15 %d\n",nbunky15);
printf("celkem nestabilnich bunek 16 %d\n",nbunky16);

```



```
printf("celkem nestabilnich bunek 17 %d\n",nbunky17);  
printf("celkem nestabilnich bunek 18 %d\n",nbunky18);  
printf("celkem nestabilnich bunek 19 %d\n",nbunky19);  
printf("celkem nestabilnich bunek 20 %d\n",nbunky20);  
getch();}
```


U 603 T