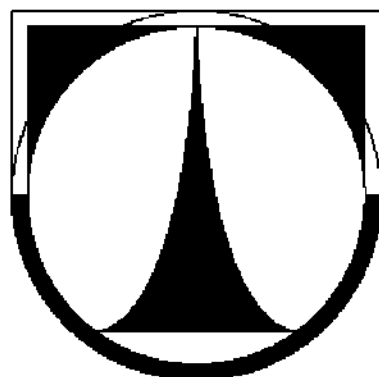


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

2007

Iva Blešová

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ

KATEDRA NETKANÝCH TEXTILIÍ

Obor: 3106 – T004

Zaměření: Netkané textilie

**ČISTITELNÉ VZDUCHOVÉ FILTRY
OBSAHUJÍCÍ NANOVLÁKENNOU VRSTVU**

**THE PULSE-JET AIR FILTERS HOLDING
A LAYER OF NANO-FIBERS**

Autor: Iva Blešová

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jakub Hrůza, Ph.D.

Rozsah práce:

stran	obrázků	tabulek	příloh
74	36	18	4

Prohlášení

Prohlašuji, že předložená *diplomová* práce je původní a zpracovala jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním *diplomové* práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Beru na vědomí, že si svou diplomovou práci mohu vyzvednout v Univerzitní knihovně TUL po uplynutí pěti let po obhajobě.

V Liberci, dne 8. 1. 2007

.....

Blešová Iva

P o d ě k o v á n í

„Mé poděkování patří především vedoucímu diplomové práce Ing. Jakubovi Hrůzovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady a připomínky při její tvorbě a zpracování. Za tvůrčí nápady a poznámky děkuji panu Karlu Kafkovi a Ing. Martinu Blešovi. Za vstřícnost a podporu děkuji všem pracovníkům katedry netkaných textilií TU v Liberci.

Zvláštní poděkování patří mé rodině za plnou podporu po celou dobu studia.“

Anotace

Tato práce se zabývá problematikou vzduchové filtrace v průmyslu, kde se užívá především čistitelných filtrů. Modifikací těchto dnes běžně používaných filtrů může být vrstva nanovlákného materiálu umístěná na náletové straně, která mění vlastnosti a chování těchto filtrů. Samotná otázka nanovlákných materiálů, jejich parametrů a způsobů výroby je vypracována v náležitě označených kapitolách teoretické části. Nedílnými součástmi teoretické oblasti je filtrační problematika a parametry čistitelných filtrů. Náplní experimentální části je hledání vhodného filtračního média s nanovláknou vrstvou na náletové straně a každý z těchto vzorků je podroben cyklické zkoušce zanášení prachem a následnému pulsnímu čištění na speciálním zařízení. Ostatní měřicí zařízení pro zjišťování dalších důležitých parametrů jsou popsány v experimentální části v časové návaznosti. Sledovanými vlastnostmi experimentu jsou především tlakový spád, prodyšnost a efektivita filtru. V závěru práce je ze zjištěných výsledků odhadována trvanlivost resp. životnost filtru.

Annotation

This diploma thesis deals with air filtration especially in industry area where pulse-jet air filters are mainly applied. These ordinarily used filters could be modified by a layer of nanofibre material, on the intake side positioned, which changes the characteristics of the filters. The issue of nanofiber materials concerning their parameters and production methods is worked out in appropriately marked chapters in the theoretical part of this diploma thesis. The questions of both filtration and pulse-jet air filters are the inseparable parts of the theoretical passage. The searching for suitable filtration medium holding a nanofiber layer positioned on the intake side is the content of the experimental part. Each one of these samples was repeatedly covered by dust and cleaned by the special pulse-jet equipment afterwards within each testing cycle. Other measuring devices for searching important and necessary parameters are described according to time sequence in experimental part. The drop of pressure, the permeability and the efficiency of filter during the testing cycles were the monitored characteristics of the experiment. Based on results, the durability of the filter was estimated in the final part of the diploma thesis.

Obsah

Seznam zkratk a symbolů	9
1. Úvod.....	10
2. Teoretická část	11
2.1 Teorie nanovláken.....	11
2.2 Metody přípravy nanovláken	11
2.3 Elektrostatické zvlákňování nanovláken	12
2.3.1 Historie elektrostatické přípravy nanovláken	12
2.3.2 Základní poznatky o technologii elektrostatického zvlákňování.....	12
2.4 Nanospider	13
2.4.1 Druhy materiálů použitelných k elektrostatickému zvlákňování	15
2.5 Aplikace nanovlákených materiálů.....	16
2.6 Vlastnosti nanovláken vzhledem k jejich použití pro filtraci	16
2.6.1 Geometrické vlastnosti nanovláken	16
2.6.2 Výhody nanovláken	18
2.7 Teorie filtrace.....	19
2.7.1 Filtrační vlastnosti netkaných textilií.....	19
2.7.2 Rozdělení filtračních mechanismů.....	19
2.7.3 Charakteristiky filtrovaných systémů	20
2.7.4 Disperzní prostředí filtračního mechanismu.....	21
2.7.5 Základní charakteristiky filtračních mechanismů.....	22
2.8 Makroskopické chování filtrů	23
2.8.1 Povrchová a hloubková filtrace	24
2.8.2 Membránová filtrace.....	25
2.8.3 Obrazová analýza nanovlákené vrstvy	26
2.8.4 Parametry a užité vlastnosti filtrace.....	27
2.9 Mechanismus povrchové filtrace kombinované pulsním čištěním.....	29
2.9.1 Pulsní tlakovzdušná regenerace	31
2.9.2 Čistitelné vzduchové filtry.....	34
2.10 Filtrační technologie nanovláken.....	37
3. Experimentální část.....	39
3.1 Výběr a příprava vzorků	39
3.1.1 Parametry testovaných vzorků	40

3.2 Zjišťování filtračních charakteristik	41
3.2.1 Měření průtoku vzduchu, resp. prodyšnosti.....	41
3.2.2 Postup měření na přístroji Metefem typ FF - 12/A.....	43
3.3 Zanášení zkušebního prachu pomocí přístroje DFT-3.....	44
3.3.1 Parametry syntetického zkušebního prachu Spongelit (sklářský tripol D).....	44
3.3.2 Postup měření na přístroji Dust Filter Tester DFT-3	45
3.4 Testování vzduchové filtrace aerosolem NaCl (Bench Mounting Rig type 1100 P) 47	
3.4.1 Princip měření na přístroji pro testování vzduchové filtrace aerosolem NaCl	49
3.5 Pulsní čištění prachového filtru	51
3.5.1 Princip zařízení	52
3.6 Výsledky měření změny prodyšnosti a tlakového spádu při opakovaném zanášení a čištění	54
3.6.1 Zhodnocení výsledků měření u filtračních vzorků s různými podkladovými materiály	54
3.6.2 Zhodnocení výsledků měření u skládaného filtračního vzorku	58
3.6.3 Zhodnocení výsledků měření u vybraného filtračního materiálu	60
4. Statistické zpracování výsledků experimentu.....	64
4.1 Grafické vyjádření průběhu prodyšnosti u měřených vzorků bez nánosu prachu, resp. po čištění	64
4.2 Výpočet trvanlivosti filtru pomocí výpočtu regresní rovnice procentuálního vyjádření prodyšnosti.....	66
4.3 Grafické vyjádření průběhu počátečního tlaku u měřených vzorků	67
4.4 Výpočet trvanlivosti filtru pomocí výpočtu regresní rovnice počátečního tlaku.....	68
5. Závěr.....	70
Seznam použité literatury	72
Seznam příloh	74

Seznam zkratek a symbolů

μm	mikrometr = 10^{-6} [m]
d_p	velikost částic disperzního podílu [μm]
d	velikost pórů [μm]
E	efektivita [%]
G	množství prachu [g]
Δp	tlakový spád [Pa]
J	jímavost [g]
E_c	střední efektivita [%]
p	tlak [MPa]
a_g	střední geometrický průměr částic [μm]
ρ	měrná hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
NaCl	chlorid sodný

1. Úvod

Nanověda a nanotechnologie je fenomén třetího tisíciletí, kdy přetechizovaný svět potřebuje léčit neduhy pokroku a civilizace účinnými, odlišnými a netradičními způsoby a novými metodami, které musí být technicky i ekonomicky dostupné a ekologicky nezávadné, nezatěžující životní prostředí.

Jako nanotechnologie obecně označujeme obory, které pracují s objekty více než tisíckrát tenčími než lidský vlas. Nanomateriály mají unikátní vlastnosti, které se dají široce využít v medicíně, strojírenství, elektronice nebo textilním průmyslu.

Dynamický rozvoj nanovědy a nanotechnologií je přičítán mimořádné aktivitě vědeckých kapacit USA, Japonska, Francie, Velké Británie a podobně, přičemž v posledních letech se výsledky své práce může pochlubit i Česká republika a především její přední pracoviště, jímž je nepochybně Textilní fakulta Technické univerzity v Liberci.

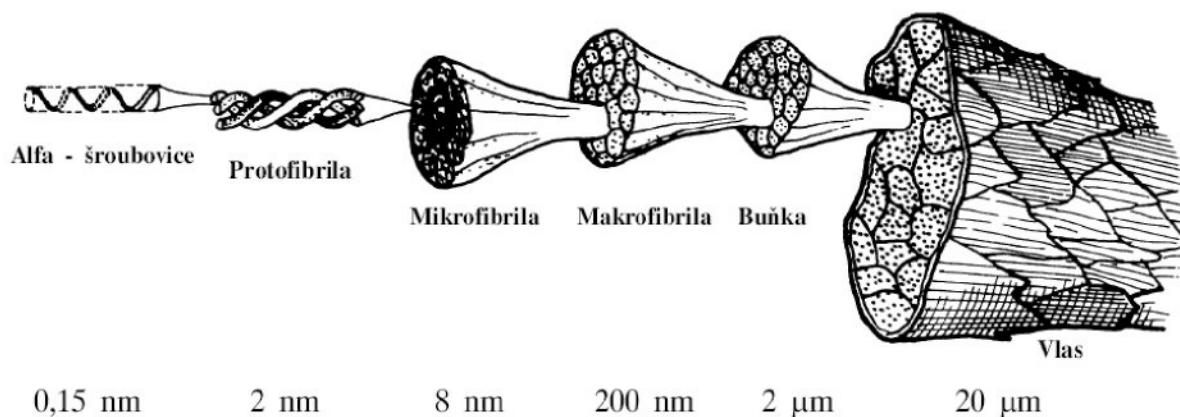
V posledních desetiletích se za pomoci netkaných textilií pomáhal úspěšně řešit například problém vzduchové filtrace u klimatizací, průmyslových odlučovačů atd.

I přesto, že jakékoli příměsi a nečistoty se v ovzduší vyskytují v relativně malém množství, mají pro životní prostředí zásadní význam. Atmosféra je složena z plynů, par, atmosférického prachu, jemných částic, vláken a dalších, které doposud byly pomocí standardních technologií lehce odlučitelné. Obsahuje však i složku těch nejjemnějších částic jako jsou bakterie a viry, jejichž filtraci lze docílit nejlépe prostřednictvím nanotechnologií.

2. Teoretická část

2.1 Teorie nanovláken

Nanovláknna jsou vlákna, jejichž průměr dosahuje submikronového rozsahu (10^{-9} m). Pro představu této velikosti je na obr. 2.1 uvedena hierarchická struktura vlasu.



Obr. 2.1: Hierarchická struktura vlasu [1].

Jednou z metod přípravy nanovláken je elektrostatičké zvlákňování (a její modifikace).

2.2 Metody přípravy nanovláken

Nanovláknna lze vyrobit následujícími postupy [2]:

Drawing, tj. dloužení - jde o proces, který se principiálně velmi podobá zvlákňování za sucha ve vlnářském průmyslu. Lze tak produkovat velmi dlouhá jednotlivá vlákna.

Template synthesis, tj. podložková syntéza - jedná se o metodu využívající membránu s nanorozměrnými póry pro tvorbu nanovláken nebo nanotrubiček, a to z různých materiálů (např. elektricky vodivých polymerů, kovů, polovodičů a uhlíku). Nelze ale tímto postupem získat jednotlivá nanovláknna.

Phase separation, tj. fázová separace - jednotlivé fáze jsou následující:

- ✓ rozpouštění
- ✓ želatinace
- ✓ extrakce (za použití různých rozpouštědel)

- ✓ zmrazení
- ✓ sušení

Následně vzniká nanorozměrná pórovitá hmota, resp. pěna. Proces je časově velmi náročný na převod pevného polymeru do nano-porézní pěny.

Self assembly, tj. samo-organizace - jednotlivé funkční mechanismy se samy organizují do požadovaných vzorců a funkcí. Opět jde o časově velmi náročné zpracování kontinuálních polymerních nanovláken.

Electrospinning, tj. elektrostatické zvlákňování - je to jediný z uvedených principů, který je schopen výroby jednotlivých kontinuálních nanovláken různých polymerů, a to ve velkém měřítku, proto bude následně nahlédnuto pouze do této technologie. **Nanospider**, tj. tzv. válečková metoda je upravená metoda elektrostatického zvlákňování z roztoků polymeru [3]. Metoda Nanospideru byla použita v této práci.

2.3 Elektrostatické zvlákňování nanovláken

2.3.1 Historie elektrostatické přípravy nanovláken

V období mezi léty 1934 - 1944 publikoval již Formhals sérii patentů [4, 5, 6, 7, 8] popisujících experimentální zařízení pro výrobu polymerních vláken za použití elektrostatické síly. Formhals přivedl polymerní vlákna ve formě roztoku acetátu celulózy do elektrostatického pole, ve kterém se nacházely dvě elektrody opačné polarity a zvlákňovací trysky. Tak vytvořil z polymerního roztoku vlákno, které bylo zachyceno na uzemněném kolektoru [2].

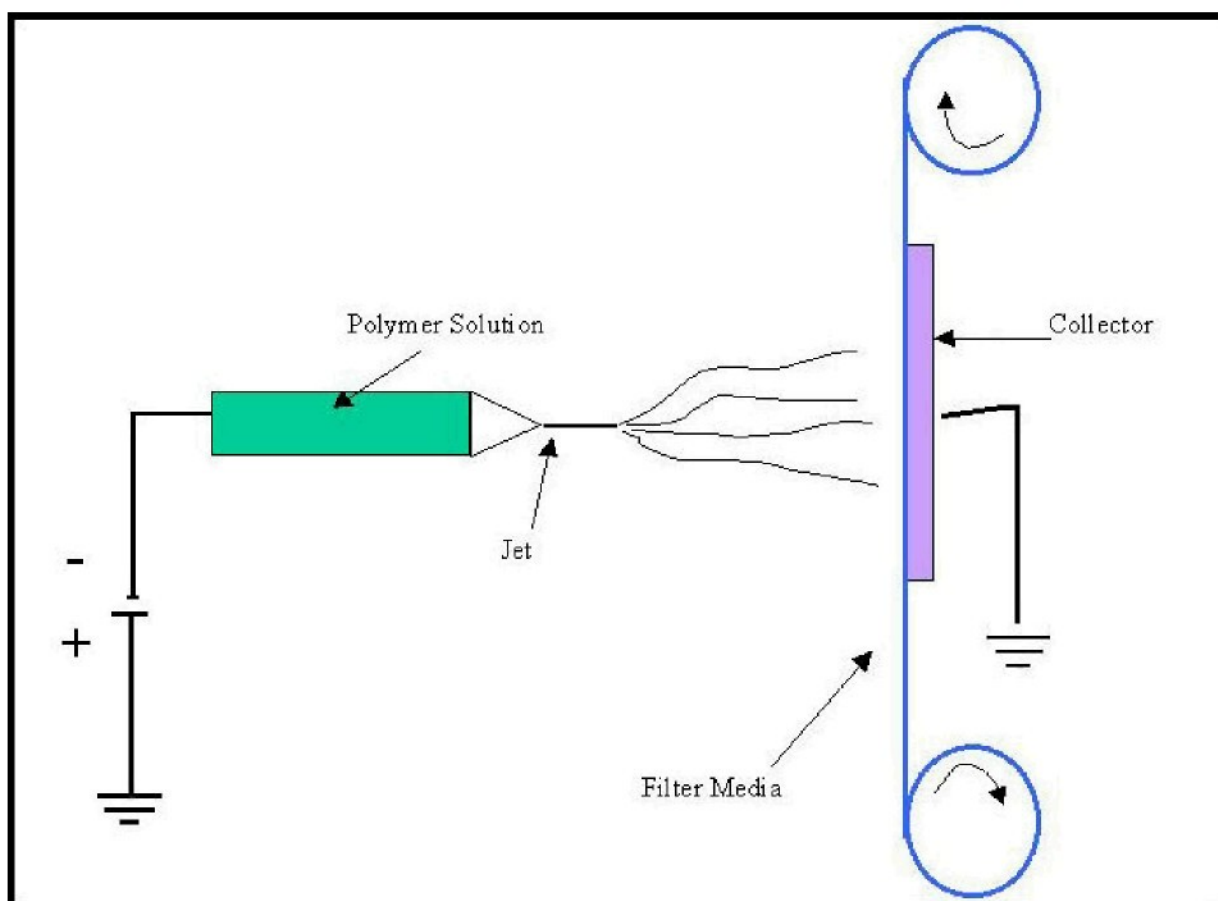
Roku 1952 se Vonnegutovi a Neubauerovi podařilo sestavit přístroj pro elektrostatické rozprašování, tzv. elektrospraying, díky němuž byli schopni produkovat proudy vysoce elektrizovaných jednotných kapiček o průměru cca. 0,1 mm [9].

2.3.2 Základní poznatky o technologii elektrostatického zvlákňování

Elektrostatické zvlákňování, resp. electrospinning je proces zvlákňování polymerů ve formě roztoků (event. taveniny) využívající elektrostatických sil k tvorbě jemných vláken. Základním principem v procesu electrospinningu je využití vysokého napětí k tvorbě elektricky nabitého proudu polymerního roztoku nebo taveniny.

Elektroda vysokého napětí je spojena přímo s polymerním roztokem. Roztok je následně zvlákněn kapilárou - zvlákňovací tryskou. Mezi špičkou kapiláry a uzemněným kolektorem je vysoký elektrický náboj, který vytváří tzv. Taylorův kužel, jenž je následkem relaxace indukovaného náboje k volnému povrchu kapaliny na výstupu ze zvlákňovací trysky [2].

Princip názorněji vysvětluje obr. 2.2, kde je znázorněn zjednodušený princip modifikace elektrostatického zvlákňování.



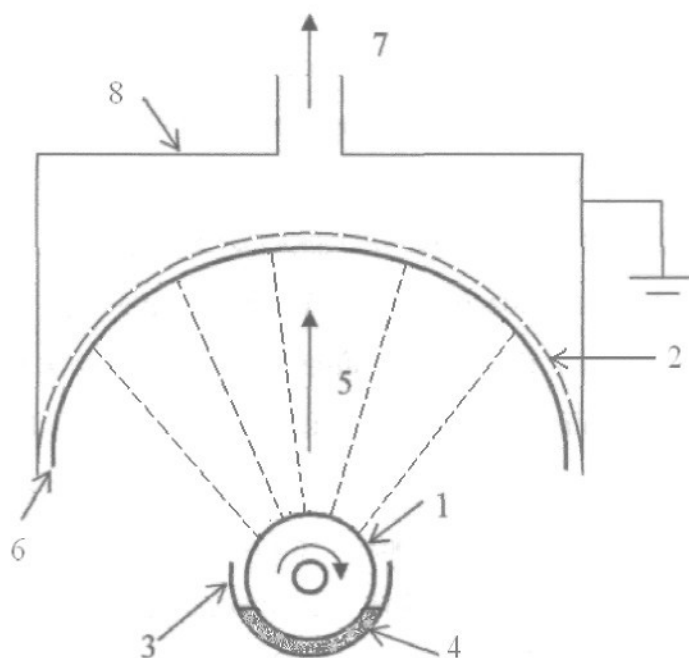
Obr. 2.2: Princip elektrostatického zvlákňování - modifikace metody electrospinningu; zleva popis: polymer solution - roztok polymeru, jet - tryska, filtr media - filtrační médium, collector - kolektor [10].

2.4 Nanospider

Nanospider je modifikace elektrostatického zvlákňování, která umožňuje výrobu nanovláknenných textilií v průmyslovém měřítku. Technologie byla vynalezena na Technické univerzitě v Liberci (katedra netkaných textilií), ve spolupráci s firmou

Elmarco, a následně patentována. Jedná se o upravenou metodu elektrosvlákňování z roztoků polymeru (electrospinning) (viz schéma na obr. 2.3) [11].

Princip je založen na tvorbě Taylorova kužele, následně proudu, z tenké vrstvy roztoku polymeru za působení silného elektrostatického pole. Rozdíl mezi electrospinningem a nanospiderem spočívá v tom, že technologie Nanospideru nevyužívá pro tvorbu vláken žádných trysek, resp. kapilár, nýbrž válec (odtud „válečková metoda“), který je částečně ponořen v roztoku polymeru. V průběhu otáčení válce dochází k nánosu vrstvy kapalného polymeru na vrchní část válce, kde se vlivem nestabilit na povrchu tekutiny a silného elektrostatického pole vytvoří Taylorův kužel. Taylorovy kužely jsou vytvářeny blízko sebe po celé délce válce, čímž je dosaženo vysoké výrobní kapacity zvlákňovací hlavy Nanospideru. Proudové roztoky polymeru jsou následným odpařením rozpouštědla přeměňovány v pevnou fázi ještě před tím, než dosáhnou protější sběrné elektrody [12].



Obr. 2.3: Schéma zařízení Nanospider; 1 - nabitá elektroda, 2 - protielektroda, 3 - zásobovací vanička, 4 - roztok polymeru, 5 - směr tvorby nanovláken, 6 - podkladová textilie, 7- odsávání vzduchu, 8 - sběrná clona s uzemněním [12].

Tryska s polymerním roztokem (4) (princip electrospinningu) je nahrazena zásobovací vaničkou (3) a uvnitř je umístěna kovová elektroda (1) uložená otočně. Kovový váleček (1) je rovnoměrně napájen elektrickým proudem. Na protější straně

válečku je umístěná protielektroda (2), pod níž (blíže k válečku) je podkladová textilie (6), na níž se vytvořená nanovláknna nanášejí a ukládají. Jejich tvorba a správné uložení je ještě znásobeno odsáváním vzduchu (7) ve směru tvorby vláken.

Technologické parametry tohoto procesu jsou závislé na mnohých fyzikálních a chemických procesech, které v průběhu elektrostatického zvlákňování vznikají, jedná se především o parametry [12]:

- typ polymeru, jeho viskozita, koncentrace, polarita atd.
- tvar, umístění elektrod a elektrické napětí v nich
- typ podkladové textilie (technologie výroby, adheze, pevnost,...)
- a jiné (klimatické podmínky, rychlost apod.)

2.4.1 Druhy materiálů použitelných k elektrostatickému zvlákňování

Nanovláknna jsou uvedenými technologiemi (viz kap. 2.3 a 2.4) z roztoků polymerů nebo polymerních tavenin. Obecně existuje více než 50 základních polymerů (jejich seznam uveden v příloze č. 3). Většinou jsou zvlákňovány polymerní roztoky, což je nejspíš dáno vyšší viskozitou taveniny (ta nedovoluje formování tak jemných vláken jako z roztoků) [2].

Elektrostatickým zvlákňováním je možné vytvořit vlákna ze směsí polymerů, tj. vlákna kompozitní. Jednou z dalších výhod této technologie je možnost přidání malých nerozpustných částecek ke zvlákňnému polymernímu roztoku a jejich následné zapouzdření v suchých vláknech. Takto lze přidat do polymerních textilií z nanovláken rozpustné léky nebo bakteriální činitele [2].

Malé rozpustné částice, které byly dispergovány a elektrostaticky zvlákňeny na University of Acron. Tyto částice byly zapouzdřeny v suchých nanovláknnech a začleněny do jejich struktury. Polymerní nanovláknna a netkané materiály z těchto nanovláken mohou být nosičem aditiv.

Katedra NT TUL učinila první úspěšný pokus o začlenění stříbrných částic do struktury nanovláken [13].

2.5 Aplikace nanovláknenných materiálů

Nanovláknna si našla uplatnění v široké škále oborů, u některých oborů lze jejich využití očekávat v blízké či vzdálené budoucnosti. Uvedeny jsou příklady používaných nebo plánovaných aplikací:

- kompozity
- filtrace
- separační membrány
- kosmetika
- biomedicína (umělé orgány, tkáňové inženýrství, krevní cévy, systémy cíleného doručení léčiv, obvazoviny, dýchací masky (roušky))
- ochranné oděvy
- solární plachty, světelné plachty a zrcadla pro použití ve vesmíru
- aplikace pesticidů na rostliny
- nanovodiče, nanoelektrické aplikace jako palem řízené tranzistory a ultra-malé antény
- nosiče chemických katalyzátorů
- vodíkové nádrže pro palivové články

2.6 Vlastnosti nanovláken vzhledem k jejich použití pro filtraci

2.6.1 Geometrické vlastnosti nanovláken

Geometrické vlastnosti nanovláken (průměr vláken, jejich struktura, orientace a distribuce) jsou, vzhledem ke svým rozměrovým dispozicím (viz kap. 2.1), zjišťované pomocí elektronových mikroskopů. [12]

V tab. 2.1 jsou pro porovnání uvedené průměry vláken a plošná hmotnost netkané textilie vyrobené různými technologiemi.

Typ vlákna	Rozsah průměrů vlákna [μm]	Plošná hmotnost [g.m^{-2}]
Elektrostatické zvlákňování	0,04 – 2	0,02 – 0,5
Melt-blown	2 – 10	5 – 200
Spun-bond	15 - 40	8 - 350

Tab. 2.1: Průměry vláken a plošné hmotnosti netkaných textilií vyrobených různými technologiemi [10].

V tab. 2.2 jsou uvedeny měrné povrchy vláken o různých průměrech a vyrobených různými technologiemi. Měrný povrch vyjadřuje plochu povrchu vláken v hmotnostní jednotce materiálu.

Typ vlákna	Průměr vlákna [μm]	Měrný povrch [$\text{m}^2.\text{g}^{-1}$]
Elektrostatické zvlákňování	0,05	80
Elektrostatické zvlákňování	0,2	20
Melt-blown	2,0	2
Spun-bond	20	0,2

Tab. 2.2: Měrný povrch vláken různých průměrů (při různých technologiích výroby) [10].

Mezi geometrické vlastnosti se řadí pórovitost, protože velikost pórů je důležitá pro filtrační aplikace (také např. pro ochranné oděvy apod.)

Pavučina z nanovláken má větší počet o podstatně menších rozměrech mikropórů než melt-blown a spun-bond pavučina [10].

2.6.2 Výhody nanovláken

Polymerní nanovláknna mohou mít mnoho výjimečných vlastností zahrnujících malý průměr a z toho vyplývající velký měrný povrch, vysoce orientovanou krystalickou strukturu (a výslednou velkou pevnost).

Výhody nanovláken při procesu filtrace jsou následující [13]:

- 1) velký měrný povrch vláken (čím jemnější vlákna, tím větší měrný povrch vláken a z toho vyplývající vysoká účinnost filtru),
- 2) malé póry (malé mezivláknenné prostory, možnost zachycení částic větších než je velikost pórů, více viz kap. 2.7.3)
- 3) specifické okrajové podmínky proudění (díky okrajové podmínce skluzu po vlákně je protékající médium méně bržděno povrchem vláken a to se projeví na hodnotě tlakového spádu. 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], [16]),
- 4) malé množství použitého materiálu (cena, není třeba se obávat například hořlavosti vláken).

2.7 Teorie filtrace

2.7.1 Filtrační vlastnosti netkaných textilií

Filtrace patří mezi separační procesy disperzního podílu nebo disperzní fáze od disperzního prostředí určité fáze disperzního systému. Disperzním podílem jsou myšleny částice rozptýlené v disperzním prostředí, ve formě kapaliny nebo plynu, které jsou zachytávány na filtru [14].

2.7.2 Rozdělení filtračních mechanismů

Filtraci lze dělit dle následujících kritérií [15]:

Dle charakteru disperzního podílu na kapalinovou a plynnou, dále dle velikosti částic disperzního podílu, a to na makrofiltraci (částicová), mikrofiltraci, ultrafiltraci, nanofiltraci a hyperfiltraci (viz tab. 2.3). Dalších kritériem může být způsob zachytu dispergovaných částic, podle něhož se filtrace dělí na povrchovou a hloubkovou.

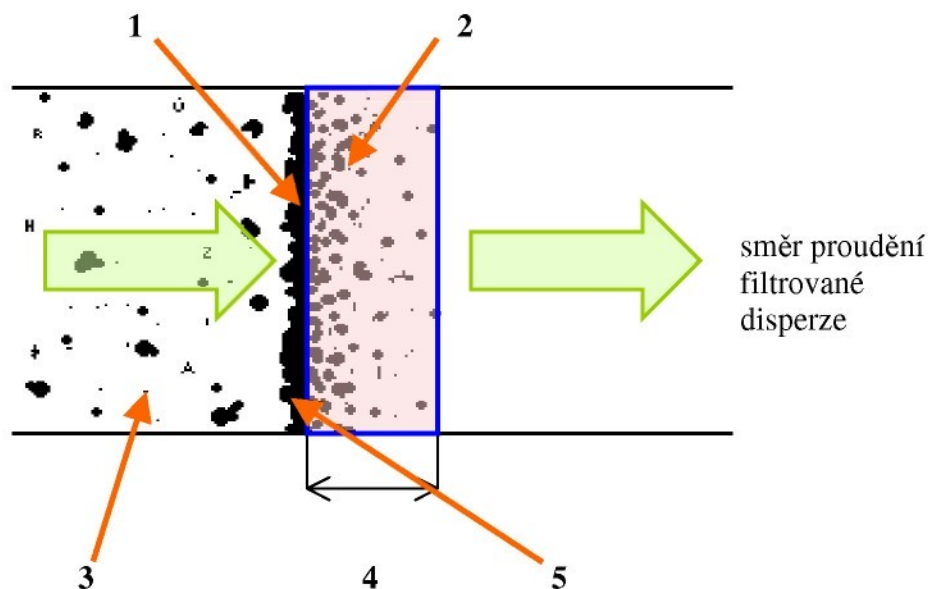
typ filtrační technologie	velikost částic [μm] do:
částicová filtrace	1
mikrofiltrace	0,1
ultrafiltrace	10^{-3}
nanofiltrace	10^{-4}
hyperfiltrace	10^{-5}

Tab. 2.3: Rozdělení typů filtračních mechanismů [15]

Z hlediska výše uvedeného rozdělení je tato práce zaměřená především na mikrofiltraci plynnou, povrchovou (viz kap. 2.8.1 a 2.8.3).

2.7.3 Charakteristiky filtrovaných systémů

Základní pojmy procesu filtrace jsou uvedeny v obr. 2.4



Obr. 2.4: Obecné schéma filtračního procesu; 1 - náletová strana filtru, 2 - částice zachycené uvnitř filtru, 3 - dispergované částice v disperzním prostředí, 4 - tloušťka filtru, 5 - filtrační koláč [16].

Dva základní typy filtračních mechanismů se dělí (viz kap. 2.7.2) dle způsobu, kterým jsou filtrované částice zachyceny. Jedná se o povrchovou a hloubkovou filtraci. V případě povrchové filtrace jde o zachycení dispergovaných částic větších než mezivláknenné póry, tj. prostor mezi vlákny filtračního média. Funkcí míry zachycení částic je především velikost pórů. U hloubkové filtrace je tomu naopak, ale uplatní se zde více filtračních mechanismů najednou. V této práci se autorka bude zabývat především filtrací povrchovou, neboť ta úzce souvisí se studovanou problematikou čistitelných vzduchových filtrů s nanovláknennou vrstvou.

Charakteristiky filtrace dle závislosti účinnosti různých veličin, které popisují vlastnosti částic, proudu vzduchu (plynu) a filtru, jsou nezbytné pro praktické použití teorie filtrace, kde nedílnou součástí je analýza rovnic pro účinnost filtru a hledání závislostí účinnosti jednotlivých veličin. Jde se o selektivní charakteristiku, kde se jedná o závislost účinnosti velikostí filtrovaných částí. Rychlostní charakteristika popisuje závislost této účinnosti na rychlosti proudění vzduchu. Tlaková charakteristika popisuje závislost na tlaku vzduchu (plynu) a je dokázané Pichem [Pich 1964], že účinnost filtru

s klesajícím tlakem stoupá. Dále je definovaná teplotní charakteristika, která s obsahem této práce příliš nesouvisí. Opomenout nelze ani strukturní charakteristiku, kde už název napovídá, že se jedná o přímou závislost účinnosti filtru na samotné struktuře filtru. Do tohoto popisu spadají geometrické rozměry filtru, průměr vláken a porozita filtru.

Účinnost filtru se snižuje s rostoucím průměrem vláken, proto je snahou vyrobit vláknenný materiál, který se skládá z vláken o co nejmenším průměru. Na tomto faktu je postavena základní myšlenka experimentální části této práce, kdy se na podkladový materiál použila vrstva nanovláknenného materiálu. Nelze vyloučit jako ovlivňující další faktory, jakými jsou např. tvar vláken, povrch, chemické složení apod. Tyto parametry mají ale znatelně menší vliv na účinnost filtru. Účinnost filtru se také zvyšuje s klesající porozitou, tj. s vyšší hustotou zaplnění. Ale naproti tomu s klesající porozitou rapidně roste tlakový spád. Tyto důvody mají za následek široké využití vysoko-porézních materiálů pro vzduchovou filtraci [17].

2.7.4 Disperzní prostředí filtračního mechanismu

Pro lepší pochopení filtračního procesu je nutno vysvětlit některé základní vztahy a parametry filtrace.

Disperzní systémy jsou charakterizovány základními dvěma parametry [14]:

- ✓ velikostí částic disperzního podílu
- ✓ hmotnostní koncentrací disperzní fáze připadající na objemovou jednotku disperzního systému

Podle velikosti částic disperzního podílu lze tyto systémy rozdělit podle tabulky 2.4:

V této práci se jedná o formu hrubě disperzní.

Forma disperzního systému	Velikost částic d_p [m]:
analyticky disperzní	$< 10^{-9}$
koloidně disperzní	$10^{-9} - 10^{-6}$
hrubě disperzní	$10^{-6} - 10^{-3}$
makroskopicky disperzní	$> 10^{-3}$

Tab. 2.4: Rozdělení disperzních systémů dle velikosti dispergovaných částic [14]

Z hlediska rozdělení disperzního systému dle hmotnostních koncentrací je možné systémy rozdělit do 12-ti řádů koncentrace, a to od 10^{-11} $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ do 10^1 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Rozdělení dle významných a charakteristických hodnot viz tab. 2.5

Pro experimentální část této práce byla použita koncentrace 70 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ podle normy EN 779 [25], což odpovídá přirozenému atmosférickému prostředí (viz tab. 2.5).

Typ prostředí	Koncentrace [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
čisté prostory (místnosti)	10^{-11}
přirozené atmosférické prostředí	$3\cdot 10^{-8}$ - $1,5\cdot 10^{-7}$
prostředí ve vysokých pecích	$5\cdot 10^{-6}$ - 10^{-1}
sůl v Tichém oceánu	34

Tab. 2.5: Rozdělení charakteristických hodnot koncentrace pro vybraná disperzní prostředí [14]

Filtrace analyticky disperzních systémů, kde jsou disperzním podílem mikroobjekty, resp. molekuly, je označována jako hyperfiltrace nebo superfiltrace (její podstatou je reversní osmosa). Filtrace koloidně disperzních systémů, jejímž podílem jsou makroobjekty, se nazývá ultrafiltrací - d_p leží v intervalu (10^{-9} - $5\cdot 10^{-8}$) m a mikrofiltrací - d_p se nalézá v intervalu ($5\cdot 10^{-8}$ - 10^{-6}) m.

Pouze filtrace makroskopicky disperzních systémů, kdy je velikost částic větší nebo rovna než 10^{-3} m, je nazývána filtrací [14].

2.7.5 Základní charakteristiky filtračních mechanismů

Efektivita (odlučivost) daná vztahem:

$$E = 1 - \frac{G_1}{G_2} * 100 \quad [\%] \quad (2.1)$$

kde G_1 je množství prachu nezachyceného filtrem a G_2 je celkové množství podaného prachu (zlomek G_1/G_2 je nazýván průnikem filtru) [16].

Tlakový spád daný vztahem:

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad [Pa] \quad (2.2)$$

kde p_1 a p_2 je tlak před a za filtrem. Tlakový spád závisí na filtrační rychlosti, kterou je proto nutné vždy uvádět [16].

Parametr tlakového spádu se považuje za stejně důležitou, někdy i více, stejně jako je efektivita filtru. Z technického hlediska není složité vyrobit filtr s účinností, která může být 100 %-ní, ale pak hodnota tlakového spádu bude tak vysoká, že by byl takový filtr v praxi v podstatě nepoužitelný. Proto je cílem připravit takový filtrační materiál, jehož tlakový spád je minimální a zároveň má vysokou účinnost, resp. efektivitu [16].

Životnost se rozumí doba, po kterou je filtr schopen plnit svou funkci. Pokud tuto funkci nesplňuje je třeba filtr vyměnit. Pro jednorázové filtry je životnost dána množstvím prachu, které je schopen pojmout do chvíle, kdy je tlaková ztráta příliš vysoká. Pro filtry, které je možné po jejich zanesení vyčistit je životnost dána intervaly mezi čištěním a jejich počtem. Jednou z možností vyjádření životnosti je jímavost podle normy EN 779 [16].

Jímavost, neboli množství prachu, které je filtr schopen zachytit do okamžiku dosažení zadaného tlakového spádu. Dáno vztahem:

$$J = E_c * \frac{G_c}{100} \quad [g], \quad (2.3)$$

kde G_c je celkové množství prachu podaného během všech měření jednoho vzorku filtru a E_c je střední efektivita pro více měření jednoho filtru.

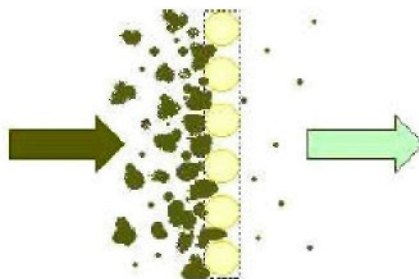
Efektivita a tlakový spád filtru se určuje pro každé měření, jímavost pak pro více měření jednoho filtru [16].

2.8 Makroskopické chování filtrů

Funkci filtru 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 mechanismu lze filtraci rozdělit na plošnou a hloubkovou (viz obr. 2.5 a 2.6).

2.8.1 Povrchová a hloubková filtrace

Povrchová filtrace: velikost zachycených částic závisí na velikosti pórů (viz obr.2.5).



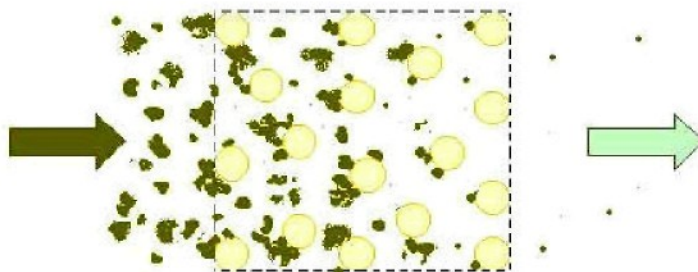
Obr. 2.5: Mechanismus povrchové filtrace [15]

Povrchová filtrace zadržuje částice na povrchu média. Povrchové filtry jsou obzvláště vhodné pro odstranění tuhých, nepravidelně tvarovaných částic. Nejprve jsou zachycovány částice větší než je velikost otvorů porézní vrstvy. Základní vrstvou usazených částic jsou zadržovány menší až velmi jemné částice. Při jejich vyšší koncentraci v suspenzi tyto částice vytvářejí shluky před filtrační přepážkou a vzniká základní vrstva kalového (filtračního) koláče. S narůstající dobou filtrace se tloušťka koláče zvyšuje [18].

Hloubková filtrace: částice různé velikosti se zachycují uvnitř filtru. Velikost zachycených částic může být i řádově menší, než mezivláknenné vzdálenosti (viz obr.2.6)

Mechanismy hloubkové filtrace:

- přímý záchyt
- setrvačné usazení
- Brownův pohyb
- elektrostatické usazení



Obr. 2.6: Mechanismus hloubkové filtrace [15]

Hloubková filtrace představuje proces filtrace skrz celou hloubku, resp. tloušťku filtračního média. Zadržení částic ovlivňují dva mechanismy, a to mechanická a adsorpční filtrace. Spektrum částic je rozdělováno dle hustoty vláken, kdy na vstupní straně jsou zachycovány hrubší částice a jemnější jsou zachyceny cestou skrz médium. Filtr tím získá delší životnost [19].

2.8.2 Membránová filtrace

Membránová filtrace je zvláštní formou povrchové filtrace. Zatímco má nízkou schopnost zadržovat běžnou nečistotu, má velmi dobrou schopnost zachytávat jemné částice. Rozdělení velikostí pórů vykazuje, díky výrobnímu postupu, velmi malou odchylku. Čímž je tedy téměř 100% částic větších než samotný pór zachyceno. Proto jsou membrány běžně používány obzvláště ve farmaceutickém průmyslu pro bezpečnou a spolehlivou filtraci kapalných léčiv v konečné fázi filtrování [20].

U vláknitých filtrů je základní filtrační jednotkou vlákno, ale u membránových je jí podle Picha [Pich, 1964] pór. Analogicky je u teorie vláknitých filtrů použit určitý model struktury a u membránových jiný, a to takový, který bude pro matematický popis tohoto typu vyhovovat 2 základním požadavkům:

- 1) model musí dobře aproximovat strukturu reálných filtrů
- 2) model musí být jednoduchý, aby bylo možné jej matematicky zpracovat.

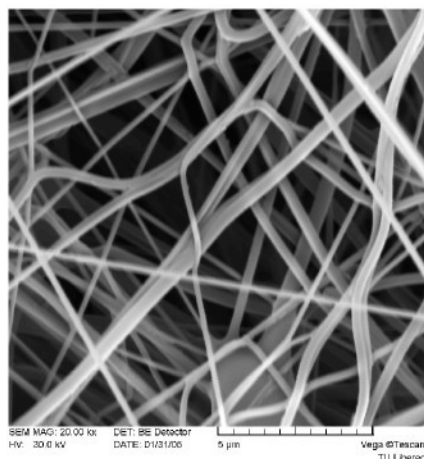
Zvolený nejjednodušší kapilární model je tvořen svazkem rovnoběžných kapilár o stejných velikostech, stejných délkách (ty se rovnají tloušťce filtru), osy jednotlivých kapilár jsou ve stejné vzdálenosti a orientovány kolmo k povrchu [17].

V této práci se nejednalo o tento typ materiálu, je zde pouze zmíněn jen jako možnost velmi efektivního, ale pomalého čištění koloidních a analyticky disperzních systémů.

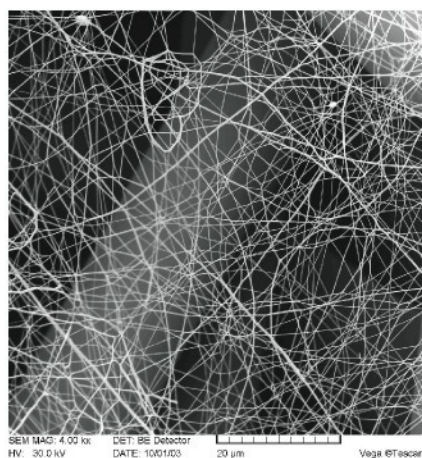
2.8.3 Obrazová analýza nanovláknenné vrstvy

Metodou obrazové analýzy ze snímků stejného typu materiálu (viz obr. 2.7 - 2.9) byla odhadnuta řádová velikost pórů vkládáním kruhových objektů. Tyto objekty byly vkládány do struktury nanovláken na snímku tak, aby se co nejméně projevila prostorovost snímků, protože je na nich zachycen 3D objekt. Proto se jedná pouze o odhad. Tímto způsobem bylo provedeno 50 měření a ze statistiky těchto hodnot zjištěno, že průměrná velikost póru d nanovláknenné vrstvy odpovídá $(1,54 \pm 0,25) \mu\text{m}$ se směrodatnou odchylkou $1,7801 \mu\text{m}$.

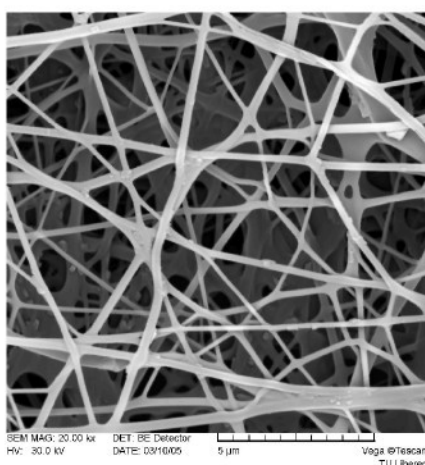
V této práci byla proto zaměřena pozornost na plošnou filtraci, což také souvisí s parametry zkušebního prachu v experimentální části této práce (viz kap. 3.3.1), kdy se velikost částic tohoto prachu pohybuje zhruba v oblasti velikosti pórů (na základě odhadu metodou obrazové analýzy).



Obr. 2.7: Snímek nanovláknenné vrstvy 1



Obr. 2.8: Snímek nanovláknenné vrstvy 2



Obr. 2.9: Snímek nanovláknenné vrstvy 3

2.8.4 Parametry a užité vlastnosti filtrace

Parametry filtrace je nutné rozdělovat podle těch, které určují průběh filtrace a ty, které ovlivňují výsledné užité vlastnosti filtru. Veškeré parametry mohou být proměnnými, které mění hodnoty filtračních vlastností.

Vlastnosti textilních filtrů se určují většinou podle potřeby použití. Tyto vlastnosti se v průběhu filtrace mění v důsledku zaplňování filtru zachycenými částicemi, což klade nároky na způsoby testování [15].

Parametry filtrace se dělí na [15]:

- 1) parametry filtračního materiálu
- 2) parametry filtrovaných částic
- 3) parametry procesu filtrace

K bodu 1) se řadí následující parametry:

- plocha filtru
- tloušťka filtru
- plošná a objemová hmotnost filtru
- stejnoměrnost materiálu
- materiál a jeho parametry (objemová hmotnost, elektrická vodivost, odolnost vůči negativním vlivům,...)
- parametry vláken (jejich průměr, tvar, jemnost, orientace v prostoru,...)

K bodu 2) se řadí následující parametry:

- velikost částic disperzního podílu
- koncentrace částic
- tvar a povrch částic
- objemová hmotnost částic
- elektrické vlastnosti

K bodu 3) se řadí následující parametry:

- rychlost náletu částic na filtr
- viskozita protékajícího média
- vnější vlivy (teplota, tlak, vlhkost,...)

2.9 Mechanismus povrchové filtrace kombinované pulsním čištěním

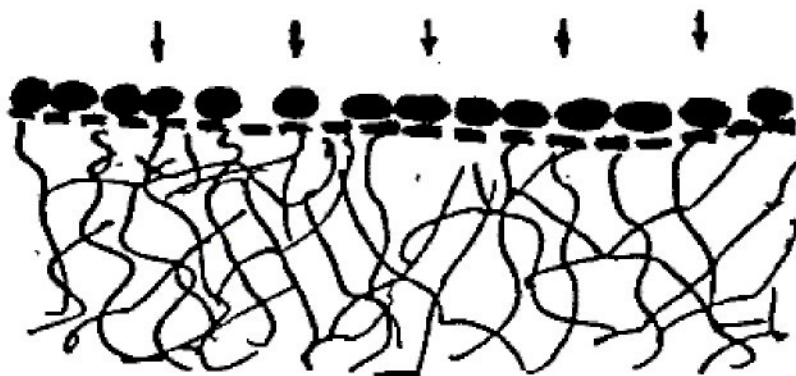
Vysvětlení principu mechanismu povrchové filtrace lze získat pro příklad aplikace mikroporézní vrstvy na vlákenný filtr. Popis je shrnut do 4 bodů a pro lepší představu doplněn schématickými obrázky (viz obr. 2.10 - 2.13) [21].

- 1) Na povrch filtru je aplikována mikroporézní vrstva, kombinace podkladové vrstvy (netkané textile, papírového filtru) a mikroporézní vrstvy je méně prodyšná než samotná podkladová vrstva (viz obr. 2.10)



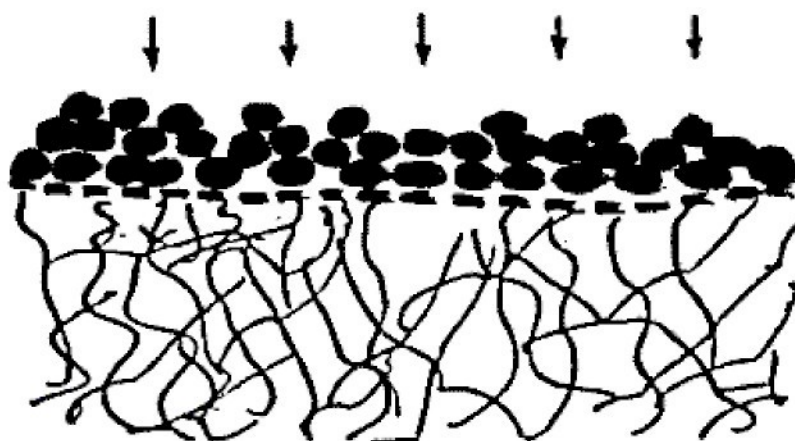
Obr. 2.10: podkladová vrstva s mikroporézním filmem (tučná přerušovaná čára)

- 2) Dokonce i velmi jemné částčky, menší než velikost pórů, mohou být zachyceny díky tomu, že částice dopadnutá na vlákno je zachycena a může tak velmi rychle zmenšit pór. Může následovat tzv. přemostění póru prostřednictvím více zachycených částic. Membrána zastaví pronikání filtračního koláče filtračním médiem (viz obr. 2.11).



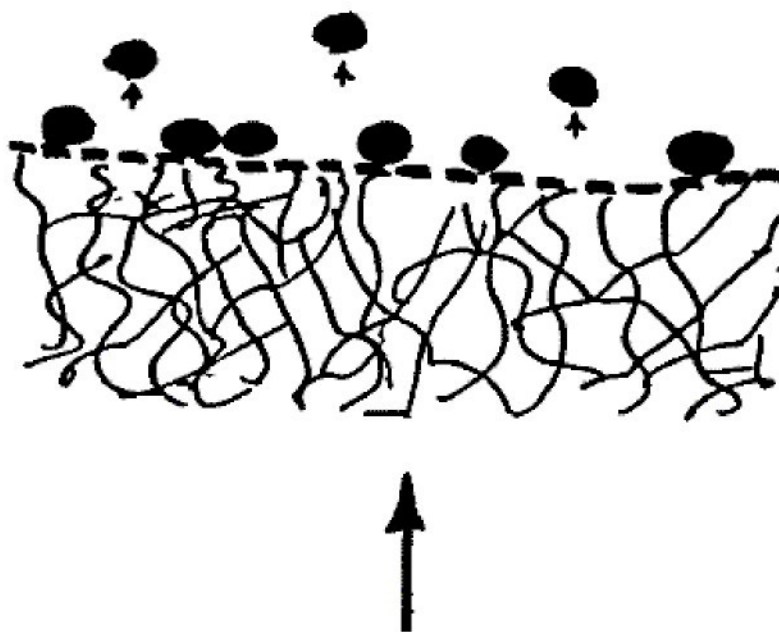
Obr. 2.11: podkladová vrstva s mikroporézním filmem - zachytávání částic na povrchu filmu

- 3) z dalšího prachu se vytváří tzv. filtrační koláč, tento prach už je méně zhuštěný, tlak tedy roste pomaleji (viz obr. 2.12)



Obr. 2.12: schéma tvorby filtračního koláče, naznačen směr proudění filtrované disperze

- 4) pulsní čištění, téměř všechny prach je odstraněn. Tenká vrstva nánosů se rychle znovu vytvoří, což je dáno podmínkou propustnosti (viz obr. 2.13)



Obr. 2.13: schéma pulsního čištění, naznačen směr proudění čistícího vzduchu (šipka dole) a směr odletu částic při pulsním čištění (nahore)

2.9.1 Pulsní tlakovzdušná regenerace

V současnosti se k regeneraci filtrů díky kvalitním povrchovým úpravám filtračních netkaných textilií používá buď zpětný proplach filtračních členů čistou vzdušinou (dříve obvykle v kombinaci s mechanickými oklepy nebo vibrací filtračních členů), nebo tzv. pulsní tlakovzdušná regenerace (známá pod označením „puls jet“). Zpětného proplachu lze docílit pomocí „proplachovacího“ ventilátoru nebo pomocí podtlaku ve filtru, kdy se po otevření „proplachovací“ a uzavření „výstupní“ klapky regenerované části filtru (komory) nasaje z okolí filtru atmosférický vzduch. V případě pulsní regenerace zpětný tlak působí jen krátkou dobu, tudíž je možné čistit filtry během provozu. Uvedené způsoby regenerace filtru se liší zejména svou intenzitou a výrobní i provozní náročností [22].

Znečištěná vzdušnina vstupující do filtru prochází přes filtrační hadice (svislé či vodorovné), kdy se na vnější straně zachycuje prach (viz obr. 2.14). Automatické čištění filtračních hadic je prováděno nejúčinnějším způsobem - krátkými pulsy tlakového vzduchu. Regenerace je prováděna za provozu filtru, tzv. on-line systém, nebo po odstavení částí filtru, tzv. off-line systém. Zachycený prach padá do výsypky filtru a odtud je přes těsnící ústrojí odváděn mimo filtr. Součástí filtru může být vestavěný odsávací ventilátor [29].

Volba jednoho z uvedených způsobů regenerace filtru je závislá od provozních podmínek filtru, resp. na podmínkách filtrace. Podmínky filtrace charakterizují především fyzikální a chemické vlastnosti prachu a filtrované vzdušiny, jako je například granulometrie prachu, koncentrace prachu, měrná a sypná hmotnost, chemické složení, vlhkost vzdušiny atd. Tyto charakteristické vlastnosti prachů a filtrované vzdušiny mají vliv na obtížnost jeho odstraňování s povrchu filtrační textilie. Je-li prach velmi jemný a lepkavý je nutno volit regeneraci intenzivní. V případě prachu hrubšího a nelepivého je ekonomicky výhodnější volit regeneraci méně intenzivní. Volba způsobu regenerace je nejen závislá na konkrétních provozních podmínkách filtru, ale také na ekonomickém vyhodnocení filtračního zařízení, jak z hlediska pořizovací ceny, tak z hlediska provozních nákladů [22].

Zpětný proplach vyvolaný podtlakem ve filtru patří mezi nejstarší, ale také nejspolehlivější a nejlevnější způsoby regenerace filtrů. Lze konstatovat, že tento způsob regenerace vyhovuje svou účinností v převážné většině (min. 90 %) všech průmyslových provozů s nutností odprašování zdrojů prašnosti průmyslovými filtry (např. těžba a zpracování surovin, výroba stavebních hmot, černá a barevná metalurgie, energetika, zemědělské a potravinářské provozy aj.) [23].

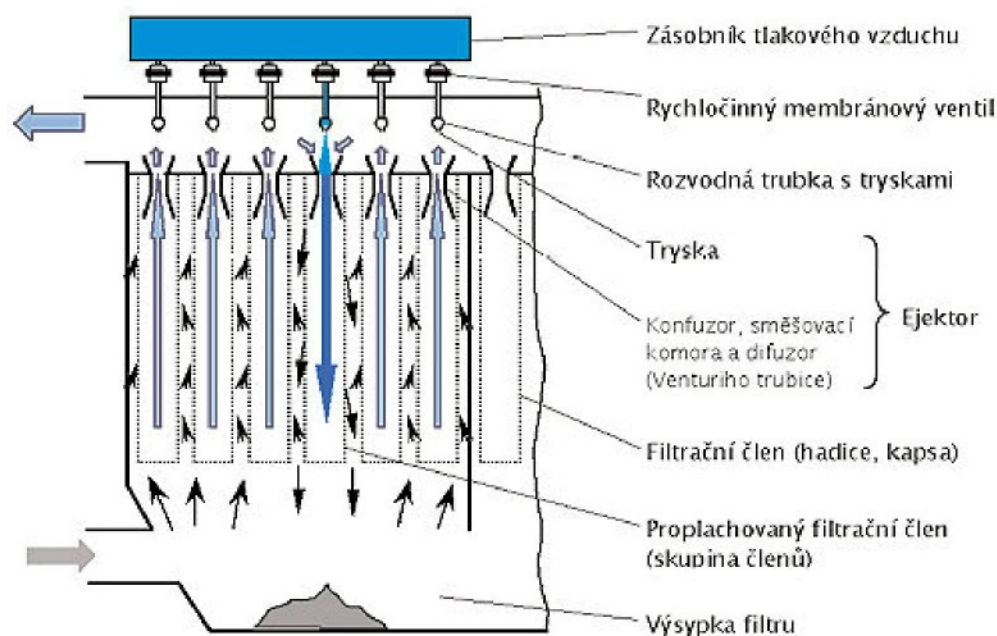
Díky nižší intenzitě proplachu je namáhání filtrační textilie minimální, čímž se dosahuje dlouhé životnosti filtračních členů. Tento způsob regenerace rovněž tak intenzivně nenarušuje primární odloučenou vrstvu prachu, která spoluvytváří s filtrační textilií filtrační vrstvu, kterou se docílí zachyt i těch nejmenších částic prachu. Úlet je minimální a je dosahováno vysoké odlučivosti filtru. Podmínkou správné funkce je tlak stlačeného vzduchu, který by měl být v rozsahu $0,5 \div 0,7$ MPa.

Jedna z prvních zemí, kde byly vyvinuty a vyráběny filtry s regenerací „puls jet“ bylo Československo (v roce 1966 - Výzkumný ústav vzduchotechniky Praha a ZVVZ Milevsko). Tato regenerace pracuje na principu ejektoru sestávajícího se z trysky, konfuzoru, směšovací komory a difuzoru [23].

Příkladem firmy, která se zabývá vývojem čistitelných filtrů, je APF - Praha. Nabízí filtry s typovým označením FVU v provedení filtračních členů ve tvaru vícekapsových filtračních vložek a s regenerací buď zpětným proplachem vyvolaným podtlakem ve filtru, nebo „puls jet“ [23].

Za účelem snížení provozních nákladů regenerace „puls jet“ (spotřeby tlakového vzduchu) firma vyvinula a od roku 1993 nabízí regenerační zařízení „puls jet“ chráněné patentem, kdy snížením počtu membránových ventilů a ejektorů na úkor zvětšení jejich

velikosti došlo k zásadnímu snížení spotřeby tlakového vzduchu a počtu dílů regeneračního zařízení a tím ke snížení pořizovacích a provozních nákladů. Podstata nového řešení spočívá v tom, že proti obvyklému provedení, kdy jsou regenerovány jednotlivé filtrační členy nebo jejich skupiny za pomoci malých ejektorů a ventilů, a to postupně za sebou v každé komoře filtru, probíhá regenerace v každé komoře filtru naráz. To bylo umožněno optimalizací tvaru a velikosti ejektoru a ventilu ve vztahu k účinnosti zařízení (směšovací poměr) na jednotku regenerované filtrační plochy filtru (jedna komora filtru). Viz obr. 2.14 [23].



Obr. 2.14: Obvyklé provedení s postupnou regenerací jednotlivých filtračních členů v režimu on-line [23].

Princip pulsního proplachu tkaninového hadicového filtru

Stlačený vzduch (obvykle v intervalu $0,5 \div 0,7$ MPa) je ze zásobníků veden membránovými ventily a ofukovými trubkami k filtračním hadicím, na kterých se z venkovní strany v prašné komoře filtru usazují tuhé emise (prach, popílek, apod.). Z vnitřní strany filtrační hadice, která je vyztužena drátěnou klecí, se vhání stlačený vzduch, který prudkým nárazem rozechvěje filtrační hadici a odstraní z ní usazený materiál. Tím se filtrační hadice zregeneruje a je schopna další činnosti. Pulsní proplach je u tkaninových hadicových filtrů řízen automaticky ze snímače tlaku, který snímá rozdíl tlaku mezi čistou a prašnou komorou. Pokud tato tlaková diference překročí nastavenou hodnotu, spustí se ofukovací cyklus. Ten přes časovací zařízení dává signál

elektropneumatickému ventilu, který otevírá a zavírá přívod vzduchu k regeneraci přes membránový ventil [33].

2.9.2 Čistitelné vzduchové filtry

Patronové filtry

Patronové neboli svíčkové filtry tvoří vlákenný filtr plochý nebo skládaný, obtočený kolem perforované dutinky. Může být konstruován jako jednorázový i jako čistitelný zpětným přetlakem. Lze jej získat i křížovým návinem přástu [16].

Hadicové filtry

Fungují na podobném principu jako patronové, ale jejich délka může být i několik metrů (viz obr. 2.16). Téměř vždy jsou čištěny zpětným přetlakem, umístěny vedle sebe ve větším počtu a slouží k filtraci většího množství zachytávaných částic. Částice uvolněné při zpětném přetlaku padají do prostoru pod filtry a jsou vysypávány [16].

V této práci byla věnována pozornost zejména hadicovým filtrům. Skládané filtry (viz kap. 3.6.2) lze použít pro konstrukci patronových filtrů.

U většiny filtračních médií se s úspěchem využívá termoplasticity vláken k úpravě vstupní (funkční) strany, resp. náletové strany filtru, aniž by se změnila tloušťka filtrační vrstvy, podstatně snížila jejich prodyšnost nebo zvýšila tlaková ztráta. Povrch filtru je působením tepla nataven nebo požehnut. Touto úpravou se podstatně zlepšují vlastnosti filtračních materiálů proti zalepování, zlepšuje se jejich schopnost vlastní regenerace a vysoké odlučivosti (efektivity), při zachování velmi vysoké prodyšnosti. V některých případech se filtrační média zlepšují speciálními úpravami, např. oleofobní a hydrofobní úpravou, PTFE impregnací či membránou, antistatickou úpravou atd. Tyto zvláštní úpravy mají pozitivní vliv na energetickou náročnost z hlediska provozního, na četnost regeneračních cyklů, životnost, chemickou stálost, odolnost proti vysokým teplotám a mechanickému poškození apod. [30].

Zajištění optimálního způsobu regenerace průmyslových filtrů má zásadní vliv na jejich správnou funkci.

Jako příklad je uvedena plošná hmotnost a tloušťka filtračního celulóзовého materiálu samotného, s obsahem syntetického prachu, případně nanovláken (viz tab. 2.6). V této práci byl použit typ filtru, kde je nanovláknenná vrstva umístěná samostatně na povrchu filtru.

Filtrační materiál	Plošná hmotnost [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$]	Tloušťka filtrač. média [mm]
Celulosa	113,9234	0,3048
Cel./syntetický mat.	152,9828	0,3302
Cel.+nanovláknena	113,9234	0,0279

Tab.2.6: Parametry filtračního média pro testování pulsního čištění [10].

Příkladem použitých parametrů jsou hadicové filtry, které se užívají k zachycení suchých, sypkých, nelepivých, tuhých příměsí obsažených ve vzdušině, s kterou nevytvářejí hořlavou nebo výbušnou směs. Filtry jsou určeny do max. teploty $+260^{\circ}\text{C}$. Smí být umístěny pouze v prostorách bez nebezpečí výbuchu. Max. hodnota vstupní koncentrace se připouští do $100 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$.

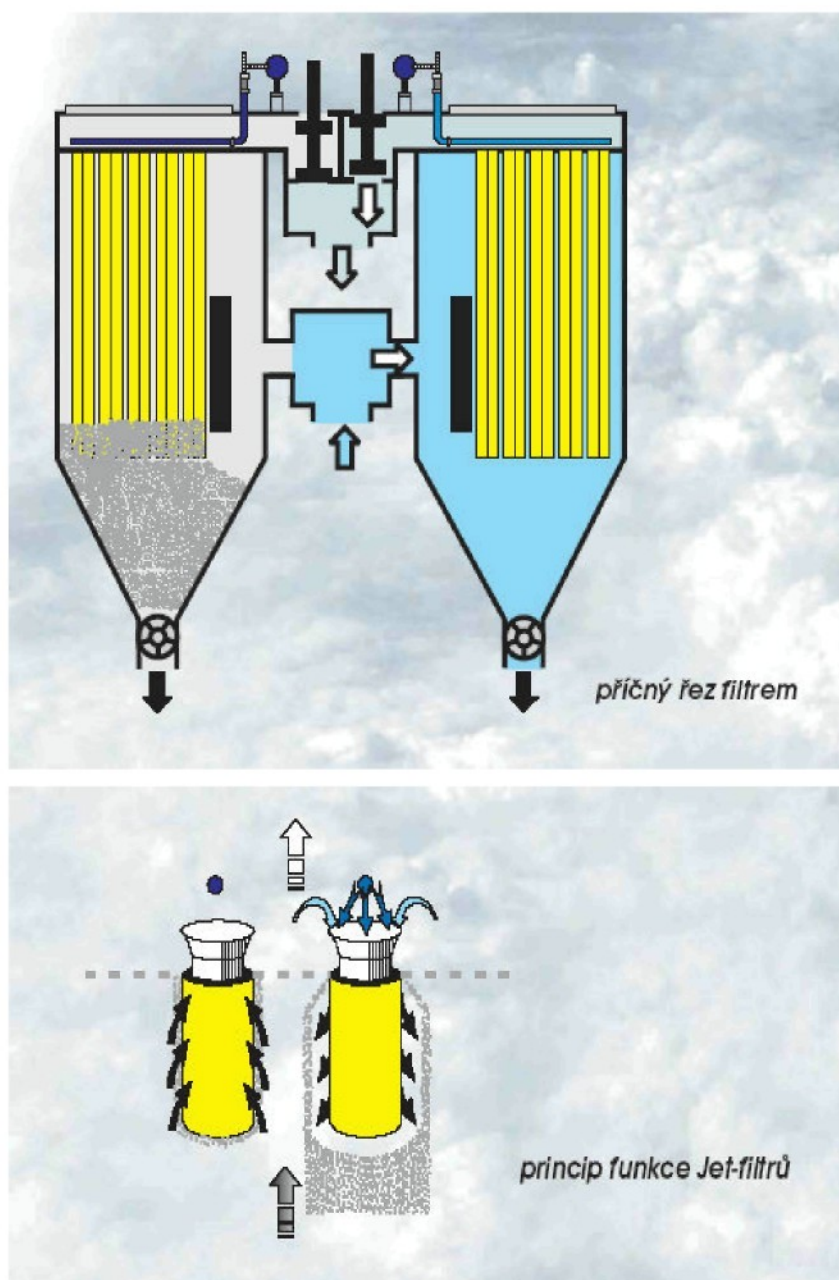
Filtry nejsou vhodné pro prachy výbušné, hygroskopické, lepidivé, prachy z vlhkých vzdušin, zvláště pod jejich rosným bodem a prachy, které se stávají při filtraci tvárnými [27].

Další typy filtrů určené pro filtraci prachů, které v disperzní směsi se vzduchem vytvářejí výbušnou směs, lze použít pro směsi prach - vzduch s nejvyššími výbuchovými parametry [podle ČSN 01 5140] (max. tlak $p = 0,81 \text{ MPa}$). Pro regeneraci filtračních hadic je třeba zajistit přívod stlačeného vzduchu o tlaku $0,5\text{--}0,6 \text{ MPa}$. Přípustná koncentrace prachových částic ve vstupním vzduchu je do $150 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$. Pro zvláštní požadavky je možné dosáhnout výstupní koncentrace prachu až pod $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Optimální hodnoty tlakové ztráty jsou v rozsahu $400 - 1100 \text{ Pa}$ [28].

Jednotlivé typy filtrů jsou závislé na svém dalším využití (např. použitelné pro disperzní směsi se vzduchem vytvářející výbušnou směs) a typu regenerace filtru (viz kap. 2.9.1).

Příkladem typů filtrů podle způsobu regenerace jsou uváděné firmou Filtr Zeos, s. r. o., Hradec Králové, jde např. o hadicové filtry Puls-Jet typu HFH (přetlakový typ) a HFHv (v = vestavěný ventilátor ve filtru). Systém regenerace on - line, tzn. čištění textilií probíhá při plném zatížení filtru, event. off - line, lze realizovat u obou typů.

Není možné je používat pro odlučování výbušných prachů, ale pro odlučování veškerých suchých prachů z proudící vzdušniny. Tyto filtry lze vybavit různými druhy filtračních textilií a splnit tak požadavky vyplývající z podmínek pro odprášení jednotlivých technologií. Použití konkrétní filtrační textilie závisí na teplotě vzdušniny, zatížení filtru, vlhkosti vzdušniny, druhu prachu a dalších provozních podmínkách. Pro regeneraci je nutné zajištění přívodu čistého, suchého vzduchu pod tlakem 0,6 MPa. Max. vstupní koncentrace prachu v přiváděném vzduchu odpovídá $200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$. Nastavení intervalu čistícího pulsu je v intervalu 1 - 240 s. Příčný řez filtrem HFH a princip jejich funkce je vidět na obr. 2.15 [31], [29].



Obr.2.15: Příčný řez a znázornění funkce filtrů Jet-filtrů HFH

Ukázka hadicových filtrů, běžně používaných pro mikrofiltraci, je na obr. 2.16. Kapacita závisí na velikosti plochy povrchu filtru. Větší systémy jsou schopné čistit více než $500 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ (tzv. multi bagfilters) [34].



Obr. 2.16: Hadicové filtry s velikostí pórů 1 - 200 mikronů

2.10 Filtrační technologie nanovláken

Filtrační média s nanovláknny mohou být účinnější a cenově výhodnější volbou pro většinu procesů při odlučování prachu a kouře pulsním čištěním stlačeným vzduchem. Pouhé přidání většího množství celulózového média nebo směsi vláken není schopno vytvářet lepší vlastnosti filtrační patrony (vysvětlení patrony, resp. patronových filtrů viz kap. 2.9.2), spíše naopak. Může mít za následek např. nižší provozní účinnost, zvýšenou tlakovou ztrátu napříč filtrem, těžší filtrační patrony atd. V uvedeném případě jde o patronové filtry, ale svým principem odpovídá tato kapitola zkoumané problematice.

Výhody, které jsou spojené s aplikací nanovláknenné vrstvy na filtrační médium, jsou: vyšší filtrační účinnost, která je velmi důležitá, pokud musí být zachyceny např. nebezpečné částice, dále technologie s nanovláknny nabízí lepší výsledky ukládání filtrovaných částic na povrchu média a snazší uvolňování částic během čistícího cyklu, což vylučuje problémy s velmi jemným prachem, který se postupně hromadí na a mezi filtračními patronami, čímž se také prodlužuje životnost filtru. Mezi další výhody patří provozuschopnost při vyšším průtoku vzduchu (o 30-50%) při udržení konstantní tlakové ztráty.

Technologie nanovláken poskytuje až 10 krát vyšší filtrační účinnost než běžná média při stejných provozních podmínkách. Tato filtrační technologie zvyšuje účinnost, životnost filtru a pulsní čištění provázáním unikátního povlaku ultra jemného nanovláknem s běžným médiem, zachycující vysoký podíl částic o velikosti menší než 1 mikron na povrchu filtru. Rychlá kumulace částic na povrchu média tvoří přetrvávající prach zadržující koláč a zajišťuje tak vysokou filtrační účinnost tím, že zabraňuje předčasnému ucpání filtru [32].

3. Experimentální část

Cílem experimentální části diplomové práce je nalézt vhodný filtrační materiál pro průmyslové hadicové resp. skládané filtry, u kterých je na náletové straně umístěna nanovláknenná vrstva.

Dalším úkolem je u vytipovaného materiálu zjistit dlouhodobou schopnost opakovaného čištění pomocí tlakového pulsu. Testovány byly ploché filtry, pouze u vrstvy vyrobené papírenským způsobem byl vyzkoušen jeden vzorek skládaného filtru. Fotografie plochých filtrů jsou umístěny v příloze č. 4.

Experiment lze rozdělit na tyto základní fáze:

- 1) výběr a příprava vzorků (viz. kap. 3.1)
- 2) zjišťování filtračních charakteristik - měření průtoku vzduchu, resp. prodyšnosti filtru (viz. kap. 3.2.1)
- 3) nános definovaného množství prachu (viz. kap. 3.3) a pulsní čištění filtru (viz. kap. 3.5)
- 4) opakování bodu 2 po vyčištění
- 5) opakování bodů 2, 3 a 4
- 6) testování efektivity filtru před a po ukončení cyklů zanášení prachem a čištění (viz. kap. 3.4)
- 7) vyhodnocení naměřených dat (viz. kap. 3.6)

3.1 Výběr a příprava vzorků

Výběr vzorků byl v podstatě založen na volbě odlišné technologie podkladového materiálu, na kterém je nanesena vždy polyamidová vrstva nanovláken. Zvoleny byly tyto technologie:

- vrstva vyrobená papírenským způsobem obsahující celulóзовá vlákna (použita i pro skládaný filtr)
- vpichovaná textilie s natavenou náletovou stranou z polyesterových vláken
- vrstva vyrobená pomocí melt-blown technologie z polypropylenových vláken
- vrstva vyrobená pomocí spunlace technologie z viskóзовých vláken

3.1.1 Parametry testovaných vzorků

Byla zjišťována plošná hmotnost a tloušťka materiálu, pouze u vybraného materiálu vybraného pro dlouhodobé testování byl učiněn pokus zjistit plošnou hmotnost nanovláknenné vrstvy.

označení vzorku	technologie výroby	materiál	plošná hmotnost [g·m ⁻²]	tloušťka [mm]
A	papírenský způsob	celulóza	119,0	0,44
B	vpichovaná technologie	polyester	492,1	1,62
C	melt-blown	polypropylen	21,0	0,61
D	spunlace	viskóza	32,3	0,32

Tab. 3.1: Parametry jednotlivých typů vzorků:

Zjišťování plošné hmotnosti nanovláknenné vrstvy u vybraného materiálu

U filtračního materiálu vyrobeného papírenskou technologií (použitého pro dlouhodobý test čistitelnosti) byla experimentálně zjišťována plošná hmotnost nanovláknenné vrstvy mechanickým oškrábáním pomocí jehly. Tato nanovláknna měla narůžovělou barvu, proto je bylo možné rozeznat od celulózových vláken. Vážením byla zjištěna hodnota plošné hmotnosti 5,4 g·m⁻². Tato metoda byla pojata za velmi neobjektivní, pro svou nepřesnost, proto se od ní ustoupilo. Skutečná plošná hmotnost by měla být nižší. Z důvodu velmi dobré adheze nebylo možné jednotlivé vrstvy od sebe oddělit.

Vysoká adheze materiálu je pro tuto práci žádoucím parametrem. S tím také souvisí pevnost podkladového materiálu, jedná se o podklad nanovláknenné vrstvy, na kterou je vrstva polyamidových vláken nanášena.

3.2 Zjišťování filtračních charakteristik

Filtrační charakteristiky lze zjišťovat prostřednictvím různých testovacích metod a norem. Pro složitost filtračního procesu není možné zvolit jednu experimentální metodu filtračního materiálu.

Dostupná měřicí zařízení na testování vzdušné i částečně kapalinové filtrace na katedře netkaných textilií jsou:

1. Zařízení pro testování syntetickým prachem (DFT-2, DFT-3) - vzdušná filtrace
2. Zařízení pro testování aerosolem NaCl (Bench Mounting Rig type 1100 P) - vzdušná filtrace
3. Zařízení pro měření prodyšnosti textilie (Metefem FF-12/A) - vzdušná filtrace
4. Zařízení pro testování velikosti póru bublinkovou metodou (Macropulos 5) - vzdušná i kapalinová filtrace
5. Zařízení pro testování dynamické propustnosti vody (WPT-1) - kapalinová filtrace.

Z uvedeného seznamu bylo použito zařízení DFT-3 pro definovaný nános syntetického prachu a určení tlakového spádu, dále zařízení METEFEM FF 12/A pro určení prodyšnosti a zařízení Bench Mounting Rig pro určení efektivity filtru před a po zkoušce.

Použité přístroje budou dále popsány v takovém sledu, jakým probíhal celý jeden cyklus experimentu.

3.2.1 Měření průtoku vzduchu, resp. prodyšnosti

Podstata zkoušky spočívá v měření množství vzduchu, který prochází mezi protilehlými plochami textilie, vztažené k času a testované ploše a měřené při standardizovaném tlakovém spádu [24].

Měření a vyhodnocení experimentu proběhlo na základě získaných hodnot průtoku vzduchu (viz kap. 3.6).

Test probíhal vždy při stejných podmínkách ve vzduchové trubici, a to při teplotě 20°C. Tlakový spád při 20 mm H₂O odpovídá 196 Pa.

Obsah otvoru o kruhovém průřezu byl 10 cm² (viz parametry přístroje).

Důležité parametry pro tuto část experimentu jsou prodyšnost a porozita, pro jejichž výpočet známe následující vzorce:

Výpočet prodyšnosti

$$W = \frac{100 * Q}{36 * S} \quad [l * m^{-2} * s^{-1}] \quad (3.1)$$

kde

W je prodyšnost,

Q je měřený průtok [l·hod⁻¹],

S je zkušební plocha [cm²].

Prodyšnost lze chápat jako množství tekutiny, které projde jednotkovou plochou filtru za čas při definovaném tlakovém spádu (obvykle 196 Pa).

Výpočet porozity

$$p = \frac{Q}{Q_0} * 100 \quad [\%] \quad (3.2.)$$

kde

p je porozita,

Q₀ je průtok měřený bez vzorku.

Pórovitost, resp. porozita je definovaná jako velikost póru určená obvykle střední event. maximální hodnotou, nebo distribucí velikostí pórů.

Parametry přístroje na měření prodyšnosti METEFEM typ FF – 12/A:

Velikost zkoušených ploch: 10, 20, 50, 100 cm²

Rozsah tlakoměru: 0 – 200 mm H₂O

Rozsah průtokoměrů:

A: 800 – 8000 l·hod⁻¹

B: 120 – 1200 l·hod⁻¹

C: 20 – 200 l·hod⁻¹

D: 4 – 40 l·hod⁻¹

Tolerance průtokoměrů: $\sigma = \pm 1,5 \%$



Obr. 3.1 Měřící zařízení prodyšnosti Metefem typ FF - 12/A; 1 - vzduchový ventil, 2 - hlavní vypínač, 3 - nulovací kolečko tlakového spádu, 4 - měřící trubice tlakového spádu, 5 - přitlačná páka pro upevnění vzorku, 6 - ventil plováčkového průtokoměru (pro stupnice A, B, C, D), 7 - plovákový průtokoměr (stupnice A,...,D) [24].

3.2.2 Postup měření na přístroji Metefem typ FF - 12/A

Před vložení filtračního vzorku je třeba nejprve uzavřít vzduchový ventil (1). Přístroj je poté zapnut (2), je nulovacím kolečkem (3) vynulována hladina tlakového spádu v trubici (4), vložen vzorek a upevněn přitlačením páky (5). Následně je otevřen ventil (6) jednoho ze čtyř plováčkových průtokoměrů (7) (4 stupnice A, B, C, D - směrem od středu ven klesá rozsah). Dalším krokem je postupné otevírání vzduchového ventilu (1) do doby, než se hladina vody v trubici ustálí na požadované hodnotě, která odpovídá 20 mm. V tomto okamžiku je odečteno množství protékajícího vzduchu na průtokoměru (jedna ze čtyř stupnic, dle toho, která je vhodná pro dané měření).

3.3 Zanášení zkušebního prachu pomocí přístroje DFT-3

Na přístroji DFT-3 lze testovat odlučivost, resp. efektivitu syntetického prachu, tlakový spád, náletovou rychlost vzduchu pronikajícího filtrem, celkové množství prachu zachyceného filtrem během testu (souvisí s životností filtru) a změny uvedených vlastností v průběhu procesu filtrace. Parametry přístroje jsou: průtok vzduchu 2000 – 4000 l·hod⁻¹, testovací plocha 100 cm², náletová rychlost 0,6 - 1,5 m·s⁻¹.



Obr. 3.2: Měřící zařízení DFT-3

K přístrojům DFT-3 a analogicky DFT-2 lze použít i laboratorní odprašovací zařízení (viz kap. 3.5).

3.3.1 Parametry syntetického zkušebního prachu Spongelit (sklářský tripol D)

Jedná se o standardizovaný testovací prach, který byl v experimentu použit.

Parametry prachu podle normy ČSN 12 5016 [35]:

- střední geometrický průměr částic $a_g = 1,75 \mu\text{m}$
- směrodatná odchylka $\log \sigma = 0,51$

- měrná hmotnost $\rho = (2500 - 2600) \text{ kg.m}^{-3}$

Granulometrické složení (viz tab. 3.2):

Velikost zrn [μm]	Obsah částic [%]
2 - 4	46 ± 6
5 - 9	19 ± 6
10 - 19	$7,5 + 4,5$
	$7,5 - 3,5$
20 a více	$2 + 5$
	$2 - 2$

Tab. 3.2: Granulometrické složení, % obsah částic odpovídající velikosti zrn v daných intervalech [35]

Chemické složení (viz tab. 3.3):

Chemická sloučenina	Obsah částic [%]
SiO_2	56 - 75
Al_2O_3	1 - 3
Fe_2O_3	1 - 3
CaO	5 - 10

Tab. 3.3: Chemické složení spongelitu [35]

Maximální velikost částic musí být 30 - 40 μm .

3.3.2 Postup měření na přístroji Dust Filter Tester DFT-3

Absolutní filtr (2) (viz obr. 3.3) slouží především jako ochrana proti znečištění přístroje a také pro měření efektivy zkoumaného filtru, což nebylo v rámci této části experimentu zjišťováno. Zkoušený vzorek textilie (3) je v této části experimentu nejprve nutné zvážit na analytických vahách. Zvážený vzorek je vložen pod mísící trať (5) a pomocí posuvu (6) se připevní úplným přitlačením mísící trati (5) k vzorku filtračního materiálu. Tím se zároveň eliminuje ucházení procházejícího vzduchu ve směsi se zkušebním prachem (Spongelit) a zajistí se potřebný podtlak. Přístroj se uvede do chodu a z barometru (4) se odečte počáteční hodnota tlakového spádu. Na podložní destičku

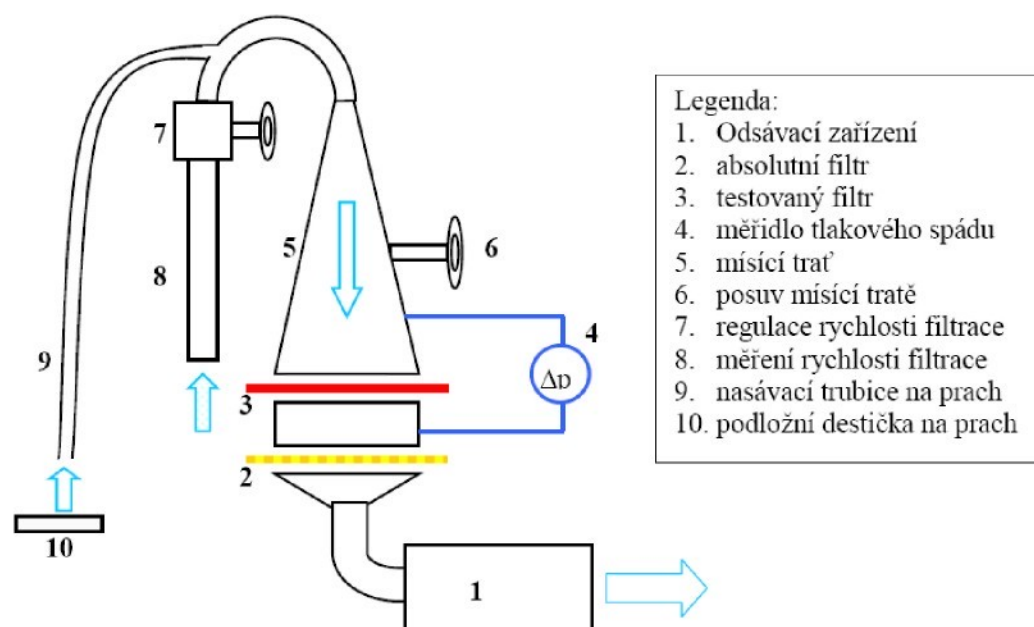
(10) se nanáší (viz obr. 3.4) zkušební prach, který je odsávací trubicí (9) hnán do mísící tratě a následně na vložený filtrační materiál. Prach se nanáší tak dlouho, dokud tlakový spád nedosáhne určité hodnoty.

V rámci této práce byl postup zkoušení filtračních materiálů modifikován, neboť nebyla měřena efektivita filtrace vzorku, ale cílem experimentu na přístroji DFT-3 bylo vzorek rovnoměrně zanešt prachem a změřit tlakový spád.

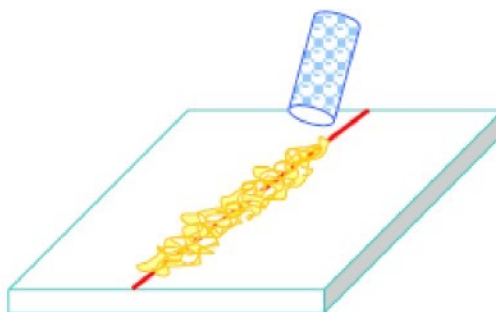
Konečná hodnota tlakového spádu byla předem určena, jako 2-násobek počátečního tlakového spádu z prvního měření nejméně propustného (papírového) filtru na DFT-3.

- u skládaného filtru tato hodnota odpovídala 200 Pa
- u plochých vzorků filtrů 600 Pa

Vzorek se dále opět zvážil, aby bylo možné orientačně zjistit hmotnost naneseného prachu, při zachování konstantního konečného tlakového spádu. Průtok vzduchu s testovacím prachem se během všech pokusů pohyboval v intervalu (3500 - 3700) l·hod⁻¹.



Obr. 3.3: Schéma měřicího zařízení Dust Filter Tester DFT-3 [24].



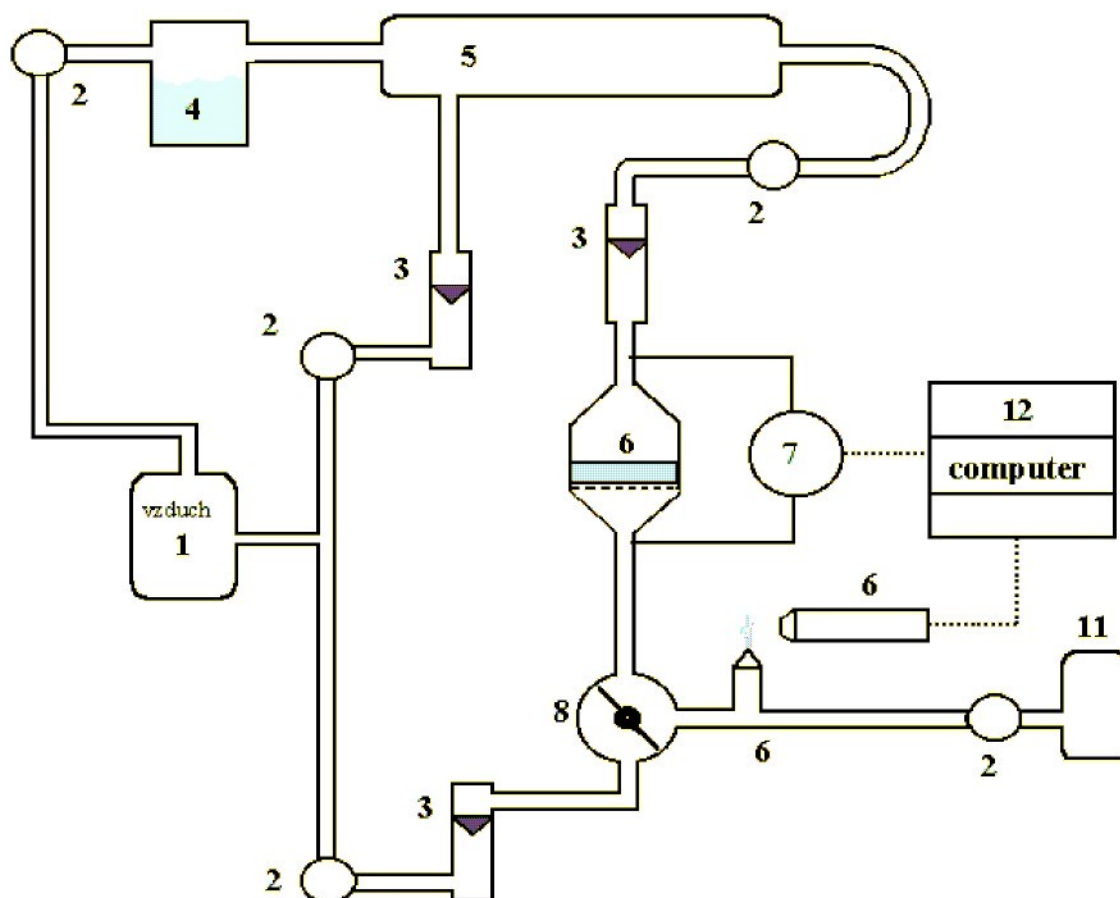
Obr. 3.4 Detail podložního plexiskla s naváženým prachem a odsávacím zařízením [24].

3.4 Testování vzduchové filtrace aerosolem NaCl (Bench Mounting Rig type 1100 P)

Jedná se o měření odlučivosti částic menších než 2 mm se střední velikostí 0,65 μm , tlakového spádu a průtoku vzduchu pronikajícím testovacím filtrem. Test je prováděn na základě normy BS 4400 [26]. Na zařízení nazvaném Bench Mounting Rig (viz obr. 3.5 a 3.6) se měří zejména vysoce účinné filtry, např. HEPA filtry, filtry třídy F aj. [25].



Obr. 3.5: Zařízení pro testování vzduchové filtrace aerosolem NaCl



Obr. 3.6: Schéma testu filtračních vlastností aerosolem NaCl

popisné číslo	vysvětlivka
1	přívod stlačeného vzduchu
2	regulační ventil
3	průtokoměr
4	rozprašovač
5	vypařovací trubice
6	měřící 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

Tab. 3.4: Legenda k obr. 3.6

3.4.1 Princip měření na přístroji pro testování vzduchové filtrace aerosolem NaCl

Roztok 10% NaCl je rozprášen a zbaven vody ve vypařovací trubici (5) (viz obr. 3.6). Výsledkem jsou částice soli definované velikosti. Tyto částice nalétávají definovanou rychlostí na testovaný vzorek (6) (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 (10). Výstupem je hodnota napětí v [mV], hodnota průniku částic testovaným vzorkem je určena vzorcem:

$$P = \frac{U_1}{U_2} \quad [\%], \quad (3.3)$$

kde U_1 je napětí naměřené na testovaném vzorku a 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:

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

Tímto způsobem byla experimentálně zjištěna efektivita u vzorku před zahájením zanášení syntetického prachu a po ukončení všech cyklů zanášení a čištění (viz tab. 3.5)

Vzorek	Efektivita [%]	Tlakový spád [Pa]
a	89,10	210,0
b	94,55	350,5

Tab. 3.5: Výsledky měření odlučivosti filtrů; vzorek a - vzorek před zanesením prachu, b- po zanesení prachu a ukončení všech cyklů zanášení a čištění

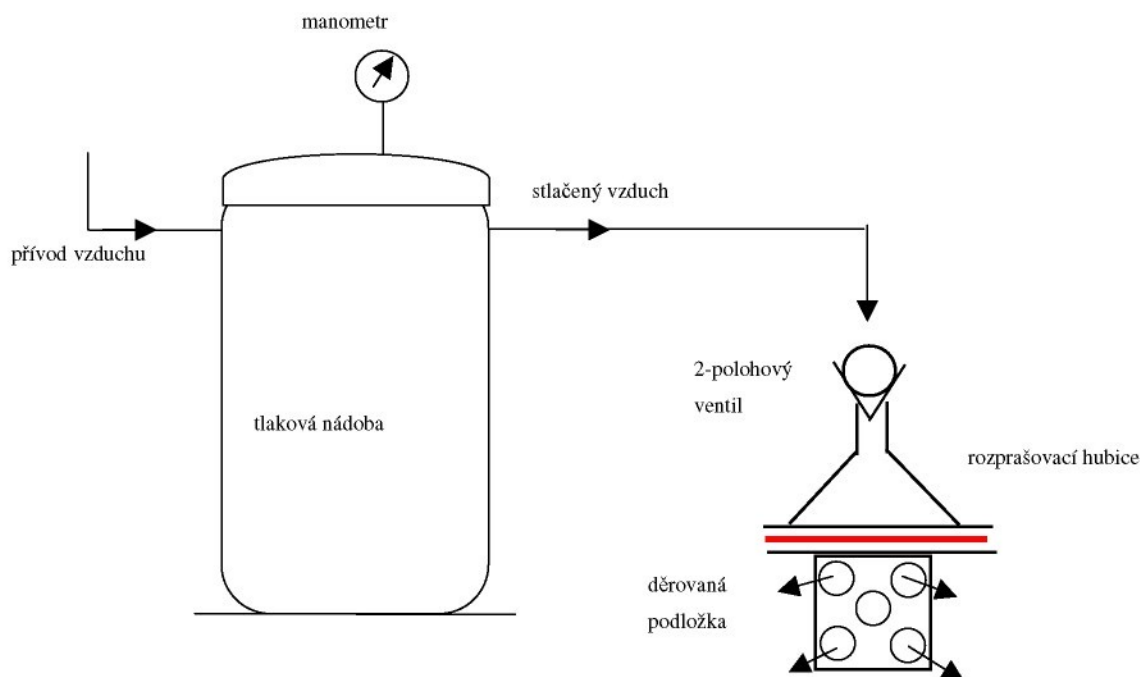
Měření probíhalo u obou vzorků se stejnými parametry:

- tok vzduchu s částicemi protékajících filtrem (flow) = $50 \text{ l} \cdot \text{hod}^{-1}$
- náletová rychlost těsně před filtrem (face velocity) = $5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
- plocha vzorku 100 cm^2

Výsledné hodnoty efektivity a tlakového spádu jsou průměrem ze dvou měření. Zkušební prach se nepodařilo z filtru zcela odstranit, což má za následek to, že naměřená efektivita, resp. odlučivost, u obou vzorků s nánosem nanovláknenné vrstvy vzrostla, stejně tak tlakový spád. Důležitým faktem je, že nedošlo k žádnému porušení nanovláknenné vrstvy a tím i snížení efektivity filtrace.

3.5 Pulsní čištění prachového filtru

Do filtračního materiálu byl nanášen syntetický prach (viz kap. 3.3.2) až do okamžiku dosažení zadaného tlakového spádu. Materiál byl následně čištěn pomocí pulsního čistícího zařízení. Parametry zařízení jsou: používaný zpětný tlak 0,1 - 0,5 MPa, čas čištění zhruba 1 sec a plocha vzorku 100 cm². Nejprve byl stanoven maximální pulsní tlak 0,4 MPa pro prvních 20 měření, vzhledem k nedokonalému čištění byl poté zvýšen na 0,5 MPa. Tento tlak již zůstal do konce experimentu konstantní. Cílem bylo tlak co nejvíce zvýšit, aby byl prach z filtrační textilie co nejefektivněji odstraněn. Tlak 0,5 MPa se jevil jako optimální hodnota. Na provizorním přístroji, kde bylo pulsní čištění realizováno, nebylo, vzhledem k technickému stavu kompresoru, možné zvýšení tlaku na vyšší hodnotu. Schéma čistícího zařízení je na obr. 3.7, (fotografie: obr. 3.8).



Obr. 3.7: Schéma pulsního čistícího zařízení pro filtrační materiály



Obr. 3.8: Laboratorní odprašovací zařízení; princip vysvětlen v kapitole 3.5.1, viz schéma obr. 3.7

3.5.1 Princip zařízení

Přiváděný čistý vzduch se v tlakové nádobě zkomprimuje pod určitým tlakem, který je přednastavený dle ukazatele na manometru (viz obr. 3.7). Takto stlačený vzduch je veden hadicí k 2-polohovému ventilu (umožňuje pouze polohy otevřeno/zavřeno). Důvodem takové konstrukce ventilu je dosažení co nejkratšího časového intervalu tlakového proudu vzduchu, a to jen v rozmezí do 1 sekundy. Při tomto měření nebylo možné časový interval prostupu vzduchu přesně změřit, nicméně nepřesáhl 1 sekundu. Rozprašovací hubice má tvar kužele, aby se přiváděný vzduch mohl rozptýlit po celé ploše vzorku, resp. v celé oblasti naneseného prachu. Červená tučná čára zobrazuje polohu umístění vzorku naprášeného filtračního materiálu. Podložka plní funkci stability celého zařízení a je děrovaná, aby vzduch mohl skrz ní prostoupit. Rozprašovací hubice a děrovaná podložka jsou kruhového průřezu o velikosti plochy 100 cm^2 (k sobě byly vždy připevněny třemi laboratorními sponami po obvodu podložky a hubice). Filtrační materiál tak byl upevněn pouze po svém obvodu.

V praxi běžně používané parametry pulsního čištění jsou uvedeny v tab. 3.6

Maximální tlakový spád textilie (kdy je nutno čistit):	1000 - 2000 Pa
Tlak zpětného pulsu:	0,5 - 1 MPa
Čistící doba:	0,1 - 100 sec (zvolena 1 sec)

Tab. 3.6: Parametry pulsního čištění. Údaje byly čerpány z firemní literatury [27], [28], [31], [32], [33], [34].

3.6 Výsledky měření změny prodyšnosti a tlakového spádu při opakovaném zanášení a čištění

3.6.1 Zhodnocení výsledků měření u filtračních vzorků s různými podkladovými materiály

Byly vybrány 4 druhy vzorků filtrační netkané textilie s nanovláknennou vrstvou PA vláken (foto viz příloha č. 4, obr. 1 - 8) , vyrobených různými technologiemi. Parametry vzorků jsou uvedeny v tab. 3.1, hodnoty prodyšnosti a tlakového spádu vzorků uvádějí tab. 3.8 až tab. 3.12. Získané hodnoty průtoku vzduchu z měření byly vyjádřeny prodyšností prostřednictvím vzorce (3.1), viz kap. 3.2.1 .

Předpokladem bylo provedení 30-ti cyklů (nános/čištění), pokud dříve nedojde k protržení vzorku. Experiment u vzorku A (filtrační papír) byl prováděn nejprve za konstantního tlaku při čištění 0,4 MPa (tab. 3.8). Po prvních 20-ti měřeních byl zvýšen na 0,5 MPa a zvolil se jako výchozí pro všechny následující typy měření (tab. 3.9). Hodnoty pro vzorky B, C a D jsou uvedeny v tab. 3.10 - 3.12.

označení vzorku	technologie výroby	materiál
A	papírenský způsob	celulóza
B	vpichovaná technologie	polyester
C	melt-blown	polypropylen
D	spunlace	viskóza

Tab. 3.7: Označení použitých typů vzorků (ostatní parametry viz. tab. 3.1)

pořadí měření	hmotnost nánosu prachu [g]	prodyšnost před nánosem [l·m⁻²·s⁻¹]	prodyšnost po nánosu [l·m⁻²·s⁻¹]	počáteční tlak před nánosem [Pa]
1	0,220	189	125	340
2	0,178	181	132	330
3	0,160	161	111	370
4	0,135	153	106	390
5	0,127	153	100	390
6	0,138	146	111	405
7	0,119	146	104	420
8	0,127	139	104	427
9	0,116	144	108	437
10	0,107	142	108	440
11	0,106	133	106	450
12	0,107	132	106	463
13	0,099	139	114	472
14	0,166	136	111	470
15	0,088	133	111	475
16	0,080	136	111	495
17	0,093	139	111	505
18	0,066	139	111	523
19	0,049	128	118	535

Tab. 3.8: Výsledky měření 1 vzorku A (pulsní tlak při čištění 0,4 MPa)

pořadí měření	hmotnost nánosu prachu [g]	prodyšnost před nánosem [l·m ⁻² ·s ⁻¹]	prodyšnost po nánosu [l·m ⁻² ·s ⁻¹]	počáteční tlak před nánosem [Pa]
20	0,071	146	118	495
21	0,056	146	122	520
22	0,043	132	118	530
23	0,060	125	118	510
24	0,049	128	125	525
25	0,063	133	122	515
26	0,033	146	118	545
27	0,035	146	128	530
28	0,071	133	118	505
29	0,072	133	119	505

Tab. 3.9: Výsledky měření 2 vzorku A (pulsní tlak při čištění = 0,5 MPa)

pořadí měření	hmotnost nánosu prachu [g]	prodyšnost před nánosem [l·m ⁻² ·s ⁻¹]	prodyšnost po nánosu [l·m ⁻² ·s ⁻¹]	počáteční tlak před nánosem [Pa]
1	0,163	250	136	300
2	0,164	222	136	350
3		257		330

Tab. 3.10: Výsledky měření vzorku B - vpichované textilie

pořadí měření	hmotnost nánosu prachu [g]	prodyšnost před nánosem [l·m ⁻² ·s ⁻¹]	prodyšnost po nánosu [l·m ⁻² ·s ⁻¹]	počáteční tlak před nánosem [Pa]
1	0,42	611	86	80
2	0,389	556	76	95
3		528		100

Tab. 3.11: Výsledky měření vzorku C - melt-blown

pořadí měření	hmotnost nánosů prachu [g]	prodyšnost před nánosem [$\text{l}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]	prodyšnost po nánosu [$\text{l}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]	počáteční tlak před nánosem [Pa]
1	0,31	271	97	195
2	0,29	229	90	200
3		203		230

Tab. 3.12: Výsledky měření vzorku D - spunlace

Diskuse výsledků:

U vzorků B, C, D jsou uvedeny pouze počáteční hodnoty, protože se při pulsním tlaku 0,5 MPa nanovláknenná vrstva protrhla již při prvním čisticím procesu. Ke stejnému efektu došlo i za použití zpevňovací mřížky (skleněná mřížka o rozteči 5 mm umístěná na náletovou stranu filtru). Pro názornost jsou uvedené fotografie porušených jednotlivých vzorků (obr. 3.9 a 3.10), kde jsou porušená místa černě označena. U vzorku B se nepodařilo vyhotovit dostatečně objektivní snímek. Pro další experimenty byl vybrán vzorek A.



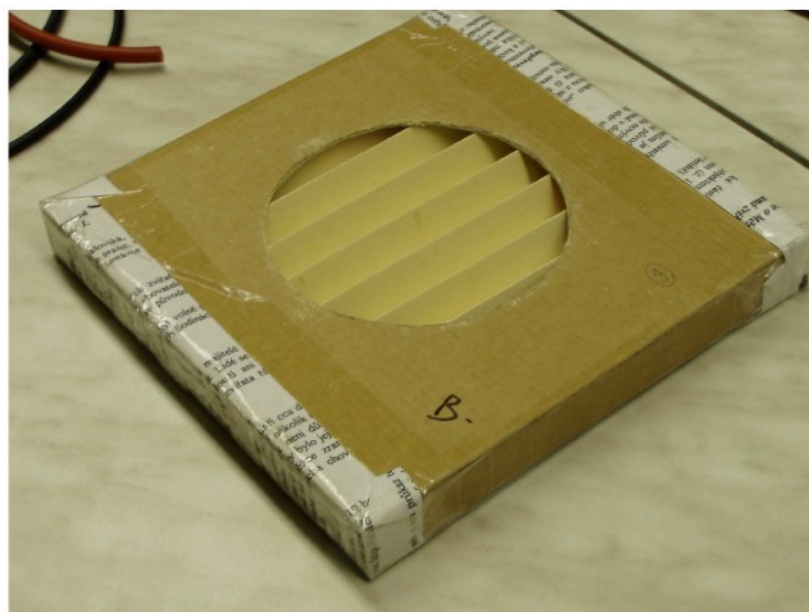
Obr. 3.9: Porušený vzorek B



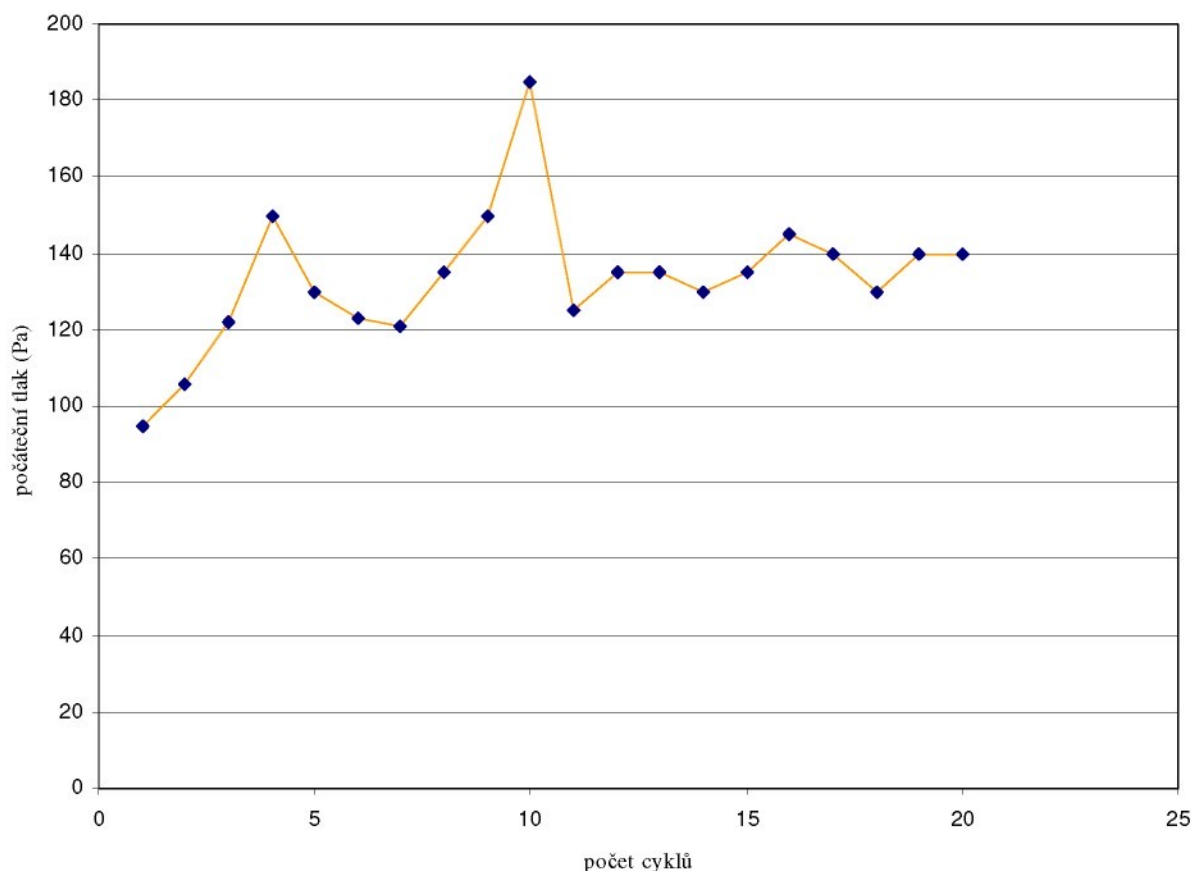
Obr. 3.10: Porušený vzorek C

3.6.2 Zhodnocení výsledků měření u skládaného filtračního vzorku

Vzorek skládaného filtru (viz obr. 3.11) byl měřen stejným způsobem, jako ostatní vzorky, jen s tou výjimkou, že u něho nebyla měřena prodyšnost, vzhledem k jeho rozměrovým parametrům. Tento experiment byl proveden opakovaně dvacetkrát pouze u jednoho vzorku. Výsledky tohoto pokusu jsou brány pouze informativně (tabulka výsledků viz příloha č.1) viz graf na obr. 3.12, na obr. 3.11 fotografie vzorku.



Obr. 3.11: Vzorek skládaného filtru



Obr.3.12: Grafické vyjádření průběhu počátečního tlaku u skládaného filtru

Diskuse výsledků:

Kolísavý nárůst v průběhu měření počátečního tlaku u skládaného filtru je nejspíš způsoben tím, že nanesený zkušební prach nebylo možné dokonale odstranit. Tato skutečnost je mimo jiné zaviněna nedokonalou kombinací čistícího zařízení a konstrukcí samotného vzorku, resp. tvarem (skládaný filtr). Filtrační materiál uvnitř vzorku je překrýván kartonem s otvorem uprostřed. Díky tomu je obtížné nanesený prach z filtru odstranit, protože při čistícím procesu se má prach tendenci šířit ve směru proudění přiváděného stlačeného vzduchu. Karton tvořící nosný element pro filtr brání tomuto přirozenému ději.

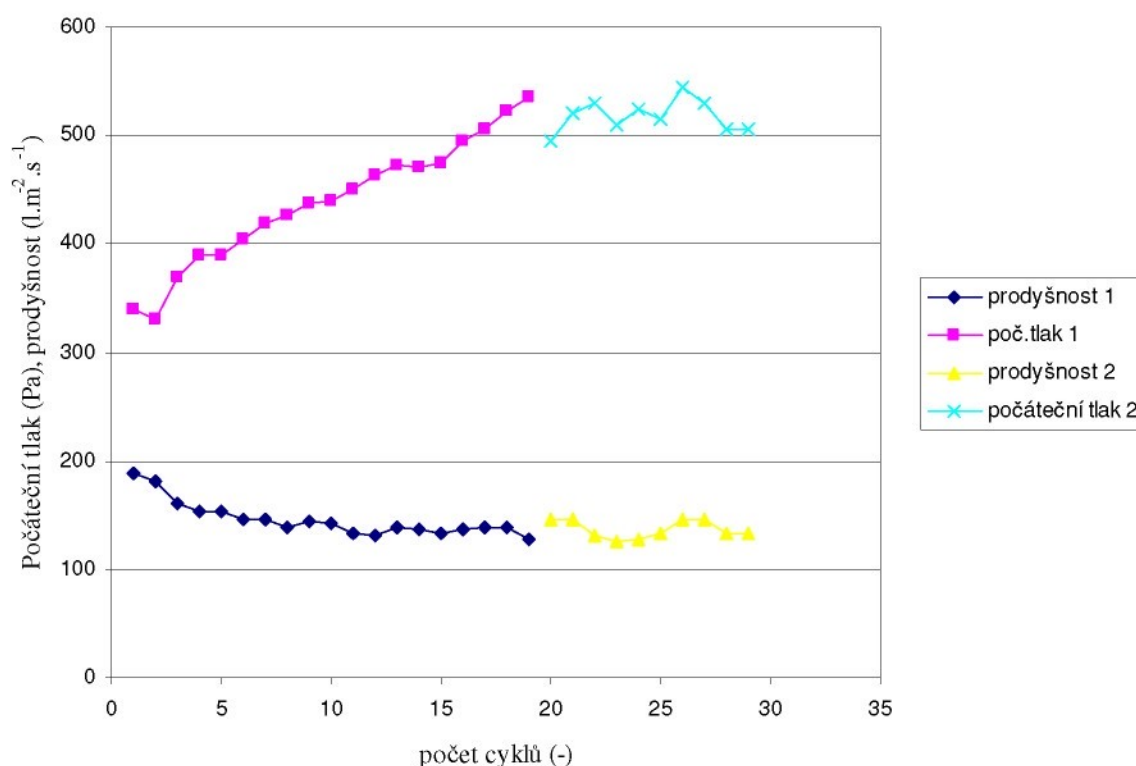
Pro zamezení tohoto negativního vlivu by bylo vhodné při impulsivní regeneraci filtru změnit konstrukci čistícího zařízení.

3.6.3 Zhodnocení výsledků měření u vybraného filtračního materiálu

Byly vybrány čtyři vzorky s podkladovou textilií z celulózy, vyrobenou papírenským způsobem (vzorek A), s nanovláknennou vrstvou. Každý vzorek byl podroben 30-ti cyklům (nános prachu/čištění), které sestávaly z měření počátečního prodyšnosti (viz kap. 3.2.2), resp. prodyšnosti před nánosem zkušebního prachu, dále z měření počátečního tlakového spádu před nánosem prachu, zaprášením vzorku filtračního materiálu zkušebním syntetickým prachem Spongelit (viz kap. 3.3.2) až do získání daného konečného tlakového spádu. Poté byl vzorek zvážen a čištěn pomocí čistícího pulsního zařízení (viz kap. 3.5.1).

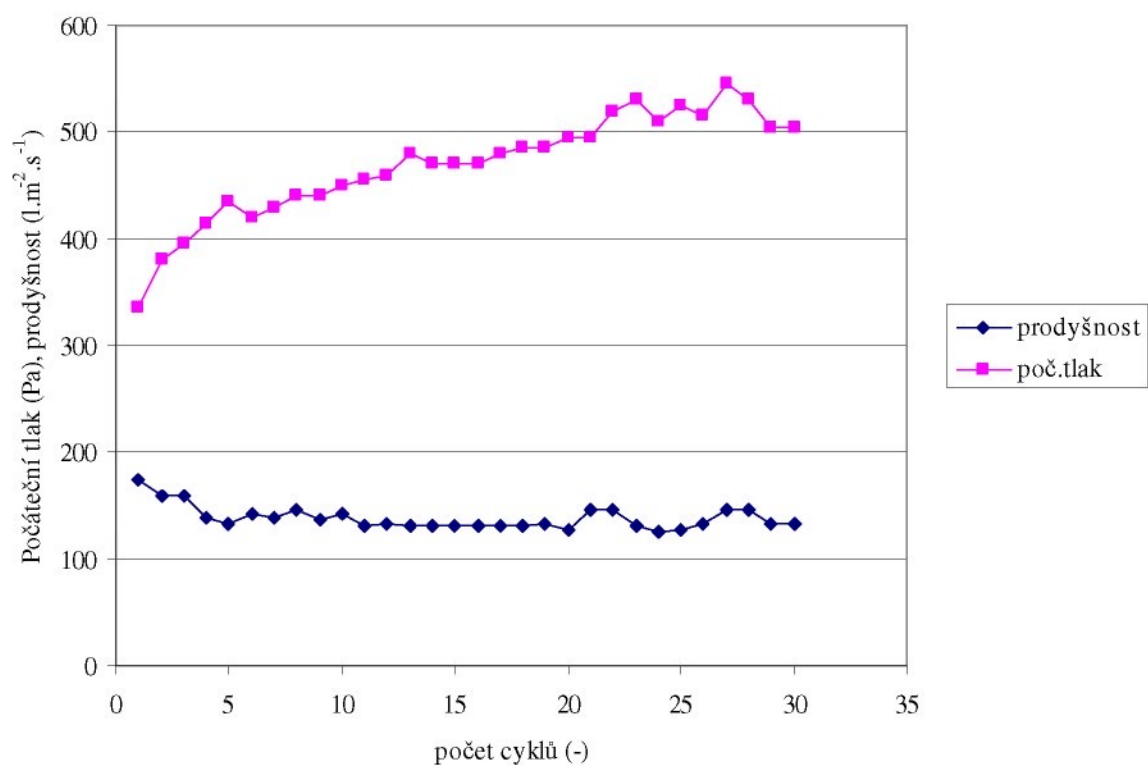
Výsledky jsou uvedeny v tabulkách (viz příloha č.2). Počáteční tlak a prodyšnost čistého vzorku jsou vždy hodnoty v prvním řádku každé tabulky (3. a 5. sloupec), kdy ještě vzorek nebyl zanesen prachem ani čištěn pomocí pulsního zařízení.

U každého vzorku je graficky znázorněn průběh počátečního tlaku a prodyšnosti (viz obr. 3.13 - 3.16). Naměřené hodnoty jsou statisticky zpracovány a vyhodnoceny v kap. 4.

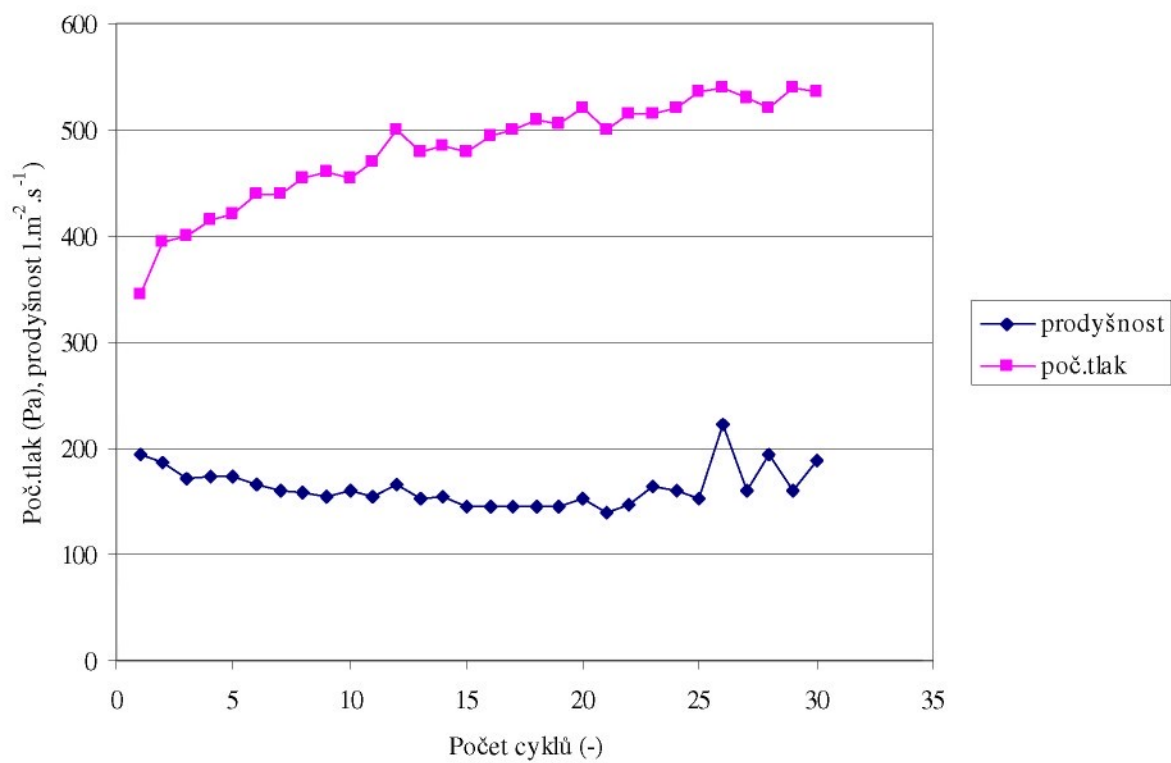


Obr. 3.13: Průběh počátečního tlaku a prodyšnosti vzorku č.1 při pulsním tlaku 0,4 MPa (1) a 0,5 MPa (2)

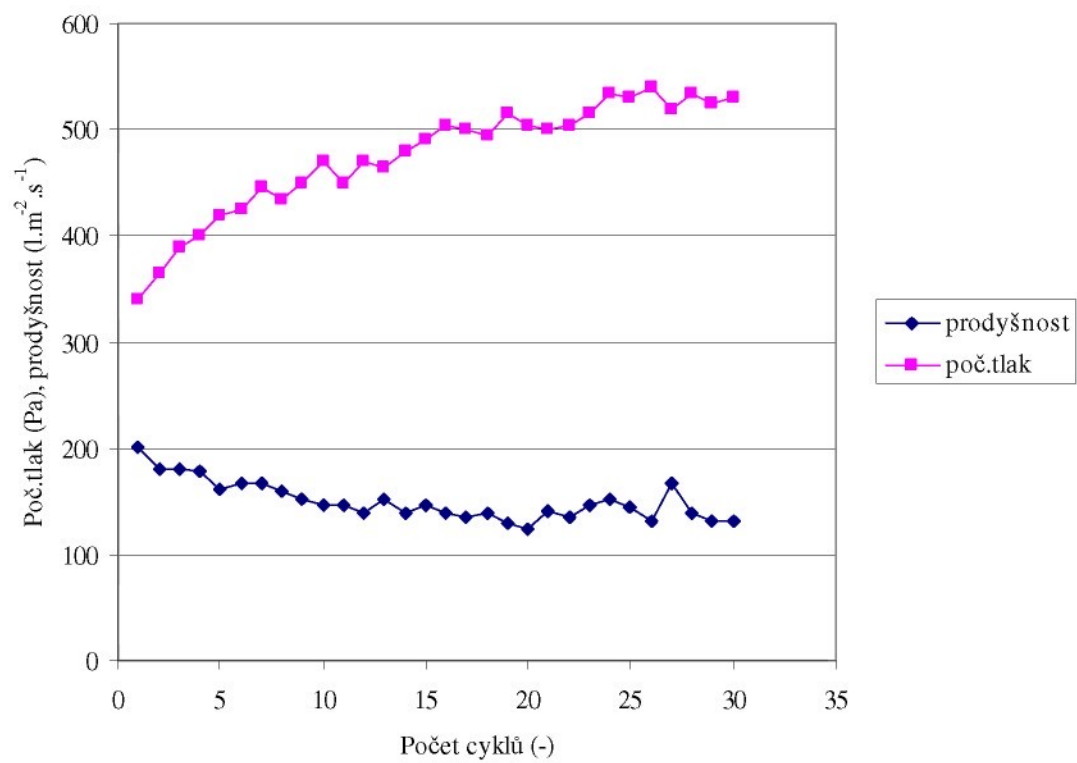
Na obr. 3.13 jsou porovnány průběhy měřené prodyšnosti a počátečního tlaku za různých podmínek při pulsním čištění, tj. při pulsním tlaku 0,4 MPa a 0,5 MPa u jednoho vzorku.



Obr. 3.14: Průběh počátečního tlaku a prodyšnosti vzorku č. 2



Obr. 3.15: Průběh počátečního tlaku a prodyšnosti vzorku č. 3

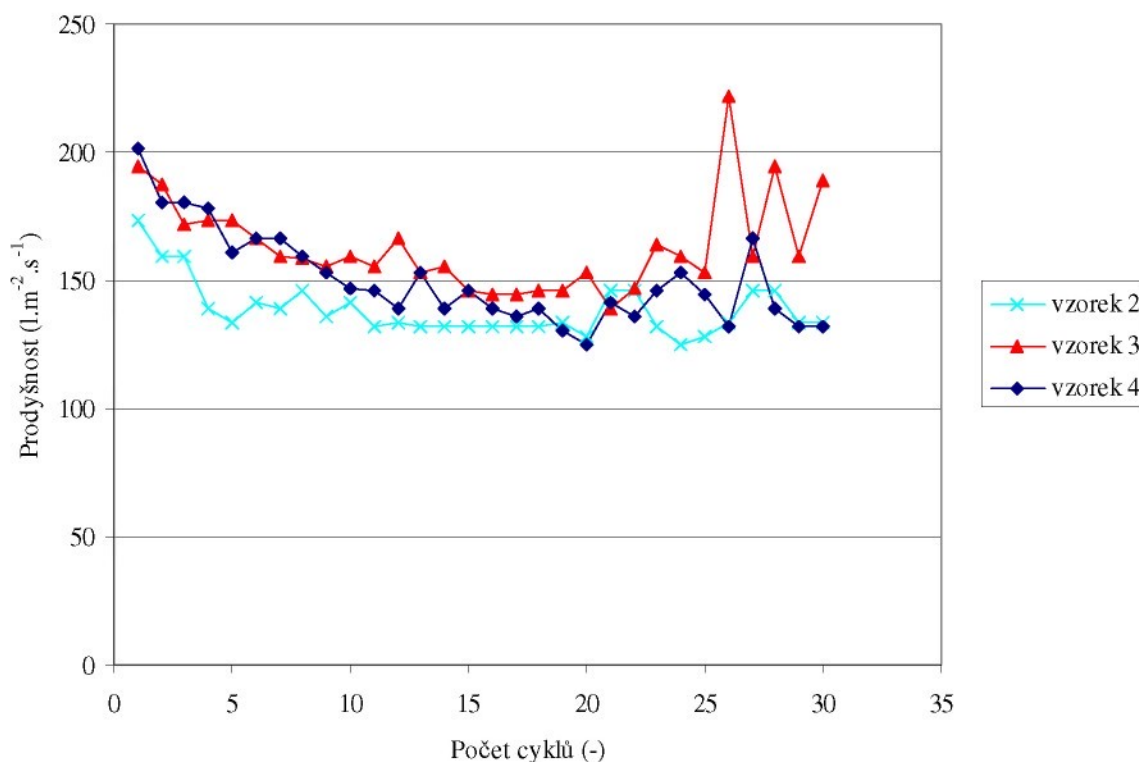


Obr. 3.16: Průběh počátečního tlaku a prodyšnosti vzorku č. 4

4. Statistické zpracování výsledků experimentu

Cílem statistického zpracování bylo porovnat výsledky a odhadnout životnost testovaných filtračních materiálů. Vyhodnocení bylo provedeno pomocí průběhu prodyšnosti a tlakového spádu u vzorků 2, 3, 4. Vzorek 1 nekoresponduje svým průběhem měření se vzorky 2, 3, 4 (změna pulsního tlaku v průběhu měření), proto nebyl již zohledňován. Hodnoty prodyšnosti byly převedené na procenta.

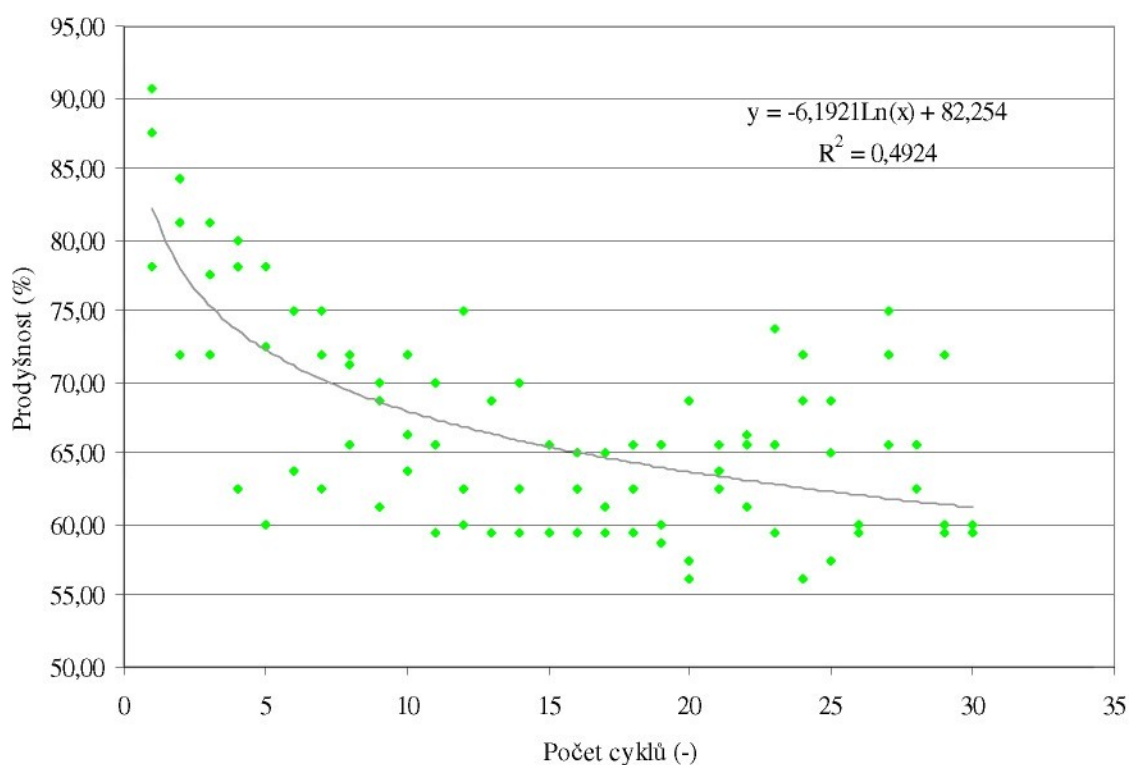
4.1 Grafické vyjádření průběhu prodyšnosti u měřených vzorků bez nánosu prachu, resp. po čištění



Obr. 4.1:: Porovnání prodyšnosti bez nánosu prachu u vzorků 2, 3, 4

Jak je z obrázku 4.1 zřejmé, průběhy prodyšnosti všech porovnávaných vzorků se od sebe liší, i když se jedná o vzorky se stejnými parametry. Konkrétně u vzorku 3 došlo v posledních cca. 6 měřeních k zanesení chyby (křivka vykazuje velké rozdíly mezi jednotlivými hodnotami prodyšnosti). Prodyšnost se ale oproti počáteční hodnotě znatelně snížila, s čímž úzce souvisí zvýšení porozity.

V grafu na obrázku 4.2 je prodyšnost přepočítána na procentuální podíl, kdy nejvyšší hodnota ze všech naměřených dat byla považována za 100%. Snahou bylo odstranit rozdíly v počátečních hodnotách prodyšnosti dané nestejnoměrností materiálu. Převodem na procenta se získaly statistické hodnoty pro objektivní vyjádření regresní křivky a koeficientu spolehlivosti, které byly použity pro další zpracování, konkrétně při vyjádření rovnice regrese k získání výpočtu pro trvanlivost filtru (viz další kap. 4.2). Analogický postup byl realizován u vyjádření stejné veličiny pomocí hodnot počátečního tlaku, ale vyjádřených v Pascalech (Pa), protože tam se počáteční hodnoty tlaku od sebe nelišily (viz kap. 4.4).



Obr. 4.2: Procentuální vyjádření prodyšnosti vzorků 2, 3, 4 - výpočet regresní funkce a koeficientu spolehlivosti

V grafu na obr. 4.2 je vidět, že jsou hodnoty u všech vzorků stále velmi rozptýlené a nelze je proložit žádnou regresní křivkou tak, aby bylo možné přesně zjistit jejich trend, resp. vývoj. Nejlépe vyhovující spojnicí je logaritmická křivka, s odpovídající spolehlivostí 49,24 %.

4.2 Výpočet trvanlivosti filtru pomocí výpočtu regresní rovnice procentuálního vyjádření prodyšnosti

Rovnice regresní křivky (viz graf 4.2) je vyjádřena vztahem:

$$y = -6,1921 \cdot \ln(x) + 82,254, \quad (3.4)$$

Budeme-li za životnost filtru považovat okamžik, kdy prodyšnost vyčištěné textilie klesne na polovinu počáteční hodnoty, lze dosadit do vztahu (3.4) $y = 50$.

Výpočtem rovnice se získá x , tj. počet cyklů:

$$x = 182,9 \text{ cyklů} \quad (3.5)$$

Z průměrných hmotností nánosu prachu na filtrační papírový filtr s nanovláknennou vrstvou 0,0953 g, průtoku vzduchu $3,5 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ a ze znalosti koncentrace prachu [EN 779] $70 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ lze vypočítat objem vzduchu, který protekl filtrem během jednoho cyklu.

- průměrný nános prachu sledovaných vzorků (2, 3, 4) je přibližně 95 mg
- koncentrace prachu 70 mg odpovídá jednomu m^3
- 95 mg odpovídá $1,357 \text{ m}^3$
- průtok neboli rychlost filtrace je $3,5 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$

Objem vzduchu, který protekl filtrem během jednoho cyklu je $1,357 \text{ m}^3$

$\Rightarrow$ čas, za který proteče objem $1,357 \text{ m}^3$, rychlostí $3,5 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ odpovídá:

$$0,387 \text{ hod} = \underline{\underline{23,3 \text{ min}}} \quad (3.6)$$

Následným dosazením z rovnic 3.5 a 3.6 dostaneme:

$$\text{Trvanlivost filtru (dny): } \frac{182,9 \cdot 23,3}{60} = 71,023 \text{ cyklů / hod},$$

$$\frac{71,023}{24} = 2,96 \text{ dní} \quad (3.7)$$

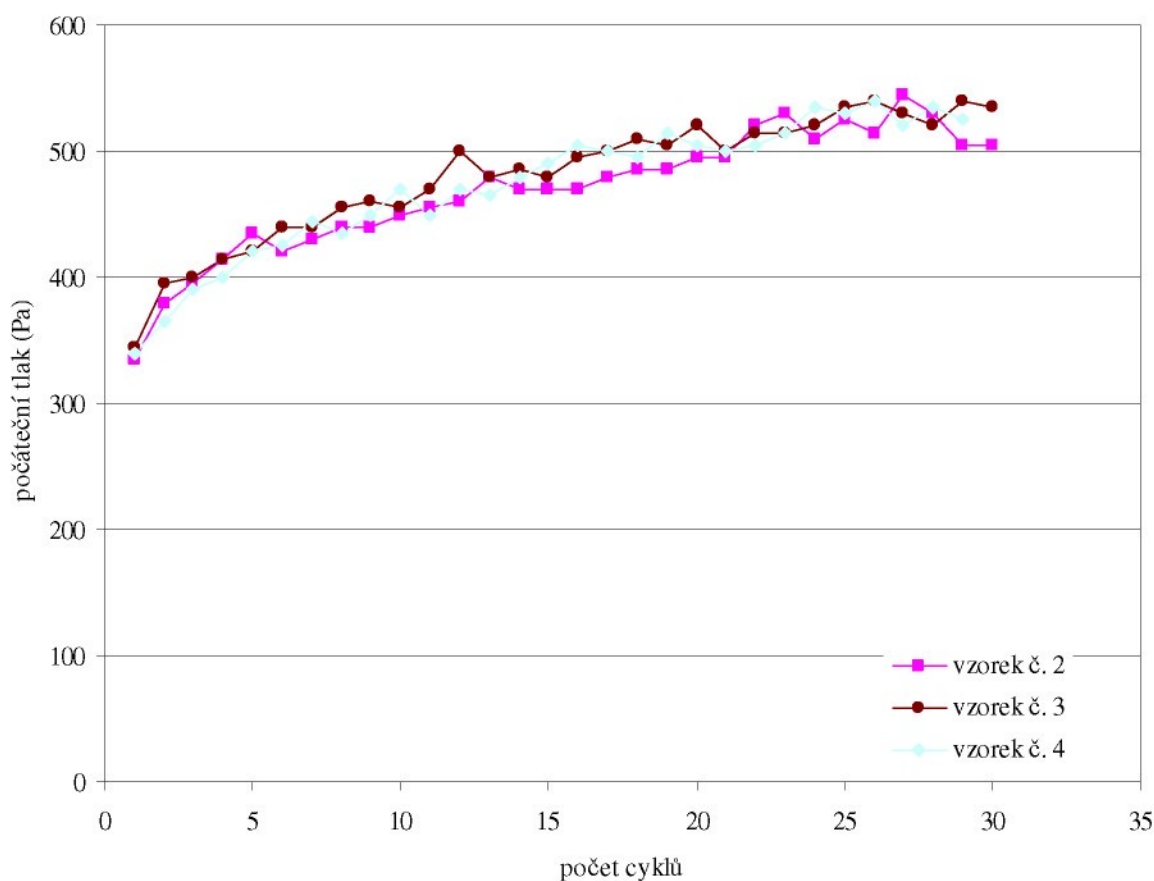
Trvanlivost filtru = 3 dny

Diskuse výsledků:

Trvanlivost papírového filtru na téměř 3 dny nelze považovat za dobrou, ale je potřeba v tomto případě zohlednit fakt, že koeficient spolehlivosti u regresní křivky

z grafu obr. 4.2 je jen necelých 50 (49,24)%. Což znamená, že lze tento výsledek považovat za zkreslený a ne příliš korektní. Záleží také na počáteční definici životnosti, nebo-li na definované prodyšnosti, kdy je filtr nepoužitelný. Tato hodnota vychází z požadavků zákazníka.

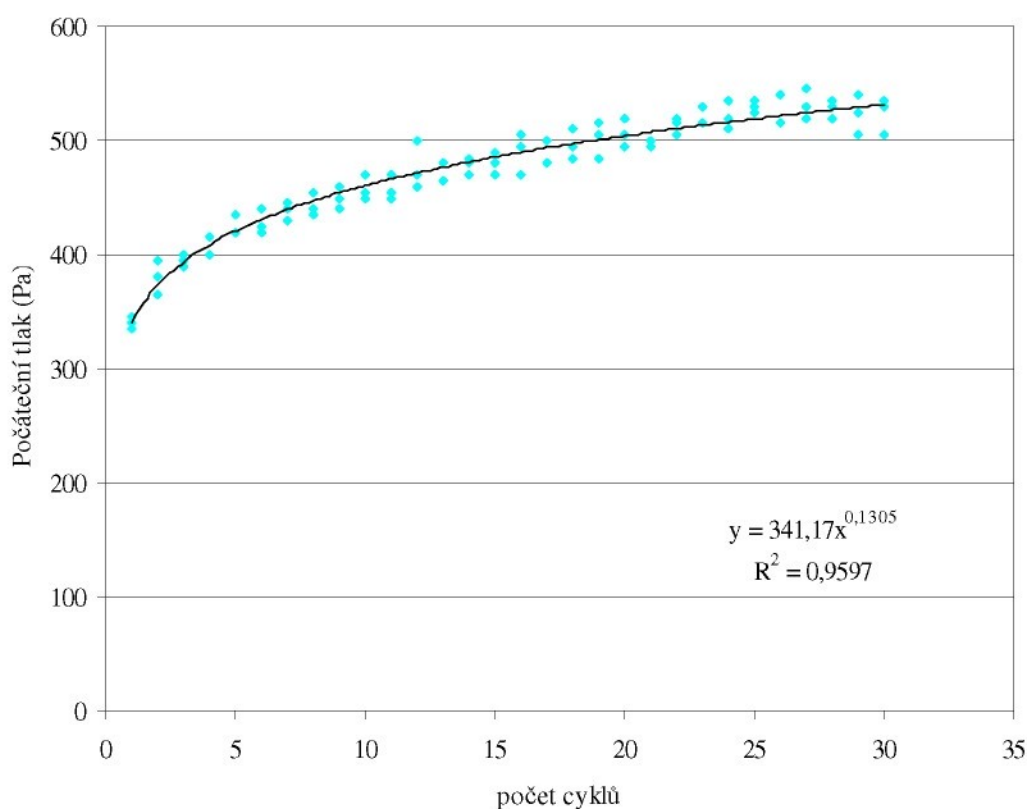
4.3 Grafické vyjádření průběhu počátečního tlaku u měřených vzorků



Obr. 4.3: Porovnání počátečních tlaků vzorků 2, 3, 4

Z grafu na obr. 4.3 je vidět, že počáteční tlaky všech srovnatelných vzorků (2, 3, 4) mají podobný průběh, což svědčí o tom, že tento parametr má ve všech sledovaných měřeních podobnou vzestupnou tendenci. Tento fakt potvrzuje graf na obr. 4.4, kde spojnice trendu této grafické závislosti vykazuje téměř 96%-ní spolehlivost. Data byla proložena pomocí mocninné regresní křivky, která se jevila jako nejvíce vyhovující.

4.4 Výpočet trvanlivosti filtru pomocí výpočtu regresní rovnice počátečního tlaku



Graf 4.4: Počáteční tlak u vzorků 2, 3, 4 - výpočet regresní funkce a koeficientu spolehlivosti

Pro určení životnosti filtru se uvažuje okamžik, kdy tlakový spád překročí dvojnásobek počáteční hodnoty, tedy 600 Pa. Z rovnice regresní křivky (viz graf na obr. 4.4), kde

$$y = 341,17 * x^{0,1305} \quad (3.8)$$

se snadno odvodí hodnota x , za předpokladu, že $y = 650$. Výpočtem z rovnice 3.8 získáme počet cyklů: $x = 140$ cyklů

Opět dosadíme hodnotu délky jednoho cyklu 23,3 min a získáme **trvanlivost filtru 2,3 dne**.

Diskuse výsledků:

Přesnost výsledku není opět příliš spolehlivá, i přesto, že regresní koeficient ukazuje spolehlivost výsledku na 96%. Nejedná se v podstatě o přesné změření počátečního tlaku, neboť se musí mimo jiné zohlednit zanesená chyba, kterou představuje prach z potrubí, jež se v okamžiku spuštění přístroje uvolňuje a zanáší testovaný vzorek ještě před odečtením tlakového spádu. Ze statistického hlediska lze takové měření považovat za přesné, leč nesprávné. Důležité je definování životnosti filtru. Pokud by se uvažovalo o překročení nikoliv dvojnásobku počátečního tlaku, ale například trojnásobku, odhadnutá životnost by byla 50 dní.

5. Závěr

Cílem diplomové práce bylo najít vhodný filtrační materiál jako podklad pro nanovláknennou vrstvu a jejich kombinaci tak, aby se nanovláknenná vrstva dala umístit na náletovou stranu filtru při opakovaném zanášení prachem a následném čištění pomocí tlakového pulsu.

U vzorků s podkladovou vrstvou textilie vyrobenou vpichovanou technologií, melt blown a spunlace technologií se při nadefinovaném pulsním tlaku 0,5 MPa nanovláknenná vrstva protrhla již při prvním čistícím procesu. Ke stejnému efektu došlo i za použití zpevňovací mřížky (skleněná mřížka o rozteči 5 mm umístěná na náletovou stranu filtru).

Pro další experimenty byly tudíž vybrány 4 vzorky připravené papírenskou technologií s celulózovými vlákny a s nanovláknennou vrstvou - díky lepším pevnostním vlastnostem. Vzorky tohoto typu byly podrobeny dlouhodobým testům opakovaného zanášení syntetickým prachem a čištěny pomocí tlakového pulsu. Nanovláknenná vrstva zůstala neporušena. Tlakový spád se s počtem cyklů zvyšoval, zatímco průtok vzduchu resp. prodyšnost filtrů po vyčištění vykazovala nejprve prudší pokles a poté se postupně začala ustalovat v určitém intervalu. Průběhy závislosti tlakového spádu a prodyšnosti v definovaných cyklech mezi jednotlivými vzorky vyrobenými z celulózy vykazovaly podobné tendence - výsledky se od sebe významně nelišily.

Kolísavý nárůst v průběhu měření počátečního tlaku u skládaného filtru vyrobeného papírenskou technologií je nejspíš způsoben tím, že nanesený zkušební prach nebylo možné dokonale odstranit. Tato skutečnost je mimo jiné způsobena nedokonalou kombinací čistícího zařízení a konstrukcí samotného vzorku, resp. tvarem (skládaný filtr). Filtrační materiál uvnitř vzorku je překrýván kartonem s otvorem uprostřed. Díky tomu je obtížné nanesený prach z filtru odstranit, protože při čistícím procesu se má prach tendenci šířit ve směru proudění přiváděného stlačeného vzduchu. Karton tvořící nosný element pro filtr brání tomuto přirozenému ději. Nicméně se nanovláknenná vrstva při regeneraci pulsním tlakem neporušila. Skládaný filtr lze použít pro konstrukci patronového filtru, který je možný čistit pulsní regenerací (pulse-jet).

Trvanlivost papírového filtru, která byla odhadnuta pomocí procentuálního vyjádření prodyšnosti na 3 dny, není dostatečná. V případě odhadnuté trvanlivosti z hodnot počátečního tlaku se jedná přibližně o stejnou dobu. Je nutné ale zvážit způsob, jakým byla trvanlivost filtru zjištěna.

Je nutné zdůraznit, že jakákoliv aproximace odhadnuté křivky pro zjištění životnosti filtru není dostatečně spolehlivá. Z toho důvodu je třeba uvažovat o odhadnuté době v řádech. Životnost filtru závisí především na tom, jak je nadefinovaná. V tomto případě se pro určení životnosti filtru definoval dvojnásobný tlakový spád oproti počátečnímu (resp. poloviční prodyšnost).

Dále je třeba si uvědomit zanesené chyby již při vlastním měření. Např. u zjišťování hodnot počátečního tlaku se v podstatě nejedná o přesné měření, zanesenou chybu zde vytváří prach z potrubí, který se uvolňuje v okamžiku, kdy se přístroj uvede do provozu a na testovaný vzorek se dostane prach ještě před odečtením počáteční hodnoty tlakového spádu.

Neodmyslitelným faktem pro zhodnocení zjištěné životnosti filtru zůstává skutečnost, že byl pro experiment použitý syntetický prach o určité koncentraci (dle normy EN 779). Za použití jiných koncentrací prachu by byla odhadnuta zcela odlišná hodnota. Tzn., že životnost filtru velmi závisí na koncentraci filtrovaného prachu.

Zvolená metoda pro odhadování životnosti není dostatečně spolehlivá také proto, že jde o princip tzv. *in vitro* („ve zkumavce“). Objektivně by šlo vlastnosti filtru hodnotit metodou *in situ* („na svém místě“), tzn. finální výrobek filtračního média posuzovat přímo v procesu, kde bude filtr plnit svou funkci.

Filtrační materiál z celulózových vláken, který tvořil pro nanovláknennou vrstvu podkladový a zároveň zpevňující element, se jevil jako jediný vhodný z použitých typů materiálů. Přesto ale je nutné brát v úvahu, že papírové materiály jsou z několika hledisek nevýhodné. Jedná se např. o vlhkost, které papír nedokáže odolávat, vyšší teploty apod., tudíž hraje rozhodující roli hledisko použitelnosti filtru. Samozřejmě nelze opomenout ani cenové hledisko. Tyto faktory však nebyly v této diplomové práci zohledňovány.

Seznam použité literatury

- [1] Prnka, T., Šperlink, K.: Nanotechnologie, Česká spol. pro nové materiály a technologie, 2004, ISBN 80-7329-070-7
- [2] Růžičková, J.: Elektrostatické zvlákňování nanovláken, TUL 2004
- [3] Nanospider, dostupné na World Wide Web: www.nanospider.cz
- [4] Formhals, A.: US, patent 1,975,504,1934
- [5] Formhals, A.: US, patent 2,160,962,1939
- [6] Formhals, A.: US, patent 2,187,306,1940
- [7] Formhals, A.: US, patent 2,323,025,1943
- [8] Formhals, A.: US, patent 2,349,950,1944
- [9] Vonnegut, B. - Neubauer, R. L.: Journal of Colloid Science 7, 1952
- [10] Graham, K. - Ouyang, M. - Raether, T. - Grafe, T.- McDonald, B. - Knauf, P.: Polymeric Nanofibers in Air Filtration Applications, dostupné na World Wide Web: www.donaldson.com
- [11] Elmarco, Nanospider, dostupné na World Wide Web: www.elmarco.cz
- [12] Schneiderová, A.: Zvýšení účinnosti filtrace pomocí vrstvy nanovláken, diplomová práce, Technická univerzita v Liberci, 2005
- [13] Výroba a vlastnosti nanovláken, Jirsák, O., Lukáš, D., a kol., dostupné na World Wide Web: <http://www.ft.vslib.cz/depart/knt/nove/dokumenty/studmaterialy/ntt/nanoact.ppt#24>
- [14] Lukáš, D.: Materiálové inženýrství, Technická univerzita v Liberci, KNT, 2001
- [15] Hrůza, J.: Přednáška filtrace a filtrační materiály, Dostupné na World Wide Web: <http://www.ft.vslib.cz/depart/knt/nove/dokumenty/studmaterialy/filtr.pdf>
- [16] Hrůza, J.: Zlepšování filtračních vlastností vláknenných materiálů, disertační práce, Technická univerzita v Liberci, 2006
- [17] Pich, J.: Teorie filtrace aerosolů vláknitými a membránovými filtry, disertační práce, Praha, 1964, ČSAV
- [18] Povrchová filtrace, dostupné na World Wide Web: <http://www.envites.cz/specializace.phtml?k=89&menu=sp>
- [19] Filtrace hloubková, dostupné na World Wide Web: http://www.ceskefiltry.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=27
- [20] Filtrox AG, Filtration types, Membrane filtration, dostupné na World Wide Web: <http://www.filtrox.ch/filtrox-gbs-en/filtration.htm>
- [21] Ravensworth, LTD, Surface filtration vs. depth filtration. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ravensworth.ltd.uk/Technical/SurfaceFilt.htm>
- [22] Impulsní tlakovzdušná regenerace puls jet, APF, Praha, filtry, dostupné na World Wide Web: <http://www.apf.cz/home.html>
- [23] Ing. Bohuslav Smrž, Miroslav Hybeš, Problematika optimálního způsobu regenerace průmyslových filtrů z pohledu provozních nákladů, z časopisu Klimatizace 1/98
- [24] EDANA 140.1-81, Standart test methods for nonwovens industry, 2005. Dostupné na World Wide Web: http://www.edana.org/story.cfm?section=ledana_publications&story=Standard_test_methods.xml

- [25] EN 779 2003. Particulate air filters for general ventilation. Requirements, testing, marking. European Comitee for Standardization, Bruxelles, Belgium, 1993.
- [26] BS 4400. 1969. Method for Sodium Chloride Particulate Test for Respirator Filters. British Standards institution. London, 1969. UDC 614.894.24
- [27] ZVVZ, a. s., Filtry hadicové FTO, katalogový list, 1996. Dostupné na World Wide Web: <http://www.zvvz.cz/pdf/kl/125171.pdf>
- [28] N-ILD 12 5105, Podniková norma pro látkový hadicový filtr ALFA-JET-Ex, Kladno, 1994
- [29] Filtr zeos, s.r.o., Průmyslová filtrace vzdušnin, dostupné na World Wide Web: www.filtrzeos.cz
- [30] Ecotex VD, Vysoké Mýto, firemní materiál průmyslové filtrace, dostupné na World Wide Web: <http://www.ecotex.cz/>
- [31] Filtr Zeos, s. r. o., Hradec Králové, technická zpráva: Hadicové filtry Puls-Jet typ HFH, HFT, 1994
- [32] Donaldson, filtrační technologie nanovláken, firemní prospekt, dostupné na World Wide Web: www.donaldson.com
- [33] Slavex filters, projektování, filtrace, dostupné na World Wide Web: <http://www.slavex.cz/index.php?pageright=filtrace>
- [34] Lenntech, cartridge filter - bag filter, dostupné na World Wide Web: http://www.lenntech.com/bag_filter.htm
- [35] ČSN 12 5016, Metody zkoušení textilních materiálů průmyslových filtrů prachem, 1986

Seznam příloh

- 1) tabulka č. 1: Hmotnost nánosu prachu a počáteční tlak vzorku skládaného filtru
- 2) tabulka č. 2 - 5: Hmotnosti nánosu, prodyšnost počáteční a konečná, počáteční tlakový spád u vzorků 1, 2, 3, 4 typu A (celulózový podklad s nanovláknennou vrstvou)
- 3) tabulka č. 6: Elektrostaticky zvlákněné polymerní roztoky
- 4) obrázek č. 1 - 8: Fotografie vzorků A - D a detailní pohledy na jejich strukturu

Příloha č. 1:

pořadí měření	hmotnost nánosů prachu [g]	počáteční tlak při nánosu [Pa]
1	1,716	95
2	1,648	106
3	1,311	122
4	0,622	150
5	0,828	130
6	1,428	125
7	1,497	120
8	1,619	135
9	0,880	150
10	0,178	185
11	1,296	125
12	1,187	135
13	1,093	135
14	1,271	130
15	1,154	135
16	0,952	145
17	1,140	140
18	1,262	130
19	1,314	140
20	1,302	140

Tab. 1: vzorek skládaného filtru

Příloha č. 2:

pořadí měření	hmotnost nánosu prachu [g]	prodyšnost před nánosem [$\text{l} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]	prodyšnost po nánosu [$\text{l} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]	počáteční tlak před nánosem [Pa]
Pulsní tlak při čištění filtračního materiálu = 0,4 MPa (1)				
1	0,22	189	125	340
2	0,178	181	132	330
3	0,16	161	111	370
4	0,135	153	106	390
5	0,127	153	100	390
6	0,138	146	111	405
7	0,119	146	104	420
8	0,127	139	104	427
9	0,116	144	108	437
10	0,107	142	108	440
11	0,106	133	106	450
12	0,107	132	106	463
13	0,099	139	114	472
14	0,166	136	111	470
15	0,088	133	111	475
16	0,08	136	111	495
17	0,093	139	111	505
18	0,066	139	111	523
19	0,049	128	118	535
Pulsní tlak při čištění filtračního materiálu = 0,5 MPa (2)				
20	0,071	146	114	495
21	0,056	146	122	520
22	0,043	132	118	530
23	0,06	125	118	510
24	0,049	128	125	525
25	0,063	133	122	515
26	0,033	146	118	545
27	0,035	146	128	530
28	0,071	133	118	505
29	0,072	133	119	505

Tab. 2: Vzorek A - podklad z celulózy (vyrobené papírenským způsobem)

pořadí měření	hmotnost nánosu prachu [g]	prodyšnost před nánosem [l·m ⁻² ·s ⁻¹]	prodyšnost po nánosu [l·m ⁻² ·s ⁻¹]	počáteční tlak před nánosem [Pa]
1	0,194	174	104	335
2	0,155	160	108	380
3	0,142	160	111	395
4	0,126	139	106	415
5	0,121	133	108	435
6	0,132	142	100	420
7	0,118	139	104	430
8	0,087	146	111	440
9	0,107	136	104	440
10	0,11	142	104	450
11	0,095	132	104	455
12	0,09	133	104	460
13	0,135	132	106	480
14	0,085	132	106	470
15	0,084	132	111	470
16	0,077	132	108	470
17	0,078	132	111	480
18	0,079	132	106	485
19	0,082	133	104	485
20	0,058	128	106	495
21	0,071	146	114	495
22	0,056	146	122	520
23	0,043	132	118	530
24	0,060	125	118	510
25	0,049	128	125	525
26	0,063	133	122	515
27	0,033	146	118	545
28	0,035	146	128	530
29	0,071	133	118	505
30	0,072	133	119	505

Tab. 3: Vzorek č. 2 typu A

pořadí měření	hmotnost nánosu prachu [g]	prodyšnost před nánosem [l·m ⁻² ·s ⁻¹]	prodyšnost po nánosu [l·m ⁻² ·s ⁻¹]	počáteční tlak před nánosem [Pa]
1	0,187	194	117	345
2	0,190	188	117	395
3	0,152	172	114	400
4	0,123	174	119	415
5	0,132	174	118	420
6	0,108	167	122	440
7	0,129	160	111	440
8	0,103	158	117	455
9	0,109	156	118	460
10	0,105	160	119	455
11	0,106	156	118	470
12	0,094	167	106	500
13	0,084	153	118	480
14	0,083	156	111	485
15	0,070	146	119	480
16	0,113	144	103	495
17	0,065	144	111	500
18	0,099	146	114	510
19	0,062	146	122	505
20	0,059	153	122	520
21	0,077	139	111	500
22	0,064	147	118	515
23	0,066	164	147	515
24	0,066	160	125	520
25	0,041	153	117	535
26	0,047	222	133	540
27	0,051	160	119	530
28	0,042	194	117	520
29	0,046	160	111	540
30	0,055	189	118	535

Tab. 4: vzorek č.3 typu A

pořadí měření	hmotnost nánosu prachu [g]	prodyšnost před nánosem [l·m ⁻² ·s ⁻¹]	prodyšnost po nánosu [l·m ⁻² ·s ⁻¹]	počáteční tlak před nánosem [Pa]
1	0,199	201	111	340
2	0,185	181	111	365
3	0,170	181	111	390
4	0,221	178	103	400
5	0,158	161	118	420
6	0,110	167	118	425
7	0,152	167	111	445
8	0,104	160	119	435
9	0,110	153	119	450
10	0,084	147	118	470
11	0,104	146	117	450
12	0,091	139	118	470
13	0,102	153	111	465
14	0,092	139	114	480
15	0,077	146	125	490
16	0,057	139	111	505
17	0,076	136	114	500
18	0,072	139	119	495
19	0,062	131	122	515
20	0,072	125	118	505
21	0,063	142	118	500
22	0,063	136	114	505
23	0,059	146	119	515
24	0,055	153	125	535
25	0,061	144	117	530
26	0,041	132	128	540
27	0,055	167	119	520
28	0,062	139	111	535
29	0,044	132	108	525
30	0,041	132	104	530

Tab. 5: vzorek č. 4 typu A

Příloha č. 3:

Polymer	Označení	Rozpouštědlo	Perspektiva a aplikace
Polyamid 6.6	PA 6.6	Kyselina mravenčí	Ochranné oděvy
Polyuretany	PU	Dimethylformamid	Ochran.oděvy, elektretové filtry
Polybenzimidazol	PBI	Dimethylacetamid	Ochran.oděvy, nanovláknny vyztužené kompozity
Polykarbonát	PC	Dimethylformamid; tetrahydrofuran 1:1	Ochran.oděvy, elektretové filtry
		Dichlormetan	Senzory, filtry
		Chloroform, tetrahydrofuran	
Polyakrylonitril	PAN	Dimethylformamid	Uhlíková nanovláknna
Polyvinylalkohol	PVA	Destilovaná voda	
Kyselina polymléčná	PLLA	Dimethylformamid	Adheze
		Metylen chlorid a dimethylformamid	Adheze
		Dichlormetan	Senzory, filtry, systém cíleného doručení léčiv
Kopolymer etylen - vinylacetát	PEVA		System cíleného doručení léčiv
Směs	PEVA/PLLA		System cíleného doručení léčiv
Polymethylmetakrylát/tetrahydroperfluoroktylakrylát	PMMA/TAN	Dimethylformamid; toluen (1:9)	
Polyetylenoxid	PEO	Destilovaná voda	
		Destilovaná voda a etanol nebo NaCl	
		Destilovaná voda, destilovaná voda a chloroform, destil. voda a isopropanol	
		Destil.voda:etanol (3:2)	Mikroelektronické dráty, spojení
		Destil.voda, chloroform, aceton	
		Etanol	
		Izopropyl alkohol + voda	
		Izopropanol:voda (6:1)	
		Chloroform	

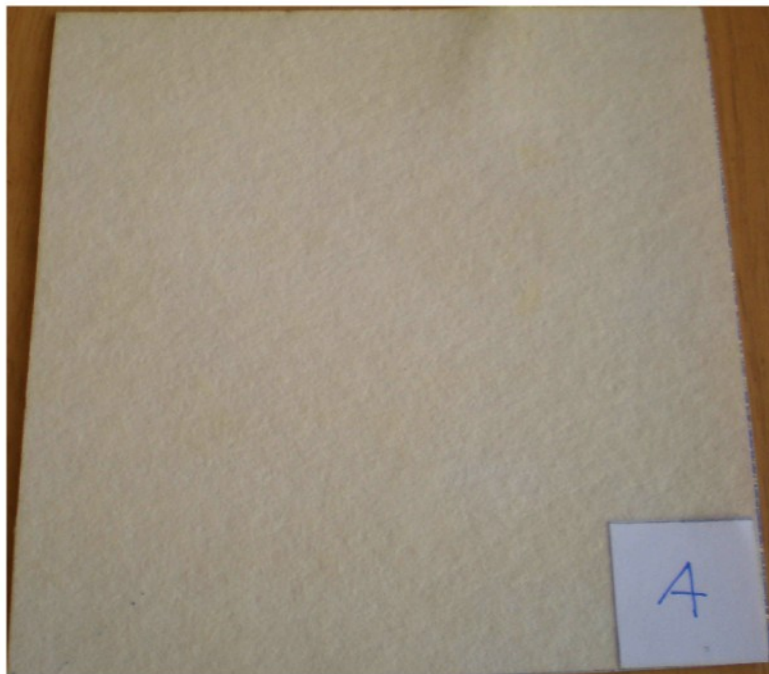
Polymer	Označení	Rozpouštědlo	Perspektiva a aplikace
Kolagen-PEO		Kyselina chlorovodíková	Obvazoviny, tkáňové inženýrství, hemostaticí činitelé
		Kyselina chlorovodíková (pH=2,0)	Obvazoviny, tkáňové inženýrství
Polyanilin/Polyethylenoxid	PANI/PEO	Chloroform	Vodivá vlákna
		Camphorsulfonic acid	Vodivá vlákna
Polyanilin/Polystyren	PANI/PS	Chloroform	Vodivá vlákna
		Camphorsulfonic acid	Vodivá vlákna
Polymer jako hedvábí s fibronektinovou funkcí		Kyselina mravenčí	Implantovatelná zařízení
Polyvinylkarbazol		Dichlormetan	Senzory, filtry
Polyetylenetereftalát	PET	Dichlormetan a trifluoroctová	
		Dichlormetan; trifluoroctová kyselina (1:1)	
Kyselina polyakrylová-poly-pyrenmetanol	PAA-PM	Dimethylformamid	Optické senzory
Polystyren	PS	Tetrahydrofuran, dimethylformamid, CS ₂ , toluen	
		Metylylketon	Enzymatické biotransformace
		Chloroform, dimethylformamid	
		Dimethylformamid	(Ploché pásky)
		Tetrahydrofuran	Katalyzátory, filtry
Polymethylmetakrylát	PMMA	Tetrahydrofuran, aceton, chloroform	
Polyamid	PA	Dimethylacetamid	Filtrační média ze skleněných vláken
Hedvábí/PEO směs		Hedvábné vodné roztoky	Biomateriálové konstrukce
Polyvinylfenol	PVP	Tetrahydrofuran	Antimikrobiální činitelé
Polyvinylchlorid	PVC	Tetrahydrofuran/dimethylformamid (1:1), 100/0, 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80, 0/100 (vol.%)	
Acetát celulózy	CA	Aceton, kys. Octová, dimethylacetamid	Membrány

Polymer	Označení	Rozpouštědlo	Perspektiva a aplikace
Směs kys.polyakrylové-polypyren metanol a polyuretan	PAA-PM	Dimethylformamid	Optické senzory
Polyvinylalkohol/křemík	PVA/Si	Destilovaná voda	
Polyakrylamid	PAAm		
	PLGA	Tetrahydrofuran: Dimethylformamid (1:1)	Konstrukce pro tkáň.inženýrství
Kolagen		Hexafluoro-2-propanol	Konstrukce pro tkáň.inženýrství
Polykaprolakton	PCL	Chloroform:metanol (3:1),	
		toluen:metanol (1:1),	
		dichlormetan:metanol (3:1)	
Poly(2-hydroxyethyl metakrylát)	HEMA	Etanol:kys.mravenčí (1:1)	(Ploché pásy)
Poly(vinylidenfluorid)	PVDF	Dimethylformamid:dimethylacetamid	(Ploché pásy)
Polyéter imid	PEI	Hexafluoro-2-propanol	(Ploché pásy)
Polyetylglykol	PEG	Chloroform	
Polyamid 4.6	PA 4.6	Kyselina mravenčí	Transparentní kompozity
Poly(polyferocenyldimetylsilan)	PFDMS	Tetrahydrofuran: dimethylformamid (9:1)	
Polyamid 6/montmorilonit	PA 6/Mt	Hexafluoroizopropanol (HFIP),	
		HFIP/Dimethylformamid:95/5 (wt.%)	
Kopolymer(etylen-vinylalkohol)	PEVA	Izopropanol/voda: 70/30 (%v/v)	Biomedicína
Polyakrylonitril/oxid titaničitý	PAN/TiO ₂		Fotovoltaické a vodivé polymery
Polykaprolakton /Kovy - např.zlato, oxid zinečnatý,...	PCL/Au, ZnO,...		ZnO: kosmetika
Polyvinylpyrolidon	PVP		
Polymetafenylen izoftalamid			
Polytrimetylen tereftalát			

Polymer	Označení	Rozpouštědlo	Perspektiva a aplikace
Regenerace přírodního hedvábí			
Hedvábí fibroin			
Polyvinylalkoho l/acetát mědi			
Polyvinylalkoho l/acetát niklu			
Polyvinylalkoho l/acetát kobaltu			
Polyvinylalkoho l/acetát zinku			
Polylaktidy	PLA		
Blokový kopolymer PLA-PEG			
Blokový kopolymer styren-butadien- styren			
Kopolymer polylaktid- kaprolakton			
Celulóza			

Tab. 6: Elektrostaticky zvlákněné polymerní roztoky

Příloha č. 4:



Obr. 1: Fotografie vzorku A (celulózový materiál) s nanovláknennou vrstvou



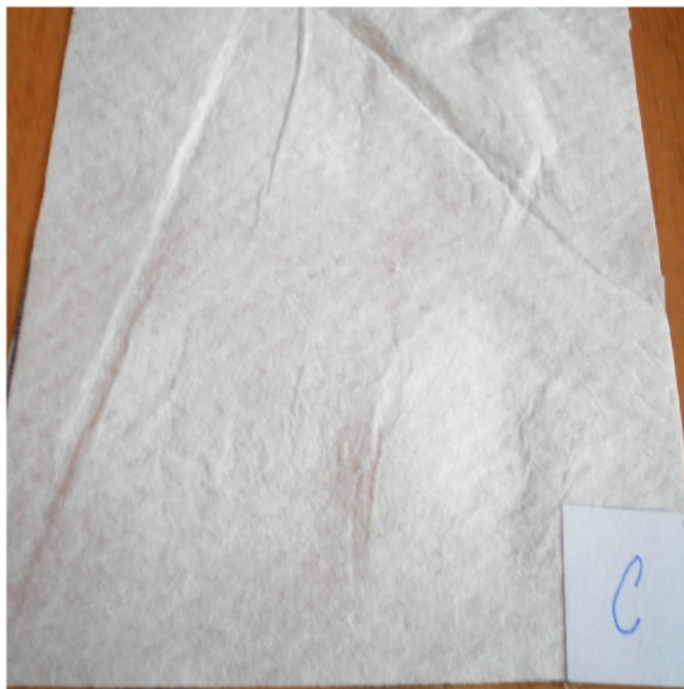
Obr. 2: Detailní pohled na strukturu vzorku A



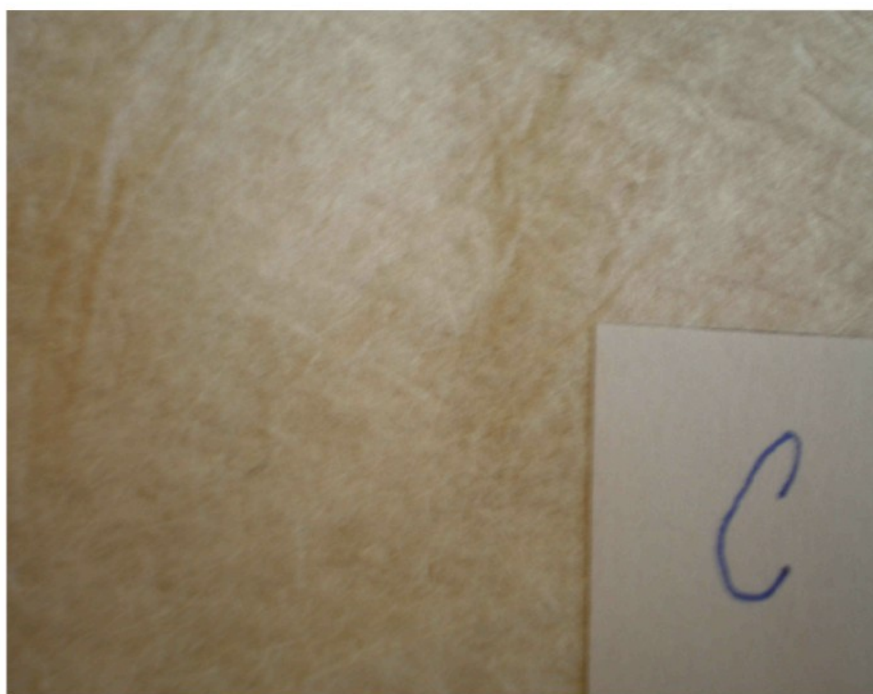
Obr. 3: Fotografie vzorku B (vpichovaná technologie) s nanovláknennou vrstvou



Obr. 4: Detailní pohled na strukturu vzorku B



Obr. 5: Fotografie vzorku C (melt blown technologie) s nanovláknennou vrstvou



Obr. 6: Detailní pohled na strukturu vzorku C



Obr. 7: Fotografie vzorku D (spunlace technologie)



Obr. 8: Detailní pohled na strukturu vzorku D