

red. prof. **Daniilo Jakšič**¹, univ. dipl. inž.

doc. dr. **Nikola Jakšič**², univ. dipl. inž.

¹Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za tekstilstvo,
Snežniška 5, SI-1000 Ljubljana; e-pošta: daniilo.jaksic@ntf.uni-lj.si

²Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva cesta 6, SI-1000 Ljubljana;
e-pošta: nikola.jaksic@guest.arnes.si

Poroznost obraznih mask, ki se uporabljajo v zdravstvu

Ugotavljali smo parametre poroznosti pri treh vrstah mask, ki se uporabljajo pri operacijah v Kliničnem centru v Ljubljani. Namen raziskave je študij mehanizma filtracije, predvsem mikrobov in morda virusov pri uporabi mask. Hitrosti pretoka zraka pri dihanju so relativno majhne in v teh razmerah je mogoče zaradi Brownovega gibanja majhnih delcev filtrirati tudi viruse (sars ipd.). Na podlagi izsledkov raziskave bi bilo mogoče optimizirati strukturo in poroznost mask.

Preskušali smo tri tipe medicinskih mask. Ugotovljene odprte površine za pretok se gibljejo med 9,1 in 9,5 %. Povprečni hidravlični premeri por so med 50 in 60 mikrometri. Te vrednosti se zdijo prevelike glede na velikost mikrobov in virusov. Vendar moramo upoštevati, da pore nimajo kompaktne stene – stene por so vlakna – in da so pore zelo ovinkaste. Mikrobi in virusi so podvrženi Brownovemu gibanju, smer gibanja zraka se spreminja in gibanje je relativno majhno. Ko se mikrob ali virus izloči na površino vlakna, je zelo majhna verjetnost, da ga zračni tok dvigne s površine in nese s sabo do dihalnih organov.

***Ključne besede:** poroznost, pore, porazdelitev por, hidravlični premer pore, odprta površina*

The Porosity of Masks Used in Medicine

Porosity parameters were investigated for three types of masks, which are used during surgical operations in the Clinical Centre in Ljubljana. The purpose of investigation was to study the mechanism of filtration of microbes and possibly viruses in conditions of wearing masks. The speed of airflow during respiration is relatively low; in such conditions it is also possible to filter viruses (SARS etc.) on the basis of Brownian movement of small particles. On the basis of the research results the structure and porosity of masks could be optimized.

Three types of surgical masks were tested. The determined open surfaces range between 9.1 and 9.5 %. Mean hydraulic diameters of pores range between 50 and 60 micrometers. These values seem too high in relation with the size of microbes and viruses. However, the fact that pores do not have a compact wall (fibres are the walls of pores) and that pores are very winding should be considered. Microbes and viruses are subjected to Brownian movement, the direction of air movement varies and the movement is relatively low. A microbe or a virus isolated on the fibre's surface could hardly be lifted by the airflow and taken to respiratory organs.

***Key words:** porosity, pores, the pores distribution, hydraulic diameter, open surface for the fluid flow*

1.0 UVOD

Zasnova Metode za ugotavljanje števila, velikosti in porazdelitve por ter volumske hitrosti pretoka zraka v

odvisnosti od tlaka in odprte površine za pretok plinov je bila razvita pred 31 leti. Zaradi precejšnjega odstopanja parametrov poroznosti, izračunanih z metodo in eksperimentalno ugotovljenih, je bila metoda modi-

ficirana [1]. Po modifikaciji metode ni bilo bistvenih odstopanj med eksperimentalno ugotovljenimi vrednostmi in izračunanimi z modificirano metodo, razen pri porah, ki so imele hidravlični premer večji od 150 mikrometrov. Vendar tudi ta odstopanja niso presegala 10 %. Metoda je verificirana na tkaninah, ki so imele približno enako gostoto po osnovi in votku in tudi enako kakovost preje. Zato so imele pore med nitmi osnove in votka obliko, ki je blizu kvadratu. Za izračun parametrov poroznosti smo uporabljali aplikacijski program [2], ki je omogočal uporabo polinoma šeste stopnje za aproksimacijo krivulje hitrosti pretoka zraka v odvisnosti od tlaka skozi omočen vzorec. Eksperimentalni rezultati so pokazali, da polinom ni primeren pri majhni porazdelitvi hidravličnih premerov por.

Pomanjkljivost metode se je pokazala tudi v primerih, ko imajo pore med nitmi osnove in votka pravokotno obliko. Izračunana odprta hidravlična površina je bila precej manjša od eksperimentalno ugotovljene realne odprte površine za pretok plinov. Iz tega smo sklepali, da je hidravličnih por več, kot je por med nitmi osnove in votka. Če pa število por na enoto površine ploske tekstilije ni znano, kot na primer v vlaknovini, smo lahko ugotovili le najmanjše mogoče število por in s tem najmanjšo vrednost odprte površine, kar je bila osnovna pomanjkljivost metode.

Pred nekaj leti je bil razvit nov aplikacijski program [3] za izračun parametrov poroznosti po naši metodi. V tem programu so za aproksimacijo krivulje volumnske hitrosti pretoka zraka skozi omočen vzorec v odvisnosti od tlaka uporabljeni kubični aproksimativni zlepki. Modificirali smo tudi postopek izračuna parametrov poroznosti. Pri tem smo upoštevali teoretične omejitve, ki jih omogoča fleksibilnost aplikacijskega programa. Rezultat modifikacije postopka izračuna vrednosti parametrov poroznosti omogoča relativno natančen izračun povprečnega premera por, števila in porazdelitve por ter realne površine za pretok plinov tudi v vlaknovinah, pri katerih število por na enoto površine ni znano.

Z novim, izpopolnjenim aplikacijskim programom [3] za ugotavljanje parametrov poroznosti po obstoječi metodi je bilo mogoče izpopolniti tudi samo metodo. Izpopolnjena metoda in izsledki raziskav so bili sprejeti za objavo v časopisu *Tex. Res. J.* [5]. Pri vrednotenju rezultatov poroznosti sta vpeljani dve novi domnevi, pri regresijski analizi pa je bila odpravljena tudi napaka glede upoštevanja meje krivulje volumnske hitrosti pretoka zraka skozi suh vzorec v odvisnosti od tlaka.

Prva domneva se nanaša na geometrijo pore v tkanini. Če imajo pore v tkanini pravokotno obliko in če je razmerje stranic pravokotnika 3:1 ali večje, sta v eni pori v tkanini dve hidravlični pori ali več. Druga domneva se nanaša na režim pretoka skozi suhi in del mokrega vzorca, v katerem je pri danem tlaku izpodrinjena tekočina iz por določenega hidravličnega premera

in se glasi: pri enakem tlaku je enak režim pretoka skozi suh in moker vzorec skozi pore. Posledica te domneve je enaka vrednost eksponenta regresijske krivulje pretoka zraka skozi suh vzorec in eksponenta, ki ga uporabljamo v enačbi za izračun števila por, na podlagi pretoka zraka skozi moker vzorec. Eksperimentalni rezultati so potrdili obe domnevi.

V prispevku predstavljamo postopek ugotavljanja parametrov poroznosti pri ploskih tekstilijah. Predmet raziskave so bile zaščitne maske, ki se uporabljajo pri operacijah v Kliničnem centru v Ljubljani. Namen raziskave je študij mehanizma filtracije, predvsem mikrobov in morda virusov pri uporabi mask.

2.0 TEORETIČNI DEL

2.1 Matematična izpeljava metode za ugotavljanje poroznosti

Matematična izpeljava metode, ki je bila objavljena v literaturi [4], je v tem prispevku poenostavljena in tudi dopolnjena. Pri postopku izračuna števila, velikosti in porazdelitve por sta upoštevani prej omenjeni domnevi.

Metoda temelji na selektivnem izpodrivanju tekočine iz por v ploskem tekstilnem izdelku pod vplivom tlaka. Odvisnost je linearna. Čim večji je hidravlični premer pore, tem manjši tlak potrebujemo, da izrinemo tekočino iz pore. Vse oznake so opredeljene po izpeljavi. Hidravlični premer pore podaja enačba (1).

$$d = \frac{f}{o} = \frac{2wl}{w+l} \quad (1)$$

Tlak p_i je tlak, ki je potreben, da izpodrinemo tekočino, površinske napetosti α , iz pore premera najmanj d_i .

$$d_i \geq \frac{4\alpha}{p_i} \quad (2)$$

Volumnski pretok zraka V_i skozi suhi vzorec pri tlaku p_i lahko aproksimiramo z enačbo (3).

$$V_i = Ap_i^b = P ap_i^b = P v_i \quad (3)$$

Pri omočenem vzorcu se bo najprej izstisnila tekočina iz največjih por, por v 1. razredu. Pri tem bo volumnski pretok zraka V_I pri tlaku p_I .

$$V_I = \pi a p_I^b \frac{n_1 d_1^2}{4} \quad (4)$$

S podobnim sklepanjem nadaljujemo za 2. razred por, ki vsebuje pore, manjše od por v 1. razredu, enačba (5). Za izstisnitev tekočine iz teh por potrebujemo višji tlak, $p_2 > p_I$. Upoštevati je treba, da so pore

1. razreda že odprte in da zrak teče skozi pore obeh razredov. Enako velja za 3. razred, enačba (6):

$$V_2 = \pi a p_2^b \frac{n_1 d_1^2 + n_2 d_2^2}{4} \quad (5)$$

$$V_3 = \pi a p_3^b \frac{n_1 d_1^2 + n_2 d_2^2 + n_3 d_3^2}{4} \quad (6)$$

Tako lahko zapišemo enačbo za volumski pretok V_i , ko se odprejo pore i-tega razreda pri tlaku p_i .

$$V_i = \frac{\pi a p_i^b}{4} \sum_{j=1}^i n_j d_j^2 \quad (7)$$

Enačbe od (4) do (7) omogočajo izračun porazdelitve por po velikostnih razredih. Za prvi razred, razred največjih por, lahko zapišemo:

$$n_1 = \frac{4V_1}{\pi a p_1^b d_1^2} \quad (8)$$

za i-ti razred pa velja:

$$n_i = \frac{p_i^2}{4a\pi\alpha^2} \left(\frac{V_i}{p_i^b} - \frac{V_{i-1}}{p_{i-1}^b} \right) \quad (9)$$

Popravljen koeficient a_j lahko zapišemo kot:

$$a_j = 1,28 \frac{n_{cj}}{n_i} = \frac{1,28}{a^*}; \quad a^* = \frac{n_i}{n_{cj}} \quad (10)$$

Enačba (11) predstavlja teoretični meji za koeficienta a in b .

$$v = a_0 p^{b_0} = 1,28 p^{0,5} \quad (11)$$

V enačbah od 1 do 11 simboli pomenijo: d – hidravlični premer pore, f – površina, o – obseg pore, l – dolžina pore, w – širina pore, α – površinska napetost tekočine v pori, p – tlak, V – volumska hitrost pretoka zraka skozi prosto površino vzorca, A – koeficient regresijske enačbe za krivuljo pretoka zraka v odvisnosti od tlaka skozi suh vzorec, b – eksponent regresijske enačbe, P – prosta površina v suhem vzorcu za pretok plinov, ki ni znana, a – koeficient, ki ni znan, v – linearna hitrost pretoka zraka skozi suh vzorec, a_0 – mejna teoretična vrednost koeficienta a , b_0 – mejna teoretična vrednost eksponenta b , n – število por, a_j – vrednost koeficienta, s katero korigiramo koeficient a (enačba 3) oziroma vrednost 1,28, n_{cj} – izračunano število por, ko smo v enačbo (9) vstavili maksimalno teoretično vrednost koeficienta a ($a = a_0 = 1,28$), n_t – dejansko število por, a^* – vrednost koeficienta pri b_0 .

2.2 Postopek izračuna števila, velikosti in porazdelitve por ter odprte površine za pretok zraka

Algoritem ugotavljanja parametrov poroznosti ploskih tekstilij lahko povzamemo v naslednjih točkah:

1. Izmerimo pretok zraka v odvisnosti od tlaka za suh vzorec.
2. Izmerimo pretok zraka v odvisnosti od tlaka za moker vzorec.
3. Izmerjene vrednosti suhega vzorca aproksimiramo s potenčno funkcijo, enačba (3).
4. Izmerjene vrednosti mokrega vzorca aproksimiramo z aproksimativnimi kubičnimi zlepkami.
5. Izračunamo število por po razredih, glej poglavje 2.1. Če število por ni znano, izračunamo maksimalno teoretično vrednost koeficienta a (enačba 3), $a = a_0$, ter vrednosti parametrov poroznosti (d , P in a^* pri b_0 , $a^* > a_0$).
6. Koeficient $a = 1,28$ delimo z a^* in dobimo dejansko vrednost a oziroma a_j (enačba 10). Nato ponovimo postopek od točke 3 naprej z upoštevanjem le tistih podatkov tlak – volumski pretok, kjer so bile ugotovljene pore.

V primeru, ko je znano število por (produkt gostote po osnovi in gostota po votku) in je koeficient $a_0 > 1,28$ (a^* iz enačbe 10), pomeni, da je v nekaterih porah več hidravličnih por. To pomeni ponoven preračun od točke 3 naprej, le da moramo upoštevati, da število por pravzaprav ni znano.

3.0 EKSPERIMENTALNI DEL IN RAZPRAVA REZULTATOV

V Kliničnem centru v Ljubljani smo dobili tri vzorce mask, ki so v uporabi. Vzorec 1 je bil okrašen z modrimi pikami. Masa vzorca je bila 75 g in debelina 0,52 mm. Vzorec 2 je imel oznako »Klinidrape«. Tehtal je 55 g in je imel debelino 0,37 mm. Vzorec 3 z zelenimi progami je imel enako maso kot vzorec 2 in debelino 0,25 mm. Debelina je merjena s standardno obremenitvijo. V neobremenjenem stanju bi bila debelina vzorcev precej večja. Na porozimetru smo merili poroznost na površini

Preglednica 1: Vrednosti parametrov poroznosti medicinskih mask

Vzorec	Povprečni hidravlični premer por, mikrometri	Največji premer por, mikrometri	Odprta površina %	Število por na 1 cm ²
1	56,04	101,27	9,10	3.634
2	59,96	129,95	9,50	3.311
3	49,83	103,41	9,33	4.602

1 cm². Na robovih je bil vzorec stisnjen. Zato je proti robu nekoliko deformiran oziroma je realna poroznost nekoliko večja, kot smo izmerili. Po drugi strani tlak izboči vzorec v sredini (odprtina je krožna) in se prejšnji učinek nevtralizira. Zaradi te kompenzacije lahko šteje-mo, da so merjeni rezultati dovolj natančni.

Vlaknovina v maskah je točkasto stabilizirana s smo-lo. Na teh površinah maska ni porozna. Pri maskah je bistvenega pomena velikost hidravličnega premera por, predvsem pa največji hidravlični premer. Pri prei-skanih maskah so največji premeri por med 101 in 130 mikrometri. Delež por, ki imajo največji hidravlič-ni premer, je od 0,45 do 1,02 %. Hidravlični premeri so porazdeljeni v zelo ozkem intervalu okrog povpreč-ne vrednosti. Čeprav je velikih por malo, bi le-te lahko bile »široka cesta« za mikrobo in viruse. Ta problem je del nadaljnjih raziskav.

Pore so odprtine med vlakni, ki jih težko definiramo. Stene so vlakna oziroma niso kompaktne. Hidra-vlična pora se formira po kanalu, v katerem so vlakna med sabo najbolj oddaljena. Takšna pora ima veliko ovinkov. Hitrost zraka pri vdihavanju in izdihavanju je sorazmerno majhna (izjema je kihanje) in je pretok zraka skozi masko laminaren. Pri laminarnem pretoku tokovnica zraka nekoliko spremeni smer, ko pride v neposredno bližino površine vlakna. Majhni delci, kot so virusi, so lahko pri tej spremembi smeri tokovnice vrženi iz tokovnice oziroma se gibljejo po Brownovem zakonu. Glede na velikost mikrobov in virusov je pot iz ene površine do druge površine maske dolga. Poleg tega tokovnice zraka popolnoma spremenijo smer v ritmu vdihavanja in izdihavanja, kar tudi pripomore k večji učinkovitosti filtracije.

Zrak, ki ga izdihavamo, je nasičen z vodno paro. Bombažna vlakna se ovlažijo. Vlažna površina je bolj »lepljiva« kot suha. Zato se poveča učinkovitost filtraci-je zraka, ki se giblje skozi masko.

Maske se testirajo glede učinkovitosti filtracije. Lah-ko nastanejo določena odstopanja v kakovosti kot po-sledica slabo vodenega proizvodnega procesa. Poroz-nost je lahko prevelika (zmanjšana učinkovitost filtra-cije) ali pa je premajhna (oteženo dihanje). Uporaba naše metode bi omogočila standardiziranje vrednosti parametrov poroznosti za vsaki tip maske in bi tudi omogočila končno kontrolo v proizvodnji.

4.0 SKLEPI

1. Z metodo je mogoče dovolj natančno ugotoviti šte-vilo, velikost in porazdelitev velikosti por ter delež proste površine ploskega tekstilnega izdelka za pre-tok plinov in tekočin.
2. Omogoča tudi ugotavljanje volumenske in linearne hitrosti pretoka plinov v odvisnosti od tlaka, kar je

pomembno pri raziskavah vpliva hitrosti vetra na termoizolacijo oblačila.

3. Območje uporabnosti metode je približno interval velikosti hidravličnih premerov med 5 in 200 mi-krometri.
4. Omejitve nad 200 mikrometrov je posledica kritič-nega razmerja med debelino tkanine in hidravlič-nim premerom pore. Če je tkanina dovolj debela, se poveča stabilnost tekočine v pori in je zaradi tega mogoče meriti pore v ploskih tekstilijah, ki imajo tudi pore večjega hidravličnega premera kot 200 mikrometrov.
5. Spodnjo mejo intervala omejuje tlak, ki je potre-ben, da iztisne tekočino iz por, ki imajo hidravlični premer 5 mikrometrov ali manj zaradi deformacije vzorca. Če je ploska tekstilija zelo stabilna in če se uporabi manj kot 1 cm² vzorca, je mogoče premak-niti spodnjo mejo intervala na hidravlični premer, manjši od 5 mikrometrov.
6. V vlaknovinah, kot so vložki v maskah, so pore ka-nali med vlakni. Premer in smer takšnih kanalov se naključno spreminja, razen, delno, kanalov, ki so posledica delovanja igel pri iglanju vlaknovine. Po-sledica tega je filtriranje tudi delcev, ki imajo nekaj-krat manjši premer, kot je hidravlični premer pore, in so lahko tako majhni, da se gibljejo po Browno-vem zakonu. Takšni delci so virusi.

Viri:

- [1] JAKŠIČ, D. *Razvoj nove metode za določanje velikosti in porazdelitve por v tekstilnih izdelkih*. Ljubljana 1978, 140 strani. Delo je bilo financirano iz sredstev RASK- PRS-J po pogodbi za IV. fazo raziskav, št. J-784/5922/77.
- [2] BUKOŠEK, V. *Program za izračun števila, velikost in po-razdelitve por v ploskih tekstilijah*. Ljubljana : Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, Oddelek za tekstilno tehnologi-jo, 1980.
- [3] JAKŠIČ, N. *Program za izračun števila, velikost in porazde-litve por v ploskih tekstilijah*. Ljubljana : Fakulteta za stroj-ništvo, 2002.
- [4] JAKŠIČ, D. *Projektiranje in konstrukcija tekstilij*. Ljubljana : Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, Oddelek za tek-stilno tehnologijo, 1988, str. 204–219.
- [5] JAKŠIČ, D. in Jakšič, N. Assessment of porosity of flat textile fabrics. *Textile Research Journal*, sprejeto za objavo 05. 04. 2003.