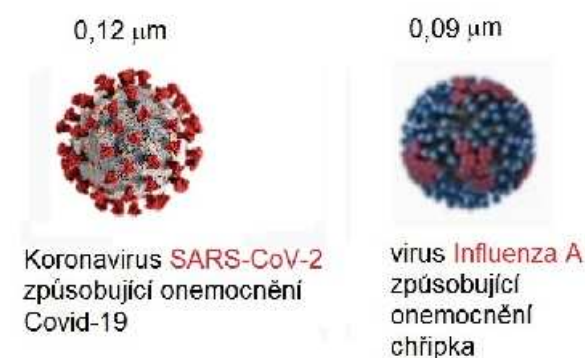


PROVOZ VZDUCHOTECHNIKY V DOBĚ COVID-19

Karel Doušek

Ing. Karel Doušek, CSc. - Airtechnik

Vzhledem k probíhající epidemii respiračního onemocnění Covid-19 se objevují různé nepřesné informace o viru SARS-Cov-2 a vlivu vzduchotechniky na přenos nákazy a v některých případech se objevují i nelogické požadavky na vypnutí vzduchotechniky, ačkoli je osazena dostatečně účinnými filtry.

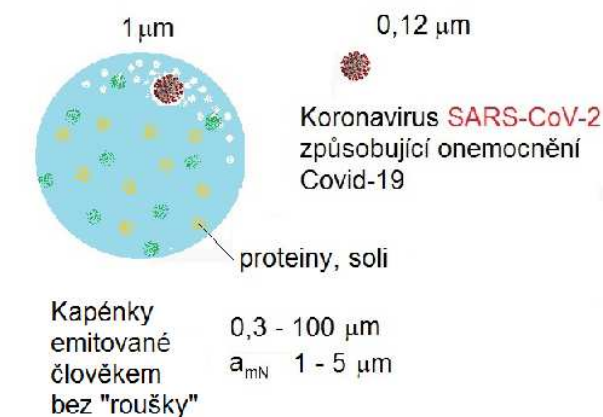


Pro srovnání je zobrazen jak virus SARS-Cov-2, tak i virus „chřipky“ (zobrazení je převzato z Wikipedie)

Pro vysvětlení skutečné situace se pokusím rozebrat vnik možného rizika v prostředí, v němž pobývá člověk emitující kapénky s viry, a vliv vzduchotechniky na toto riziko.

VZNIK NEBEZPEČNÝCH ČÁSTIC VE VZDUCHU

Kapénky produkované člověkem při mluvení a kýchání obsahují částice v širokém rozmezí 0,3 - 100 μm . Kapénky podle literárních údajů [2], [3], [4] mají medián počtu částic mezi cca 1 - 5 μm , a významný podíl velkých částic 10 - 100 μm , které nesou nejvíce infekčního agens. Podle našeho zjištění mají přibližně log-normální rozdělení četnosti. V blízkém okolí kýchajícího člověka jsme na površích zjistili i jednotlivé kapky o velikosti až 1 mm (10x větší částice obsahuje 1000x více agens).

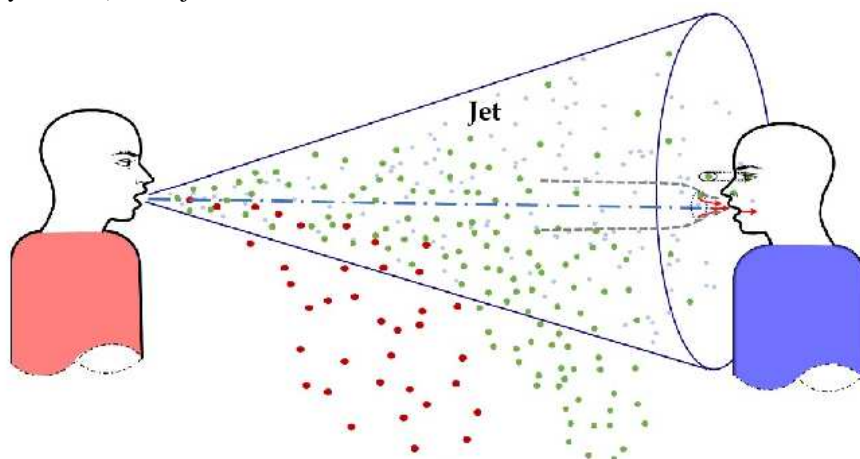


Kapénky jsou tvořeny slinami, hlenem a odumřelými buňkami sliznic. Rozložení velikostí kapének v rozsahu 0,3 až 100 μm se dá aproximovat log-normálním rozdělením s tím, že medián rozdělení je 1 - 5 μm .

U nemocného člověka kapénky obsahují patogenní viry nebo bakterie. Samostatně, bez kapénky, se virus ve vzduchu nevyskytuje.

Po exhalaci z dýchacího ústrojí člověka kapénka podléhá vlivu prostředí, tj. sedimentuje, zmenšuje se vypařováním a pohybuje se vlivem proudění vzduchu.

Nejjednodušší případem je prostor se dvěma osobami, kde proudění vzduchu je vyvoláno jen prudkým výdechem (kýchnutím) emitující osobou.



Je zřejmé, že velké kapénky, obsahující nejvíce infekčního agens, rychle sedimentují a ulpívají na horizontálních plochách, kde též postupně vysychají. Pádová rychlost je významná pro kapénky přes 5 μm.

Pádová rychlost a doba setrvání částic ve vzduchu

$$u_p = a^2 (\rho_c - \rho) \cdot g / 18 \eta$$

výpočet pro součinitel odporu ξ částice podle Stokesova zákona
tj. $\xi = 24/Re$ v oblasti $Re_r < 0,2$; $\rho_c = 1000 \text{ kg/m}^3$

Doba t pádu částice o průměru a [mm] z výšky 1,5 m na horizontální rovinu

u [mm/s]	a [μm]	t		Poznámka
		[s]	[min]	
0,030	1,0	50151	836	téměř nesedimentuje
0,75	5,0	2006	33	pomalou sedimentuje
3,0	10	502	8,4	sedimentuje
12,0	20	125	2,1	sedimentuje
75	50	20	0,33	sedimentuje
299	100	5	0,08	rychle sedimentuje

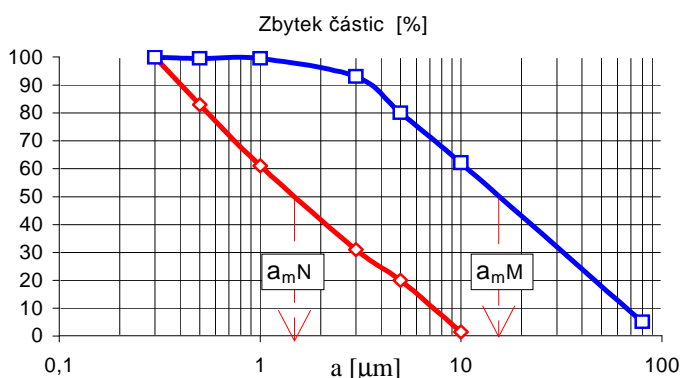
Pokud se kapénka dostatečně zmenší, klesá její pádová rychlost, zvyšuje se pohyb se ve směru proudění vzduchu a začínají na ni působit molekulární vlivy okolí. Zejména jde o termoprecipitaci, tj. pohyb ve směru gradientu teploty a elektroprecipitaci, tj. pohyb ve směru gradientu elektrického pole. To v interiéru v zimě obvykle způsobuje pohyb k chladnějším stěnám, na nichž se částice zachytí. Samozřejmě rychlost vypařování závisí na okolní teplotě a vlhkosti.



Fotografické zobrazení emise kapének je převzato z [1]

Příklad rozložení velikostí emitovaných kapének uvádím ve formě křivky zbytku zjištěné měřením počítačem částic. Měření bylo provedeno při kýchnání pro několik osob [5]. Uvedená křivka je vybrána jako „worst case“ z více měření.

velikost částic [μm]	0,1	0,3	0,5	1	3	5	10
Zbytek početní [%]	N/A	100	83	61	31	20	1,5
Zbytek hmotnostní [%]	N/A	99,9	99,5	99,5	93	80	62



Pozn. Křivka zbytku definuje, jaký je podíl částic $\geq a$ [μm] (tj. částic dané velikosti a všech větších) na jejich celkovém množství. Křivky zbytku lze vyjádřit pro počet a pro hmotnost částic.

Pro obvyklé logaritmicko-normální rozložení velikostí částic lze posun hmotnostní křivky proti početní vypočítat ze směrodatné odchylky.

Kapénky podle našich zkoušek jeví medián četnosti v oblasti nad 1 μm a 90 % hmotnosti nesou částice přes 3 μm.

Z grafu je vidět, že zobrazený aerosol obsahuje 50% částic $\geq 1,5 \mu\text{m}$, 50% hmotnosti připadá na částice $\geq 15 \mu\text{m}$

a částice přes 1 µm představují 99,5 % hmotnosti, tj. hlavní infekční nálož je v relativně velkých kapénkách.

Pozn. Obdobné výsledky rozložení velikosti částic emitovaných podle našich měření osobami (bez „roušky“) jsou uvedeny i v separátu [6]

Pravděpodobnost vzniku onemocnění u zasažené osoby klesá s počtem infekčních částic ve vzduchu a s obsahem infekčního agens, tj. s jejich původní velikostí a počtem.

Z údajů v literatuře lze očekávat, že vysušení kapének vede k inaktivaci viru neb pro funkčnost jeho povrchových proteinů je nutná voda.

VLIV VZDUCHOTECHNIKY NA INFEKČNOST PROSTORU

Pokud v místnosti pobývají potenciálně nemocní lidé, dochází v něm k vytvoření určité koncentrace rizikových kapének. Jejich koncentrace závisí hlavně na intenzitě větrání čistým vzduchem bez infekčních částic.

Toto větrání může být zajištěno příivodem čerstvého vzduchu nebo směřováním části čerstvého vzduchu s cirkulací vzduchu odtáženého z prostoru zařízením, v němž jsou instalovány dostatečně účinné filtry. Dají se očekávat následující případy.

1. Prostor s vypnutou vzduchotechnikou nebo bez vzduchotechniky

Je zřejmé, že emitováním částic osobami dojde k zvyšování koncentrace částic, které budou z uzavřené místnosti odstraňovány jen uvedenými mechanismy (sedimentací velkých částic, termoprecipitací a případně difuzí a elektroprecipitací malých částic). Po určité době dojde na dosti vysoké „rizikové“ úrovni koncentrace k vytvoření jisté rovnováhy mezi příivodem kontaminujících částic a mechanismy jejich odstraňování.

Snížení koncentrace samozřejmě lze dosáhnout větráním venkovním „čistým“ vzduchem, jímž se koncentrace může „rozředit“. Pokud ovšem nejde o nucené větrání, je vliv přirozeného větrání malý, ale „lepší něco než nic“. Dá se ovšem očekávat, že na určitých místech proudění vzduchu, npř. od otevřeného okna ke dveřím, transportuje kapénky od jedné osoby ke druhé, což není žádoucí a je třeba proti tomu přijmout opatření. Je třeba, pokud možno, dodržovat zásady správného větrání, tj. otevřít všechna okna na krátkou dobu a pak je opět zavřít.

Snížení koncentrace aktivních virů v prostoru lze též dosáhnout vhodným umístěním dostatečně výkonného cirkulačního filtru (nejlépe HEPA), ionizátorem nebo zdrojem ozónu. Ionizace vzduchu též vyvolá elektroprecipitaci malých částic.

2. Prostor s čerstvovzdušným větráním

Pokud je prostor správně provětráván vzduchotechnikou pracující plně s čerstvým vzduchem pak bude koncentrace nebezpečných částic v prostoru menší než bez větrání a bude záviset na výměně vzduchu. Pokud je zajištěna dostatečná výměna vzduchu a správné uspořádání proudění v prostoru, bude riziková koncentrace významně menší než bez vzduchotechniky.

Nesprávné uspořádání větrání je takové, kdy proudění vzduchu transportuje kapénky od jedné osoby ke druhé což lze objektivně snadno zjistit zviditelněním proudění. Pak je nutno určit, která místa jsou z hlediska transportu kapének rizikovější a v nich pobyt osob vyloučit.

3. Prostor se směšovací větráním

Pokud je prostor správně provětráván vzduchotechnikou s dostatečně účinnými filtry bude koncentrace nebezpečných částic v prostoru opět významně menší než bez větrání a bude záviset na účinnosti filtrů a výměně vzduchu. Opět je podmínkou dostatečná výměna vzduchu a správné uspořádání proudění v prostoru.

Účinnost filtrace a tím i snížení infekční nálože v prostoru dále uvádíme pro vzduchotechniku s filtry F8 a H13.

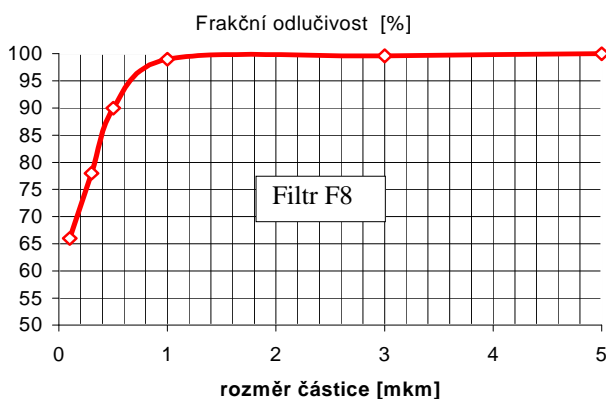
3.1. Filtrace filtrem třídy F8

Pokud jsou ve vzduchotechnice správně instalované nepoškozené filtry alespoň třídy **F8**, pak má vzduchotechnika pro částice s mediánem podle hmotnosti 0,6 µm, odlučivost >94% a pro částice > 5 µm odlučivost >99%. Proto výše uvedené kapénky odfiltruje prakticky úplně, tj. s celkovou **odlučivostí přes 99%** (viz frakční odlučivost dále).

Frakční odlučivost (závislost odlučivosti na velikosti filtrovaných částic)

pro filtrační materiál kapového filtru F8 při rychlosti 5 cm/s byla zjištěna následující [5].

velikost částic [μm]	0,1	0,3	0,5	1	3	5
odlučivost [%]	66	78	90	99	99,6	99,99
průnik [%]	34	22	10	1	0,4	0,01



Ze zobrazené křivky frakční odlučivosti filtru a křivky zbytku kapének uvedené výše je vidět, že při rozložení počtu emitovaných kapének s mediánem 1,5μm a mediánem podle hmotnosti 15 μm zachytí uvedený filtr **min 99,5 %** jejich hmotnosti.

Pokud však bude v prostoru menší výměna vzduchu než cca 5x za hodinu, může dojít ke zmenšení části kapének vysycháním a tím k jejich posunu k menší velikosti (mediány cca. 0,5/5 μm), kde účinnost filtru klesne na cca 90%. Tato účinnost však stále zajišťuje nižší koncentraci nebezpečných částic v prostoru proti stavu bez vzduchotechniky.

3.2 Filtrace filtrem H13

Filtr H13, H14 jsou historicky nazývány HEPA filtry .

Filtry HEPA používají jako filtrační medium **papír ze skleněných mikrovláken**, jejichž rozložení průměrů vláken tvoří obvykle **polydisperzní systém** v rozmezí **od 0,1 do 30 μm** s **maximem** počtu v oblasti **desetin až jednotek μm**. Papír tvoří prostorovou strukturu s naplněním cca 2%. Větší odlučivosti při menším tlakovém spádu dosahují materiály s větším podílem submikronových vláken („nanovláken“). Třída filtrace určitého filtračního media závisí na rychlosti protékajícího vzduchu (čelní rychlosti) viz příklad parametrů níže.

Zatřídění vysokoúčinných filtrů (HEPA a ULPA) je v současnosti založené na zjišťování **odlučivosti pro částice**, které filtračním materiálem nebo filtrem **nejvíce pronikají**, tzv. **MPPS** (Most Penetrating Particle Size). Filtrační materiál se zkouší při jmenovité filtrační rychlosti a stanoví se velikost částice MPPS. Stanovení MPPS se provádí měřením odlučivosti, resp. průniku pro několik velikostí částic čímž se určí průběh **funkce „frakční odlučivosti“** a její **minimum** tj. MPPS.

Filtr třídy **H13** má pro částice menší i větší než jeho **MPPS** odlučivost **>99,95 %**, proto výše uvedené kapénky odfiltruje prakticky úplně, tj. s celkovou hmotnostní **odlučivostí > 99,99 %**.

MPPS (Most Penetration Particles Size) je velikost částice, která nejlépe proniká filtračním mediem a podle průniku pro tuto velikost je filtr zatříděn. Z toho plyne, že filtr H13 vždy chrání prostředí prakticky absolutně a podstatně lépe než je jeho účinnost (odlučivost) podle normy definovaná pro částice s velikostí MPPS.

Pro filtr **HEPA** lze použít například filtrační medium (papír) LYDAIR GRADE 3428, který podle použité čelní rychlosti odpovídá třídě filtrace H13 - H14.

Třída filtrace	Odlučivost (%)	Průnik (%)	MPPS (μm)
H 13	99,95	0,05	0,20 (for Face velocity 4,5 cm/s)
H 14	99,995	0,005	0,14 (for Face velocity 1,7 cm/s)

Částice o velikosti **MPPS**, tj. částice s **největším průnikem**, jsou pro uvedený materiál v oblasti **0,14 - 0,20 μm**. Je však třeba uvést, že **pro všechny menší i větší částice** než je MPPS, **odlučivost** filtru významně **roste**. Pro menší částice je to dáno vlivem vzrůstající účinnosti **difuzního** a pro větší částice vlivem vzrůstu vlivu **intercepčního** principu **záchytu**. Zachycená částice zůstává na vlákně filtru trvale zachycena kohezními silami.

Je vidět, že i pro samotný virus s velikostí 0,12 μm by filtr H13 zajistil jeho prakticky úplný záchyt. Virus je vždy spojen s kapénkou nebo zbytkem kapénky obsahující i další organickou hmotu, což znamená, že i velikost částice vzniklé „vysušením“ kapénky obsahující jeden virus bude větší než MPPS filtru H13.

ZÁVĚRY PRO PROVOZOVÁNÍ VZDUCHOTECHNIKY.

1. **Cirkulační vzduchotechnika** s filtry nižší třídy než **F7**, zejména pod M5 nezaručuje dostatečný záchyt kapének a je třeba zvážit, zda je vhodnější ji vypnout a větrat jen přirozeným větráním. V každém případě i filtry M5 zajistí určitý pokles koncentrace kapének ve vzduchu
2. **Čerstvovzdušná vzduchotechnika** vždy snižuje koncentraci infekčních částic ve vnitřním větraném prostoru a je třeba ji normálně provozovat.
3. **Směšovací vzduchotechnika s filtry** lepší třídy než **F8**, vždy snižuje významně koncentraci infekčních částic v prostoru a je třeba ji, v době epidemie, normálně provozovat.
4. **Směšovací vzduchotechnika s filtry HEPA**, bezpečně odstraní všechny infekční částice z prostoru a je třeba ji, v době epidemie, vždy normálně provozovat.
5. Vzduchotechniku **aseptických operačních sálů, JIP** a dalších **sterilních prostorů** je třeba vždy normálně provozovat, aby nedošlo k riziku významné bakteriální kontaminace prostorů a nedodržení předepsaných tříd prostoru s možným poškozením pacienta. Předpokladem spolehlivosti je validace prostorů zahrnující leak test filtrů.
6. Při provozování vzduchotechniky **aseptických prostorů** (npř. operační sály s příslušenstvím), s přetlakem proti okolí, kde mohou být ošetřováni pacienti s Covid-19 **je třeba** přijmout zvláštní **opatření** pro následnou **dekontaminaci** prostorů.
V operačním sále s přívodem vzduchu operačním stropem s HEPA filtry a s odtahy u podlahy, je personál, prouděním čistého vzduchu, dobře chráněn proti přenosu infekce od pacienta.
Je však nutno předpokládat, že se část nebezpečných částic dostane na podlahu a odtahové mřížky a do navazujících prostorů s nižšími přetlaky (přípravna pacienta, umývárna lékařů atd.)
7. V prostorech s cirkulací odtahovaného vzduchu musí, pro bezpečné snížení infekční nálože v prostorech, být kapsové filtry F8-F9 instalované do zařízení správně těsně a nepoškozené. Před provozováním této vzduchotechniky je třeba provést podrobnou kontrolu jejich nepoškozenosti a těsné instalace do skříně vzduchotechnické jednotky. Lze-li provést, doporučuje se kontrola měřením celkové odlučivosti metodou počítáče částic pro částice 0,5 a 5 μm .
8. V prostorech s cirkulací odtahovaného vzduchu je absolutní ochrana čistým přiváděným vzduchem zajištěna pokud jsou instalované HEPA filtry instalovány odborně a je doloženo provedení „defektoskopie“ tj- Leak test.
9. Při provozu vzduchotechniky je vhodné z využívaného prostoru vyloučit místa mezi nimiž dochází k významnému proudění vzduchu s možností transportu kapének. Doporučuje se, aby rizikové osoby byly, jde-li to zařídít, umístěny u odtahu, a tím jejich emise byly odváděny z prostoru.

Literatura k článku

[1] Sneeze. CDC Public Health Image library ID 11162, James Gathany, USA, 2009

[2] Rozsypal, Ošetřovatelství infekčních nemocí v intenzivní péči,
<https://www1.lf1.cuni.cz/~hrozs/osetrin2.htm>

[3] Nákazy přenášené vzdušnou cestou,
https://www.wikiskripta.eu/w/Nákazy_přenášené_vzdušnou_cestou

[4] Hygiena a epidemiologie (2. doplněné vydání), Učební texty univerzity Karlovy, Milan Tuček

[5] Interní protokoly o měření, Doušek, firma Ing.Karel Doušek,CSc.-Airtechnik, 2020

[6] Short-range airborne route dominates exposure of respiratory 3 infection during close contact, Wenzhao Chen, Nan Zhang, Jianjian Wei, Hui-Ling Yen², Yuguo Li, Hong Kong, China, 2020

[7] Airborne Transmission of SARS-CoV-2, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2020.: *Proceedings of a Workshop in Brief*. Washington, 2020
DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25958>

[8] Online přednáška, Ždímal, UCHP AVČR, <https://www.youtube.com/watch?v=Xf5d-oQRBlo>