

АНАЛІЗ БІОБЕЗПЕКИ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ АВІАЦІЙНИМ ТРАНСПОРТОМ

Д.О. ДЕКАР, В.В. ГОРУПА

Національний авіаційний університет, м. Київ

Розглянуто проблему поширення патогенних мікроорганізмів на борту пасажирського літака. Доведено, що система кондиціонування повітря повітряного судна та організація повітряних потоків в салоні є основними чинниками в інфікуванні пасажирів під час перельоту. Представлені та обґрунтовані рекомендації зміни напрямку руху повітряних потоків для унеможливлення інфікування пасажирів під час перельоту.

Ключові слова: *авіаційні пасажирські перевезення, біобезпека, інфікування, система кондиціонування повітря, патогенні мікроорганізми, повітряне судно, повітряно-крапельний механізм*

Біологічна безпека (біобезпека) – це система правил та заходів, що мають зменшити чи запобігти біологічним ризикам, пов'язаним з використанням біотехнології та її продуктів [1].

Авіаційна галузь має пріоритетне значення в економічному розвитку більшості країн та світовій економіці загалом, оскільки забезпечує велику кількість пасажирських та вантажних перевезень за короткий термін часу та сприяє розвитку суміжних галузей економіки.

Важливу роль авіаційний транспорт відіграє у пасажирських перевезеннях. За 2017 р. понад 4 млрд пасажирів скористалися 1202 великими міжнародними аеропортами. Авіаційним транспортом забезпечується міжнародні перевезення пасажирів та внутрішні, в країнах з великою територією (США, РФ, Канада, Китай та інші). Частка авіаційного транспорту в перевезенні пасажирів світу

перевищує 10 %. Близько 70 % пасажиропотоку в структурі авіаперевезень – внутрішні рейси. Індустрія повітряного транспорту зростала швидкими темпами до початку пандемії 2020 р. Інформація, опублікована Міжнародною асоціацією повітряного транспорту «*International Air Transport Association*» (IATA), стосовно загальносвітових показників пасажирських перевезень за 2020 р., повідомляє про зниження попиту на авіаперевезення на 65,9 % порівняно з попереднім роком. Станом на 2020 р. більшість авіаперевезень здійснено в Азіатсько-Тихоокеанських регіонах, що становить 38,6 %, друге та третє місця 23,6 та 22,7 % посідають Європа та Північна Америка відповідно [2; 3].

Події сьогодення та проведені наукові дослідження дали змогу встановити зв'язок між авіаперевезеннями та поширенням мікроорганізмів, що спричинили захворювання людей. Задokumentовано десятки випадків інфікування важкими хворобами під час авіаперельоту. Поширення патогенних мікроорганізмів під час перельоту є важливою проблемою охорони здоров'я у світі, адже авіаперевезення сприяють швидкому розповсюдженню захворювань та пандемій [4].

У журналі «*Journal of Infectious Diseases*» опубліковані результати наукових робіт щодо поширення гострої респіраторної вірусної інфекції (ГРВІ) авіаційним транспортом під час її спалаху. За проведеними дослідженнями, із сорока рейсів, пасажери яких мали симптоматичну ГРВІ, інфікування відбулося на п'яти. Під час чотирьох рейсів інфіковані пасажери (реципієнти) розташовувалися недалеко від переносника хвороби (донора), тому вважається, що передача вірусу відбулася повітряно-крапельним шляхом (ПКШ) через великі краплі аерозолі. Також подана інформація, що під час рейсу з Гонконгу до Пекіна 22 із 120 пасажирів та екіпажу заразилися ГРВІ. Це свідчить про розповсюдження вірусу в повітрі на значну відстань, що підтверджує значну роль системи кондиціонування повітря (СКП) в поширенні МО [5].

Біологічний рівень безпеки визначає біобезпеку залежно від агентів, що створюють певний ризик небезпеки для розвитку інфекцій у людей. Існує чотири рівні біобезпеки, кожен з яких складається з первинних і вторинних

бар'єрів і особливостей біологічних процедур. Відповідно до вимог класифікації рівнів біобезпеки, пасажирські авіаперевезення належать до третього рівня біобезпеки. Він визначає групу ризиків, що містить біологічні агенти, які викликають істотні захворювання людини, та може призвести до важких економічних наслідків. Ці агенти передаються ПКШ [1]. Біобезпека авіаційних перевезень забезпечується комплексом заходів, що запобігають неконтрольованому поширенню мікроорганізмів (МО) в аеропортах та на борту повітряних суден.

Аналізуючи ризики інфікування пасажирів під час авіаперельоту, необхідно зазначити, що важливу роль у запобіганні поширенню МО відіграє СКП повітряного судна (ПС). Повітря, що циркулює в СКП, – це аерозоль, до складу якого входить азот (75 %), кисень (23 %), вода (до 3 %) у газоподібному та рідкому станах (краплі), аргон (1,3 %), інертні гази (0,65 %), вуглекислий газ (0,05 %), завислі тверді та рідкі частки.

Здатність СКП очищати повітря від забруднень визначає рівень її біобезпеки. Очищення повітря, що циркулює в салоні літака, переважно забезпечується системою фільтрів, призначених для уловлювання часток різного розміру. Мікроорганізми як самостійні об'єкти зазвичай не містяться в повітрі. Як правило, вони знаходяться на поверхнях часток різного розміру [6]. Очищуючи повітря від часток, зменшується їх кількість у ньому, а це приводить до зниження концентрації МО у повітрі, отже знижується ймовірність контакту їх з людиною.

Систему кондиціонування повітря ПС варто розглядати як джерело потенційної небезпеки поширення МО, оскільки оновлення повітря на борту літака відбувається 20...30 разів за годину, відповідно ймовірність контакту людини з патогенними МО збільшується. У разі несправності повітряних фільтрів СКП мікроорганізми можуть багаторазово потрапляти до салону літака разом із рециркуляційним повітрям, тим самим збільшиться ймовірність інфікування пасажирів.

Поширення МО між пасажирами в літаку може відбуватися навіть за належної роботи СКП. Ще до спалаху пандемії було задокументовано випадки захворюваності безпосередньо під час авіаційних перельотів. У світі щороку реєструють близько 2 млрд випадків зараження різними інфекціями, внаслідок яких помирає понад 17 млн осіб [5].

Патогенні мікроорганізми на літаку між людьми можуть поширюватися такими способами:

- через контакт із поверхнями, на яких знаходяться МО;
- через їжу;
- через прямий контакт між пасажирами;
- повітряно-крапельним шляхом.

Мікроорганізми в повітрі входять до складу аерозолі (колоїдна система, яка складається з повітря, крапель рідини або твердих частинок). До основних фаз мікробного аерозолі належать:

- крапельна фаза – складається з вірусів та бактеріальних клітин, оточених водно-сольовою оболонкою. Тривалість перебування у повітрі становить кілька секунд (діаметр крапель понад 0,1 мм);

- дрібна ядерна фаза – утворюється при висиханні частинок першої фази. Під час даної фази частки легко переміщуються потоками повітря та здатні тривалий час знаходитися у завислому стані. У цей період відбувається поширення більшості збудників повітряно-крапельних інфекцій (діаметр крапель менше ніж 0,1 мм);

- фаза «бактеріального пилу» – характеризується швидко осідаючими частками, здатними утворювати пил та підніматися в повітрі (діаметр крапель від 1 до 100 мкм).

Повітряно-крапельний механізм передачі захворювання характерний для інфекцій дихальних шляхів. Мікроби потрапляють до повітря в крапельній фазі аерозолі під час розмови, кашлю або чхання людини і знаходяться в складі крапель різної величини, які складаються із слини та слизу (рис. 1) [7].

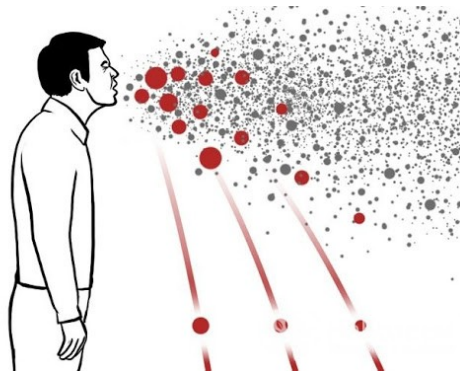


Рис. 1. Моделювання процесу розповсюдження і виділення аерозолі під час кашлю людини

Система кондиціонування повітря сучасних ПС повинна запобігати розповсюдженню найпоширеніших патогенних мікроорганізмів (див табл. 1), які передаються повітряно-крапельним механізмом (ПКМ).

Таблиця 1

Патогенні мікроорганізми та їх розміри

Назва мікроорганізму	Розмір, мкм
<i>Influenzavirus A</i>	0,08...0,12
<i>COVID-19</i>	0,12
<i>Varicella-zostervirus</i>	0,15...0,2
<i>Neisseria meningitidis</i>	0,6...1,0
<i>Ebolavirus</i>	0,79...0,97
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>	1...8 × 0,3...0,8
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	1...10 × 0,2...0,6

Головним джерелом розповсюдження МО під час ПКМ інфікування є повітря. Отже, для встановлення біоризиків перебування пасажирів на борту ПС необхідно провести аналіз СКП та визначити особливості її функціонування.

У СКП сучасних літаків використовується часткова рециркуляція повітря. Розподіл повітря у салоні відбувається двома шляхами: безпосередньо до кожного пасажира у верхній частині та подача вздовж усього літака [8].

Підведення повітря до салону здійснюється через гумові трубопроводи у стельовій зоні з нижньої частини багажних полиць каналним осьовим електровентилятором. Розподіл повітря в салоні та виведення з нього забезпечується відповідними елементами, показаними на рис. 2.



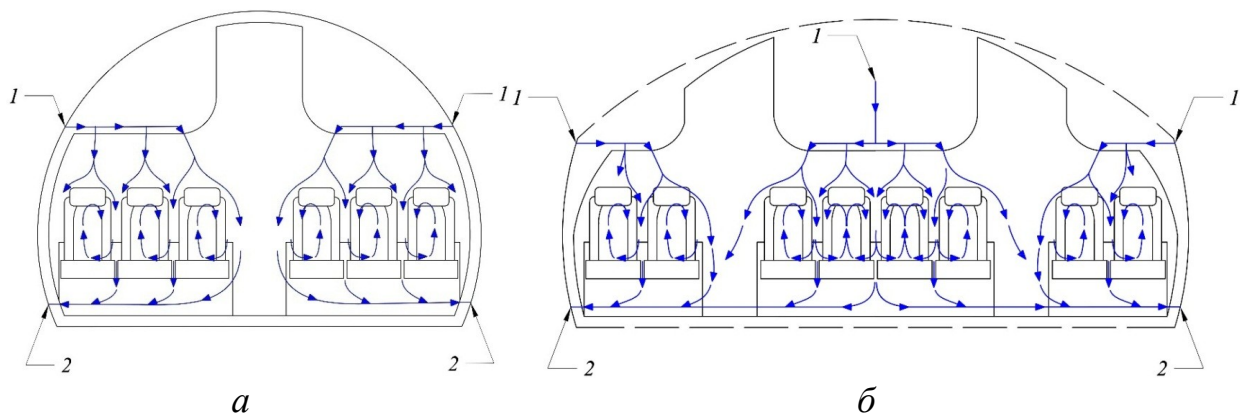
a



б

Рис. 2. Елементи подачі (*a*) та відбору (*б*) повітря в салоні літака

Напрямки основних потоків повітря, що спрямовуються до пасажирів та подальший рух у салоні вузько- та широкофюзеляжного ПС показано на рис. 3.



a

б

Рис. 3. Схема вертикальної подачі повітря на:

a – *Airbus-320* та *Boeing-737* (вузькофюзеляжні літаки); *б* – *Airbus-330*;

1 – місця подачі повітря в салоні, *2* – місце відбору повітря з салону

Вони зображені з урахуванням присутності пасажирів, тому на запропонованих рисунках можна побачити зміну напрямків руху. Повітряні потоки у широкофюзеляжних літаках, спрямовані на місця сидінь пасажирів у середній частині ЛА, не мають виходів для рециркуляційного повітря. Повітря

для виходу з салону літака змушене рухатися до боків фюзеляжу, що зумовлює його турбулізацію та утворення хаотичних вихрів. Цьому також сприяє наявність перешкод для повітряних потоків: частин тіла пасажирів, особистих речей та крісел (нижня частина сидінь).

Перехресному руху повітря також сприяє додатковий потік повітря, що використовується для обігріву салону вздовж ПС. Додатковий підігрів повітря в салоні відбувається завдяки подачі нагрітого повітря через декілька теплообмінників (3...5), які розташовані рівномірно вздовж осі фюзеляжу. Подача нагрітого повітря відбувається на початку, посередині та в кінці салону.

Відбір усього рециркуляційного повітря з салону літака, як було зазначено вище, відбувається в нижній частині лівого та правого боків фюзеляжу. Відповідні елементи забору повітря з салону літака розташовані біля кожного ряду сидінь. Надалі повітря з салону спрямовується до турбохолодильника. Перед подачею до турбохолодильника частина повітря відводиться з СКП за борт повітряного судна (ПС) за допомогою відповідних її елементів, інша частина – спрямовується на рециркуляцію та знову підводиться до салону.

Підвищити рівень біобезпеки під час перебування пасажирів на борту літака можливо завдяки оптимізації руху повітряних потоків у салоні літака, тобто створення умов руху повітря, за якого поширення патогенних МО повітряно-крапельним шляхом між окремими пасажирами не відбувається.

Існуюча схема подачі повітря в салоні літака передбачає створення вертикальних потоків повітря, спрямованих зверху донизу. Головне призначення повітряного потоку в салоні літака полягає в тому, щоб підводити до людини повітря з необхідними параметрами та швидко відводити видихуване повітря до системи очищення. Для цих двох процесів бажаною є прямотечійність, тобто підведення свіжого та відведення видихуваного повітря відбувається одночасно в одному напрямку. Підведення повітря у верхній частині салону та відведення у нижній є недоречними, з погляду фізіологічних властивостей організму пасажира, а саме безперервного виділення тепла у довкілля [8].

Теплообмін між організмом людини та навколишнім середовищем описується явищем природної конвекції. Теплообмін у процесі життєдіяльності організму людини відбувається переважно завдяки випаровуванню вологи з поверхні тіла, та теплопровідності (рис. 4) [9].

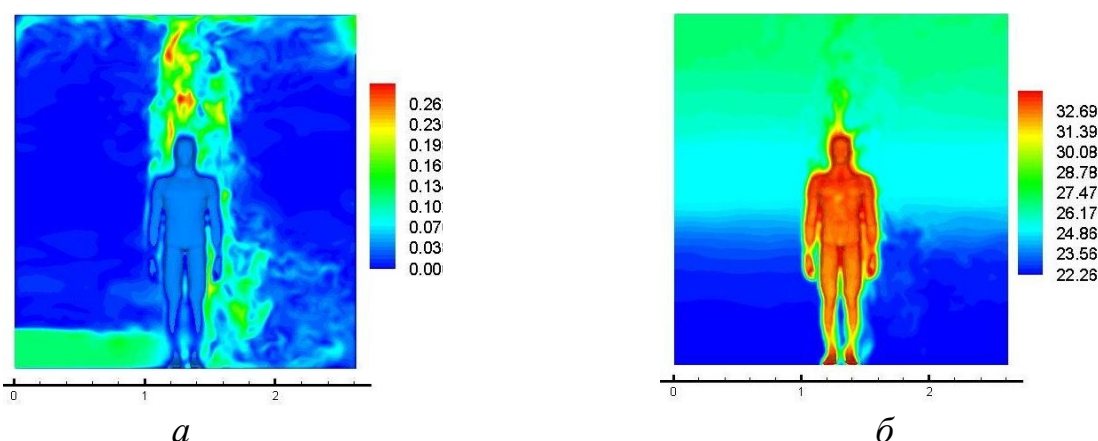


Рис. 4. Візуалізація процесу теплообміну між організмом людини та навколишнім середовищем:

a – вертикальна швидкість потоку повітря природної конвекції, м/с;

б – температурне поле людини в оточуючому просторі, °С [10]

На рис. 4 показано, що температура оточуючого людину повітря може підвищуватися завдяки теплообміну до значень 27 – 28 °С, при цьому швидкість потоків повітря, що виникли завдяки природній конвекції, в середньому становить 0,16 – 0,19 м/с. Під час природної конвекції більш нагріте повітря стає менш щільним та легшим, унаслідок чого відбувається висхідний рух (тепле повітря піднімається вгору). Охолоджуючись, повітря, навпаки, стає більш щільним, тому відбувається рух повітря донизу. Конвективний теплообмін (спостерігається в рухомому середовищі) – це перенесення теплоти, зумовлене переміщенням макроскопічних об’ємів середовища в просторі, що супроводжується теплопровідністю [11]. Повітря, що омиває тіло людини, нагрівається та відповідно має вищу температуру ніж повітря, що подається до салону (плюс 10 °С), тому, відповідно до явища конвекції, воно змушене рухатися вгору, захоплюючи із собою частки, які виділяються з тіла людини, та краплі аерозолі видихуваного повітря. Низхідні

потоки повітря сучасних СКП та висхідні потоки від тіла спрямовані назустріч один одному, саме тому відбуваються їх зіткнення, зміна траєкторії та завихрення. Унаслідок утворення таких повітряних течій з'являється турбулентність, яка сприяє збільшенню часу перебування повітря в салоні, зменшуючи кратність циркуляції та збільшуючи ймовірність контакту часток та крапель видихуваного повітря з іншими пасажирами. Наявні в салоні літака перешкоди, такі як сидіння, особисті речі також сприяють турбулізації повітряних потоків та хаотичному їх переміщенню. Моделювання руху повітряних потоків та їх завихрення показано на рис. 5.

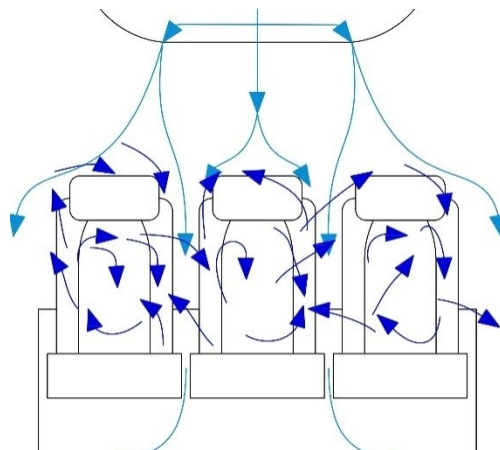


Рис. 5. Схематичне зображення турбулізації повітряних потоків

Для зменшення турбулізації повітряних потоків, унеможливлення їх неконтрольованого переміщення між пасажирами та забезпечення сприятливих умов для природного конвективного руху нагрітого повітря запропоновано змінити напрямки потоків повітря в салоні літака на протилежні – знизу вгору (рис. 6). Циркуляція повітря знизу вгору дозволить уникнути ефекту завихрення, зіткнення повітряних потоків та забезпечить якісне виведення з салону аерозолі, в якому можуть міститися МО.

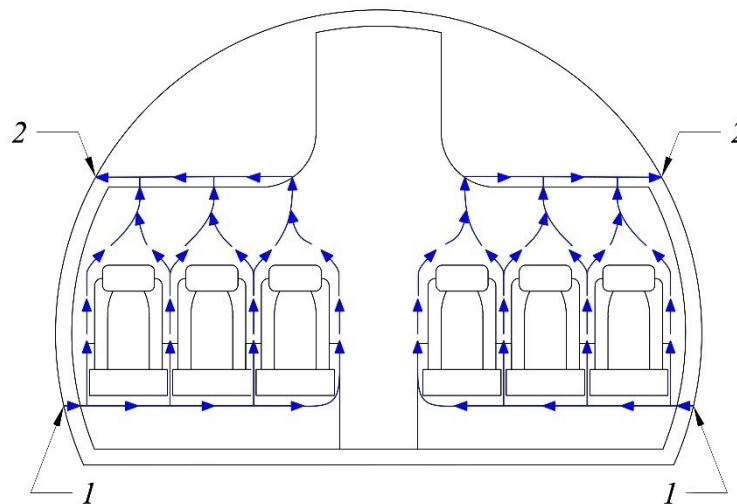


Рис. 6. Схема удосконаленої вертикальної подачі повітря на *Airbus–320* та *Boeing–737* (вузькофюзеляжні літаки): 1 – місця подачі повітря в салон; 2 – місце відбору повітря із салону

У запропонованій удосконаленій схемі циркуляції подача повітря відбувається із повітропроводів, розташованих під кріслами сидінь. Повітря в салон потрапляє між сидіннями через відповідні елементи, розміщені з обох боків сидіння кожного пасажира. Така схема повітряних потоків забезпечить аерацію для кожного пасажира окремо. Запропонована прямотечійна схема дає змогу уникнути перешкод при циркуляції повітря на борту літака, завдяки чому відбувається вільне виведення забрудненого рециркуляційного повітря за межі салону літака у верхній частині літака (див. рис. 6, поз. 2).

ВИСНОВКИ

Провівши ретельний аналіз стану біобезпеки пасажирських перевезень сучасними літаками, можна дійти висновку, що її рівень незадовільний. Саме завдяки авіаційному транспорту відбулося стрімке поширення коронавірусної інфекції, що спричинило світову пандемію.

Проаналізовано наукові публікації, встановлено зв'язок між авіаперевезеннями та розповсюдженням мікроорганізмів, які спричинили захворювання людей.

Відповідно до вимог класифікації рівнів біобезпеки пасажирські авіаперевезення запропоновано віднести до третього рівня біобезпеки.

Визначено способи поширення патогенних МО на борту літака. Інфікування пасажирів здійснюється через контакти з поверхнями, через їжу, контакт між пасажирами та повітряно-крапельним шляхом. Встановлено, що поширення МО здебільшого відбувається повітряно-крапельним механізмом, оскільки існуюча система кондиціонування повітря в салоні літака нездатна забезпечити належний рівень біобезпеки пасажирів.

До найрозповсюдженіших МО, що поширюються повітряно-крапельним шляхом, належать: *COVID-19*, вірус грипу А, палочка Коха, *Corynebacterium diphtheriae*, *Neisseria meningitidis*, *Ebolavirus*, *Varicella-zostervirus*.

Проаналізовано рух повітря в салоні середньофюзеляжних та широкофюзеляжних літаків. Рух повітря в салоні літака «зверху донизу» та додаткові перешкоди забезпечують турбулізацію та утворення хаотичних вихрів, які сприяють поширенню МО серед пасажирів.

Запропонована та обґрунтована зміна повітряних потоків в салоні літака із низхідного на висхідний забезпечить прямотечійність конвекційного потоку від тіла людини та повітряного потоку, що підводиться до пасажира системою кондиціонування повітря. Подана схема повітряних потоків унеможливить їх турбулізацію та створить сприятливі умови для швидкого винесення часток за межі салону.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Behaviors, movements, and transmission of droplet-mediated respiratory diseases during transcontinental airline flights [Електронний ресурс] // National Library of Medicine. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29555754/>.

2. Cabin Air Quality [Електронний ресурс] // IATA. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.iata.org/en/youandiata/travelers/health/cabin-air/>

3. Авіаційний транспорт [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:

https://vue.gov.ua/Авіаційний_транспорт#.D0.9C.D1.96.D1.81.D1.86D0.B5_.D0.B0.D0.B2.D1.96.D0.B0.D1.86.D1.96.D0.B9.D0.BD.D0.BE.D0.B3.D0.BE_.D1.82.D1.80.D0.B0.D0.BD.D1.81.D0.BF.D0.BE.D1.80.D1.82.D1.83_.D0.B2_.D1.81.D0.B2.D1.96.D1.82.D0.BE.D0.B2.D1.96.D0.B9_.D1.82.D1.80.D0.B0.D0.BD.D1.81.D0.BF.D0.BE.D1.80.D1.82.D0.BD.D1.96.D0.B9_.D1.81.D0.B8.D1.81.D1.82.D0.B5.D0.BC.D1.9

4. Методичні рекомендації до дисципліни «Віруси і біобезпека» кафедри вірусології для студентів денної форми навчання ННЦ «Інститут біології та медицини» / Упорядник: О.М. Андрійчук – Київ.: Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2017. – 34 с.

5. Andrew T. Pavia. Germs on a Plane: Aircraft, International Travel, and the Global Spread of Disease [Електронний ресурс] / Andrew T. Pavia // The Journal of Infectious Diseases. – 2007. – Режим доступу до ресурсу: <https://academic.oup.com/jid/article/195/5/621/841980>.

6. Взаємодія мікроорганізмів з навколишнім середовищем. Мікробіота ротової порожнини людини : навч. посібник з мікробіології для студентів-стоматологів II-III курсу мед ф-ту / О. В. Войтович [та ін.]. – Запоріжжя : [ЗДМУ], 2015. – 86 с.

7. Гудзь С. П. Вірусологія / С. П. Гудзь, Т. Б. Перетятко – Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2018. – 536 с.

8. Проектирование Авиационных систем кондиционирования воздуха / Н. В. Антонова, Е. Е. Егоров, Ю. М. Петров, Л. Д. Дубровин– Москва: Машиностроение, 2006. – 384 с.

9. Воронин Г. И. Конструирование машин и агрегатов систем кондиционирования / Г. И. Воронин. – Москва: Машиностроение, 1978. – 543 с.

10. Климанов И. А. Механизмы формирования конденсата выдыхаемого воздуха и маркеры оксидативного стресса при патологиях респираторного тракта [Електронний ресурс] / И. А. Климанов, С. К. Соодаева–

2009. – Режим доступу до ресурсу:
<https://journal.pulmonology.ru/pulm/article/viewFile/1539/1162>.

11. Фізіологія дихальної системи. Зовнішнє дихання. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
http://www.medcollege.te.ua/sayt1/Lecturs/Lekcia%20n_fiziologia/Lekcia%20n_fiziologia_UKR/Fiziologia%20dih.htm.

ANALYSIS OF BIOSAFETY OF PASSENGERS TRANSPORTATION BY AIR TRANSPORT

D. O. DEKAR, V. V. HORUPA

National Aviations University, Kyiv

The problem of spread of pathogenic microorganisms on board of passenger plane is considered. It is proved that the air conditioning system of the aircraft and the organization of air flows in the cabin are the main factors in the infection of passengers during the flight. Recommendations for changing the direction of airflow to prevent infection of passengers during the flight are presented and substantiated.

Key words: *airborne transmission, air conditioning system, aircraft, air passengers transportation, biosafety, infection, pathogenic microorganisms*

АНАЛИЗ БИОБЕЗОПАСНОСТИ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК АВИАЦИОННЫМ ТРАНСПОРТОМ

Д. О. ДЕКАР, В. В. ГОРУПА

Национальный авиационный университет, г. Киев

Рассмотрена проблема распространения патогенных микроорганизмов на борту пассажирского самолета. Доказано, что система кондиционирования

воздуха воздушного судна и организация воздушных потоков в салоне являются основными факторами инфицирования пассажиров во время перелета. Обоснованы рекомендации изменения направления движения воздушных потоков для предотвращения инфицирования пассажиров во время перелета.

Ключевые слова: *авиационные пассажирские перевозки, биобезопасность, воздушное судно, инфицирование, патогенные микроорганизмы, система кондиционирования воздуха*