



УДК 656.029:614.4

## IMPACT OF PUBLIC TRANSPORTATION SYSTEMS ON THE EPIDEMIC THREAT SPREADING: RESEARCH REVIEW AND ANALYSIS

### АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ ТРАНСПОРТНОЇ СКЛАДОВОЇ НА РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЕПІДЕМІЧНОЇ ЗАГРОЗИ

Raida I.M. / Райда І.М.

Senior Lecturer / ст. викладач

ORCID: 0000-0003-3925-4692

National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Zhukovskogo, 64, 69063

Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Жуковського, 64, 69063

**Анотація.** В роботі зроблена спроба виконати аналіз сучасних досліджень розповсюдження епідемічної загрози в системах громадського транспорту. Розглянуті ризики поширення епідемії через транспортні системи. Проаналізовані запропоновані дослідниками шляхи моделювання розповсюдження інфекції в транспортних системах. Оглянуті методи боротьби з розповсюдженням хвороби та можливість їх реалізації на транспорті. Проаналізовано сучасні підходи щодо управління транспортом під час епідемічних небезпек.

**Ключові слова:** епідемія, громадський транспорт, ризик захворювання, пересування пасажирів, моделювання, заходи зменшення потенційних ризиків захворювання

#### Вступ.

У 2019 році людство зустрілося із новою хворобою – COVID-19, яка за рік набула епідемічних масштабів. Вже в березні 2020 Всесвітня організація охорони здоров'я визнала епідемію коронавірусу пандемією. Станом на липень 2023 року в світі захворіли на COVID-19 більше 690 мільйонів чоловік, з яких майже 7 мільйонів померли [1]. Україна також зіткнулася із цією хворобою – майже 5 мільйонів захворілих та більше 100 тисяч померлих [2]. COVID-19 став найпотужнішою пандемією за останні 100 років.

Весь цей час людство боролось із розповсюдженням цієї хвороби та її наслідками, використовуючи різноманітні заходи, які до цього не застосовувались. Не стали виключенням і пасажирські перевезення. Пересування пасажирів громадським транспортом почало розглядатися як можливий шлях розповсюдження хвороби. Відповідно, багато країн висунули особливі вимоги та обмеження щодо функціонування громадського транспорту під час пандемії.

Наукова спільнота долучилася до досліджень ролі транспорту в розповсюдженні хвороби, щоб відповісти на цілу низку питань, які стосуються безпечної експлуатації транспорту під час епідемічних спалахів. Ця робота є спробою проаналізувати різні напрямки таких досліджень, їх результати та визначити спектр подальших наукових дослідницьких робіт з метою зниження рівня небезпеки експлуатації громадського транспорту. З багатьох наукових робіт на цю тематику окремо виділено десять, які, на думку автора статті, добре відображають сучасний стан зазначених вище напрямків досліджень (таблиця 1).



**Таблиця 1 – Наукові роботи з досліджень впливу транспортної складової на розповсюдження епідемічної загрози\***

№	Рік видання	Місце дослідження	Вид транспорту	Джерело даних про пересування пасажирів	Використані моделі	Запропоновані заходи зменшення потенційних ризиків
3	2011	Великобританія	автобус, трамвай	анкетування	множинне регресійне моделювання	-
4	2021	Сінгапур	автобус	смарт-карти пасажирів	динамічна контактна мережа пасажирів, нестандартна модель SEIR	використання засобів індивідуального захисту, зменшення кількості поїздок, закриття окремих маршрутів, обмеження місткості ТЗ, ізоляція критичних пасажирів
5	2020	США	громадський транспорт	перепис населення США 2010, дослідження транспорту Нью-Йорка	Trans-SEIR	використання засобів індивідуального захисту, скринінг пасажирів
6	2020	Китай	метрополітен	смарт-карти пасажирів	контактна мережа пасажирів, модель SIR	цільова імунізація, вакцинація, карантин, контроль над наповненням станцій пасажирами
7	2017	США	автобус	моделювання	мережа поїздок транспортних засобів	-
8	2021	Південна Корея	громадський транспорт	смарт-карти пасажирів	змінна в часі зважена мережа зустрічей, модель SEIR	використання засобів індивідуального захисту, соціальне дистанціювання
9	2022	США	метрополітен	моделювання	модель SEIR	-
10	2021	США	автобус	система автоматичного підрахунку кількості пасажирів	контактна мережа пасажирів	зменшення місткості транспортного засобу
11	2018	США	громадський транспорт	дані про використання населенням громадського транспорту	удосконалена модель SEIR	зменшення довжини поїздок, збільшення плати за проїзд
12	2021	Китай	метрополітен	моделювання	удосконалена модель SEIR	використання засобів індивідуального захисту, методи пасивного та активного контролю

\* - порядкові номери таблиці 1 відповідають порядковим номерам джерел у списку літератури

*Авторська розробка*



### Основний текст

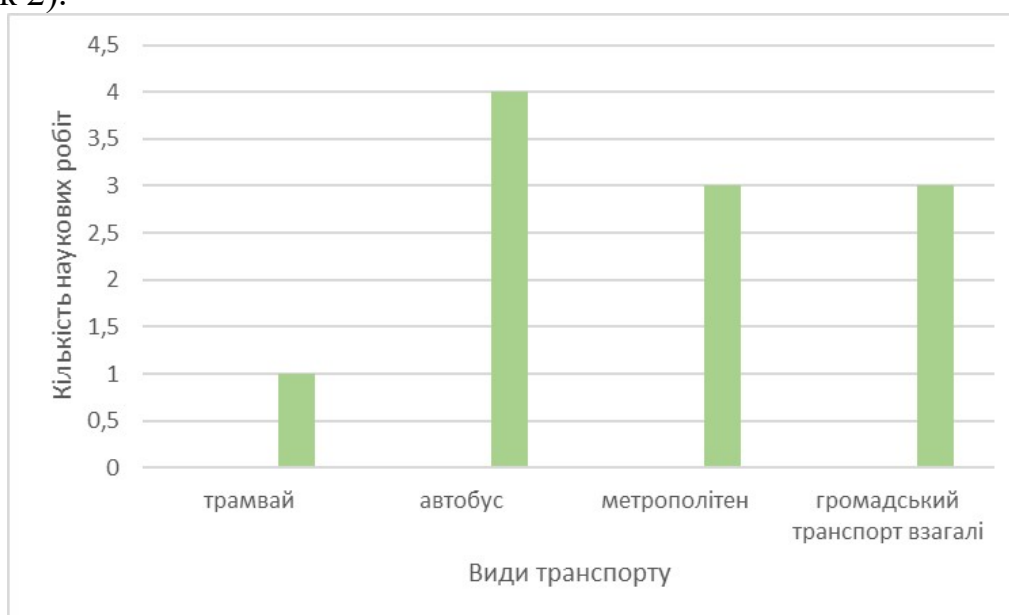
Географія проведення досліджень є доволі широкою й охоплює Північну Америку, Європу та країни Азії (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Географія проведення досліджень**

*Авторська розробка*

Розглянуті дослідження охоплюють різні види громадського транспорту (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Види транспорту, які досліджувалися в наукових роботах**

*Авторська розробка*

COVID-19 передається різними способами. Простішим й, мабуть, найнебезпечнішим є контакт між хворою та здоровою людиною при перебуванні в безпосередній близькості одна від одної повітряно-крапельним шляхом, тобто так, як передаються різноманітні гострі респіраторні вірусні інфекції. В цьому сенсі транспорт є місцем, де таких контактів доволі багато, а, відповідно, це може бути небезпечним.



Ще у 2011 році в роботі [3] автори виявили значущий зв'язок між користуванням автобусом чи трамваєм за п'ять днів до появи перших симптомів захворювання та саме виникненням гострого респіраторного захворювання. Автори відмічали, що найбільші ризики виникають при випадковому використанні громадського транспорту й можуть бути різними для різних захворювань.

Роль систем громадського транспорту для нормального функціонування великих міст складно переоцінити. Чим більшим є місто, тим більшими є потреби в мобільності його мешканців, які й задовольняє система громадського транспорту.

В роботі [4] зазначається, що ефективний транспорт відіграє ключову роль у підтримці економіки міста під час епідемічних спалахів.

Однак систему громадського транспорту в частині, де її безпосередньо використовують пасажирів, складають окремі закриті осередки (транспортні засоби, вокзали, станції метрополітену тощо). Характерною особливістю цих місць є можлива потенційно висока щільність пасажирів, а відповідно доволі невеликі відстані між ними. Саме цей фактор та тривалість знаходження пасажирів в системі громадського транспорту зумовлюють сприйняття цієї системи, як каталізатору при розповсюдженні епідемічної загрози.

Міська транспортна система має вплив на фундаментальну динаміку інфекційних захворювань, може змінювати кількість вторинних інфекцій, сприяти розповсюдженню захворювання містом [5]. Громадський транспорт стає важливим каталізатором пандемії грипу та потенційно може прискорювати темпи поширення інфекційних захворювань [6].

Автобусна система може відігравати вирішальну роль в поширенні високоінфекційних захворювань [4]. Закритий і відносно багатолюдний простір в автобусах є ідеальним для поширення хвороби, а загальна кількість пасажирів, які їдуть в автобусі, пропорційна ймовірності зараження [7].

В роботі [8] громадський транспорт називають критичним фактором зараження.

Однак не всі науковці так критичні в оцінці громадського транспорту як основного каталізатору розповсюдження захворювань. В роботі [5] стверджується, що пряма передача інфекції під час поїздок у системах громадського транспорту може не бути основним джерелом розповсюдження. Автори роботи вказують, що в залежності від структури транспортної мережі, частка прямого зараження в транспорті становить не більше 17,6 % від загальної кількості захворювань. Це свідчить про те, що роль, яку відіграє система міського транспорту під час спалахів інфекційних захворювань, не є однозначною й потребує подальших досліджень.

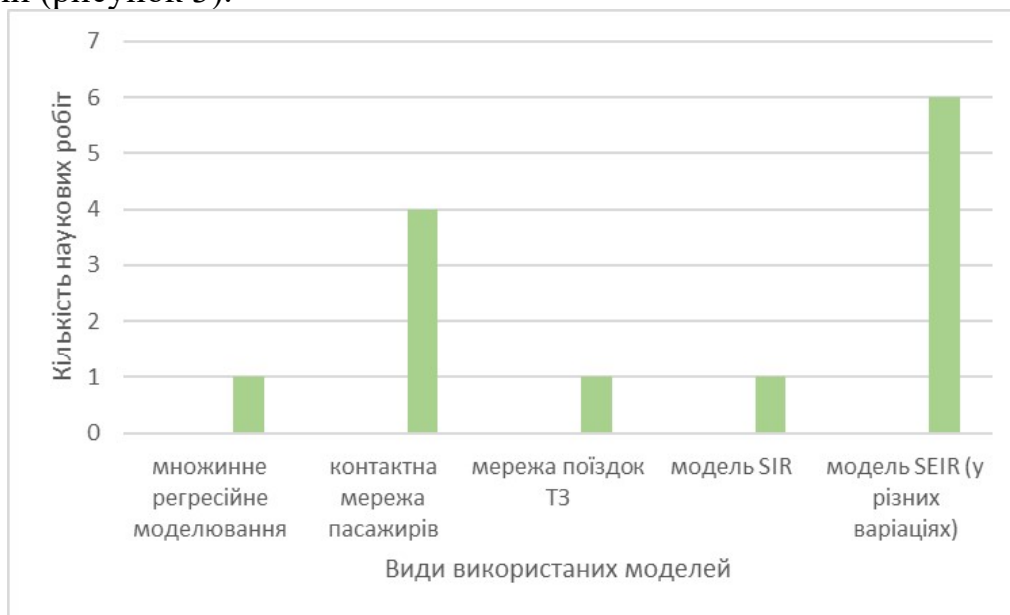
Враховуючи вище сказане, перед організаторами транспортного обслуговування постає серйозне питання: як оптимально управляти транспортом, забезпечуючи водночас мобільність населення та ефективно стримування поширення хвороби під час епідемії.

В роботі [9] зазначається, що ефективне управління громадським транспортом під час пандемії стає, навіть, критично важливим політичним



рішенням.

Для управління транспортною системою чи окремими її складовими й попередження розповсюдження інфекційної загрози через елементи транспортної системи потрібно мати уявлення про механізми цього розповсюдження. Тому багато науковців приділяють увагу саме цьому аспекту, вивчаючи різні складові процесу передачі захворювання в системах міського транспорту. Для цього активно використовується моделювання. Дослідники пропонують нові власні моделі, удосконалюють вже існуючі чи використовують відомі моделі для певних конкретних осередків транспортної системи. Пропонується умовний розподіл досліджень за використаними моделями (рисунок 3).



**Рисунок 3 – Розподіл досліджень за використаними моделями**

*Авторська розробка*

В основі практично всіх досліджень цього напрямку є ідея поєднання моделей розповсюдження інфекційних захворювань з моделями транспортної рухливості мешканців певної території чи користувачів певної транспортної системи.

Сучасні моделі транспортної рухливості враховують динаміку цього процесу. Ще у 2017 році в роботі [7] була запропонована нова мережева структура, яка здатна фіксувати динаміку пасажирських подорожей і яку можна використовувати для ефективної ідентифікації компонентів системи громадського транспорту з найвищим ризиком, тобто для виділення конкретних поїздок, які мають найбільшу ймовірність подальшого поширення хвороби.

В дослідженнях враховувався характер руху для певних територій. Так в роботі [5] фіксувалася динаміка мобільності населення під час подорожей за рахунок поділу певної території на зони й класифікацію населення на мешканців та відвідувачів по відношенню до цих зон.

Але найбільшого розвитку набуває побудова контактних мереж пасажирів громадського транспорту. Саме вони добре пристосовуються для подальшого аналізу процесу проникнення хвороби серед окремих мандрівників. Останні



досягнення в теоріях складних мереж і моделюванні епідемії встановили разючий зв'язок між структурою мережі та динамікою захворювання і поширення епідемії.

В роботі [8] автори розглядали змінну в часі зважену мережу зустрічей у громадському транспорті й на її базі моделювали інфекційний процес поширення COVID-19. Для отримання даних про поїздки використовувалися дані смарт-карт пасажирів міста Сеул, виділялися ланцюжки поїздок та виконувався загальний розподіл трафіку з використанням агентських моделей. Контакти з іншими користувачами громадського транспорту були проаналізовані під час імітації фактичних пересувань інфікованих людей у мережі громадського транспорту.

Такий же метод отримання інформації (дані смарт-карт) використовувався й в роботі [4]. Тут модель також дозволяла фіксувати змінні в часі контакти пасажирів на індивідуальному рівні. Автори стверджують, що реальні контактні мережі за своєю суттю динамічні. Зв'язки з'являються, зникають, і змінюються із часом, і їх краще представляти в рамках тимчасової або змінної в часі мережі. Тому моделювання епідемічного процесу на громадському транспорті має базуватися саме на мережі контактів, що змінюється в часі.

В роботі [10] мережа контактів пасажирів розглядалася в рамках транзитного автобусного маршруту. За її допомогою оцінювалися потенційні ризики посадки на зупинках маршруту. Також вона може використовуватись для моделювання ефекту окремих обмежувальних заходів (максимальна кількість пасажирів в автобусі, тощо).

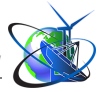
Автори роботи [7] створювали мережу контактів, використовуючи дані моделі попиту на подорожі на основі діяльності пасажирів. На створеній мережі моделювався один чи декілька спалахів епідемії. Для цього використовується стохастична імітаційна агентська модель для моделювання поширення інфекції між особами.

Дослідники в роботі [6] стверджують, що контактні мережі потрібно розглядати як функції мобільності людини, тобто сама мобільність людини формує контактні мережі під час подорожей і це має подальший вплив на розповсюдження захворювання серед окремих пасажирів.

Для моделювання поширення інфекційних захворювань використовуються здебільшого дискретні компартментні моделі, тобто моделі з поділом всіх людей на певні групи, які відображають стан окремої людини стосовно певного захворювання. Динаміку руху окремих одиниць між групами описують нелінійними диференціальними рівняннями.

Можливо найпростішою такою моделлю є SIR, яка поділяє всіх людей на три групи (компартменти): сприятливі, інфіковані, видалені. Саме така модель використовувалася в дослідженні [7].

Розвитком моделі SIR є компартментна модель SEIR, яка виконує поділ вже на чотири групи: сприятливі, заражені, інфекційні, видалені. Ця модель є найрозповсюдженішою й широко використовувалася для моделювання грипоподібних та інших респіраторних захворювань. Так у 2018 році в роботі [11] саме ця модель застосовувалася для відтворення процесу передачі хвороби



в замкнутому просторі (коридорі), яким рухається, наприклад, потік пасажирів метрополітену. Результати цієї роботи показали залежність швидкості передачі інфекції від щільності натовпу.

Автори роботи [5] запропонували удосконалену модель Trans-SEIR, яка пристосована для моделювання зараження у подорожі. Ця модель відокремлює зараження під час подорожей від інших (наприклад, заражень на місці роботи). Фактично модель SEIR накладається на модель мобільності, щоб відобразити просторову неоднорідність динаміки захворювання.

Компартментні моделі в силу своїх особливостей використовують певні припущення. Представники груп в них є однорідними з однаковою поведінкою. Якщо потрібно врахувати індивідуальні показники мобільності населення, в пригоді стануть так звані мережеві моделі, які можуть реалізовувати як виключно індивідуальний підхід до оцінювання окремої досліджуваної одиниці (наприклад, пасажира) так і підхід на основі певного признаку одиниць. В роботі [4] запропоновано модель поширення епідемії на основі системи громадського транспорту, де фіксуються змінні в часі контакти між пасажирами на індивідуальному рівні.

Для запобігання розповсюдження хвороби, в тому числі й у транспорті, загально відомими є кілька дієвих заходів, а саме: дотримання максимально можливої безпечної відстані від інших пасажирів; носіння захисної маски на обличчі; здійснення подорожей в непіковий час та уникання скупчення людей. Ці заходи (окрім носіння засобів індивідуального захисту) в транспортних системах реалізувати доволі складно. Але прагнути до цього потрібно. Результати роботи [8] стверджують, що обов'язкове носіння масок в години пік знижує рівень зараження на 93,5 %. Якщо при цьому ще й дотримуватись соціальної дистанції, то це значення сягає 98,1 %. Носіння маски співставне із дотриманням 2-метрової соціальної дистанції для запобігання COVID-19.

Ще одним дуже потужним заходом може стати вхідний контроль пасажирів до транспортної системи. В роботі [5] надані докази ефективності вимірювання температури пасажирів перед потраплянням до транспортної мережі. Однак такі заходи доволі складно реалізувати на практиці.

Дуже важливим є захід з уникнення скупчення людей. Чим менше можливих потенційних контактів між пасажирами, тим меншим є загальний ризик захворювання під час таких контактів. В цьому сенсі може йти мова про використання для перевезень менших за місткістю транспортних засобів з метою зменшення кількості потенційних контактів пасажирів. В роботі [5] дійшли висновків, що при впровадженні «режиму низької місткості» ймовірність зараження є значно нижчою у порівнянні із «режимами середньої або великої місткості».

В роботі [8] стверджується, що тривалість контакту інфікованих осіб тісно пов'язана з рівнем завантаження громадського транспорту.

Ці фактори призводять до появи ряду політик управління транспортом під час епідемічних спалахів. Однією з типових стратегій боротьби з епідемією є зниження кількості поїздок на певній території (місті, районі, тощо). В роботі [4] показана лінійна залежність скорочення поїздок та поширення епідемічної



загрози. Коли всі поїздки скорочуються більше ніж на 80 %, зниження ризику захворювання починає прискорюватися. Коли всі поїздки зменшуються на 98 %, поширення хвороби фактично припиняється. Це означає, що контроль подорожей може бути ефективним лише на екстремальному рівні [4].

В роботі [9] розглядається можливість виділення частки населення, якій дозволено користуватися певним маршрутом громадського транспорту. Зазначається, що такий підхід призводить до зниження ризиків розповсюдження епідемії при підтримці мобільності частки населення. Реалізація заходу можлива через зменшення частоти обслуговування на маршруті або обмеження пропускної здатності зупиночних пунктів [9].

Ще одним дієвим заходом щодо зменшення потенційних ризиків захворювання є закриття окремих маршрутів. В роботі [4] вивчали мережу автобусних маршрутів в умовах закриття від 10 до 90 % маршрутів за різними принципами їх вибору. Так, в разі закриття спочатку автобусних маршрутів із високим попитом спостерігається більший вплив на розповсюдження інфекції – закриття 40 % найбільш затребуваних автобусних маршрутів зменшує очікуване розповсюдження інфекції на 15,3 %. Закриття спочатку маршрутів з меншим попитом чи взагалі закриття маршрутів випадково не є таким ефективним [4].

Однак закриття маршрутів транспорту пов'язано із зростанням незручностей для пасажирів, наприклад, із ускладненням потрапляння до лікарень, що під час епідемії є вкрай небажаним.

Альтернативою закриттю маршрутів розглядають обмеження максимального навантаження пасажирів на окремих транспортних засобах з метою зменшення кількості контактів між пасажирами. В роботі [4] доведено, що ефект від такого обмеження стає значущим за умови обмеження 50 % максимального навантаження та більше й зростає, зрозуміло, з підвищенням цього значення. З однаковим відсотком уражених пасажирів метод обмеження максимального навантаження на окремих транспортних засобах є менш ефективним за метод закриття маршрутів, однак він зберігає певний рівень мобільності населення [4].

Значного зниження відносного ризику розповсюдження захворювання можна досягти, якщо максимальну кількість пасажирів у транспортному засобі обмежити до 15 осіб [10]. При цьому для врахування зменшення пропускної здатності й збереження розумного часу очікування пасажирів на зупинках, пропонується збільшення частоти руху транспорту на маршруті.

Найефективнішим підходом є ізоляція впливових пасажирів на ранній стадії, при якій епідемічний процес можна суттєво знизити за невеликої кількості захворілих [4]. В роботі [12] пропонується створення статичного захисного бар'єрного шару на прикладі міського залізничного транспорту, тобто певної інфраструктури та засобів захисту (прилади для вимірювання температури, бокси для медичного персоналу, обладнання для тестування на станціях метро, тощо).

### **Висновки.**

Підсумовуючи все вище згадане, можна зробити кілька висновків:





- громадський транспорт дійсно є джерелом можливого розповсюдження епідемічної загрози й, при певних умовах, може мати каталізаторний ефект на розповсюдження;
- застосування загальновідомих заходів боротьби із розповсюдженням інфекції (індивідуальні захисні засоби, соціальна дистанція) повинні вимагатися й реалізовуватися в транспортній інфраструктурі;
- методи реалізації заходів боротьби із епідемічною загрозою можуть бути різними, залежать від особливостей окремих територій та транспортних мереж та потребують подальших досліджень з уточненням конкретних параметрів реалізації того чи іншого методу.

#### Література:

1. COVID-19 Coronavirus Pandemic. World statistics and information portal. URL: <https://www.worldometers.info/coronavirus/> (дата звернення 15.06.2023).
2. Коронавірус в Україні. Офіційний інформаційний портал МОЗ України. URL: <https://covid19.gov.ua/> (дата звернення 15.06.2023).
3. J. Troko, P. Myles, J. Gibson, A. Hashim, J. Enstone, S. Kingdon, C. Packham, S. Amin, A. Hayward, J. Van-Tam “Is public transport a risk factor for acute respiratory infection?” in BMC Infectious Diseases 11, article number: 16 (2011). DOI: 10.1186/1471-2334-11-16.
4. B. Mo, K. Feng, Yu Shen, C. Tam, D. Li, Y. Yin, J. Zhao “Modeling epidemic spreading through public transit using time-varying encounter network” in ScienceDirect, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 122, January 2021, 102893. DOI: 10.1016/j.trc.2020.102893.
5. X. Qian, S.V. Ukkusuri “Modeling the spread of infectious disease in urban areas with travel contagion” in Cornell University, arXiv: 2005.04583 (May 2020). DOI: 10.48550/arXiv.2005.04583.
6. X. Qian, L. Sun, S.V. Ukkusuri “Scaling of contact networks for epidemic spreading in urban transit systems” in ResearchGate, February 2020. DOI: 10.1038/s41598-021-83878-7.
7. A. Bota, L.M. Gardner, A. Khani “Identifying Critical Components of a Public Transit System for Outbreak Control” in Networks and Spatial Economics 17, 1137-1159 (2017). DOI: 10.1007/s11067-017-9361-2.
8. D. Ku, C. Yeon, S. Lee, K. Lee, K. Hwang, Y.C. Li, S.C. Wong “Safe traveling in public transport amid COVID-19” in Science Advances, Vol. 7, Issue 43 (Oct 2021). DOI: 10.1126/sciadv.abg3691.
9. Qi Luo, M. Gee, B. Piccoli, D. Work, S. Samaranayake “Managing public transit during a pandemic: The trade-off between safety and mobility” in ScienceDirect, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 138, May 2022, 103592. DOI: 10.1016/j.trc.2022.103592.
10. P. Kumar, A. Khani, E. Lind, J. Levin “Estimation and Mitigation of Epidemic Risk on a Public Transit Route using Automatic Passenger Count Data” in Transportation Research Record, 2021, Vol. 2675(5), 94-106. DOI: 10.1177/0361198120985133.
11. Z. Du, Y. Bai “Detecting the impact of public transit on the transmission of



epidemics” in Cornell University, arXiv: 1801.09333 (Jan 2018). DOI: 10.48550/arXiv.1801.09333.

12. Y. Zhuang, Y. Chen “Risk management of Covid-19 epidemic spread in urban rail transit based on SEIR model” in Sixth International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT 2021), 2021, Chongqing, China. DOI: 10.1117/12.2624679.

**Abstract.** *Public transport systems are one of the factors in the spread of epidemic threats. Moreover, the use of public transport carries the risk of spreading the epidemic due to direct contact of passengers with each other in passenger transport vehicles during trips. That situation requires changes in approaches to transport management during epidemic hazards. The article analyzes the methods proposed by scientists nowadays to prevent the spreading of infectious diseases and the possibility of using these methods regarding public transport systems.*

**Key words:** *epidemic, public transportation, risk of illness, passenger trips, simulation, passenger encounters.*

Стаття надіслана: 16.02.2024 р.

© Райда І.М.