

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-2(36)-251-265

УДК 711.43

Владислав Анатолійович Смілка

¹доктор технічних наук, доцент, професор кафедри теорії архітектури
Київський національний університет будівництва і архітектури (Україна, Київ)

E-mail: smilka.va@knuba.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7025-9398>

ResearcherID: [S-6934-2017](https://orcid.org/0000-0002-7025-9398) SCOPUSID: [57211859251](https://orcid.org/0000-0002-7025-9398)

ЗАСТОСУВАННЯ ТРІАНГУЛЯЦІЇ ДЕЛОНЕ ДЛЯ АНАЛІЗУ ПІШОХІДНОЇ ДОСТУПНОСТІ ДО ЗАКЛАДІВ ОСВІТИ

На основі властивостей тріангуляції Делоне запропоновано методикою оцінювання оптимальності (відповідності нормативним вимогам) планувальних вирішень мережі закладів освіти, розроблено еталонні варіанти взаєморозташування таких закладів. Критерієм оптимальності є максимальне охоплення території обслуговування при мінімальній кількості закладів. З метою оцінювання оптимальності наведених пропозицій запропоновано склад показників мережі освітніх закладів, які враховують охоплення території обслуговування, геометричні параметри взаємного розташування закладів та відповідність еталонній кількості закладів. Вказані показники є базовими для розрахунку загального індикатора пішохідної доступності до освітніх закладів. Апробація розроблених пропозицій проведена для мережі освітніх закладів Солом'янського району м. Києва.

Ключові слова: тріангуляція; мережа освітніх закладів; радіус обслуговування; пішохідна доступність; еталонна відстань між закладами.

Рис.: 7. Табл.: 2. Бібл.: 29.

Актуальність теми дослідження. Розвиток мереж об'єктів обслуговування населення є важливим елементом забезпечення сталого розвитку територій населених пунктів. Доступність до основних об'єктів обслуговування населення є одним з аспектів якості життя населення за тематичною групою показників «Міське планування», що визначається міжнародним стандартом ISO 37120:2018, на основі якого прийнято національний стандарт ДСТУ ISO 37120:2019 «Сталі міста та громади. Показники міських послуг і якості життя». Державними будівельними нормами ДБН Б.2.2-12:2019 «Планування і забудова територій» встановлюються вимоги до максимально допустимих радіусів обслуговування для кожного типу об'єкта обслуговування населення. Є суттєві відмінності між вимогами до доступності певних об'єктів обслуговування в ДСТУ ISO 37120:2019 та ДБН Б.2.2-12:2019, зокрема для закладів загальної освіти. У ДСТУ ISO 37120:2019 встановлено, що доступність до початкової школи має становити 300 м, а середньої школи – 500 м, ДБН Б.2.2-12:2019 визначає максимальні радіуси обслуговування населення для початкової та середньої школи – 800 м. Ці відмінності впливають на рівень оцінки якості життя та обслуговування населення.

Постановка проблеми. Виникає проблема аналізу доступності до об'єктів обслуговування населення з врахуванням різних вихідних параметрів, зокрема місця розташування об'єктів обслуговування та показників доступності до цих об'єктів. На підставі результатів аналізу відповідності вихідним параметрам доступності до об'єктів можуть бути розроблені конкретні пропозиції щодо вдосконалення, розвитку мережі об'єктів обслуговування населення, а саме перепрофілювання об'єктів, визначення місця будівництва (влаштування) нових об'єктів обслуговування для найбільш повного охоплення зоною обслуговування території населеного пункту.

Тематичну мережу будь-яких об'єктів обслуговування населення можна представити у вигляді множини точок (де одна точка відповідає одному об'єкту) на плані населеного пункту, або його окремої частини території, тому для аналізу доступності до об'єктів обслуговування населення доцільно використати властивості тріангуляції.

У цьому дослідженні «доступність до об'єктів обслуговування населення» розуміємо як відстань (евклідову відстань) від житлового будинку до об'єкта, який забезпечує надання послуг населенню.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тріангуляція є мережею найпростіших фігур-трикутників у просторі, яка формується з множини точок. Вона застосовується в багатьох прикладних сферах діяльності, зокрема геодезії, геоінформаційних системах, архітектурі, комп'ютерному моделюванні тощо.

Тріангуляція Делоне (метод побудови мережі трикутників) та діаграма Тіссена-Вороного (метод визначення зон близькості) як об'єкт дослідження активно вивчається науковцями та впроваджується в галузі просторового аналізу та моделювання [1, 2, 3], комп'ютерної геометрії [4; 5] та інших науках.

У роботах [6; 7] розглянуто прикладні питання використання тріангуляції Делоне та діаграм Тіссена-Вороного для аналізу території населеного пункту за тематикою пожежної безпеки. Публікації [8; 9; 10; 11] містять теоретичні та практичні положення використання тріангуляції для збереження біоресурсів та корисних копалин.

Розробленню підходів з оцінювання якості середовища населених пунктів присвячені роботи [12; 13; 14]. У статтях [15; 16; 17] розглянуто містобудівні фактори формування різних мереж закладів обслуговування населення в житловій забудові, натомість питання оцінювання доступності до об'єктів обслуговування населення не розглядались. Питання доступності до об'єктів обслуговування населення, зупинок громадського транспорту, місць прикладання праці та відпочинку розглядались у працях [18; 19; 20], у яких досліджувались проблеми компактності забудови населених пунктів та забезпечення сталого розвитку територій, що передбачає можливість пішохідної доступності до основних об'єктів обслуговування населення та мінімізацію транспортних переміщень.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Вищенаведені напрями досліджень охоплюють окремі аспекти вивчення проблеми формування та розвитку мереж об'єктів обслуговування населення. Інтеграція різнопланових підходів комплексного аналізу та оцінювання відповідності містобудівним вимогам мереж закладів громадського обслуговування населених пунктів забезпечує вдосконалення методів містобудівного моніторингу та інформаційної підтримки ухвалення управлінських рішень щодо сталого розвитку територій населених пунктів.

Метою дослідження є аналіз пішохідної доступності до комунальних закладів початкової освіти Солом'янського району міста Києва, визначення рівня фактичної відповідності забезпечення закладами середньої освіти території району нормативним вимогам, встановленим державними будівельними нормами ДБН Б.2.2-12:2019 та ДСТУ ISO 37120:2019, напрацювання пропозицій щодо вдосконалення, розвитку закладів освіти в Солом'янському районі міста Києва, напрацювання показників та індикаторів оцінювання відповідності мережі об'єктів обслуговування населення встановленим містобудівним вимогам. Підходи оцінювання мережі освітніх закладів можуть бути використані для оцінювання мереж інших видів об'єктів обслуговування населення.

Виклад основного матеріалу. Відповідно до даних Головного управління статистики у місті Києві [21], починаючи з 2010 року встановилась тенденція зростання кількості учнів у закладах загальної середньої освіти, цей показник щорічно зростає на 1-5 %. З 2010 року до 2022 року кількість учнів зросла з 224,8 тис. осіб до 338,6 тис. осіб, що становить понад 50 % зростання. Однак у навчальному році 2022-2023 показник очного відвідування закладів середньої освіти у порівнянні з попереднім навчальним роком знизився на 30 %, що пояснюється збройною агресією російської федерації проти України. Таким чином, при зростанні загальної кількості учнів закладів загальної середньої освіти суттєво зменшилась кількість учнів, які очно відвідують денні навчальні заклади.

Очікуючи нормалізації безпекової ситуації в Україні, необхідно моніторити рівень доступності до об'єктів обслуговування населення, розвивати мережі об'єктів обслуговування населення, зокрема закладів загальної середньої освіти, оскільки, як згадувалось, показники доступності до закладів освіти в Україні та відповідні показники у міжнародних нормах суттєво відрізняються.

Площа Солом'янського району міста Києва становить близько 5% від площі міста Києва, однак він є репрезентативним містобудівним формуванням, оскільки знаходиться в трьох планувальних зонах міста Києва – Центральній, Західній та Південній. В Солом'янському районі міста Києва налічується 33 комунальних середніх заклади освіти, які забезпечують навчання на I рівні освіти – початковій школі. З метою врегулювання проблеми наповнюваності закладів освіти в місті Києві районні державні адміністрації щорічно видають розпорядження про закріплення території обслуговування для кожного освітнього закладу, де вказують адресний перелік житлових будинків, які обслуговуються конкретним закладом освіти. У цій статті досліджується мережа освітніх закладів з 33 комунальних шкіл I рівня, для яких визначені зони обслуговування відповідно до розпорядження Солом'янської районної в місті Києві державної адміністрації від 03.04.2024 № 218 [22].

Аналіз відстаней від шкіл до житлових будинків (рис. 1), які закріплені за кожною школою відповідно до розпорядження Солом'янської районної у місті Києві державної адміністрації засвідчує, що максимальна відстань до окремих житлових будинків перевищує нормативно встановлений радіус обслуговування у 800 м для понад 40% комунальних закладів освіти району. Геоінформаційні системи дозволяють здійснювати просторовий аналіз, зокрема побудову полігонів Тіссена-Вороного. Враховуючи, що залізниця ділить район на дві частини та є штучною перешкодою для обслуговування населення на території, що нею розділяється, буфери та полігони Тіссена-Вороного побудовані для окремих територій, а потім злиті в цілісний полігональний об'єкт (рис. 2). Поділ зон близькості житлових будинків до шкіл за методом Тіссена-Вороного має більш збалансовані результати, оскільки вже для 36 % шкіл наявні максимальні радіуси обслуговування понад 800 м. Результати аналізу відстаней від шкіл до житлових будинків за показниками «максимальна відстань» наведено на рис. 1 та розподілено на групи: 1) максимальна відстань до будинків, закріплених за кожною школою відповідно до розпорядження Солом'янської районної у місті Києві державної адміністрації, 2) максимальна відстань до будинків, за методом побудови зон близькості Тіссена-Вороного. Як видно з рис. 1, жоден із підходів запропонованих моделей поділу території району на зони обслуговування не задовольняє встановленим державними будівельними нормами вимогам. У зв'язку з вищевикладеним необхідно розглядати питання ущільнення закладів загальної освіти в районі.

Солом'янський район міста Києва розташований частково в трьох планувальних районах міста Києва, які визначаються окремими містобудівними показниками та характеристиками. Встановлено, що 11 % територій житлових мікрорайонів не охоплені максимально допустимими радіусами обслуговування від закладів початкової освіти, що також свідчить про необхідність ущільнення мережі загальноосвітніх закладів. Переважна частина територій, які не охоплені максимально допустимими радіусами обслуговування від закладів освіти, є садибною забудовою, яка поступово трансформується в мало- та середньо поверхову житлову забудову, що потребує відповідної інфраструктури та об'єктів обслуговування населення.

Для забезпечення державних будівельних норм в межах району необхідно здійснити ущільнення мережі мінімум трьома освітніми закладами. В результаті вивчення ситуації

щодо забезпечення території району міста Києва освітніми закладами сформовані пропозиції щодо будівництва чотирьох нових освітніх закладів I рівня освіти (рис. 3), таким чином, проєктна кількість освітніх закладів становить 37.

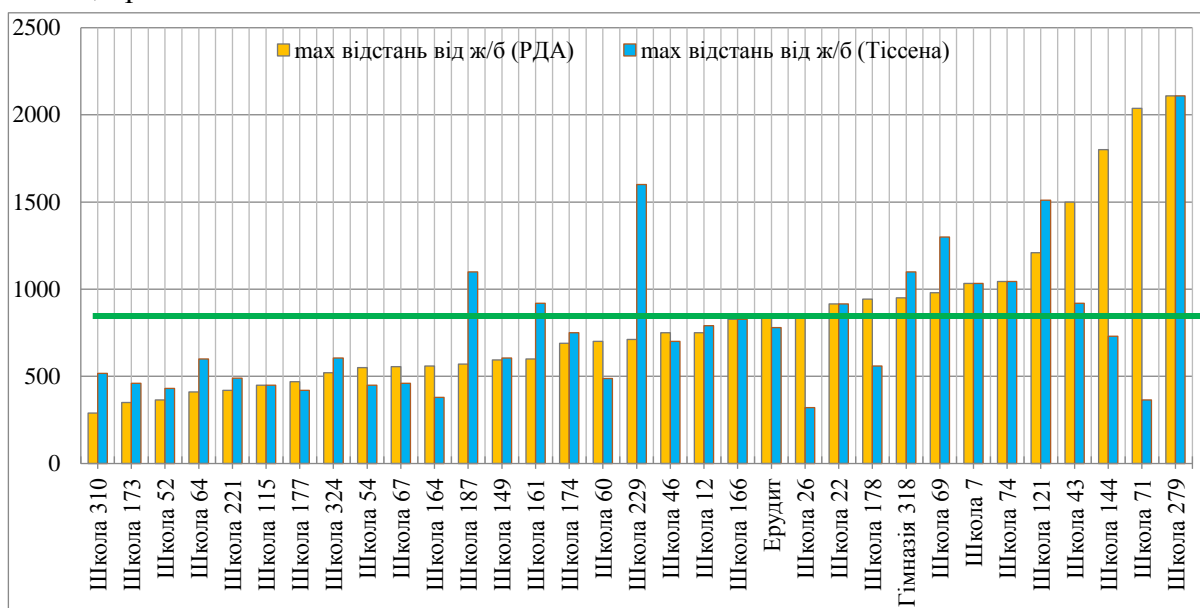


Рис. 1. Аналіз відстаней від шкіл до будинків відповідно до зон обслуговування, встановлених:

1 – райдержадміністрацією; 2 – полігонами близькості Тіссена-Вороного

Джерело: розроблено автором.

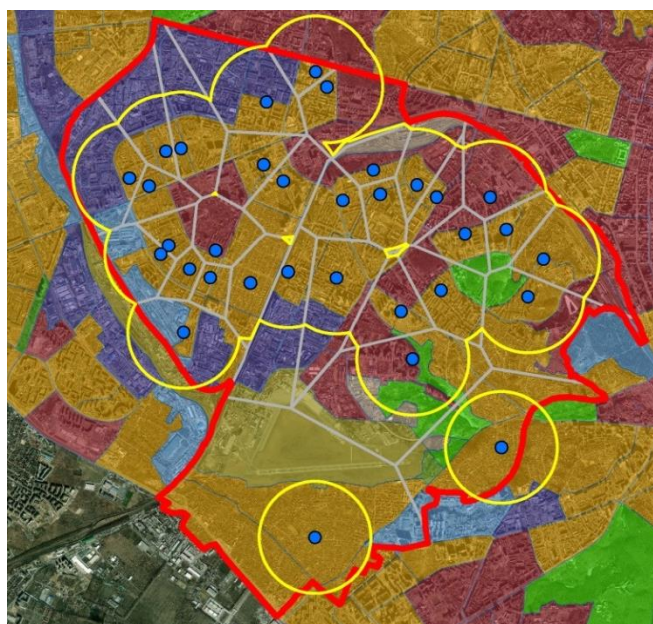


Рис. 2. Мережа закладів освіти Солом'янського району міста Києва в планувальній структурі міста із загальною зоною обслуговування та полігонами Тіссена-Вороного
Джерело: розроблено автором.

Подальші пропозиції щодо оцінювання стійкості мережі освітніх закладів пропонується розробляти, спираючись на методи триангуляції та методи побудови зон близькості Тіссена-Вороного [23; 24]. Оскільки мережу освітніх закладів можна представити у ви-

гляді неопуклої триангуляції Делоне, відстані між закладами характеризуються властивостями трикутників. Поділ Солом'янського району міста Києва на триангуляцію освітніх закладів та зони близькості до них наведений на рис. 3 для існуючого та запропонованого стану. У зв'язку з поділом території району залізницею формуються дві окремі триангуляційні мережі освітніх закладів. Також на структуру триангуляційної мережі впливає розташування аеропорту та промислових районів у межах території, що досліджується.

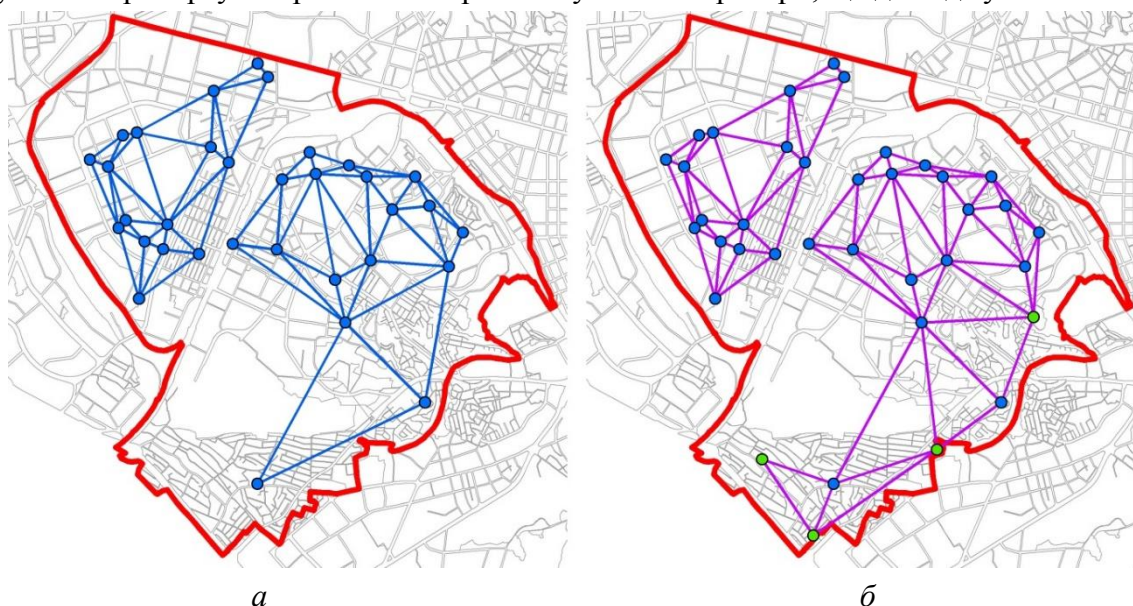


Рис. 3. Триангуляційна мережа освітніх закладів та їх зони близькості:

а – існуюча мережа освітніх закладів;

б – пропозиції з удосконалення мережі освітніх закладів

Джерело: розроблено автором.

Оскільки державними будівельними нормами регламентується максимально допустимий радіус обслуговування, для подальшого планування території та оцінювання мережі громадських установ можна визначити оптимальну відстань між найближчими закладами (установами), назовемо її «еталонна відстань між об'єктами обслуговування». Еталонна відстань між об'єктами обслуговування задовольняє умові формування безрозривної області обслуговування встановленими типами закладів (установ), фактично це є найдовша лінія трикутника. Враховуючи цю умову, оптимальним елементом триангуляції є рівносторонній трикутник, який забезпечує мінімальний перетин зон обслуговування закладів між собою (рис. 4, *а*). Іншим оптимальним елементом триангуляції є рівнобедрений прямокутний трикутник, або похідний від нього прямокутний трикутник (рис. 4, *б*). Таким чином, оптимальний розмір еталонної відстані між закладами освіти становить від $R\sqrt{3}$ до $2R$, де R – це максимальний радіус обслуговування.

Важливим питанням у дослідженні є розроблення критеріїв оцінювання фактичної мережі освітніх закладів, що необхідно для оцінювання пропозицій щодо удосконалення мережі закладів. На безрозривність зон обслуговування вказує еталонна відстань між об'єктами обслуговування, сукупність найдовших ліній кожного з трикутників в неопуклій триангуляції Делоне. Побудова опуклої триангуляції забезпечить формування додаткових елементів, що додатково збільшуватимуть розмірність відстаней між закладами.

Аналіз показників елементів трикутників, що виникають в результаті побудови триангуляції, дає можливість сформулювати характеристику утвореної мережі закладів освіти, а саме цілісність та щільність їх зон обслуговування. Показниками, які характеризують трикутники та загалом триангуляцію, є довжини сторін та кути трикутників. Довжини

сторін трикутників можуть свідчити про наявність розривів між зонами закладів обслуговування населення, а кути характеризують висоту трикутників, яка вказує на ступінь перетину зон обслуговування закладів.

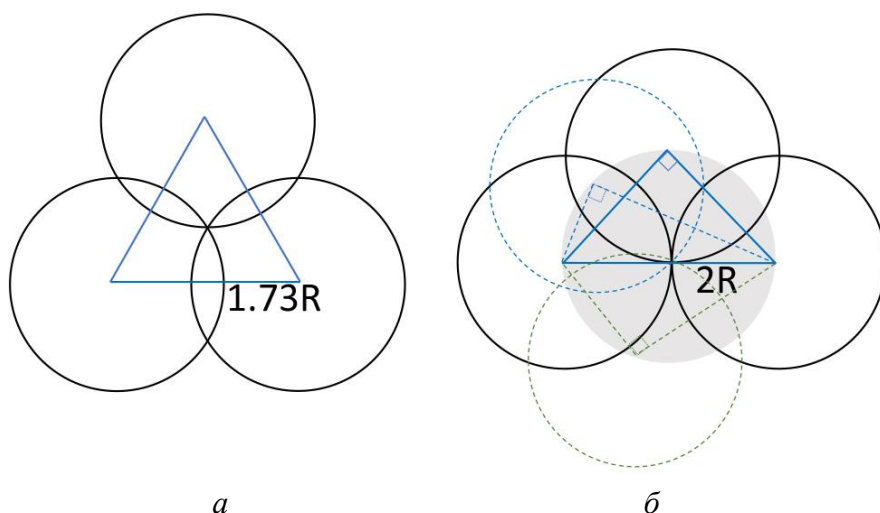


Рис. 4. Оптимальні моделі взаєморозташування об'єктів обслуговування: а – рівносторонній трикутник; б – рівнобедрений прямокутний трикутник та похідний від нього прямокутний трикутник

Джерело: розроблено автором.

Необхідно визначити репрезентативний загальний показник або групу показників, які характеризують довжини сторін трикутника та кути між ними, щоб узагальнено оцінити триангуляційну мережу. Такими загальними показниками мережі освітніх закладів пропонується визначити:

- співвідношення загальної площі території, фактично охопленої максимально допустимим радіусом обслуговування об'єктів, до загальної площі території, яку необхідно забезпечити освітніми закладами – K_p ;

- співвідношення середнього радіусу описаного кола до середнього радіусу вписаного кола трикутників триангуляції – K_k . Описане коло трикутника – це коло, радіус якого за визначенням є рівновіддаленим від кожної з вершин трикутника, а побудова описаних кіл є основою для формування триангуляції Делоне. Вписане коло трикутника є дотичним до всіх сторін трикутника та може характеризувати висоту трикутника. Для рівностороннього трикутника згадане співвідношення дорівнює 2, чим більше величина відношення відрізняється від цього значення, тим пропорційно меншою у порівнянні з еталонною є одна з висот трикутника (рис. 5);

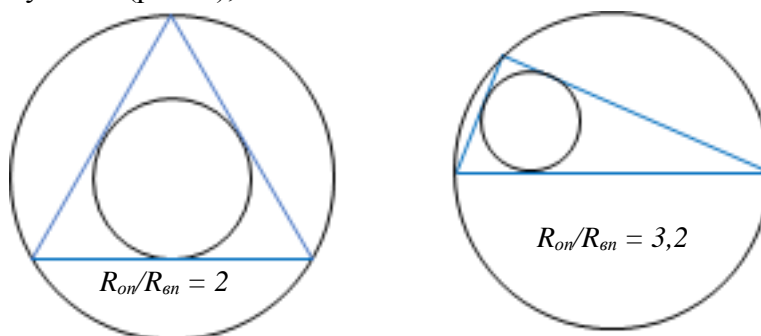


Рис. 5. Залежність між параметрами трикутника та розмірами його вписаного і описаного кіл

Джерело: розроблено автором.

- співвідношення середньої довжини всіх ліній триангуляційної мережі до еталонної відстані між освітніми закладами K_L ;

- співвідношення кількості закладів, які складають мережу освітніх закладів, до мінімально необхідної кількості установ, які можуть задовольнити визначену територію – K_S . Останнє визначається виходячи з того, що на території обслуговування формується модель еталонної триангуляції з рівносторонніх трикутників (при $R = 800$ м та стороні трикутника – 1385,6 м, при $R = 300$ м та стороні трикутника – 519,6 м).

Для доведення репрезентативності цих показників пропонується паралельно вести розрахунок рівня відхилень між еталонними та фактичними довжинами та кутами трикутника. Середня квадратична похибка між еталонними параметрами трикутника та фактичними розмірами для кожного з трикутників вказуватиме на рівень відхилень фактичної конфігурації мережі освітніх закладів від її еталонної конфігурації.

Можна визначити три еталонних форми трикутника:

1) рівносторонній трикутник зі сторонами $R\sqrt{3}$ та відповідно рівними кутами 60° ; радіус описаного кола R , радіус вписаного кола $R/2$, де R – максимально допустимий радіус обслуговування населення. Співвідношення радіусів описаного до вписаного кола становить 2;

2) рівнобедрений прямокутний трикутник зі сторонами $2R$, $R\sqrt{2}$, $R\sqrt{2}$ та кутами 90° , 45° , 45° ; радіус описаного кола R , радіус вписаного кола $R/(\sqrt{2}+1)$. Співвідношення радіусів описаного до вписаного кола становить 2,41;

3) прямокутний трикутник зі сторонами $2R$, $\sqrt{(2R)^2 - a^2}$, $\sqrt{(2R)^2 - b^2}$; радіус описаного кола R , радіус вписаного кола змінюється залежно від довжини катетів.

Визначення показників для розрахунку співвідношення зони обслуговування в межах району до площі району (K_P) здійснюється методами просторового аналізу за допомогою геоінформаційних систем.

Середній радіус описаного та вписаного кола для кожного з трикутників триангуляційної мережі освітніх закладів району визначається за допомогою формул тригонометрії.

Вихідні дані для цих розрахунків формуються після побудови триангуляції Делоне в середовищі геоінформаційних системи.

Еталонна кількість закладів визначається як доданок існуючої кількості закладів мережі та їх додаткової кількості, для забезпечення умови сто відсоткового охоплення території, що досліджується, зонами обслуговування установ. Додаткова кількість установ відповідає вимогам еталонної моделі мережі. Визначення еталонної кількості закладів є різновидом задачі оптимізації [25]. До наявної кількості закладів додається розрахункова кількість закладів, які необхідно розмістити на території, що не охоплена додатково. Первинно визначається еталонна кількість закладів за ідеальних умов для всієї території, що розглядається. Це дає можливість розрахувати площу зони обслуговування на один об'єкт обслуговування населення. Такий показник дає можливість визначити додаткову кількість закладів, яку необхідно розмістити в межах території, що досліджується. Виходячи з цього, еталонна кількість закладів для кожного етапу удосконалення мережі буде розраховуватись окремо, як наслідок значення цього показника буде унікальним для кожної ітерації розрахунку.

Еталонна кількість закладів освіти за ідеальних умов розраховується із залежності:

$$S_t = S_o \cdot (d - m - h),$$

де S_t – площа території, що досліджується (житлової території району);

S_o – площа кола, утвореного еталонною відстанню між об'єктами обслуговування;

d – кількість об'єктів обслуговування;

m – площа території, що потрапляє в межі обслуговування декількох закладів освіти;

h – площа, яка виходить за межі території, що досліджується.

У свою чергу площа території, що потрапляє в межі обслуговування декількох закладів освіти, визначається як кількість граней триангуляції помножена на 0,058 (площа перетину зон обслуговування об’єктів, утворених вздовж однієї грані (рис. 4, а)). Кількість граней можна розрахувати за формулою складності триангуляції [25; 26] $n \cdot \log_{10} n$, де, n – кількість трикутників. Придатність формули була перевірена емпіричним шляхом.

Площа, яка виходить за межі території, визначається як відношення периметру території до еталонної відстані між об’єктами обслуговування, поділене на 2.

Таким чином, кількість об’єктів обслуговування в межах досліджуваної території визначається за формулою:

$$d = \frac{S_t}{S_o} + 0,058 \cdot \frac{S_t}{S_{\Delta}} \log_{10} \frac{S_t}{S_{\Delta}} + \frac{P_t}{a_e}$$

Вихідними показниками є S_t та P_t , площа та периметр території, що досліджується, а змінним параметром мережі об’єктів обслуговування є a_e – еталонна відстань між об’єктами обслуговування. Від еталонної відстані визначаються S_o – площа еталонного описаного кола та S_{Δ} – площа еталонного трикутника.

Паралельно з визначенням розмірів вписаного та описаного кіл трикутників і середньої довжини ліній триангуляції виконано розрахунок середніх квадратичних відхилень довжин сторін трикутників від еталонних відстаней між закладами обслуговування населення (табл. 1). Оцінювання пропонується здійснювати для двох еталонних моделей, за вимогами ДБН Б.2.2-12:2019 ($R = 800$ м) та вимогами ДСТУ ISO 37120:2019 ($R = 300$ м). Вихідними даними для розрахунків є площа житлової та житлово-громадської території району – 2767,3 га, периметр цієї території 34610 м. Як свідчать результати порівняння розрахунків мережі закладів освіти, показники мережі покращилися після удосконалення мережі в порівнянні з фактичними показниками.

Таблиця 1 – Загальні розрахунки мережі освітніх закладів

Показник	Фактичний стан	Етап удосконалення	Еталонна модель (800)	Еталонна модель (300)
1	2	3	4	5
Площа, що обслуговується закладами в межах району, га	2905,7	3393,4	3067,2	2850,4
Житлові території, не охоплені зоною обслуговування 800, га	424,6	165,1	0	0
Житлові території, не охоплені зоною обслуговування 300, га	2043,9	1930,9	0	0
Відношення площі зони обслуговування 800 в межах району до площі району (житлової території) (K_p)	0,846	0,940	1	-
Відношення площі зони обслуговування 300 в межах району до площі району (житлової території) (K_p)	0,261	0,302	-	1
Середній радіус описаного кола трикутників, м	691,3	706,8	800	300
Середній радіус вписаного кола трикутників, м	198,8	205,1	400	150
Середнє значення відношення середнього радіусу описаного кола до середнього радіусу вписаного кола (K_k)	4,453	4,418	2	2
СКП відхилення описаного радіусу до еталонного описаного радіусу 800, м	340,3	316,0	0	-
СКП відхилення вписаного радіусу до еталонного описаного радіусу 800, м	235,4	224,4	0	-
СКП відхилення описаного радіусу до еталонного описаного радіусу 300, м	507,0	506,6	-	0
СКП відхилення вписаного радіусу до еталонного описаного радіусу 300, м	131,5	124,1	-	0
Середня довжина ліній триангуляційної мережі	948,5	972,2	1385,6	519,6
Відношення середньої довжини всіх ліній триангуляційної мережі до еталонної відстані між освітніми закладами 800 (K_L)	0,684	0,702	1	-

Закінчення табл. 1

1	2	3	4	5
Відношення середньої довжини всіх ліній триангуляційної мережі до еталонної відстані між освітніми закладами 300 (K_L)	1,825	1,871	-	1
СКП відхилення найдовшої, середньої та найменшої сторін трикутника від 1-ого еталонного розміру трикутника (800), м	528,6 603,2 847,2	503,0 545,0 817,9	0 0 0	- - -
СКП відхилення найдовшої, середньої та найменшої сторін трикутника від 2-ого еталонного розміру трикутника (800), м	627,4 483,0 626,0	594,4 419,3 594,2	214,4 254,3 254,3	- - -
СКП відхилення найдовшої, середньої та найменшої сторін трикутника від 1-ого еталонного розміру трикутника (300), м	867,8 670,0 370,6	885,0 643,6 350,7	- - -	0 0 0
СКП відхилення найдовшої, середньої та найменшої сторін трикутника від 2-ого еталонного розміру трикутника (300), м	683,6 741,6 406,3	819,0 720,2 393,1	- - -	80,4 95,4 95,4
Кількість закладів мережі	33	37	30	164
Еталонна кількість закладів мережі 800	38	39	30	-
Еталонна кількість закладів мережі 300	154	152	-	164
Відношення кількості закладів до еталонної кількості закладів 800 (K_s)	0,868	0,949	1	-
Відношення кількості закладів до еталонної кількості закладів 300 (K_s)	0,214	0,243	-	1

Джерело: розроблено автором.

Для удосконаленої моделі мережі освітніх закладів розраховано відстані від шкіл до житлових будинків. Результати свідчать, що для 7 шкіл (21 % від кількості шкіл в районі) максимальні відстані пішохідної доступності перевищують 800 м у діапазоні 800-1050 м, (рис. 6). Загалом, наведені розрахунки свідчать, що запропонований перерозподіл доступності до об'єктів обслуговування є оптимальним, розроблені пропозиції щодо удосконалення мережі освітніх закладів вагомі, а інформативність показників оцінювання пішохідної доступності до об'єктів обслуговування населення є дієвою.

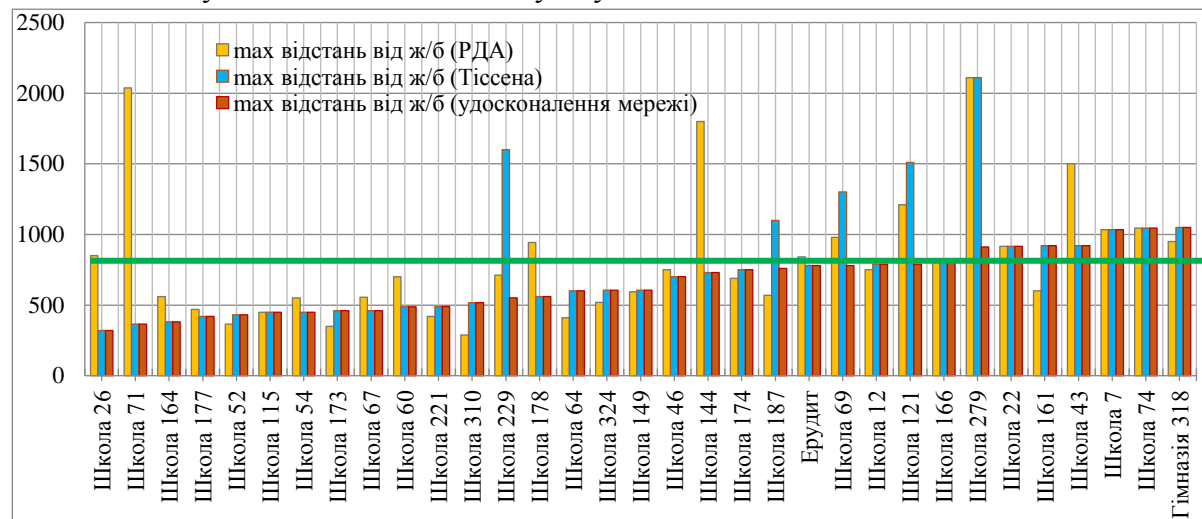


Рис. 6. Аналіз відстаней від шкіл до будинків відповідно до: документу адміністрації, зон полігонів близькості Тіссена-Вороного, удосконаленої моделі мережі

Джерело: розроблено автором.

На основі загальних показників мережі освітніх закладів пропонується використовувати узагальнений індикатор пішохідної доступності до освітніх закладів (табл. 2), що визначається як середнє арифметичне значення чотирьох нормалізованих показників ме-

режі: 1) співвідношення загальної площі території, фактично охопленої максимально допустимим радіусом обслуговування об'єктів, до загальної площі території, яку необхідно забезпечити освітніми закладами K_P , 2) співвідношення середнього радіусу описаного кола до середнього радіусу вписаного кола трикутників триангуляції K_K , 3) співвідношення середньої довжини всіх ліній триангуляційної мережі до еталонної відстані між освітніми закладами K_L ; 4) співвідношення кількості закладів, які складають мережу освітніх закладів, до мінімально необхідної кількості установ, які можуть задовольнити визначену територію K_S .

Таблиця 2 – Розрахунок індикатора пішоїдної доступності до освітніх закладів

Показники	Для еталонної моделі 800		Для еталонної моделі 300	
	Фактичний стан	Етап удосконалення	Фактичний стан	Етап удосконалення
Нормалізоване значення відношення зони обслуговування в межах району до площі району (K_P)	0,846	0,940	0,261	0,302
Нормалізоване значення відношення середнього радіусу описаного кола до середнього радіусу вписаного кола (K_K)	0,101	0,102	0,101	0,102
Нормалізоване значення відношення середньої довжини всіх ліній триангуляційної мережі до еталонної відстані між освітніми закладами (k_L)	0,684	0,702	0,300	0,286
Нормалізоване значення відношення кількості закладів до еталонної кількості закладів (K_S)	0,868	0,949	0,214	0,243
Індикатор пішоїдної доступності до мережі освітніх закладів	0,625	0,673	0,219	0,233

Джерело: розроблено автором.

Нормалізація показників мережі освітніх закладів району здійснюється відносно еталонних показників мережі за умов, що «1» є еталонним (бажаним) значенням, при $P < E$, $P_n = P/E$, при $P > E$, $P_n = E/P^2$, де P – показник мережі, E – еталонний показник мережі, P_n – нормалізований показник мережі. Будь-які відхилення від еталонних показників (у більшу або меншу сторону) є невідповідністю бажаних значень, графік нормалізованих значень наведено на рис. 7.

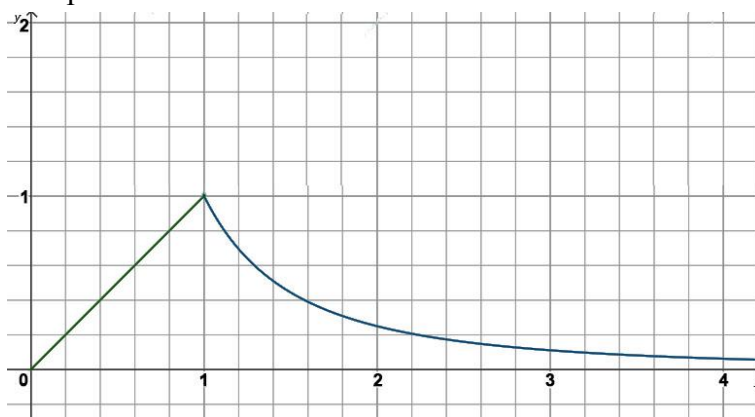


Рис. 7. Графік нормалізації показників мережі освітніх закладів

При узагальненому оцінюванні мережі запропонований метод враховує ступінь охоплення території зонами обслуговування закладів, показники геометрії закладів та відповідності еталонній кількості закладів. Таким чином, значення співвідношення зони обслуговування в межах району до площі району (K_P), співвідношення середнього радіусу описаного кола до середнього радіусу вписаного кола (K_K), співвідношення середньої довжини всіх ліній триангуляційної мережі до еталонної відстані між освітніми закладами

(K_L), співвідношення кількості закладів до еталонної кількості закладів (K_S) є репрезентативними для об'єктів обслуговування та базовими для розрахунку індикатора доступності до мережі освітніх закладів.

З метою оцінювання індикатора доступності пропонується використовувати оціночну шкалу Харрінгтона [27]:

- від 0,01 до 0,2 – низький рівень;
- від 0,2 до 0,37 – понижений рівень;
- від 0,37 до 0,63 – середній рівень;
- від 0,63 до 0,8 – достатній рівень;
- від 0,8 до 1,0 – оптимальний рівень.

За шкалою Харрінгтона існуючий стан пішохідної доступності до закладів освіти за вимогами ДБН Б.2.2-12:2019 у Солом'янському районі міста Києва оцінюється як «середній» (на верхній його межі), а проектне удосконалення мережі шляхом будівництва 4-х нових закладів освіти забезпечить для цього індикатора значення «достатній». Пішохідна доступність до закладів освіти за вимогами ДСТУ ISO 37120:2019 для існуючого та проектного удосконаленого стану оцінюється на рівні «понижений» на нижній його межі. Таким чином, необхідно здійснювати ущільнення мережі освітніх закладів в місті Києві та прагнути досягнути вимог пішохідної доступності за ДСТУ ISO 37120:2019, що підвищить якість міських послуг та якість життя мешканців столиці України.

Висновки. Розроблений метод оцінювання пішохідної доступності до освітніх закладів може бути використаний для оцінювання різних видів об'єктів обслуговування населення, для яких визначено нормативні вимоги доступності.

Геоінформаційні технології надають можливість автоматизації запропонованого методу, що дозволить на основі вихідних даних, які описують фактичне та проектне положення закладів, здійснити швидкий розрахунок показників та індикатора мережі об'єктів обслуговування населення та визначити оптимальне проектне рішення математичним способом.

Зазначені підходи можуть бути застосовані при:

- встановленні зон обслуговування освітніх закладів державними районними адміністраціями;
- оцінюванні варіантів удосконалення мереж об'єктів обслуговування при містобудівному проектуванні [28];
- оцінюванні впливу проектного закладу обслуговування на загальну пішохідну доступність до мережі об'єктів обслуговування при об'єктному проектуванні;
- проведенні містобудівного моніторингу, виявленні проблемних питань у обслуговуванні населення [29];
- розробленні пропозицій для удосконалення мереж об'єктів обслуговування населення.

У зазначеному дослідженні розглянуто лише питання доступності до закладів освіти, однак не враховано показники потужності освітніх закладів та ресурсний потенціал закладів для задоволення потреб населення у встановленій зоні обслуговування. Зазначені питання планується розглянути в подальшому дослідженні.

Список використаних джерел

1. Методи та моделі розроблення комп'ютерних систем і мереж : монографія / В. С. Пономаренко, С. В. Мінухін, С. В. Кавун, та ін.; заг. ред. В. С. Пономаренка. – Харків : ХНЕУ, 2008. – 316 с.
2. Midtbo, T. Spatial Modeling by Delaunay Networks of Two and Three Dimensions : Dr. Ing. Thesis / T. Midtbo. – Norwegian Institute of Technology, University of Trondheim, 1993. – 157 p.
3. De Floriani L. Compressing Triangulated Irregular Networks / De L. Floriani, P. Magillo, E. Puppo // Geoinformatica. – 2000. – Vol. 1, № 4. – Pp. 67-88.
4. Watson, D. F. Computing the n-dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoi polytopes / D. F. Watson // The Computer Journal. – 1981. – Vol. 24, № 2. – Pp. 167-172.

5. Sloan, S. W. A fast algorithm for constructing Delaunay triangulations in the plane / S.W. Sloan // *Adv. Eng. Software.* – 1987. – Vol. 9, № 1. – Pp. 34-55.
6. Кузик, А. Д. Аналіз зон покриття гідрантами території міста (на прикладі Новояворівська) / А. Д. Кузик, О. М. Трусевич, О. О. Карабин // *Пожежна безпека : зб. наук. праць.* – Львів : ЛДУ БЖД, 2009. – № 15. – С. 71-77.
7. Кузик, А. Д. Аналіз зон обслуговування пожежно-рятувальних частин за допомогою діаграм Вороного / А. Д. Кузик, О. О. Карабин, О. М. Трусевич // *Пожежна безпека : зб. наук. праць.* – Львів : ЛДУ БЖД, 2008. – № 13. – С. 73-78.
8. Терентьев, А. Ю. Використання сучасних ГІС-технологій для розрахунку площі живлення дерев у лісових насадженнях / А. Ю. Терентьев // *Науковий вісник НЛТУ України.* – 2014. – Вип. 24.5. – С. 111-115.
9. Рудько, Г. І. Геоінформаційні технології в надрокористуванні (на прикладі ГІС К – MINE) / Г. І. Рудько, ред. М. В. Назаренко. – Київ : Академпрес, 2011. – 336 с.
10. Кохан, С. С. Географічні інформаційні системи : посібник / С. С. Кохан ; за ред. М. Ван Мервіна. – Київ : НАУ. 2003. – 206 с.
11. Геоінформаційні системи в агросфері / В. В. Морозов, Н. М. Шапоринська, О. В. Морозов, В. І. Пічура. – Київ : Аграрна освіта, 2010. – 269 с.
12. Горбань, О. М. Основи теорії систем і системного аналізу / О. М. Горбань, В. Є. Бахрушин. – Запоріжжя : ГУ «ЗІДМУ», 2011. – 204 с.
13. Плешкановська, А. М. Аналіз різноманітності структури міської системи на основі моделі Шеннона / А. М. Плешкановська // *Містобудування та територіальне планування.* – 2014. – Вип. 51. – С. 452-457.
14. Ligmann-Zielinska, A. Sustainable urban land use allocation with spatial optimization / A. Ligmann-Zielinska, R. Church, P. Jankowski // *8th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation.* – 2005. – Pp. 1-18.
15. Ковальський, Л. М. Проблеми реконструкції мережі дошкільних навчальних закладів в ущільненій житловій забудові / Л. М. Ковальський, Г. Л. Ковальська, Д. С. Саєнко // *Досвід та перспективи розвитку міст України.* – 2016. – Вип. 31. – С. 164-174.
16. Булах, І. В. Передумови реорганізації мережі дитячих лікувальних закладів України / І. В. Булах // *Сучасні проблеми архітектури та містобудування.* – 2017. – № 47. – С. 444-450.
17. Кузьміна, Г. В. Питання організації мережі підприємств дрібнороздрібної торгівлі / Г. В. Кузьміна // *Перспективні напрямки проектування житлових та громадських будівель.* – 2003. – Спец. вип. : Сучасні тенденції в архітектурі та будівництві. – С. 176-178.
18. Cabrera-Jara, N. Assessing sustainable urban densification using geographic information systems / N. Cabrera-Jara, D. Orellana, M. Hermida // *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development.* – 2017. – Vol. 8, No. 2. – Pp. 237-243. DOI: <https://doi.org/10.12972/susb.20170021>.
19. Smilka, V. Settlement compactness as a quality characteristic of land use / V. Smilka // *Baltic Journal of Real Estate Economics and Construction Management.* – 2020. – № 8. – P. 34-44. DOI: 10.2478/bjreecm-2020-0004.
20. Kovalska, G.L. Construction management in Ukraine / G. L. Kovalska, V. A. Smilka // *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE).* – 2019. – Vol. 9, № 1. – Pp. 1593-1600. DOI: 10.35940/ijitee.A4563.119119.
21. Офіційний сайт Головного управління статистики у м. Києві [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.kyiv.ukrstat.gov.ua>.
22. Офіційний сайт Шевченківської районної в місті Києві державної адміністрації [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://shev.kyivcity.gov.ua>.
23. Zamirets, O. Building triangulation irregular network model based on regular GRID data / O. Zamirets // *Science looks ahead.* – 2012. – № 11 – P. 12.
24. Voronoi, G. Nouvelles applications des parameters continues a la therie des formes quadratiques. Deuxieme Memorie: Recherches sur les parralleloedres primitifs / G. Voronoi // *J. reine angew.* – 1908. – № 134. – Pp. 198-287.
25. Терещенко, В. М. Аналіз методів розв'язання оптимізаційних задач обчислювальної геометрії / В. М. Терещенко Київ : ВПЦ «Київський університет», 2022. – 112 с.

26. Давидов, О. П. Комплексна система обробки зображень на основі алгоритмів триангуляції / О. П. Давидов // Комп'ютерна математика. – 2018. – № 2. – С. 48-59.
27. Harrington, E. C. The desirable function / E. C. Harrington // *Industrial Quality Control*. – 1965. – Vol. 21(10). – Pp. 494-498.
28. Смілка, В. А. Структура містобудівного моніторингу / В. А. Смілка // *Сучасні проблеми архітектури і містобудування*. – 2015. – Вип. 38. – С. 292-296.
29. Smilka, V. The Role of Monitoring in Sustainable Development / V. Smilka // *Baltic Journal of Real Estate Economics and Construction Management*. – 2019. – № 7 (1) – Pp. 245-254. DOI:10.2478/bjreem-2019-0015.

References

1. Ponomarenko, V.S. (Ed.), Minukhin, S.V., & Kavun, S.V. (2008). *Metody ta modeli rozroblennia kompiuternykh system i merezh [Methods and models of development of computer systems and networks]*. KhNEU.
2. Midtbo, T. (1993). *Spatial Modeling by Delaunay Networks of Two and Three Dimensions*. Dr. Ing. thesis. Department of Surveying and Mapping, Norwegian Institute of Technology, University of Trondheim.
3. De Florian, L., Magillo, P., & Puppo, E. (2000). Compressing Triangulated Irregular Networks. *Geoinformatica*, 1(4), 67–88.
4. Watson, D.F. (1981). Computing the n-dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoi polytopes. *The Computer Journal*, 24(2), 167–172.
5. Sloan, S. W. (1987). A fast algorithm for constructing Delaunay triangulations in the plane. *Adv. Eng. Software*, 9(1), 34–55.
6. Kuzyk, A.D., Trusevych, O.M., & Karabyn, O.O. (2009). Analysis of hydrant coverage areas of the city (on the example of Novoyavorivsk) [Analiz zon pokryttia hidrantamy terytorii mista (na prykladi Novoiavorivska)]. *Pozhezhna bezpeka – Fire Security*, 15, 71–77. <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/1244>.
7. Kuzyk, A.D., Karabyn, O.O., & Trusevych, O.M. (2008). Analiz zon obsluhovuvannia pozhezhno-riatuvalnykh chastyn za dopomohoiu diahram Voronoho [Analysis of service areas of fire and rescue units using Voronoi diagrams]. *Pozhezhna bezpeka – Fire Security*, 13, 73-78.
8. Terentiev, A.Yu. (2014). Vykorystannia suchasnykh HIS-tekhnologii dlia rozrakhunku ploshchi zhyvlennia derev u lisovykh nasadzhenniakh [The use of modern GIS technologies for calculating the area of tree nutrition in forest plantations]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy – Scientific bulletin of NLTU of Ukraine*, 24.5, 111-115. http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnlntu_2014_24.
9. Rudko, H.I., Nazarenko, M.V. (Ed.). (2011). *Heoinformatsiini tekhnologii v nadrokorystuvanni (na prykladi HIS K – MINE) [Geoinformation technologies in subsoil use (on the example of GIS K – MINE)]*. Akadempres.
10. Kokhan, S.S., M. Van Mervin (Ed.). (2003). *Heohrafichni informatsiini systemy [Geographic information systems]*. NAU.
11. Morozov, V.V., Shaporynska, N.M., Morozov, O.V., & Pichura, V. I. (2010). *Heoinformatsiini systemy v ahrosferi [Geoinformation systems in agriculture]*. Ahrarna osvita.
12. Horban, O.M., & Bakhrushyn, V.Ye. (2011). *Osnovy teorii system i systemnoho analizu [Fundamentals of systems theory and system analysis]*. HU «ZIDMU».
13. Pleshkanovska, A.M. (2014). Analiz riznomanitnosti struktury miskoi systemy na osnovi modeli Shennona [Analysis of the diversity of the urban system structure based on the Shannon model]. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia – Urban planning and territorial planning*, 51, 452-457. http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP_2014_51_62.
14. Ligmann-Zielinska, A., Church, R., & Jankowski, P. (2005). Sustainable urban land use allocation with spatial optimization. *8th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation* (pp. 1-18).
15. Kovalskiy, L.M., Kovalska, H.L., & Saienko, D.S. (2016). Problemy rekonstruktsii merezhi doshkilnykh navchalnykh zakladiv v ushchilnenii zhytlovi zabudovi [Problems of reconstruction of the network of pre-school educational institutions in a compact residential building]. *Dosvid ta perspektyvy rozvytku mist Ukrainy – Experience and prospects of the development of Ukrainian cities*, 31, 164-174.

16. Bulakh, I.V. (2017). Peredumovy reorhanizatsii merezhi dytiachykh likuvalnykh zakladiv Ukrainy [Prerequisites for Reorganization of Children's Medical Institution Network in the Ukraine]. *Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannia – Modern Problems of Architecture and Urban Development*, 47, 444-450.
17. Kuzmina, H.V. (2003). Pytannia orhanizatsii merezhi pidpriemstv dribnorozdribnoi torhivli [The issue of organization of a network of retail trade enterprises]. *Perspektyvni napriamky proektuvannia zhytlovykh ta hromadskykh budivel – Prospective directions for the design of residential and public buildings. Modern trends in architecture and construction* (pp. 176-178).
18. Cabrera-Jara, N., Orellana, D., & Hermida, M. (2017). Assessing sustainable urban densification using geographic information systems. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 8(2), 237-243. <https://doi.org/10.12972/susb.20170021>.
19. Smilka, V.A. (2020). Settlement compactness as a quality characteristic of land use. *Baltic Journal of Real Estate Economics and Construction Management*, 8, 34-44. <https://doi.org/10.2478/bjreecm-2020-0004>.
20. Kovalska, G.L., & Smilka, V.A. (2019). Construction management in Ukraine. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 9(1), 1593-1600. <https://doi.org/10.35940/ijitee.A4563.119119>.
21. Ofitsiyni sait Holovnoho upravlinnia statystyky u m. Kyievi [The official website of the Main Directorate of Statistics in Kyiv]. (n.d.). <http://www.kyiv.ukrstat.gov.ua>.
22. Ofitsiyni sait Shevchenkivskoi raionnoi v misti Kyievi derzhavnoi administratsii [The official website of the Solomian district state administration in the city of Kyiv]. (n.d.). <https://solom.kyivcity.gov.ua/content/rozporyadzhennya.html>.
23. Zamirets, O. (2012). Building triangulation irregular network model based on regular GRID data. *Science looks ahead*, 11, 12-25.
24. Voronoi, G. (1908). Nouvelles applications des parameters continues a la theorie des formes quadratiques. *Deuxieme Memorie: Recherches sur les parralleloeddres primitifs*, 134, 198-287.
25. Tereshchenko, V.M. (2022). *Analiz metodiv rozviazannia optyimizatsiinykh zadach obchyslivalnoi heometrii [Analysis of development methods for optimization of general geometry problems]*. VOC «Kyiv University».
26. Davydov, O.P. (2018). Kompleksna systema obrobky zobrazhen na osnovi alhorytmiv trianhuliatsii [Complex image processing system based on triangulation algorithms]. *Kompiuterna matematika – Computer Mathematics*, 2, 48-59.
27. Harrington, E.C. (1965). The desirable function. *Industrial Quality Control*, 21(10), 494-498.
28. Smilka, V.A. (2015). Struktura mistobudivnoho monitorynhu [Structure of urban planning monitoring]. *Suchasni problemy arkhitektury i mistobuduvannia – Modern problems of architecture and urban planning*, 38, 292-296.
29. Smilka, V. A. (2019). The Role of Monitoring in Sustainable Development. *Baltic Journal of Real Estate Economics and Construction Management*, 7(1), 245-254. <https://doi.org/10.2478/bjreecm-2019-0015>.

Отримано 16.05.2024

UDC 711.43

Vladyslav Smilka

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Architectural Theory
Kyiv National University of Construction and Architecture (Ukraine, Kyiv)

E-mail: smilka.va@knuba.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7025-9398>

ResearcherID: S-6934-2017. SCOPUSID: 57211859251

APPLICATION OF DELONE TRIANGULATION FOR THE ANALYSIS OF PEDESTRIAN ACCESSIBILITY TO EDUCATIONAL INSTITUTIONS

Accessibility to the main objects of public service is one of the aspects of the quality of life of the population according to the thematic group of indicators "Urban planning", which is defined by the international standard ISO 37120:2018, on the basis of which the state standard of Ukraine ISO 37120:2019 was adopted. There are significant differences between the requirements for the accessibility of a number of public service facilities in state standard of Ukraine ISO 37120:2019 and state

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

building regulations B.2.2-12:2019, in particular for general education institutions. There is a problem of analyzing accessibility to public service facilities taking into account various initial parameters, in particular the location of public service facilities and indicators of accessibility to these facilities.

The purpose of the study is the analysis of pedestrian accessibility to communal primary education institutions of the Solomyan district of Kyiv, determination of the level of compliance of secondary education institutions in the area with the requirements established by state building regulations B.2.2-12:2019 state standard ISO 37120:2019. Based on the properties of Delaunay's triangulation, a methodology for evaluating the optimality (compliance with regulatory requirements) of planning solutions of educational institution's network is proposed, and reference options for the mutual location of such institutions are developed. The optimality criterion is the maximum coverage of the service territory with the minimum number of establishments. In order to evaluate the optimality of the above proposals, the composition of indicators of the network of educational institutions is proposed, which take into account the coverage of the service territory, the geometric parameters of the mutual location of institutions and compliance with the reference number of institutions. Indicators of the ratio of the area of the service area within the district to the area of the district (K_R), the ratio of the average radius of the circumscribed circle to the average radius of the inscribed circle (K_K), the ratio of the average length of the network line to the reference distance between objects (K_L), the ratio of the number of establishments to the reference number of institutions (K_S) are basic for calculating the general indicator of walking accessibility to educational institutions. It is proposed to evaluate the results of the calculations according to the Harrington scale. Approbation of the developed proposals was carried out for the network of educational institutions of the Solomyan district of Kyiv. Geoinformation technologies provide an opportunity to automate the proposed method, which will allow, on the basis of initial data describing the actual and design position of institutions, to perform a quick calculation of indicators and indicators of the network of public service facilities and to mathematically determine the optimal design solution.

Keywords: triangulation; network of educational institutions; radius of service; pedestrian accessibility; reference distance between institutions; indicators of the network of educational institutions; urban planning monitoring.

Fig.: 7. Table: 2. References: 29.