

ВИЗНАЧЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ ФОРМИ ТІЛА ЛЮДИНИ ПРИ АКТИВНОМУ РУСІ В ПОТОЦІ ЛЮДЕЙ

Набоков К.А., курсант

Комяк В.М., д.т.н., професор,

Національний університет цивільного захисту України

(м. Харків, Україна)

Анотація – при русі людей в потоці спостерігаються наступні категорії руху: комфортний, спокійний, активний, підвищеної активності. При моделюванні індивідуально-поточного руху людей при комфортному і спокійному русі люди представляються еліпсами. Фізичні рухи людини враховуються мінімально-допустимими відстанями між ними і визначаються, як комфортність. Коли категорія руху змінюється і переходить в категорію активного руху, пропонується моделювати рух людей з більш високою точністю апроксимації, яка враховувала б не тільки повороти людини відносно основного напрямку руху потоку взагалі, а і повороти частин тіла. В роботі пропонується трикомпонентна модель тіла людини, а умови неперетину між ними описуються за допомогою апарату Ф-функцій.

Ключові слова – активний рух людей, модель тіла людини, Ф-функція, точність представлення моделі тіла людини

Постановка проблеми. Постійне зростання кількості надзвичайних ситуацій (НС) природного і техногенного характеру, в тому числі їх масштабність, робить проблему захисту населення і територій від них досить актуальною. Евакуація – часто єдиний спосіб порятунку людини, що опинилася в небезпечній для життя ситуації. До можливих форм захисту населення відноситься організація керованої евакуації людей з місць розвитку НС. Основною складовою аварійного рятування людей по горизонтальним шляхам є програми моделювання людських потоків, що адекватно відображають реальні процеси переміщення людей. Моделювання людських потоків реалізує можливість візуалізації конфігурації розміщення людей в процесі евакуації, а також проведення оптимізації їх руху з вибором раціональних шляхів. Тому актуальною проблемою є розробка нових методів евакуації та аварійного рятування людей із зони надзвичайної ситуації по шляхам з різними характеристиками.

Аналіз останніх досліджень. На сьогодні відсутні моделі індивідуально-поточного руху людей, що адекватні реальному потоку [1]. Інтерес до моделі мотивується як необхідністю уваги до руху гетерогенних груп людей в потоці, так і неможливістю на теперішній час побудови

адекватних математичних моделей на базі аналітичного опису умов не перетинання між людьми .

Проаналізовано параметри, які впливають на вид руху людей в потоці [2]. Отримано зв'язок між способами моделювання руху потоку людей та рівнем комфортності їх руху. Показано, що зміна категорії комфортності руху потоку людей може бути врахована в способі індивідуально поточного руху як шляхом зміни просторової форми об'єктів, так і завданням мінімально-допустимих відстаней між ними [3]. В даній прикладній проблемі об'єктом переміщення є людина. У роботі [2] показано, що при вільній категорії руху найбільш адекватною моделлю проєкції людського тіла на горизонтальну площину є еліпс. При активному русі людей здійснюється деформація тіл людей в рамках антропологічних обмежень. Тому для розв'язання задач моделювання активного руху людей необхідна побудова адекватних моделей людських тіл, які дозволяли б враховувати зміну їх просторової форми в рамках антропологічних обмежень.

Метою роботи є розробка математичної моделі тіла людини, яка б враховувала нетравматичну зміну просторової форми при активному русі в потоці людей.

Основна частина. Формою горизонтальної проєкції людини прийнято еліпс [2], діаметри якого (a, c_i) відповідають ширині і товщині тіла людини (рис. 1)

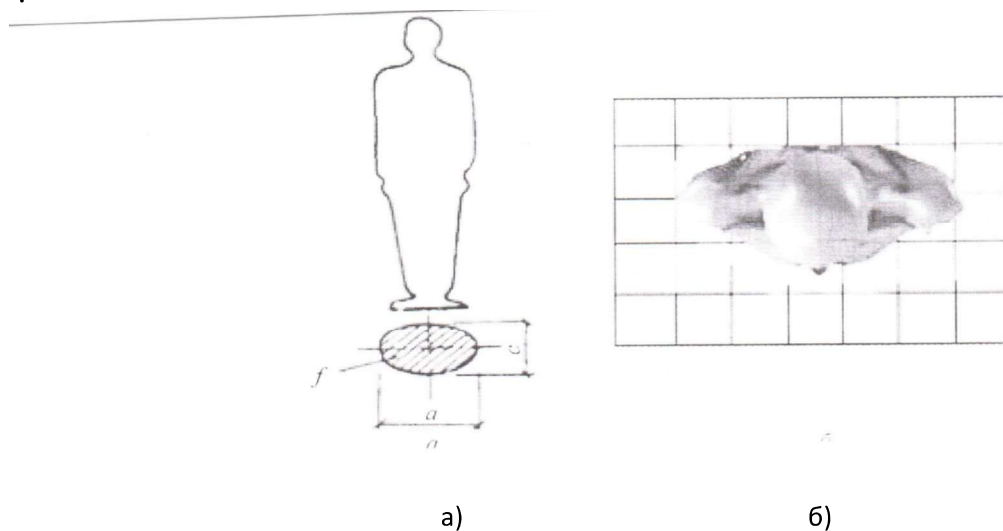


Рис. 1 – Горизонтальна проєкція людини: а - розрахункова; б - дійсна

Розміри людей змінюються в залежності від фізичних даних людини, її віку. У наступній табл. 1 [1, 2] наводяться усереднені розміри людей різного віку та з порушенням опорно-рухового апарату.

Таблиця 1 – Розміри (a_i, c_i) (м) горизонтальної проєкції усереднених людей та її площа f_i (м²)

Здорові люди	Люди з пошкодженням опорно-рухової системи, пересуваютья без додаткових опор	Діти та підлітки		
		7-9 років	10-13 років	14-16 років
$a_i=0,46$	$a_i=0,75$	$a_i=0,24$	$a_i=0,31$	$a_i=0,39$
$c_i=0,28$	$c_i=0,40$	$c_i=0,20$	$c_i=0,245$	$c_i=0,26$
$f_i=0,101$	$f_i=0,25$	$f_i=0,04$	$f_i=0,06$	$f_i=0,08$

Слід зазначити, що зріст людини є вихідним параметром при визначенні характерних розмірів тіла. Шляхом порівняння розмірів людських фігур знайдено, що розміри окремих частин тіла у більшості людей пропорційні їх росту. Зріст людини коливається в межах 150–200 см. Люди, зріст яких перевищує 200 см або не досягає 150 см, вважаються або дуже високими, або низькорослими.

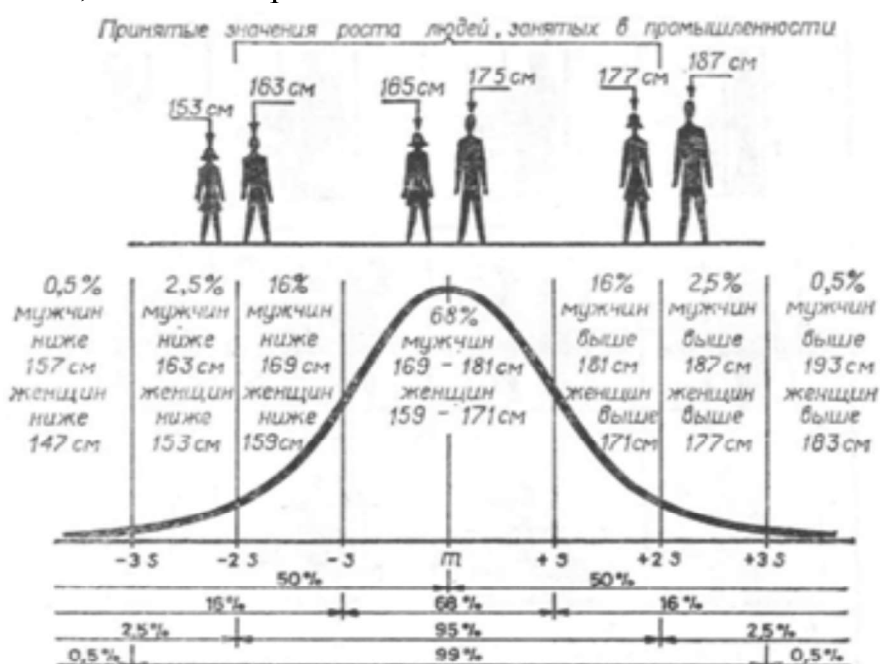


Рис. 2 – Нормальный розподіл росту людей

Закон розподілу росту людей наведено на рис. 2. У тих випадках, коли треба знати основні розміри людей, що утворюють потік, то враховуються розміри 90 - 95% людей (рис. 2).

Таким чином, використовуючи антропометричні дані (рис.2), можна знаходити основні статичні розміри людського тіла для розуміння функціональних взаємозв'язків окремих параметрів потоку. Необхідно також враховувати рухи людини в потоці, тобто простір для його природних фізичних рухів.

Згідно [2, 3] при русі людей в потоці спостерігаються наступні категорії руху: комфортний, спокійний, активний, підвищеної активності. При моделюванні індивідуально-поточного руху людей при комфортному і спокійному русі люди представляються еліпсами, мала вісь якої перпендикулярна до основного напрямку руху, з можливістю повороту відносно цього напрямку руху в рамках маневреності. Фізичні рухи людини враховуються, як правило, мінімально-допустимими відстанями між ними і визначаються, як комфортність. Коли категорія руху змінюється і переходить в категорію активного руху, пропонується моделювати рух людей з більш високою точністю апроксимації, яка враховувала б не тільки повороти людини відносно основного напрямку руху потоку взагалі, а і повороти частин тіла. Розглянемо ці повороти на прикладі зміни положення плеча. Для цього пропонується представляти людину набором трьох еліпсів: основного з параметрами з табл. 1, так двома допоміжними з однаковими параметрами, що наведені в табл. 2. Допоміжні еліпси задаються осями, що рівні довжині та товщині кожного з плеч з можливістю їх обертання в діапазоні кутів $(-\alpha_1; +\alpha_2)$ в горизонтальній площині відносно піднятої руки людини.

Таблиця 2 – Розміри горизонтальної проєкції плеча людей (м)

Здорові люди	Люди з пошкодженням опорно-рухової системи, пересуваються без додаткових опор	Діти та підлітки		
		7-9 років	10-13 років	14-16 років
$a_{li}=0,30$ (м)	$a_{li}=0,3$	$a_{li}=0,115$	$a_{li}=0,12$	$a_{li}=0,125$
$c_{li}=0,11$ (м)	$c_{li}=0,11$	$c_{li}=0,045$	$c_{li}=0,05$	$c_{li}=0,055$
$f_{li}=0,026$	$f_{li}=0,026$	$f_{li}=0,004$	$f_{li}=0,00471$	$f_{li}=0,0053$

Оцінемо точність апроксимації представлення природних фізичних рухів людини представленням її трикомпонентною моделлю зі спроможністю обертання допоміжних еліпсів в першому випадку та завданням мінімально-допустимих відстаней між ними в другому випадку.

1. Пропонується при моделюванні руху враховувати природну деформацію тіла людини шляхом повороту частин його тіла на прикладі плеча. Для цього представимо проєкцію людини набором трьох еліпсів: основного E_c і двох допоміжних E_l , E_r (рис.4).

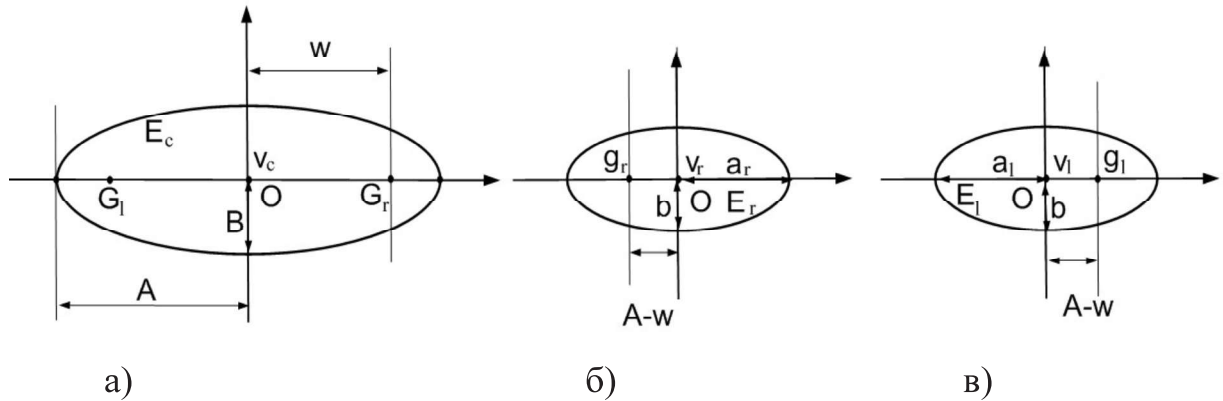


Рис. 3 – Трикомпонентна модель людського тіла: (а) тулуб, (б) праве плече, (в) леве плече.

Кожному еліпсу E зіставлені у відповідність параметри розміщення $u = (v, \theta)$, де $v = (x, y)$ – вектор трансляції об'єкта E відносно нерухомої системи координат, а θ – кут його повороту.

Позначимо через $E(u)$ еліпс $E = E(0)$, що повернутий на кут θ і трансльований на вектор v .

Об'єкт E_c має можливість повороту в рамках маневреності відносно основного напрямку руху, а два допоміжні, що задаються півосями, які рівні половині довжині та ширині плеча, мають можливість обертатися в діапазоні кутів $(-\alpha_1; +\alpha_2)$ в горизонтальній площині відносно піднятої руки людини (рис.4, 5)

Таким чином, для побудови моделі людського тіла, що дозволяє враховувати нетравматичні деформації його форми при русі в натовпі і при щільному розміщенні в приміщеннях пропонується представляти його проєкцію у вигляді нежорсткого з'єднання трьох еліпсів: центрального E_c з розмірами піввісь A і B , та «правого» і «лівого» еліпсів E_l , E_r з розмірами a і b (див. Рис 4).

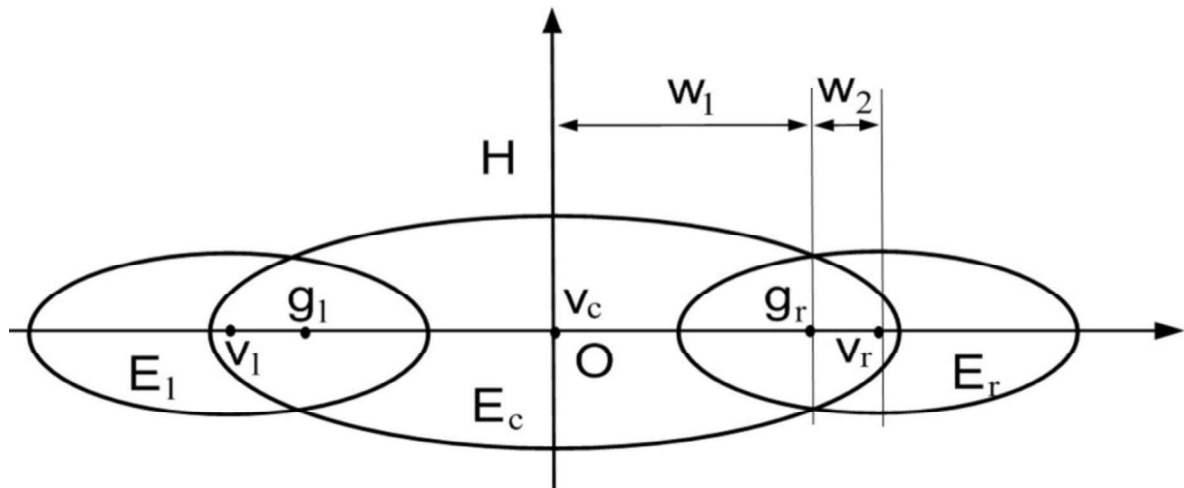


Рис. 4 – Трикомпонентна модель проєкції людського тіла на горизонтальну площину

Еліпси E_{ci} і E_{ri} мають «точку склейки» g_r , а еліпси E_{ci} і E_{li} – «точку склейки» g_l . Точки g_r і g_l лежать на великій півосі еліпса E_{ci} і розташовані симетрично щодо його малої півосі. Положення точок g_r і g_l на площині визначається виключно параметрами розміщення еліпса E_{ci} . Еліпси E_{li} і E_{ri} можуть тільки обертатися на кути в заданому діапазоні (по відношенню до кута повороту еліпса E_{ci}) щодо цих точок (рис.5).

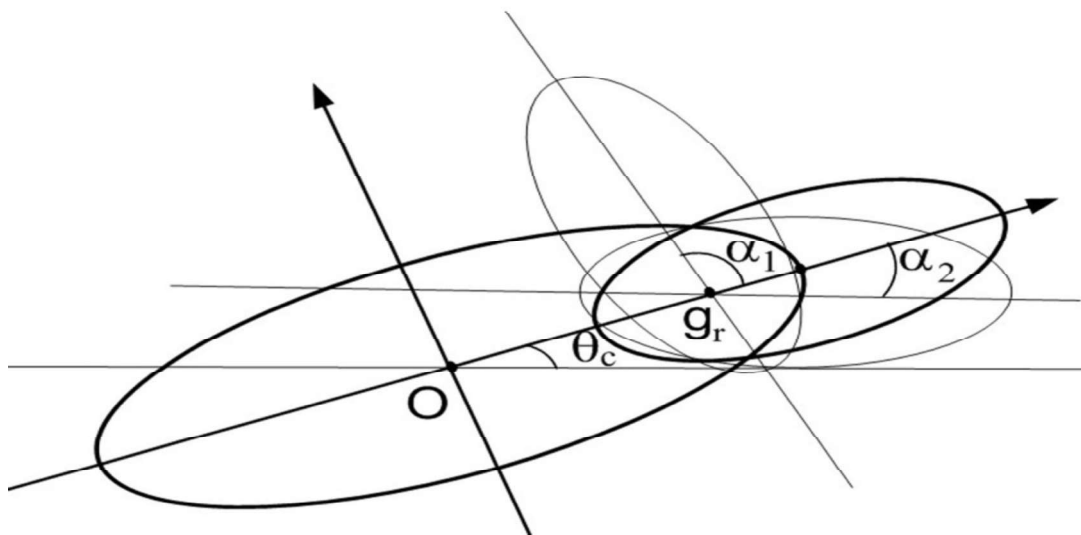


Рис. 5 – Ілюстрація зміни конфігурації складеного об'єкта

Розглянемо об'єкт $H_i = E_{ci} \cup E_{ri} \cup E_{li}$. Положення кожного з об'єктів H_i на площині визначається вектором $u_i = (x_{ci}, y_{ci}, \theta_{ci}, x_{li}, y_{li}, \theta_{li}, x_{ri}, y_{ri}, \theta_{ri})$ при дотриманні обмежень «склеювання»:

$$x_{ci} + w_{i1} \cos \theta_{ci} = x_{ri} - w_{i2} \cos \theta_{ri}, \quad (3)$$

$$y_{ci} + w_{i1} \sin \theta_{ci} = y_{ri} - w_{i2} \sin \theta_{ri}, \quad (4)$$

$$x_{ci} - w_{i1} \cos \theta_{ci} = x_{li} + w_{i2} \cos \theta_{li}, \quad (5)$$

$$y_{ci} - w_{i1} \sin \theta_{ci} = y_{li} + w_{i2} \sin \theta_{li}, \quad (6)$$

і обмежень на діапазон кутів повороту:

$$\theta_{ci} - \alpha_{i2} \leq \theta_{ri} \leq \theta_{ci} + \alpha_{i1}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (7)$$

$$\theta_{ci} - \alpha_{i1} \leq \theta_{li} \leq \theta_{ci} + \alpha_{i2}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (8)$$

Тут w_{i1} , w_{i2} , α_{i1} , α_{i2} - константи, що характеризують фізичні параметри конкретної людини.

З урахуванням вищесказаного, умова неперетинання трикомпонентних об'єктів $H_i = E_{ci} \cup E_{ri} \cup E_{li}$ і $H_s = E_{cs} \cup E_{rs} \cup E_{ls}$ можна представити у вигляді:

$$\Phi^{H_i H_s}(u_i, u_s, t'_{is}) \geq 0, \quad (9)$$

при обмеженнях (3)-(8), де

$$\Phi^{H_i H_s}(u_i, u_s, t'_{is}) = \min\{\Phi^{E_{ci} E_{cs}}(u_{ci}, u_{cs}, t_{is}^{cc}), \Phi^{E_{ri} E_{rs}}(u_{ri}, u_{rs}, t_{is}^{rc}), \Phi^{E_{li} E_{ls}}(u_{li}, u_{ls}, t_{is}^{lc}),$$

$$\Phi^{E_{ci} E_{ls}}(u_{ci}, u_{ls}, t_{is}^{cl}), \Phi^{E_{ri} E_{ls}}(u_{ri}, u_{ls}, t_{is}^{rl}), \Phi^{E_{li} E_{rs}}(u_{li}, u_{rs}, t_{is}^{lr}), \Phi^{E_{ci} E_{rs}}(u_{ci}, u_{rs}, t_{is}^{cr}),$$

$$\Phi^{E_{ri} E_{rs}}(u_{ri}, u_{rs}, t_{is}^{rr}), \Phi^{E_{li} E_{rs}}(u_{li}, u_{rs}, t_{is}^{lr})\},$$

—квазі-phi-функція [4], що описує умови неперетину об'єктів $H_i(u_i)$ і $H_s(u_s)$;

$t'_{is} = (t_{is}^{cc}, t_{is}^{cl}, t_{is}^{cr}, t_{is}^{lc}, t_{is}^{ll}, t_{is}^{lr}, t_{is}^{rc}, t_{is}^{rl}, t_{is}^{rr})$ — вектор допоміжних змінних квазі-phi-функцій, рівності (3)–(6) задають умови «склеювання» складеного об'єкта, нерівності (7)–(8) — обмеження на кути повороту частин складеного об'єкта.

Оцінимо точність апроксимації представлення природних фізичних рухів людини представленням її трикомпонентною моделлю (рис.3-5) та шляхом врахування їх зовнішню a -апроксимації основного еліпса (рис.6).

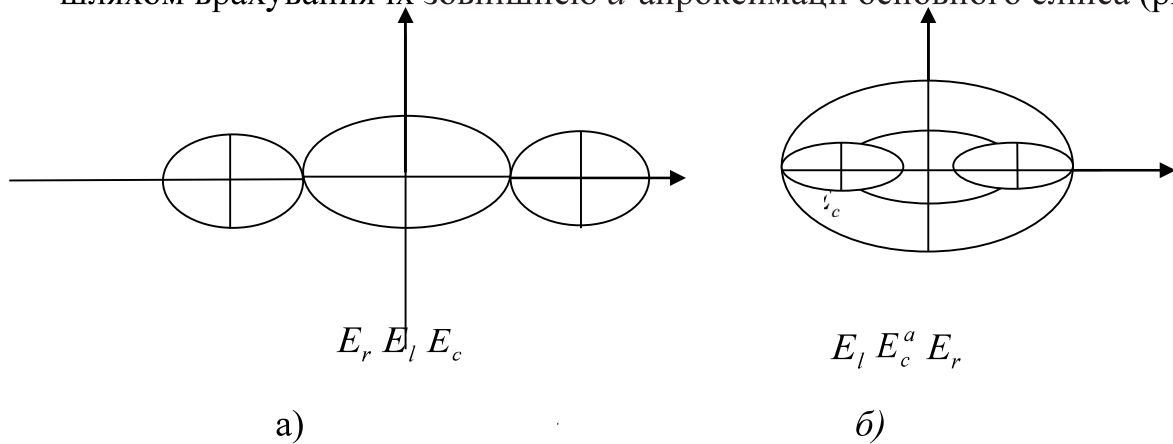


Рис.6 – Ілюстрація до оцінки додаткової площі, що враховує природні фізичні рухи людини шляхом побудови трикомпонентної моделі (рис.6,а) (верхня оцінка) та побудови a -апроксимації проведенням еквідистної лінії (нижня оцінка) (рис.6,б)

Отримаємо *верхню* оцінку площі проєкції тіла людини на площину xOy з урахуванням природних деформацій її тіла представленням її трикомпонентною моделлю, яка представлена на рис.6,а. Нехай еліпси E_c та E_r співпадають вершинами (центр еліпса E_r знаходиться в точці $(A + a_1, 0)$). Нехай еліпси E_c та E_r однаково орієнтовані. Площа еліпса E_r дорівнює $\pi a_1 b_1$. Відповідно, площа E_l з центром в точці $(-A - a_1, 0)$ матиме площу $\pi a_1 b_1$. Тоді додаткова площа, що враховує природні рухи плеча складатиме $\pi a_1 b_1 + \pi a_1 b_1$, або $2\pi a_1 b_1$, так як еліпси E_r та E_l рівні. Позначимо через $\Delta S_{\mathcal{D}} = 2\pi a_1 b_1$. Так як $(a_1 > b_1)$, то

$$\Delta S_{\mathcal{D}} < 2\pi a_1^2. \quad (10)$$

Таким чином, *верхня* оцінка загальної площі проєкції людини з урахуванням природних деформацій складе

$$S_{\mathcal{D}} = \pi AB + 2\pi a_1 b_1.$$

Оцінимо *мінімальну* оцінку, коли ці обмеження задаються проведенням еквідистантних ліній на відстані a_1 від еліпсу E_c . Нехай півосі такого апроксимованого еліпса E_c^a складають відповідно $A_e = A + a_1, B_e = B + a_1$. Площа еліпса з півосями (A_e, B_e) дорівнює $(\pi A_e B_e) = \pi (AB + Aa_1 + Ba_1 + a_1^2)$. Тоді площа еквідистантного кільця складе

$$\Delta S_E = \pi (Aa_1 + Ba_1 + a_1^2). \quad (11)$$

Так як згідно антропологічних даних людини ($A > a_l, B > a_l$), то можна записати

$$\Delta S_E > 3\lambda a_l^2. \quad (12)$$

Враховуючи вирази (10) та (11), можна зробити висновок, що мінімальна оцінка (11) більше максимальної оцінки (10), тобто $\Delta S_D < \Delta S_E$.

Таким чином показано, що $\Delta S_D < \Delta S_E$, що вказує на більш високу точність завдання природних деформацій тіла людини трьома еліпсами, які можуть обертатись в допустимих межах, ніж зовнішня a -апроксимація

Бібліографічний список

1. Kholshchevnikov V. V., Shields T. J., Samoshyn D. A. Galushka M. M. Pedestrian flow modeling: book of abstracts of the 4th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, 8–12 September 2003. University of Ulster, 2003.
2. Kholshchevnikov V. V., Shields T. J., Samoshyn D. A. Foot traffic flows: background for modeling: proceedings of the Second International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, 20–22 August 2003. University of Greenwich, 2003.
3. Кязімов. К.Т. Категорії комфортності руху людей в потоці і способи їх моделювання. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ. 2020. Вип. 20. С. 144–154.
4. Стоян Ю.Г., Панкратов А.В., Романова Т.Е., Чернов Н.И. Квази-phi-функции для математического моделирования отношений геометрических объектов. *Доклады НАН Украины*, 2014. Том 9. С. 49–54.