

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАТРИМОК УЧАСНИКІВ РУХУ ПІД ЧАС ПЕРЕТИНАННЯ ПІШОХОДАМИ ВУЛИЦЬ І ДОРІГ ЧЕРЕЗ РЕГУЛЬОВАНІ ПІШОХІДНІ ПЕРЕХОДИ

Горбачов П. Ф.<sup>1</sup>, Макарічев О. В.<sup>1</sup>, Атаманюк Г. В.<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Анотація.** Отримано аналітичні моделі витрат часу пішоходів і ТЗ на регульованих пішохідних переходах із викличними пристроями, які створюють основу для визначення оптимального варіанта організації дорожнього руху в місцях перетинання пішохідних та транспортних потоків на ділянках міських вулиць і автомобільних доріг залежно від інтенсивності руху його учасників обох видів.

**Ключові слова:** пішохід, транспорт, пішохідний перехід, викличний пристрій, час затримки.

### Вступ

Наземний пішохідний перехід – це один з найголовніших елементів вулично-дорожньої мережі (ВДМ), який може бути зоною транспортних і пішохідних затримок. Транспортні затримки можуть викликати перенапруження водіїв і в зоні пішохідних переходів призводити до швидкої стомлюваності, що, у свою чергу, може стати причиною конфліктних ситуацій і виникнення дорожньо-транспортних пригод (ДТП). Тому зниження затримок у зоні пішохідних переходів є нагальною потребою для розвантаження ВДМ міста та, відповідно, безпеки як самих пішоходів, так і водіїв транспортних засобів (ТЗ).

### Аналіз публікацій

З усіх типів пішохідних переходів найбільш безпечними вважаються регульовані пішохідні переходи (РПП). Умови введення світлофорного регулювання визначаються співвідношенням інтенсивностей транспортних і пішохідних потоків.

Якщо транспортний потік має високу інтенсивність руху, а пішохідний потік у цьому випадку має епізодичний характер, то застосування жорсткого режиму регулювання може призвести до невиправданих транспортних затримок. Тому в таких умовах необхідно застосувати пішохідні викличні пристрої (ПВП), що передбачають переривання транспортного потоку шляхом надходження заявки від пішохода.

Умови застосування РПП із викличним пристроєм (ВП) на перегонах вулиць і доріг, на відміну від «непозначених» та нерегульованих пішохідних переходів, подані в науковій літературі більш широко та вивчалися ще в радянські часи.

У керівництві з регулювання дорожнього руху в містах 1974 р. [1] зазначено, що світлофорну сигналізацію на пішохідному переході, розташованому на перегоні вулиці, слід застосовувати, якщо протягом 8 год (поспіль чи ні) у робочий день інтенсивність руху ТЗ і пішоходів є не меншою за такі величини:

– 600 од./год (для вулиць з розділювальною смугою – 1000 од./год) по головній вулиці у двох напрямках;

– 150 пішоходів переходять цю вулицю в одному, найбільш завантаженому напрямку протягом тих же 8 год.

У чинному українському нормативному документі ДСТУ 4092–2002 [2] в п. 7.10, в умові 2 описуються ідентичні вимоги з керівництвом [1] щодо введення світлофорної сигналізації. З чого випливає, що критерії введення світлофорної сигналізації в [2] варто переглянути, урахувавши сучасний рівень автомобілізації в Україні.

Потрібно відмітити, що в керівництві [1] та нормативному документі [2] визначальними умовами застосування ПВП є тільки інтенсивність транспортних та пішохідних потоків, кількість смуг у цьому випадку не враховується.

Також [2] не містить будь-яких вказівок щодо використання ВП на РПП; одночасно в керівництві [1] надається графік, згідно з яким влаштування ВП на пішохідних переходах рекомендується вводити в тому випадку, якщо точка перетину інтенсивності руху транспортних і пішохідних потоків розташовується вище від лінії на графіку (рис. 1).

В іншому випадку доцільним вважається застосування жорсткого циклу регулювання руху пішоходів та ТЗ.

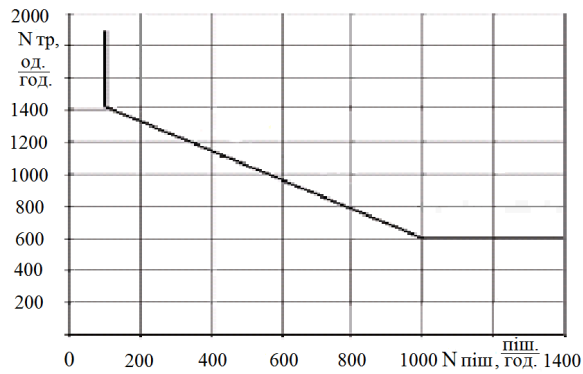


Рис. 1. Графік для визначення необхідності установки пішохідних світлофорів із ВП на пішохідних переходах без острівця безпеки:  $N_{\text{тр}}$  – інтенсивність руху ТЗ;  $N_{\text{піш.}}$  – інтенсивність пішохідного руху

У методичних рекомендаціях щодо регулювання пішохідного руху 1977 р. ПВП застосовується за умови, якщо інтенсивність пішохідного руху по переходу в одному напрямку становить не менше, ніж 50 піш./год, і має епізодичний характер, тобто різко і багаторазово змінюється протягом доби [3]. Інтенсивність руху ТЗ у цьому випадку повинна бути не меншою за 600 авт./год.

У керівництві з проектування міських вулиць і доріг ПВП застосовується за умови інтенсивності транспортного руху понад 600 од./год в обох напрямках, і якщо пішохідний рух має епізодичний характер, різко і багаторазово змінюється протягом доби з інтенсивністю від 100 до 600 піш./год [4].

Але треба враховувати те, що [1], [3] та [4] не входять до нормативної бази України, а рік випуску вказує на їх технічну застарілість.

Вивчаючи умови застосування пішохідних переходів із ВП у зарубіжних країнах, слід вказати Великобританію, яка вже багато років належить до країн із низькими показниками аварійності на дорогах і в якій безпека руху пішоходів є пріоритетною. У цій країні широко застосовуються пішохідні переходи з ВП типу Pelican (Pedestrian Light Controlled Crossing) [5] та Puffin (Pedestrian user friendly intelligent crossing) [6], основні особливості яких подані в табл. 1 [7, 8].

На пішохідних переходах із ПВП Pelican пішохідні сигнали світлофора встановлюються на протилежному боці дороги від ВП. Пішохідна фаза обмежується запрограмованим світлофорним циклом, який розділяє транспортний і пішохідний потоки, тобто перехідні інтервали світлофорного циклу

складаються з декількох тактів, що зменшують тривалість очікування пішоходів.

Таблиця 1 – Характеристика ПВП Pelican та Puffin

Вид ПВП	Особливості ПВП
 Pelican [15]	Пішохідний перехід із ВП, який має червоний /жовтий/зелений сигнали регулювання для автомобілів і червоний/зелений/зелений миготливий сигнал «людина» для пішоходів
 Puffin [15]	Пішохідний перехід із ВП, який відрізняється від Pelican відсутністю миготливого пішохідного зеленого сигналу або миготливого жовтого сигналу для автомобілів

Також ПВП Pelican забезпечують невидиму індикацію того, що безпечно перетинати проїжджу частину (звуковий сигнал або вібраційну кнопку), щоб допомогти пішоходам з порушеннями зору [5].

ПВП Puffin широко застосовується у Великобританії з 2003 р. і є оновленою версією Pelican. Основна відмінність від Pelican полягає в тому, що заборонні та довільні сигнали (червоний/зелений «людина») розташовуються вище ВП, а не з іншого боку дороги, як у Pelican. Також на ПВП Puffin закінчення зеленого сигналу для пішоходів контролюється детектором пішоходів, що фіксує закінчення переходу пішоходом проїзної частини. Це дозволяє раціонально використовувати пішохідний перехід, оскільки водіям завжди горить зелений сигнал світлофора, коли на ньому немає пішоходів. Дослідження 2008 р., проведене на замовлення міністерства транспорту Великобританії, показало, що ПВП Puffin виявилися більш безпечними, ніж переходи типу Pelican, на них припадає менша кількість ДТП. На жаль, ці приклади не надають чітких вказівок щодо доцільності їх використання у різних місцях.

У роботі [9] розглядаються умови застосування пішохідних переходів із ВП, що наведені в зарубіжних нормативних документах (табл. 2).

Оскільки граничні умови введення ВП на РПП характеризуються затримками пішохо-

дів і ТЗ, то можна виділити дисертаційні роботи зарубіжних авторів [9, 10].

Таблиця 2 – Аналіз умов застосування пішохідних переходів із ВП у зарубіжних нормативних документах [7]

Керівництво / нормативний документ	$N_{\text{піш}}$	$N_{\text{шк}}^*$	$N_{\text{тр}}$
Policy and standards for pedestrian crossings / City of Columbia, Policy Resolution 134-00 (США)	50	–	3500
Florida Pedestrian Planning and Design Handbook, 1999 (США)	25	–	600
The Design of Pedestrian Crossings / local Transport Note 2/95, 1995 (Англія)	–	–	3000
Traffic Signal Warrant/Guidelines for Conducting a Traffic Signal Warrant Analysis, 2nd Edition (США)	190	20	–
Pedestrian Crossing Control Manual for British Columbia, 1994 (Канада)	40–60	–	–
Manual on Uniform Traffic Control Devices, 2009 (США)	–	20	–

$N_{\text{шк}}^*$  – інтенсивність руху школярів, піш./год.

У роботі [9] визначено, що на вулицях та дорогах із двома смугами руху, за умови інтенсивності руху пішоходів від 50 до 440 піш./год та ТЗ 1100–1300 од./год на одну смугу, слід застосовувати ПВП.

А у роботі [10] для магістральної вулиці районного значення завширшки від 7 до 14 м регульовані пішохідні переходи з ВП застосовуються за умови таких інтенсивностей:

- 1500–3500 од./год;
- 200–1000 піш./год.

Порівняння між собою умов використання ВП на РПП у роботах [9, 10] показує, що вони мають різні числові показники, які істотно відрізняються один від одного. З цього можна зробити висновок, що підхід до вирішення завдання про граничні умови використання РПП із ВП у цих роботах є не тільки різним, але й має суттєві аналітичні неточності.

Також можна виділити роботу [11], у якій визначалася середня величина затримок пішоходів під час перетинання дороги із двох смуг, за рахунок поділу циклу регулювання ПВП на три інтервали часу, а середня затримка ТЗ на пішохідному переході з ВП розраховувалася за формулою НСМ 2000, але вона

не містить рішень щодо розрахунку сумарних затримок ТЗ і пішоходів.

До відомих математичних моделей у сфері затримок пішоходів на РПП із ВП належать моделі Гріффіта та Дана і Преті [12], які ґрунтуються на дослідженні роботи ПВП Pelican [5]. Недоліком цих моделей є те, що їх розрахунки мають емпіричну основу, а зелений сигнал для транспорту має постійну тривалість [13].

Серед українських досліджень викликає інтерес робота [14], у якій автори подають формулу доцільності застосування світлофорного регулювання на пішохідних переходах, але не зрозуміло, чи доцільно її використовувати як умову щодо введення ВП на РПП. Крім того, у роботі [14] не були показані розрахунки втрат від викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище та втрат від дорожньо-транспортних пригод і методи розрахунку середньої затримки одного пішохода й одного ТЗ на пішохідному переході, які є необхідними для розрахунку сумарних затримок.

#### Мета і постановка завдання

Метою роботи є створення аналітичних залежностей затримок пішоходів і ТЗ під час подолання місць перетину напрямків руху транспортних та пішохідних потоків на РПП залежно від їх інтенсивності.

Аналіз літератури показав, що питання організації світлофорного регулювання на пішохідних переходах має два аспекти, а саме визначення порогових значень інтенсивності руху транспортних та пішохідних потоків, перевищення яких робить доцільним застосування РПП, а також визначення виду РПП – з жорстким циклом або ПВП.

З точки зору економії часу учасників руху другий аспект питання має досить очевидну відповідь – усі РПП на перегонах вулиць та доріг повинні мати ВП. Пояснюється це тим, що будь-яка ділянка дороги підлягає значним коливанням інтенсивності руху в добовому розрізі, що обумовлено особливістю життєдіяльності людей.

У періоди високої інтенсивності руху, для яких більш доцільним є жорсткий цикл світлофорного регулювання, ПВП автоматично переходить у жорсткий режим, оскільки висока інтенсивність підходу пасажирів до РПП буде забезпечувати постійне включення ними дозвільного сигналу протягом періоду пропуску ТЗ.

За умови зниження інтенсивності руху пішоходів ПВП буде економити час ТЗ. Тобто для РПП із жорстким циклом регулювання не існує умов функціонування, за яких він є більш ефективним, ніж ПВП, з точки зору витрат часу учасників руху на подолання РПП.

Жорсткий цикл роботи світлофора на РПП частиною експертів вважається більш безпечним для учасників руху, ніж ПВП, що має рацію, незважаючи на відсутність відповідних кількісних оцінок безпеки руху. Але оскільки питання економії часу завжди вирішується за умов безумовного дотримання всіма учасниками руху вимог ПДР у процесі перетинання РПП, у даній роботі більш ефективним способом регулювання завжди вважається ПВП, та вирішити залишається лише питання визначення порогових значень інтенсивності руху транспортних та пішохідних потоків.

Для досягнення поставленої мети в даній роботі розглядається випадок взаємодії пішохідних і транспортних потоків на РПП, що розташований на перегоні міських вулиць і автомобільних доріг поза зоною впливу перехресть. Ці умови надають можливості використовувати припущення, що прибуття пішоходів та ТЗ до РПП із ВП є найпростішим потоком.

Для побудови моделей необхідно врахувати, що згідно з правилами дорожнього руху (ПДР) [15], а саме розділу 18, п. 18.2, за умови сигналу світлофора, що дозволяє рух ТЗ, водій повинен дати дорогу пішоходам, які закінчують перехід проїзної частини відповідного напрямку руху і для яких може бути створена перешкода або небезпека.

**Побудова моделей затримок пішоходів та ТЗ під час перетинання вулиць і доріг через РПП із ВП**

Оскільки прибуття пішоходів до РПП розглядається як найпростіший потік, розподіл інтервалів у пішохідному потоці підпорядковується показовому закону. Тоді час прибуття пішоходів до РПП є випадковою величиною, що має показниковий розподіл з параметром  $\lambda$  (піш./с), рівним інтенсивності підходу пішоходів.

Відповідно до поставленого завдання у процесі перетинання пішоходами РПП із ВП на перегонах вулиць і доріг виникають три основних випадки.

У першому випадку розглядається ситуація, коли в РПП із ВП немає пішоходів, тобто

пішоходи тільки прибувають до переходу і для ТЗ уже тривалий час горить дозвільний сигнал світлофора (рис. 2), рівняння (1).

$$T_{п} = \tau_{г}, \text{ якщо } t_0 \geq t_{д}, \quad (1)$$

де  $t_0$  – час, коли в РПП немає пішоходів (перед приходом чергового пішохода), с;  $\tau_{г}$  – час гальмування ТЗ до повної зупинки, на який затримується включення дозвільного сигналу для пішоходів після натискання на кнопку його виклику, с;  $t_{д}$  – мінімальна тривалість дозвільного сигналу для ТЗ, с;  $T_{п}$  – час затримки пішохода, с.

Завдяки відсутності післядії для показникового розподілу ймовірностей часу між сусідніми прибуттями пішоходів до РПП, випадкова величина  $t_0$  до появи першого пішохода та після його появи, за умови заборонного сигналу, має показниковий розподіл ймовірностей з тим самим параметром  $\lambda$ . Тоді у першому випадку, коли  $t_0 > t_{д}$ , ймовірність цієї умови має вигляд:

$$P\{t_0 > t_{д}\} = \exp(-\lambda t_{д}). \quad (2)$$

У другому випадку розглядається ситуація, коли від пішохода, що підійшов до ПВП, надходить заявка на вмикання пішохідної фази, коли ще не вичерпаний мінімальний час дозвільного сигналу для ТЗ. Тоді проміжок часу, необхідний для переключення РПП, який є часом затримки пішохода  $T_{п}$ , містить залишок мінімального часу (рис. 3).

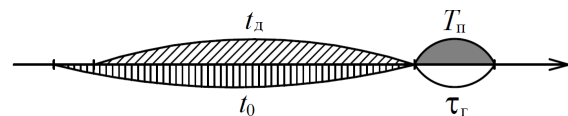


Рис. 2. Складові часу подолання РПП для першого випадку

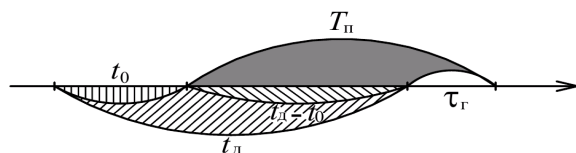


Рис. 3. Складові часу подолання РПП для другого випадку

У цьому випадку час затримки пішохода  $T_{п}$  знаходиться у проміжку  $[\tau_{г}; \tau_{г} + t_{д}]$  (рис. 3) та має місце рівність:

$$T_n = \tau_r + (t_d - t_0). \quad (3)$$

Тоді нерівність  $T_n \leq x$  означає, що

$$(t_d - t_0) + \tau_r \leq x$$

або

$$t_0 \geq \tau_r + t_d - x. \quad (4)$$

Тобто у другому випадку має місце така функція розподілу часу затримки  $T_n$ :

$$F_{T_n}(x) = P\{T_n \leq x\} = P\{(t_d - t_0) + \tau_r \leq x\} = P\{t_0 \geq \tau_r + t_d - x\} = \exp\{-\lambda[\tau_r + t_d - x]\}, \quad (5)$$

коли  $\tau_r \leq x < \tau_r + t_d$ .

Отже, загальна функція розподілу часу очікування пішохода має такий вигляд:

$$F_{T_n}(x) = P\{T_n \leq x\} = \begin{cases} 0, & x < \tau_r \\ \exp\{-\lambda[\tau_r + t_d - x]\}, & \tau_r \leq x < \tau_r + t_d \\ 1, & x > \tau_r + t_d \end{cases}. \quad (6)$$

Або з використанням індикаторів подій:

$$F_{T_n}(x) = I(\tau_r \leq x < \tau_r + t_d) \cdot \exp\{-\lambda[\tau_r + t_d - x]\} + I(x > \tau_r + t_d). \quad (7)$$

У результаті формула (7) дозволяє обчислити математичне сподівання часу затримки пішохода  $\bar{T}_n$  у вигляді:

$$\begin{aligned} \bar{T}_n &= \int_0^{\infty} [1 - F_{T_n}(x)] dx = \int_0^{\tau_r} 1 \cdot dx + \int_{\tau_r}^{\tau_r + t_d} (1 - \exp\{-\lambda[\tau_r + t_d - x]\}) dx = \tau_r + \left( -\frac{1}{\lambda} \exp\{-\lambda[\tau_r + t_d - x]\} \right) \Big|_{\tau_r}^{\tau_r + t_d} + (\tau_r + t_d) - \tau_r = \\ &= \tau_r + t_d - \frac{1}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda t_d)). \end{aligned} \quad (8)$$

На відміну від перших двох випадків, де для ТЗ горить дозвільний сигнал світлофора  $t_d$ , у третьому випадку розглядається ситуація, коли пішохідна фаза вже увімкнена і для ТЗ горить заборонний сигнал світлофора  $t_3$ , мінімальна тривалість якого є постійною ве-

личиною, достатньою для подолання переходу пішоходами. Оскільки третій випадок не збільшує середнього часу затримки пішохода під час переходу дороги, формула (8) являє собою залежність між цим часом та інтенсивністю найпростішого пішохідного потоку, за умови заданих часу гальмування ТЗ і мінімальної тривалості зеленого сигналу для їх проїзду.

Вона створює можливість для розрахунку загальних витрат пішоходів у процесі перетинання РПП із ВП на ділянках міських вулиць та автомобільних доріг. Це досягається простим множенням середнього часу затримки переходу випадково обраного пішохода  $\bar{T}_n$  на інтенсивність пішохідного потоку  $\lambda$ :

$$T_{зп} = \tau_r + t_d - \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_d}) \cdot \lambda, \quad (9)$$

де  $T_{зп}$  – загальні витрати часу пішоходів на подолання місця перетину транспортного та пішохідного потоків у РПП із ВП на ділянці ВДМ за заданий проміжок часу, с/с.

Для прийняття конкретних умов переходу через РПП із ВП можна отримати графічне подання залежності (9) (рис. 4).

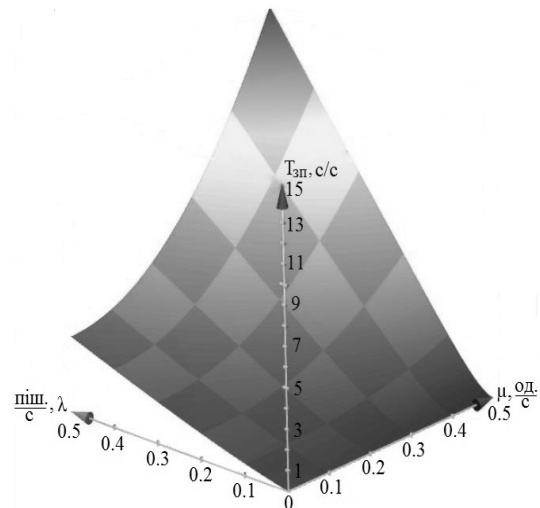


Рис. 4. Загальні витрати часу пішоходів залежно від інтенсивності транспортного та пішохідного потоків

Осями графіка на рис. 4 є загальні витрати часу пішоходів, інтенсивність транспортного та пішохідного потоків у місці переходу. Для інтенсивностей руху транспортних та пішохідних потоків взято один діапазон варіювання – від 0 до 1800 од./год (0,5 од./с). Графік побудований для ділянки міської

вулиці з двома смугами руху зі смугою за-  
вширшки 3,75 м. Час гальмування ТЗ до пов-  
ної зупинки розрахований за умови, що ТЗ  
рухається зі швидкістю  $V_T = 50$  км/год, або  
 $V_T = 13,9$  м/с:

$$t_r = \frac{V_T}{a} = \frac{13,9}{3} = 4,63 \approx 5 \text{ с}, \quad (10)$$

де  $a$  – уповільнення гальмування, яке дорів-  
нює  $3 \text{ м/с}^2$  [16, 17].

Мінімальна тривалість дозвільного сигна-  
лу (основного такту) для ТЗ  $t_d$  визначається  
з такої залежності [18]:

$$t_d = T_{\text{ц}} - T_{\text{пр}} - t_{\text{мін}}, \quad (11)$$

де  $T_{\text{ц}}$  – тривалість циклу регулювання, с;  
 $T_{\text{пр}}$  – тривалість проміжного такту в фазі  
регулювання, с;  $t_{\text{мін}}$  – час, необхідний для  
пропуску пішоходів у зоні пішохідного пере-  
ходу, с.

$$t_{\text{мін}} = 5 + B_{\text{пш}}/V_{\text{пш}}, \quad (12)$$

де  $B_{\text{пш}}$  – ширина проїжджої частини, м;  
 $V_{\text{пш}}$  – постійна швидкість руху пішохода в  
зоні пішохідного переходу, м/с.

Тривалість циклу регулювання визнача-  
ється за загальновідомими залежностями  
[18]:

$$T_{\text{ц}} = B/(2A) + \sqrt{B^2/(4A^2) - C/A}; \quad (13)$$

$$A = 1 - y_n; \quad (14)$$

$$B = 2,5 \cdot T_{\text{пр}} - T_{\text{пр}} \cdot y_n + t_{\text{мін}} + 5; \quad (15)$$

$$C = (T_{\text{пр}} + t_{\text{мін}}) \cdot (1,5 \cdot T_{\text{мін}} + 5), \quad (16)$$

де  $y_n$  – сума фазових коефіцієнтів.

Фазові коефіцієнти визначають для кож-  
ного з напрямків руху на перегонах вулиці  
[18]:

$$y_{ij} = N_{ij}/M_{nij}, \quad (17)$$

де  $y_{ij}$  – фазовий коефіцієнт даного напрям-  
ку;  $N_{ij}$  та  $M_{nij}$  – інтенсивність руху ТЗ для

розглянутого періоду доби й потік насичення  
в цьому напрямку даної фази регулювання,  
од./год

$$M_{nij} = 525 \cdot B_{\text{пч}}, \quad (18)$$

де  $B_{\text{пч}}$  – ширина проїжджої частини в дано-  
му напрямку руху, м.

Залежності (10)–(18) створюють можли-  
вість проведення розрахунку затримок як  
пішоходів, так і ТЗ на переході з ПВП.

Одночасно, якщо водій ТЗ потрапляє на  
заборонний сигнал світлофора  $t_3$ , час затри-  
мки ТЗ у пішохідного переходу буде мати  
рівномірний розподіл в інтервалі  $[0; t_3]$ ,  
тобто:

$$P\{T_{\text{т}} \leq x\} = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \frac{x}{t_3}, & 0 \leq x \leq t_3 \\ 1, & x > t_3 \end{cases}, \quad (19)$$

де  $T_{\text{т}}$  – час затримки ТЗ, с;  $t_3$  – мінімальна  
тривалість для заборонного сигналу ТЗ, с.

Тоді час затримки ТЗ дорівнює:

$$T_{\text{т}} = \frac{1}{2} \cdot t_3. \quad (20)$$

З (20) втрачений ТЗ час, за умови очіку-  
вання дозвільного сигналу світлофора, до-  
рівнює:

$$T_{\text{т}} = \tau_{\text{т}} + \frac{1}{2} \cdot t_3. \quad (21)$$

А час переходу пішохода через РПП мож-  
на поділити на два періоди  $T_1$  і  $T_2$ :

$$T_1 = \frac{1}{\lambda} + T_{\text{п}}; \quad (22)$$

$$T_2 = t_3. \quad (23)$$

Тоді ймовірність для ТЗ потрапити на за-  
боронний сигнал світлофора дорівнює:

$$P = \frac{T_2}{T_1 + T_2} = \frac{t_3}{\frac{1}{\lambda} + T_{\text{п}} + t_3}. \quad (24)$$

Унаслідок цього математичне сподівання  
часу затримки ТЗ біля регульованого перехо-  
ду з ВП  $\bar{T}_{\text{т}}$  описується такою залежністю:

$$\bar{T}_T = \left( \tau_r + \frac{1}{2} t_3 \right) \cdot P = \left( \tau_r + \frac{1}{2} t_3 \right) \cdot \frac{t_3}{\frac{1}{\lambda} + \tau_r + t_d - \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_d}) + t_3} = \frac{\left( \tau_r + \frac{1}{2} t_3 \right) \cdot t_3}{\tau_r + t_d + \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t_d} + t_3}. \quad (25)$$

Загальні витрати часу ТЗ на подолання РПП із ВП отримуються множенням середнього часу затримки ТЗ на інтенсивність транспортного потоку  $\mu$  (25).

$$T_{зг} = \frac{\left( \tau_r + \frac{1}{2} t_3 \right) \cdot t_3}{\tau_r + t_d + \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t_d} + t_3} \cdot \mu. \quad (26)$$

Залежність (26) доповнює (9) у питанні узагальнення сумарних витрат усіх учасників руху на РПП із ВП. Її графік, побудований за тих же умов, що й попередній графік, наведений на рис. 5.

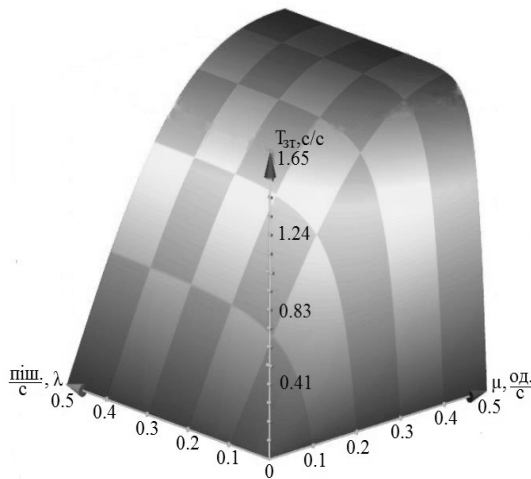


Рис. 5. Загальні витрати часу ТЗ залежно від інтенсивності транспортного та пішохідного потоків

Тривалість заборонного сигналу (такту)  $t_3$ , що є константою, приймається рівною величині, яка дорівнює часу переходу пішоходом проїзної частини в зоні РПП, тобто за формулою (12), і становить:

$$t_3 = 5 + 7,5/1 = 12,5 \approx 13 \text{ с.}$$

Максимальні затримки пішоходів та ТЗ в обраному діапазоні інтенсивностей руху транспортних та пішохідних потоків становлять відповідно 1,65 с/с та 15 с/с. Ці величини насправді є середньою довжиною черги пішоходів перед РПП із ВП та є цілком зрозумілими за умови високих інтенсивностей транспортного та пішохідного потоків.

Для розрахунку сумарних витрат учасників руху на подолання РПП необхідно визначити перевідний коефіцієнт між часом затримки пішоходом і часом затримки ТЗ, який можна виразити через середню кількість людей, що знаходяться в салоні ТЗ.

### Висновки

Чинні на цей час нормативи України не надають проектувальникам схем ОДР чітких вказівок щодо умов використання регульованих пішохідних переходів з виключними пристроями або з жорстким циклом регулювання на ВДМ міст та регіонів.

З точки зору економії часу учасників руху для РПП із жорстким циклом регулювання не існує умов функціонування, за яких він є більш ефективним, ніж ПВП. Застосування жорсткого циклу роботи світлофора на РПП може бути результатом прийняття політичного рішення для підвищення безпеки учасників руху в періоди низької інтенсивності руху.

Отримані в роботі аналітичні залежності витрат часу пішоходів та ТЗ на подолання РПП створюють основу для розрахунку та аналізу сумарних витрат часу всіх учасників руху в цій ситуації, з метою визначення раціональних умов використання ПВП з точки зору економії часу.

### Література

1. Руководство по регулированию дорожного движения в городах. Москва: Стройиздат, 1974. 97 с.
2. ДСТУ 4092–2002. Безпека дорожнього руху. Світлофори дорожні. Загальні технічні вимоги, правила застосування та вимоги безпеки. Київ, 2002. 27 с.
3. Методические рекомендации по регулированию пешеходного движения. Москва: ВНИИБДД МВД СССР, 1977. 51 с.
4. Руководство по проектированию городских улиц и дорог. Москва: Стройиздат, 1980. 224 с.
5. Pelican crossing. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Pelican\\_crossing](https://en.wikipedia.org/wiki/Pelican_crossing) (дата звернення: 17.01.2019).
6. Puffin crossing. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Puffin\\_crossing](https://en.wikipedia.org/wiki/Puffin_crossing) (дата звернення: 17.01.2019).

7. LTN 2/95 The Design of Pedestrian crossings. URL: <https://www.gov.uk/government/publications/the-design-of-pedestrian-crossin-gs-ltn-295>. (дата звернення: 17.01.2019).
8. Puffin crossings. Good Practice Guide – Release 1. URL: <https://webarchive.nationalarchives.gov.uk> (дата звернення: 17.01.2019).
9. Слободчикова Н. А. Совершенствование организации дорожного движения на основе применения пешеходных вызывных устройств: дис. канд. техн. наук: спец. 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта». Иркутск, 2010.
10. Симуль М. Г. Повышение безопасности дорожного движения в зонах пешеходных переходов на магистральных улицах: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: спец. 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта». Омск, 2012. 20 с.
11. Скульбеденко Н. А. Модель оценки задержек на пешеходных регулируемых переходах с вызывными устройствами // Вестник ИрГТУ. 2008. № 4. С. 105–109.
12. Скульбеденко Н. А., Антонова А. А. Обзор методов расчета задержек пешеходов на регулируемых пешеходных переходах. URL: <http://waksman.ru/Russian/Konference/2009/II/sku1.htm> (дата звернення: 17.01.2019).
13. Скульбеденко Н. А. Методы расчета задержек пешеходов на регулируемых пешеходных переходах // Вестник ИрГТУ. 2009. № 3. С. 76–79.
14. Рейцен Е. О., Толлок О. В., Уразбаев В. О. Науковий підхід до визначення граничних умов застосування різних типів пішохідних переходів на перегонах міських вулиць // Містобудування та територіальне планування. 2014. Вип. 52. С. 346–355.
15. Правила Дорожного руху України із змінами, внесеними постановою Кабінету Міністрів України від 22.03.2017 № 161. Редакція діє з 05.04.2017. URL: <http://pdd.ua> (дата звертання: 21.01.2019).
16. Кременец Ю. А., Печерский М. П., Афанасьев М. Б. Технические средства организации дорожного движения: учебник для вузов. Москва: Академкнига, 2005. 279 с.
17. Иларионов В. А. Судебная автотехническая экспертиза. Москва: ВНИИСЭ, 1980. Ч. 2. 230 с.
18. Кременец Ю. А. Технические средства организации дорожного движения: учебник для вузов. Москва: Транспорт, 1990. 255 с.
19. вимоги, правила застосувannya та вимоги безпеки [State Standard 4092–2002. Road safety. Traffic lights road. General technical requirements, application rules and safety requirements]. Kyiv [in Ukrainian].
20. Metodicheskie rekomendacii po regulirovaniyu peshehodnogo dvizheniya. (1977). [Methodological recommendations for the regulation of pedestrian traffic]. Moscow, VNIIBDD MVD SSSR [in Russian].
21. Rukovodstvo po proektirovaniyu gorodskikh ulits i dorog. (1980). [Design manual for urban streets and roads]. Moscow, Stroizdat Publ [in Russian].
22. Pelican crossing. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Pelican\\_crossing](https://en.wikipedia.org/wiki/Pelican_crossing) (accessed: 17.01.2019).
23. Puffin crossing. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Puffin\\_crossing](https://en.wikipedia.org/wiki/Puffin_crossing) (accessed: 17.01.2019).
24. LTN 2/95 The Design of Pedestrian crossings. Available at: <https://www.gov.uk/government/publications/the-design-of-pedestrian-crossin-gs-ltn-295> (accessed: 17.01.2019).
25. Puffin crossings. Good Practice Guide – Release 1. Available at: <https://webarchive.nationalarchives.gov.uk> (accessed: 17.01.2019).
26. Slobodchikova N. A. (2010). Sovershenstvovanie organizacii dorozhnogo dvizheniya na osnove primeneniya peshehodnyh vyzyvnyh ustrojstv. Dys. kand. tekhn. nauk. [Improving the organization of traffic on the basis of the use of pedestrian push buttons. Cand. eng. sci. diss.]. Irkutsk [in Russian].
27. Simul' M. G. (2010). Povyshenie bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya v zonah peshehodnyh perehodov na magistral'nyh ulicach: avtoref. dis. na soisk. uchen. step. kand. tekhn. nauk: spets. 05.22.10 «Ekspluatatsiya avtomobil'nogo transporta». [Improving road safety in pedestrian crossing zones on main streets. Abstract of a thesis PhD in Engineering sciences diss. 05.22.10 «Operation of automobile transport»]. Omsk [in Russian].
28. Skul'bedenko N. A. (2008). Model' otsenki zaderzhok na peshehodnykh reguliruemyykh perekhodakh s vyzyvnyimi ustroystvami [Model evaluation of delays on regulated pedestrian crossings with push buttons]. Vestnik IrGTU Publ., 4, 105–109 [in Russian].
29. Skul'bedenko N. A., Antonova A. A. (2009). Obzor metodov rascheta zaderzhok peshehodov na reguliruemyykh peshehodnykh perekhodakh. [Review of methods for calculating pedestrian delays at regulated pedestrian crossings]. Available at: <http://waksman.ru/Russian/Konference/2009/II/sku1.htm> (accessed: 17.01.2019).
30. Skul'bedenko N. A. (2009). Metody rascheta zaderzhok peshehodov na reguliruemyykh peshehodnykh perekhodakh. [Methods for calculating pedestrian delays at regulated pedestrian crossings]. Vestnik IrGTU Publ., №3, 76–79.

### References

1. Rukovodstvo po regulirovaniyu dorozhnogo dvizheniya v gorodah. (1974). [Guide to urban traffic regulation]. Moscow, Stroizdat Publ [in Russian].
2. DSTU 4092–2002. (2002). Bezpeka dorozhn'oho rukhu. Svitlofory dorozhni. Zahal'ni tekhnichni



14. Reytsen E. O., Tolok O. V. Urazbayev V. O. (2014). Naukovyy pidkhid do vyznachennya hranychnykh umov zastosovannya riznykh typiv pishokhidnykh perekhodiv na perehonakh mis'kykh vulyts' [Scientific approach to the definition of boundary conditions for the use of various types of pedestrian crossings on the sections of city streets]. *Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya*, 52, 346–355 [in Ukrainian].
15. Pravyla Dorozhn'oho rukhu Ukrainy iz zminamy vnesenymy postanovoyu Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 22.03.2017 № 161. Redaktsiya diye z 5 kvitnya 2017 roku [Road Traffic Rules of Ukraine, as amended by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated March 22, 2017, No. 161. The edition is valid from April 5, 2017]. Available at: <http://pdd.ua> (accessed 21.01.2019).
16. Kremenets Yu. A., Pecherskii M. P., Afanas'ev M. B. (2005). *Tekhnicheskie sredstva organizatsii dorozhnogo dvizheniya* [Technical means of traffic organization]. Moscow, Akademkniga Publ [in Russian].
17. Ilarionov V. A. ed. (1980). *Sudebnaya avtotekhnicheskaya ekspertiza, chast' 2* [Autotechnical examination, part 2]. Moscow, VNIIE Publ. [in Russian].
18. Kremenets Yu. A. (1990). *Tekhnicheskie sredstva organizatsii dorozhnogo dvizheniya*. [Technical means of traffic organization]. Uchebnik dlya vuzov. Moscow, Transport Publ. [in Russian].

**Горбачов Петро Федорович**<sup>1</sup>, д.т.н., проф., каф. транспортних систем і логістики, [gorbachov.pf@gmail.com](mailto:gorbachov.pf@gmail.com), тел. +380 57 707-37-83,

**Макаричев Олександр Володимирович**<sup>1</sup>, проф., д.ф.-м.н., каф. транспортних систем і логістики, [amsol2904@gmail.com](mailto:amsol2904@gmail.com), тел. +380 57 707-37-83,

**Атаманюк Ганна Володимирівна**<sup>1</sup>, аспірант, каф. транспортних систем і логістики, [annie.ukraine@gmail.com](mailto:annie.ukraine@gmail.com), тел. +380 57 707-37-83.

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

**Исследование задержек участников движения при пересечении пешеходами улиц и дорог через регулируемые пешеходные переходы**  
**Аннотация.** Получены аналитические модели затрат времени пешеходов и транспортных средств на регулируемых пешеходных переходах с вызывными устройствами, которые создают основу для определения оптимального варианта организации дорожного движения в местах пересечения пешеходных и транспортных потоков на участках городских улиц и автомобильных дорог в зависимости от интенсивности движе-

ния участников обоих видов.

**Ключевые слова:** пешеход, транспорт, пешеходный переход, вызывное устройство, время задержки.

**Горбачёв Петр Федорович**<sup>1</sup>, д.т.н., проф., каф. транспортных систем и логистики, [pf@gmail.com](mailto:pf@gmail.com),

тел. +380 57 707-37-83,

**Макаричев Александр Владимирович**<sup>1</sup>, проф., д.ф.-м.н., каф. транспортных систем и логистики, [amsol2904@gmail.com](mailto:amsol2904@gmail.com),

тел. +380 57 707-37-83,

**Атаманюк Анна Владимировна**<sup>1</sup>, аспирант, каф. транспортных систем и логистики, [annie.ukraine@gmail.com](mailto:annie.ukraine@gmail.com),

тел. +380 57 707-37-83.

<sup>1</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Украина, г. Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25.

### Investigation of Average Delays of Road Users at Signalized Pedestrian Crossings

**Abstract. Problem.** The adoption of informed decisions on the providing pedestrian crossings with traffic lights with push buttons is an urgent problem, which is mainly caused by the lack of sufficient substantiation of the boundary conditions for their use. First of all, this concerns stand-alone pedestrian crossings on the streets and roads, since most of the scientific work in this field is devoted to the study of the interaction of traffic and pedestrian flows at intersections. The current regulatory documents in our country describe the requirements for the introduction of traffic lights, but they do not contain any conditions for the introduction of push buttons at regulated pedestrian crossings. Existing models for pedestrian and vehicle delays are characterized by errors and significant simplifications in the formulas. Therefore, the problem of determining the boundary conditions for the use of traffic lights at stand-alone pedestrian crossings remains open. **Goal.** The aim of the work is to create analytical formulas for the delay time of pedestrians and vehicles when overcoming places of intersection of traffic and pedestrian flows at stand-alone regulated pedestrian crossings, depending on the flow intensity. **Methodology.** To determine the delays of road users overcoming the regulated stand-alone pedestrian crossing with push button the analytical methods of research were used. It was taken as a basis that the movement of vehicles and pedestrians on streets and roads outside the influence zone of intersections can be considered as the simplest flow. **Results.** The obtained analytical dependences allow us to calculate the total time spent by pedestrians and vehicles for overcoming the intersection of traffic and pedestrian flows, depending on their intensity. The formed models are the basis for creating a general dependence of the total time expenditure of all participants of the movement. **Originality.** For the first time, a comprehensive analytical approach to determining roads users' delays

when they overcome regulated stand-alone pedestrian crossings with push button is fully built. It is based on correct assumptions for the selected object of study and allows an objective estimation of the time delays by road users. **Practical value.** The dependencies obtained in the work are aimed at improving the normative documents of Ukraine concerning the usage of regulated pedestrian crossings with push buttons on the streets and roads.

**Key words:** pedestrian, vehicle, pedestrian crossing, push button, delay time.

**Horbachov Peter**<sup>1</sup>, professor, Doct. of Science (Eng.), Transportation Systems and Logistics Department, pf@gmail.com, tel. +380 57 707-37-83,

**Makarichev Aleksandr**<sup>1</sup>, professor, Doct. of Science (Phys.-Math.), Transportation Systems and Logistics Department,

amsol2904@gmail.com,  
tel. +380 57 707-37-83,

**Atamanyuk Anna**<sup>1</sup>, graduate student, Transportation Systems and Logistics Department,

[annie.ukraine@gmail.com](mailto:annie.ukraine@gmail.com), +380 57 707-37-83.

<sup>1</sup>Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

---