

## ПОВЕРХНЕВА КОНЦЕНТРАЦІЯ СТОКУ ТА РОЗРАХУНКОВИЙ ПОХИЛ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРИГ

### THE STOCK CONCENTRATION ON THE SURFACE AND CALCULATED SLOPE OF THE ROADS



**Солодкий Сергій Йосифович**, доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», завідувач кафедри «Автомобільні дороги та мости», e-mail: [s.solodkyy@ukr.net](mailto:s.solodkyy@ukr.net), тел. +380322582517

<https://orcid.org/0000-0001-9829-5123>



**Каськів Володимир Іванович**, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном [vi\\_kas@ukr.net](mailto:vi_kas@ukr.net), +380504458544

<https://orcid.org/0000-0002-8074-6798>



**Гаврищук Владислав Володимирович**, спеціаліст з технічної підтримки ТОВ «АКО Будівельні Елементи Лтд.», [vlad.havryshchuk@gmail.com](mailto:vlad.havryshchuk@gmail.com), тел.: +380963796185

<https://orcid.org/0000-0003-3164-4426>

**Анотація.** Виконано аналіз існуючих методів розрахунку тривалості поверхневої концентрації. Виявлено недоцільність застосування даних методів при проектуванні водовідведення на автомобільних дорогах. Параметри шороховатості та коефіцієнт поверхні басейна стоку характеризують кількість затриманого стоку на покритті, але дані величини є характерними для визначення об'єму, а не інтенсивності. Доцільно застосовувати для характеристики втрат – змочування поверхні. Доведена необхідність застосування поздовжнього похилу для визначення розрахункового похилу ділянки та розрахункової ширини водозбірної площі. Наведена методика визначення розрахункового похилу та розрахункової ширини, для лінійних у плані водозбірних площ. Отримані результати показують, що при ширині проїзної частини 7,5м ширина площі водозбору змінюється в діапазоні від 7,506м до 30,323м, що безпосередньо впливає на кількість стоків.

**Ключові слова:** автомобільна дорога, поверхневе водовідведення, ширина водозбору, лінійний водозбірний басейн, водовідвідний канал, поздовжній похил, поверхнева концентрація.

**Постановка проблеми.** Проблемами вивчення умов формування дощового стоку з територій водозбірних басейнів та дослідженням роботи систем водовідведення, їх розрахунків займалися такі

науковці: Алексєєв М. І., Белов М. М., Дикаревський В. С., Курганов А. М., Жук В. М., Ткачук С. Г., Сальчук В. Л., Ткачук О. А., Шевчук О. В., Dziopak J., James W., Horton R., Huder W., Mays L. W., Rossman L. A., Weitman D. та інші. Розрахунок систем поверхневого водовідведення здійснюється на основі емпіричних досліджень для труб або відкритих русел водойм. При розрахунку систем поверхневого водовідведення основне значення мають рідкі опади, у вигляді дощів, що потребують невідкладного відведення.

Відповідно до чинного в Україні нормативного документа [1], час поверхневої концентрації дощового стоку потрібно розраховувати або приймати в населених пунктах за відсутності внутрішньоквартальних закритих дощових мереж таким, що дорівнює 5–10 хв, а за їх наявності – 3–5 хв. При розрахунку внутрішньоквартальної водовідвідної мережі, час поверхневої концентрації рекомендується приймати таким, що дорівнює 2–3 хв.

На відміну від загальноприйнятих умов розрахунку елементів водовідведення з урбанізованих територій міст, автомобільні дороги мають особливості стікання та формування максимального стоку. Водопроникність та втрати об'єму стоку на схилах залежать від типу конструкції дорожнього покриття. Штучні поверхні відведення поверхневого стоку характеризуються як поздовжнім, так і поперечним ухилом. Поздовжні похили для доріг I-х категорій з максимальними швидкостями руху 110-130 км/год становлять 1-50‰ [2] при рівнинних умовах будівництва, а поперечні похили проїзної частини автомобільних доріг - 25‰ на прямолінійних ділянках.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Всі дослідження зводяться до емпіричного визначення об'єму стоку розрахункового дощу. Серед залежностей для визначення часу поверхневої концентрації найвідомішою є формула Абрамова-Шигоріна [3]. Вона отримана для дощів зі спадним степеневим законом зміни інтенсивності в часі:

$$t_{con} = \left( \frac{1.5 \cdot n_m^{0.6} \cdot L_{con}^{0.6} \cdot 166.7^{0.5}}{Z_{mid}^{0.3} \cdot i_{n.kb}^{0.3} \cdot A^{0.5}} \right)^{1/(1-0.5n)}, \quad (1)$$

де  $n_m$  – коефіцієнт шорсткості покриття басейна стоку;  $L_{con}$  – довжина басейна стоку, м;  $i_{n.kb}$  – похил поверхні басейна стоку;  $A, n$  – емпіричні коефіцієнти, що описують степеневий закон зміни інтенсивності дощу ( $q=A/t_n$ ) і залежать від кліматичних особливостей регіону;  $Z_{mid}$  – коефіцієнт поверхні басейна стоку.

При визначенні витрати стоку, коефіцієнт поверхні басейну, який фактично є визначальним для коефіцієнта стоку, як і коефіцієнт шороховатості покриття, недоцільноприймати в розрахунок. Введення в розрахунок даних характеризує відсоток затримування стоку, який не добігає до елементів водовідведення. Вони дають узагальнене поняття, на яку величину зменшиться об'єм стоку від дощу в цілому, а не в одиницю часу.

У закордонній інженерній практиці спеціально для розрахунку часу концентрації плівкового потоку широко використовується формула Овертона-Мідовса [4]:

$$t_{con} = \frac{5.476 \cdot (n_1 \cdot L)^{0.8}}{P_2^{0.5} \cdot i^{0.4}}, \quad (2)$$

де  $n_1$  – ефективний коефіцієнт шорсткості поверхні;  $L$  – довжина потоку, м;  $P_2$  – висота шару опадів 24-годинного дощу з частотою повторюваності 2 роки, мм;  $i$  – геодезичний похил місцевості, м/м [5].

Дана формула, як і формула Абрамова-Шигоріна, описує загальний об'єм стоку, а не максимальну секундну витрату.

За методом Ізарда – Гупта [5]:

$$t_{con} = \left( \frac{0.024 \cdot n_h^{1/3} + \frac{878k}{i_h^{2/3}}}{\frac{L^{2/3}}{c^{2/3}} \cdot H^{1/3}} \right), \quad (3)$$

де  $C$  – коефіцієнт стоку [6];  $i_h$  – інтенсивність випадання дощу за шаром, мм/год;  $H$  – перепад відміток початкового і кінцевого контрольного перерізу, м.

**Мета роботи** – виконати аналіз відомих методів розрахунку поверхневої концентрації стоку. Визначити основні фактори, які впливають на тривалість поверхневої концентрації. Дослідити вплив позовжнього похилу на результати гідравлічних розрахунків.

У всіх вищенаведених формулах, однією з визначальних характеристик є вплив шороховатості покриття. Основою даної роботи є виконання дослідження раціональних факторів визначення тривалості поверхневої концентрації стоку.

Фактичні умови утворення поверхневого стоку з дорожніх покриттів досліджені недостатньо, оскільки не враховані особливості стоку з мікробасейнів. Тривалість поверхневої концентрації залежить від двох параметрів: часу, протягом якого відбувається змочування поверхні, та тривалості добігання стоку від найвіддаленішої точки басейну до водовідвідного каналу.

Першою складовою тривалості поверхневої концентрації дощового стоку є змочування поверхні. Мірою змочування є рівноважний кут, який утворює краплина із твердою поверхнею. Його визначають як кут між поверхнею твердого тіла та дотичною в точці дотику трьох фаз (рис.1).

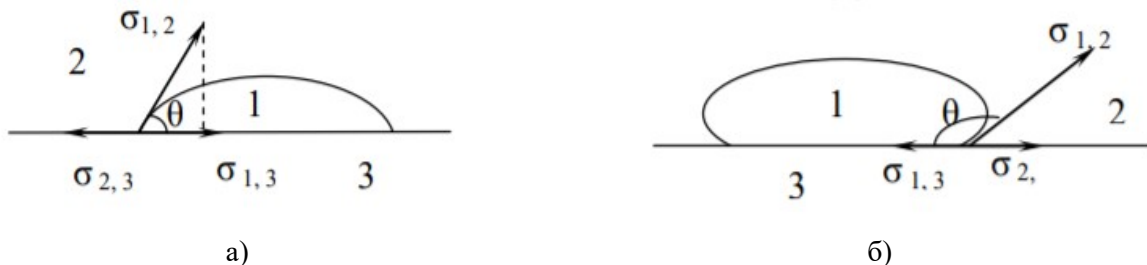


Рисунок 1 – Змочування поверхні  
 а) ефективне змочування; б) неякісне змочування  
 Figure – - wetting of the surface  
 a) effective wetting; b) poor wetting

$\sigma_{1-3}$ ,  $\sigma_{1-2}$ ,  $\sigma_{2-3}$  – поверхневі натяги на межі тверде тіло – газ, тверде тіло – рідина, рідина – газ, відповідно.

Тверда поверхня краще змочується рідиною при менших силах зчеплення між її молекулами (когезія) та при більших силах прилипання до поверхні твердого тіла (адгезія). Критерій змочування можна визначити через роботу адгезії і роботу когезії.

$$W_a = \sigma_{1-3} + \sigma_{2-3} - \sigma_{1-2}, \quad (4)$$

Оскільки,  $\sigma_{2-3} \cdot \cos\theta = \sigma_{1-3} - \sigma_{1-2}$ , рівняння (4) можна виразити у вигляді:

$$W_a = \sigma_{2-3} + \sigma_{2-3} \cdot \cos\theta = \sigma_{2-3}(1 + \cos\theta), \quad (5)$$

Рівняння (5) – це рівняння Дюпре – Юнга [7]. Оскільки  $W_c = 2 \cdot \sigma_{2-3}$ , то

$$\cos\theta = \frac{W_a - \sigma_{2-3}}{\sigma_{2-3}} = \frac{2W_a - W_c}{W_c}, \quad (6)$$

Змочування поверхні характеризується співвідношенням адгезії рідини з покриттям до її когезії.

В основу гідравлічного розрахунку покладено, що рух стоків прямопропорційно залежить від похилу [1]. Фактично, автори відомих методик розрахунку поверхневої концентрації [3-6]

використовують поперечний похил. Застосування поперечного похилу в розрахунку поверхневої концентрації для лінійних систем поверхневого водовідведення [8] з лінійних у плані водозбірних басейнів не відповідає дійсності. Зокрема, в розрахунках застосовуються параметри:  $i$  – поперечний похил лінійних у плані водозбірних басейнів,  $b$  – шлях поверхневої концентрації, рисунок 2.

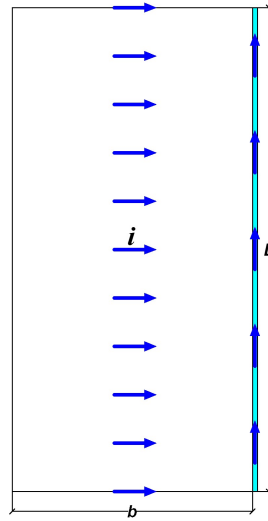


Рисунок 2 – Типова схема визначення тривалості поверхневої концентрації  
Figure 2 – A typical scheme for determining the duration of surface concentration definition

Дана методика являється дієвою при умові відсутності на автомобільній дорозі поздовжнього похилу, або при оцінці виключно в двохвимірній системі (рис. 3).

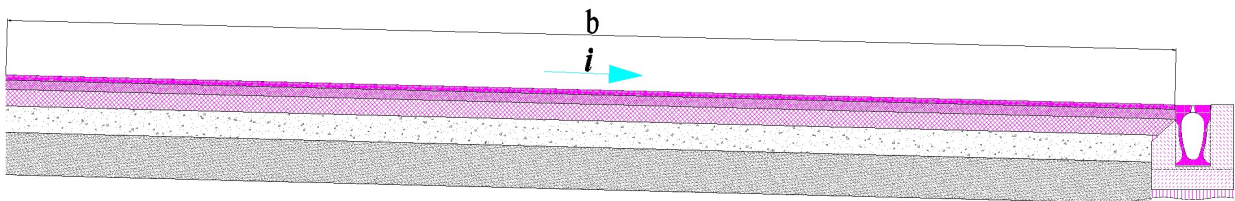


Рисунок 3 – Поперечний розріз смуг руху в одному напрямку на прямолінійній ділянці  
Figure 3 – Cross section of lanes in one direction on a straight section

Для визначення розрахункового похилу та розрахункової ширини площі водозбірного басейну з автомобільної дороги, розглянемо елементарну ділянку шириною  $b$ , довжиною  $L$ . Відтворимо дану ділянку автомобільної дороги в декартовій системі координат у вигляді елементарного прямокутника ABCD (рис. 4).

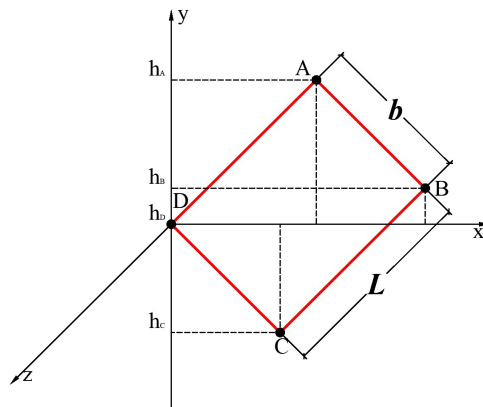


Рисунок 4 – Ділянка автомобільної дороги в декартовій системі координат  
 Figure 4 – Section of highway in Cartesian coordinate system

Рух стоків з площини AD відбувається у напрямку площини BC, але, в залежності від поздовжнього ухилу ділянки, величина добігання стоку від точки A буде змінюватись в діапазоні від точки B до точки C та окреслена прямокутним трикутником ABC (рис. 5).

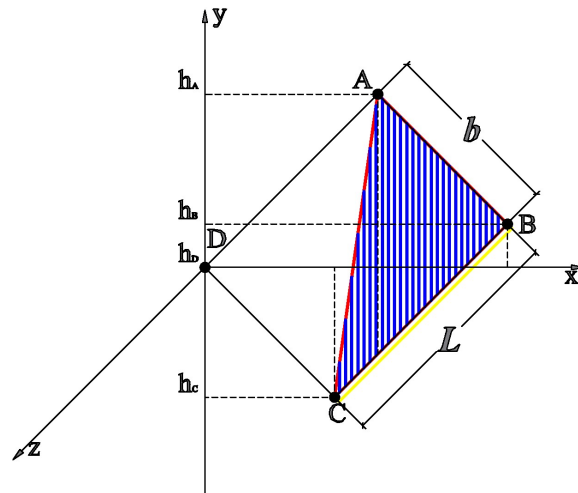


Рисунок 5 – Площина зміни розрахункової ширини площі водозбору  
 Figure 5 – Plane of change of the calculated width of the catchment area

Розглянемо прямокутний трикутник ABC, в якому гіпотенуза AC – довжина розрахункової ширини водозбірного басейну лінійної форми. Враховуючи, що  $b$  – це ширина проїзної частини автомобільної дороги [2], та величина стала.

$$b = const, \quad (7)$$

Поперечний похил проїзної частини –  $i_{pop}$ , на прямолінійних ділянках автомобільних доріг:

$$i_{pop} = const, \quad (8)$$

При умові, що водовідвідний канал розташовано на ділянці BC, визначимо за теоремою Піфагора розрахунковий похил з автомобільної дороги до водовідвідного каналу (рис. 6):

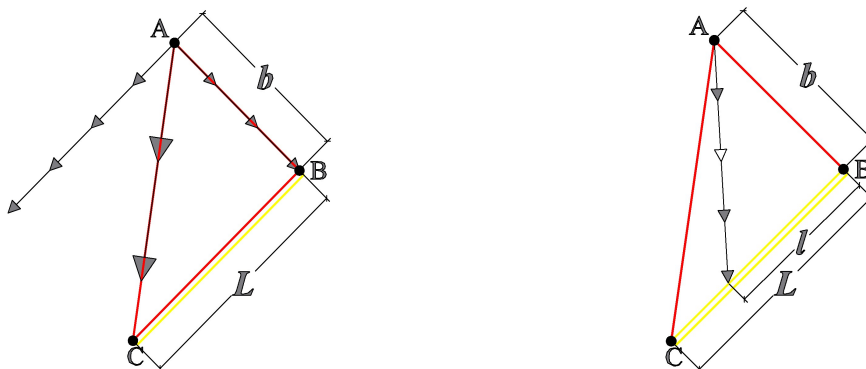


Рисунок 6 – Визначення розрахункового похилу  
 Figure 6 – Determination of the calculated slope

$$i_{роз} = \sqrt{i_{pop}^2 + i_{пов}^2}, \quad (9)$$

Величина добігання стоку з найвіддаленішої ділянки лінійного в плані водозбірного басейну з сталою шириною та сталим поперечним похилом матиме залежність від співвідношення поздовжнього до поперечного ухилів:

$$l = \left( \frac{i_{\text{пов}}}{i_{\text{поп}}} \right) \cdot b, \quad (10)$$

Враховуючи (10), маємо два сектори визначення довжини добігання дощового стоку до водозбірного каналу (рис. 7):

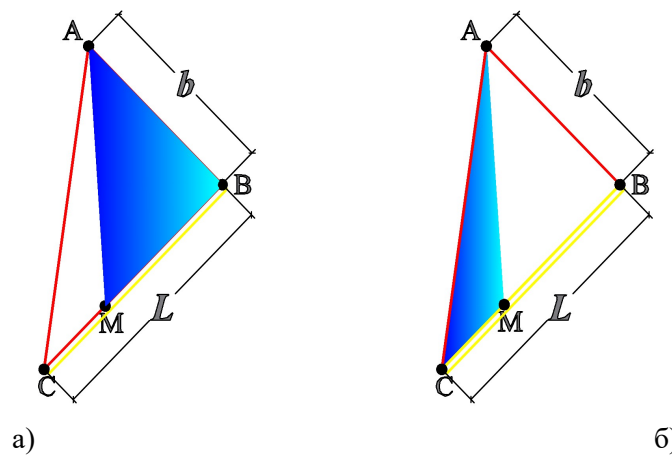


Рисунок 7 – Діапазони розрахункових площин, які відповідають умовам (11) та (12)  
 Figure 7 – Ranges of computational planes meeting conditions (11) and (12)

Сектор АВМ буде розрахунковим при умові:

$$\left( \frac{i_{\text{пов}}}{i_{\text{поп}}} \right) \leq 1, \quad (11)$$

а ВМ змінюватиметься в діапазоні 0- $b$ .

Сектор АМС відповідає умові:

$$\left( \frac{i_{\text{пов}}}{i_{\text{поп}}} \right) > 1, \quad (12)$$

Отже, величина добігання від найвіддаленішої точки лінійної за формою площі водозбору:

$$B_{\text{роз}} = \sqrt{b^2 + \left( \frac{i_{\text{пов}}}{i_{\text{поп}}} \cdot b \right)^2}, \quad (13)$$

З урахуванням основних вимог [2] та додаткових умов, виконано розрахунок зміни розрахункової відстані добігання дощового стоку, при умові ширини проїзної частини в одному напрямку – 7,50м:

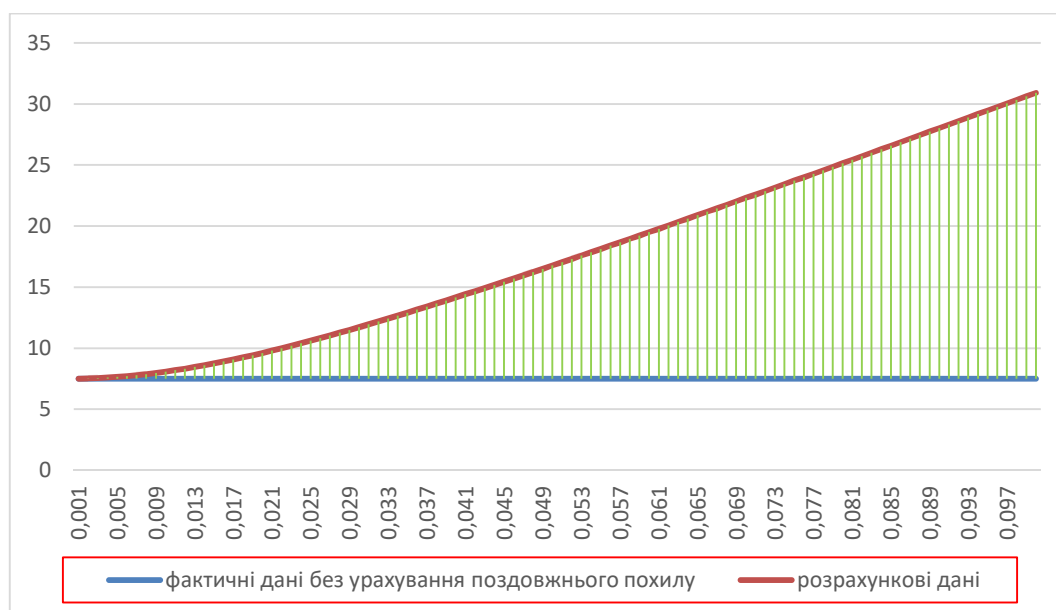


Рисунок 8 – Зміна величини розрахункової ширини автомобільної дороги в залежності від поздовжнього похилу

Figure 8 – Change in the value of the estimated width of the highway depending on the longitudinal slope

Отже, нехтування в розрахунках системи водовідведення лінійних об'єктів таким параметром як поздовжній ухил ділянки автомобільної дороги, загалом, вносить погрішність у результати 1-300%.

**Висновки.** В роботі проведено аналіз діючих методів розрахунків тривалості поверхневої концентрації в гідравлічних розрахунках. Автомобільні дороги вищих категорій будуються виключно з асфальтобетонного або цементобетонного покриття, які, згідно [1], віднесені до категорії водонепроникних, так як характеризуються мінімальними показниками втрати стоку. Для автомобільних доріг показники стоку та шороховатості поверхні доцільно застосовувати для визначення загальних об'ємів стоку з територій, а не максимальної витрати, згідно якої визначають системи водовідведення. В роботі визначено вплив поздовжнього похилу на зміну параметрів розрахункового похилу лінійної в плані водозбірної ділянки. Розрахункова величина добігання стоку при ширині проїзної частини – 2x3,75м та врахуванні поздовжнього похилу, в діапазоні 0,001-0,1 змінюється в діапазоні від 7,506м до 30,323м. При визначенні тривалості утворення поверхневої концентрації доцільно враховувати дві складові: тривалість змочування та тривалість добігання стоку до водозбірного каналу.

#### Перелік посилань

1. ДБН В.2.5-75:2013 Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. [Чинний від 01.01.2014] Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України. 2013. 219с.
2. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво. [Чинний від 01.04.2016] Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2015, 91с.
3. Калицун В.И. Водоотводящие системы и сооружения: учеб. пособие/ В.И. Калицун. – М.:Стройиздат, 1987. – 336с.
4. Urban Hydrology for Small Watersheds. TR-55. – United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service, 1986. –164 p.
5. Ткачук С.Г. Регулювання дощового стоку в системах водовідведення: монографія/ С. Г. Ткачук, В. М. Жук. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2012. – 216 с.
6. Stormwater Drainage Manual. City of Columbus. Division of Sewerage and Drainage Department of Public Utilities. 2006.

7. Боднар Р. Т. Розроблення методів та засобів контролю змочуваності твердих тіл рідинами: Дис. ... кан. техн. наук: 05.11.13 – I., 2006.– 279 с.
8. EN 1433:2002 Drainage channels for vehicular and pedestrian areas - Classification, design and testing requirements, marking and evaluation of conformity

## THE STOCK CONCENTRATION ON THE SURFACE AND CALCULATED SLOPE OF THE ROADS

**Serhiy Solodkyy**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Lviv Polytechnic National University, Head of the Department of Motor Roads and Bridges, e-mail: s.solodkyy@ukr.net, +380322582517, ORCID 0000-0001-9829-5123

**Volodymyr Kaskiv**, Candidate of Engineering Science (Ph.D.), Associate Professor, National Transport University, Associate Professor of Department of Transport Construction and Property Management, vi\_kas@ukr.net, +380504458544, ORCID 0000-0002-8074-6798

**Vladyslav Havryshchuk**, ACO Building Materials Ltd., Kyiv, vlad.havryshchuk@gmail.com, +380963796185 ORCID 0000-0003-3164-4426

**Abstract.** The analysis of existing calculating methods of the surface concentration duration was performed. These methods' application in the highways drainage design is shown to be inappropriate. The amount of delayed drainage basin runoff on the cover is characterized by such parameters as roughness and the surface coefficient. But these values are specific to determining volume rather than intensity. It is advisable to use the surface wetting to characterize losses. The necessity of using a longitudinal slope to determine the calculated slope of the site and the estimated width of the catchment area is proved. The determining method of the calculated slope and the estimated width for linear in terms of catchment areas is shown. The obtained results show that at the width of the roadway 7.5m, the width of the catchment area varies in the range from 7.506m to 30.323m, which directly affects the amount of runoff.

**Keywords:** road, surface drainage, width of the water supply, linear water supply area, drainage channel, longitudinal slope, the stock concentration.

### References

1. DBN B.2.5-75: 2013 Sewage. External networks and structures. Basic design principles. [Effective 01.01.2014] View. offic. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine. 2013. 219p. [in Ukrainian]
2. DBN B.2.3-4: 2015 Highways. Part I. Designing. Part II. Construction. [Effective 04/01/2016] View. offic. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2015, 91 p. [in Ukrainian]
3. Kalitsun V.I. Drainage systems and structures: textbook. allowance / V.I. Kalitsun. - M.: Stroyizdat, 1987/ - 336p. [in Russian]
4. Urban Hydrology for Small Watersheds. TR-55. – United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service, 1986. –164 p.
5. Tkachuk S. Rainwater runoff regulation in drainage systems: a monograph / S. Tkachuk, V. Zhuk. - Lviv: Edition of the Lviv Polytechnic, 2012. - 216 p. [in Ukrainian]
6. Stormwater Drainage Manual. City of Columbus. Division of Sewerage and Drainage Department of Public Utilities. 2006.
7. Bodnar R. Development of methods and means of control of wettability of solids by liquids: Dis. ...Candidate of Technical Sciences: 05.11.13 - I., 2006.– 279 p. [in Ukrainian]
8. EN 1433:2002 Drainage channels for vehicular and pedestrian areas - Classification, design and testing requirements, marking and evaluation of conformity.