

УДК 628.1

Vladyslav Havryshchuk, Ph.D., <https://orcid.org/0000-0003-3164-4426>Bohdan Sossa, Ph.D., <https://orcid.org/0000-0003-4484-4865>*State University of Trade and Economics (SUTE), Kyiv, Ukraine*

MAIN FACTORS IN THE FORMATION OF SURFACE RUNOFF FROM THE DECK OF ARTIFICIAL STRUCTURES

Abstract

Introduction. Effective management of surface runoff from urbanized areas is a key task in modern construction, directly impacting the safety, functionality, and longevity of structures. Traditional solutions and calculations that permit the flooding of a catchment area up to the height of a curbstone are unacceptable for use on bridges. Incorrect calculation of drainage parameters can lead to aquaplaning, saturation of structural elements, and their subsequent destruction, which necessitates the improvement of existing methodologies. The primary method used in Ukraine for calculating stormwater runoff from a catchment basin is the limiting intensities method, described in [4]. Globally, Manning's formula [1-3, 11] is widely used and applied.

A separate, yet critically important, and often-ignored aspect is the relationship between theoretically justified minimum slopes and the accuracy of their practical implementation. When designing and constructing bridge structures, the determination and provision of minimum longitudinal slopes required for effective drainage depend directly on the accuracy of measuring equipment (levels, total stations) and the qualifications of the workers. Small slopes can turn out to be less than the permissible measurement error, making their practical realization impossible and leading to the formation of stagnant zones. Thus, the analysis of the influence of slopes must be integrated with an assessment of the practical feasibility of the specified parameters.

Additionally, the probability of errors in theoretical calculations must be considered, and a significant challenge is the correct practical implementation of design solutions. In this context, the construction camber, which is a pre-calculated imitation of reverse curvature, is a mandatory design element for span structures to compensate for their deflection under permanent and temporary loads. Inaccuracies in the determination or implementation of these elevations directly affect the actual longitudinal and transverse slopes on the road surface. Even minor deviations in the construction camber elevations can nullify the design slopes needed for effective drainage, leading to the formation of local areas of water stagnation and impaired drainage functionality.

This study simulates the formation of surface runoff using Manning's formula [1-3, 11] and the limiting intensities method [4]. During the simulation of surface runoff movement, the main task was to determine the maximum depth of the surface runoff layer, followed by identifying the key factors influencing its magnitude. The simulation of surface runoff formation was performed considering variable longitudinal and transverse pavement slopes, the geometric parameters of the catchment area, the distance between water intake elements, and their width.

Problem Statement. One of the prerequisites for the effective functioning of a bridge's drainage system and the protection of its structures is the rate at which surface runoff is received by water intake elements. The primary indicator that determines the speed of runoff movement is the surface slope. Errors and inaccuracies can lead to a decrease in slope and a reduction in the effectiveness of the drainage system.

Objective. To simulate the process of surface runoff formation using the Manning and limiting intensities methods. To determine the volume of runoff that forms from a local catchment area in front of a drainage element. To determine the minimum permissible longitudinal slopes for bridges, taking into account the need to ensure the functionality of the drainage system.

Materials and Methods. This study employs a comprehensive approach based on the analysis of scientific and technical developments in the field of surface drainage and stormwater sewerage design, as well as practical experience in their installation. The methodological basis of the work is an analysis of current building codes and a comparison with relevant foreign regulatory documents and technical literature. To ensure the comprehensiveness of the study, domestic and international experience gained during the design, installation, and operation of drainage systems has been taken into account. Mathematical modeling methods were used to determine the optimal key factors that govern the magnitude of surface runoff formation and the minimum permissible longitudinal slopes of the bridge deck that ensure the effective functioning of the drainage system.

Results. The key factors influencing the formation of surface runoff have been identified. The magnitude of the longitudinal slope that ensures the effectiveness of the drainage system has been substantiated.

Conclusions. The research demonstrates that to ensure effective drainage and prevent the destruction of bridge structures, it is necessary to consider not only theoretical calculations but also the practical implementation of design solutions. Achieving a minimum permissible longitudinal slope of no less than 0.2 % is a key condition for ensuring the reliable functioning of the drainage system.

Keywords: bridge, surface runoff, longitudinal and transverse slope, runoff volume, water intake element.

Introduction

The design of road transport infrastructure, particularly bridges, aims to solve technical, economic, and environmental challenges. Design solutions for ensuring the reliable operation of structures are based not only on quality and strength but also on protection from the effects of the natural environment [5-7]. The existing requirements for bridge drainage design negatively impact the provision of inter-repair periods [8]. The requirement to place the drainage axis at a distance of 200-500 mm from the curbstone is a regulatory deficiency that creates significant technological difficulties. This distance is too small for effective compaction of the asphalt concrete pavement, which is critically important for its durability. The use of the necessary compaction equipment is impossible, and the use of manual tools does not guarantee the required compaction coefficient. As a result, this area remains uncompacted, making it vulnerable to deformation under load, water penetration into the roadbed, and rapid deterioration. The conditions for installing a drainage axis set back from the curbstone are also complicated by a reverse slope, which leads to an increased concentration of moisture directly along the axis of the vehicle's wheel track.

The spacing between drainage inlets is not an arbitrary value but an important design parameter determined during the design phase. It depends on a number of factors, including:

- Rainfall intensity: Higher intensity requires closer spacing.
- Hydraulic characteristics: The design of the drainage system must account for water flow rates.
- Bridge geometric parameters: The length and width of the carriageway, as well as the magnitude of the longitudinal and transverse slopes, influence the speed and volume of runoff, which in turn determines the required spacing.
- Permissible runoff depth: The design must ensure that the depth of the water layer does not exceed permissible limits, which prevent aquaplaning and ensure traffic safety.

Analysis of Recent Research and Publications. The study of bridge drainage issues dates back to 1982. Marsalek was one of the first to present hydraulic performance curves and new design procedures, emphasizing the need to account for susceptibility to clogging. In 2005, Mohamed M. Mekkawy, D. White, M. Suleiman, and S. Sreekanthan proposed constructing a drainage layer from porous backfill. Amin Akhnoukh and Rudolf Seracino argued for the installation of a closed drainage network on bridges. In general, research into drainage issues has been ongoing for less than 50 years [1-3, 5-7, 9-11].

Objective. The aim of this work is to analyze the feasibility of designing surface drainage systems as part of a complex of treatment facilities on public roads. It seeks to determine the impact on cost minimization when calculating the road right-of-way and to analyze existing methods for treating surface runoff.

Materials and Methods

The paper presents modelling of surface runoff formation, which is an example of hydraulic analysis of surface runoff on sloped surfaces. It is based on the empirical and theoretical principles of hydraulics, in particular the Manning formula, which describes turbulent flow in thin layers of water. Such models are used in engineering practice to assess the risk of aquaplaning, excessive wetting of pavements and design drainage systems, ensuring that the maximum runoff depth does not exceed critical values (2-5 mm for traffic safety). The modelling takes into account the surface geometry and climatic parameters (using Kyiv as an example).

The modelling is carried out iteratively, with a set of combinations of parameters, in order to calculate the maximum runoff depth (y_{max}) at the end point of the catchment, per catchment end point. The process is based on a kinematic wave for surface runoff, where the Manning formula is applied to estimate depth as a function of discharge, roughness and slope. Calculation algorithm [12]:

$$T_{ti} = \frac{K_u}{I^{0.4}} \left(\frac{nL}{\sqrt{S}} \right)^{0.6}, \quad (1)$$

where T_{ti} — duration of surface runoff concentration,
 n = roughness coefficient (see Table 3-2) [12],
 L = length of the drain, m,
 I = rainfall intensity, $\frac{mm}{hr}$,
 S = surface slope, $\frac{m}{m}$,
 K_u = empirical coefficient equal to 6.9.

$$V = K_c k S_p^{0.5}, \quad (2)$$

where V — average velocity (m/s),
 K_c = 1.0,
 V = velocity, m/s (ft/s),
 k = cross-sectional coefficient (Table 3-3),
 S_p = slope, %.

$$V = (K_c/n) R^{2/3} S^{1/2}, \quad (3)$$

where n = roughness coefficient (see Table 3-2) [12],
 R = hydraulic radius (defined as the flow area divided by the wetted perimeter), m.

Collection and determination of input parameters

Longitudinal slope (S_{long} , in %) is the slope in the direction of the main water flow, along the length of the runoff (L). Values range from 0.0 % to 4.0 %, reflecting flat (horizontal) to steep surfaces.

Transverse slope (S_{cross} , in %) is the slope perpendicular to the longitudinal slope, typical for roadways on straight and curved sections (2.5 – 5.0 %). It affects the direction of flow, but in this model, as can be seen from the data, it does not directly change y_{max} , indicating a simplification.

Catchment width (B , in m) is the size of the plane from which runoff accumulates (4.5 – 17.5 m), equivalent to the width of a road or lane. It determines the area of the basin.

Runoff length (L , in m) – the distance in the direction of flow (4.0 – 12.0 m), which represents the path of runoff accumulation to the collection point (e.g., storm drain). This is a key parameter, as the flow rate is proportional to L .

Additional constants: Manning's roughness coefficient (n , typically 0.011 – 0.016 for asphalt), fall intensity (i , mm/hour, often 40 – 100 mm/hour for design rain), runoff coefficient ($\psi \approx 0.9$ for impervious surfaces). These values are not specified in the table, but are derived by reverse engineering (e.g., $i \approx 40$ mm/hour to match $y = 1.3$ mm at $S_{long} = 0.1$ %).

Rainwater runoff on a flat asphalt concrete road surface is modelled as surface runoff. This is a thin layer of water flowing under the action of gravity on an inclined surface. Manning's formula is used for calculations, since the surface is conditionally impermeable and runoff occurs quickly without significant seepage (Fig. 1), Table 1.

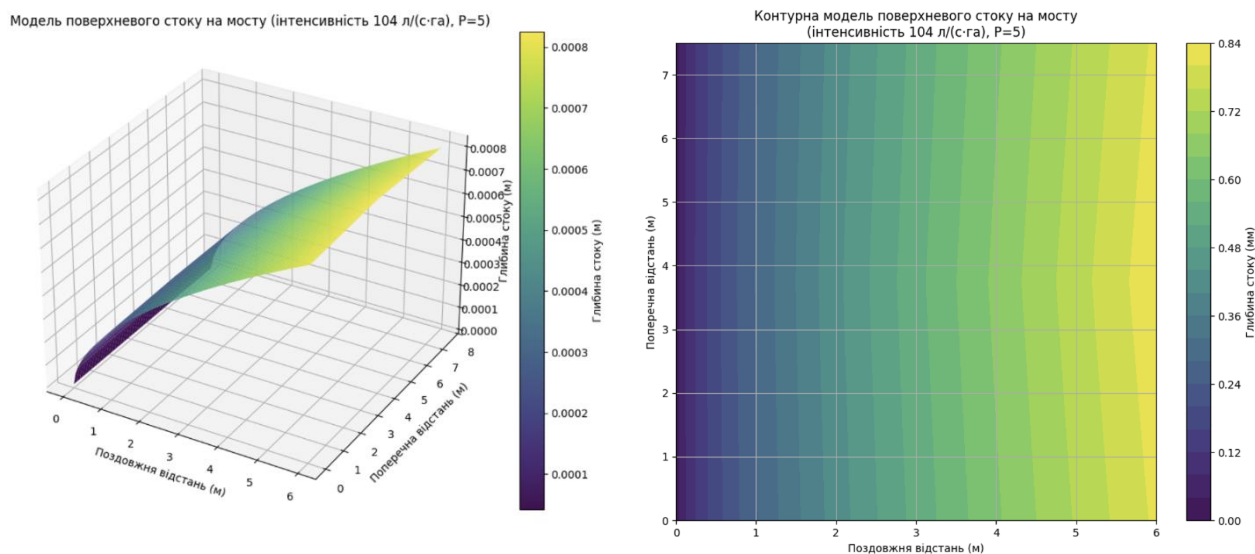


Figure 1 — Model of surface runoff from the bridge pavement at $q_{20} = 104 \text{ l}/(\text{sec} \cdot \text{ha})$ and $P = 5$ years

Table 1

Results of modelling the formation of runoff

Longitudinal slope (%)	Transverse slope (%)	Width of the catchment area (m)	Length (m)	Max. drain depth (mm)
0	2.5	4.5	6	3.30
0.1	2.5	4.5	6	1.65
0.2	2.5	4.5	6	1.34
0.3	2.5	4.5	6	1.19
0.4	2.5	4.5	6	1.09
0.5	2.5	4.5	6	1.02
0.6	2.5	4.5	6	0.97
0.7	2.5	4.5	6	0.92
0.8	2.5	4.5	6	0.89
0.9	2.5	4.5	6	0.85
1.0	2.5	4.5	6	0.83
1.1	2.5	4.5	6	0.80
1.2	2.5	4.5	6	0.78
1.3	2.5	4.5	6	0.77
1.4	2.5	4.5	6	0.75
1.5	2.5	4.5	6	0.73
1.6	2.5	4.5	6	0.72
1.7	2.5	4.5	6	0.71

End of Table 1

Longitudinal slope (%)	Transverse slope (%)	Width of the catchment area (m)	Length (m)	Max. drain depth (mm)
1.8	2.5	4.5	6	0.69
1.9	2.5	4.5	6	0.68
2.0	2.5	4.5	6	0.67
2.1	2.5	4.5	6	0.66
2.2	2.5	4.5	6	0.65
2.3	2.5	4.5	6	0.64
2.4	2.5	4.5	6	0.64
2.5	2.5	4.5	6	0.63
2.6	2.5	4.5	6	0.62
2.7	2.5	4.5	6	0.61
2.8	2.5	4.5	6	0.61
2.9	2.5	4.5	6	0.60
3.0	2.5	4.5	6	0.60
3.1	2.5	4.5	6	0.59
3.2	2.5	4.5	6	0.58
3.3	2.5	4.5	6	0.58
3.4	2.5	4.5	6	0.57
3.5	2.5	4.5	6	0.57
3.6	2.5	4.5	6	0.56
3.7	2.5	4.5	6	0.56
3.8	2.5	4.5	6	0.55
3.9	2.5	4.5	6	0.55
4.0	2.5	4.5	6	0.55

According to [4], the modelling of the second option was performed taking into account formulas (4, 5):

$$Q_r = \frac{z_{mid} A^{1.2} F}{t_r^{1.2n-0.1}} \eta \cdot m, \quad (4)$$

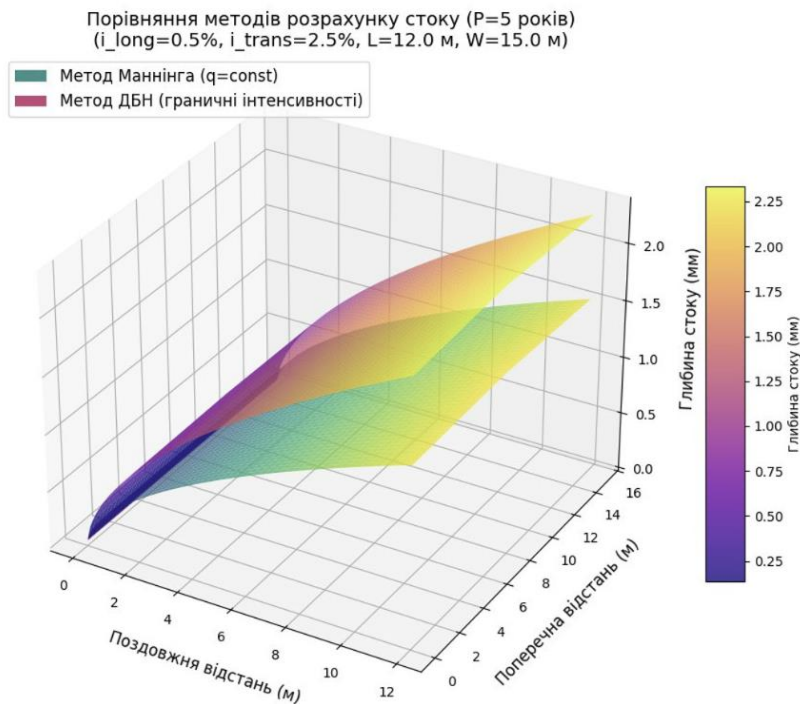
where z_{mid} — is the average value of the coefficient characterising the surface area of the catchment basin;
 F — is the total area of the catchment basin, ha;
 t_r — is the calculated duration of rainfall, equal to the time concentration of surface runoff for a given cross-section, min/

A and n are parameters that depend on the climatic characteristics of the region for a period of single exceedance P :

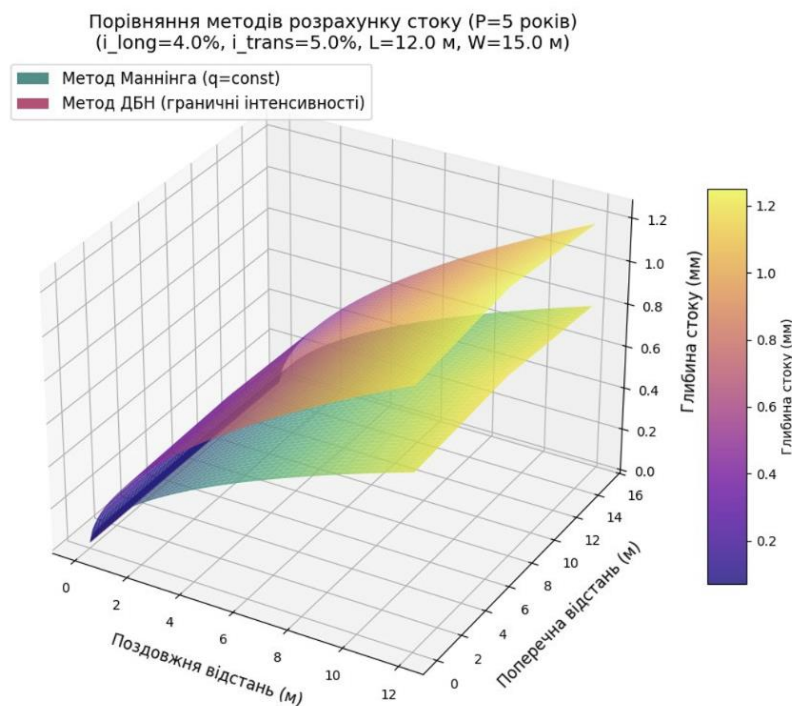
$$A = q_{20} \cdot 20^n \left(1 + \frac{\lg P}{\lg m_r}\right)^{\gamma}, \quad (5)$$

where q_{20} — is the rainfall intensity, l/(s·ha), for a specific area with a duration of 20 minutes at $P = 1$ year.

The simulation results are shown in **Figure 2** and presented in **Table 2** with a sample size of 0.5 %.



a)



b)

- a) under the conditions of longitudinal slope — 0.5 %, transverse slope — 2.5 %, length of runoff movement — 15 m, catchment width — 12 m;
b) under the conditions of longitudinal slope — 4 %, transverse slope — 5 %, length of runoff movement — 15 m, catchment width — 12 m.

Figure 2 — Comparison of modelling results using the Manning formula and the limiting intensities method

Partial results of modelling using two methods are presented in **Table 2**.

Table 2

Results of modelling runoff formation using Manning's formula and the limiting intensities method

Longitudinal slope (%)	Transverse slope (%)	Width (m)	Length (m)	Max. depth (Manning, mm)	Max. depth (DBN, mm)
0	2.5	4.5	6	3.40	5.19
0.5	2.5	4.5	6	1.05	1.61
1.0	2.5	4.5	6	0.86	1.30
1.5	2.5	4.5	6	0.76	1.15
2.0	2.5	4.5	6	0.69	1.06
2.5	2.5	4.5	6	0.65	0.99
3.0	2.5	4.5	6	0.62	0.94
3.5	2.5	4.5	6	0.59	0.90
4.0	2.5	4.5	6	0.56	0.86
0	3.0	4.5	6	3.40	5.19
0.5	3.0	4.5	6	1.05	1.61
1.0	3.0	4.5	6	0.86	1.30
1.5	3.0	4.5	6	0.76	1.15
2.0	3.0	4.5	6	0.69	1.06
2.5	3.0	4.5	6	0.65	0.99
3.0	3.0	4.5	6	0.62	0.94
3.5	3.0	4.5	6	0.59	0.90
4.0	3.0	4.5	6	0.56	0.86
0	3.5	4.5	6	3.40	5.19
0.5	3.5	4.5	6	1.05	1.61
1.0	3.5	4.5	6	0.86	1.30
1.5	3.5	4.5	6	0.76	1.15
2.0	3.5	4.5	6	0.69	1.06
2.5	3.5	4.5	6	0.65	0.99
3.0	3.5	4.5	6	0.62	0.94
3.5	3.5	4.5	6	0.59	0.90
4.0	3.5	4.5	6	0.56	0.86
0	4.0	4.5	6	3.40	5.19
0.5	4.0	4.5	6	1.05	1.61
1.0	4.0	4.5	6	0.86	1.30
1.5	4.0	4.5	6	0.76	1.15
2.0	4.0	4.5	6	0.69	1.06
2.5	4.0	4.5	6	0.65	0.99
3.0	4.0	4.5	6	0.62	0.94
3.5	4.0	4.5	6	0.59	0.90
4.0	4.0	4.5	6	0.56	0.86
0	4.5	4.5	6	3.40	5.19
0.5	4.5	4.5	6	1.05	1.61
1.0	4.5	4.5	6	0.86	1.30

Longitudinal slope (%)	Transverse slope (%)	Width (m)	Length (m)	Max. depth (Manning, mm)	Max. depth (DBN, mm)
1.5	4.5	4.5	6	0.76	1.15
2.0	4.5	4.5	6	0.69	1.06
2.5	4.5	4.5	6	0.65	0.99
3.0	4.5	4.5	6	0.62	0.94
3.5	4.5	4.5	6	0.59	0.90
4.0	4.5	4.5	6	0.56	0.86
0	5.0	4.5	6	3.40	5.19
0.5	5.0	4.5	6	1.05	1.61
1.0	5.0	4.5	6	0.86	1.30
1.5	5.0	4.5	6	0.76	1.15
2.0	5.0	4.5	6	0.69	1.06
2.5	5.0	4.5	6	0.65	0.99
3.0	5.0	4.5	6	0.62	0.94
3.5	5.0	4.5	6	0.59	0.90
4.0	5.0	4.5	6	0.56	0.86

As a result of modelling, it was determined that in order to ensure surface runoff from the bridge deck, a minimum longitudinal slope of at least 0.2 % to the water intake element should be provided. At the same time, the theoretical accuracy of the slope is influenced by factors such as deviations in the calculations of the ‘construction camber’ and the tolerances provided for in [15]. In the practical implementation of design slopes, a significant part is made up of errors in geodetic measurements during stakeout work [14]. The authors see the prospect of further research in the systematisation and consideration of these errors, which will make it possible to refine the regulatory and technical documentation related to the design and implementation of drainage systems.

Conclusions

The study identified several key issues related to drainage:

Inaccuracies in design and construction: Determining and ensuring minimum longitudinal slopes depends on the accuracy of measuring equipment and the qualifications of workers. Even minor deviations in ‘construction camber’ marks can negate design slopes, leading to the formation of stagnant areas. Small slopes may be less than the acceptable measurement error, making their implementation virtually impossible.

Shortcomings in regulatory documentation: Existing requirements for drainage from bridges have a harmful impact on the time between repairs. In particular, the requirement to locate the drainage axis at a distance of 200–500 mm from the kerb creates technological difficulties, as this distance is too small for effective compaction of the asphalt concrete pavement. This leads to uncompacted areas that are prone to rapid deterioration and water penetration.

Modelling has shown that to ensure effective surface runoff from the bridge deck, the minimum longitudinal slope to the water intake element should be at least 0.2 %. This result does not take into account possible deviations in construction elevation calculations and geodetic measurement errors.

References

1. Barnes, H. H. (1989). Roughness Characteristics of Natural Channels (U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1849). Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office [in English].
2. US Army Corps of Engineers. (2020). HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Hydrologic Engineering Center [in English].

3. Sturm, T. W. (2010). Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill Education [in English].
4. DBN V.2.5-75:2013 Sewerage. External networks and structures. Basic design provisions. with amendment No. 1 [Effective from 01.02.2019] Official publication. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2019. 219 p. [Ukrainian].
5. Jong-min Kim, Hyunglak Lee, Yong Rak Kim, H. B. Kim (2009). A Drainage System for Mitigating Moisture Damage to Bridge Deck Pavements [in English].
6. S. Pearson, J. Cuninghame (1998). Water Management for Durable Bridges [in English].
7. Mohamed M. Mekkawy, D. White, M. Suleiman, S. Sritharan (2005). Simple Design Alternatives to Improve Drainage and Reduce Erosion at Bridge Abutments [in English].
8. DBN V.2.3-22:2009 Bridges and pipes. Basic design requirements. [Effective from 01.03.2010] Official publication. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010. 46 p. [Ukrainian].
9. Amin Akhnoukh, Rudolf Seracino Design and Construction Practices for Efficient Bridge Deck Drainage. EPiC Series in Built Environment [in English].
10. Bani-Hani, A. Baral, M. Shahandashti (2023). Synthesis of State of Practice on Bridge Deck Drains. International Conference on Transportation and Development 2023 [in English].
11. ASCE Manual of Practice. No. 77 (1992). Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems [in English].
12. Urban Drainage Design Manual Hydraulic Engineering Circular 22, Third Edition, 2009 [in English].
13. Kaskiv V. I., Havryshchuk V. V. Linear surface drainage from road coverage, technical and economic indicators. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2020. Вип. 108. Р. 39–45 [Ukrainian].
14. Sossa, B. & Havryshchuk, V. (2025). Vykorystannia metodu Monte-Karlo pry doslidzhenni pokhybok heodezychnykh pryladiv [Application of the Monte Carlo method in the study of errors of geodetic instruments]. *Technical sciences and technologies*. 2(40). P. 472–484 DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-472-484](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-472-484) [Ukrainian].
15. DSTU-N B V.1.3-1:2009 System for ensuring the accuracy of geometric parameters in construction. Measurement, calculation, and control of the accuracy of geometric parameters. Guideline [Effective from 01.10.2010] Official publication. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010. 75 p. [Ukrainian].

Список літератури

1. Barnes, H. H. (1989). Roughness Characteristics of Natural Channels (U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1849). Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.
2. US Army Corps of Engineers. (2020). HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Hydrologic Engineering Center.
3. Sturm, T. W. (2010). Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill Education.
4. ДБН В.2.5-75:2013 Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. із міною № 1. Київ, 2019, 219 с. (Інформація та документація).
5. Jong-min Kim, Hyunglak Lee, Yong Rak Kim, H. B. Kim (2009). A Drainage System for Mitigating Moisture Damage to Bridge Deck Pavements.
6. S. Pearson, J. Cuninghame (1998). Water Management for Durable Bridges.
7. Mohamed M. Mekkawy, D. White, M. Suleiman, S. Sritharan (2005). Simple Design Alternatives to Improve Drainage and Reduce Erosion at Bridge Abutments.
8. ДБН В.2.3-22:2009 Мости та труби. Основні вимоги проектування. Київ, 2010, 46 с. (Інформація та документація).
9. Amin Akhnoukh, Rudolf Seracino Design and Construction Practices for Efficient Bridge Deck Drainage. EPiC Series in Built Environment.
10. Bani-Hani, A. Baral, M. Shahandashti (2023). Synthesis of State of Practice on Bridge Deck Drains. International Conference on Transportation and Development 2023.

11. ASCE Manual of Practice No. 77 (1992). Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems.
12. Urban Drainage Design Manual Hydraulic Engineering Circular 22, Third Edition, 2009.
13. Kaskiv V. I., Havryshchuk V. V. Linear surface drainage from road coverage, technical and economic indicators. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2020. Вип. 108. С. 39–45.
14. Сосса Б., Гавришук В. (2025). Використання методу Монте-Карло при дослідженні похибок геодезичних приладів. *Технічні науки та технології*. Чернігів. 2025. 2(40), С. 472–484. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-472-484](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-472-484).
15. ДСТУ-Н Б В.1.3-1:2009 Система забезпечення точності геометричних параметрів у будівництві. Виконання вимірювань, розрахунків та контроль точності геометричних параметрів. Київ: Мінрегіон України, 2010, 75 с. (Інформація та документація).

Гавришук В. В., канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0003-3164-4426>

Сосса Б. Р., д-р філос. з геодезії та землеустрою, <https://orcid.org/0000-0003-4484-4865>

Державний торговельно-економічний університет (ДТЕУ), м. Київ, Україна

ОСНОВНІ ЧИННИКИ ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО СТОКУ З ПОКРИТТЯ ШТУЧНИХ СПОРУД

Анотація

Вступ. Ефективне управління поверхневими стоками з урбанізованих територій є ключовим завданням сучасного будівництва, що безпосередньо впливає на безпеку, функціональність та довговічність об'єктів. Традиційні рішення та розрахунки, які дозволяють підтоплення водозбірної ділянки на висоту бордюрного каменю не допускається застосовувати на мостах. Некоректний розрахунок параметрів водовідведення може призвести до аквапланування, замокання конструктивних елементів та їх руйнування, що зумовлює необхідність вдосконалення існуючих методик. Основним способом, який застосовується в Україні для розрахунку витрати дощового стоку з водозбірного басейну є метод граничних інтенсивностей, описаний в [4]. У світовій практиці широко поширена та застосовується формула Маннінга [1-3, 11].

Окремим, але критично важливим аспектом, що часто ігнорується, є зв'язок між теоретично обґрунтованими мінімальними похибами та точністю їх практичного втілення. При проектуванні та будівництві мостових конструкцій, визначення та забезпечення мінімальних поздовжніх ухилів, необхідних для ефективного водовідведення, безпосередньо залежить від точності вимірювального обладнання (нівелірів, тахеометрів) та кваліфікації виконавців. Малі похиби можуть виявитися меншими за допустиму похибку вимірювань, що робить їх практичну реалізацію неможливою та призводить до утворення застійних зон. Таким чином, аналіз впливу похилів має бути інтегрований з оцінкою практичної досяжності заданих параметрів.

Додатково, слід враховувати імовірність похибок при теоретичних розрахунках, важливим викликом є коректне втілення проектних рішень на практиці. При цьому будівельний підйом, що являє собою заздалегідь розраховане імітування зворотної кривини, є обов'язковим елементом проектування прогонових конструкцій для компенсації їхнього прогину під постійним і тимчасовим навантаженнями. Неточності у визначенні або реалізації цих відміток безпосередньо впливають на фактичні поздовжні та поперечні ухили на поверхні проїжджої частини. Навіть незначні відхилення у відмітках будівельного підйому можуть нівелювати проектні похиби, необхідні для ефективного водовідведення, що призводить до утворення локальних зон застою води та порушення функціонування водовідведення.

В роботі проведено моделювання формування поверхневого стоку за формулою Маннінга [1-3, 11] та методом граничних інтенсивностей [4]. При моделюванні руху поверхневого

стоку основною задачею було визначення максимальної величини шару поверхневого стоку, з подальшим визначенням основних факторів впливу на величину шару стоку. Моделювання формування поверхневого стоку виконано з урахуванням змінних поздовжніх та поперечних похилів покриття, геометричних параметрів водозбірної ділянки відстані між водоприймальними елементами та ширини.

Проблематика. Однією з передумов ефективного функціонування системи водовідведення з покриття мосту та захисту конструкцій є швидкість прийому поверхневого стоку водоприймальними елементами, основним показником, який визначає швидкість руху стоку є похил поверхні. Похибки та неточності, можуть впливати на зменшення похилу та на ефективність функціонування системи водовідводу.

Мета. Провести моделювання процесу формування поверхневого стоку методом Маннінга та граничних інтенсивностей. Визначити кількість стоків, які формуються з локальної водозбірної ділянки перед елементом водозбору. Визначити мінімально-допустимі поздовжні похили для мостів з урахуванням забезпечення функціонування системи водовідведення.

Матеріали та методи. Під час дослідження використано комплексний підхід, що базується на аналізі науково-технічних напрацювань у сфері проєктування поверхневого водовідведення та дощової каналізації, а також практичний досвід їх улаштування. Методологічною основою роботи є аналіз чинних будівельних норм та порівняння їх із відповідними закордонними нормативними документами та технічною літературою. Для забезпечення комплексності дослідження ураховано вітчизняний і світовий досвід, здобутий під час виконання робіт із проєктування, улаштування та експлуатації водовідвідних систем. Застосовано методи математичного моделювання для визначення оптимальних ключових чинників, які визначають величину формування поверхневого стоку та мінімально-допустимі поздовжні похили покриття мосту, які забезпечують ефективне функціонування системи водовідведення.

Результати. Визначено основні чинники, які впливають на формування поверхневого стоку. Обґрунтовано величину поздовжнього похилу, яка забезпечує ефективність роботи системи водовідведення.

Висновки. Дослідження показує, що для забезпечення ефективного водовідведення та запобігання руйнуванню мостових конструкцій необхідно враховувати не лише теоретичні розрахунки, але й практичну реалізацію проєктних рішень. Досягнення мінімально допустимого поздовжнього похилу, що становить не менше 0,2 %, є ключовою умовою для забезпечення надійного функціонування системи водовідведення.

Ключові слова: міст, поверхневі стоки, поздовжній та поперечний похил, величина стоку, водоприймальний елемент.