

Національний транспортний університет  
Міністерство освіти і науки України

Національний транспортний університет  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

КВАТАДЗЕ АЛІНА ІРОДІОНІВНА

УДК 627.15

## ДИСЕРТАЦІЯ

### УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ ВОЛОГІСНОГО РЕЖИМУ ДРЕНУВАЛЬНОГО ШАРУ ДОРОЖНЬОЇ КОНСТРУКЦІЇ ПІД ДІЄЮ НАВАНТАЖЕННЯ

05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми

Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень.  
Використання ідей, результатів і текстів інших  
авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ А.І. Кватадзе

Науковий керівник –  
Савенко Вячеслав Якович,  
доктор технічних наук,  
професор

Ідентичність усіх примірників дисертації  
*Засвідчую*  
Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.059.02  
\_\_\_\_\_ О.Ю. Усиченко

Київ – 2020

## АНОТАЦІЯ

*Кватадзе А.І.* Удосконалення методу прогнозування вологісного режиму дренажного шару дорожньої конструкції під дією навантаження. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.11 «Автомобільні шляхи та аеродроми» (192 – Будівництво та цивільна інженерія). – Національний транспортний університет, Київ, 2020.

У дисертаційній роботі представлено нове вирішення **актуального питання** щодо методу прогнозування вологісного режиму дренажного шару дорожньої конструкції під дією понаднормативного навантаження. Наведено короткий аналіз запропонованої загальної схеми цілорічного циклу водно-теплого режиму земляного полотна автомобільних доріг. Для кожного періоду виділено різні типи зволоження, які обумовлюють максимальний внесок у формування величини надходження води до дренажного шару. Для своєчасного усунення факторів, що змінюють умови експлуатації дороги за рахунок підвищення інтенсивності руху великовагового транспорту виникає необхідність щодо прогнозування вологісного режиму дорожньої конструкції.

Зважаючи на це, було проведено дослідження роботи дренажних шарів на експериментальній установці дорожньої конструкції, яка відповідає параметрам дороги III категорії. Досліджувалась робота двох типів дренажних конструкцій: з щебеневим та піщаним шарами, з коефіцієнтами фільтрації, відповідно, 100 м/добу та 4,5 м/добу. Режим роботи двох типів дренажних конструкцій мілкового закладання відрізнявся між собою: дренальний шар з митого щебеню, фр. 20–40 мм, мав середню інтенсивність водовідведення 0,0645 л/хв, а шар із середньозернистого піску – 0,0029 л/хв. Дренажна конструкція мілкового закладання з піщаним шаром розглядалася, як конструкція, що працює за принципом осушення, а фактично працювала за принципом поглинання.

Для прогнозування об'єму води, що надходить у дренальний шар під дією

навантаження від великовагових автомобілів, та відповідної зміни вологісного режиму всієї дорожньої конструкції в найбільш несприятливий період року, визначено характеристики, що описують цей процес. Відповідно, у роботі було проаналізовано процес просідання ґрунту при його відтаванні та висушуванні.

Для проведення числового експерименту представлено модель тривимірної дорожньої конструкції з дренавальним шаром методом скінченних елементів. Для створення розрахункової моделі елементів автомобільної дороги обрано ПРК SCAD Office. Було побудовано схеми моделей автомобільних доріг I – IV-ої категорій (переріз крайньої смуги руху з узбіччям та укосом з похилом 1:1,5). Побудова скінченно-елементних сіток обумовлена розмірами штампа колеса автомобільного транспорту за статичним навантаженням групи А2, що регламентується державними стандартами. Для отримання найбільш можливих деформацій для проведення числових експериментів прийнято рішення – не обмежувати переміщення вузлів по контуру моделі.

На типових дорожніх конструкціях, з врахуванням власної ваги, проведено серію числових експериментів, які включали збільшення нормативного навантаження на 10–50 % при перезволоженому ґрунті земляного полотна (ЗП), що відповідає реальним умовам роботи автомобільних доріг на певних ділянках. За результатами числового моделювання отримано розподіл ізополів та ізоліній нормальних напружень  $N_z$  (т/м<sup>2</sup>) та деформацій  $Z$  (мм) шарів дорожнього одягу в об'ємних елементах.

Ґрунтуючись на підході щодо визначення параметрів просідання ґрунту, при його висиханні або розмерзанні, отримано залежності для відносного осідання ґрунту, коефіцієнтів лінійного осідання та ущільнення ґрунту під дією понаднормативного навантаження. Запропоновані залежності поєднують такі показники як деформація під дренавальним шаром, товщина шару ґрунту, розміщеного під дренавальним шаром, з якого відбувається віджимання води під дією прикладеного навантаження, оптимальна вологість та повна вологоємність ґрунту. За запропонованим методом визначено величину питомого надлишку віджимання води в дренавальний шар під впливом понаднормативного

навантаження.

Для доріг I – IV категорій в умовах I-ої дорожньо-кліматичної зони України, при понаднормативному навантаженні від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН на дорожню конструкції з перезволоженим піщаним дренажним шаром, міграція вологи знизу вгору буде відбуватися з шару ґрунту ЗП під проїзну частину товщиною 50 – 80 см, під узбіччя – товщиною 60 – 90 см, залежно від загальної товщини дорожнього одягу; питомий надлишок віджимання води під дією навантаження змінюється від 5,4 л до 7,4 л на 1 м<sup>2</sup>.

Також у роботі наведено результати з ефективності застосування методології з прийняття проектних рішень щодо підбору параметрів споруд для регулювання водно-теплого режиму. Запропонований оновлений метод дає можливість виключити етапи збору вихідних даних про кліматичні умови району будівництва за багаторічний період спостережень (температура повітря, ґрунту, швидкість вітру та висоту снігового покриву) та статистичної обробки цих даних для виконання розрахунків за нормативною методикою. Всі ці елементи проектування можуть бути замінені на спрощене користування картами значень розрахункової глибини промерзання дорожньої конструкції для різних категорій автомобільних доріг. На основі проведеного кластерного аналізу, побудована дорожньо-кліматична карта, на якій поділено територію України на 5 зон. Впровадження результатів розробки дає можливість оптимізувати параметри дренажних конструкцій мілкового закладання (у тому числі визначати товщину дренажного шару) з урахуванням змін кліматичних показників.

Запропоновано визначення запасної товщини дренажного шару для розміщення додаткового надлишку води за рахунок її віджимання під впливом понаднормативного навантаження.

**Ключові слова:** автомобільна дорога, віджимання води, вологісний режим, дорожня конструкція, дренажний шар, напружено-деформований стан, навантаження.



### Список публікацій здобувача

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

**Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:**

1. Usichenko O., Kvatadze A. Road-climate zoning for water-thermal mode regulation in transport structures. *World Science*. 2020. Vol. 1, No 3(55). P. 8-12. URL: [https://doi.org/10.31435/rsglobal\\_ws/31032020/6966](https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/31032020/6966)

2. Бубела А.В., Кватадзе А.І. Дослідження режимів роботи дренавальних шарів в дорожніх конструкціях. *Science Review*. 2020. No 5(32). P. 24-29. URL: [https://doi.org/10.31435/rsglobal\\_sr/30062020/7140](https://doi.org/10.31435/rsglobal_sr/30062020/7140)

3. Slavinska O., Stozhka V., Kharchenko A., Bubela A., Kvatadze A. Development of a model of the weight of motor roads parameters as part of the information and management system of monetary evaluation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 1, No 3 (97). P. 46-59. (Scopus) URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156519>

4. Savenko V., Kvatadze A., Davydenko O., Stozhka V., Ianchuk L. Forecasting of the moisture mode of the drainage layer of a road structure under the action of a load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 4, No 7 (106). P. 62-75. (Scopus) URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209421>

**Статті у фахових виданнях:**

5. Кватадзе А.І. Метод визначення розрахункових періодів водно-теплогового режиму для розрахунку дренажних пристроїв. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2016. Вип. 98. С. 79-84.

URL: [http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi\\_i\\_stroitelstvo/98/079-084.pdf](http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/98/079-084.pdf)

6. Кватадзе А.І. Удосконалення методу визначення об'єму вологонакопичення в дорожніх конструкціях дренажними шарами. *Дороги і мости*. 2017. Вип. 17. С. 81-88.

URL: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2017.17.081>

### **Опубліковані праці апробаційного характеру:**

7. Савенко В.Я., Кватадзе А.І. Удосконалення періодів водно-теплового режиму дренажних систем в робочій зоні земляного полотна. *LXXIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету* : тези доповідей. К. : НТУ, 2017. С. 118.

8. Савенко В.Я., Кватадзе А.І. Удосконалення методології врахування кліматичних змін при визначенні вологонакопичення в дорожніх конструкціях. *LXXIV наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету* : тези доповідей. К. : НТУ, 2018. С. 171.

9. Кватадзе А.І. Удосконалення методу дорожньо-кліматичного районування на основі врахування зональності та азональності геокомплексів. *Actual aspects of development in the context of globalization*. IX Міжнародна науково-практична конференція. 23-24 березня 2020 р., Флоренція, Італія. С. 255-257. URL: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2020/03/IX-Conference-23-24-Florence-Italy.pdf>

10. Кватадзе А.І. Дослідження напружено-деформованого стану дорожньої конструкції з перезволоженою основою. *Theoretical foundations of modern science and practice*. XI Міжнародна науково-практична конференція. 06-07 квітня 2020 р., Мельбурн, Австралія. С. 234-235.

URL: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2020/04/XI-Conference-06-07-Melbourne-Australia.pdf>

11. Савенко В.Я., Кватадзе А.І. Дослідження процесу віджимання води в дорожній конструкції під впливом понаднормативного навантаження. *Гідротехнічне і транспортне будівництво*. Міжнародна науково-технічна конференція. 28-29 травня 2020 р., Одеса, Україна. С. 102-104.

12. Савенко В.Я., Кватадзе А.І. Удосконалення методології встановлення розрахункових схем регулювання вологонакопичення в дорожній конструкції.

*LXXVI наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету : тези доповідей. К. : НТУ, 2020. С. 123.*

URL: <http://vstup.ntu.edu.ua/konf-76.pdf>

**Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:**

13. Slavinska O., Savenko V., Usichenko O., Kvatadze A. The method of accounting infiltration of atmospheric precipitation to calculate drainage facilities. *Metallurgical and Mining Industry*. 2017. Vol. 1. P. 46-52.

URL: [https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI\\_2017\\_1/007Savenko.pdf](https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2017_1/007Savenko.pdf)

14. Slavinska O., Usichenko O., Kvatadze A., Prykhodko S. Method to incorporate the climatic changes for determining freezing depths of road constructions. *Metallurgical and Mining Industry*. 2017. Vol. 8. P. 8-15.

URL: [https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI\\_2017\\_8/1Slavinska-O.pdf](https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2017_8/1Slavinska-O.pdf)

**Свідоцтва та патенти:**

15. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 86516 Україна. Літературний письмовий твір наукового характеру «Розробка моделі вагомостей параметрів автомобільних доріг у складі інформаційно-управлінської системи грошової оцінки» Славінська О.С., Стьожка В.В., Харченко А.М., Бубела А.В., Кватадзе А.І. Дата реєстрації 01.03.2019 р.

## **ABSTRACT**

**Kvatadze A. Improvement of the forecast method for the humidity of the drainage of the road structure under the influence of load – As a manuscript.**

The dissertation for candidate of technical sciences degree in specialty 05.22.11 «Highways and airfields» (192 – Construction and Civil Engineering). – National transport university, Kyiv, 2020.

The dissertation work presents a new solution to the topical questions of the method of forecasting the humidity-like mode of the drainage of the road construction layer under the action of the super-normative load. A brief analysis of the proposed outline of the year-round cycle of the water-thermal regime of the pavement of roads is given. For each period, different types of humidification have been identified, which make the maximum contribution to the water supply to the drainage layer. In order to eliminate, in a timely manner, the factors changing road conditions by increasing the volume of heavy traffic, it is necessary to forecast the humidity of the drainage construction (DC).

Considering this, a study was made of the drainage layers on the experimental installation of a road structure conforming to the parameters of the category III road. The work of two types of drainage structures was studied: with crushed and sandy layers, with filtration coefficients of 100 m/day and 4.5 m/day, respectively. The operating mode of two types of shallow drainage constructions differed: a draining layer made of soap rubble, fr. 20-40 mm, had an average discharge intensity of 0.0645 l/min, and a medium grain sand layer of 0.0029 l/min. A shallow, sandy drainage structure was seen as working on a drying principle, but actually worked on a absorption principle.

To forecast the volume of water entering the drainage layer due to heavy vehicle loads and the corresponding change in the humidity of the entire road structure during the most unfavourable period of the year, the characteristics describing this process have been defined. Accordingly, the process of soil drying during freezing and drying was analysed.

A three-dimensional road construction model with a draining layer by finite elements is provided for carrying out a numerical experiment. The software-calculation suite SCAD Office has been chosen to create a calculation model of the elements of the road. Road models of categories I-IV were constructed along the boundary of the extreme lane with a shoulder and slope 1:1.5 gradient. The construction of the finite-element grids is conditioned by the size of the wheel stamp on the statistical load of the A2 group, which is regulated by state standards. To obtain the most possible

deformations for carrying out numerical experiments, it is decided not to limit the movement of the nodes along the contour of the model.

A series of numerical experiments have been carried out on typical road structures, taking into account their own weight, which included an increase in the normative load by 10-50 % in the wetlands of the RF, which corresponds to the real road conditions on certain sections. According to the results of numerical modelling, the distribution of isofields and insulation of normal stresses  $N_z$  ( $t/m^2$ ) and deformations  $Z$  (mm) of layers of road pavement in the volume elements is obtained.

Based on the approach to determining the parameters of soil seedling, when the soil is dry or thawed, the relationships for the relative soil precipitation are obtained, The proposed dependencies combine deformation under the drainage layer, soil thickness under the drainage layer, from which water is pressurized under applied load, optimum moisture and total moisture capacity of the soil. According to the proposed method, the value of the specific excess of water in the draining layer due to the action of a over-normative load is determined.

For roads of categories I to IV in the conditions of the 1st road-climatic zone of Ukraine, with the over-normative load from the wheel of the design car 86.25 kN on the road structures with the wetted sandy drainage layer, The migration of moisture from the bottom upwards will occur from the soil of the subgrade to the carriageway, from the thickness of 50 cm to 80 cm, from the shoulder to the thickness of 60 cm to 90 cm, depending on the overall thickness of road pavement; the proportion of the excess pressure applied to the water pressure varies from 5.4 litres per  $m^2$  to 7.4 litres per  $m^2$ .

The work also presents the results on the effectiveness of the methodology for taking project decisions on the selection of parameters of structures for water and thermal regulation. The proposed updated method makes it possible to eliminate the stages of the collection of baseline data on the climatic conditions of the construction area over the many years of observation (air temperature, soil, wind speed and snow height) and statistical processing of these data in order to perform the calculations according to the normative method. All these elements of the design can be replaced by the simplified use of maps of the calculated freezing depth of the road structure for

different road categories. On the basis of the completed cluster analysis, a road-climate map was constructed on which the territory of Ukraine is divided into five zones. The introduction of the results of the development makes it possible to optimize the parameters of the shallow drainage structure (including the thickness of the drainage layer) taking into account changes in climatic characteristics.

The proposed definition of the reserve thickness of the draining layer for accommodating the additional excess water due to the squeezing thereof under the influence of the super-normative load is proposed.

**Keywords:** road, water squeezing, humidity, road structure, drainage construction, stressed-strained state, load.

### Список публікацій здобувача

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

**Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:**

1. Usichenko O., Kvatadze A. Road-climate zoning for water-thermal mode regulation in transport structures. *World Science*. 2020. Vol. 1, No 3(55). P. 8-12. URL: [https://doi.org/10.31435/rsglobal\\_ws/31032020/6966](https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/31032020/6966)

2. Бубела А.В., Кватадзе А.І. Дослідження режимів роботи дренавальних шарів в дорожніх конструкціях. *Science Review*. 2020. No 5(32). P. 24-29. URL: [https://doi.org/10.31435/rsglobal\\_sr/30062020/7140](https://doi.org/10.31435/rsglobal_sr/30062020/7140)

3. Slavinska O., Stozhka V., Kharchenko A., Bubela A., Kvatadze A. Development of a model of the weight of motor roads parameters as part of the information and management system of monetary evaluation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 1, No 3 (97). P. 46-59. (Scopus) URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156519>

4. Savenko V., Kvatadze A., Davydenko O., Stozhka V., Ianchuk L. Forecasting of the moisture mode of the drainage layer of a road structure under the action of a load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 4, No 7 (106). P. 62-75. (Scopus) URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209421>

### Статті у фахових виданнях:

5. Кватадзе А.І. Метод визначення розрахункових періодів водно-теплового режиму для розрахунку дренажних пристроїв. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2016. Вип. 98. С. 79-84.

URL: [http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi\\_i\\_stroitelstvo/98/079-084.pdf](http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/98/079-084.pdf)

6. Кватадзе А.І. Удосконалення методу визначення об'єму вологонакопичення в дорожніх конструкціях дренажними шарами. *Дороги і мости*. 2017. Вип. 17. С. 81-88.

URL: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2017.17.081>

### Опубліковані праці апробаційного характеру:

7. Савенко В.Я., Кватадзе А.І. Удосконалення періодів водно-теплового режиму дренажних систем в робочій зоні земляного полотна. *LXXIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету* : тези доповідей. К. : НТУ, 2017. С. 118.

8. Савенко В.Я., Кватадзе А.І. Удосконалення методології врахування кліматичних змін при визначенні вологонакопичення в дорожніх конструкціях. *LXXIV наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету* : тези доповідей. К. : НТУ, 2018. С. 171.

9. Кватадзе А.І. Удосконалення методу дорожньо-кліматичного районування на основі врахування зональності та азональності геокомплексів. *Actual aspects of development in the context of globalization*. IX Міжнародна науково-практична конференція. 23-24 березня 2020 р., Флоренція, Італія. С. 255-257. URL: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2020/03/IX-Conference-23-24-Florence-Italy.pdf>

10. Кватадзе А.І. Дослідження напружено-деформованого стану дорожньої конструкції з перезволоженою основою. *Theoretical foundations of modern science and practice*. XI Міжнародна науково-практична конференція. 06-07 квітня 2020 р., Мельбурн, Австралія. С. 234-235.

URL: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2020/04/XI-Conference-06-07-Melbourne-Australia.pdf>

11. Савенко В.Я., Кватадзе А.І. Дослідження процесу віджимання води в дорожній конструкції під впливом понаднормативного навантаження. *Гідротехнічне і транспортне будівництво*. Міжнародна науково-технічна конференція. 28-29 травня 2020 р., Одеса, Україна. С. 102-104.

12. Савенко В.Я., Кватадзе А.І. Удосконалення методології встановлення розрахункових схем регулювання вологонакопичення в дорожній конструкції. *LXXVI наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету* : тези доповідей. К. : НТУ, 2020. С. 123.

URL: <http://vstup.ntu.edu.ua/konf-76.pdf>

**Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:**

13. Slavinska O., Savenko V., Usichenko O., Kvatadze A. The method of accounting infiltration of atmospheric precipitation to calculate drainage facilities. *Metallurgical and Mining Industry*. 2017. Vol. 1. P. 46-52.

URL: [https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI\\_2017\\_1/007Savenko.pdf](https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2017_1/007Savenko.pdf)

14. Slavinska O., Usichenko O., Kvatadze A., Prykhodko S. Method to incorporate the climatic changes for determining freezing depths of road constructions. *Metallurgical and Mining Industry*. 2017. Vol. 8. P. 8-15.

URL: [https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI\\_2017\\_8/1Slavinska-O.pdf](https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2017_8/1Slavinska-O.pdf)

**Свідоцтва та патенти:**

15. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 86516 Україна. Літературний письмовий твір наукового характеру «Розробка моделі вагомостей параметрів автомобільних доріг у складі інформаційно-управлінської системи грошової оцінки» Славінська О.С., Стьожка В.В., Харченко А.М., Бубела А.В., Кватадзе А.І. Дата реєстрації 01.03.2019 р.



## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ВСТУП.....                                                                                                                                                                             | 15  |
| РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ВОЛОГОСТІ<br>ДОРОЖНЬОЇ КОНСТРУКЦІЇ. УЗАГАЛЬНЕНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ<br>ДЕФОРМАЦІЙ ҐРУНТІВ .....                                              | 21  |
| 1.1 Особливості водно-теплогового режиму земляного полотна на автомобільних<br>дорогах. Аналіз існуючих методів досліджень роботи дорожніх конструкцій з<br>дренувальними шарами ..... | 21  |
| 1.2 Методи розрахунку вологості дорожньої конструкції .....                                                                                                                            | 26  |
| 1.3 Стисливість та прогнозування осідання ґрунтів. Узагальнені методи<br>визначення деформацій ґрунтів .....                                                                           | 37  |
| Висновки по розділу 1 .....                                                                                                                                                            | 47  |
| РОЗДІЛ 2 РЕЖИМИ РОБОТИ ДРЕНУВАЛЬНИХ ШАРІВ У ДОРОЖНІХ<br>КОНСТРУКЦІЯХ.....                                                                                                              | 49  |
| 2.1 Дослідження режимів роботи дренавальних шарів у дорожніх конструкціях<br>.....                                                                                                     | 49  |
| 2.2 Процес просідання ґрунту при його відтаванні та висушуванні .....                                                                                                                  | 55  |
| 2.3 Метод визначення об'єму віджимання води під впливом динамічного<br>навантаження.....                                                                                               | 59  |
| Висновки по розділу 2 .....                                                                                                                                                            | 63  |
| РОЗДІЛ 3 ПРОГНОЗУВАННЯ ВОЛОГІСНОГО РЕЖИМУ ДРЕНУВАЛЬНОГО<br>ШАРУ ДОРОЖНЬОЇ КОНСТРУКЦІЇ ПІД ДІЄЮ НАВАНТАЖЕННЯ .....                                                                      | 65  |
| 3.1 Побудова моделі дорожньої конструкції в ПРК SCAD Office .....                                                                                                                      | 65  |
| 3.2 Номенклатура та аббревіатури матеріалів елементів дослідних дорожніх<br>конструкцій .....                                                                                          | 74  |
| 3.3 Результати досліджень напружено-деформованого стану дорожніх<br>конструкцій з дренавальним шаром .....                                                                             | 81  |
| 3.4 Визначення віджимання води в дренавальний шар під впливом<br>навантаження.....                                                                                                     | 96  |
| 3.5 Порівняльний аналіз результатів за методом В. І. Куканова (МАДІ) з<br>результатами розрахунку віджимання води в дренавальний шар за<br>запропонованим методом .....                | 103 |
| Висновки по розділу 3 .....                                                                                                                                                            | 110 |

|                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| РОЗДІЛ 4 ДОРОЖНЬО-КЛІМАТИЧНЕ РАЙОНУВАННЯ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ<br>ВОДНО-ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ В ТРАНСПОРТНИХ СПОРУДАХ .....                                      | 112 |
| 4.1 Метод визначення розрахункових періодів водно-теплого режиму для<br>розрахунку дренажних пристроїв .....                                          | 112 |
| 4.2 Визначення притоку вологи від атмосферних опадів .....                                                                                            | 117 |
| 4.3 Визначення розрахункового значення питомого надлишку води .....                                                                                   | 125 |
| 4.4 Розроблення методології врахування кліматичних змін при визначенні<br>глибини промерзання дорожніх конструкцій .....                              | 131 |
| 4.5 Дорожньо-кліматичне районування для регулювання водно-теплого<br>режиму в транспортних спорудах .....                                             | 137 |
| 4.6 Практичні аспекти щодо регулювання вологісного режиму дернувального<br>шару під впливом навантаження від великовагових транспортних засобів ..... | 145 |
| Висновки по розділу 4 .....                                                                                                                           | 148 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....                                                                                                                      | 153 |
| ДОДАТОК А РОЗПОДІЛ ІЗОПОЛІВ ТА ІЗОЛІНІЙ НОРМАЛЬНИХ<br>НАПРУЖЕНЬ ТА ДЕФОРМАЦІЙ У ДОРОЖНІЙ КОНСТРУКЦІЇ .....                                            | 167 |
| ДОДАТОК Б ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ .....                                                                                           | 234 |
| ДОДАТОК В СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ<br>ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ .....                                  | 244 |

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Збільшення інтенсивності великовагових транспортних засобів обумовлює безперервне зростання навантажень, швидкостей руху та відповідне підвищення вимог до міцності і стійкості дорожньої конструкції. Причому несприятлива ситуація виникає, коли велика вага вантажу призводить до необоротних деформацій як асфальтобетонного покриття, так і шарів основи дорожнього одягу. Суттєві зміни вологісного режиму спостерігаються навесні в дренавальних або морозозахисних шарах основи дорожнього одягу та у верхній частині земляного полотна (ЗП). Найбільше значення вологості виникає не тільки за рахунок надходження атмосферних опадів, що просочуються через тріщини покриття, узбіччя, укоси ЗП, а і в результаті віджимання води у дренавальний шар при просіданні нижніх шарів ґрунту, що відтанули. Також в цій зоні відбувається додаткова міграція вологи під впливом великовагових транспортних засобів.

На підставі експериментальних та натурних досліджень, на території колишнього СРСР, на перезволожених ділянках доріг було визначено, що дренавальні шари, які запроектовані за принципом осушення, фактично працюють за принципом поглинання. Як правило, це ділянки в низьких насипах, в нульових відмітках, у виїмках. Ці шари, за традиційним рішенням, влаштовують із нездимальних пісків на всю ширину ЗП. Їх товщина, без спеціальних додаткових дренавальних конструкцій, повинна бути досить великою, щоб забезпечити поглинання всієї води, що поступає за тривалий час.

Багатошарова дорожня конструкція (ДК) під дією вібрації від великовагового транспорту (особливо перевантаженого) зазнає суттєвого впливу від вільної води, яка потрапляє в проміжки між шарами, де виникає ефект подібний діафрагмовому насосу. Вплив збільшення навантаження підвищує ступінь защемлення води, що змушує її рухатись по поверхні розділу між нижнім шаром дорожнього одягу (ДО) та верхнім шаром ЗП. При постійному русі перевантажених транспортних засобів створюються умови для виникнення підсосу води з верхнього шару ґрунту ЗП у дренавальні шари.

Перевищення нормативних навантажень суттєво змінює картину напружено-деформованого стану (НДС) ДК в цілому. Одним із можливих шляхів обґрунтування явища міграції вологи з верхніх шарів ЗП в дренавальні є використання полів напружень та деформацій в цих зонах, що дасть можливість описати процеси осідання ґрунту ЗП. Ефективним підходом є використання числового моделювання НДС ДК на основі сучасного програмно-розрахункового комплексу SCAD Office (ПРК SCAD Office), що дозволяє визначати товщину верхнього шару ґрунту ЗП, з якого відбувається віджимання води під дією транспортного навантаження. Такий підхід є актуальним і надає можливість приймати обґрунтоване проектне рішення щодо дренавальних шарів дорожнього одягу для об'єктів нового будівництва, реконструкції та капітального ремонту.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основні дослідження теоретичного та прикладного характеру виконані згідно з тематикою науково-дослідних робіт, що здійснювались кафедрою транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету: «Виконати аналіз та розробити довідник кліматичних характеристик та кліматичного районування території України для регулювання водно-теплогового режиму в дорожньому будівництві», номер держреєстрації 0116U007514; «Розробити метод прогнозування водно-теплогового режиму дорожньої конструкції з урахуванням зміни екологічного стану придорожньої смуги», номер держреєстрації 0115U002287; «Розробити аналітичну систему технічної експертизи та грошової оцінки автомобільної дороги як складової матеріально-технічної бази дорожнього господарства», номер держреєстрації 0117U002326, Міжнародний проект CERES «Centers of Excellence for young REsearchers» (Центри передового досвіду для молодих вчених), реєстр. номер 544137-TEMPUS-1-2013-1-SK-TEMPUS-JPHES, <http://erasmusplus.org.ua/en/projects/1008-centers-of-excellence-for-young-researchers.html>.

#### **Мета і завдання дослідження.**

Мета полягає в розробленні методу прогнозування вологісного режиму дренавального шару, за рахунок впливу навантаження від великовагових транспортних засобів на основі числового моделювання напружено-

деформованого стану дорожньої конструкції, та районування території України для регулювання водно-теплового режиму.

Для досягнення мети роботи необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз методів розрахунку вологості дорожньої конструкції та закономірностей процесів просідання ґрунту земляного полотна при його промерзанні та висушуванні;
- на підставі результатів експериментальних досліджень, змодельовати елементи тривимірних дорожніх конструкцій з дренавальним шаром за методом скінченних елементів та обґрунтувати основні фактори, які є визначальними в роботі дорожньої конструкції;
- дослідити напружено-деформований стан дорожньої конструкції з дренавальним шаром при перезволоженому ґрунті земляного полотна, під впливом навантаження від великовагових транспортних засобів;
- визначити питомий надлишок віджимання води під дією навантаження від великовагових транспортних засобів з верхнього шару земляного полотна з урахуванням зміни модуля пружності дренавального шару;
- виконати дорожньо-кліматичне районування для регулювання водно-теплового режиму на основі методу з визначення вологонакопичення в дорожній конструкції.

**Об’єкт дослідження** – процеси осідання ґрунту земляного полотна під дією навантаження від великовагових транспортних засобів.

**Предмет дослідження** – методи прогнозування вологісного режиму дренавального шару дорожньої конструкції під дією навантаження.

**Методи дослідження:** теорії механіки суцільного середовища і механіки дисперсних середовищ, методи математичного моделювання, методи числового моделювання, метод аналізу.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

- вперше змодельовані елементи тривимірних дорожніх конструкцій з дренавальним шаром методом скінченних елементів;
- досліджено напружено-деформований стан дорожньої конструкції, з дренавальним шаром при перезволоженому ґрунті земляного полотна, під

впливом навантаження, що дозволило встановити осідання ґрунту земляного полотна за розподілом ізополів та ізоліній нормальних напружень і деформацій;

- вперше визначено питомий надлишок віджимання води під дією навантаження від великовагових транспортних засобів з верхнього шару земляного полотна в дренавальний на основі запропонованого методу прогнозування вологісного режиму;

- вперше виконано дорожньо-кліматичне районування для регулювання водно-теплогового режиму в транспортних спорудах з урахуванням зміни питомого надлишку вологи за рахунок впливу навантаження від великовагових транспортних засобів.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в розробленні методу розрахунку, що дозволяє проектувати дренавальні шари залежно від впливу великовагових транспортних засобів з урахуванням кліматичних особливостей регіону. Теоретичні положення дисертаційної роботи доведені до інженерної методики визначення питомого надлишку вологи, що надходить у дренавальні шари за рахунок впливу навантаження від великовагових транспортних засобів. Результати досліджень і практичні рекомендації можуть бути використані підприємствами та організаціями, які виконують роботи з проектування систем регулювання водно-теплогового режиму дорожньої конструкції.

Матеріали досліджень були впроваджені в Державному агентстві автомобільних доріг України при розробленні галузевих документів, а саме Довідник № 4 «Кліматичні характеристики та кліматичне районування території України для регулювання водно-теплогового режиму в дорожньому будівництві».

Результати дисертаційної роботи були використані в навчально–методичних комплексах дисциплін «Механіка земляного полотна» і «Будівництво та експлуатація інженерних мереж» при формуванні програм лекційних занять та в дипломному проектуванні для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія, ОП «Автомобільні дороги, вулиці та дороги населених пунктів».

**Особистий внесок здобувача** в отриманні наукових результатів, викладених у дисертаційній роботі, полягає у:

- моделюванні елементу тривимірної лінійно-протяжної дорожньої конструкції з дренавальним шаром методом скінченних елементів;
- дослідженні напружено-деформованого стану дорожньої конструкції з дренавальним шаром при перезволоженому ґрунті земляного полотна під впливом навантаження від великовагових транспортних засобів;
- визначенні питомого надлишку віджимання води під дією навантаження від великовагових транспортних засобів з шару ґрунту земляного полотна;
- виконанні дорожньо-кліматичного районування для регулювання водно-теплового режиму в транспортних спорудах з урахуванням зміни питомого надлишку води за рахунок впливу навантаження від великовагових транспортних засобів.

Здобувачем в роботах [1-4, 15] – запропоновано метод обробки експериментальних досліджень; проведено числове експериментальне дослідження НДС дорожньої конструкції з перезволоженим дренавальним шаром; проаналізовано експертний метод оцінки якісного стану дороги, метод кластеризації для побудови карт України. В роботах [6] виконана методологія визначення весняного вологонакопичення в дорожній конструкції; [7] – розроблено структурно-логічну модель з визначення величини здимання при промерзанні дорожньої конструкції; [9] – проаналізовано методи з визначення періодів водно-теплового режиму дренавальних систем в робочій зоні земляного полотна; [10] – враховано кліматичні зміни при визначенні вологонакопичення в дорожніх конструкціях; [13] – досліджено процес віджимання води в дорожній конструкції під впливом навантаження від великовагових транспортних засобів; [14] – встановлені розрахункові схеми регулювання накопичення вологи в дорожній конструкції.

**Обґрунтованість та достовірність** отриманих в роботі результатів підтверджується: застосуванням фізично обґрунтованих (на основі експериментальних даних) математичних моделей; коректною постановкою

межових умов при реалізації методу скінченних елементів; математичним описом числових алгоритмів; співставленням числових розрахунків з результатами теоретичних та експериментальних досліджень інших авторів; апробацією результатів роботи на різних рівнях.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на: щорічних 73, 74, 76 наукових конференціях професорсько–викладацького складу, аспірантів, студентів та структурних підрозділів Національного транспортного університету (2017, 2018, 2020 р.); IX Міжнародній науково-практичній конференції “Actual aspects of development in the context of globalization”, 23-24 березня 2020 р., Флоренція, Італія; XI Міжнародна науково-практична конференція “Theoretical foundations of modern science and practice”, 06-07 квітня 2020 р., Мельбурн, Австралія; Міжнародній науково-технічній конференції «Гідротехнічне і транспортне будівництво», 28-29 травня 2020 р., м. Одеса, Україна; Workshop CERES-Modern Experience on Young Researchers Organization held on 5-7 July 2017 in Zilina, Slovakia.

**Публікації.** За темою дисертаційного дослідження опубліковано 15 наукових праць, у тому числі: 4 у періодичних фахових виданнях, що входять до переліку МОН України (2 статті у виданні, яке включене до наукометричної бази Scopus); 2 статті у зарубіжних періодичних наукових виданнях; 6 у збірниках праць за матеріалами наукових конференцій; 2 статті додатково відображають наукові результати дисертації. За матеріалами дисертаційних досліджень отримано 1 охоронний документ (1 свідоцтво України про реєстрацію авторського права).

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація включає вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел із 120 найменувань та три додатки. Основний текст викладений на 130 сторінках. Текст ілюструється 43 рисунками і містить 20 таблиць.



## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ВОЛОГОСТІ ДОРОЖНЬОЇ КОНСТРУКЦІЇ. УЗАГАЛЬНЕНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ҐРУНТІВ

#### 1.1 Особливості водно-теплогового режиму земляного полотна на автомобільних дорогах. Аналіз існуючих методів досліджень роботи дорожніх конструкцій з дренавальними шарами

На основі даних багатьох досліджень для районів із сезонним промерзанням запропонована загальна схема цілорічного циклу водно-теплогового режиму (ВТР) земляного полотна (ЗП) автомобільних доріг. Цілорічний цикл складається з чотирьох взаємопов'язаних періодів зміни вологості ЗП: 1) осіннє вологонакопичення; 2) інтенсивне переміщення та накопичення вологи при промерзанні-відтаванні ґрунту ЗП взимку; 3) максимальне вологонасичення при відтаванні ґрунту та надходженні атмосферних опадів навесні; 4) переважне висихання влітку.

Дослідженням зміни ВТР дорожньої конструкції присвячені роботи В.М. Сіденка, І.А. Золотаря, О.Я. Тулаєва, М.А. Пузакова, В.І. Рувинського, Г.Р. Седергрена, Ендрю Даусона [1-10] та ін.

Основним джерелом зволоження в період осіннього вологонакопичення є атмосферні опади та водяна пара. Восени зменшується інтенсивність та збільшується тривалість випадіння атмосферних опадів, зменшується дефіцит вологості повітря та випаровування, починається підняття рівня ґрунтових вод.

При встановленні середньодобової температури повітря нижче  $-5^{\circ}\text{C}$  починається стійке промерзання ґрунтів. Зимове накопичення вологи в ґрунтах відбувається шляхом переміщення від більш теплих місць до більш холодних, за рахунок перерозподілу вологи в ґрунті ЗП та міграції її від рівня підземних вод. Цей процес також залежить від швидкості промерзання ґрунтів, швидкості міграції води, від типу ґрунту та ступеня його ущільнення.

Третій період починається з підвищення температури мерзлих ґрунтів,

зміни напрямку теплового потоку та відповідного відтавання ґрунту ЗП. В активній зоні ЗП відбувається інтенсивний перерозподіл вологи, де вологість ґрунту досягає максимального значення, щільність та міцність – мінімального, що обумовлює виникнення деформацій дорожнього покриття.

Вода, що звільняється при відтаванні крижаних лінз в мерзлих ґрунтах, насичує розущільнений у результаті здимання ґрунт, внаслідок чого різко знижується його стійкість. До накопичених взимку запасів вологи частково додається волога від атмосферних опадів і талого снігу. Однак, навесні величина вбирання вологи зменшена порівняно з іншими періодами.

Дослідженнями встановлено [1 - 5], що в процесі відтавання ґрунту частина вивільненої вологи йде на гідратацію зневоднених при промерзанні часток ґрунту, частина води залишається в капілярах і замкнутих порожнинах, що утворилися на місці крижаних лінз. Частина вільної води опускається вниз по мірі відтавання, а частина – під дією напірних сил піднімається до поверхні і надходить в дренальний шар. При неглибокому від поверхні землі заляганні ґрунтових вод і значному зимовому вологонакопиченню підземні води можуть перешкоджати просочуванню вниз вологи та сприяти ще більшому перезволоженню.

Важливе значення має товщина перезволоженого розмороженого ґрунту та рівномірність відтавання в поперечному і поздовжньому напрямках до осі ЗП. Через більшу теплопровідність дорожнього одягу (ДО) ЗП відтаватиме під проїзною частиною швидше, ніж на узбіччях та укосах. У середній частині полотна утворюватиметься скупчення вільної води, яка не має виходу через мерзлі укоси. Вода стікатиме та накопичуватиметься в понижених місцях, особливо поблизу увігнутих переломів поздовжнього профілю дороги та скупчуватиметься в кориті ЗП, у результаті чого знижується міцність ґрунту ЗП та виникають руйнування ДО.

Щільність ґрунту ЗП істотно впливає на ВТР всієї дорожньої конструкції (ДК). Навесні при попередній стандартній щільності – вологість не перевищує значення 0,60–0,65, якщо ж ґрунт недоущільнений (88–92% від стандартної щільності), то вологість підвищується до 0,73–0,78. Також регулятором ВТР всієї

ДК є дренавальний шар. Цей граничний шар між ДО та ЗП, залежно від ступеня пористості, може акумулювати певну кількість конденсованої вологи з водяної пари.

У міру прогрівання ЗП починається четвертий період – висихання ґрунтів, тобто зменшення їх вологості, відновлення щільності та несної здатності. Прискорення висихання може бути досягнуто поверхневим дренажем.

Протягом річного циклу водно-теплогового режиму переважають ті чи інші джерела зволоження ґрунту земляного полотна. Джерела зволоження земляного полотна поділяються на активні та пасивні. До активних належать: атмосферні опади, поверхневі води, капілярне підняття. До пасивних – ґрунтова, пароподібна та плівкова вода. У кожному періоді слід проаналізувати різні типи опадів, які вносять максимальний внесок у формування величини надходження води до дренавального шару.

Питаннями проектування та розрахунку дорожніх конструкцій з дренавальними шарами займалися В.М. Сіденко, І.А. Золотарь, М.Б. Корсунський, О.Я. Тулаєв, М.А. Пузаков, Ю.Д. Соколов, Л.О. Преферансова, П.Д. Россовський, В.І. Рувінський, В.І. Куканов, О.Я. Олійник, В.Л. Поляков, В.М. Шестаков, П.Я. Полубарінова-Кочіна, Г.Р. Седергрєн, О.С. Славінська, І.П. Гамеляк, В.В. Стьошка та ін. [1 - 5, 7, 10 - 21].

Науково-обґрунтовані пропозиції щодо адаптації дренажних систем на автомобільних дорогах до зміни клімату, до частих випадінь критичних дощів, змін у циклах промерзання та відтавання представлені в роботі [6]. Підходи щодо постійного врахування динаміки змін кліматичних показників протягом річного циклу, гідрологічні моделі для обчислення стоку з водозбірного басейну, що прилягає до дороги, прогнозування вологонакопичення в дорожніх конструкціях дозволили запропонувати технічні заходи щодо вдосконалення роботи дренажних систем мілкового закладання.

З точки зору ефекту надходження вологи, дощі можна розділити на три типи [22]:

- зливи – короткі та інтенсивні дощі тривалістю від 2 год до 4 год та середньої інтенсивністю від 10 мм/год до 20 мм/год. Такі зливи можуть бути конвективного та фронтального походження. Особливо сильні фронтальні зливи дають до 150 мм опадів і утворюють добові максимуми;

- зливові дощі – характеризуються тривалістю від декількох годин до декількох діб, середньою інтенсивністю від 2 мм/год до 10 мм/год. Як правило мають мусонне походження, інколи пов'язані з проходженням потужних циклонів. Найбільш значні зливові дощі продовжуються до 5 діб та можуть дати шар опадів до 200 мм;

- обложні дощі – характеризуються великою тривалістю від 3 діб до 5 діб та більше і відносно малою інтенсивністю (менше ніж 2 мм/год), що змінюється протягом дощу незначно.

Обложні дощі враховуються при визначенні середньозважених значень інтенсивності опадів; зливи та зливові дощі повинні враховуватись для розрахунку пікових навантажень на дренажну систему.

Проблема вологонакопичення в дорожніх конструкціях та відповідні наслідки впливу цього складного процесу в зимовий період розглядається в роботах багатьох вчених. Одним із напрямків досліджень є отримання удосконалених дорожніх конструкцій з додатковими дренажними прошарками для забезпечення оптимальних строків осушення [23]. Запропонований у роботі [24] підхід щодо використання системи мобільного лазерного сканування (MLS) дозволяє визначити глибину розподілу водного потоку, виявити умови дренажного та поверхневого стоку, стан дренажної конструкції. Експериментальні дослідження режиму водного потоку в дренажних конструкціях, розподілу швидкісного поля, прогнозування витрати поверхневого водовідводу представлено в роботі [25]. Методологія гідравлічних розрахунків параметрів цілісної дренажної системи [26] є підґрунтям для розробки ряду ефективних гідротехнічних заходів з розподілу поверхневих вод. Результати числового 3D моделювання гідродинамічних процесів розподілу водного потоку в

дренажній системі дозволили врахувати параметри поздовжнього та поперечного профілю, конфігурацію автомобільної дороги в плані [27].

Згідно проведених розрахунків за останні п'ять років середня тривалість: осіннього періоду складає 3 місяці, зимового – до 1,5 місяця, весняного – понад 0,5 місяця, літнього – 7 місяців [28]. У зв'язку із суттєвими змінами строків розрахункових періодів водно-теплого режиму, при визначенні параметрів дренажних конструкцій мілкового закладання слід враховувати питомий надлишок води від злив, зливових та обложних дощів, які характеризуються своєю підвищеною інтенсивністю в літній період, на відміну від існуючих нормативних рекомендацій щодо підбору параметрів дренажів в залежності від весняного вологонакопичення.

У зв'язку зі зміною клімату, а саме підвищення вмісту атмосферної вологи, збільшенням інтенсивності та тривалості опадів, що випадають протягом року, відбувається зміна водно-теплого режиму дорожньої конструкції. При проектуванні елементів дорожньої конструкції, зокрема дренажних систем, виникає необхідність у розрахунку режиму інфільтрації опадів, визначенні притоку води від атмосферних опадів – пікове значення за період та розрахунок надходження води до дренажної системи [29].

Вплив води на дорожню конструкцію протягом річного циклу є завжди суттєвим і має багатофакторний характер. У роботі [30] запропоноване аналітичне рішення з визначення кількості води, що відводиться дренажним шаром дорожнього одягу. Наведені рекомендації щодо використання матеріалів в дренажних шарах в залежності від їх фільтраційних властивостей.

Вплив стану дорожнього одягу доріг, з удосконаленням покриттям, на безпеку автомобільного руху, з урахуванням водно-теплого балансу ґрунтового масиву ЗП, розглянуто в роботі [31]. Наведені математичні моделі, що відображають процеси розподілу температури і фільтраційного руху рідини в ґрунті. У роботі акцентується увага на тому, що інтенсивність зміни кількості вологи в ґрунті ЗП залежить від виду ґрунту, кількості атмосферних опадів, тривалості зволоження поверхневими або ґрунтовими водами, температурного

режиму. Також зазначено про небезпечний вплив навантажень від транспортних засобів на дорожній одяг у період сильного зволоження і перезволоження, але не запропоновано відповідних методів, що враховують це проблемне питання.

Дослідження розподілу вологи залежно від температурного режиму в дорожній конструкції представлено в роботі [32]. На основі експериментальних вимірювань побудовано графіки зміни вологості в осінній, весняний та літній періоди року. Розподіл та коливання вологи по глибині за часом має складний характер. Також відзначено, що на глибині понад 2 м максимальне значення вологості досягає в весняний період після повного розморожування.

Для вивчення властивостей дренажу та підвищення проектної надійності асфальтобетонного покриття в роботі [33] було використано 3D-метод визначення просочення через шари ДО. У результаті було встановлено, що вплив товщини, похилу, коефіцієнта проникності та конструкції дренажного шару впливають на ефективність водовідведення дренажної конструкції.

У дренажних або морозозахисних шарах основи дорожнього одягу та в робочому шарі ЗП на початку весняного періоду спостерігаються несприятливі для роботи ДК, суттєві зміни її вологісного режиму. Збільшення вологості спричинене надходженням як і атмосферних опадів, що просочуються через деформації покриття, узбіччя, укоси ЗП, так і за рахунок віджиманням води в дренажний шар при просіданні нижніх шарів ґрунтів, що відтанули. Збільшення інтенсивності великовагових автомобілів призводить до безперервного зростання навантажень та до додаткової міграції вологи між шарами дорожнього одягу і ґрунту ЗП, що обумовлює підвищення вимог до міцності і стійкості ДК.

## **1.2 Методи розрахунку вологості дорожньої конструкції**

Для доріг, що експлуатуються, можлива зміна умов зволоження ґрунтової основи порівняно з умовами, що мали місце в період попередніх вишукувань та проектування споруди (порушення поверхневого водовідведення, зміна положення рівня ґрунтових вод). У подібних випадках прогноз вологості є

необхідним для своєчасного усунення факторів, що погіршують вологісний режим ДК та змінюють умови експлуатації дороги за рахунок збільшення інтенсивності руху великовагового транспорту.

Результати натурних досліджень модуля деформації дорожньої конструкції з урахуванням сезонної зміни вологості ґрунту земляного полотна представлено в роботі [34]. Це дозволило авторам запропонувати метод оцінки НДС дорожньої конструкції протягом річного циклу для різних кліматичних умов. Але запропоновані дослідження [34] не враховують зміну вологості шарів основи дорожнього одягу під впливом навантаження, що суттєво може впливати на транспортно-експлуатаційний стан дороги в цілому.

Пори ґрунту ЗП частково або повністю заповнені рідиною, в основному водою, яка може бути в пароподібному, рідкому і твердому станах. Вода в ґрунті, її види та властивості залежать від вмісту в ґрунті та величини сил взаємодії з мінеральними частинками, які визначаються переважно гідрофільністю мінеральних частинок. Водяна пара в суміші з газами розглядається в складі газоподібної складової. У твердому стані вода знаходиться в ґрунтах у вигляді льоду, а також у вигляді кристалізаційної води, що входить в структуру кристалічних решіток різних мінералів, тобто у складі твердої фази.

В основу сучасних уявлень про види води і характер їх взаємодії з твердими частинками покладені дослідження Лебедева А.Ф., Дерягина Б.В. та інші [35, 36]. У рідкому стані вода може бути у зв'язному і вільному вигляді. Мінерали ґрунтів заряджені негативно, а молекули води являють собою диполі, заряджені позитивно на одному (атом кисню) та негативно на іншому (два атома водню) кінці. При зіткненні твердої мінеральної частинки з водою виникають електромолекулярні сили взаємодії, які притягують диполі води до поверхні мінеральних частинок з величезною силою (особливо з перших шарів), і чим більше питома поверхня частинок, тим більша кількість молекул води буде знаходитися в зв'язному стані. Зв'язна вода, зокрема поблизу від поверхні частинок, володіє підвищеною щільністю, має велику в'язкість, температуру замерзання нижче  $0^{\circ}\text{C}$ , і, відповідно за своїми властивостями, значно

відрізняється від вільної води. Електромолекулярні сили взаємодії, згідно [35], дуже великі і біля поверхні мінеральних часток (для першого ряду зв'язних молекул води) складають величину біля декількох сотень мегапаскалів, що значно перевищує сили власної ваги води. У міру ж віддалення від поверхні твердих частинок вони швидко зменшуються і на відстані, що дорівнює приблизно 0,5 мкм, стають близькими до нуля. Найближчі до мінеральної частинки шари в 1-3 ряди молекул води, які стикаються з твердою поверхнею, настільки зв'язні електромолекулярними силами тяжіння з поверхнею, що їх не вдається видалити ні зовнішнім тиском в кілька атмосфер, ні дією напору води, і ці шари утворюють плівки міцнозв'язною адсорбованої води.

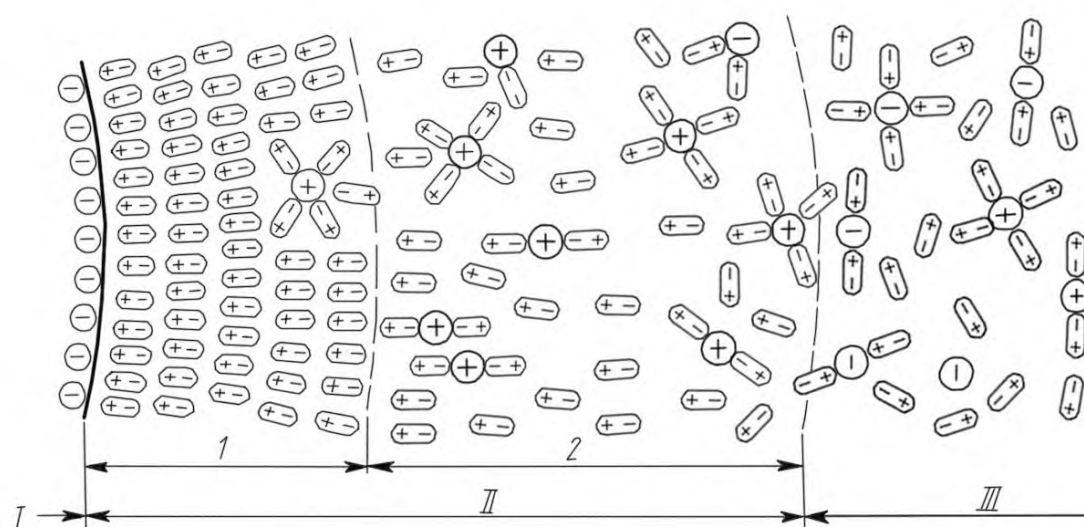
Наступні шари молекул води, що оточують мінерали, будуть зв'язуватися та орієнтуватися граничною фазою по мірі віддалення від твердої поверхні ґрунтових частинок все меншими силами; вони утворюють шари крихкозв'язної (ліосорбованої) води, які піддаються видавлюванню з пор ґрунту зовнішнім тиском, до декількох сотень кілопаскалів (іноді і до декількох мегапаскалів).

Кількість зв'язної води та її співвідношення з кількістю вільної води в значній мірі визначає властивості ґрунтів. У піщаних та великоуламкових ґрунтах, завдяки відносно малій питомій поверхні частинок, об'єм зв'язної води, розподіленої по їх поверхні, дуже малий. У глинистих ґрунтах, навпаки, за рахунок дуже великої питомої поверхні частинок, об'єм зв'язної води великий, а в щільних глинах або суглинках майже всі пори можуть бути заповнені зв'язною водою.

Для видалення і переміщення зв'язної води, особливо тої, що знаходиться ближче до поверхні твердих частинок, потрібні значні силові дії. Якщо дві однакові сусідні частинки ґрунту мають різні за товщиною водні плівки, то вода з товстої плівки переміщається в тонку, поки товщина плівок не стане однаковою. Така міграція вологи відбувається у випадках: як висихання верхніх шарів ґрунту; відриву зовнішнього шару зв'язної води потоком фільтруючої вільної води; вичавлюванням вологи із контактів між твердими частинками під дією навантаження.



Молекули води, що знаходяться поза сферою дії електромолекулярних сил взаємодії з поверхнею мінеральних частинок, будуть утворювати вільну - гравітаційну воду, рух якої відбувається під дією різниці напору, та капілярну, що підтягується на деяку висоту від рівня ґрунтових вод силами капілярного підняття, капілярними менісками, що утворюються під дією адсорбційних сил поверхні в тонких порах ґрунту та зумовлюють капілярні сили в ґрунтах. На рис. 1.1 показана схема електромолекулярної взаємодії поверхні мінеральних частинок з водою.



I - тверда частинка; II - зв'язна вода; III - вільна вода; 1 - шар міцнозв'язної води (гідратний шар); 2 - шар крихкозв'язної води (дифузійний шар)

Рисунок 1.1 – Схема будови шару зв'язної води [35]

При поширенні в товщі ґрунту нульових і негативних температур в першу чергу замерзає вільна вода, особливо з малою концентрацією розчинених в ній солей. При замерзанні частини такої води залишається більш концентрована ропка, яка може включатися в утворений лід у вигляді окремих бульбашок переохолодженої рідини. При наступному зниженні температури починає замерзати крихкозв'язна вода. Міцнозв'язна вода практично не замерзає при зимових температурах.

При замерзанні вода розширюється і, розсовуючи частинки, порушує структуру ґрунту. Характерно, що в межах зони негативних температур ґрунту вода, що замерзає, концентрується і відкладається у вигляді лінз і прошарків чистого льоду, розділених шарами мерзлого ґрунту з льодом в порах. У результаті утворюється особлива текстура замерзлого ґрунту, яку називають кріогенною. При зміщенні фронту льодоутворення всередину масиву ґрунту виникає інтенсивний процес переміщення вологи в зону промерзання з навколишнього незамерзаючого ґрунту. Найбільш інтенсивна міграція вологи та обводнення зони замерзання відбуваються в супіщаних та суглинистих ґрунтах. У результаті утворюються істотні деформації розширення ґрунту - морозне здимання. Міграція вологи в зону промерзання пояснюється складними фізико-хімічними процесами, зокрема капілярним «підсмоктуванням» води в результаті звуження пор в процесі замерзання в них води; зменшенням плівок зв'язаної води навколо частинок ґрунту в процесі замерзання крихкозв'язної води і прагненням цих частинок відновити плівки зв'язної води за рахунок сусідніх незамерзлих ділянок ґрунту; рухом води у бік зон більшої концентрації розчинених солей в поровій воді, які утворюються при її поступовому замерзанні; градієнтом температури у шарі, що замерзає.

Газоподібні включення (пари, гази) завжди містяться в ґрунтах і можуть перебувати в наступних станах: замкнутому або защемленому, розміщуючись у вакуолях між твердими мінеральними частинками, які оточені плівками зв'язної води; вільному, коли гази (повітря) з'єднуються з атмосферою; розчиненими у поровій воді. Наявність бульбашок газів, як замкнутих, так і таких, що містяться у поровій воді, істотно впливає на деформованість ґрунтів, обумовлює стисливість порової води та збільшує пружність ґрунту.

Вологообмін у ґрунтах, що сезонно промерзають, відбувається в наступному інтервалі вологості  $W_{\text{мг}} < W < W_{\text{пв}}$ , де  $W_{\text{мг}}$  – максимальна гігроскопічна вологоємність,  $W_{\text{пв}}$  – повна вологоємність. У такому інтервалі стан ґрунту відповідає гетерогенній системі, яка неводонасичена рідкою фазою вологи. Зі збільшенням вологості та обводненості мінеральних частинок такого ґрунту

механізми міграції води є змішаними [1 - 5]: в інтервалі вологості  $0,25 W_{ПВ} < W < 0,50 W_{ПВ}$  – дифузно-конденсаційний + плівковий; в інтервалі  $0,50 W_{нв} < W < 0,70 W_{нв}$  – дифузно-конденсаційний + плівковий капілярний; в інтервалі  $0,70 W_{нв} < W < W_{нв}$  – дифузно-конденсаційний + капілярний.

В якості розрахункової при призначенні конструкцій ДО приймають за найбільшу відносну весняну вологість:

$$W_{весн.відн} = \frac{W_{весн.}}{W_T} = W_{ос.відн} + \frac{Q_{нак.} \rho_v}{\delta_{нес} (z_{нр} - z_1) W_T S} = W_{осін.відн} + \frac{W_{з.н}}{W_T}, \quad (1.1)$$

де  $W_{весн.}$  – вологість ґрунту ЗП навесні, в частках одиниці;

$W_T$  – вологість на межі текучості, в частках одиниці;

$W_{ос.відн}$  – відносна осіння вологість, в частках одиниці;

$Q_{нак.}$  – об'єм накопиченої за зиму води в стовпчику ґрунту перетином  $S=1 \text{ см}^2$  [1, 7];

$\rho_v$  – щільність води,  $\text{г/см}^3$ ;

$\delta_{нес}$  – об'ємна вага талого ґрунту,  $\text{г/см}^2$ ;

$z_{нр}$  – глибина промерзання від поверхні покриття по осі проїзної частини, см;

$z_1$  – загальна товщина шарів дорожнього одягу, см;

$W_{з.н}$  – зимова накопичена вологість, в частках одиниці.

З наведеної формули видно, що зі зміною параметрів ДК змінюється розрахункова вологість ґрунту ЗП, а також деформативні та міцнісні характеристики ґрунту.

Вологообмін у ДК відбувається внаслідок наявності градієнтів потенціалу тепла, потенціалу перепаду пари та рідиноподібної води. Залежно від річного циклу, за характером зволоження, у шарах дорожнього одягу може мігрувати однофазна ( $W \leq W_{МГ}$ ) або двофазна ( $W_{МГ} < W < W_{ПВ}$ ) вода. При однофазному зволоженні вологонакопичення в будь-якому шарі ДО розраховується за формулою:

$$\Delta W = W_{\kappa} - W_{\text{поч}} , \quad (1.2)$$

де  $W_{\kappa}$  – вологість до кінця періоду вологонакопичення  $T$ ;

$W_{\text{поч}}$  – початкова вологість.

При двофазному зволоженні в ДО, коли одночасно дифундує насичена водяна пара  $P = P_t$  та мігрує вода в рідкій фазі, сумарне вологонакопичення площини  $n$  (рис. 1.2, а) визначається як:

$$\Delta W_n = W_{\text{поч}} + \frac{100\Delta T}{\rho_g z^2 \delta} \left[ \lambda_{\text{нар}} (P_{n-1} - 2P_n + P_{n+1}) + \lambda_{\text{pid}} (W_{n-1} - 2W_n + W_{n+1}) \right]. \quad (1.3)$$

На основі загального рівняння, залежно від типу конструкції, властивостей матеріалу шарів ДО та ґрунту ЗП, отримані модифіковані залежності зміни вологості. У випадку, коли в конструкції ДО є щільний шар з малою паропроникністю, він перериває міграцію рідкої фази вгору. Внаслідок низької паропроникності в площині  $n+1$  пружність пари нижче значення  $P_t$  і конденсація пари не відбувається. Приріст вологості за час  $\Delta T$  при міграції двофазної вологи дорівнюватиме:

$$\Delta W_n = \frac{100\Delta T}{\rho_g z^2 \delta_{n+1}} \left[ \lambda_{\text{pid}} (W_{n-1} - W_n) + \lambda_{n,n} (P_{n-1} - P_n) - \lambda_{n,n+2} (P_{n+1} - P_{n+2}) \right]. \quad (1.4)$$

На межі ДО з ЗП (площина  $O$ , рис. 1.2, а) відбувається якісна зміна процесу міграції вологи. Якщо шар 1 влаштований з щільного малопаропроникного матеріалу (цементогрунт, бітумогрунт), то рух рідкої фази вологи вгору обмежена, а пружність водяної пари істотно знижується. Якщо шар 1 влаштований з пористого матеріалу (пісок, щебінь, шлак, горіла порода, жорства), рух рідкої фази вологи вгору також обмежується, оскільки в цих матеріалах кількість

колоїдних фракцій, що обумовлюють пересування рідкої фази, мало.

Отже, в правильно спроектованій дорожній конструкції, з боку земляного полотна в одяг надходить насичена водяна пара  $P_n$ . У шарі 1 відбувається його конденсація в деякій зоні товщиною  $h_k$ .

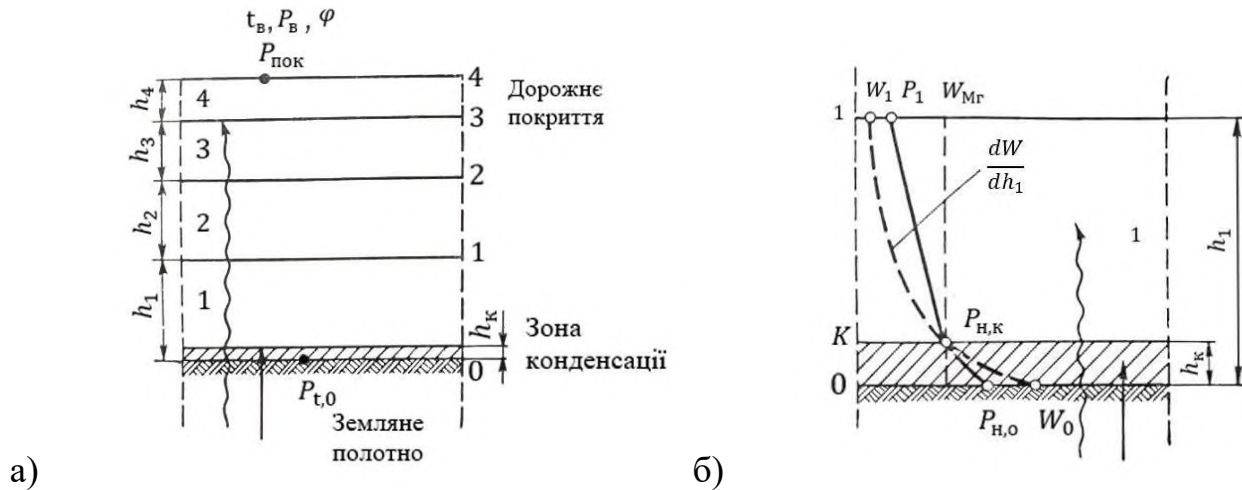


Рисунок 1.2 – Схема для визначення вологості нижнього шару основи дорожнього одягу (граничного шару) [1]

Вологість у нижньому шарі (рис. 1.2, б) змінна по товщині – від  $W_1$  (відповідає на кривій адсорбції пружності  $P_1$ ) до  $W_0$ . У нижній частині шару  $h_1$  на глибину  $h_k$  відбувається конденсація водяної пари і тому в цій зоні відбувається, крім дифузії і пароутворення, рух вологи в рідкій формі.

Розрахунок вологості граничного шару ДО, за умови зволоження його пароподібною та рідкою вологою, визначається за наступною залежністю:

$$W_k = W_{MG} + \frac{100\Delta T}{h_k \delta_1} \left[ \frac{\lambda_{pid}}{h_k} (W_0 - W_{MG}) + \frac{\lambda_n}{h_k} (P_n - P_{n,-1}) \right], \quad (1.5)$$

де  $\lambda_{pid}$  – коефіцієнт вологопровідності рідкої фази вологи для ґрунту ЗП, кг/м·год.%;

$W_0$  – вологість ґрунту полотна (задається як гранична умова);

$\lambda_n$  – коефіцієнт паропроникності ґрунту, кг/м·год·мм;

$h_k$  – товщина в граничному шарі, де відбувається конденсація водяної пари, см;

$\delta_1$  – об'ємна вага граничного шару, г/см<sup>3</sup>.

Вологість ґрунту  $n$ -го шару ЗП товщиною  $\Delta z$  визначається на основі суми вологостей:

$$W_l = W_{pid} + W_{\Pi}, \quad (1.6)$$

де  $W_{pid}$  – вологість ґрунту, обумовлена міграцією рідкої фази;

$W_{\Pi}$  – зростання вологості за рахунок конденсації водяної пари.

За стаціонарного волого обміну:

$$W_{pid} = W_0 - \frac{W_0 - W_n}{D} \Sigma D_n, \quad (1.7)$$

де  $W_0, W_n$  – вологість на відповідних граничних площах, %;

$D$  – сумарний опір вологопроникності в межах площин 0 –  $n$ , % м<sup>2</sup>·год/кг, визначається як

$$D = \frac{h_1}{\lambda_{pid1}} + \frac{h_2}{\lambda_{pid2}} + \dots + \frac{h_m}{\lambda_{pid m}}. \quad (1.8)$$

Кількість конденсаційної вологи в  $n$ -м шарі товщиною  $h$  визначаються за залежністю:

$$W_n = \frac{100 \lambda_n \Delta T}{h^2 \delta} (P_{n,n-1} - P_{n,n}). \quad (1.9)$$

Загальне вологонакопичення в активній зоні ЗП в шарі  $h_1$  за зимовий період  $T_{ост}$  дорівнюватиме ( $\Delta W_{pid} + \Delta W_{\Pi}$ ):

$$\Delta W = \frac{100T}{\delta h_1} \left[ \frac{\lambda_{pi\partial}}{h_1} (W_0 - W_1) + \frac{\lambda_{II}}{h_1} (P_{n,0} - P_{n,1}) \right], \quad (1.10)$$

де  $\lambda_{pi\partial}$  – середнє значення коефіцієнта вологопровідності в шарі  $h_1$ , кг/м·год., %;  
 $h_1$  – товщина шару земляного полотна, для якої приймається перепад вологостей  $W_0 - W_1$ .

Рівняння (1.10) враховує теплові особливості дорожнього одягу.

У роботі [1] представлена розрахункова залежність для визначення найбільшої вологості багатокomпонентних систем, що складаються з кам'яного скелета (щебеневі, гравійні частки):

$$W_{ic}^{oc} = \frac{4,5}{\delta_{zp}} (1 - p_z) \left( \sec \frac{0,665}{\sqrt{d_e}} - 1 \right)^2 \left[ 1 - \left( \frac{\pi}{2} - \frac{0,665}{\sqrt{d_e}} \right) \operatorname{tg} \frac{0,665}{\sqrt{d_e}} \right] + p_z W_{HB}, \quad (1.11)$$

де  $\delta_{zp}$  – об'ємна вага скелетних (щебених, гравійних) частинок;

$p_z$  – вміст ґрунту в шарі, частки одиниці;

$d_e$  – ефективний діаметр скелетних часток, що визначається як середній ваговий;

$W_{HB}$  – найменша вологоємність ґрунту, що визначається за співвідношенням:

$$W_{HB} \cong \frac{2}{3} W_{ПВ}, \quad (1.12)$$

де  $W_{ПВ}$  – вологість ґрунту, відповідає повній вологоємності і визначається за

$$W_{ПВ} = \frac{1}{\gamma_{ск}^{zp}} - \frac{1}{\delta_{zp}}, \quad (1.13)$$

де  $\gamma_{ск}^{zp}$  – об'ємна вага скелета ґрунту в шарі;

$\delta_{zp}$  – об'ємна вага ґрунтових частинок ( $\delta_{zp} = 2,67 - 2,71$  г/см<sup>3</sup>).

При влаштуванні дренажного морозозахисного шару на всю ширину ЗП

у роботі [7] запропоновано визначення середнього за висотою значення вологості піщаного шару у весняний період після відтавання ґрунту:

$$W_{мз}''' = \left[ b \left( q_{атм(пр.ч)}''' + q_{відж(пр.ч)}''' + q_{відж(р)}''' \right) + 2a \left( q_{атм(узб)}''' + q_{відж(узб)}''' \right) - 2S_{мз} H_{випар(ук)}''' \right] \times \\ \times \frac{\rho_{\text{в}}}{K_{y(\text{в})} \rho_{ск(мах)} h_{мз} (b + 2a) \bar{\omega}_{\text{ср}}} + W_{мз}'' , \quad (1.14)$$

де  $q_{атм(пр.ч)}'''$  - приплив води в морозозахисний шар від атмосферних опадів, що випадають на поверхню проїжджої частини у весняний період,  $\text{м}^3/\text{м}^2$ ;

$q_{відж(пр.ч)}'''$  — об'єм води, що надходить в морозозахисний шар з лежачих під ним в межах проїзної частини ґрунтів при їх осіданні після відтавання,  $\text{м}^3/\text{м}^2$ ;

$q_{відж(р)}'''$  - об'єм води, що надходить в морозозахисний шар під дією динамічного навантаження від автомобілів,  $\text{м}^3/\text{м}^2$ ;

$q_{відж(узб)}'''$  - об'єм води, що надходить в морозозахисний шар з лежачих під ним в межах узбіч ґрунтів при їх осіданні після відтавання,  $\text{м}^3/\text{м}^2$ ;

$q_{атм(узб)}'''$  - приплив води в морозозахисний шар від атмосферних опадів, що випадають на поверхню узбіч, і від стоку води з проїзної частини на узбіччя в весняний період,  $\text{м}^3/\text{м}^2$ ;

$H_{відж(відк)}'''$  - випаровування води з морозозахисного шару через укуси земляного полотна у весняний період  $\text{м}^3/\text{м}^2$ ;

$K_{y(\text{в})}$  - коефіцієнт ущільнення ґрунту після його опади у весняний період;

$W_{мз}''$  - середня вологість піску морозозахисного шару в кінці зими, частки одиниці;

$b$  - ширина проїзної частини, м;

$a$  — ширина узбіччя, м.



### **1.3 Стисливість та прогнозування осідання ґрунтів. Узагальнені методи визначення деформацій ґрунтів**

Важливим показником фізико-механічних властивостей ґрунтів є їх структурна міцність та її зміна під впливом зовнішніх навантажень (замочування, відтавання, вібрація і т. д.), що обумовлює стисливість та відповідний процес просідання.

Стисливість ґрунтів, зокрема ґрунтів земляного полотна, пов'язана зі зміною їх пористості та загальним їх об'ємом під дією зовнішніх сил, внаслідок перепакування частинок (зміни вмісту твердих частинок в одиниці об'єму ґрунту), є властивістю лише дисперсних матеріалів. Таке зменшення пористості ґрунтів при більш компактній упаковці частинок відбувається, як внаслідок виникнення деяких місцевих зрушень частинок і зісковзування більш дрібних частинок в пори ґрунту, так і, особливо у дисперсних водонасичених глинистих ґрунтах, внаслідок зміни товщини водно-колоїдних плівок мінеральних частинок під впливом збільшення тиску, висихання та коагуляції.

На перепакування частинок впливає повзучість скелету ґрунту та плівок міцнозв'язної води, які також можна відносити до скелету ґрунту [35, 36], що обумовлено викривленням форми кристалічних решіток мінеральних частинок та повільною в'язкою течією молекулярних шарів міцнозв'язної води.

Для повністю водонасичених ґрунтів зміна пористості можлива лише при зміні їх вологості, видавлюванні або висмоктуванні води, та стисканні газових включень всередині об'єму. Зміна пористості характерна також і для неводонасичених ґрунтів. Перетворення об'єму пор дисперсних ґрунтів при висиханні, в процесі обезвожування плівок води та збільшення капілярного стискання, а також внаслідок фізико-механічних процесів відбувається внаслідок ущільнення під навантаженням.

При оцінці деформованості просідаючих ґрунтів в якості характеристики їх стисливості використовується модуль просідання - відносна деформація ґрунту при певному тиску:

$$\varepsilon_{sl} = s_i / h , \quad (1.15)$$

де  $s_i$  – повне просідання зразка ґрунту при певному навантаженні, вимірюється від початку завантаження, мм;

$h$  – початкова висота зразка ґрунту, мм.

Коефіцієнт стисливості може бути виражений через відношення зміни коефіцієнта пористості до величини діючого тиску:

$$m_0 = (e_1 - e_2) / p , \quad (1.16)$$

де  $e_i$  – коефіцієнт пористості ґрунту при будь-якому ступені навантаження;

$p$  – навантаження, МПа.

При розрахунках осідання при ущільненні ґрунтів використовують показник - коефіцієнт відносної стисливості, який дорівнює

$$m_v = m_0 / (1 + e_0) , \quad (1.17)$$

де  $e_0$  – початковий коефіцієнт пористості ґрунту;

або

$$m_v = s_i / (hp_i) , \quad (1.18)$$

дорівнює відносному просіданню  $\varepsilon_p$ , на одиницю діючого тиску  $p_i$ . (МПа).

Цю величину також визначають за співвідношенням

$$m_v = \beta / E_o , \quad (1.19)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт, який залежить від коефіцієнта відносної поперечної деформації ґрунту, аналогічний коефіцієнту Пуассона для пружних тіл;

$E_o$  – модуль загальної деформації ґрунту.

Модуль загальної деформації ґрунту визначають за формулою:

$$E_0 = \Delta\sigma_z / \Delta\varepsilon_z, \quad (1.20)$$

де  $\Delta\sigma_z$  – зміна вертикальних напружень;

$\Delta\varepsilon_z$  – зміна вертикальних деформацій.

Просідання ґрунтів оцінюється величиною відносної деформації просідання, яка визначається за виразом

$$\varepsilon_{sl} = (h_{np} - h_{satp}) / h_{ng} \quad (1.21)$$

де  $h_{np}, h_{satp}$  – висота зразків ґрунту, відповідно, природної вологості та водонасиченого, без бокового розширення при тиску  $p$  від дії зовнішнього навантаження та власної ваги верхніх шарів ґрунту, мм;

$h_{ng}$  – висота зразка ґрунту природної вологості, мм.

Якщо значення відносної деформації просідання  $\varepsilon_{np} \geq 0,02$ , то такі структурно нестійкі ґрунти відносять до категорії ґрунтів, що просідають.

Формулу (1.21) можна переписати у вигляді:

$$\varepsilon_{sl} = \Delta h_{np} / h_{ng}. \quad (1.22)$$

За дослідями Абелева Ю.М., Денисова Н.Я., Мустафаєва А.А., згідно [39], величина відносної деформації просідання при зміні зовнішнього тиску не залишається постійною, а зростає з його збільшенням.

Для отримання параметру повного просідання ґрунту при навантаженні використовується формула (1.17), відповідно:

$$s = h m_v p, \quad (1.23)$$

а за виразом (1.19)

$$s = h \frac{\beta}{E_0} p . \quad (1.24)$$

На процес просідання впливає як водопроникність ґрунтів (в умовах водонасичення), так і повзучість скелета ґрунту, а також деформованість всіх компонентів, що складають ґрунти (порова вода, включення повітря, парів і газів, органічних речовин).

Осідання ґрунту під дією навантаження від споруди визначають як суму осідань елементарних шарів ґрунту такої товщини, для яких можна без великої погрішності приймати при розрахунках середні значення діючих напружень та коефіцієнтів, що характеризують ґрунти [36].

Врахування напружень для окремих виділених елементів (шарів) стиснутої товщі ґрунтів розглядають за двома основними методами: 1 - врахування тільки осьових стискаючих напружень  $\sigma_z$  та 2 - врахування всіх нормальних напружень  $\sigma_x \sigma_y \sigma_z$ . За першим методом приймають, що кожен елемент ґрунту буде сприймати тільки вертикальне стискання під дією середнього тиску, максимальне стискаюче напруження  $\sigma_z$  без можливості бокового розширення. Тоді для осідання окремого елемента, якщо не враховувати (у запас) структурну міцність стиснення, застосовують формулу для всієї товщі:

$$s = \sum_{i=1}^{i=h_0} h_i m_{vi} \sigma_{zi} , \quad (1.25)$$

або

$$s = \sum_{i=1}^{i=h_0} h_i \frac{\beta_i}{E_{oi}} \sigma_{zi} , \quad (1.26)$$

де  $h_i$  - товщина окремих шарів ґрунту;

$m_{vi}$  - коефіцієнт відносної стисливості окремого шару ґрунту;

$\beta_i$  - коефіцієнт, що залежить від бокового розширення ґрунту [35];

$E_{oi}$  - модуль загальної деформації шару ґрунту.

Осідання елементарного шару ґрунту товщиною  $h_i$  у випадку дії стискаючих напружень за трьома взаємно перпендикулярним напрямками та неможливості бокового розширення ґрунту, враховуючи формулу (1.15), визначають як:

$$s = h[\varepsilon_{pz} - \mu_0(\varepsilon_{px} - \varepsilon_{py})], \quad (1.27)$$

де  $\varepsilon_{pz}, \varepsilon_{px}, \varepsilon_{py}$  - модулі осідання (відносні деформації) при безпосередньому та ізолюваному впливі на елемент ґрунту нормальних напружень, які залежать від величини цих напружень.

Узагальнені методи визначення деформацій ґрунтів враховують як загальні пружні, так і місцеві непружні їх деформації.

Метод структурно-відновлювальних деформацій Черкасова-Клейна [40, 41] враховує загальні відновлювальні деформації (пружні і адсорбційні) та залишкові (структурні) і застосовується при розрахунку нежорстких дорожніх одягів.

У цьому методі відновлювальні деформації приймають за лінійно деформовані, які характеризуються коефіцієнтом, аналогічним коефіцієнту пружного напівпростору:

$$C_s = (1 - \mu_s^2) / E_s, \quad (1.28)$$

а структурні деформації визначають за теорією розмірностей, виходячи зі степеневі залежності:

$$p = A(s_{\text{залиш}} / D)^n, \quad (1.29)$$

де  $p$  - зовнішній питомий тиск (навантаження), Па;

$A$  - число твердості, Н/м<sup>2</sup>;

$s_{\text{залиш}}$  - залишкова деформація, м;

$D$  - діаметр круглої площі завантаження, м;

$n$  - ступінь зміцнення (безрозмірний параметр).

Повне осідання при круглій площі завантаження за цим методом визначається виразом:

$$s_o / D = (\pi / 4) C_\phi p + \sqrt[3]{p / A}, \quad (1.30)$$

а осідання точок поверхні ґрунту поза завантаженої площі:

$$s_r = (D / 2) C_\phi p \arcsin[D / (2r)], \quad (1.31)$$

де  $r$  - відстань від розглянутої точки на поверхні ґрунту до центру круглої площі завантаження.

Для визначення залежності між зміною коефіцієнта пористості та відносною деформацією приймають основне припущення, що стиснення або розширення ґрунту відбувається тільки за рахунок зміни об'єму ґрунту, тобто частинки ґрунту вважаються нестисливими. Тоді, прирівнюючи об'єми частинок ґрунту до та після деформації, у роботі [36] отримано, з урахуванням  $\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ , вираз для об'ємної деформації у вигляді:

$$\varepsilon_v = (e_1 - e_2) / (1 + e_1). \quad (1.32)$$

В умовах неможливості бокового розширення ґрунту, наприклад, для шарів ґрунту,  $\varepsilon_z = \varepsilon_y = 0$ , а  $\varepsilon_z = \varepsilon_v$  і тому

$$\varepsilon_z = (e_1 - e_2) / (1 + e_1). \quad (1.33)$$

У диференціальній формі рівняння (1.32) і (1.33) набувають вигляду:

$$d\varepsilon_v = -de / (1 + e) \text{ та } d\varepsilon_z = -de / (1 + e). \quad (1.34)$$

Таким чином, маючи будь-який зв'язок коефіцієнта пористості з напруженням, його можна, за формулою (1.32) або (1.33), представити у вигляді залежності між деформаціями і напруженнями.

Для опису процесу деформування ґрунту із застосуванням моделі лінійно-деформованого тіла визначають дві розрахункові характеристики деформованості: модуля деформації  $E$  та коефіцієнта Пуассона  $\nu$ , які можуть визначатися для ґрунтів за експериментально отриманими значеннями коефіцієнта бокового тиску  $\xi$  і коефіцієнта ущільнення  $K_{\text{ущ}}$  або безпосередньо з лабораторних та польових випробувань ґрунтів.

У зв'язку з тим, що будь-яку деформацію можна представити у вигляді суми об'ємної деформації та деформації зсуву, застосовують інші характеристики деформованості – модуль об'ємної стисливості ( $K$ ) і модуль зсуву ( $G$ ), які пов'язані з  $E$  та  $\nu$  певними, що приводяться нижче, залежностями.

Для цього систему рівнянь Гука представляють у вигляді:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1+\nu}{E}(\sigma_x - \frac{\theta}{3}) + \frac{1-2\nu}{3E}\theta; \\ \varepsilon_y &= \frac{1+\nu}{E}(\sigma_y - \frac{\theta}{3}) + \frac{1-2\nu}{3E}\theta; \\ \varepsilon_z &= \frac{1+\nu}{E}(\sigma_z - \frac{\theta}{3}) + \frac{1-2\nu}{3E}\theta.\end{aligned}\tag{1.35}$$

де  $\theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$ .

Перші доданки кожного компонента деформації у рівняннях (1.35) відносяться до деформації зсуву, а другі доданки - деформації об'єму. Тому рівняння (1.35) представляють у вигляді:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{2G}(\sigma_x - \frac{\theta}{3}) + \frac{1}{3K}\theta; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{2G}(\sigma_y - \frac{\theta}{3}) + \frac{1}{3K}\theta; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{2G}(\sigma_z - \frac{\theta}{3}) + \frac{1}{3K}\theta;\end{aligned}\tag{1.36}$$

де модуль зсуву:

$$G = E / [2(1+\nu)], \quad (1.37)$$

модуль об'ємного стиснення:

$$K = E / (1-2\nu). \quad (1.38)$$

Виключаючи з (1.37) та (1.38)  $E$ , у роботі [36] представлено залежність:

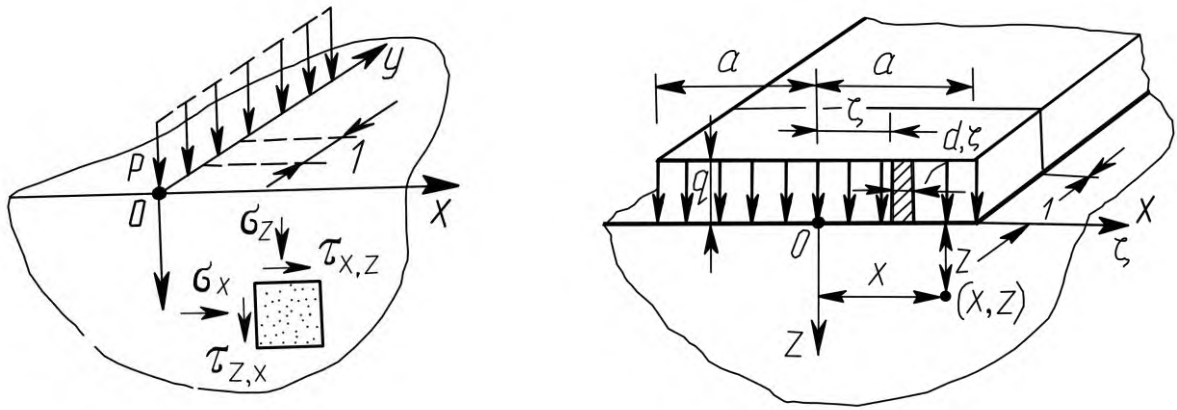
$$\nu = (K - 2G) / (2K + 2G). \quad (1.39)$$

Таким чином, з чотирьох розрахункових характеристик деформованості лінійно деформованого середовища ( $E, \nu, G, K$ ) комбінація з двох достатня для опису її напружено-деформованого стану.

Визначення напружень від зовнішніх статичних навантажень на основі моделі лінійно-деформованого тіла виконується двома способами. В умовах площинної задачі вертикальна зосереджена сила  $P$  відповідає розподіленому вздовж горизонтальної осі рівномірному нескінченному навантаженню інтенсивністю  $P$  (рис. 1.3, а). Для розглянутого випадку для напружень отримані рівняння без урахування дії об'ємних сил [36]:

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi} \frac{x^2 z}{(x^2 + z^2)^2}; \quad \sigma_z = \frac{2P}{\pi} \frac{z^3}{(x^2 + z^2)^2}; \quad \tau_{xz} = \frac{2P}{\pi} \frac{xz^2}{(x^2 + z^2)^2}. \quad (1.40)$$





а)

б)

Рисунок 1.3 – Умови площинної задачі для визначення напружень від зовнішніх статичних навантажень [36]: а) зосереджена сила; б) розподіл смугового навантаження

У випадку рівномірно розподіленого смугового навантаження  $q$  (рис. 1.3, б) розподілене навантаження представляють елементарними зосередженими силами, що дорівнюють  $qd\zeta$ , з заміною  $x$  на  $x-\zeta$  рівняннях (1.40). Тоді напруження в точці  $(x, z)$  від смугового навантаження, згідно [35], на ділянці  $(-a, +a)$  будуть дорівнювати:

$$\sigma_x = \frac{2q}{\pi} \int_{-a}^{+a} \frac{(x-\zeta)^2 z}{[(x-\zeta)^2 + z^2]^2} d\zeta = \frac{q}{\pi} \left( \arctg \frac{a-x}{z} + \arctg \frac{a+x}{z} \right) + \frac{2aqz(x^2 - z^2 - a^2)}{\pi[(x^2 + z^2 - a^2)^2 + 4a^2 z^2]};$$

$$\sigma_z = \frac{q}{\pi} \left( \arctg \frac{a-x}{z} + \arctg \frac{a+x}{z} \right) - \frac{2aqz(x^2 - z^2 - a^2)}{\pi[(x^2 + z^2 - a^2)^2 + 4a^2 z^2]}; \quad (1.41)$$

$$\tau_{xz} = \frac{4aqxz^2}{\pi[(x^2 + z^2 - a^2)^2 + 4a^2 z^2]}.$$

Для напружень від зосередженої сили, прикладеної до поверхні однорідного ізотропного півпростору (рис. 1.4), отримані Ж. Буссінеском рівняння у вигляді

$$\begin{aligned}
\sigma_x &= \frac{3P}{\pi} \left\{ \frac{zx^2}{R^5} + \frac{1-2\nu}{3} \left[ \frac{R^2 - Rz - z^2}{R^3(R+z)} - \frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right] \right\}; \\
\sigma_y &= \frac{3P}{\pi} \left\{ \frac{zy^2}{R^3} + \frac{1-2\nu}{3} \left[ \frac{R^2 - Rz - z^2}{R^3(R+z)} - \frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right] \right\}; \\
\sigma_z &= (3P / 2\pi)(z^3 / R^5); \\
\tau_{xy} &= \frac{3P}{\pi} \left[ \frac{xyz}{R^5} - \frac{1-2\nu}{3} \frac{xy(2R+z)}{R^5(R+z)} \right]; \\
\tau_{yz} &= (-3P / 2\pi)(yz^2 / R^5); \\
\tau_{zx} &= (-3P / 2\pi)(yz^2 / R^5),
\end{aligned} \tag{1.42}$$

де  $R^5 = x^2 + y^2 + z^2$ .

Сума головних напружень в будь-якій точці основи дорівнює:

$$\theta = \sigma_z + \sigma_y + \sigma_x = \frac{P}{\pi} (1-\gamma) \frac{z}{R^3}. \tag{1.43}$$

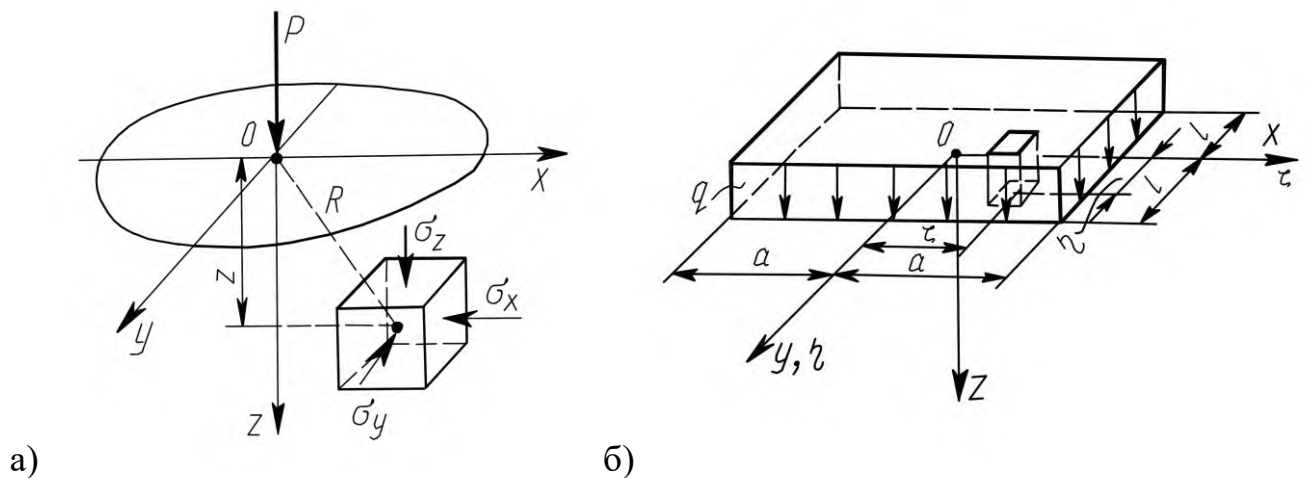


Рисунок 1.4 – Умови просторової задачі для визначення напружень від зовнішніх статичних навантажень [36]: а) зосереджена сила на поверхні півпростору; б) рівномірний розподіл навантаження по площі прямокутника

Особливістю рішень просторової задачі є те, що рівняння (1.42) входить коефіцієнт Пуассона  $\nu$ , тобто напруження  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  залежать від співвідношення між поздовжніми і поперечними деформаціями для даного ґрунту. Вертикальні

стискаючі напруження  $\sigma_z$  не залежать від розрахункових характеристик і однакові для всіх лінійно деформованих тіл.

Випадок завантаження прямокутної площі поверхні основи рівномірно розподіленим навантаженням був розглянутий Лявом А. і Короткін В.Г. Отримані рівняння розподілу напружень, використовуючи рішення для зосередженої сили (1.42), шляхом заміни в ньому сили  $P$  на  $qd\zeta d\eta$  та інтегруванням в межах від  $-a$  до  $+a$  і від  $-l$  до  $+l$  (рис. 1.4):

$$\sigma_z^y = \frac{q}{2\pi} \left[ \frac{4alz(4a^2 + 4l^2 + 2z^2)}{(4a^2 + z^2)(4l^2 + z^2)\sqrt{4a^2 + 4l^2 + z^2}} + \arctg \frac{4al}{z\sqrt{4a^2 + 4l^2 + z^2}} \right]. \quad (1.44)$$

Напруження для точок, розташованих на вертикалі, що проходить через центр площі завантаження  $\sigma_{z''}$ , виходять рівними, збільшеними у четверо, від значень напружень  $\sigma_{z'}$ . У відповідних точках, розташованих на подвоєній глибині на вертикалях, що проходять через кути площі завантаження  $\sigma_{z/2}'' = 4\sigma_{z'}''$ .

Розрахунки напружень та деформацій, що виникають під дією навантажень від великовагових транспортних засобів ґрунтуються на таких характеристиках ґрунту, як модуль пружності, коефіцієнт внутрішнього тертя, величина зчеплення. Однак числові значення характеристик ґрунтів можуть різко змінюватися зі зміною щільності та вологості ґрунту. Тому числовий експеримент повинен, в принципі, проводитися при максимальному значенні вологості ґрунту  $W_p$ , яке можливе за розрахунковий строк служби дороги. Неврахування цих особливостей створює можливість розвитку неприпустимих за величиною деформацій ДО або ДК в цілому.

## Висновки по розділу 1

1. При обґрунтуванні загального модуля пружності ДК у теперішній час водно-тепловий режим земляного полотна враховується лише в загальному вигляді кліматичною зоною та гідрологічної групою місцевості. При цьому не

враховується можливість перезволоження ґрунтів ЗП на різних глибинах активної зони, зокрема нижніх шарів основи ДО. Це може призвести до порушення стійкості і утворення деформацій дорожнього одягу.

2. Оскільки вологість та міцність ґрунту ЗП змінюються протягом року, то при проектуванні ДО велике практичне значення має не тільки призначення розрахункових вологості та модуля пружності ґрунту, але і врахування заздалегідь встановленого інтервалу сезонного коливання вологості, особливо в несприятливі періоди року. А в результаті одночасного впливу несприятливого водно-теплогового режиму та великовагового транспорту відбувається порушення стійкості ДО і внаслідок виникають та розвиваються його деформації.

3. При оцінці деформованості просідних ґрунтів в якості характеристики їх стисливості використовується модуль просідання - відносна деформація ґрунту при певному тиску. На процес просідання впливає як водопроникність ґрунтів (в умовах водонасичення), так і повзучість скелета ґрунту, а також деформованість всіх компонентів, що складають ґрунти (порова вода, включення повітря, парів і газів, органічних речовин). Узагальнені методи визначення деформацій ґрунтів враховують як загальні пружні, так і місцеві непружні їх деформації. У відповідності з цим, прогнозування вологісного режиму ДК повинно ґрунтуватися на дослідженні її напружено-деформованого стану з урахуванням міграції вологи під впливом навантажень від великовагових транспортних засобів

4. Результати досліджень першого розділу викладено у наступних публікаціях [28, 29].

## РОЗДІЛ 2

### РЕЖИМИ РОБОТИ ДРЕНУВАЛЬНИХ ШАРІВ У ДОРОЖНІХ КОНСТРУКЦІЯХ

#### **2.1 Дослідження режимів роботи дренавальних шарів у дорожніх конструкціях**

Дослідження роботи піщаних та щебеневих дренавальних шарів було проведено на експериментальній установці дорожньої конструкції (рис. 2.1, 2.2), розміри якої відповідають параметрам автомобільної дороги III категорії, у навчально-науковій лабораторії кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету, представлені у роботі [42]. Передня стінка корпусу установки влаштована з органічного скла, що дозволяє безпосередньо спостерігати за режимами роботи шарів у комплексі з дренажною траншеєю.

У верхньому шарі ґрунту земляного полотна було влаштовано прямокутну дренажну траншею глибиною 0,25 м та шириною 0,25 м, обкладену по периметру геосинтетичним матеріалом (ГСМ). Похил дна траншеї – 25 %. На дно траншеї поверх розкладеного по периметру ГСМ укладено перфоровану трубу ПВХ, яку попередньо було обгорнуто ГСМ із перекриттям 0,1 м. Дренажну трубу щільно обсипано митим кварцовим крупнозернистим піском фракцією 2–3 мм. Фільтруючу обсипку закрито краями ГСМ з перекриттям 30 см.

Для влаштування дренавального шару в дренажній конструкції мілкового закладання (далі- ДКМЗ) № 1 було використано митий щебінь фракцією 20 – 40 мм товщиною 0,12 м (рис. 2.1). Влаштування щебеневого шару обумовлене тим, що він має пористу структуру з коефіцієнтом фільтрації 200 м/добу, не затримує воду.

Для влаштування піщаного дренавального шару в ДКМЗ № 2 використовувався середньозернистий пісок товщиною 0,3 м (рис. 2.2). При цьому коефіцієнт фільтрації піску задовольняв основній вимозі щодо властивостей

дренувальних шарів. А саме він повинен бути таким, щоб не відбувалося утворення шару води під ДО, а атмосферні опади, що надходять проїзної частини в дренувальний шар, повністю поступали в пори цього піщаного шару. Виходячи з цієї вимоги, коефіцієнт фільтрації піску – 4,5 м/добу.

Під час дослідження проводилися вимірювання об'єму відведеної води обох типів ДКМЗ. Результати вимірювань наведені в табл. 2.1 та 2.2.

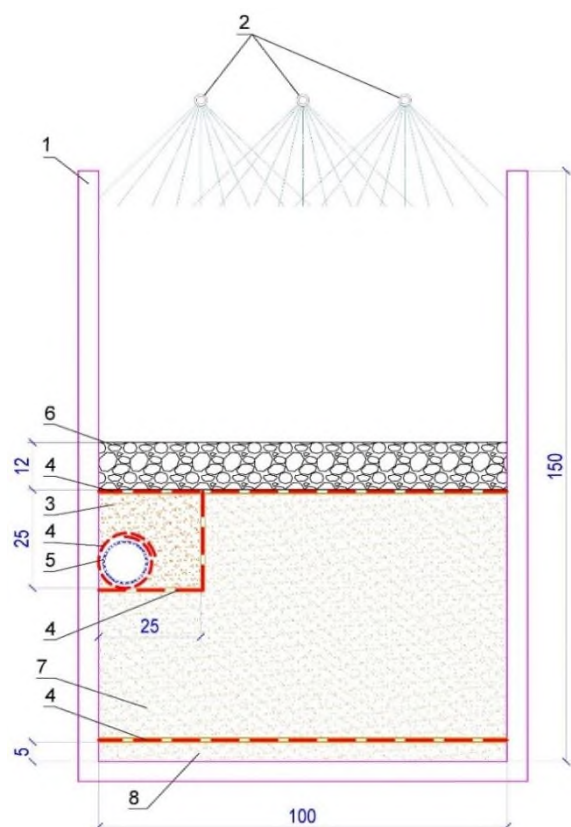
Вода надходила на поверхню дренувального шару за допомогою системи імітації дощових опадів (рис. 2.1 та 2.2), яка забезпечувала рівномірний розподіл вологи по площині експериментальної установки.

Таблиця 2.1 – Загальний об'єм відведеної води ДКМЗ № 1 з дренувальним шаром з щебеню

| Дата проведення експерименту | Об'єм води, який надійшов до конструкції $Q_{\text{заг.}}, \text{Л}$ | Об'єм відведеної води під час сформованого потоку $Q_{\text{від}}, \text{Л}$ | Час сформованого потоку $t_{\text{сформ}}, \text{хв}$ | Загальний об'єм відведеної води $Q_{\text{заг.від}}, \text{Л}$ | Загальний час відведення води $t_{\text{заг.від}}, \text{хв}$ |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 17.02.2020                   | 25                                                                   | 8,6                                                                          | 26                                                    | 10,6                                                           | 206                                                           |
| 19.02.2020                   | 25                                                                   | 11,5                                                                         | 27                                                    | 13,5                                                           | 207                                                           |
| 21.02.2020                   | 25                                                                   | 11,8                                                                         | 26                                                    | 15,8                                                           | 206                                                           |
| Всього                       | 75                                                                   | 31,9                                                                         | 79                                                    | 39,9                                                           | 619                                                           |

Таблиця 2.2 – Загальний об'єм відведеної води ДКМЗ № 2 з дренувальним шаром з піску

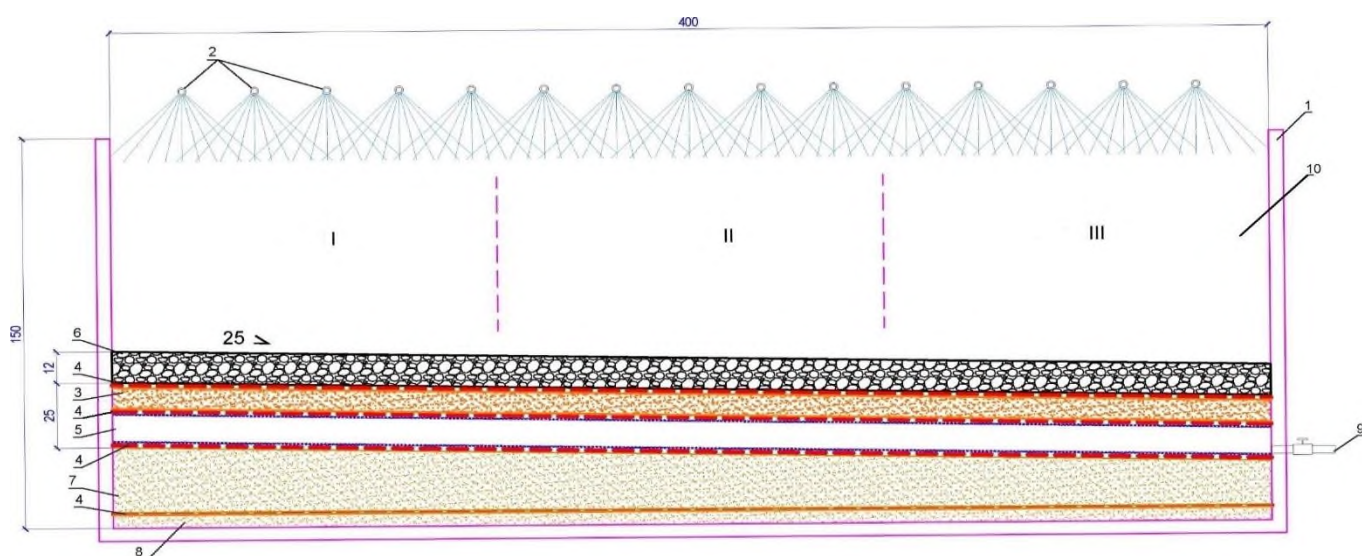
| Дата проведення експерименту | Об'єм води, який надійшов до конструкції $Q_{\text{заг.}}, \text{Л}$ | Об'єм відведеної води під час сформованого потоку $Q_{\text{від}}, \text{Л}$ | Час сформованого потоку $t_{\text{сформ}}, \text{хв}$ | Загальний об'єм відведеної води $Q_{\text{заг.від}}, \text{Л}$ | Загальний час відведення води $t_{\text{заг.від}}, \text{доба}$ |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 24.02.2020                   | 100                                                                  | 23,0                                                                         | 32                                                    | 26,8                                                           | 1 доба                                                          |
| 26.02.2020                   | 25                                                                   | 0,0                                                                          | 0                                                     | 1,9                                                            | 1 доба                                                          |
| 27.02.2020                   | 40                                                                   | 0,0                                                                          | 0                                                     | 2,6                                                            | 1 доба                                                          |
| 24.02-07.03                  | 165                                                                  | 23,0                                                                         | 32                                                    | 49,5                                                           | 12 діб                                                          |



а)



б)

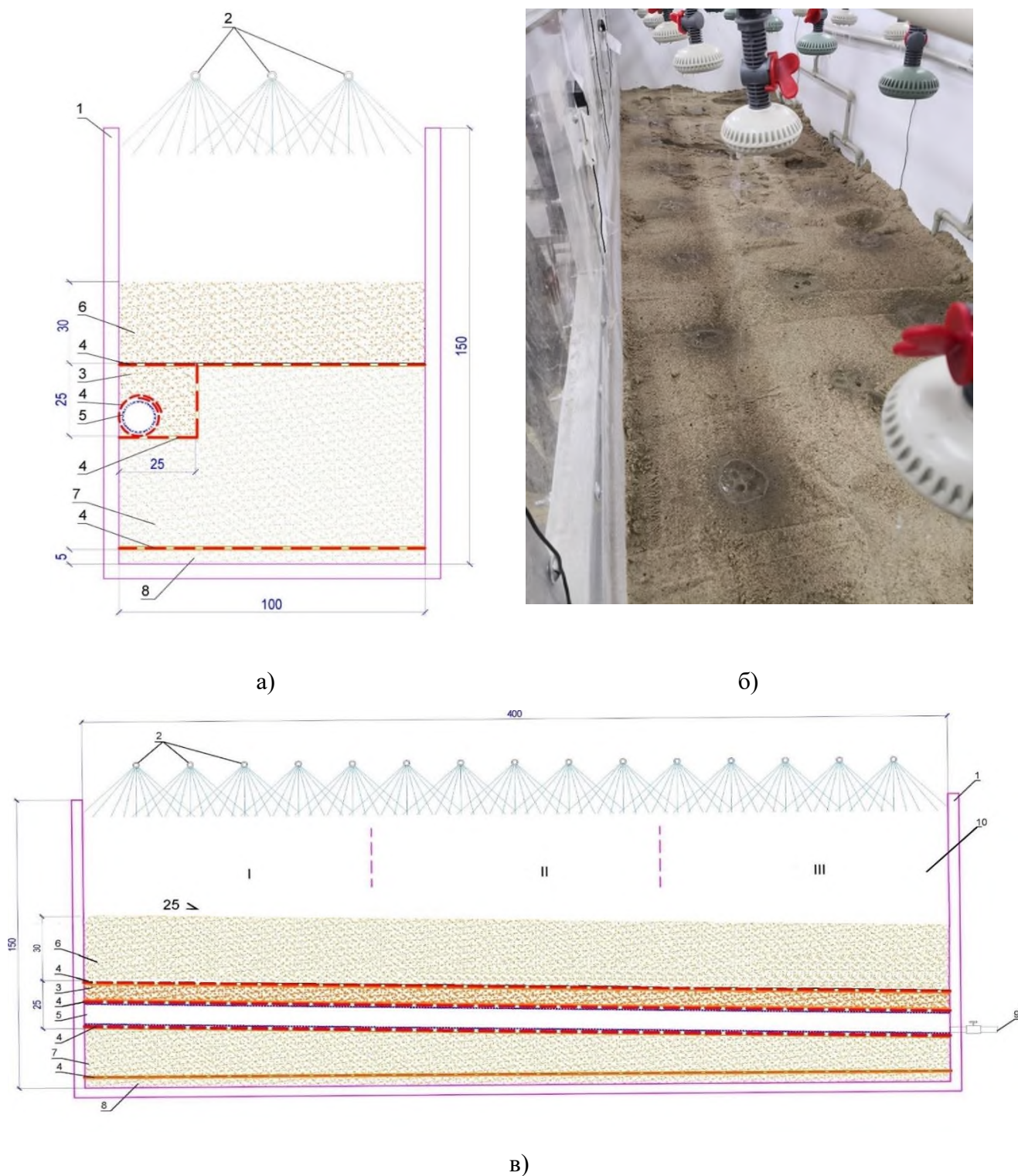


в)

1 – корпус експериментальної установки; 2 – система імітації дощових опадів; 3 – заповнювач дренажної траншеї – кварцовий митий пісок фракції 2–3 мм; 4 – прошарок ГСМ; 5 – дренажна труба ПВХ діаметром 100 мм з отворами; 6 – дренавальний шар – митий щебінь фракції 20–40 мм; 7 – ґрунт – супісок пилуватий; 8 – шар дрібнозернистого піску; 9 – відвідний отвір (кран); 10 – передня стінка корпусу експериментальної установки з оргскла.  
I, II, III – відповідно зони проведення вимірювань

Рисунок 2.1 – Експериментальна установка з дренавальним шаром з щебеню: а) торцева площина; б) подача води на дренавальний шар; в) бокова площина;





1 – корпус експериментальної установки; 2 – система імітації дощових опадів; 3 – заповнювач дренажної траншеї – кварцовий митий пісок фракції 2–3 мм; 4 – прошарок ГСМ; 5 – дренажна труба ПВХ діаметром 100 мм з отворами; 6 – дренавальний шар – середньозернистий пісок; 7 – ґрунт – супісок пилуватий; 8 – шар дрібнозернистого піску; 9 – відвідний отвір (кран); 10 – передня стінка корпусу експериментальної установки з оргскла. I, II, III – відповідно зони проведення вимірювань

Рисунок 2.2 – Експериментальна установка з дренавальним шаром з середньозернистого піску: а) торцева площина; б) подача води на дренавальний шар; в) бокова площина



У ході проведення експерименту на ДКМЗ № 1 було виявлено, що трубчастий дренаж мілкового закладання працював в двох режимах. Після надходження води в щебеновий дренажний шар, вода одразу поступала в траншею, де відбувалося формування фільтраційного потоку. Середній час відведення води (табл. 2.1) складає – 206 хв., середня інтенсивність відведення (співвідношення кількості відведеної води до часу її відведення) сформованого потоку – 0,4038 л/хв. Протягом наступних 3-х годин вода відводилася у формі крапель з інтенсивністю – 0,0148 л/хв. Відповідно до табл. 2.1, було встановлено, що дренавальний шар віддав 53,2 % від загальної кількості води, що надійшла за 3,4 години. Таким чином, ДКМЗ №1 працювала за принципом осушення.

У результаті проведених експериментальних досліджень на ДКМЗ № 2 було встановлено, що при надходженні води у кількості 25 л, як і у випадку для ДК № 1, пісок поглинув воду та не віддав її. Надалі в ДКМЗ № 2 надійшло ще 75 л води, а в загальній кількості - 100 л. ДКМЗ № 2 почала відводити воду тільки при майже повному насиченні піщаного шару у вигляді сформованого потоку з інтенсивністю - 0,7188 л/хв. Протягом наступних двох діб в ДКМЗ № 2 надійшло ще 65 л води. Дренавальний шар тримав воду протягом 12 діб (табл. 2.2) та віддав 30 % від загальної кількості води (165 л), що надійшла, у вигляді крапель. Таким чином ДКМЗ № 2 розглядалася, як конструкція, що працює за принципом осушення, а фактично працювала за принципом поглинання. Режим роботи двох типів ДКМЗ, згідно результатів експериментальних досліджень, відрізняються між собою, тому що дренавальний шар з щебеню має середню інтенсивність водовідведення 0,0645 л/хв, а дренавальний шар з середньозернистого піску – 0,0029 л/хв. Інтенсивність водовідведення дренавального шару з середньозернистого піску під час сформованого потоку, при 23 % відведеної води, становить 0,7188 л/хв., а дренавального шару з щебеню при 42,5% – 0,4038 л/хв за умови, що кількість води, яка надійшла на дренавальний шар з піску в чотири рази більше за кількість, яка надійшла на дренавальний шар з щебеню. Порівняння режимів роботи двох типів ДКМЗ наведено на рис. 2.3 та 2.4.

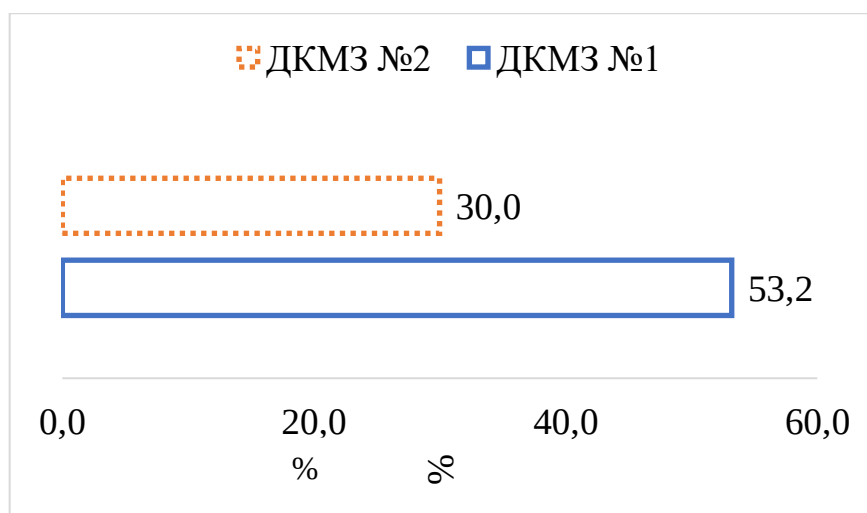


Рисунок 2.3 – Загальний об'єм відведеної води

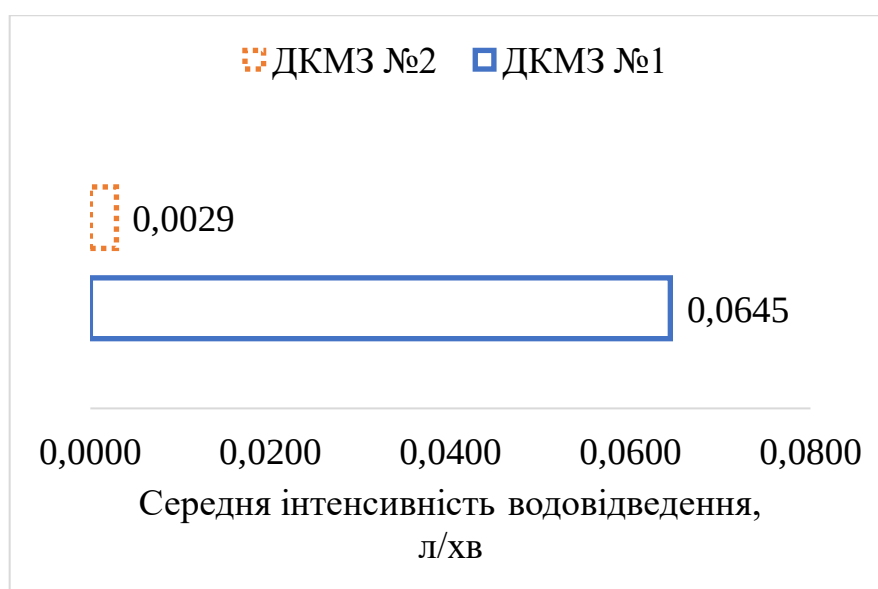


Рисунок 2.4 – Середня інтенсивність водовідведення ДКМЗ №1 та ДКМЗ №2

Згідно даних, що наведені на рис. 2.3 і 2.4 видно суттєву різницю режимів роботи двох типів ДКМЗ. Піщані дренавальні шари переважно працюють за принципом поглинання та накопичування вологи в дорожній конструкції. Шари з фільтруючих зернистих матеріалів – митого щебеню або гальки, завжди працюють за принципом осушення, не накопичуючи воду.

## 2.2 Процес просідання ґрунту при його відтаванні та висушуванні

Для прогнозування кількості обсягу води, що надходить в дренальний шар під дією динамічного навантаження (навантаження від великовагових транспортних засобів) від великовагових автомобілів, та відповідної зміни вологісного режиму всієї ДК в найбільш несприятливий період року необхідно визначити, якими характеристиками можливо описати цей процес. Для розрахунку водно-теплого режиму земляного полотна використовують дані досліджень щодо просідання ґрунту при його відтаванні та висушуванні [7, 11, 43 - 46].

Міграція вологи в зону промерзання супроводжується фазовим переходом води, в результаті чого може мати місце здимання ґрунту. Одночасно при зменшенні вологості талого ґрунту, тобто при відтаванні, відбувається і його просідання, яке може переважати над здиманням. У роботі [7] зазначено, що ці явища залежать від співвідношення між витратою плівковою води, що надходить з талого ґрунту в мерзлий шар, і витратами капілярної води, відповідно під кордоном промерзання та нижче глибини промерзання за зиму. У цьому випадку, при просіданні, виникають напруження, під дією яких і відбувається зближення ґрунтових частинок. Вологість ґрунту в мерзлом шарі земляного полотна  $W_m$  визначається як:

$$W_m = W'_0 + \frac{\bar{Q}_{p(0)с\bar{e}p} \rho_6}{\rho'_{ск(0)} v_{np} \bar{\omega}_{ep}}, \quad (2.1)$$

де  $W'_0$  – вологість ґрунту під межею промерзання - відтавання після відтоку плівкової води із талого ґрунту в мерзлий шар, в частках одиниці;

$\rho_6$  – густина води, кг/м<sup>3</sup>;

$\bar{Q}_{p(0)с\bar{e}p}$  – середнє для шару земляного полотна значення витрати плівковою води, що надходить з талого ґрунту в мерзлий шар, м<sup>3</sup>/с;

$v_{np}$  – швидкість промерзання ґрунту, м/с;

$\bar{\omega}_{ep}$  – площа поперечного перетину ґрунту, м<sup>2</sup> ( $\bar{\omega}_{ep} = 1$  м<sup>2</sup>);

$\rho'_{ск(0)}$  – щільність сухого ґрунту під межею промерзання - відтавання після відтоку плівковою води в мерзлий шар, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho'_{ск(0)} = \rho_{ск(0)} / (1 - e_{просід}), \quad (2.2)$$

де  $e_{просід}$  – відносне просідання ґрунту при відтаванні, частки одиниці.

Для визначення відносного просідання ґрунту при відтаванні в роботі [47] враховувалися закономірності, встановлені при проведенні експериментальних досліджень, згідно [7], для процесу просідання при висушуванні ґрунту. Цей процес залежить від складу, щільності та вологості ґрунту, а також він уповільнюється при зменшенні інтенсивності видалення води з ґрунту, що обумовлено різною міцністю пор на стиск. Видалення води відбувається в першу чергу з найменш міцних, більших, пор. Далі вода видаляється з більш тонких капілярів, які володіють великим опором на стиск. Напруження при просідання, що розвиваються при видаленні капілярної води з слабо ущільнених ґрунтів, швидко поновлюються. Зміна об'єму ґрунту в цей період виявляється рівною об'єму видаленої з нього води. При наступному осушенні ґрунту, коли міцність на стиск вже значно зросла за рахунок зближення ґрунтових частинок, внутрішні напруження не встигають поновлюватися. У результаті цього розвиток деформацій відстає від швидкості зневоднення і швидкість просідання знижується.

Для наближеної практичної оцінки процесу просідання ґрунту при відтаванні в роботах [7, 47] встановлювали значення коефіцієнта лінійного просідання ґрунту за даними його лабораторних випробувань при висушуванні. З урахуванням цього у роботі [7] була прийнята методика визначення просідання ґрунту в інтервалі вологості  $1,35 \div 1,0 W_{opt}$  ( $W_{opt}$  – оптимальна вологість), за основу якої покладена лінійна залежність між об'ємом та вологістю ґрунту. Коефіцієнт лінійного просідання встановлювався за даними замірів висоти зразка при двох значеннях вологості: повної вологоємності і оптимальної (або близькою до неї) вологості. Коефіцієнт лінійного просідання визначався за даними випробувань

зразка ґрунту, який попередньо піддавався промерзанню та відтаванню.

Розрахунок просідання ґрунту в процесі відтавання в роботі [7] рекомендується проводити за формулами:

$$h_{\text{просід(м)}} = 10^2 (z_{\text{нр(i)}} - z_{\text{нр(i-1)}}) e_{\text{просід}}, \quad (2.3)$$

$$e_{\text{просід}} = 1 - \frac{1 + a_{\text{просід}} W'_0}{1 + a_{\text{просід}} W_0}, \quad (2.4)$$

де  $a_{\text{усід}}$  – коефіцієнт лінійного просідання ґрунту, безрозмірна величина;

$W_0$  – початкова вологість ґрунту під межею промерзання - відтавання, в частках одиниці;

$z_{\text{нр}}$  – глибина промерзання, м.

Коефіцієнт лінійного просідання також можна отримати з формули (2.4) зворотним перерахунком.

Кожен з періодів ВТР у ДК характеризується своїм значенням коефіцієнта ущільнення ґрунту ЗП, під яким розуміють відношення щільності скелета ґрунту  $\rho_{\text{скел}}$  до його максимальної щільності  $\rho_{\text{max}}$  при оптимальній вологості за методом стандартного ущільнення. Розрахунок коефіцієнтів ущільнення проводять на основі послідовного визначення для кожного періоду набухання, здимання, просідання ґрунту:

$$K_{y(\text{с})} = K_{y(\text{з})} / (1 - e_{\text{просід}}), \quad (2.5)$$

$$K_{y(\text{п})} = K_{y(\text{с})} / (1 - e_{\text{просід}}), \quad (2.6)$$

$$K_{y(\text{ос})} = K_{y(\text{п})} / (1 + e_{\text{наб}}), \quad (2.7)$$

$$K_{y(\text{з})} = K_{y(\text{ос})} / (1 + e_{\text{здим}}), \quad (2.8)$$

де  $K_{y(\text{з})}$  – коефіцієнт ущільнення після здимання ґрунту взимку;

$K_{y(\theta)}$  – коефіцієнт ущільнення після просідання ґрунту навесні;

$K_{y(l)}$  – коефіцієнт ущільнення після просідання ґрунту влітку;

$K_{y(oc)}$  – коефіцієнт ущільнення після набухання ґрунту восени;

$e_{просід}$  – відносне просідання ґрунту;

$e_{наб}$  – відносне набухання ґрунту;

$e_{здим}$  – відносне здимання ґрунту.

Згідно досліджень, представлених у роботі [7], встановлено, що при деякому мінімальному значенні коефіцієнта ущільнення ґрунту після просідання навесні має місце наступне співвідношення між здиманням ґрунту і його просіданням:  $h_{просід} \geq h_{здим}$ . У цьому випадку припиняється зниження щільності ґрунту і встановлюється так названа "побутова" щільність. "Побутовий" щільності скелета ґрунту в літній період відповідає коефіцієнт ущільнення ґрунту:

$$K_{y(\theta)} = \frac{K_{y(min)}}{1 - e_{просід}}, \quad (2.9)$$

$e_{просід}$  – відносне просідання ґрунту при його висиханні навесні та влітку, частки одиниці.

Розрахунок відносного просідання можна виконати за формулою:

$$e_{просід} = 1 - \frac{1 + a_{просід} W_l}{1 + a_{просід} W_{ПВ}}, \quad (2.10)$$

де  $W_l$  – вологість ґрунту в літній період, долі одиниці;

$W_{ПВ}$  – повна вологоємність ґрунту при щільності після просідання, долі одиниці.

При цьому, чим вище щільність ґрунту при будівництві дороги, тим більше  $K_{y(\theta)}$ .

### **2.3 Метод визначення об'єму віджимання води під впливом динамічного навантаження**

Вплив великовагових транспортних засобів обумовлює в ДК розвиток надмірних напружень, що призводять до виникнення та поступового накопичення деформацій дорожнього покриття. Розвиток таких деформацій відбувається за рахунок тривалих внутрішніх процесів, що призводять до створення ослаблених зон між шарами ДО та ЗП зі зниженими міцнісними характеристиками. Суттєву вагомість міцності та цілісності дорожнього одягу, що характеризують НДС дорожньої конструкції, як показників якісного стану ділянки автомобільної дороги, наведено в роботах [48] та [49]. У роботі [50], як метод дослідження процесів тріщиноутворення в бетонному покритті, застосовано математичне моделювання, що ґрунтується на залежностях впливу рухомого складу та погодних умов. Числовий експеримент проводився за трьома етапами з моделювання: метеорологічних параметрів; річної зміни водно-теплогового режиму (ВТР), НДС дорожньої конструкції. Підхід щодо моделювання НДС ґрунтувався на результатах випробувань бетонних балок на вигин. Але така схема розрахунку суттєво відрізняється від запропонованої в цій роботі і не дозволяє враховувати вплив опору ґрунтової основи.

Багатошарова ДК під дією вібрації від транспорту на покриття зазнає суттєвого впливу від вільної води, яка потрапляє в проміжки між шарами. Під дією навантажень від великовагових транспортних засобів (особливо перевантажених) в шаровій конструкції виникає ефект подібний діафрагмовому насосу, що прискорює розвиток пошкоджень в багато разів.

Від дії коліс автомобілів дорожній одяг прогинається та відновлюється. При великій інтенсивності великоваговиків навантаження від їх коліс можуть повторюватися через кожні 1,5–6,0 с [15, 51]. У процесі руху створюються чаши прогинів, які перекривають одна одну по всій ширині смуги руху. У шарах дорожнього одягу виникають напруження стиску, розтягу, згину та зсуву, накопичується їх вплив, що поступово призводить до припинення відновлення

дорожнього покриття. Вплив збільшення навантаження підвищує ступінь защемлення води, змушує її рухатися по поверхні розділу між нижнім шаром покриття та верхнім шаром ЗП. Це обумовлює процес розмивання матеріалу основи ДО та (або) верхнього шару ґрунту ЗП. У початковий період, за рахунок руху догори, відбувається виштовхування і розбризкування води через відкриті тріщини на поверхню. При постійному русі перевантажених транспортних засобів створюються умови для виникнення підсосу води з верхнього шару ґрунту ЗП. Вода поступово прокладає собі шлях для виходу між узбіччям і кромкою покриття. У процесі викиду або витікання води відбувається змішуванням дрібних фракцій ґрунту ЗП з водою, яка забирає їх з собою. У результаті, під впливом транспортних навантажень поступово утворюються та збільшуються порожнечі, які викликають руйнування покриття.

При визначенні вологості ґрунтів в найбільш несприятливий весняний період під дренавальним, морозозахисним шаром переважно враховують віджимання води з цих ґрунтів при їх просіданні після відтавання. Зазначене віджимання води відбувається з шару ґрунту товщиною  $2/3$  глибини промерзання – відтавання [7, 11]. У разі промерзання ґрунту робочого шару ґрунту ЗП з непорушеною структурою об'єм з віджимання води при відтаванні визначають за формулою:

$$q'''_{\text{відж(пр.ч)}} = \left\{ \rho_{\text{ск(max)1}} (K_{y(z)1} W_{\text{м(1)}} - K_{y(e)1} W_{\text{е(1)}}) h_{\text{роб.шар}} + \rho_{\text{ск(max)2}} (K_{y(z)2} W_{\text{м(2)}} - K_{y(e)2} W_{\text{е(2)}}) \right\} \times \\ \times \left[ 2 / 3 (h_{\text{пр}} - h_{\text{мз}}) - h_{\text{роб.шар}} \right] \omega_{\text{гр}} / \rho_{\text{в}}, \quad (2.11)$$

де  $\rho_{\text{ск(max)1}}$ ,  $\rho_{\text{ск(max)2}}$  – максимальні щільності скелета ґрунту за методом стандартного ущільнення відповідно робочого шару ЗП і основи насипу або виїмки,  $\text{кг/м}^3$ ;

$K_{y(z)1}$ ,  $K_{y(z)2}$  – коефіцієнти ущільнення ґрунту в кінці зими відповідно робочого шару земляного полотна;

$K_{y(e)1}$ ,  $K_{y(e)2}$  – коефіцієнти ущільнення ґрунту після його просідання у весняний період відповідно робочого шару земляного полотна;



$W_{м(1)}$ ,  $W_{м(2)}$  – вологість ґрунту в кінці зими відповідно робочого шару земляного полотна, частки одиниці;

$W_{г(1)}$ ,  $W_{г(2)}$  – вологість ґрунту після його просідання у весняний період відповідно робочого шару земляного полотна і основи насипу або виїмки, частки одиниці.

Питомий надлишок води  $q'''_{відж(узб)}$  на узбіччях визначається за аналогічним підходом, або допускається приймати  $q'''_{відж(узб)} = q'''_{відж(пр.ч)}$ .

Об'єм води, що надходить в дренавальний, морозозахисний шар під дією динамічного навантаження від автомобілів визначають за номограмою (рис. 2.5), запропонованої В. І. Кукановим (МАДІ) [15, 51].

Для встановлення об'єму води  $q'''_{відж(р)}$  потрібно попередньо обчислити напруження від розрахункового автомобіля на поверхню ґрунту під дренавальним шаром  $\sigma_{н.о}$ , МПа:

$$\sigma_{н.о} = \frac{\bar{p}}{1 + 1,5(z_{екв} / D)^2}, \quad (2.12)$$

$$z_{екв} = 1,1h_{од} \sqrt{E_{д.о} / E_{гр}}, \quad (2.13)$$

де  $\bar{p}$  – середній розрахунковий тиск колеса на покриття, МПа;

$z_{екв}$  – товщина еквівалентного шару ґрунту, см;

$D$  – розрахунковий діаметр сліду колеса автомобіля, см;

$h_{од}$  – товщина дорожнього одягу (з морозозахисним шаром), см;

$E_{д.о}$  – середній модуль пружності дорожнього одягу (з морозозахисним шаром), МПа;

$E_{гр}$  – модуль пружності ґрунту ЗП під морозозахисним шаром, МПа.

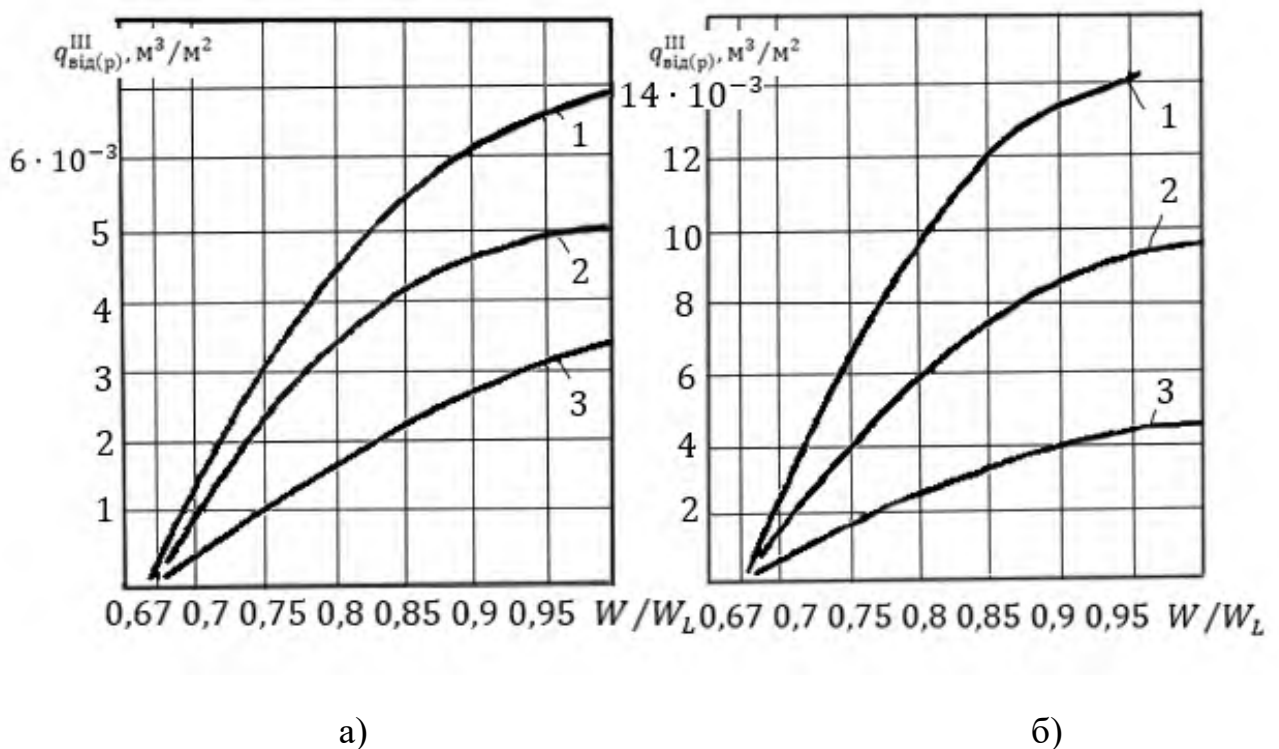
Після чого визначають товщину шару ґрунту  $z_{відж}$  см, розташованого під дренавальним шаром, з якого буде відбуватися віджимання води під дією динамічного навантаження від автомобілів:

$$z_{\text{відж}} = \frac{D\sqrt{(\bar{p} - \sigma_{\text{відж}}) / (1,5\sigma_{\text{відж}})}}{1,1\sqrt[3]{E_{\text{до}} / E_{\text{гр}}}} - h_{\text{од}}, \quad (2.14)$$

де  $\sigma_{\text{відж}}$  – мінімальне значення напруження, при яких не буде віджимання води, МПа.

Для супіщаних ґрунтів, згідно [7, 15, 51] слід приймати  $\sigma_{\text{відж}} = 0,010$  МПа, для суглинків та глин  $\sigma_{\text{відж}} = 0,012$  МПа.

За рисунком 2.5 визначають питомий надлишок  $q'''_{\text{відж}(p)}$  в залежності від різновиду ґрунту та його вологості (відносного значення  $W_s / W_L$ ) у весняний період в шарі ґрунту і від навантаження ( $\sigma_{\text{н.о}}$ ) від автомобілів на цей шар.



Дія динамічного навантаження від автомобілів: 1 – 0,06 МПа; 2 – 0,04 МПа; 3 – 0,02 МПа

Рисунок 2.5 – Номограми для визначення об'єму води, що віджимається з супіску (а), суглинків та глин (б)

Результати розрахунків дозволяють визначити за формулою (1.14) значення вологості  $W'''_{мз}$  при відсутності спеціальних пристроїв щодо відведення води з дренажного шару. Представлений метод МАДІ, щодо розрахунку зміни вологісного стану дорожньої конструкції під дією навантаження [7, 15, 51], є обмеженим щодо діапазону відносної вологості ґрунту ЗП та не враховує процеси осідання ґрунту ЗП під дією навантаження. Ці обставини обумовлюють суттєві зміни у підходах до розрахунку дорожніх конструкцій з точки зору міграції вологи та необхідність залучення сучасних розрахункових комплексів щодо визначення напружено-деформованого стану (НДС) перезволоженої дорожньої конструкції.

## Висновки по розділу 2

1. Дренажні шари з піску, які широко застосовуються для будівництва дорожньої конструкції, не забезпечують швидке відведення води і за умовами роботи працюють на поглинання. Експериментально визначено, що дренажний шар з піску не працює на осушення поки не досягне певної вологості  $W_{д.ш.} \rightarrow W_{ПВ}$ .

2. Товщина дренажного шару з піску повинна бути досить великою для того, щоб розмістити всю воду, яка надходить, на тривалий час. При дотриманні умови допустимого рівня вільної гравітаційної води в піску забезпечується міцність всієї дорожньої конструкції. Якщо рівень вищий за допустиму позначку, то в такому випадку розвиватимуться деформації ДО. Дренажний шар з піску, що задовольняє зазначеним вимогам, як правило, проектується за умовами роботи на поглинання.

3. Для розрахунку водно-теплого режиму земляного полотна використовують дані досліджень щодо просідання ґрунту при його відтаванні та висушуванні. Для визначення відносного просідання ґрунту при відтаванні в роботі враховувалися закономірності, які встановлені при проведенні експериментальних досліджень, для процесу просідання при висушуванні ґрунту.

4. Кожен з періодів ВТР в ДК характеризується своїм значенням коефіцієнта ущільнення ґрунту ЗП. Розрахунок коефіцієнтів ущільнення проводять на основі послідовного визначення для кожного періоду набухання, здимання, просідання ґрунту.

5. Існуючий метод розрахунку щодо зміни вологісного стану дорожньої конструкції під дією навантаження є застарілим і не відповідає сучасним нормативним вимогам. Сучасні розрахункові навантаження перевищують навантаження, за якими проектувався дорожній одяг у два рази. Ці обставини обумовили суттєві зміни у підходах до розрахунку дорожніх конструкцій з точки зору міграції вологи та необхідність залучення сучасних розрахункових комплексів щодо визначення напружено-деформованого стану (НДС) перезволоженої дорожньої конструкції.

6. Результати досліджень другого розділу викладено у наступних публікаціях [42, 49].

## РОЗДІЛ 3

### ПРОГНОЗУВАННЯ ВОЛОГІСНОГО РЕЖИМУ ДРЕНУВАЛЬНОГО ШАРУ ДОРОЖНЬОЇ КОНСТРУКЦІЇ ПІД ДІЄЮ НАВАНТАЖЕННЯ

#### 3.1 Побудова моделі дорожньої конструкції в ПРК SCAD Office

Для створення розрахункової моделі елементів автомобільної дороги було обрано ПРК SCAD Office призначений для числового дослідження міцності і стійкості широкого класу конструкцій об'єктів будівництва, визначення НДС конструкцій від статичних і динамічних дій. SCAD Office є універсальним ПРК, спрямованим на галузь цивільного будівництва.

У методі СЕ займана конструкцією суцільна область  $\Omega$ , яка має нескінченне число ступенів вільності, апроксимується дискретною моделлю, що складається із сукупності підобластей (кінцевих елементів), що мають кінцеве число ступенів вільності і взаємодіючих між собою тільки в вузлових точках, [52 - 59].

Кожен СЕ характеризується наступними властивостями:

- розмірністю використовуваного простору (одномірне, двомірне, тривимірне);
- геометричною формою, яка найчастіше є однією з найпростіших геометричних фігур (відрізок прямої, трикутник, прямокутник, чотирикутник, тетраедр тощо);
- набором вузлів, розташованих (як правило, хоча і не завжди) на лініях (поверхнях) розділу елементів і є загальними для межі один з одним елементів;
- набором використовуваних ступенів вільності, віднесених найчастіше до вузлів – переміщення, повороти тощо;
- правилами, що визначають залежність між переміщеннями вузлів кінцевого елемента і вузлами системи. Вузли елемента прикріплені до вузлів системи або жорстко або шарнірно;

- системою функцій апроксимації, визначених всередині області  $\Omega$  та дозволяють наближено виразити компоненти переміщень в будь-якій точці елемента через його ступінь вільності;
- фізичним законом, що визначає залежність між внутрішніми зусиллями та переміщеннями;
- класом задач, до яких застосовується даний тип СЕ;
- набором допустимих навантажень і впливів, які можуть бути включені безпосередньо до кінцевого елемента, та способом їх завдання;
- переліком обмежень та рекомендацій щодо застосування.

Бібліотека скінченних елементів SCAD представлена  $h$ -елементами. Однією з найважливіших характеристик моделі СЕ є максимальний діаметр елементів з яким часто пов'язують оцінки похибки методу:

$$h = \max_e \left( \sup_{x, y \in \Omega} |x - y| \right). \quad (3.1)$$

Тобто,  $h$  – це мінімальний діаметр кулі, в який можна вкласти будь-який кінцевий елемент розрахункової схеми. Як правило, у методі скінченних елементів (МСЕ) апроксимуючі функції є поліноміальними або частково-поліноміальними (метод підобластей). Вибір ступенів вільності елемента і відповідних апроксимуючих функцій повністю визначає швидкість збіжності та оцінку похибки МСЕ [55].

Якщо зафіксувати всі параметри розрахункової моделі СЕ, за винятком розміру кінчених елементів, то можна уявити, що, змінюючи цей розмір, ми отримаємо послідовність наближених рішень задачі. Коли говорять про збіжність МСЕ, то мають на увазі, що ця послідовність спрямовується до точного розв'язання задачі.

Представлена вище концепція моделювання задачі СЕ базується на тому, що допускається ефективно та пряме рішення задачі розрахунку.  $h$ -елементи використовують для аналізу глобальної поведінки конструкції.

Для вирішення розглядуваної просторової задачі на основі теорії пружності СЕ використовувалися такі навантаження:

- власна вага, яка діє уздовж вертикальної осі  $Z$  загальної системи координат, вказується питома вага матеріалу та коефіцієнт обліку власної ваги елемента;
- рівномірно розподілені по межі елемента навантаження, які діють в заданому напрямку, вони задаються порядковими номерами граней, наведеними при описі елемента (рис. 3.1), та інтенсивністю сили або моменту (величиною сили або моменту, що припадає на одиницю площі). Навантаження може здаватися як в місцевій, так і в загальній системах координат;

У базовій системі одиниць навантаження задаються як розподілені по площі сили в  $\text{т/м}^2$ .

На кожному плоскому СЕ може існувати три різні місцеві системи координат:

- місцева система координат елемента;
- система координат осей ортотропії;
- система координат обчислення зусиль і напружень.

Дві останні системи координат за замовчуванням збігаються з місцевою системою координат елемента. Місцеві системи координат всіх елементів визначаються порядком нумерації їх вузлів. Вони мають певні особливості, які пов'язані з тим, що плита передбачається розташованою в площині  $XOY$  (вид зверху) або паралельна їй, а елементи плоскої задачі теорії пружності, як правило, розташовуються в площині  $XOZ$  (в поперечному перерізі, паралельно цій площині) і лише елементи оболонки можуть займати довільне положення в просторі.

Ці елементи призначені для визначення напружено-деформованого стану континуальних об'єктів і масивних просторових конструкцій з однорідного матеріалу.

За допомогою системи SCAD, згідно [60 - 73], були реалізовані наступні варіанти пружних властивостей матеріалу для ізотропного тіла:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y - \nu\sigma_z), \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x - \nu\sigma_z), \varepsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu\sigma_x - \nu\sigma_y), \quad (3.2)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy}, \gamma_{yz} = \frac{1}{G}\tau_{yz}, \gamma_{zx} = \frac{1}{G}\tau_{zx}, \quad (3.3)$$

де  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$  – відносні лінійні та кутові деформації;

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  – нормальні та дотичні напруження;

$E$  – модуль Юнга з головних напрямків пружності;

$G$  – модуль зсуву, що характеризує зміну кута між головними напрямками;

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона, що характеризує поперечне скорочення при стисненні або розширення при розтягуванні в напрямку осей координат та показує напрямок деформації.

У кожному вузлі кінцевих елементів є по три ступені вільності:  $u, v, w$  – переміщення відповідно по осях  $x, y, z$ . При побудові СЕ переміщення ( $u, v, w$ ) апроксимувались функціями такого вигляду: лінійними поліномами – для тетраедра, лінійними або білінійними по кожному з напрямків – для трикутної призми та паралелепіпеда, ізопараметричні – для інших елементів.

В основу фізичної моделі покладено гіпотези, що визначають закон зміни по товщині багат шарової оболонки поперечних дотичних  $\sigma_{j3}$  та нормального  $\sigma_{33}$  напружень, а також поперечної деформації  $e_{33}$ :

$$\sigma_{j3} = q_j^+ \frac{h_1 + z}{h} + q_j^- \frac{h_2 - z}{h} + G_{j3}(z) f'_j(z) \psi_j(x_1, x_2), \quad (3.4)$$

$$\sigma_{33} = q_j^+ \frac{h_1 + z}{h} + q_j^- \frac{h_2 - z}{h} + \phi(z) p(x_1, x_2), \quad (3.5)$$

$$e_{33} = f_3''(z) \psi_3(x_1, x_2), j = 1, 2, \quad (3.6)$$

де  $G_{j3}$  – кусочно-безперервні функції, що характеризують відповідний модуль зсуву шарів;



$\psi_s s(x_1, x_2)$  – шукані функції, що дозволяють врахувати поперечний зсув ( $s = 1, 2$ ) та обтиснення ( $s = 3$ ), вони доповнюють класичні функції переміщень  $v_j(x_1, x_2)$ , ( $j = 1, 2$ ) та  $w(x_1, x_2)$  [56, 59];

$f_s(z), \phi(z)$  – задаються допоміжні функції, що описують нелінійний закон зміни напружень та деформацій в залежності від характеристик жорсткості. Форма їх запису дозволяє вибирати положення поверхні приведення довільно в межах товщини пакета шарів, задовольняє умовам нерозривності між шарами і граничним умовам на зовнішніх поверхнях оболонки [72];

$p(x_1, x_2)$  – функція, що характеризує поперечне обтиснення та визначається через шукані функції  $v_j, w, \psi_s$ .

У системі SCAD реалізовані наступні варіанти пружних властивостей матеріалу [57, 61, 62]:

а) ізотропне тіло для плоско-напруженого стану та вигину плити:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y), \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x), \varepsilon_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy}; \quad (3.7)$$

б) ізотропне для плоскої деформації:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \bar{\nu}\sigma_y), \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \bar{\nu}\sigma_x), \varepsilon_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy}, \sigma_z = \nu_{13}\sigma_x + \nu_{23}\sigma_y, \quad (3.8)$$

$$\bar{E} = \frac{E}{(1-\nu^2)}, \bar{\nu} = \frac{\nu}{(1-\nu)}, \bar{G} = \frac{\bar{E}}{2(1+\nu)}, \nu = \nu_{13} = \nu_{23}. \quad (3.9)$$

Якщо не враховується обтиснення шарів, то в основу побудови фізичної моделі може бути покладена гіпотеза, яка визначає закон зміни по товщині багат шарової оболонки поперечних дотичних напружень  $\sigma_{j3}(x_i, z)$ , а також допущення про відсутність поперечних нормальних напружень та деформацій:

$$\sigma_{j3} = G_{j3}(z) \sum_{p=1}^2 f_{pj}(z) \psi_{pj}(x_1, x_2), \quad (3.10)$$

$$\sigma_{33}, e_{33} = 0; j = 1, 2, \quad (3.11)$$

де  $\psi_{pj}(x_1, x_2)$  – шукані функції зсуву першого та другого наближень (при  $p = 1$  – доповнюють класичні функції переміщень  $v_j(x_1, x_2)$  у першому наближенні і уточнюють гіпотезу на другому етапі побудови моделі, а при  $p = 2$  – враховують внесок в дотичні напруження від тангенціальних навантажень);

$f_{pj}(z)$  – задані функції розподілу поперечних зсувів по товщині пакета шарів, які обираються таким чином, щоб задовольнялися умови рівності поперечних дотичних напружень на поверхнях контакту шарів та граничні умови на зовнішніх поверхнях оболонки (при  $p = 2$  – враховують вплив властивостей матеріалу шарів на дотичні напруження від впливу тангенціальних навантажень);

$s$  – номер відповідного наближення зсувної моделі.

Облік впливу обтиску шарів або міжшарових зсувів в розглянутих СЕ дозволяє розраховувати навіть одношарові конструкції, [52, 54], що представляють собою плити і оболонки середньої товщини. За основу для моделі були прийняті об'ємні скінченні елементи (СЕ), тип та їх опис міститься в документації до програмного комплексу і посиланням на елемент є його номер – ідентифікаційна ознака в бібліотеці кінцевих елементів. СЕ № 36 та №34 (рис. 3.1) використовується для вирішення просторової задачі теорії пружності, для ізотропного матеріалу.

Для моделювання, згідно [71, 72] було обрано наступну схему моделі, що складається із вище згаданих СЕ: ділянка довжиною 4 м і загальною шириною відповідно до параметрів категорії дороги. Для прикладу дороги II категорії загальна ширина - 10,1 м (ширина покриття – 3,75 м; ширина узбіччя – 3,75 м; ширина укосу – 2,9 м; висота конструкції – 3,1 м). Обрана схема моделі є типовим проектним рішенням автомобільної дороги певної категорії в розрізі по межі крайньої смуги руху з узбіччям та укосом з похилом 1:1,5.

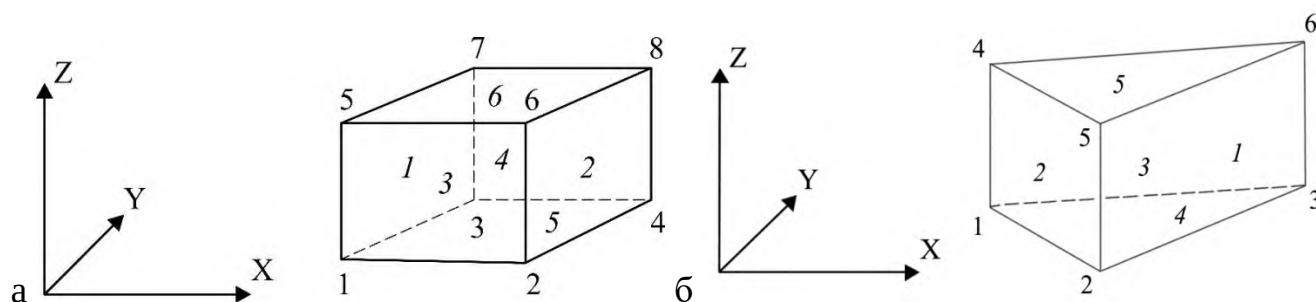


Рисунок 3.1 – Схематичне відображення восьми- та шести- вузлового ізопараметричного CE № 36 та № 34 в бібліотеці SCAD Office

Розрахункова модель такого лінійного елемента автомобільної дороги суттєво відрізняється від площинних будівель цивільного будівництва розглянутих в роботах [76, 77].

Побудова скінченно-елементних сіток була визначена із умов штампу колеса автомобільного транспорту за статичним навантаженням, що регламентується галузевими та державними стандартами [78, 79], та рекомендаціями керівництва користувача SCAD для забезпечення найменшої похибки розрахунку (рис. 3.2 – рис. 3.4).

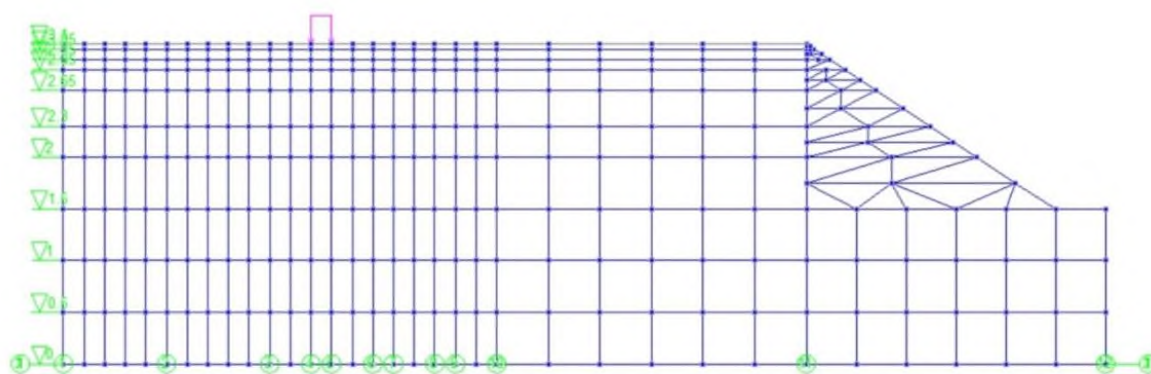


Рисунок 3.2 – Вид збоку (фасад) розрахункової моделі із зазначенням будівельних осей

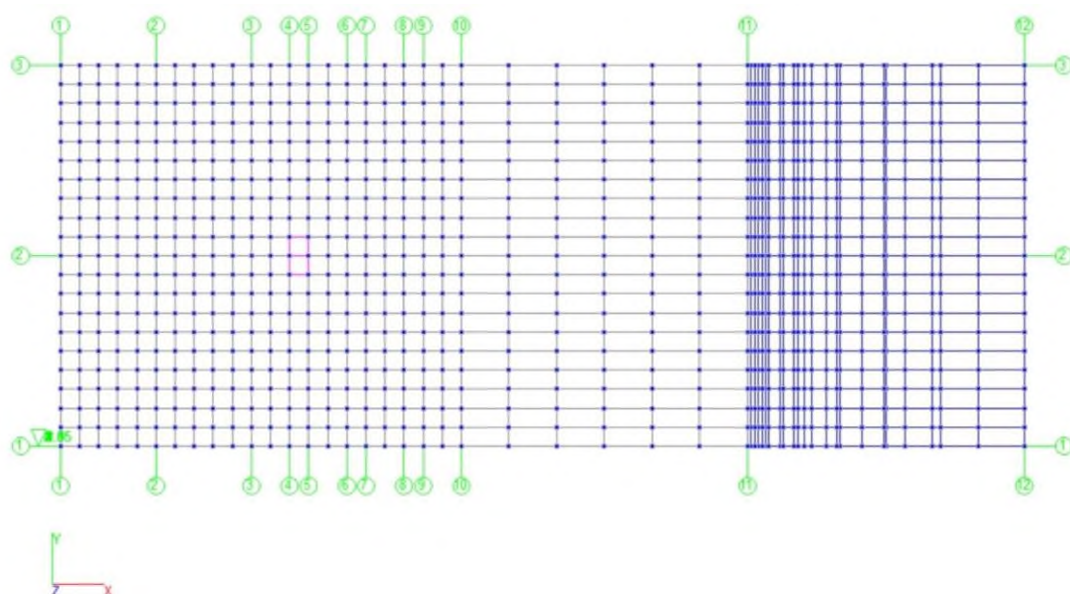


Рисунок 3.3 – Вид зверху (план) розрахункової моделі із зазначенням будівельних осей

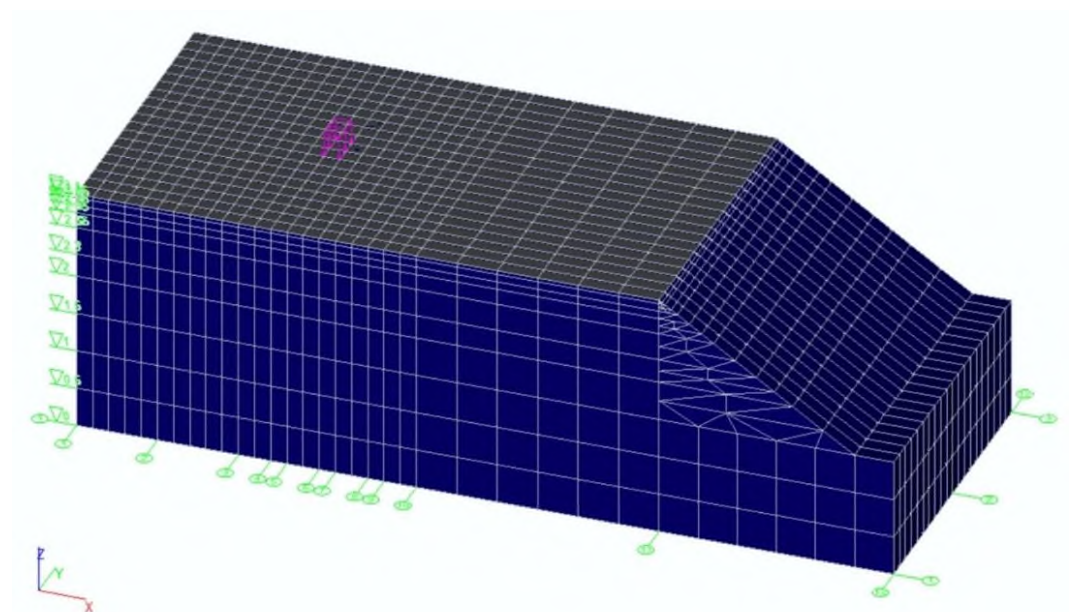


Рисунок 3.4 – Ізометрія розрахункової моделі із зазначенням будівельних осей

Фізико-механічні характеристики шарів конструкцій автомобільної дороги задані відповідно до типових проектів сучасних конструкцій автомобільних доріг I – IV-ої категорій [79].

Модулі пружності шарів дорожнього одягу з органічним в'язучим відповідають статичній дії навантаження (рис. 3.5).

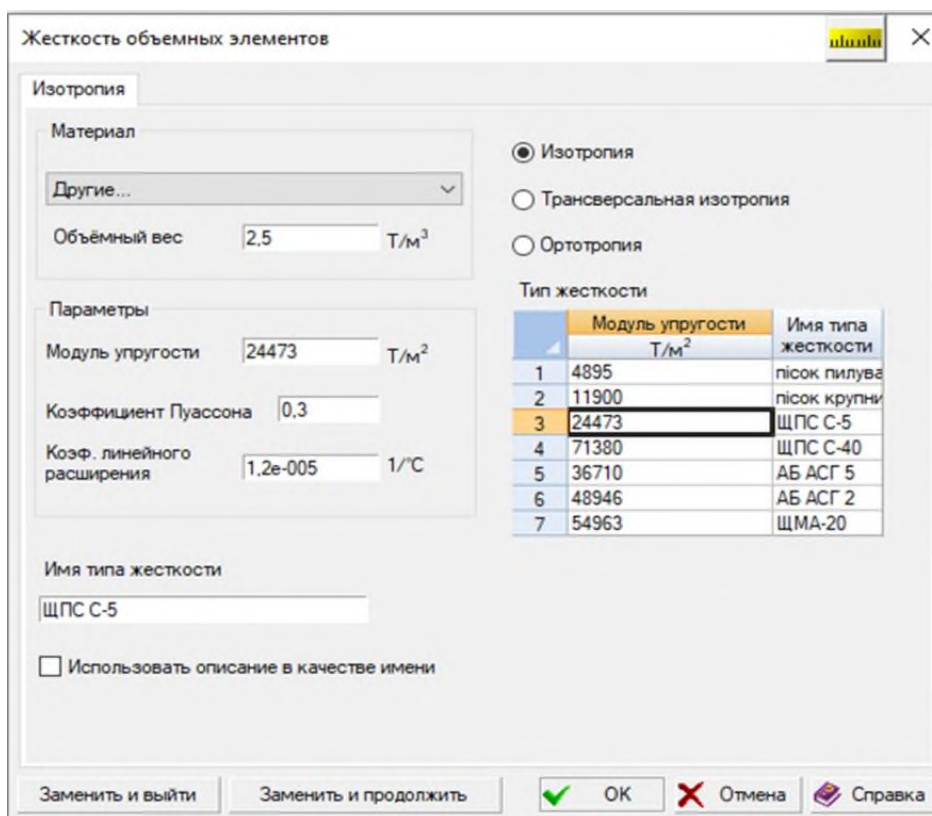


Рисунок 3.5 – Призначення фізико-механічних характеристик шарам дорожньої конструкції

Дослідження дорожньої конструкції на ділянках з трубчастими дренами з матеріалів різного походження представлено в роботі [81]. Було визначено доцільність застосування труб, які за міцнісними характеристиками витримують навантаження на дорогах. Але наведені результати визначені за спрощеною плоскою схемою в площині XOZ, з обмеженням переміщень по осі OX (з кожного боку) та по осі OZ (по низу моделі). Для забезпечення геометричної незмінності системи постає необхідність в накладанні в'язей опорних вузлів. Для моделі, яка розглядається, експериментально з'ясовано, що в'язі накладаються лише в опорних вузлах нижнього шару ґрунту для обмеження лінійних та кутових переміщень і забезпечення геометричної незмінності системи. Згідно результатів, представлених в роботі [82], та для отримання найбільш можливих деформацій прийнято рішення – не обмежувати переміщення вузлів по контуру моделі.

### 3.2 Номенклатура та абревіатури матеріалів елементів дослідних дорожніх конструкцій

На відміну від раніше поширених автомобілів з відносно невеликими навантаженнями 3–6 тонн на вісь на теперішній час збільшилася інтенсивність автомобілів високої вантажопідйомності з навантаженнями на вісь 10,0–13,5 тонн. Це, в першу чергу, обумовлює зміну проектної геометричної форми земляного полотна протягом року, наявність просадок та нерівномірного здимання та відповідного зростання вимог до міцності дорожніх одягів та конструкції в цілому.

Основною деформативною характеристикою дорожнього одягу є модуль пружності, який визначається як:

$$E_{\text{д.о.}} = \frac{pD(1-\nu^2)}{l_{\text{пр.н}}}, \quad (3.12)$$

де  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;

$l_{\text{пр.н}}$  – пружний прогин ДО.

Додатковим показником міцності дорожнього одягу є модуль деформації, який визначається за формулою:

$$E_{\text{д.о.}} = \frac{pD}{l_{\text{н.н.}}} K_s, \quad (3.13)$$

де  $p$  – питоме навантаження від колеса розрахункового автомобіля;

$K_s$  – коефіцієнт, що враховує повторне прикладання навантаження,

$$K_s = 0,5 + 0,65 \lg N;$$

$N$  – добова інтенсивність руху;

$D$  – діаметр штампа;

$l_{\text{н.н.}}$  – величина абсолютної вертикальної деформації (повного прогину).

Відповідно до цього, при одному і тому ж тиску  $p$  в шинах підвищення навантажень на вісь призводить до збільшення опорної площі колеса, а також величини штампа  $D$ . Зменшення напружень від зовнішнього навантаження всередині шарової дорожньої конструкції до величин, які не викликають деформацій, відбувається приблизно на глибині  $z = 2D$  [1, 7, 35]. Тому необхідна товщина дорожнього одягу зростатиме не тільки від величини  $D$ , а й зі зростанням інтенсивності руху  $N$  (3.12). Такі проектні рішення є менш економічними. Підвищення міцності та стійкості дорожньої конструкції можна досягти за рахунок ретельного ущільнення і осушення земляного полотна, а також збільшенням товщини дренавальних шарів.

У роботі [84] наведено дослідження НДС дорожньої конструкції з тріщиною у покритті. Вивчається вплив збільшення глибини тріщини на модуль пружності шарів дорожнього одягу. У роботах [84 – 86] запропоновано комплексний підхід щодо дослідження характеристик НДС дорожньої конструкції під впливом динамічного навантаження, що відповідає натурним умовам. У роботі [84] наведено аналіз параметрів чаш прогину шару покриття, представлені результати числового експерименту з моделювання впливу втрати зчеплення між шарами нежорсткого дорожнього одягу. Але у представлених авторами результатах [84 – 86] відсутні дослідження зміни НДС перезволоженої дорожньої конструкції.

При числовому моделюванні розглядуваної конструкції в якості вихідного використовувалось навантаження для I – VI-ої категорій автомобільних доріг згідно з [78, 87] групи  $A_2$  – нормативне статичне навантаження на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН (рис. 3.6), з рівновеликим діаметром площі відбитку колеса – 303 мм. Час дії навантаження 600 с. Навантаження приймалося статичне, як найбільш несприятливе за тривалістю, при зміні вологісного режиму дренавального шару та ґрунту ЗП. Навантаження на вісь рівномірно розподілялось по 6-и або по 8-и вузлам розрахункової сітки по прямокутнику розміром 300 мм на 240 мм та, відповідно, 450 мм на 240 мм, (площа прямокутника відповідає площі штампу). Характеристики матеріалів дорожньої конструкції наведено в табл. 3.1 – табл. 3.8.

Таблиця 3.1 – Характеристики матеріалів шарів дорожньої конструкції з піщаним дренавальним шаром, дорога І-ї категорії

| Ч.ч. | Матеріал                                                         | Модуль пружності $E$ , МПа |                                 | Висота шару $h$ , м | Коефіцієнт Пуассона | Питома вага, т/м <sup>3</sup> |
|------|------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|
|      |                                                                  | за стандартними вимогами   | при перезволоженні, згідно [87] |                     |                     |                               |
| 1    | Щебенево-мастиковий асфальтобетон ЩМА-20 на бітумі БМПА 60/90-53 | 539                        |                                 | 0,05                | 0,27                | 2,4                           |
| 2    | Асфальтобетон щільний на бітумі БНД 60/90, Тип А, Марка І        | 480                        |                                 | 0,10                | 0,25                | 2,3                           |
| 3    | Асфальтобетон пористий на бітумі БНД 60/90, крупнозернистий      | 360                        |                                 | 0,10                | 0,25                | 2,3                           |
| 4    | ЩПС С-7, укріплена цементом М20 (щебенево-піщана суміш)          | 400                        |                                 | 0,12                | 0,31                | 1,8                           |
| 5    | ЩПС С-5 (щебенево-піщана суміш)                                  | 240                        |                                 | 0,26                | 0,30                | 2,0                           |
| 6    | Пісок крупнозернистий $W_t$ (0,87)                               | 130                        | 116                             | 0,30                | 0,35                | 2,0                           |
| 7    | Пісок пилюватий                                                  | 52                         | 48                              | 4,00                | 0,30                | 1,8                           |

Таблиця 3.2 – Характеристики матеріалів шарів дорожньої конструкції з щебеним дренавальним шаром, дорога І-ї категорії

| Ч.ч. | Матеріал                                                                | Модуль пружності $E$ , МПа |                               | Модуль пружності $E$ , МПа | Коефіцієнт Пуассона | Питома вага, т/м <sup>3</sup> |
|------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------|-------------------------------|
|      |                                                                         | за стандартними вимогами   | за стандартними вимогами [87] |                            |                     |                               |
| 1    | Щебенево-мастиковий асфальтобетон ЩМА-20 на бітумі БМПА 60/90-53        | 539                        |                               | 0,05                       | 0,27                | 2,4                           |
| 2    | Асфальтобетон щільний на бітумі БНД 60/90, Тип А, Марка І               | 480                        |                               | 0,10                       | 0,25                | 2,3                           |
| 3    | Асфальтобетон пористий на бітумі БНД 60/90, крупнозернистий             | 360                        |                               | 0,10                       | 0,25                | 2,3                           |
| 4    | Щебенево-піщані суміші, укріплені цементом М20                          | 400                        |                               | 0,12                       | 0,31                | 1,8                           |
| 5    | ЩПС С-5 (щебенево-піщана суміш)                                         | 240                        |                               | 0,26                       | 0,30                | 2,0                           |
| 6    | Щебінь М1000–1400, влаштований за способом заклинки з магматичних порід | 250                        |                               | 0,20                       | 0,35                | 2,0                           |
| 7    | Пісок пилюватий                                                         | 52                         | 48                            | 4,00                       | 0,30                | 1,8                           |



Таблиця 3.3 – Характеристики матеріалів шарів дорожньої конструкції з піщаним дренавальним шаром, дорога II-ї категорії

| Ч.ч. | Матеріал                                                         | Модуль пружності $E$ , МПа |                                 | Висота шару $h$ , м | Коефіцієнт Пуассона | Питома вага, т/м <sup>3</sup> |
|------|------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|
|      |                                                                  | за стандартними вимогами   | при перезволоженні, згідно [87] |                     |                     |                               |
| 1    | Щебенево-мастиковий асфальтобетон ЦМА-20 на бітумі БМПА 60/90-53 | 539                        |                                 | 0,05                | 0,27                | 2,4                           |
| 2    | Асфальтобетон щільний на бітумі БНД 60/90, Тип А, Марка І        | 480                        |                                 | 0,10                | 0,25                | 2,3                           |
| 3    | Асфальтобетон пористий на бітумі БНД 60/90, крупнозернистий      | 360                        |                                 | 0,10                | 0,25                | 2,3                           |
| 4    | ЩПС С-7, укріплена цементом М40 (щебенево-піщана суміш)          | 700                        |                                 | 0,20                | 0,31                | 1,8                           |
| 5    | ЩПС С-5 (щебенево-піщана суміш)                                  | 240                        |                                 | 0,35                | 0,30                | 2,0                           |
| 6    | Пісок крупнозернистий $W_t$ (0,87)                               | 130                        | 116                             | 0,30                | 0,35                | 2,0                           |
| 7    | Пісок пилюватий                                                  | 52                         | 48                              | 4,00                | 0,30                | 1,8                           |

Таблиця 3.4 – Характеристики матеріалів шарів дорожньої конструкції з щебеним дренавальним шаром, дорога II-ї категорії

| Ч.ч. | Матеріал                                                                | Модуль пружності $E$ , МПа |                                 | Висота шару $h$ , м | Коефіцієнт Пуассона | Питома вага, т/м <sup>3</sup> |
|------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|
|      |                                                                         | за стандартними вимогами   | при перезволоженні, згідно [87] |                     |                     |                               |
| 1    | Щебенево-мастиковий асфальтобетон ЦМА-20 на бітумі БМПА 60/90-53)       | 539                        |                                 | 0,05                | 0,27                | 2,4                           |
| 2    | Асфальтобетон щільний на бітумі БНД 60/90, Тип А, Марка І               | 480                        |                                 | 0,10                | 0,25                | 2,3                           |
| 3    | Асфальтобетон пористий на бітумі БНД 60/90, крупнозернистий             | 360                        |                                 | 0,10                | 0,25                | 2,3                           |
| 4    | ЩПС С-7, укріплена цементом М40 (щебенево-піщана суміш)                 | 700                        |                                 | 0,20                | 0,31                | 1,8                           |
| 5    | ЩПС С-5 (щебенево-піщана суміш)                                         | 240                        |                                 | 0,35                | 0,30                | 2,0                           |
| 6    | Щебінь М1000–1400, влаштований за способом заклинки з магматичних порід | 250                        |                                 | 0,20                | 0,35                | 2,0                           |
| 7    | Пісок пилюватий                                                         | 52                         | 48                              | 4,00                | 0,30                | 1,8                           |

Таблиця 3.5 – Характеристики матеріалів шарів дорожньої конструкції з піщаним дренавальним шаром, дорога III-ї категорії

| Ч.ч. | Матеріал                                                          | Модуль пружності $E$ , МПа |                                 | Висота шару $h$ , м | Коефіцієнт Пуассона | Питома вага, т/м <sup>3</sup> |
|------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|
|      |                                                                   | за стандартними вимогами   | при перезволоженні, згідно [87] |                     |                     |                               |
| 1    | Щебенево-мастиковий асфальтобетон ЩМА-20 на бітумі БМПА 60/90-53) | 539                        |                                 | 0,05                | 0,27                | 2,4                           |
| 2    | Асфальтобетон щільний на бітумі БНД 60/90, Тип А, Марка I         | 480                        |                                 | 0,10                | 0,25                | 2,3                           |
| 3    | ЩПС С-5 (щебенево-піщана суміш)                                   | 240                        |                                 | 0,21                | 0,31                | 1,8                           |
| 4    | ЩПС С-5 (щебенево-піщана суміш)                                   | 240                        |                                 | 0,35                | 0,30                | 2,0                           |
| 5    | Пісок крупнозернистий $W_t$ (0,87)                                | 130                        | 116                             | 0,20                | 0,35                | 2,0                           |
| 6    | Пісок пилюватий                                                   | 52                         | 48                              | 4,00                | 0,30                | 1,8                           |

Таблиця 3.6 – Характеристики матеріалів шарів дорожньої конструкції з щебеним дренавальним шаром, дорога III-ї категорії

| Ч.ч. | Матеріал                                                                | Модуль пружності $E$ , МПа |                                 | Висота шару $h$ , м | Коефіцієнт Пуассона | Питома вага, т/м <sup>3</sup> |
|------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|
|      |                                                                         | за стандартними вимогами   | при перезволоженні, згідно [87] |                     |                     |                               |
| 1    | Щебенево-мастиковий асфальтобетон ЩМА-20 на бітумі БМПА 60/90-53)       | 539                        |                                 | 0,05                | 0,27                | 2,4                           |
| 2    | Асфальтобетон щільний на бітумі БНД 60/90, Тип А, Марка I               | 480                        |                                 | 0,10                | 0,25                | 2,3                           |
| 3    | ЩПС С-5 (щебенево-піщана суміш)                                         | 240                        |                                 | 0,21                | 0,31                | 1,8                           |
| 4    | ЩПС С-5 (щебенево-піщана суміш)                                         | 240                        |                                 | 0,35                | 0,30                | 2,0                           |
| 5    | Щебінь М1000–1400, влаштований за способом заклинки з магматичних порід | 250                        |                                 | 0,20                | 0,35                | 2,0                           |
| 6    | Пісок пилюватий                                                         | 52                         | 48                              | 4,00                | 0,30                | 1,8                           |

Таблиця 3.7 – Характеристики матеріалів шарів дорожньої конструкції з піщаним дренавальним шаром, дорога IV-ї категорії

| Ч.ч. | Матеріал                                                          | Модуль пружності $E$ , МПа |                                 | Висота шару $h$ , м | Коефіцієнт Пуассона | Питома вага, т/м <sup>3</sup> |
|------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|
|      |                                                                   | за стандартним и вимогами  | при перезволоженні, згідно [87] |                     |                     |                               |
| 1    | Щебенево-мастиковий асфальтобетон ЩМА-20 на бітумі БМПА 60/90-53) | 539                        |                                 | 0,05                | 0,27                | 2,4                           |
| 2    | Асфальтобетон щільний на бітумі БНД 60/90, Тип А, Марка І         | 480                        |                                 | 0,10                | 0,25                | 2,3                           |
| 3    | ЩПС С-5 (щебенево-піщана суміш)                                   | 240                        |                                 | 0,21                | 0,31                | 1,8                           |
| 4    | ЩПС С-5 (щебенево-піщана суміш)                                   | 240                        |                                 | 0,30                | 0,30                | 2,0                           |
| 5    | Пісок крупнозернистий $W_t$ (0,87)                                | 130                        | 116                             | 0,20                | 0,35                | 2,0                           |
| 6    | Пісок пилюватий                                                   | 52                         | 48                              | 4,00                | 0,30                | 1,8                           |

Таблиця 3.8 – Характеристики матеріалів шарів дорожньої конструкції з щебеним дренавальним шаром, дорога IV-ї категорії

| Ч.ч. | Матеріал                                                              | Модуль пружності $E$ , МПа |                                 | Висота шару $h$ , м | Коефіцієнт Пуассона | Питома вага, т/м <sup>3</sup> |
|------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|
|      |                                                                       | за стандартним и вимогами  | при перезволоженні, згідно [87] |                     |                     |                               |
| 1    | Щебенево-мастиковий асфальтобетон ЩМА-20 на бітумі БМПА 60/90-53)     | 539                        |                                 | 0,05                | 0,27                | 2,4                           |
| 2    | Асфальтобетон щільний на бітумі БНД 60/90, Тип А, Марка І             | 480                        |                                 | 0,10                | 0,25                | 2,3                           |
| 3    | ЩПС С-5 (щебенево-піщана суміш)                                       | 240                        |                                 | 0,21                | 0,31                | 1,8                           |
| 4    | ЩПС С-5 (щебенево-піщана суміш)                                       | 240                        |                                 | 0,3                 | 0,30                | 2,0                           |
| 5    | Щебінь М1000–1400, влаштований за способом просочення в'язким бітумом | 250                        |                                 | 0,20                | 0,35                | 2,0                           |
| 6    | Пісок пилюватий                                                       | 52                         | 48                              | 4,00                | 0,30                | 1,8                           |

На типових конструкціях дорожнього одягу було проведено серію числових експериментів, які включали збільшення нормативного навантаження на 10–50 % при перезволоженні дренажного шару і ґрунту ЗП (табл. 3.1, 3.3, 3.5, 3.7, ряди 6 та 7 та табл. 3.2, 3.4, 3.6, 3.8), що відповідає реальним умовам роботи автомобільних доріг на певних ділянках. Збільшення навантаження обумовлене статистичними даними, які визначаються на майданчиках системи зважування в русі Weigh-in-Motion на ділянках доріг з високою інтенсивністю руху великовагового транспорту. Статистичні дані обробляються та аналізуються відділом інтелектуальних транспортних систем Державного агентства автомобільних доріг України (рис. 3.6).

За період з 1 січня 2020 року до 31 жовтня 2020 року

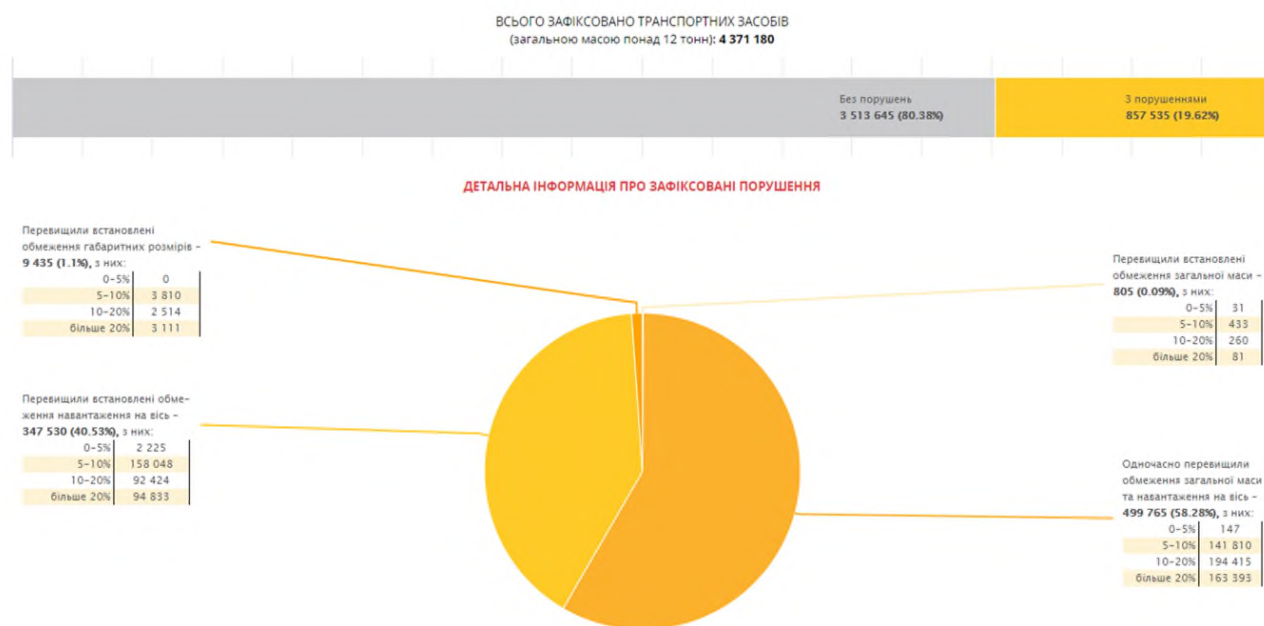


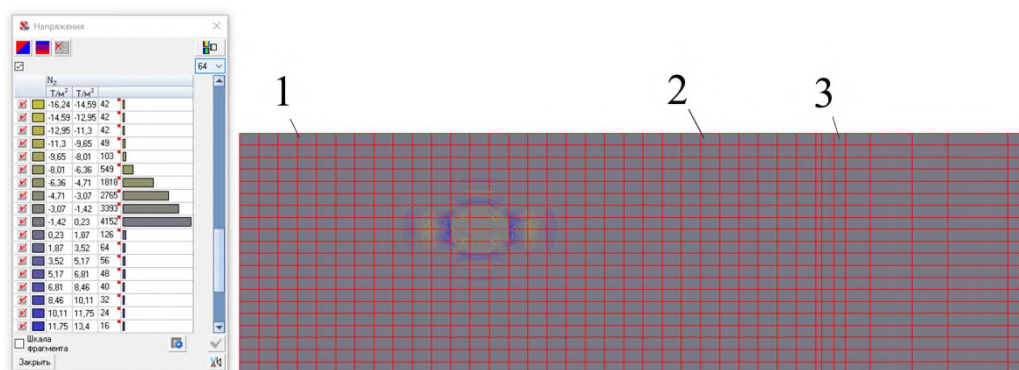
Рисунок 3.6 – Статистичні дані, отримані на основі показників зважування в русі (WIM) за період з 01.01.2020 по 31.10.2020 (версія доступна за посиланням <https://stat.ukravtodor.gov.ua>)

Запропонований метод розрахунку справедливий для будь яких дорожніх конструкцій.

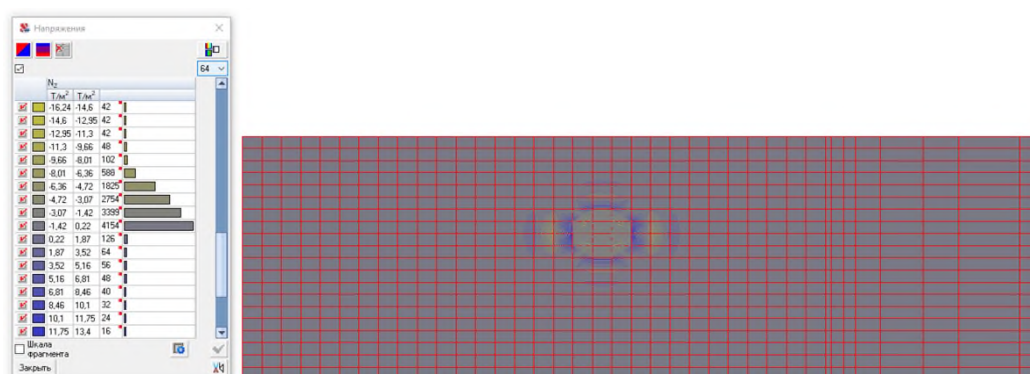
### 3.3 Результати досліджень напружено-деформованого стану дорожніх конструкцій з дренавальним шаром

Для проведення числових досліджень розглядалося три випадки прикладання навантаження по відношенню до осі дороги та кромки узбіччя. Перший випадок: навантаження прикладалося на відстані 2,4 м від осі дороги; другий – на відстані 2,8 м від осі дороги; третій – в найбільш несприятливому місці прикладання, на відстані 1 м від кромки узбіччя. Числове моделювання проводилося для дорожніх конструкцій I – IV категорій доріг з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа, з піщаним дренавальним шаром,  $E = 130$  МПа, з щебеним дренавальним шаром  $E = 250$  МПа. Результати для двох останніх випадків наведені у додатку А.

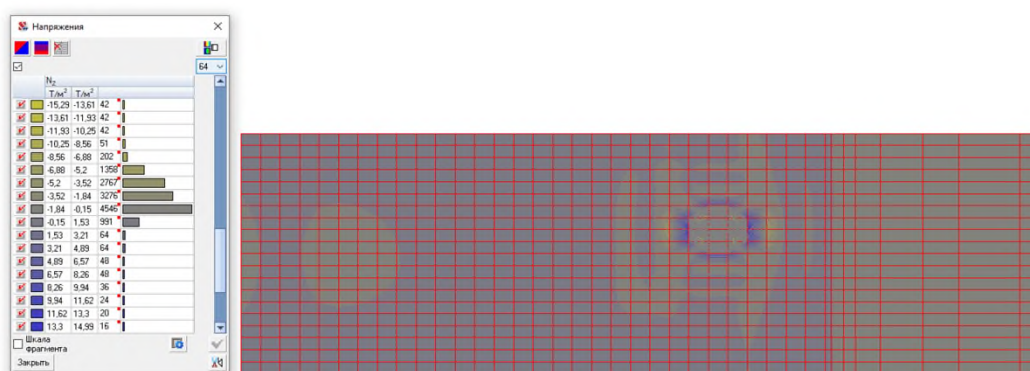
За результатами числового моделювання було отримано розподіл ізополів та ізоліній нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах - вид зверху, (рис. 3.7 – 3.8 та рис. А.1 – А.22), розподіл ізополів та ізоліній нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах - в поперечному перерізі, (рис. 3.9 – 3.10 та рис. А.23 – А.44) та розподіл деформацій  $Z$  (мм) конструктивних шарів дорожнього одягу, товщиною в залежності від категорії дороги, для ЗП (виїмки) глибиною 4 м, (рис. 3.11 – 3.12 та рис. А.45 – А.66) при навантаженнях від великовагових транспортних засобів. Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах – вид зверху, в дорожній конструкції дозволяє визначити параметри чаши прогину дорожнього покриття та зміну її конфігурації в залежності від параметрів штампу та місця прикладання навантаження (рис. 3.7 – 3.8 та рис. А.1 – А.22). Зі збільшенням навантаження чаша прогину при перезволоженому піщаному шарі відповідно за своїми розмірами в плані орієнтовно збільшується на 8 см.



а)



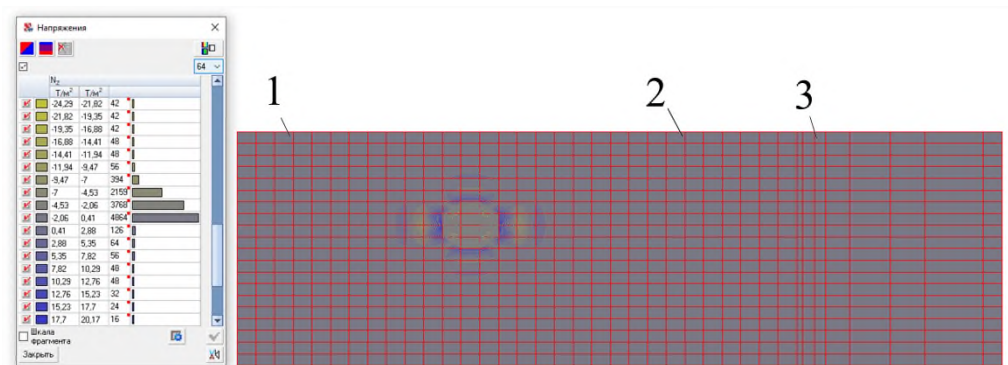
б)



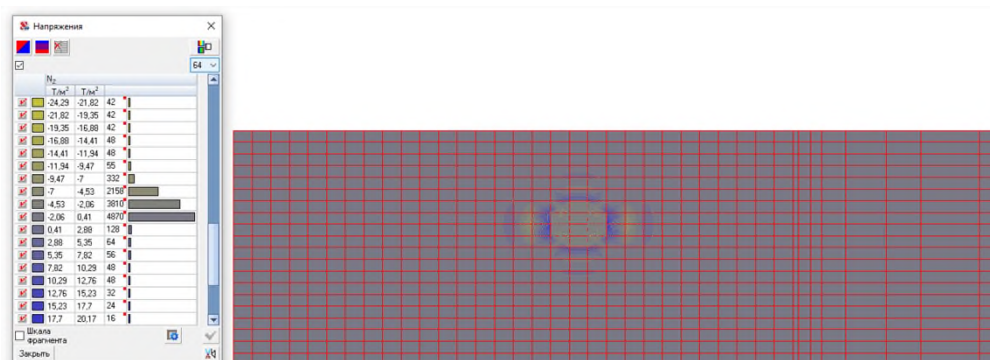
в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

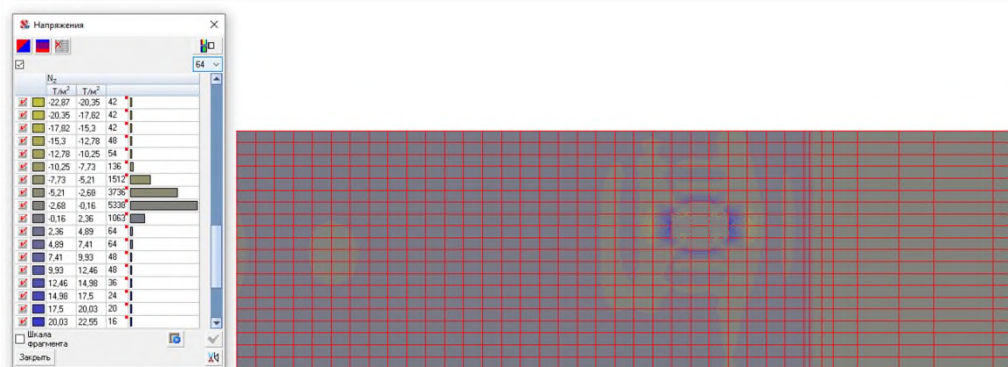
Рисунок 3.7 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції II категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 2,4 м від осі дороги, б) на відстані 2,8 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя



а)



б)

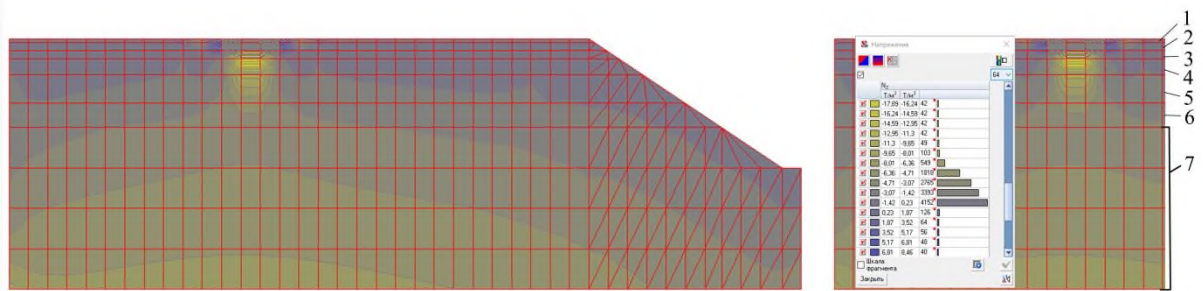


в)

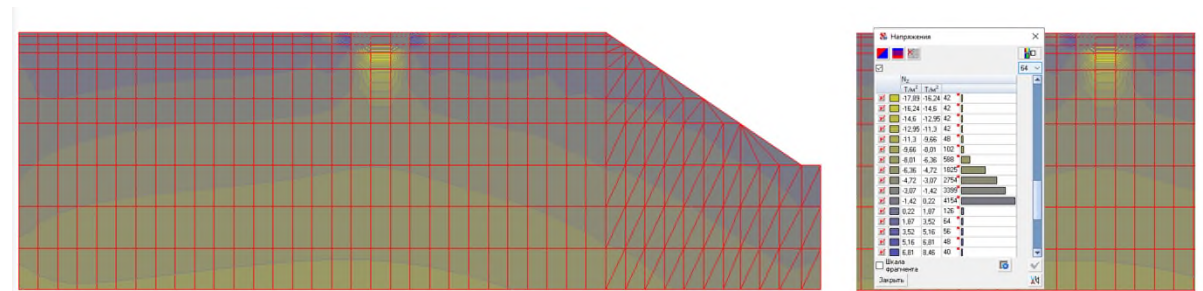
1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

Рисунок 3.8 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції II категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 2,4 м від осі дороги, б) на відстані 2,8 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя

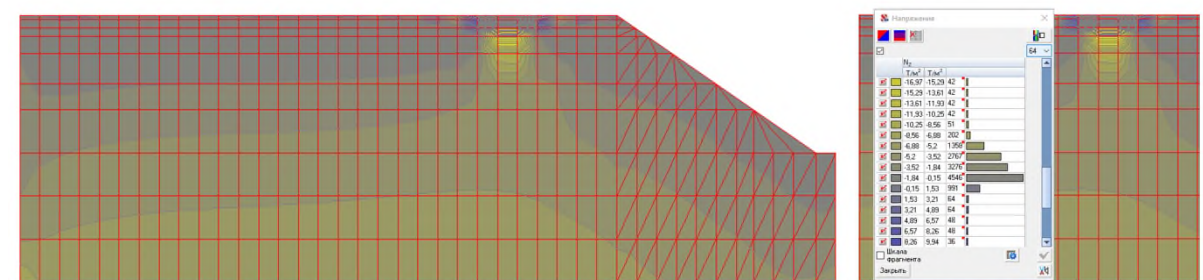




а)



б)

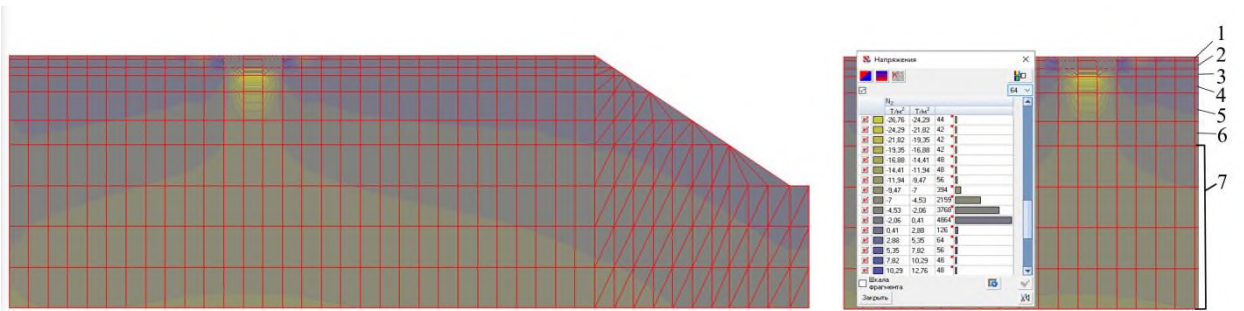


в)

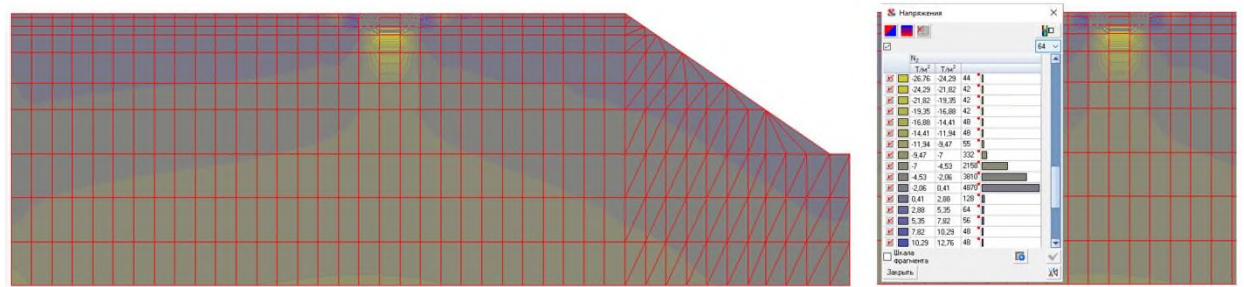
1–7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 3.3

Рисунок 3.9 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції II категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 2,4 м від осі дороги, б) на відстані 2,8 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя

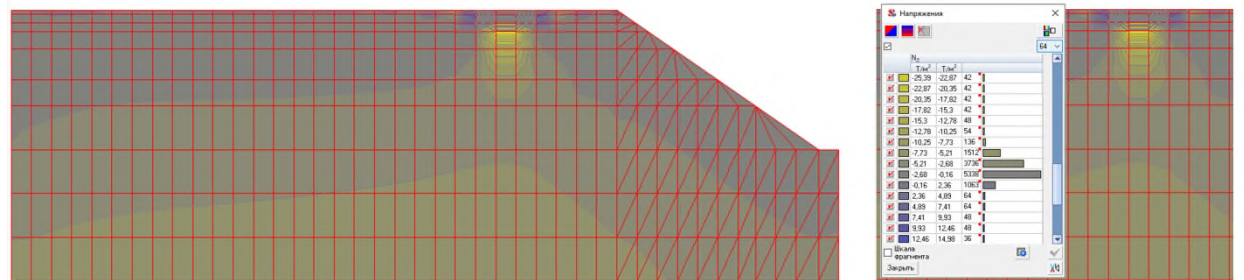




а)



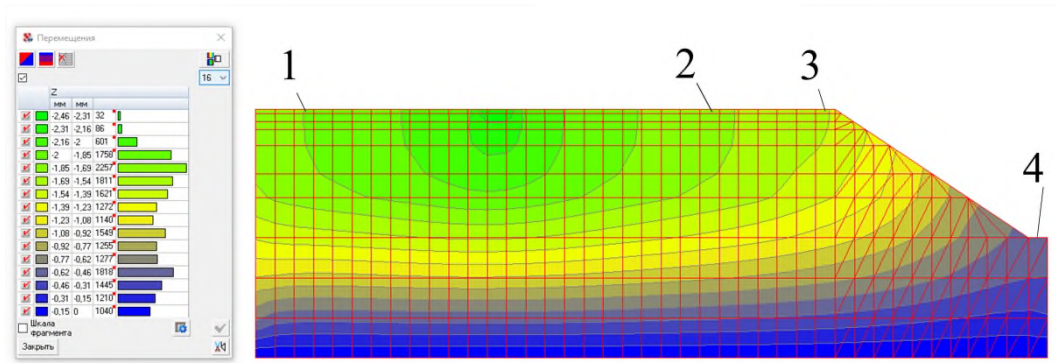
б)



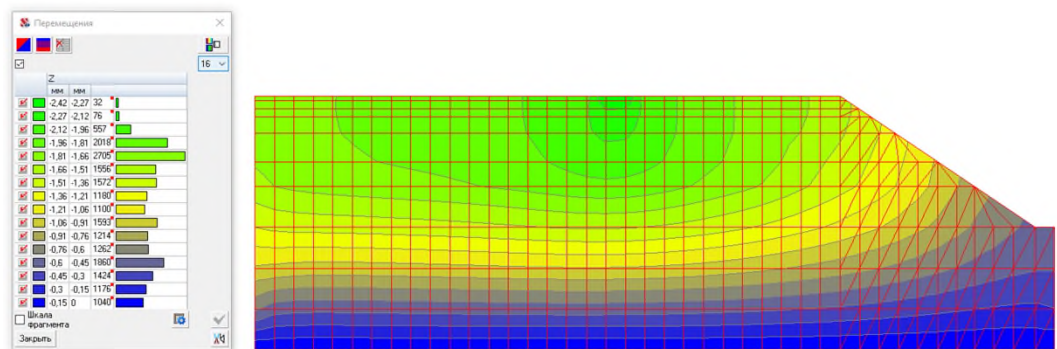
в)

1–7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 3.3

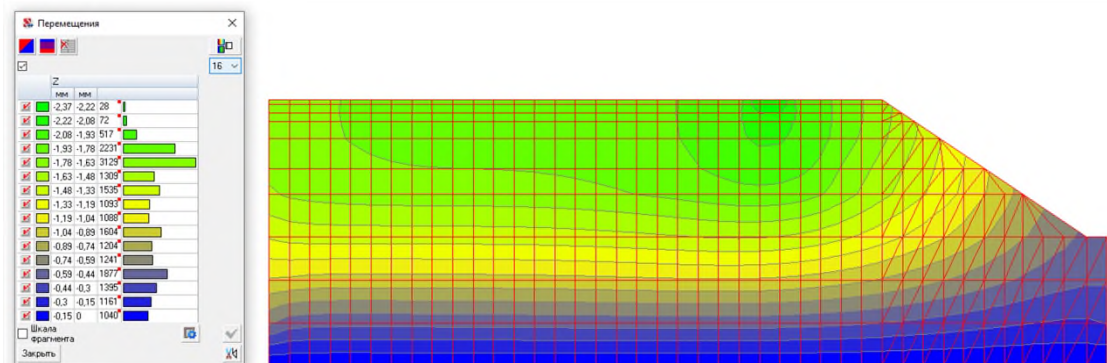
Рисунок 3.10 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах в дорожній конструкції II категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 2,4 м від осі дороги, б) на відстані 2,8 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя



а)



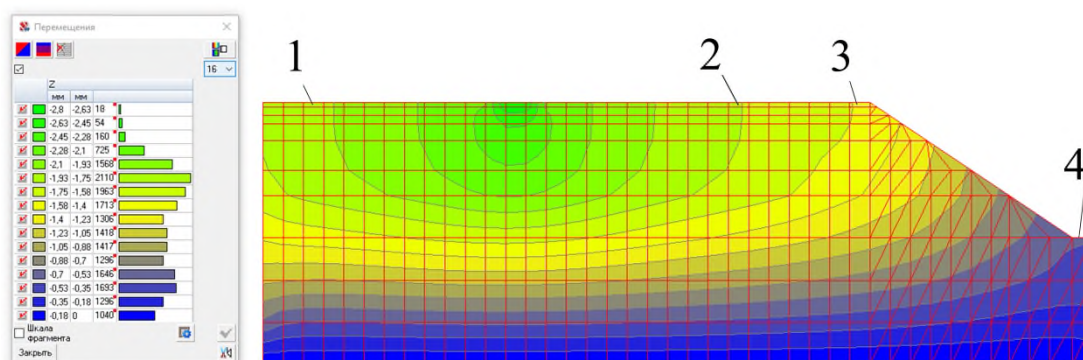
б)



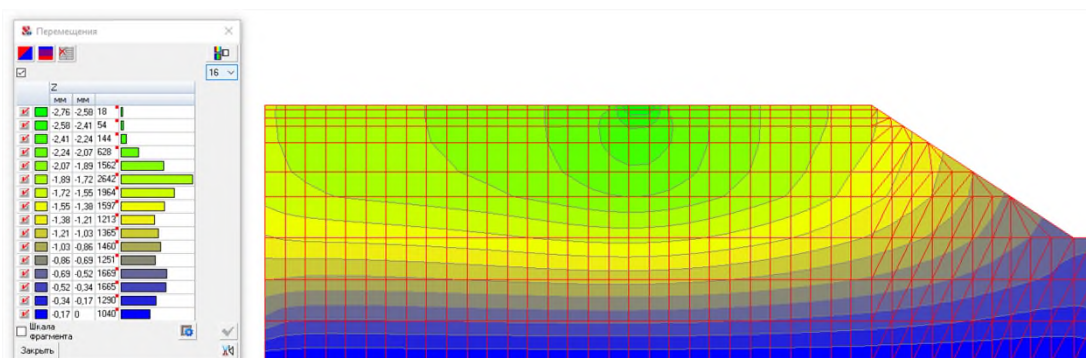
в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП; 4 – кювет

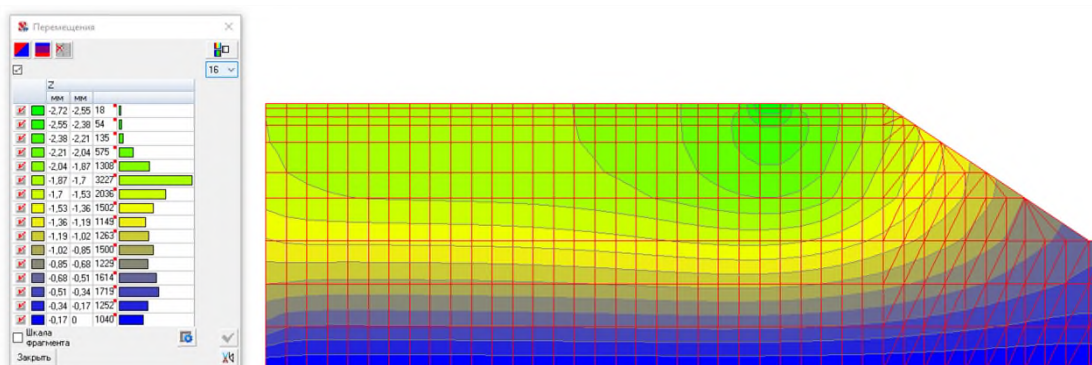
Рисунок 3.11 – Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції II категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа: при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 2,4 м від осі дороги, б) на відстані 2,8 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя



а)



б)



в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП; 4 – кювет

Рисунок 3.12 – Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції II категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа: при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 2,4 м від осі дороги, б) на відстані 2,8 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя



Результати серії числових експериментів, а саме розподіл ізополів та ізоліній нормальних напружень  $N_z$  та розподіл деформацій  $Z$ , в об'ємних елементах ДК, порівнювалися при діапазоні навантажень, при збільшенні нормативного навантаження на 10–50 % (рис. 3.9 – 3.12 та рис. А.23 – А.66). Розподіл ізополів та ізоліній нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах (рис. 3.9 – 3.8 та рис. А.23 – А.44) дозволяє визначити товщину шару ґрунту, розміщеного під дренавальним шаром, з якого буде відбуватися віджимання води під дією прикладеного навантаження (рис. 3.13 – 3.24). Це можливо за рахунок розподілу мінімальних значень напружень, при яких не буде віджиматися вода, згідно [7, 73, 75] для піщаних та супіщаних ґрунтів  $N_z=0,01$  МПа.

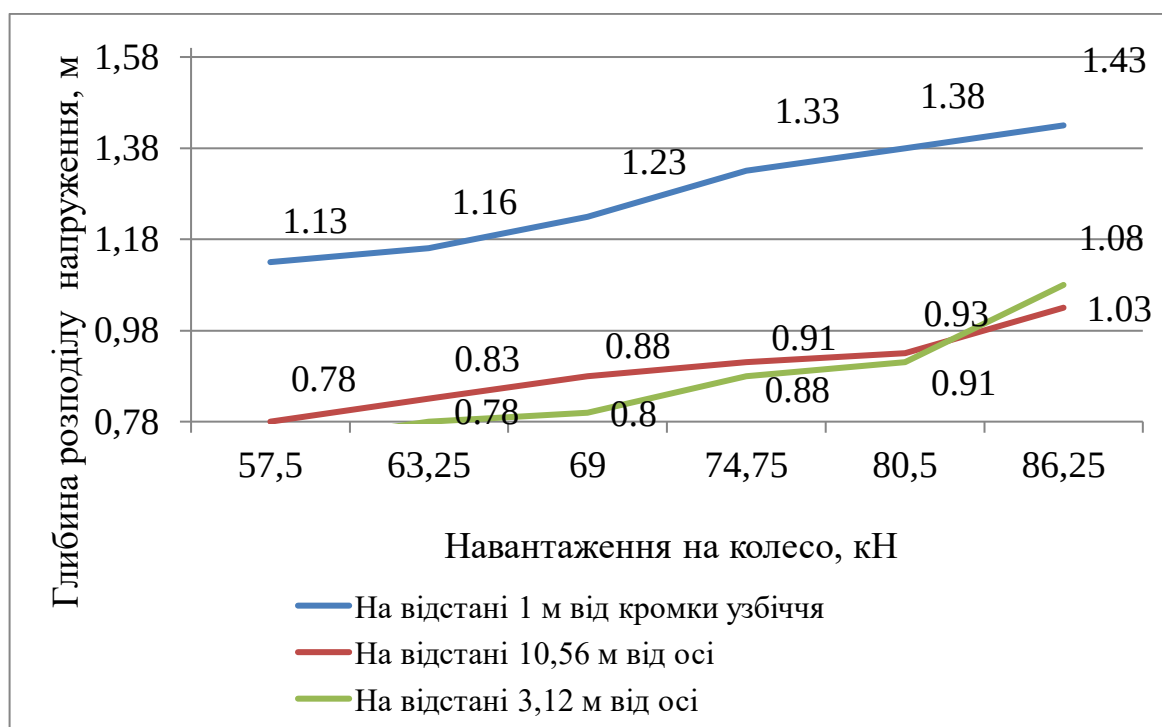


Рисунок 3.13 – Глибина розподілу напружень  $h_{N_{Zmin}}$  від поверхні дорожнього одягу дороги І категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E=116$  МПа, до розподілу мінімальних значень напружень  $N_z = 0,01$  МПа

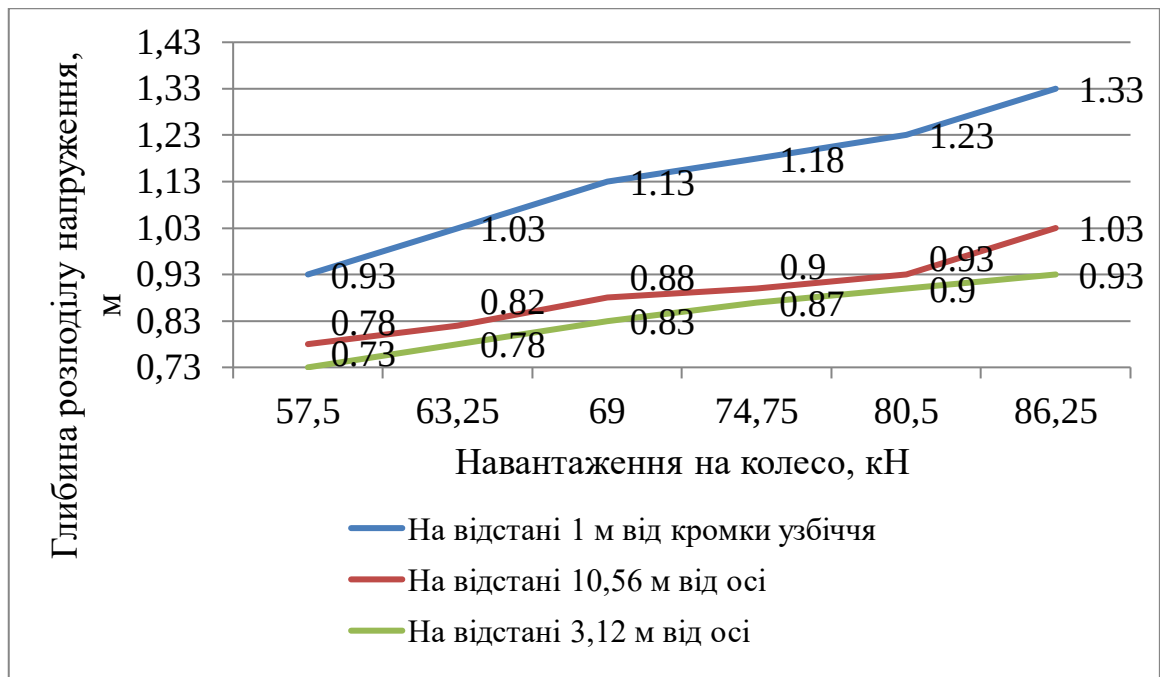


Рисунок 3.14 – Глибина розподілу напружень  $h_{N_{Zmin}}$  від поверхні дорожнього одягу дороги I категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E=130$  МПа. до розподілу мінімальних значень напружень  $N_z = 0,01$  МПа

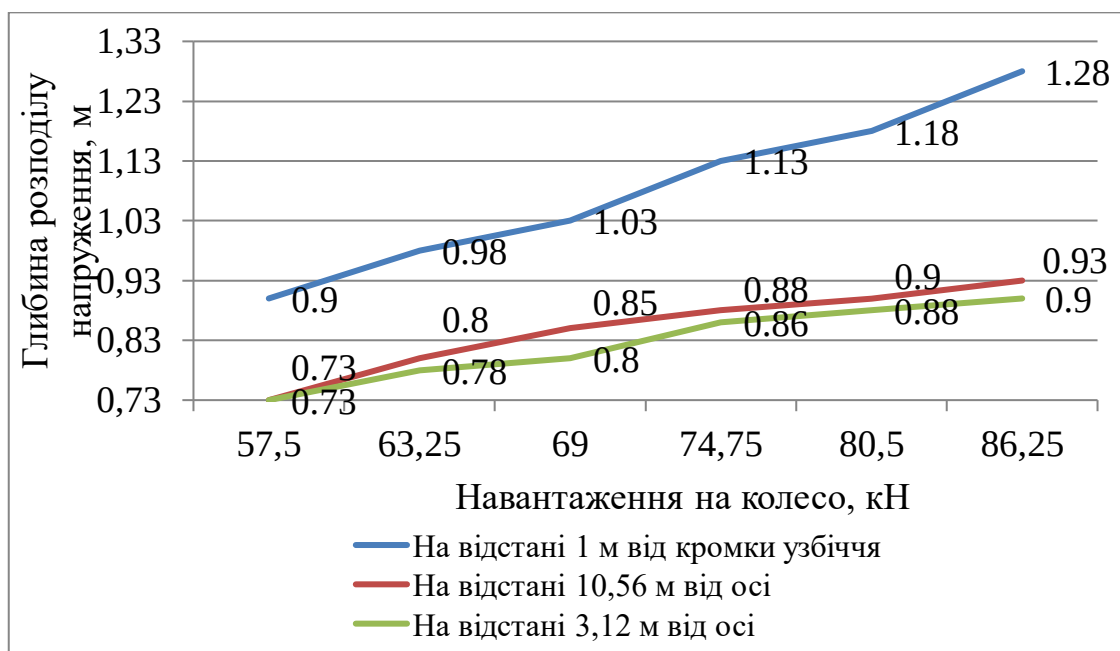


Рисунок 3.15 – Глибина розподілу напружень  $h_{N_{Zmin}}$  від поверхні дорожнього одягу дороги I категорії з щебеним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа, до розподілу мінімальних значень напружень  $N_z = 0,01$  МПа

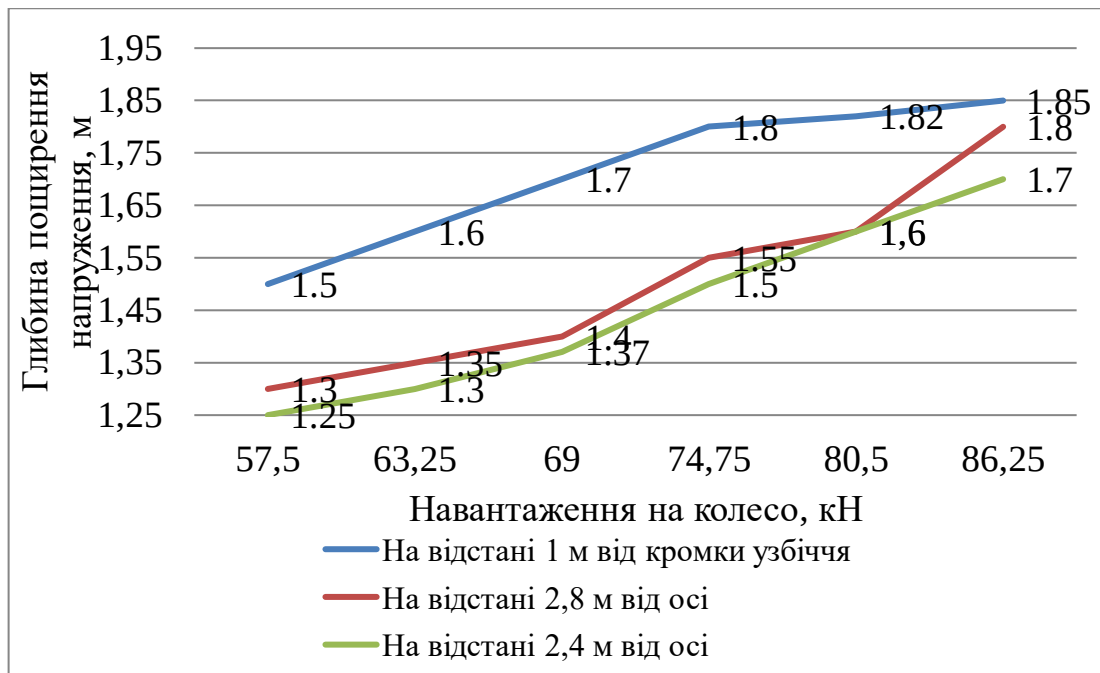


Рисунок 3.16 – Глибина розподілу напружень  $h_{N_{zmin}}$  від поверхні дорожнього одягу дороги II категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа, до розподілу мінімальних значень напружень  $N_z = 0,01$  МПа

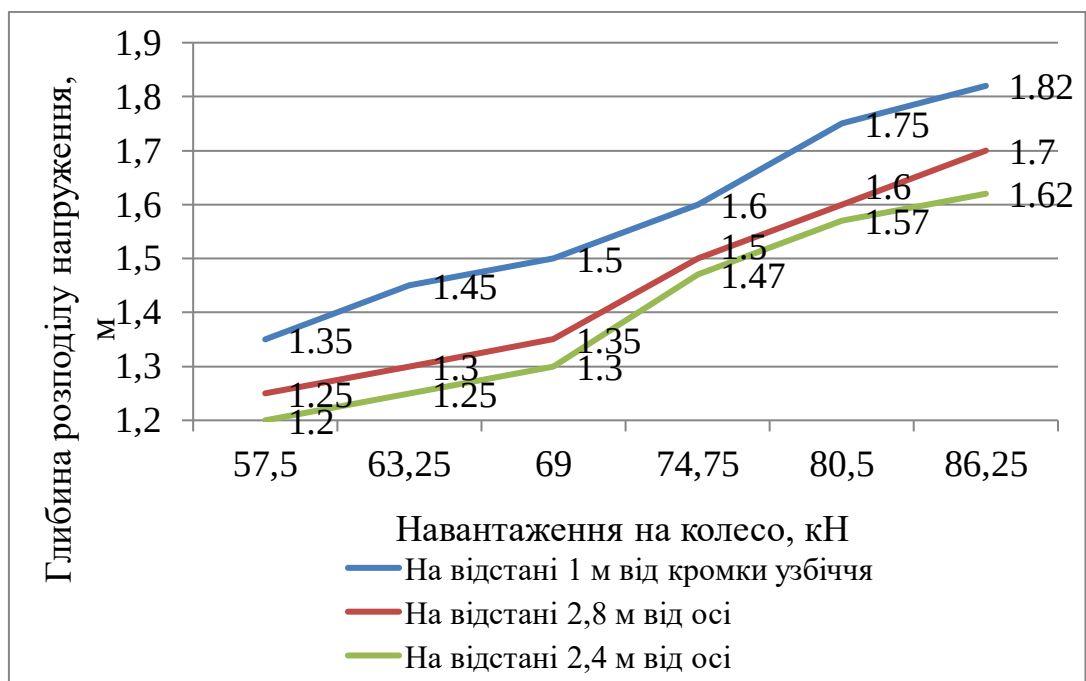


Рисунок 3.17 – Глибина розподілу напружень  $h_{N_{zmin}}$  від поверхні дорожнього одягу дороги II категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа, до розподілу мінімальних значень напружень  $N_z = 0,01$  МПа

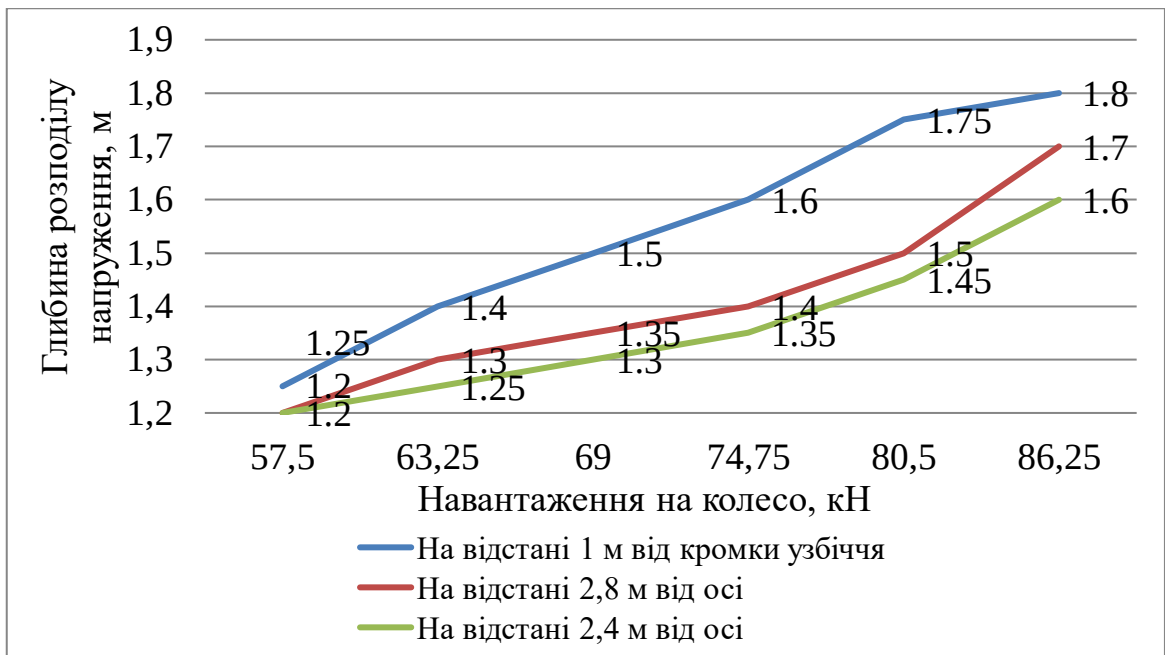


Рисунок 3.18 – Глибина розподілу напружень  $h_{N_{zmin}}$  від поверхні дорожнього одягу дороги II категорії з щебеневим дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа, до розподілу мінімальних значень напружень  $N_z = 0,01$  МПа

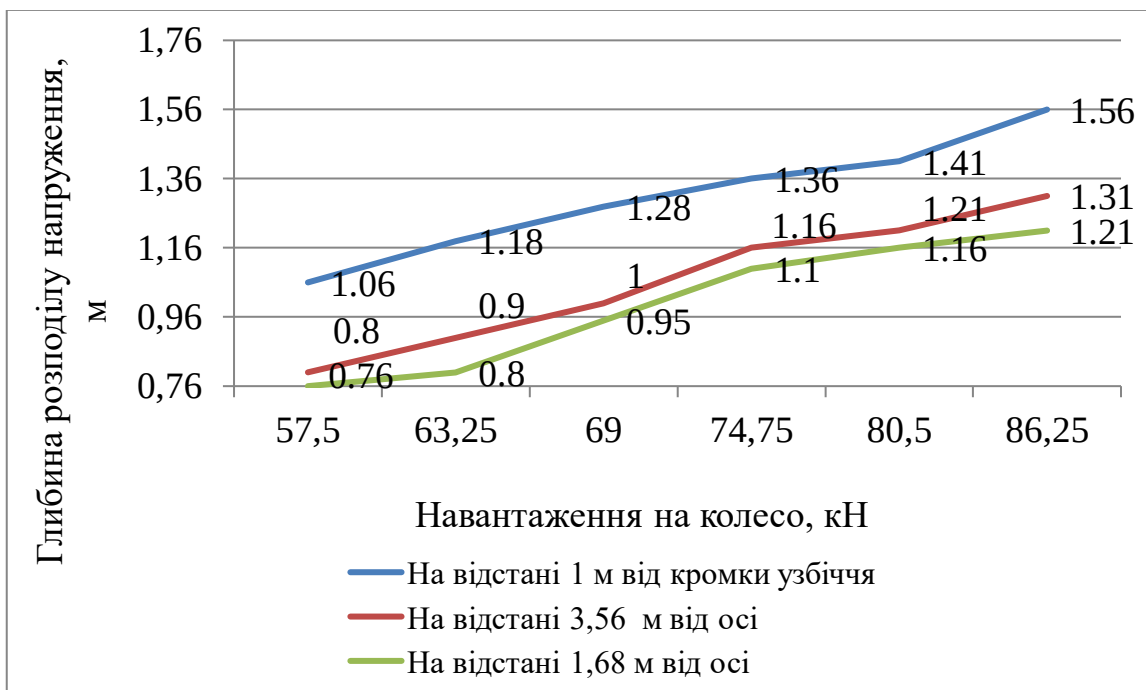


Рисунок 3.19 – Глибина розподілу напружень  $h_{N_{zmin}}$  від поверхні дорожнього одягу дороги III категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа, до розподілу мінімальних значень напружень  $N_z = 0,01$  МПа

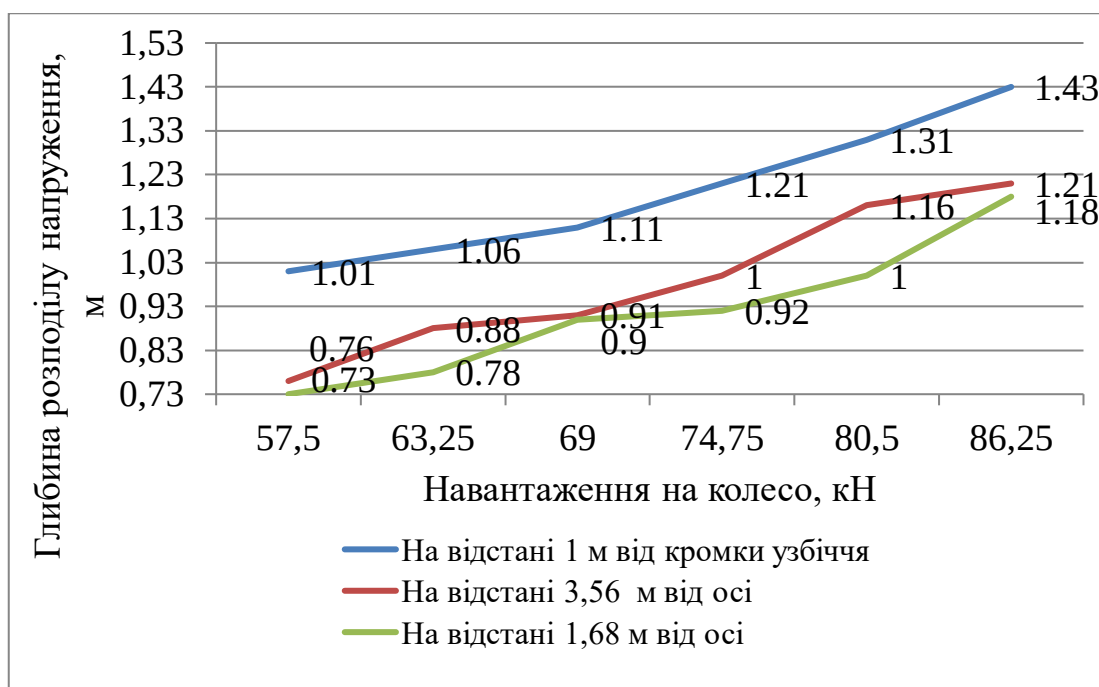


Рисунок 3.20 – Глибина розподілу напружень  $h_{N_{Zmin}}$  від поверхні дорожнього одягу дороги III категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа, до розподілу мінімальних значень напружень  $N_z = 0,01$  МПа

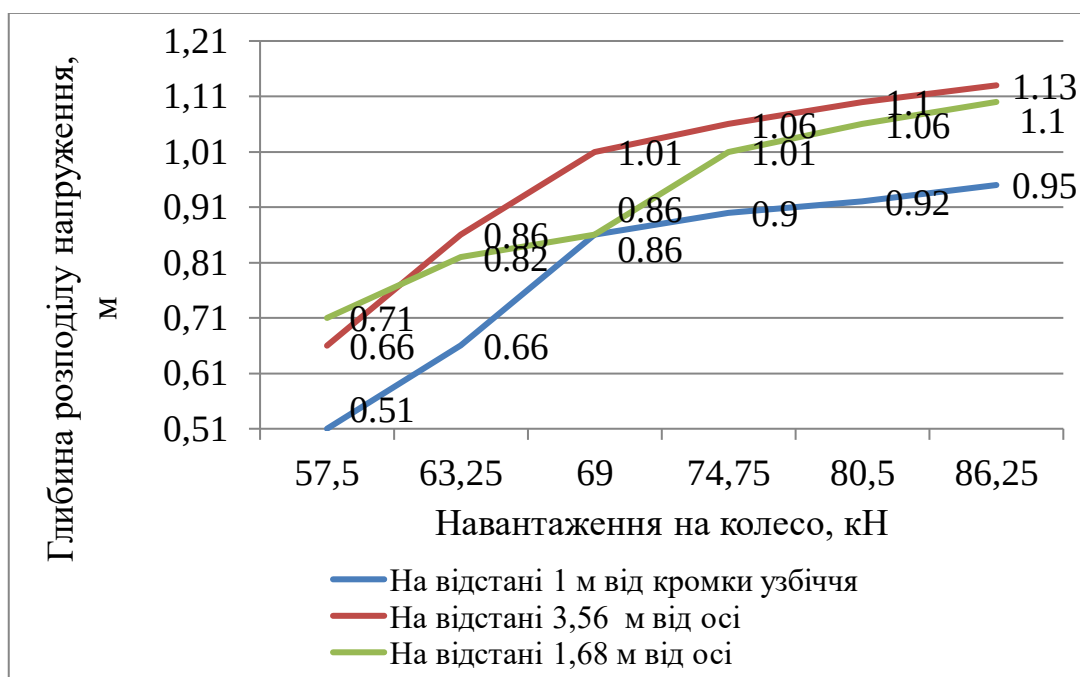


Рисунок 3.21 – Глибина розподілу напружень  $h_{N_{Zmin}}$  від поверхні дорожнього одягу дороги III категорії з щебеним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа, до розподілу мінімальних значень напружень  $N_z = 0,01$  МПа



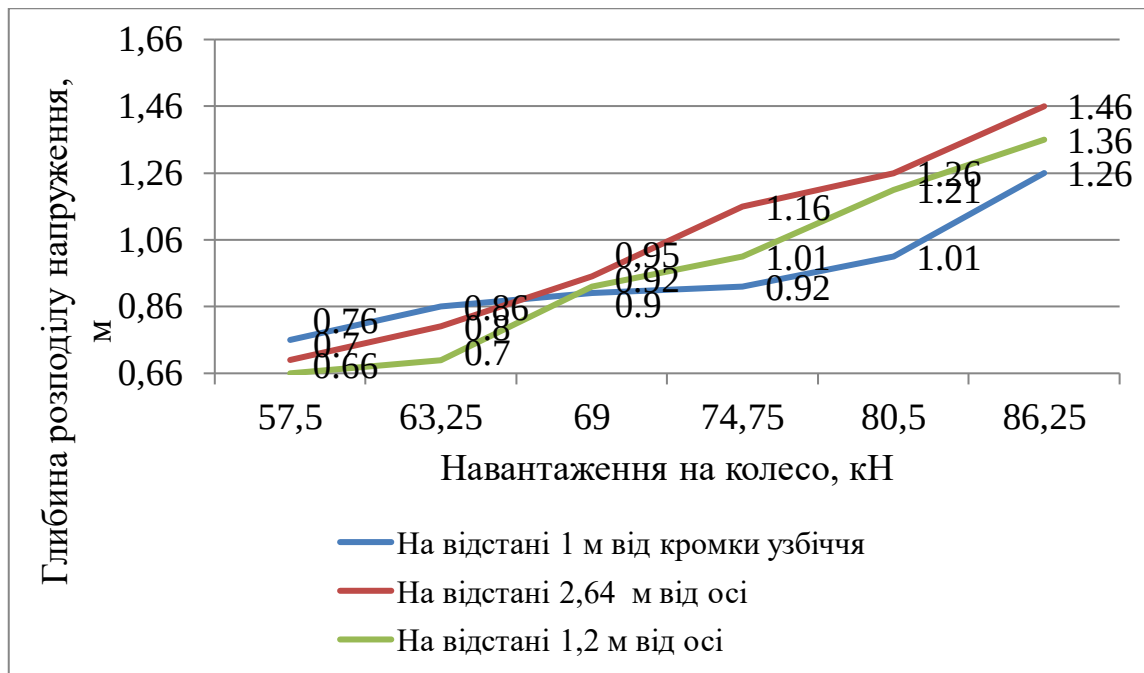


Рисунок 3.22 – Глибина розподілу напружень  $h_{N_{Zmin}}$  від поверхні дорожнього одягу дороги IV категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа, до розподілу мінімальних значень напружень  $N_z = 0,01$  МПа

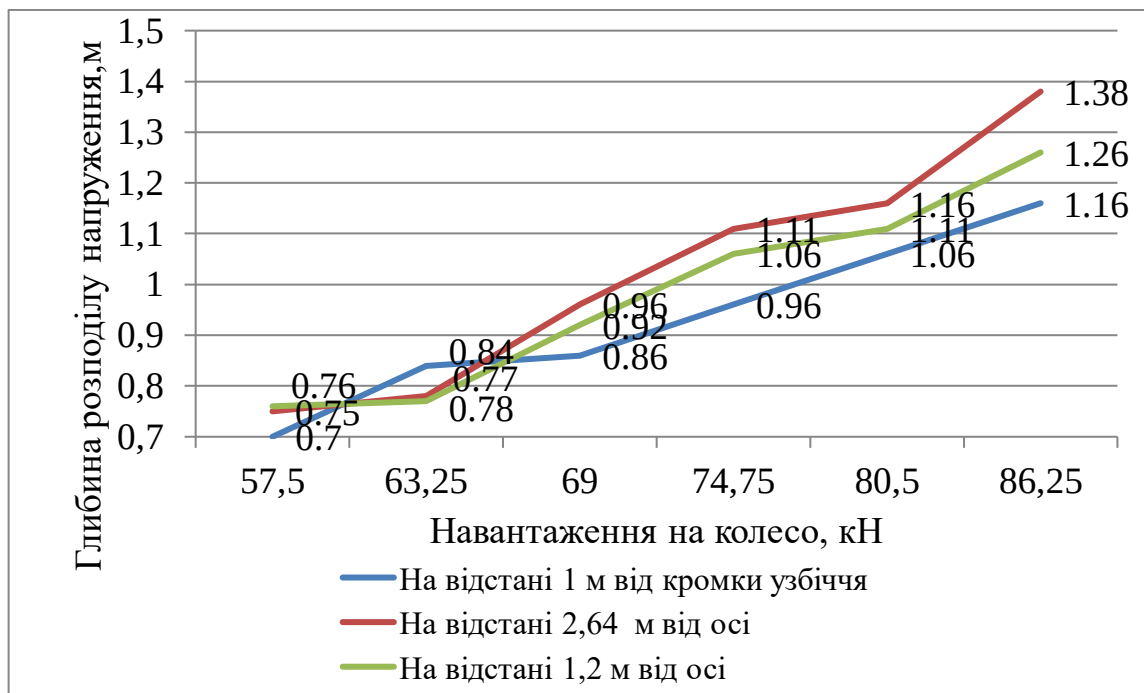


Рисунок 3.23 – Глибина розподілу напружень  $h_{N_{Zmin}}$  від поверхні дорожнього одягу дороги IV категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа, до розподілу мінімальних значень напружень  $N_z = 0,01$  МПа

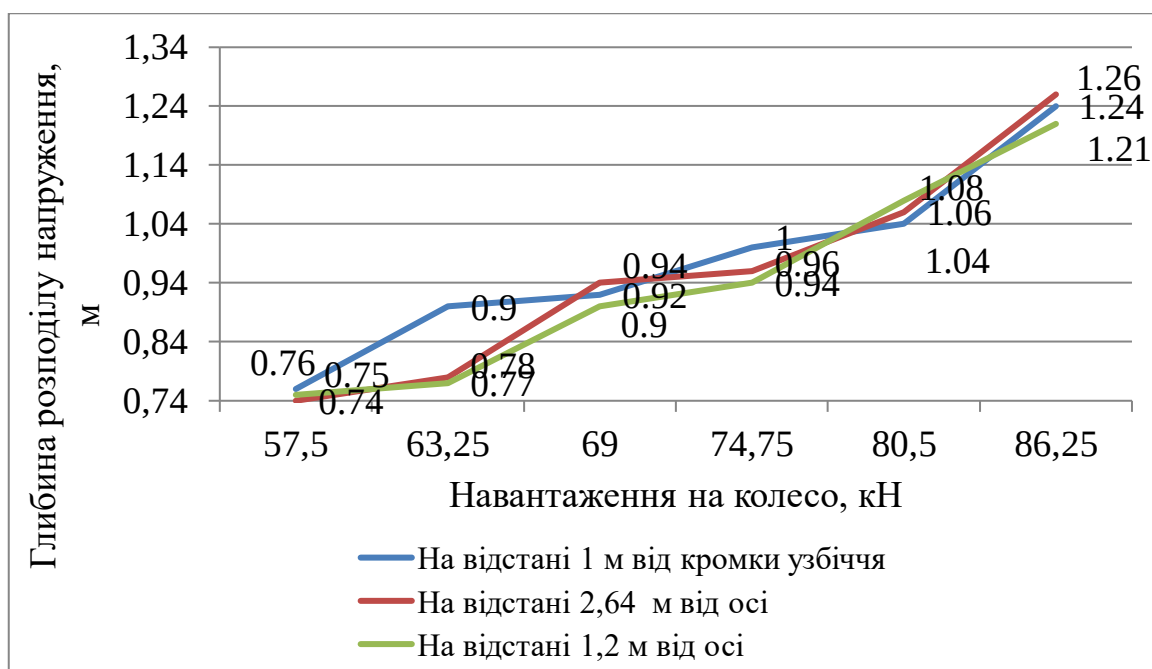


Рисунок 3.24 – Глибина розподілу напружень  $h_{N_{Zmin}}$  від поверхні дорожнього одягу дороги IV категорії з щебеним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа, до розподілу мінімальних значень напружень  $N_z = 0,01$  МПа

За результатами числового експерименту чітко видно збільшення глибини розподілу напруження  $h_{N_{Zmin}}$  від поверхні дорожнього одягу до розподілу мінімальних значень напружень, при яких не буде віджиматися вода з ґрунту ЗП. На основі моделі елементу тривимірної дорожньої конструкції досліджено її напружено-деформований стан, що дозволяє спрогнозувати вологісний режим дренавального шару під впливом навантаження від великовагових транспортних засобів. У місці прикладання навантаження спостерігається зміна конфігурації чаши прогину (рис. 3.7 – 3.8, рис. А.1 – рис. А.22). При збільшенні навантаження на 50%, розміри чаши в плані в середньому збільшуються на 12 % на дорожній конструкції з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа. Для ДК з дренавальним шаром з модулями пружності  $E = 130$  МПа та  $E = 250$  МПа розміри чаши в плані збільшуються, відповідно, на 10 % та 7 %.

Що стосується розподілу вертикальних напружень в межах проїзної частини дороги, на дорожніх конструкціях I – IV категоріях з дренавальним піщаним

шаром,  $E = 116$  МПа, вода при нормативному навантаженні віджиматися не буде (рис. 3.9 – 3.10, а, б, рис. А.23 – А.44 а, б). При навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН буде відбуватися міграція вологи знизу догори з шару ґрунту ЗП товщиною 80 – 50 см (рис. 3.13 – 3.24) в дренальний шар. Деформація в цьому шарі сягатиме біля 2 мм, а на самій проїзній частині, при такому збільшенні навантаження, зростає до 3 мм, що на 12 % більше від дії нормативного (рис. 3.11 – 3.12 а, б та рис. А.45 – А.66 а, б).

При прикладанні навантаження в найбільш несприятливому місці, на відстані 1 м від кромки узбіччя, суттєво змінюється розподіл вертикальних напружень, особливо на укосах конструкції (рис. 3.9 – 3.10, в, рис. А.23 – А.44 в). Це підтверджується багатьма натурними спостереженнями щодо виникнення та розподілу деформацій дорожнього покриття та укосів ЗП [84]. Відбувається руйнування країв дорожнього одягу, починаючи від окремих тріщин до відколювання та відламування країв проїзної частини. Під впливом навантаження 57,5 кН (рис. 3.9 – 3.10, в, рис. А.23 – А.44 в) в цій зоні вже починається процес віджимання вологи з шару товщиною 15 – 40 см. Це можна визначити за рахунок різниці глибини розподілу мінімальних значень напружень, при яких не буде віджиматися вода, і загальної товщини дорожнього одягу. При збільшенні навантаження на 50 % від нормативного, міграція вологи відбуватиметься вже в шарі ґрунту ЗП товщиною 90 – 60 см на ДК I – IV категоріях з дренальним піщаним шаром,  $E = 116$  МПа (рис. 3.9 – 3.10, в, рис. А.23 – А.44 в). Для доріг I – IV категорії за результатами числового експерименту з ДК з дренальним щебеневим шаром,  $E = 250$  МПа, максимальна глибина віджимання вологи з верхньої зони земляного полотна складає до 40 см, з ДК з дренальним піщаним шаром,  $E = 130$  МПа – до 60 см. Слід також враховувати, що щебневий дренальний шар не тримає вологу, на відміну від піщаного, та відповідно, віджимання вологи з нього не відбувається, що підтверджено результатами лабораторних досліджень, наведених у п. 2.1.

Деформації поширюватимуться до кромки укосів ЗП, де при навантаженні 57,5 кН складають біля 1,7 мм (рис. 3.11 – 3.12 в та рис. А.45 – А.66, в), при

86,25 кН – до 2 мм (рис. 3.11 – 3.12 в та рис. А.45 – А.66, в). Деформація на узбіччях – понад 2 мм та понад 2,5 мм, відповідно. Вода також буде віджиматися під укріпленою смугою узбіччя та в зоні укусу ЗП, що приводить до подальшого послаблення дорожньої конструкції.

Проведення числових експериментів дозволило визначити зміну глибини віджимання води з ґрунту ЗП в дренавальний шар на основі глибини розподілу напруження від поверхні дорожнього одягу до розподілу мінімальних значень напружень, при яких не буде віджиматися вода з супіщаних ґрунтів (рис. 3.13 – 3.24).

### **3.4 Визначення віджимання води в дренавальний шар під впливом навантаження**

По аналогії із запропонованим в роботах [7, 47] методом щодо визначення параметрів просідання ґрунту при висиханні або при відтаванні отримаємо залежності для відповідних показників під дією навантаження на дорожню конструкцію.

Відносне осідання ґрунту під дією навантаження визначимо з наступної залежності:

$$Z_{\text{до}} = e_{\text{осід},p} (h_{Nz_{\min}} - h_{\text{до}}) \cdot 10^3, \quad (3.14)$$

де  $e_{\text{осід},p}$  – відносне осідання ґрунту під дією навантаження від великовагових транспортних засобів, в частках одиниці;

$Z_{\text{до}}$  – деформація в дорожній конструкції на рівні глибини  $h_{\text{до}}$  під дренавальним шаром, в проекції на площину X0Z при понаднормативному навантаженні, мм;

$h_{\text{до}}$  – загальна товщина дорожнього одягу включно з дренавальним шаром основи, м;

$h_{Nz_{\min}}$  – глибина розподілу напруження від поверхні дорожнього одягу до розподілу мінімальних значень напружень, при яких не буде віджиматися вода з ґрунту, м.

Таким чином, з формули (3.14) отримаємо

$$e_{\text{осід},p} = \frac{Z_{\text{ДО}}}{(h_{N_{Z\min}} - h_{\text{ДО}}) \cdot 10^3}. \quad (3.15)$$

Розрахунок відносного просідання ґрунту  $e_{\text{просід.}}$  після відтавання в роботі [7] проводився на основі визначеного експериментально коефіцієнту лінійного просідання ґрунту  $a_{\text{просід.}}$ . За аналогічним підходом, згідно [7], визначимо відносне осідання ґрунту  $e_{\text{осід},p}$  під дією навантаження за формулою:

$$e_{\text{осід},p} = 1 - \frac{1 + a_{\text{осід},p} W_{\text{opt}}}{1 + a_{\text{осід},p} W_{\text{ПВ}}}, \quad (3.16)$$

де  $W_{\text{opt}}$  – оптимальна вологість ґрунту, в частках одиниці;

$W_{\text{ПВ}}$  – повна вологоємність ґрунту, в частках одиниці;

$a_{\text{осід},p}$  – коефіцієнт лінійного осідання ґрунту під дією навантаження, безрозмірна величина.

За результатами числового експерименту ПРК SCAD Office визначимо величини  $Z_{\text{ДО}}$ ,  $h_{N_{Z\min}}$  та, за залежністю (3.15),  $e_{\text{осід},p}$ .

Далі, після перетворення (3.16), представимо у вигляді співвідношення:

$$a_{\text{осід},p} = \frac{e_{\text{осід},p}}{W_{\text{ПВ}}(1 - e_{\text{осід},p}) - W_{\text{opt}}}, \quad (3.17)$$

де повна вологоємність визначається за співвідношенням:

$$W_{\text{ПВ}} = (\rho_{\text{гр}} - \rho_{\text{ск.мак}}) \rho_{\text{в}} / (\rho_{\text{гр}} \cdot \rho_{\text{ск.мак}}), \quad (3.18)$$

де  $\rho_{\text{гр}}$  – осереднене значення щільності частинок ґрунту,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\rho_{\text{ск.мах}}$  – максимальна щільність скелету ґрунту за методом стандартного ущільнення, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{в}}$  – щільність води, кг/м<sup>3</sup> ( $\rho_{\text{в}}=1000$  кг/м<sup>3</sup>).

Коефіцієнт ущільнення ґрунту після впливу навантаження також можна визначити за аналогією (2.5) – (2.8) при висиханні ґрунту:

$$K_{\text{ущ.р}} = \frac{K_{\text{ущ.мін}}}{1 - e_{\text{осід.р}}}, \quad (3.19)$$

де  $K_{\text{ущ.мін}}$  – мінімально допустимий коефіцієнт ущільнення ґрунту.

Віджимання води з шару ґрунту під впливом навантаження відбувається від рівня глибини  $h_{\text{ДО}}$  до рівня  $h_{Nz_{\text{мін}}}$ . Як у випадку відтавання [7], але з додатковим врахуванням коефіцієнта  $a_{\text{осід.р}}$ , віджимання води під проїзною частиною та узбіччям можна визначити за залежністю:

$$q_{\text{відж.р}} = \left\{ \begin{aligned} &\rho_{\text{ск.мах1}} \cdot a_{\text{осід.р1}} (K_{\text{ущ.р1}} \cdot W_{\text{ПБ1}} - K_{\text{ущ.1}} \cdot W_{\text{опт1}}) h_{\text{др.ш.}} + \\ &+ \rho_{\text{ск.мах2}} \cdot a_{\text{осід.р2}} (K_{\text{ущ.р2}} \cdot W_{\text{ПБ2}} - K_{\text{ущ.2}} \cdot W_{\text{опт2}}) (h_{Nz_{\text{мін}}} - h_{\text{ДО}}) \end{aligned} \right\} \omega_{\text{гр}} / \rho_{\text{в}}, \quad (3.20)$$

де  $\rho_{\text{ск.мах1}}$ ,  $\rho_{\text{ск.мах2}}$  – максимальна щільність скелету ґрунту за методом стандартного ущільнення відповідно дренавального шару та шару ґрунту ЗП, з якого відбувається віджимання води під дією навантаження, кг/м<sup>3</sup>;

$a_{\text{осід.р1}}$ ,  $a_{\text{осід.р2}}$  – коефіцієнт лінійного осідання відповідно дренавального шару та шару ґрунту ЗП, з якого відбувається віджимання води під дією навантаження, безрозмірна величина;

$K_{\text{ущ.1}}$ ,  $K_{\text{ущ.2}}$  – коефіцієнт ущільнення до прикладання навантаження відповідно дренавального шару та шару ґрунту ЗП, з якого відбувається віджимання води під дією навантаження;

$K_{уш,р1}$ ,  $K_{уш,р2}$  – коефіцієнт ущільнення після прикладання навантаження відповідно дренажувального шару та шару ґрунту ЗП, з якого відбувається віджим води під дією навантаження;

$W_{opt1}$ ,  $W_{opt2}$  – оптимальна вологість відповідно дренажувального шару та шару ґрунту ЗП, з якого відбувається віджимання води під дією навантаження, в частках одиниці;

$W_{пв1}$ ,  $W_{пв2}$  – повна вологоємність відповідно дренажувального шару та шару ґрунту ЗП, з якого відбувається віджимання води під дією навантаження, в частках одиниці;

$h_{др.ш.}$  – товщина дренажувального шару, м;

$\omega_{гр}$  – площа поперечного перетину ґрунту,  $m^2$  ( $\omega_{гр} = 1 m^2$ ).

На прикладі І дорожньо-кліматичної зони України, де в дренажну конструкцію надходить найбільший питомий надлишок води, згідно [88], для дороги ІІ категорії визначено питомий надлишок віджимання води з шару ґрунту під впливом навантаження на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН на відстані 2,8 м від осі.

Для розглянутої ділянки дороги ІІ-ої категорії маємо наступні вихідні дані:

$\rho_{ск.маx1} = 2000 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{ск.маx2} = 1800 \text{ кг/м}^3$ ,  $K_{уш.1} = 1$ ,  $K_{уш.2} = 0,98$  (згідно вимог [79]),  $W_{opt1} = 0,06$ ,  $W_{opt2} = 0,1$ ,  $h_{др.ш.} = 0,3 \text{ м}$  (згідно табл. 3.3),  $h_{до} = 1,1 \text{ м}$ ,  $\rho_{гр} = 2650 \text{ кг/м}^3$  для піску,  $h_{Nzmin} = 1,8 \text{ м}$  (згідно рис. 3.16) та  $Z_{до} = 2,01 \text{ мм}$  (за рис. 3.12, б).

Величина, за (3.15), відносного осідання дорожнього одягу під дією навантаження:

$$e_{осід,р} = \frac{2,01}{(1,8 - 1,1) \cdot 10^3} = 0,0029.$$

Повна вологоємність, згідно (3.18), відповідно дренажувального піщаного шару та шару ґрунту ЗП, з якого відбувається віджимання води під дією навантаження:

$$W_{IB1} = (2650 - 2000)1000 / (2650 \cdot 2000) = 0,123;$$

$$W_{IB2} = (2650 - 1800)1000 / (2650 \cdot 1800) = 0,178.$$

Коефіцієнти лінійного осідання ґрунту, згідно (3.17):

$$a_{осід,р1} = \frac{0,0029}{0,123(1 - 0,0029) - 0,06} = 0,046,$$

$$a_{осід,р2} = \frac{0,0029}{0,178(1 - 0,0029) - 0,1} = 0,037.$$

Коефіцієнти ущільнення після впливу навантаження, за (3.19):

$$K_{ущ,р1} = \frac{1}{1 - 0,0029} = 1,0028,$$

$$K_{ущ,р2} = \frac{0,98}{1 - 0,0029} = 0,982.$$

Після попередніх розрахунків, за (3.20), питомий надлишок віджимання води з шару ґрунту під впливом навантаження на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН:

$$q_{відж,р} = \left\{ \begin{aligned} &2000 \cdot 0,046(1,003 \cdot 0,123 - 1 \cdot 0,06)0,3 + \\ &+ 1800 \cdot 0,037(0,982 \cdot 0,178 - 0,98 \cdot 0,1)(1,8 - 1,1) \end{aligned} \right\} 1/1000 =$$

$$= 0,0054 \text{ м}^3 \text{ на } 1 \text{ м}^2.$$

Тобто під дією навантаження 86,25 кН в дренальний шар основи дорожнього одягу віджиматиметься додаткових 5,4 л води на 1 м<sup>2</sup> площі.



Аналогічним чином за запропонованим методом, формули (3.14) – (3.20), визначено величину віджимання води в дренальний шар під впливом навантаження 86,25 кН для I, III, IV категорій, для I дорожньо-кліматичної зони України. Вихідні дані для проведення розрахунку, отримані за результатами числового експерименту (рис. 3.13 – 3.24 та рис. 3.12, рис. А.46, А.48, А.50, А.52, А.54, А.56, А.58, А.60, А.62, А.64, А.66) наведені в табл. 3.9. Результати розрахунку за запропонованою методикою представлено в табл. 3.10.

Таблиця 3.9 – Вихідні дані для визначення величини питомого надлишку віджимання води під проїзною частиною та узбіччям

| Показники                                                         | I категорія | II категорія | III категорія | IV категорія |
|-------------------------------------------------------------------|-------------|--------------|---------------|--------------|
| Для піщаного дренального шару з модулем пружності $E = 116$ МПа   |             |              |               |              |
| $h_{Nz_{min}}$ , м                                                | 1,33        | 1,80         | 1,36          | 1,16         |
| $Z_{до}$ , мм                                                     | 2,16        | 2,01         | 3,41          | 2,51         |
| Для піщаного дренального шару з модулем пружності $E = 130$ МПа   |             |              |               |              |
| $h_{Nz_{min}}$ , м                                                | 1,18        | 1,60         | 1,31          | 1,11         |
| $Z_{до}$ , мм                                                     | 2,15        | 2,00         | 3,29          | 2,36         |
| Для щебеневого дренального шару з модулем пружності $E = 250$ МПа |             |              |               |              |
| $h_{Nz_{min}}$ , м                                                | 1,13        | 1,60         | 1,06          | 1,00         |
| $Z_{до}$ , мм                                                     | 2,02        | 1,99         | 2,11          | 2,32         |

Для I-ої дорожньо-кліматичної зони України, згідно [88], рівень загального питомого надлишку води (інфільтраційної та від розмерзання), що надходить в дренальний шар, від найвищого до найнижчого коливається в достатньо широких межах: 0,03–0,017 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>2</sup>. Відповідно до цього максимальний загальний питомий обсяг води з урахуванням віджимання з шару ґрунту під впливом навантаження 86,25 кН складатиме від 37,6 до 24,6 л на 1 м<sup>2</sup>. Це суттєво змінює вологісний стан основи дорожнього одягу та знизить міцнісні показники ДК. Прогноз щодо кількості віджимання води під проїзною частиною, згідно (3.20), можливо отримати за величинами відносного осідання ґрунту (3.15), коефіцієнтів лінійного осідання (3.17) та ущільнення ґрунту після впливу навантаження від великовагових транспортних засобів (3.19).

Таблиця 3.10 – Результати визначення розрахунку питомого надлишку віджимання води в дренавальний шар під впливом навантаження

| Показники                                                          | I категорія | II категорія | III категорія | IV категорія |
|--------------------------------------------------------------------|-------------|--------------|---------------|--------------|
| Піщаний дренавальний шар, з модулем пружності $E = 116$ МПа        |             |              |               |              |
| $e_{\text{осід.р}}$                                                | 0,0054      | 0,0029       | 0,0076        | 0,0083       |
| $a_{\text{осід.р1}}$                                               | 0,0870      | 0,0460       | 0,1220        | 0,1350       |
| $a_{\text{осід.р2}}$                                               | 0,0690      | 0,0370       | 0,0980        | 0,1090       |
| $K_{\text{ущ.р1}}$                                                 | 1,0054      | 1,0028       | 1,0076        | 1,0084       |
| $K_{\text{ущ.р2}}$                                                 | 0,9850      | 0,9820       | 0,9870        | 0,9880       |
| $q_{\text{відж.р}}, \text{Л}$<br>води на<br>1 м <sup>2</sup> площі | 5,7         | 5,4          | 7,4           | 5,8          |
| Піщаний дренавальний шар, з модулем пружності $E = 130$ МПа        |             |              |               |              |
| $e_{\text{осід.р}}$                                                | 0,0086      | 0,0040       | 0,0082        | 0,0094       |
| $a_{\text{осід.р1}}$                                               | 0,1580      | 0,0537       | 0,1510        | 0,1730       |
| $a_{\text{осід.р2}}$                                               | 0,1230      | 0,0419       | 0,1180        | 0,1360       |
| $K_{\text{ущ.р1}}$                                                 | 1,0086      | 1,1044       | 1,0083        | 1,0095       |
| $K_{\text{ущ.р2}}$                                                 | 0,9880      | 0,8940       | 0,9880        | 0,9890       |
| $q_{\text{відж.р}}, \text{Л}$<br>води на<br>1 м <sup>2</sup> площі | 5,5         | 4,3          | 7,1           | 5,4          |
| Щебеневий дренавальний шар, з модулем пружності $E = 250$ МПа      |             |              |               |              |
| $e_{\text{осід.р}}$                                                | 0,0039      | 0,0039       | 0,0140        | 0,0165       |
| $a_{\text{осід.р1}}$                                               | 0,1210      | 0,0475       | 0,1700        | 0,2010       |
| $a_{\text{осід.р2}}$                                               | 0,0900      | 0,0352       | 0,1260        | 0,1490       |
| $K_{\text{ущ.р1}}$                                                 | 1,2620      | 1,2540       | 1,2670        | 1,2710       |
| $K_{\text{ущ.р2}}$                                                 | 0,7900      | 0,7860       | 0,7920        | 0,7940       |
| $q_{\text{відж.р}}, \text{Л}$<br>води на<br>1 м <sup>2</sup> площі | 2,5         | 2,7          | 3,0           | 2,8          |

### 3.5 Порівняльний аналіз результатів за методом В. І. Куканова (МАДІ) з результатами розрахунку віджимання води в дренальний шар за запропонованим методом

З метою обґрунтування та підтвердження адекватності запропонованого методу розрахунку віджимання води в дренальний шар під дією навантаження проведемо порівняльний аналіз з результатами, отриманими за методом В.І. Куканова (МАДІ) [7, 51].

Розрахунок віджимання питомого надлишку води з шару ґрунту під впливом навантаження на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН на відстані 2,8 м від осі. На прикладі І дорожньо-кліматичної зони України проведено розрахунки за наступними вихідними даними: середній тиск навантаження колеса на покриття  $\bar{p}=0,8$  МПа, розрахований діаметр колеса автомобіля  $D=37,09$  см, відносна вологість ґрунту після його осідання у весняний період  $W_{зп} / W_L = 0,86$ . На основі вихідних даних з табл. 3.3 послідовно визначимо середній модуль пружності дорожнього одягу (з морозозахисним шаром):

1 категорія -

$$E_{\text{д.о}} = \frac{539 \cdot 5 + 480 \cdot 10 + 360 \cdot 10 + 400 \cdot 12 + 240 \cdot 26 + 116 \cdot 30}{93} = 309 \text{ МПа};$$

$$E_{\text{д.о.с.п}} = \frac{539 \cdot 5 + 480 \cdot 10 + 360 \cdot 10 + 400 \cdot 20 + 240 \cdot 26 + 130 \cdot 30}{93} = 314 \text{ МПа};$$

$$E_{\text{д.о.щ}} = \frac{539 \cdot 5 + 480 \cdot 10 + 360 \cdot 10 + 400 \cdot 20 + 240 \cdot 26 + 250 \cdot 20}{93} = 326 \text{ МПа};$$

2 категорія -

$$E_{\text{д.о}} = \frac{539 \cdot 5 + 480 \cdot 10 + 360 \cdot 10 + 700 \cdot 20 + 240 \cdot 35 + 116 \cdot 30}{110} = 336 \text{ МПа};$$

$$E_{\partial.o.c.n} = \frac{539 \cdot 5 + 480 \cdot 10 + 360 \cdot 10 + 700 \cdot 20 + 240 \cdot 35 + 130 \cdot 30}{110} = 340 \text{ МПа};$$

$$E_{\partial.o.ш} = \frac{539 \cdot 5 + 480 \cdot 10 + 360 \cdot 10 + 700 \cdot 20 + 240 \cdot 35 + 250 \cdot 20}{100} = 384 \text{ МПа};$$

3 категорія -

$$E_{\partial.o.} = \frac{539 \cdot 5 + 480 \cdot 10 + 240 \cdot 21 + 240 \cdot 35 + 116 \cdot 30}{91} = 262 \text{ МПа};$$

$$E_{\partial.o.c.n.} = \frac{539 \cdot 5 + 480 \cdot 10 + 240 \cdot 21 + 240 \cdot 35 + 130 \cdot 30}{91} = 272 \text{ МПа};$$

$$E_{\partial.o.ш} = \frac{539 \cdot 5 + 480 \cdot 10 + 240 \cdot 21 + 240 \cdot 35 + 250 \cdot 20}{86} = 301 \text{ МПа};$$

4 категорія -

$$E_{\partial.o.} = \frac{539 \cdot 5 + 480 \cdot 10 + 240 \cdot 21 + 240 \cdot 30 + 116 \cdot 20}{86} = 256 \text{ МПа};$$

$$E_{\partial.o.c.n.} = \frac{539 \cdot 5 + 480 \cdot 10 + 240 \cdot 21 + 240 \cdot 30 + 130 \cdot 20}{86} = 259 \text{ МПа};$$

$$E_{\partial.o.ш} = \frac{539 \cdot 5 + 480 \cdot 10 + 240 \cdot 21 + 240 \cdot 30 + 250 \cdot 20}{86} = 287 \text{ МПа}.$$

Товщину ґрунту, з якого буде відбуватись віджимання води визначимо за формулою (2.14):

1 категорія -

$$z_{\text{відж}} = \frac{37,09 \sqrt{(0,8 - 0,01) / (1,5 \cdot 0,01)}}{1,1 \sqrt[3]{309 / 48}} - 93 = 38,53 \text{ см};$$

$$Z_{\text{відж.с.п.}} = \frac{37,09\sqrt{(0,8-0,01)/(1,5 \cdot 0,01)}}{1,1\sqrt[3]{314/52}} - 93 = 41,36 \text{ см};$$

$$Z_{\text{відж.щ.}} = \frac{37,09\sqrt{(0,8-0,01)/(1,5 \cdot 0,01)}}{1,1\sqrt[3]{326/52}} - 93 = 39,69 \text{ см};$$

2 категорія -

$$Z_{\text{відж}} = \frac{37,09\sqrt{(0,8-0,01)/(1,5 \cdot 0,01)}}{1,1\sqrt[3]{336/48}} - 110 = 17,9 \text{ см};$$

$$Z_{\text{відж.с.п.}} = \frac{37,09\sqrt{(0,8-0,01)/(1,5 \cdot 0,01)}}{1,1\sqrt[3]{340/52}} - 110 = 20,8 \text{ см};$$

$$Z_{\text{відж.щ.}} = \frac{37,09\sqrt{(0,8-0,01)/(1,5 \cdot 0,01)}}{1,1\sqrt[3]{384/52}} - 100 = 25,64 \text{ см};$$

3 категорія

$$Z_{\text{відж}} = \frac{37,09\sqrt{(0,8-0,01)/(1,5 \cdot 0,01)}}{1,1\sqrt[3]{262/48}} - 91 = 47,9 \text{ см};$$

$$Z_{\text{відж.с.п.}} = \frac{37,09\sqrt{(0,8-0,01)/(1,5 \cdot 0,01)}}{1,1\sqrt[3]{272/52}} - 91 = 49,9 \text{ см};$$

$$Z_{\text{відж.щ.}} = \frac{37,09\sqrt{(0,8-0,01)/(1,5 \cdot 0,01)}}{1,1\sqrt[3]{301/52}} - 86 = 50,27 \text{ см};$$

4 категорія -

$$Z_{\text{відж}} = \frac{37,09\sqrt{(0,8-0,01)/(1,5 \cdot 0,01)}}{1,1\sqrt[3]{256/48}} - 86 = 54,04 \text{ см};$$

$$z_{\text{відж.с.п.}} = \frac{37,09\sqrt{(0,8-0,01)/(1,5\cdot 0,01)}}{1,1\sqrt[3]{259/52}} - 86 = 57,27 \text{ см};$$

$$z_{\text{відж.ш.}} = \frac{37,09\sqrt{(0,8-0,01)/(1,5\cdot 0,01)}}{1,1\sqrt[3]{287/52}} - 86 = 52,45 \text{ см.}$$

Товщину еквівалентного шару ґрунту визначимо за формулою (2.13):

1 категорія -

$$z_{\text{екв}} = 1,1 \cdot 93 \sqrt[3]{309/48} = 204 \text{ см};$$

$$z_{\text{екв}} = 1,1 \cdot 93 \sqrt[3]{314/52} = 200 \text{ см};$$

$$z_{\text{екв}} = 1,1 \cdot 93 \sqrt[3]{326/52} = 202 \text{ см};$$

2 категорія -

$$z_{\text{екв}} = 1,1 \cdot 110 \sqrt[3]{336/48} = 210 \text{ см};$$

$$z_{\text{екв}} = 1,1 \cdot 110 \sqrt[3]{340/52} = 205 \text{ см};$$

$$z_{\text{екв}} = 1,1 \cdot 100 \sqrt[3]{384/52} = 215 \text{ см};$$

3 категорія -

$$z_{\text{екв}} = 1,1 \cdot 91 \sqrt[3]{262/48} = 193 \text{ см};$$

$$z_{\text{екв}} = 1,1 \cdot 91 \sqrt[3]{272/52} = 190 \text{ см};$$

$$z_{\text{екв}} = 1,1 \cdot 86 \sqrt[3]{301/52} = 197 \text{ см};$$

4 категорія -

$$z_{\text{екв}} = 1,1 \cdot 86 \sqrt[3]{256/48} = 192 \text{ см};$$

$$z_{екв} = 1,1 \cdot 91 \sqrt[3]{259 / 52} = 187 \text{ см};$$

$$z_{екв} = 1,1 \cdot 86 \sqrt[3]{287 / 52} = 194 \text{ см}.$$

Напруження від розрахункового автомобіля на поверхні піщаного ґрунту під дренавальним, морозозахисним шаром отримаємо за формулою (2.12):

1 категорія -

$$\sigma_{н.о} = \frac{0,8}{1 + 1,5(204 / 37,09)^2} = 0,017 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{н.о} = \frac{0,8}{1 + 1,5(200 / 37,09)^2} = 0,018 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{н.о} = \frac{0,8}{1 + 1,5(202 / 37,09)^2} = 0,0175 \text{ МПа};$$

2 категорія -

$$\sigma_{н.о} = \frac{0,8}{1 + 1,5(210 / 37,09)^2} = 0,016 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{н.о} = \frac{0,8}{1 + 1,5(205 / 37,09)^2} = 0,017 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{н.о} = \frac{0,8}{1 + 1,5(215 / 37,09)^2} = 0,015 \text{ МПа};$$

3 категорія -

$$\sigma_{н.о} = \frac{0,8}{1 + 1,5(193 / 37,09)^2} = 0,019 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{н.о} = \frac{0,8}{1 + 1,5(190 / 37,09)^2} = 0,02 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{н.о} = \frac{0,8}{1+1,5(197 / 37,09)^2} = 0,018 \text{ МПа};$$

4 категорія -

$$\sigma_{н.о} = \frac{0,8}{1+1,5(192 / 37,09)^2} = 0,019 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{н.о} = \frac{0,8}{1+1,5(187 / 37,09)^2} = 0,02 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{н.о} = \frac{0,8}{1+1,5(194 / 37,09)^2} = 0,019 \text{ МПа}.$$

Питомий надлишок води  $q'''_{\text{відж}(p)}$ , що віджимається під впливом навантаження з піщаного ґрунту ЗП визначимо за рисунком 2.5 а), при  $W_g/W_L = 0,86$  та визначених вище напружень від розрахункового автомобіля на поверхні піщаного ґрунту  $\sigma_{н.о}$ . Результати порівняння проведених розрахунків за двома методами для I – IV категорій доріг наведені в табл. 3.11.

За представленими у табл. 3.11 можна зробити висновок щодо суттєвих відносних похибок щодо представлених за двома методиками розрахунків. Запропонована В.І. Кукановим методика є спрощеною, не враховує багато особливостей в роботі дорожньої конструкції під впливом навантаження від великовагових транспортних засобів: вплив напружень від власної ваги конструкції, процеси осідання ґрунту ЗП та дренажного шару ДО, має обмеження щодо параметрів відносної вологості ЗП.



Таблиця 3.11 – Порівняння результатів розрахунку величин питомого надлишку віджимання води в дренавальний шар під впливом навантаження за двома методами

| Показники                                                       | I категорія | II категорія | III категорія | IV категорія |
|-----------------------------------------------------------------|-------------|--------------|---------------|--------------|
| Піщаний дренавальний шар, з модулем пружності $E = 116$ МПа     |             |              |               |              |
| $q_{\text{відж.р}}$ , л на м <sup>2</sup> (метод В.І. Куканова) | 1,7         | 1,8          | 1,9           | 1,9          |
| $q_{\text{відж.р}}$ , л на м <sup>2</sup>                       | 5,7         | 5,4          | 7,4           | 5,8          |
| Відносна похибка                                                | 0,42        | 0,50         | 0,34          | 0,48         |
| $z_{\text{відж}}$ , см (метод В.І. Куканова)                    | 38,53       | 17,90        | 47,90         | 54,04        |
| $z_{\text{відж}}$ , см                                          | 40          | 70           | 45            | 30           |
| Відносна похибка                                                | -0,09       | 0,74         | -0,094        | -1,29        |
| Піщаний дренавальний шар, з модулем пружності $E = 130$ МПа     |             |              |               |              |
| $q_{\text{відж.р}}$ , л на м <sup>2</sup> (метод В.І. Куканова) | 2,0         | 1,9          | 2,1           | 2,1          |
| $q_{\text{відж.р}}$ , л на м <sup>2</sup>                       | 5,5         | 4,3          | 7,1           | 5,4          |
| Відносна похибка                                                | 0,57        | 0,79         | 0,42          | 0,63         |
| $z_{\text{відж}}$ , см (метод В.І. Куканова)                    | 41,36       | 20,80        | 49,90         | 57,27        |
| $z_{\text{відж}}$ , см                                          | 25          | 50           | 30            | 25           |
| Відносна похибка                                                | 2,520       | 0,712        | 2,50          | 1,770        |
| Щебеневий дренавальний шар, з модулем пружності $E = 250$ МПа   |             |              |               |              |
| $q_{\text{відж.р}}$ , л на м <sup>2</sup> (метод В.І. Куканова) | 1,7         | 1,6          | 1,9           | 1,9          |
| $q_{\text{відж.р}}$ , л на м <sup>2</sup>                       | 5,5         | 4,3          | 7,1           | 5,4          |
| Відносна похибка                                                | 0,45        | 0,59         | 0,36          | 0,54         |
| $z_{\text{відж}}$ , см (метод В.І. Куканова)                    | 39,00       | 25,64        | 50,27         | 52,45        |
| $z_{\text{відж}}$ , см                                          | 20          | 60           | 20            | 14           |
| Відносна похибка                                                | 2,05        | 0,74         | 1,66          | 1,36         |

### Висновки по розділу 3

1. Запропоноване прогнозування вологісного режиму дренавального шару дорожньої конструкції під дією навантаження визначено з умов впливу штамп одного колеса транспортного засобу. За результатами числового експерименту розраховано глибини розподілу напружень від поверхні дорожнього одягу до розподілу мінімальних значень напружень, при яких не буде віджиматися вода з ґрунту ЗП. При нормативному навантаженні віджимання води в ґрунті майже не відбувається.

2. На основі моделі елементу тривимірної дорожньої конструкції досліджено її напружено-деформований стан, що дозволило спрогнозувати вологісний режим дренавального шару під впливом навантаження від великовагових транспортних засобів. У місці прикладання навантаження спостерігається зміна конфігурації чаши прогину. При збільшенні навантаження на 50%, на дорожніх конструкціях з дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа,  $E = 130$  МПа та  $E = 250$  МПа, розміри чаши в плані, відповідно, збільшуються на 12 %, 10 % та 7 %.

3. За розподілом ізополів та ізоліній вертикальних напружень в межах проїзної частини дороги, на дорожніх конструкціях I – IV категоріях з дренавальним шаром, вода при нормативному навантаженні віджиматися не буде. При навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН міграція вологи в дорожній конструкції з дренавальним шаром буде відбуватися знизу, з шару ґрунту ЗП товщиною 80 – 50 см, догори. Деформація в цьому шарі сягатиме біля 2 мм, а на самій проїзній частині, при такому збільшенні навантаження, зростає до 3 мм.

3. При прикладанні навантаження в найбільш несприятливому місці, на укріпленій смузі узбіччя, суттєво змінюється розподіл вертикальних напружень, особливо на укосах конструкції. Під впливом навантаження 57,5 кН в цій зоні починається процес віджимання вологи з шару товщиною 15 – 40 см. При збільшенні навантаження на 50 % від нормативного міграція вологи

відбуватиметься в шарі ґрунту ЗП товщиною 90 – 60 см на дорожніх конструкціях I – IV категоріях з дренавальним піщаним шаром,  $E = 116$  МПа. Для доріг I – IV категорії - з дренавальним щебеневим шаром,  $E = 250$  МПа, максимальна глибина віджимання вологи з верхньої зони земляного полотна складає до 40 см, з дорожньою конструкцією з дренавальним піщаним шаром,  $E = 130$  МПа – до 60 см.

4. Проведення числових експериментів дозволило визначити зміну глибини віджимання вологи з ґрунту ЗП в дренавальний шар на основі глибини розподілу напруження від поверхні дорожнього одягу до розподілу мінімальних значень напружень, при яких не буде віджиматися вода. Для I-ої дорожньо-кліматичної зони України максимальний загальний питомий об'єм води, з урахуванням віджимання з шару ґрунту з земляного полотна, під впливом навантаження 86,25 кН складатиме від 37,6 л на 1 м<sup>2</sup> до 24,6 л на 1 м<sup>2</sup>. Це суттєво змінює вологісний стан основи дорожнього одягу та знизить міцнісні показники дорожньої конструкції.

5. На основі проведеного порівняння результатів розрахунку за методом В.І. Куканова (МАДІ) та за запропонованим удосконаленим методом за дослідженням НДС ДК можна зробити висновок щодо суттєвих відносних похибок, які змінюються в межах 0,09 до 2,50. Запропонована методика МАДІ є спрощеною, не враховує багато особливостей в роботі дорожньої конструкції під впливом навантаження від великовагових транспортних засобів: вплив напружень від власної ваги конструкції, процеси осідання ґрунту ЗП та дренавального шару ДО, має обмеження щодо параметрів відносної вологості ЗП.

6. Результати досліджень третього розділу викладено у наступних публікаціях [73, 74, 75].

## РОЗДІЛ 4

### ДОРОЖНЬО-КЛІМАТИЧНЕ РАЙОНУВАННЯ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ ВОДНО-ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ В ТРАНСПОРТНИХ СПОРУДАХ

#### 4.1 Метод визначення розрахункових періодів водно-теплого режиму для розрахунку дренажних пристроїв

Вода в дренавальний шар дорожньої конструкції може надходити від атмосферних опадів та при віджиманні води з нижнього шару ґрунту при розмерзанні ДК.

Сумарну кількість води, що надходить до дренавального шару ( $Q$ , м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup> проїзної частини) можна розраховувати трьома способами:

- вимірюванням вологості та щільності ґрунтів земляного полотна в кінці третього періоду водно-теплого режиму;
- нівелюванням морозного здимання;
- враховуючи надлишок вільної води в ґрунтах верхньої частини земляного полотна.

Перші два способи потребують великих обсягів польових випробувань та дають змогу розрахувати сумарну кількість води, що надходить в дренавальні шари тільки у весняний період водно-теплого режиму [1, 5, 90].

У зв'язку зі зміною клімату планети, а саме підвищення вмісту атмосферної вологи, збільшенням інтенсивності та тривалості опадів, що випадають протягом року, відбувається зміна водно-теплого режиму дорожньої конструкції. При проектуванні елементів дорожньої конструкції, зокрема дренажних систем, виникає необхідність у визначенні розрахункових періодів водно-теплого режиму [22, 28, 91 – 96]. А саме необхідно визначити тривалість кожного періоду окремо, оскільки вони не відповідають календарним термінам: першого – осіннього періоду початкового накопичення вологи, другого – зимового періоду перерозподілу вологи і накопичення її в верхніх шарах земляного полотна,

промерзання ґрунту, третього – весняного періоду відтавання і насичення, і четвертого - літнього.

Вихідними даними для розрахунків є статистичні дані метеорологічних спостережень району будівництва за період вибраної кількості років  $N_{\text{років}}$  розрахунків (приймають, як мінімум, п'ятирічний період). Збільшення кількості років спостереження призводить до підвищення точності виконаних розрахунків [97]. Розрахунок за нижченаведеним методом слід виконувати для кожного визначеного року окремо.

Для розрахунків необхідно мати статистичні дані метеорологічних спостережень про такі метеорологічні величини:

- середньодобові температури повітря протягом року;
- середньомісячні температури повітря протягом року;
- середньодобові температури на поверхні ґрунту протягом року;
- кількість опадів,
- інтенсивність опадів;
- тривалість опадів;
- дефіцит насичення повітря.

Окремі межі певних періодів визначаються температурним режимом. Визначення дат настання відповідних температур слід проводити за метеорологічними даними про середньомісячні температури шляхом побудови графік уходу цих температур протягом розрахункового року. Графік дає можливість отримати дати переходу температури через  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  весною, через  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  та мінус  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  восени.

Початок першого розрахункового осіннього періоду визначається датами переходу температури через  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_{\text{по}}$ ), закінчення – при переході температури через мінус  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_{\text{зо}}$ ) – початок замерзання ґрунту. Тривалість першого періоду  $T_0$  (доба) визначається кількістю діб за календарем між розрахованими датами ( $T_0 = T_{\text{зо}} - T_{\text{по}}$ ). Початок третього весняного періоду ( $T_{\text{пв}}$ ) визначається датою переходу температури через  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  весною [28]. Дату закінчення весняного періоду ( $T_{\text{зв}}$ ) визначають після розрахунків режиму відтавання ґрунту.

На подальшому етапі послідовно для кожного дня, починаючи з дати початку весняного періоду ( $T_{\text{пв}}$ ), на підставі метеорологічних даних розрахункового року, визначають товщину шару ґрунту [22, 96], в якому розтає лід за одну добу в активній зоні земляного полотна, м:

$$h_i = \sqrt{\frac{4,86 \cdot \lambda \cdot 24 \cdot (t_B - t_L)}{\delta \cdot W_{\text{вес}} \cdot \rho} + 0,25 \cdot (R_{\text{п}} + R_0)^2 \cdot \lambda^2} - 0,5 \cdot (R_{\text{п}} + R_0) \cdot \lambda, \quad (4.1)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності талого ґрунту, Вт/(м · К) [3];

$t_B$  – температура повітря, °С;

$t_L$  – температура льодоутворення, °С [3];

$\delta$  – прихована теплота льодоутворення, яка дорівнює 334 кДж/кг;

$W_{\text{вес}}$  – розрахункова весняна вологість ґрунту земляного полотна, в частках одиниці;

$\rho$  – щільність ґрунту, кг/м<sup>3</sup>;

$R_{\text{п}}$  – величина, яка залежить від швидкості вітру, К·м<sup>2</sup>/Вт [3];

$R_0$  – тепловий опір дорожнього одягу, К·м<sup>2</sup>/Вт, розраховують за формулою (4.2).

$$R_0 = \frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{h_n}{\lambda_n}, \quad (4.2)$$

де  $h_1, h_2, h_n$  – товщини шарів дорожнього одягу, м;

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_n$  – коефіцієнти теплопровідності від повідних шарів, Вт/(м · К) (визначають експериментально, а за відсутності необхідного обладнання – приймають за таблицею Г.1 [22]).

Тепловий опір  $R_{\text{п}}$ , що характеризує теплообмін покриття з повітрям, К·м<sup>2</sup>/Вт, приймають залежно від величини швидкості вітру  $v$ , м/с

Загальний тепловий опір  $R$ , К·м<sup>2</sup>/Вт:

$$R = \frac{h'}{\lambda_{\text{по}}} + \frac{h_c}{\lambda_c}, \quad (4.3)$$

де  $H'$  – глибина, на якій приймається температура ґрунту;  $t_{\Gamma}$ , м (приймають за даними метеорологічної станції – глибина, на якій вимірюють температуру ґрунту під час метеорологічних спостережень);

$\lambda_{\text{по}}$  – коефіцієнт теплопровідності ґрунту поля,

$h_c$  – висота снігового покриву, м;

$\lambda_c$  – коефіцієнт теплопровідності снігу, Вт/(м · К).

Отримані результати послідовно сумують  $\sum h_i$ . Розрахунки за формулою (4.1) проводять до виконання умови:

$$\sum h_i \leq z_{\text{пр}}, \quad (4.4)$$

де  $z_{\text{пр}}$  – глибина промерзання ґрунту, м, розраховують за формулою 4 для розрахункового року спостережень.

$$z_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{4,86 \cdot \lambda_m \cdot T}{\delta \cdot W \cdot \rho} \cdot \left[ t_{\text{л}} - t_{\text{п}} + (t_{\text{п}} - t_{\Gamma}) \cdot \frac{R_{\text{п}} + R_0}{R} \right]} \cdot 100, \quad (4.5)$$

де  $\lambda_m$  – коефіцієнт теплопровідності мерзлого ґрунту, Вт/(м · К);

$T$  – період промерзання, годин (те ж, що і  $T_z$  виражене в годинах);

$\delta$  – прихована теплота льодоутворення, дорівнює 334 кДж/кг;

$W$  – вологість ґрунту, долі одиниці;

$\rho$  – щільність ґрунту, кг/м<sup>3</sup>;

$t_{\text{п}}$ ,  $t_{\Gamma}$ ,  $t_{\text{л}}$  – відповідно, температура повітря, ґрунту (за даними метеорологічних спостережень) та льодоутворення, °С

За дату закінчення третього (весняного) розрахункового періоду ( $T_{\text{зв}}$ ) приймають останню дату, для якої виконувались розрахунки за формулою (4.1) Тривалість третього періоду  $T_{\text{в}}$  (доба) визначають за календарем кількістю діб між розрахованими датами закінчення та початку весняного періоду ( $T_{\text{в}} = T_{\text{зв}} - T_{\text{пв}}$ ).

Тривалість четвертого (літнього) розрахункового періоду визначають за календарем кількістю діб між розрахованими датами закінчення весняного та початку осіннього періоду ( $T_{\text{л}} = T_{\text{по}} - T_{\text{зв}}$ ).

У таблиці 4.1 наведені тривалості розрахункових періодів, що були визначені на основі статистичних даних метеорологічних спостережень у Київській області з 2011 по 2015 роки.

Таблиця 4.1 – Дати початку періодів зміни вологості

| Початок весняного розрахункового періоду – перехід через 0 °C | Початок осіннього розрахункового періоду – перехід температури через +10 °C | Початок зимового розрахункового періоду – перехід через -5 °C | Період замерзання, доба | Початок літнього розрахункового періоду – Кінець розмерзання |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 24.02.2015                                                    | 02.11.2015                                                                  | 31.01.2016                                                    | 23                      | 08.03.2015                                                   |
| 01.03.2014                                                    | 23.10.2014                                                                  | 13.01.2015                                                    | 42                      | 14.03.2014                                                   |
| 13.03.2013                                                    | 27.10.2013                                                                  | 09.02.2014                                                    | 20                      | 14.04.2013                                                   |
| 20.03.2012                                                    | 25.10.2012                                                                  | 11.01.2013                                                    | 61                      | 04.04.2012                                                   |
| 14.03.2011                                                    | 27.10.2011                                                                  | 01.02.2012                                                    | 48                      | 08.04.2011                                                   |

Для кожної доби із зимового розрахункового періоду визначають об'єм води, що звільняється при відтаванні ґрунту під проїзною частиною та узбіччям, м<sup>3</sup>/доба на 1 м<sup>2</sup>:

$$q_{i_{\text{вг}}}^{\text{пч}} = h_i \cdot (W_{\text{вес}} \cdot \rho_{\text{вес}} - \beta \cdot W_T \cdot \rho_d), \quad (4.6)$$

$$q_{i_{\text{вг}}}^y = q_{i_{\text{вг}}}^{\text{пч}} \cdot \frac{2 \cdot l}{b}, \quad (4.7)$$

де  $h_i$  – товщина шару ґрунту, в якому розтає лід за одну добу в активній зоні земляного полотна, м (4.1);

$W_{\text{вес}}$  – розрахункова весняна вологість ґрунту земляного полотна, в частках одиниці;

$\rho_{\text{вес}}$  – щільність ґрунту при розрахунковій вологості, г/см<sup>3</sup>;



$\beta$  – коефіцієнт, що показує, яка кількість води утримується в порах ґрунту, ущільненого до потрібної щільності, в долях від вологості при межі текучості ґрунту: для супісків приймається рівним 0,7, для суглинків і глинистих ґрунтів – 0,75;

$W_T$  – вологість на межі текучості ґрунту, в частках одиниці;

$\rho_d$  – щільність сухого ґрунту, г/см<sup>3</sup>;

$l$  – ширина узбіччя, м;

$b$  – ширина проїзної частини, м.

Питомий надлишок води, що надходить в дренавальний шар при відтаванні ґрунту, м<sup>3</sup>/доба на 1 м<sup>2</sup>:

$$q_{i \text{ вг}} = \frac{q_{i \text{ вг}}^{\text{пч}} \cdot b + q_{i \text{ вг}}^y \cdot l}{b + l}. \quad (4.8)$$

## 4.2 Визначення притоку вологи від атмосферних опадів

Надходження вологи від опадів слід встановлювати для кожного з трьох періодів окремо: осіннього ( $T_o$ ), весняного ( $T_v$ ) та літнього ( $T_l$ ), тривалість та межі яких визначають відповідно згідно вище розглянутих рекомендацій.

Визначають можливу сумарну тривалість опадів 5 % забезпеченості за статистичними метеорологічними даними за всі  $N_{\text{років}}$ , що прийняті до розрахунку.

Кількість дощів 5 % забезпеченості:

$$m = \frac{m_{\text{ср}}}{T_{\text{д(ср)}}} \cdot T_{\text{д}}, \quad (4.9)$$

де  $m_{\text{ср}}$  – середня кількість дощів за  $N_{\text{років}}$  років;

$T_{\text{д(ср)}}$  – середня сумарна тривалість опадів, хв;

$T_{\text{д}}$  – можлива сумарна тривалість опадів 5 % забезпеченості, хв.

Величину дефіциту вологості повітря визначають за середньорічними даними не менше ніж п'яти річного періоду [22, 96] розрахунку приймають величину 5 % забезпеченості ( $d$ , мбар).

Середню інтенсивність дощу визначають за формулою, мм/хв:

$$i_d = \frac{H_{d(ср)}}{T_{d(ср)}}, \quad (4.10)$$

де  $H_{d(ср)}$  – середньомісячна кількість опадів, мм.

Величину змочування поверхні покриття, мм визначають за формулою:

$$H_{зм(п)} = a_{зм} \cdot m \cdot \sqrt[3]{d \cdot \frac{T' - T_d}{m}}, \quad (4.11)$$

$$H_{зм(п)} \leq \max H_{зм(п)} = \max h_{зм} \cdot m,$$

де  $T'$  – тривалість розрахункового періоду, хв;

$a_{зм}$ ,  $\max h_{зм}$  – показники змочування поверхні проїзної частини і узбіч, мм [22].

При  $H_{зм(n)} \geq i_d \cdot T_d$  всі опади ідуть на змочування, проникнення відсутнє. При  $H_{зм(n)} < i_d \cdot T_d$  відбувається проникнення опадів у покриття.

Середня тривалість проникання вологи в покриття за один дощ, хв:

$$t_{вп(п)} = \frac{i_d \cdot T_d - H_{зм(п)}}{i_d \cdot m}. \quad (4.12)$$

Кількість води, що проникає в покриття, мм:

$$H_{вп(п)} = 0,013 \cdot m \cdot \ln(1 + a_0 \cdot i_d) \cdot 10^{0,4 \ln t_{вп(п)}}, \quad (4.13)$$

де  $a_0$  – параметр, що становить 120 для літнього, 100 – для весняного і 80 – осіннього періодів.

Інтенсивність стоку з покриття визначають за формулою мм/хв:

$$i_{\text{ст(п)}} = i_{\text{д}} - \frac{H_{\text{вп(п)}}}{mt_{\text{вп(п)}}}. \quad (4.14)$$

Інтенсивність надходження води на узбіччя з урахуванням стоку з проїзної частини, мм/хв:

$$i_{\text{пв}} = i_{\text{д}} + i_{\text{ст(п)}} \cdot \frac{a}{l}, \quad (4.15)$$

де  $a$  – ширина односкатної або половини двоскатної проїзної частини у бік нахилу, м;

$l$  – довжина узбіччя в бік ухилу, м.

Величина змочування поверхні узбіч, мм, визначається як:

$$H_{\text{зм}} = a_{\text{зм}} \cdot m \cdot \sqrt[3]{d \cdot \frac{T' - T_{\text{д}}}{m}}, \quad (4.16)$$

$$H_{\text{зм}} \leq \max H_{\text{зм}} = \max h_{\text{зм}} \cdot m,$$

де  $a_{\text{зм}}$ ,  $\max h_{\text{зм}}$  – показники змочування поверхні проїзної частини і узбіч, мм.

При  $H_{\text{зм}} \geq i_{\text{пв}} \cdot T_{\text{д}}$  вся вода, яка потрапляє на узбіччя, іде на змочування, проникнення відсутнє. При  $H_{\text{зм}} < i_{\text{пв}} \cdot T_{\text{д}}$  відбувається проникнення води у ґрунтові узбіччя.

Коефіцієнт проникнення в ґрунт земляного полотна:

$$C = 6000 \cdot \frac{\sqrt[3]{K}}{W_T^2} \left( 1 - \sqrt{\frac{W_{\text{опт}}}{W_{\text{вп}}}} \right) + 30 \cdot K, \quad (4.17)$$

де  $K$  – коефіцієнт фільтрації ґрунту;

$W_T$  – вологість на межі текучості ґрунту, %;

$W_{\text{опт}}$  – оптимальна вологість ґрунту, %;

$W_{\text{вп}}$  – повна вологоємність ґрунту, %.

Повну вологоємність ґрунту, % розраховують за формулою:

$$W_{\text{вп}} = \frac{n \cdot \rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{с}}} \cdot 100, \quad (4.18)$$

де  $n$  – пористість ґрунту;

$\rho_{\text{в}}$  – щільність води, г/см<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{с}}$  – щільність твердих частинок ґрунту, г/см<sup>3</sup>.

Величини  $K$ ,  $W_T$ ,  $W_{\text{опт}}$ ,  $\rho_{\text{с}}$  визначаються експериментально.

Визначення інтенсивності проникнення води в узбіччя виконують за такими формулами, мм/хв:

$$(i_{\text{пв}} \leq 0,02 \cdot C), \quad i_{\text{вп}} = i_{\text{пв}}, \quad (4.19)$$

$$(i_{\text{пв}} > 0,02 \cdot C), \quad i_{\text{вп}} = C \cdot \left( 0,02 + 10^{0,02 + 0,68 \cdot \lg \frac{i_{\text{пв}} - i_{\text{вп}}}{\varphi(l)}} \right),$$

де  $\varphi(l)$  – функція уклону поверхні.

$$i_{\text{ст}} = i_{\text{пв}} - i_{\text{вп}}. \quad (4.20)$$

Інтенсивність проникнення визначається методом підбору.

Кількість води, що просочується в узбіччя, мм:

$$H_{\text{вп}(y)} = A_{\text{укр}} \cdot i_{\text{вп}} \cdot \left[ T_{\text{д}} - \left( \frac{H_{\text{зм}(\Pi)}}{i_{\text{д}}} - \frac{H_{\text{зм}} - H_{\text{зм}(\Pi)}}{i_{\text{пв}}} \right) \right], \quad (4.21)$$

де  $A_{\text{укр}}$  – коефіцієнт, який враховує тип укріплення узбіч.

Інтенсивність випаровування води з узбіч при вологості ґрунту, більшій за оптимальну, мм/хв:

$$i_y = 25 \cdot 10^{-5} \cdot (E - e) \cdot \lg \left( 1 + \frac{80}{d} \right) \cdot (1 + 0,15 \cdot v), \quad (4.22)$$

де  $E$  – тиск насиченої водяної пари на межі з поверхнею випаровування, мбар;

$e$  – тиск водяного пару, мбар;

$d$  – дефіцит вологості повітря, мбар;

$v$  – швидкість вітру, м/с.

У перший весняний місяць різниця між температурами повітря і поверхні ґрунту незначна. Тому, в цей період слід розраховувати випаровування за спрощеною формулою, приймаючи за значення  $E$  тиск насиченої водяної пари при певній температурі повітря. Для літнього та осіннього періоду тиск насиченої водяної пари на межі з випаровуючою поверхнею  $E$  визначають за емпіричною залежністю тиску насиченої водяної пари від температури:

$$E = E_0 \cdot 10^{\frac{7.43}{23.5+t}}, \quad (4.23)$$

де  $E_0$  – тиск насиченої водяної пари при температурі  $0^\circ\text{C}$  ( $E_0 = 6,1$  мбар,  $t$  – температура поверхні ґрунту,  $^\circ\text{C}$ ).

Кількість води, що випаровується з узбіч за розрахунковий період (в мм), визначають з рівняння:

$$H_y = B_{\text{укр}} \cdot i_y \cdot (T' - T_d), \quad (4.24)$$

де  $B_{\text{укр}}$  – коефіцієнт, який враховує вплив типу укріплення узбіч на процес випаровування.

Питомий надлишок води, що надходить в основу від атмосферних опадів, визначається за залежностями,  $\text{м}^3/\text{добу}$  на  $1 \text{ м}^2$ :

а) через покриття:

$$q_{\text{інф}}^{\text{пч}} = \frac{H_{\text{вп(п)}}}{1000 \cdot T''}, \quad (4.25)$$

б) через узбіччя:

$$q_{\text{інф}}^y = \frac{(H_{\text{вп(у)}} - H_y)}{1000 \cdot T''}, \quad (4.26)$$

де  $T''$  – тривалість розрахункового періоду, доба.

Величину надходження вологи через неукріплену розділювальну смугу  $q_{\text{інф}}^{\text{pc}}$  без водоприймачів розраховують аналогічно до узбіч з урахуванням напрямку стоку з проїзної частини та похилу, і висотної відмітки розташування розділювальної смуги по відношенню до проїзної частини.

Питомий надлишок інфільтраційної вологи від атмосферних опадів, що потрапляє через узбіччя, покриття проїзної частини, розділювальну смугу, визначається за залежністю,  $\text{м}^3/\text{добу}$  на  $1 \text{ м}^2$ :

$$q_{\text{інф}}^{\text{сер}} = \frac{q_{\text{інф}}^{\text{пч}} \cdot a + q_{\text{інф}}^{\text{у}} \cdot l + q_{\text{інф}}^{\text{pc}} \cdot b}{a + b + l}, \quad (4.27)$$

де  $a$  – ширина односкатної або половини двоскатної проїзної частини, м;

$l$  – ширина узбіччя, м;

$b$  – ширина розділювальної смуги.

Для визначення пікових навантажень до розрахунків приймають зливи (тривалість  $T_z$  менше ніж 5 годин, інтенсивність  $H_z$  від 10 мм/год до 20 мм/год) та зливи дощі (тривалість  $T_{\text{зд}}$ , більше 5 годин до 5 діб, інтенсивність  $H_{\text{зд}}$  від 2 мм/год до 10 мм/год).

Етапи розрахунків наступні:

- за даними статистичних метеорологічних спостережень слід визначити величину дефіциту вологості повітря 5 % забезпеченості ( $d$ , мбар).
- за даними статистичних метеорологічних спостережень слід визначити для зливових дощів (тривалістю понад добу)  $i_{\text{зд}5}$  – інтенсивність зливових дощів 5 % забезпеченості, мм/хв.

Для визначення інтенсивності опадів слід за даними метеорологічних спостережень приймати тривалість опадів певного терміну спостережень  $T_{\text{зді}}$ , хв та загальну кількість опадів одного дощу того ж терміну спостережень  $H_{\text{зді}}$ , мм. Інтенсивність цього дощу  $i_{\text{зді}}$  слід визначати за залежністю:

$$i_{зді} = \frac{T_{зді}}{H_{зді}}. \quad (4.28)$$

Для отриманих значень  $i_{зді}$  слід визначити значення  $i_{зд5}$  – інтенсивність зливових опадів 5% забезпеченості, мм/хв. При подальших розрахунках для таких видів опадів за розрахункову тривалість дощу слід приймати одну добу ( $T_{зд} = 1140$  хв).

За даними статистичних метеорологічних спостережень визначають для злив (короткочасні дощі, тривалість менше ніж 5 годин) – інтенсивність  $i_{з5}$ , мм/хв.

Загальну кількість опадів за одну зливу  $H_з$  з повторюваністю раз на  $N$  років слід визначати за формулою:

$$H_з = 0,046 \cdot \sqrt[3]{\bar{H}^2 \cdot N}, \quad (4.29)$$

де  $\bar{H}$  – річна норма опадів для даної місцевості (за даними метеорологічних статистичних спостережень),

$N$  – кількість років, протягом яких  $H_з$  повторюється один раз.

Тривалість  $T_з$  злив 5 % забезпеченості визначиться із залежності, хв:

$$T_з = \frac{H_з}{i_з}. \quad (4.30)$$

Подальші розрахунки слід виконувати за одним алгоритмом, із врахуванням, що  $T_д$  – розрахункова тривалість дощу (для зливи –  $T_з$ , для зливого дощу –  $T_{зд}$ ),  $i_д$  – розрахункова інтенсивність дощу (для зливи –  $i_{з5}$ , для зливого дощу –  $i_{зд5}$ ).

Величина змочування поверхні покриття  $h_{зм}$  (у мм) слід приймати рівною максимальній величині змочування  $max h_{зм}$ .

Середня тривалість проникання вологи в покриття за один дощ, хв:

$$t_{\text{вп}(\Pi)} = \frac{i_{\text{д}} \cdot T_{\text{д}} - h_{\text{зм}(\Pi)}}{i_{\text{д}}}. \quad (4.31)$$

Кількість води, що проникає в покриття, мм:

$$h_{\text{вп}(\Pi)} = 0,013 \cdot \ln(1 + a_0 \cdot i_{\text{д}}) \cdot 10^{0,4 \ln t_{\text{вп}(\Pi)}}, \quad (4.32)$$

де  $a_0$  – параметр, що становить 120 для літнього, 100 – для весняного і 80 – осіннього періодів.

Інтенсивність стоку з покриття, мм/хв:

$$i_{\text{ст}(\Pi)} = i_{\text{д}} - \frac{h_{\text{вп}(\Pi)}}{t_{\text{вп}(\Pi)}}. \quad (4.33)$$

Наступні розрахунки виконують формулами у послідовності за (4.16) – (4.21).

Кількість води, що випаровується з узбіч за розрахунковий період, визначають з рівняння, мм:

$$h_u = B_{\text{укр}} \cdot i_u \cdot T_{\text{д}}, \quad (4.34)$$

де  $B_{\text{укр}}$  – коефіцієнт, який враховує вплив типу укріплення узбіч на процес випаровування.

Питомий надлишок води, що надходить в основу від атмосферних опадів визначають за залежностями, м<sup>3</sup>/добу на 1 м<sup>2</sup>:

а) через покриття:

$$q_{\text{інф}}^{\text{пч}} = \frac{H_{\text{вп}(\Pi)}}{1000}, \quad (4.35)$$

б) через узбіччя:

$$q_{\text{інф}}^y = \frac{(H_{\text{вп}(y)} - H_y)}{1000}. \quad (4.36)$$



Величину надходження вологи через неукріплену розділювальну смугу  $q_{\text{інф}}^{\text{pc}}$  без водоприймачів розраховують аналогічно до узбіч з урахуванням напрямку стоку з проїзної частини та похилу і висотної відмітки розташування розділювальної смуги по відношенню до проїзної частини.

Питомий надлишок інфільтраційної вологи від атмосферних опадів, що потрапляє через узбіччя, покриття проїзної частини, розділювальну смугу,  $\text{м}^3/\text{добу}$  на  $1 \text{ м}^2$  для пікових навантажень на дренажну систему  $q_{\text{інф}}^{\text{пik}}$  розраховують за формулою (4.27) із використанням значень  $q_{\text{інф}}^{\text{пч}}$ ,  $q_{\text{інф}}^{\text{у}}$ ,  $q_{\text{інф}}^{\text{pc}}$ .

### 4.3 Визначення розрахункового значення питомого надлишку води

Загальний питомий надлишок вологи ( $q_{\text{заг}}$ ,  $\text{м}^3/\text{добу}$  на  $1 \text{ м}^2$  основи) розраховують по періодам за наступними залежностями:

Весняний розрахунковий період визначаються як

$$q_{\text{заг}} = q_{\text{інф}} + q_{\text{ег}}. \quad (4.37)$$

Розрахунки за формулою (4.37) слід виконувати для кожного дня розрахункового весняного періоду окремо по роках.

Літній та осінній розрахунковий періоди:

$$q_{\text{заг}} = q_{\text{інф}}, \quad (4.38)$$

де розрахунки за формулою (4.38) слід виконувати для кожного періоду окремо по роках.

Загальний питомий надлишок води для визначення його розрахункового значення приймають за максимальним значенням  $q_{\text{заг}}$ ,  $\text{м}^3/\text{добу}$  на  $1 \text{ м}^2$  із результатів, розрахованих за формулами (4.37) та (4.38) за період вибраної кількості років  $N_{\text{років}}$ :

$$Q_{\text{заг}} = q_{\text{заг}}^{\text{max}}. \quad (4.39)$$

Розрахункове значення питомого надлишку води, що надходить в дренажну конструкцію, визначають за залежністю:

$$Q_p = Q_{\text{заг}} \cdot K_{\text{п}} \cdot K_{\text{г}}, \quad (4.40)$$

де  $K_{\text{п}}$  – коефіцієнт, що враховує неусталений режим припливу води через нерівномірне розтавання та випадання атмосферних опадів;

$K_{\text{г}}$  – коефіцієнт гідрологічного запасу, що враховує пониження фільтруючої спроможності дренуючого шару в процесі експлуатації дороги.

У результаті реалізації запропонованого методу розроблено розрахунково-аналітичну систему, для проведення розрахунків на реальному об'єкті автомобільної дороги I категорії в Полтавській області. Як приклад, в таблицях 4.2 – 4.5 наведено розрахунок режиму інфільтрації опадів та надходження вологи від критичних дощів, який вперше запропоновано при визначенні розрахункових періодів водно-теплогового режиму при розрахунках дренажних конструкцій.

Таблиця 4.2 – Дати початку розрахункових періодів

| Початок<br>весняного<br>розрахункового<br>періоду | Початок<br>осіннього<br>розрахункового<br>періоду | Початок зимового<br>розрахункового<br>періоду | Період<br>замерзання,<br>доба | Початок літнього<br>розрахункового<br>періоду |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
| 27.02.2014                                        | 30.10.2014                                        | 11.01.2015                                    | 46                            | 07.03.2014                                    |
| 05.03.2013                                        | 01.11.2013                                        | 28.01.2014                                    | 30                            | 30.03.2013                                    |
| 15.03.2012                                        | 03.11.2012                                        | 12.01.2013                                    | 52                            | 12.04.2012                                    |
| 17.03.2011                                        | 03.11.2011                                        | 23.01.2012                                    | 52                            | 13.04.2011                                    |
| 14.03.2010                                        | 09.11.2010                                        | 18.01.2011                                    | 58                            | 10.04.2010                                    |

Таблиця 4.3 – Кліматичні характеристики для розрахунку режиму опадів

| Ч.ч. | Рік  | $m_{cp}$                | $T_d$ , хв.                    | $S$ , мм                                                                                        | $t_r$                       | $f$                        | $d$ , мбар                |
|------|------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------|
|      |      | Середня кількість дощів | Сумарна тривалість опадів, хв. | Сумарна кількість опадів за період зміни середньодобової температури повітря від +10 °С до 0 °С | Температура поверхні ґрунту | Відносна вологість повітря | Дефіцит вологості повітря |
| 1    | 2014 | 6                       | 9360                           | 1,8                                                                                             | 3,6                         | 0,28                       | 2,280886983               |
| 2    | 2013 | 14                      | 23040                          | 63,0                                                                                            | 0,6                         | 0,38                       | 0,766250408               |
| 3    | 2012 | 8                       | 11160                          | 12,0                                                                                            | 3,7                         | 0,38                       | 0,754601511               |
| 4    | 2011 | 7                       | 8280                           | 8,4                                                                                             | 3,1                         | 0,33                       | 1,519674757               |
| 5    | 2010 | 8                       | 14040                          | 21,0                                                                                            | 4,7                         | 0,32                       | 1,666758187               |

Таблиця 4.4 - Визначення притоку води від атмосферних опадів – пікове значення за період

| Параметр  | Визначення                                                          | Одиниці виміру |             |      |      |      |      |
|-----------|---------------------------------------------------------------------|----------------|-------------|------|------|------|------|
|           |                                                                     |                | 2010        | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
| $T_d$     | сумарна тривалість опадів 5% забезпеченості                         | хв             | 30944,71888 |      |      |      |      |
| $m_{cp}$  | середня кількість дощів                                             |                | 8,6         |      |      |      |      |
| $T_d(cp)$ | середня сумарна тривалість опадів                                   | хв             | 13176       |      |      |      |      |
| $m$       | кількість дощів 5% забезпеченості                                   |                | 20,19767626 |      |      |      |      |
| $d$       | дефіцит вологості повітря 5% забезпеченості                         | мбар           | 0,021445067 |      |      |      |      |
| $H_d(cp)$ | середньомісячна кількість опадів                                    | мм             | 26          |      |      |      |      |
| $H'$      | річна норма опадів для даної місцевості                             | мм             | 650         |      |      |      |      |
| $N$       | кількість років, протягом яких $H_z$ повторюється один раз          |                | 20          |      |      |      |      |
| $H_z$     |                                                                     | мм             | 9,369363059 |      |      |      |      |
| $H_p$     | максимальна кількість опадів критичного дощу розрахункового періоду | мм             | 24          | 44   | 38   | 41   | 32   |

Продовження табл. 4.4

| Параметр                 | Визначення                                                               | Одиниці виміру |                             |                   |               |                  |                  |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------------|-------------------|---------------|------------------|------------------|
|                          |                                                                          |                | 2010                        | 2011              | 2012          | 2013             | 2014             |
| <i>t<sub>спос</sub></i>  | тривалість критичного дощу розрахункового періоду з кількістю опадів Нр  | годин          | 12                          | 12                | 12            | 12               | 12               |
| <i>i<sub>з</sub></i>     | максимальна кількість опадів за годину                                   | мм/год         | 2                           | 3,66666<br>67     | 3,16666<br>67 | 3,41666<br>7     | 2,6666<br>67     |
| <i>T'з</i>               | тривалість розрахункового періоду                                        | хв             | 4,68<br>4681<br>5           | 2,55528<br>08     | 2,95874<br>62 | 2,74225<br>3     | 3,5135<br>11     |
| <b>Покриття</b>          |                                                                          |                | асфальтобетонне             |                   |               |                  |                  |
| <i>асм покр</i>          | показники змочування поверхні проїзної частини і узбіч, мм               |                | 0,01                        |                   |               |                  |                  |
| <i>тах hсм покр</i>      | показники змочування поверхні проїзної частини і узбіч, мм               |                | 0,5                         |                   |               |                  |                  |
| <i>H<sub>см(п)</sub></i> | величина змочування поверхні покриття (в мм)                             |                | 0,5                         | 0,5               | 0,5           | 0,5              | 0,5              |
| <b>Узбіччя</b>           |                                                                          |                | з густим трав'яним покривом |                   |               |                  |                  |
| <i>асм узб</i>           | показники змочування поверхні проїзної частини і узбіч, мм               |                | 0,15                        |                   |               |                  |                  |
| <i>тах hсм узб</i>       | показники змочування поверхні проїзної частини і узбіч, мм               |                | 4                           |                   |               |                  |                  |
| <i>H<sub>см(о)</sub></i> | величина змочування поверхні узбіччя (в мм)                              |                | -<br>9,7<br>030<br>5        | -<br>9,70327<br>2 | -<br>9,70323  | -<br>9,7032<br>5 | -<br>9,7031<br>7 |
| <i>l</i>                 | довжина узбіччя в бік нахилу                                             | м              | 3,9                         |                   |               |                  |                  |
| <i>b</i>                 | ширина розділювальної смуги                                              | м              | 4                           |                   |               |                  |                  |
| <i>a</i>                 | ширина односкатної або половини двоскатної проїзної частини у бік нахилу | м              | 7,5                         |                   |               |                  |                  |

Продовження табл. 4.4

| Параметр            | Визначення                                                                             | Одиниці виміру |                                                        |      |      |      |      |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------|------|------|------|------|
|                     |                                                                                        |                | 2010                                                   | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
| $K$                 | коефіцієнт фільтрації ґрунту                                                           | м/добу         | 0,04                                                   |      |      |      |      |
| $W_{\text{опт}}$    | оптимальна вологість ґрунту                                                            | %              | 0,15                                                   |      |      |      |      |
| $W_{\text{вп}}$     | повна вологоємність ґрунту                                                             | долі одиниці   | 0,210146013                                            |      |      |      |      |
| $W_T$               | вологість на межі текучості ґрунту                                                     | долі одиниці   | 0,21                                                   |      |      |      |      |
| $C$                 | коефіцієнт проникнення в ґрунт земляного полотна                                       |                | 1,921863018                                            |      |      |      |      |
| $I$                 | похил поверхні                                                                         | %              | 100                                                    |      |      |      |      |
| $\varphi(l)$        | функція похилу поверхні                                                                |                | 3,98                                                   |      |      |      |      |
| <b>Узбіччя</b>      | Характеристика узбіччя                                                                 |                | Укріплені щебенем при щільності 1920 кг/м <sup>3</sup> |      |      |      |      |
| $A_{\text{укр}}$    | коефіцієнт, який враховує тип укріплення узбіч                                         |                | 0,8                                                    |      |      |      |      |
| $B_{\text{укр}}$    | коефіцієнт, який враховує вплив типу укріплення узбіч на процес випаровування          |                | 0,5                                                    |      |      |      |      |
| $V$                 | швидкість вітру                                                                        | м/с            | 3                                                      |      |      |      |      |
| $T''$               | тривалість розрахункового періоду                                                      | доба           | 1                                                      |      |      |      |      |
| $a_{\text{оліто}}$  | параметр, що становить 120 для літнього, 100 – для весняного і 80 – осіннього періодів |                | 120                                                    |      |      |      |      |
| $a_{\text{овесна}}$ | параметр, що становить 120 для літнього, 100 – для весняного і 80 – осіннього періодів |                | 100                                                    |      |      |      |      |
| $a_{\text{осінь}}$  | параметр, що становить 120 для літнього, 100 – для весняного і 80 – осіннього періодів |                | 80                                                     |      |      |      |      |

Кінець табл. 4.4

| Параметр                   | Визначення                                                                    | Одиниці виміру |                             |      |      |      |      |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------------|------|------|------|------|
|                            |                                                                               |                | 2010                        | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
| <b>Розділювальна смуга</b> |                                                                               |                | з густим трав'яним покривом |      |      |      |      |
| <i>асм розд см</i>         | показники змочування поверхні проїзної частини і узбіч, мм                    |                | 0,15                        |      |      |      |      |
| <i>тах нсм розд см</i>     | показники змочування поверхні проїзної частини і узбіч, мм                    |                | 4                           |      |      |      |      |
| <i>H<sub>см(рсм)</sub></i> | величина змочування поверхні узбіччя, мм                                      |                | 4                           | 4    | 4    | 4    | 4    |
|                            | характеристика розділювальної смуги                                           |                | Неукріплене (грунтове)      |      |      |      |      |
| <i>Аукр</i>                | коефіцієнт, який враховує тип укріплення узбіч                                |                | 1                           |      |      |      |      |
| <i>Вукр</i>                | коефіцієнт, який враховує вплив типу укріплення узбіч на процес випаровування |                | 1                           |      |      |      |      |

Таблиця 4.5 - Результати обчислень

| Параметр                 | Визначення                                                                           | Одиниці виміру |                    |           |           |          |          |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------|-----------|-----------|----------|----------|
|                          |                                                                                      |                | 2010               | 2011      | 2012      | 2013     | 2014     |
| <i>i<sub>д</sub></i>     | Середня інтенсивність дощу                                                           | мм/хв          | 0,001973285        |           |           |          |          |
| <i>Q 5%</i>              | Розрахунковий питомий надлишок води 5% забезпеченості                                | л/добу         | <b>24,10495373</b> |           |           |          |          |
| <i>t<sub>ен(п)</sub></i> | Середня тривалість проникнення води в покриття за один дощ                           | хв             | 4,4346815          | 2,4189172 | 2,8008515 | 2,595911 | 3,326011 |
| <i>H<sub>ен(у)</sub></i> | Кількість води, що просочується в узбіччя                                            | мм             | 2,6979068          | 2,2284579 | 2,3342262 | 2,278815 | 2,464368 |
| <i>i<sub>у</sub></i>     | Інтенсивність випаровування води з узбіч при вологості ґрунту, більшій за оптимальну | мм/хв          | 2,77672E-05        |           |           |          |          |

Кінець табл. 4.5

| Параметр      | Визначення                                                                                                                                 | Одиниці виміру                           |           |           |           |          |          |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
|               |                                                                                                                                            |                                          | 2010      | 2011      | 2012      | 2013     | 2014     |
| $H_{вп(рсм)}$ | Кількість води, що просочується в розділювальну смугу                                                                                      | мм                                       | 39347,142 | 59277,804 | 53680,256 | 56511,9  | 47790,5  |
| $q_{пч/інф}$  | Питомий надлишок води, що надходить в основу від атмосферних опадів через покриття                                                         | м <sup>3</sup> /добу на 1 м <sup>2</sup> | 0,0002811 | 0,0001786 | 0,0001995 | 0,000188 | 0,000227 |
| $q_{у/інф}$   | Питомий надлишок води, що надходить в основу від атмосферних опадів через узбіччя                                                          | м <sup>3</sup> /добу на 1 м <sup>2</sup> | 0,0026978 | 0,0022284 | 0,0023342 | 0,002279 | 0,002464 |
| $q_{рсм/інф}$ | Питомий надлишок води, що надходить в основу від атмосферних опадів через роздільну смугу                                                  | м <sup>3</sup> /добу на 1 м <sup>2</sup> | 39,347142 | 59,277804 | 53,680256 | 56,5119  | 47,7905  |
| $q_{сер/інф}$ | Питомий надлишок інфільтраційної вологи від атмосферних опадів, що потрапляє через узбіччя, покриття проїзної частини, розділювальну смугу | м <sup>3</sup> /добу на 1 м <sup>2</sup> | 10,220857 | 15,397483 | 13,943612 | 14,67908 | 12,41385 |

#### 4.4 Розроблення методології врахування кліматичних змін при визначенні глибини промерзання дорожніх конструкцій

Ідеологія дослідження ґрунтується на використанні типових конструкцій дорожніх одягів, згідно нормативного документу «Альбом типових конструкцій дорожніх одягів нежорсткого типу під розрахункові навантаження А1, А2, Б», для розроблення дорожньо-кліматичних карт щодо розрахункової глибини промерзання ґрунту дорожньої конструкції території України. Це дасть можливість значно скоротити обсяги робіт з метою удосконалення проектних рішень щодо пошуку, збору та статистичної обробки вихідних метеорологічних даних району будівництва або реконструкції автомобільної дороги.

Розрахунок величини промерзання дорожньої конструкції розпочинається зі збору необхідних даних, визначення кліматичних та геологічних показників.

Врахування кліматичних характеристик на теперішній час виконується розрахунок глибини промерзання з використанням однієї кліматичної карти 80-х років минулого століття. Перевірка на морозостійкість дорожньої конструкції проводиться згідно вимог [78].

Виникає необхідність вдосконалити методологію проектних розрахунків відповідно до сучасних вимог та змін кліматичних умов [97]. Для вирішення поставлених задач проводився збір та обробка статистичних метеорологічних даних Центральної геофізичної обсерваторії України за десять років (2007-2016 роки).

Тривалість періоду промерзання ґрунту земляного полотна  $T_z$  розраховують за статистичними кліматичними даними для району будівництва і приймають кількість діб з моменту настання восени середньодобових температур повітря нижче  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до настання весною періоду зі стійкою температурою вище  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  [90].

Ґрунтуючись на [22] визначення глибини промерзання здійснюється за наведеним нижче наступним підходом [91, 92].

Загальну глибину промерзання дорожньої конструкції  $z_{\text{пр}}$ , см, при наявності результатів багаторічних спостережень визначають за формулою (4.4).

При розрахунку глибини промерзання ґрунтових узбіч або розділювальної смуги слід застосовувати формулу (4.4) із заміною  $R_0$  на відношення  $\frac{h_c}{\lambda_c}$ .

Коефіцієнт теплопровідності ґрунту  $\lambda_{\text{гр}}$  приймають за даними експериментальних досліджень приймаючи вологість ґрунту  $W$  – середню за розрахунковий період.

Коефіцієнт теплопровідності снігу  $\lambda_c$  визначають за емпіричною залежністю:

$$\lambda_c = 0,017 + 0,774 \cdot \rho_c, \quad (4.41)$$

де  $\rho_c$  – щільність снігу,  $\text{г/см}^3$ .



Розрахунки за наведеною методикою виконуються із використанням статистичних даних метеорологічної служби. Дані усереднюються або вибираються екстремальні залежно від мети розрахунку.

З використанням формул (4.2, 4.3, 4.5 та 4.41) згідно статистичних метеорологічних даних за останні десять років спостережень для території України, були отримані розрахункові показники глибини промерзання земляного полотна та дорожньої конструкції в цілому. Наприклад, для станції Чернігів отримані такі розрахункові величини, що наведені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 - Глибини промерзання дорожньої конструкції категорії Ia

|                        | Рік   |       |      |      |       |       |       |       |       |      |
|------------------------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|                        | 2006  | 2007  | 2008 | 2009 | 2010  | 2011  | 2012  | 2013  | 2014  | 2015 |
| Глибина промерзання, м | 0,862 | 0,401 | 0    | 0    | 0,938 | 0,734 | 0,881 | 0,499 | 0,543 | 0    |

Отримане критичне значення глибини промерзання 5 % забезпеченості становить  $z_{пр} = 1,039$  м.

Для прогнозування вологонакопичення в дорожній конструкції, підбору параметрів дренажних конструкцій мілкового закладання були побудовані карти розподілу глибини промерзання для автомобільних доріг різних категорій по території України. Карти будувалися з використанням програми Surfer 13 [93, 94]. Програма має широкий набір методів інтерполяції дискретних функцій та можливість налаштування потрібних додаткових параметрів. Використовувався метод радіальних базисних функцій (Radial Basis Functions), – згідно якого поверхня будується по всім опорним точкам, що були введені [94].

В якості прикладу на рисунках 4.1,4.2,4.3 наведено побудовані дорожньо-кліматичні карти України для I – IV-ої категорій автомобільних доріг загального користування.

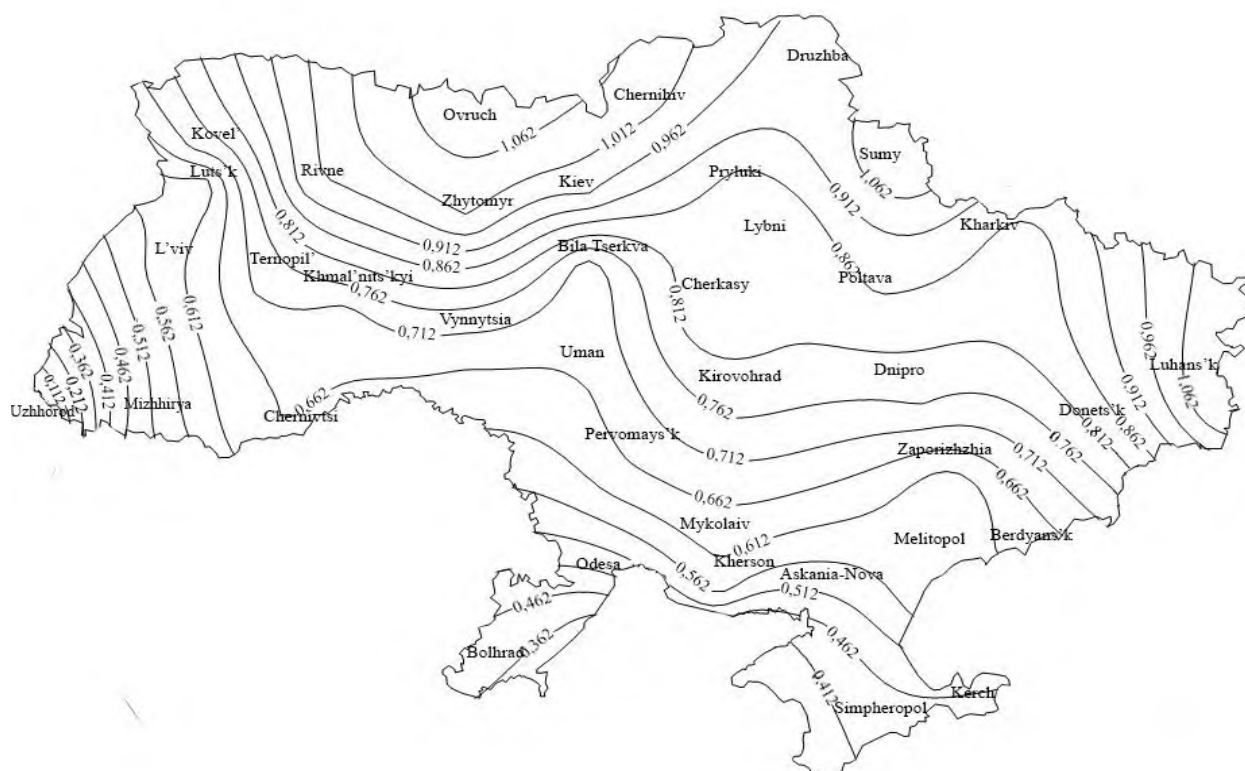


Рисунок 4.1 – Глибина промерзання дорожньої конструкції в межах проїзної частини (м) для дороги категорії Ia

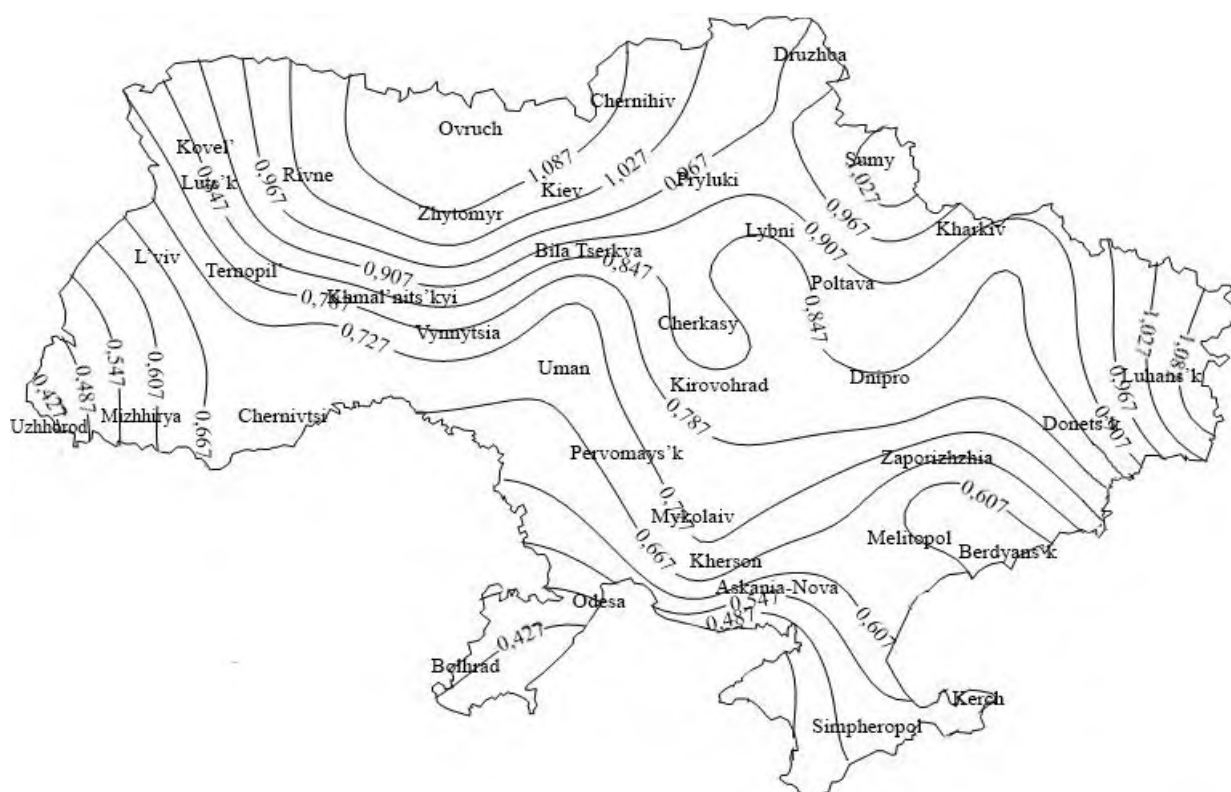


Рисунок 4.2 – Глибина промерзання дорожньої конструкції в межах проїзної частини (м) для дороги категорії III

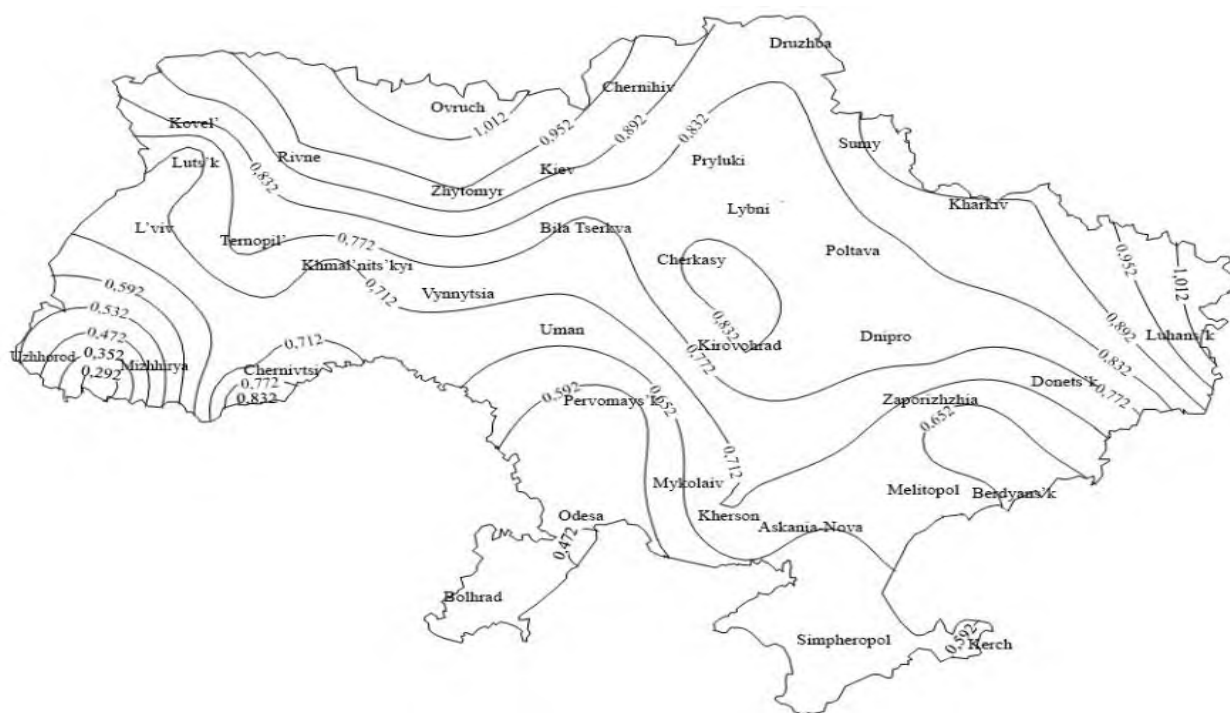


Рисунок 4.3 – Глибина промерзання ґрунту (м) для узбіччя

Показник глибини промерзання визначався для типових конструкцій дорожніх одягів нежорсткого типу, регламентованих нормативним документом [22].

Ефективність застосування запропонованої методології представлена на схемі прийняття проектних рішень щодо підбору параметрів споруд для регулювання водно-теплого режиму (рис. 4.4). Розглядається два підходи: перший містить чотири додаткових етапи виконання проектних розрахунків, спираючись на існуючу нормативну базу, вимагає оновлення застарілих довідкових даних кліматичних характеристик по регіонах України; другий – скорочений, дозволяє враховувати типові та нетипові проектні рішення щодо конструкції дорожнього одягу та оновлені кліматичні показники району будівництва.

Запропонований оновлений метод (права частина схеми на рис. 4.4) дає можливість виключити етапи збору вихідних даних про кліматичні умови району будівництва за багаторічний період спостережень (температура повітря, ґрунту, швидкість вітру та висоту снігового покриву) та статистичної обробки цих даних для виконання розрахунків за нормативною методикою. Всі ці елементи проектування можуть бути замінені на спрощене користування картами значень

розрахункової глибини промерзання дорожньої конструкції для різних категорій автомобільних доріг.



Рисунок 4.4 – Схема прийняття проектних рішень щодо підбору параметрів споруд для регулювання волого-теплового режиму

#### **4.5 Дорожньо-кліматичне районування для регулювання водно-теплогового режиму в транспортних спорудах**

Необхідність удосконалення дорожньо-кліматичного районування та розроблення рекомендацій із застосування кліматичних характеристик та кліматичного районування території України для дорожнього будівництва обумовлена тим, що ці питання розроблялися ще в 70-80 роках минулого століття з використанням даних про кліматичні умови всієї території колишнього СРСР. Глобальні зміни (потепління) клімату на планеті призвело до зміни кількості атмосферної вологи. Як наслідок елементи дорожньої конструкції піддаються посиленому впливу дії атмосферних опадів, що призводить до зміни водно-теплогового режиму (ВТР) всієї конструкції в цілому. Перезволоження дорожньої конструкції є основною причиною виникнення руйнувань та деформацій. Підходи до проектування споруд регулювання ВТР повинні змінюватися відповідно до інтенсивності зовнішніх впливів [95 - 100]. Проектування параметрів дренажних систем потребує оновлення, методологічного регулювання, врахування метеорологічної інформації та отримання баз даних спеціальних метеорологічних величин, які є розрахунковими при проектуванні елементів дорожньої конструкції. Проблеми впливу змін за останні роки кліматичних факторів на будівництво доріг на основі метеоданих Литовської гідрометеорологічної служби (LHS) були відображені в кліматичному районуванні території Литовської Республіки в роботах [101, 102]. Групування опадів за їх рівнем з застосуванням статистичних методів та на основі кластерного аналізу для помірного клімату Польщі представлено в роботі [103].

Важливу роль кластеризації, як зручного та точного методу, для сегментації та аналітики даних проаналізовано в роботі [104]. За алгоритмом кластерного аналізу, використовуючи різні набори вихідних просторових даних та можливості програмного забезпечення, побудована карта з обраними однорідними гідрологічними зонами [105].

На поточний момент часу діючим нормативним документом, в якому встановлені кліматичні параметри для проектування громадянських, промислових будинків та споруд, систем опалення, вентиляції, кондиціонування, водопостачання, при плануванні та забудові міських та сільських поселень є [106]. Наявні дані є недостатніми для дорожньо-кліматичного районування, оскільки надані тільки середні значення по кількості опадів для областей, не врахована глибина промерзання ґрунту, хоча є одним із найважливіших кліматичних показників.

Районування є комплексним процесом, оскільки враховує не тільки елементи клімату, гідрології та умови залягання ґрунтів. Дорожньо-кліматичне районування території України закріплено у [106] і диференціює норми проектування і будівництва транспортних споруд. Відповідно до ландшафтно-географічного зонування, ґрунтово-гідрологічними умовами та умовами зволоження, а також досвіду експлуатації доріг, територія України ділиться на чотири дорожньо-кліматичні зони: північна, центральна, південна та гірська. Слід відзначити, що існуюче дорожньо-кліматичне районування відображає лише загальну залежність проектування і будівництва доріг від клімату і більшості інших природних умов, і тому є схематичним. При проектуванні доріг необхідно не обмежуватися загальною характеристикою кліматичних умов, отриманих шляхом віднесення району прилягання траси до відповідної зони, а вивчати з достатньою докладністю кліматичні елементи за даними місцевих метеорологічних станцій [107 - 115].

З метою удосконалення нормативного забезпечення та формування баз даних метеорологічних характеристик при проектуванні споруд для регулювання ВТР дорожніх конструкцій було проаналізовано і узагальнено методи обробки метеорологічної інформації, існуючі метеорологічні дані, виконано аналіз та оцінку обсягів потрібної статистичної метеорологічної інформації. На основі проведеного аналізу виконано збір статистичної метеорологічної інформації за десять років по тридцяти восьми метеорологічних станціях України, проаналізовані отримані масиви метеорологічних даних. З використанням наявної



розрахунково-аналітичної системи здійснено статистичну обробку отриманих масивів метеорологічної інформації. У процесі розроблення методології застосування кліматичних характеристик для потреб будівництва були встановлені недоліки розрахунково-аналітичної системи, що застосовувалась для статистичної обробки метеорологічної інформації. Розрахунковий апарат було доведено до потрібного рівня та виконано поповнення інформаційної бази [116].

Дорожньо-кліматичне районування враховує не тільки природничо-кліматичні характеристики, а й особливості будівництва та експлуатації доріг. В основі дорожньо-кліматичного районування повинні бути покладені особливості розподілу тепла та вологи - волого-тепловий режим місцевості.

Базуючись на зібраних даних з метеорологічних станцій (Асканія-Нова, Бердянськ, Біла Церква, Болград, Вінниця, Дніпропетровськ, Донецьк, Дружба, Житомир, Запоріжжя, Керч, Київ, Кіровоград, Ковель, Лубни, Луганськ, Луцьк, Львів, Мелітополь, Миколаїв, Міжгір'я, Овруч, Одеса, Первомайськ, Полтава, Прилуки, Рівне, Сімферополь, Суми, Тернопіль, Ужгород, Умань, Харків, Херсон, Хмельницький, Черкаси, Чернівці, Чернігів) були опрацьовані кліматологічні характеристики опадів, снігового покриву та температури повітря, розраховані та сформовані таблиці даних про середні та екстремальні значення. Засобами розрахунково-аналітичної системи «ВТР» розроблені графіки ходу температур за десятирічний період та розраховані періоди волого-теплого режиму дорожньої конструкції. Фрагмент вікна програми наведений на рисунку 4.5.

| РІК<br>РОЗРАХУНКУ | 1     | 2     | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10  | 11   | 12   | ПОЧАТОК<br>ВЕСНЯНОГО<br>РОЗРАХУНКОВОГО<br>ПЕРІОДУ -<br>Перехід через<br>0 | ПОЧАТОК<br>ОСІНЬОГО<br>РОЗРАХУНКОВОГО<br>ПЕРІОДУ - перехід<br>температури<br>через +10 | ПОЧАТОК<br>ЗИМОВОГО<br>РОЗРАХУНКОВОГО<br>ПЕРІОДУ -<br>перехід через -5 | Період<br>замерзання<br>, доба | ПОЧАТОК<br>ЛІТНЬОГО<br>РОЗРАХУНКОВОГО<br>ПЕРІОДУ -<br>Кінець<br>розмерзання |
|-------------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 2006              | -8,2  | -8,0  | -1,7 | 8,4  | 13,7 | 18,0 | 20,1 | 19,2 | 14,6 | 8,6 | 2,1  | 1,7  | 18.03.2006                                                                | 10.10.2006                                                                             | 01.01.2006                                                             | 76                             | 26.04.2006                                                                  |
| 2007              | 0,7   | -6,5  | 5,4  | 7,5  | 17,0 | 19,7 | 20,2 | 20,7 | 13,8 | 8,5 | -0,1 | -0,9 | 01.03.2007                                                                | 08.10.2007                                                                             | 09.02.2007                                                             | 20                             | 22.03.2007                                                                  |
| 2008              | -3,7  | -0,5  | 3,6  | 10,3 | 17,0 | 19,7 | 20,2 | 20,7 | 13,8 | 8,5 | -0,1 | -0,9 | -                                                                         | 09.10.2008                                                                             | -                                                                      | 0                              | 15.04.2008                                                                  |
| 2009              | -4,5  | -3,0  | 1,3  | 9,6  | 14,1 | 19,2 | 20,6 | 17,8 | 16,2 | 7,8 | 4,0  | -4,6 | -                                                                         | 07.10.2009                                                                             | -                                                                      | 0                              | 15.04.2009                                                                  |
| 2010              | -11,0 | -4,4  | -0,5 | 9,1  | 17,1 | 21,1 | 24,3 | 23,4 | 13,9 | 5,4 | 6,3  | -5,3 | 16.03.2010                                                                | 28.09.2010                                                                             | 17.12.2009                                                             | 89                             | 21.04.2010                                                                  |
| 2011              | -3,7  | -7,8  | -0,5 | 9,0  | 15,8 | 20,2 | 21,4 | 18,5 | 14,0 | 6,6 | 1,7  | 1,3  | 17.03.2011                                                                | 02.10.2011                                                                             | 14.12.2010                                                             | 93                             | 23.04.2011                                                                  |
| 2012              | -5,1  | -11,9 | 1,2  | 10,6 | 17,4 | 18,5 | 22,2 | 19,2 | 14,7 | 8,8 | 4,0  | -5,9 | 13.03.2012                                                                | 12.10.2012                                                                             | 15.01.2012                                                             | 58                             | 20.04.2012                                                                  |
| 2013              | -5,5  | -1,4  | -3,0 | 9,1  | 18,4 | 21,1 | 19,8 | 18,9 | 12,4 | 8,6 | 5,8  | -1,0 | 21.03.2013                                                                | 05.10.2013                                                                             | 13.12.2012                                                             | 98                             | 20.04.2013                                                                  |
| 2014              | -6,2  | -1,4  | 5,8  | 9,6  | 16,7 | 17,4 | 21,5 | 19,8 | 13,6 | 5,5 | 1,2  | -2,7 | 21.03.2014                                                                | 28.09.2014                                                                             | 09.01.2014                                                             | 71                             | 09.04.2014                                                                  |
| 2015              | -1,4  | -1,4  | 4,3  | 8,4  | 15,1 | 19,1 | 19,8 | 20,5 | 16,4 | 5,3 | 3,6  | 1,2  | -                                                                         | 03.10.2015                                                                             | -                                                                      | 0                              | 15.04.2015                                                                  |

Рисунок 4.5 – Результати розрахунку періодів ВТР

На основі отриманих даних були розраховані та сформовані таблиці розрахункових значень інтенсивності опадів та глибини промерзання ґрунту різних зон земляного полотна (рис. 4.6).

|     |      |                               |                                      |                                             |                                    |                                  |                                 |       |         |   |      |   |   |              |       | $m_{cp}$ | 6,5714                 |        |
|-----|------|-------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-------|---------|---|------|---|---|--------------|-------|----------|------------------------|--------|
|     |      |                               |                                      |                                             |                                    |                                  |                                 |       |         |   |      |   |   |              |       | MAXy     |                        |        |
| №пп | Рік  | $m_{cp}$                      | $T_{\delta}$ , хв.                   | $S$ , мм                                    | $t_r$                              | $f$                              | d, мбар                         | Ранг  |         |   | Flag |   |   | $P_{\Sigma}$ |       |          | $T_{\delta(cp)}$ , хв. |        |
|     |      | середня<br>кількість<br>дошів | сумарна<br>тривалість<br>опадів, хв. | сумарна<br>кількість<br>опадів за<br>період | температур<br>а поверхні<br>грунту | відносна<br>вологість<br>повітря | Дефіцит<br>вологісті<br>повітря |       |         |   |      |   |   |              |       |          | 5                      | 465,6  |
|     |      | 1                             | 2006                                 | 13                                          | 1392                               | 53,7                             | 3,25                            | 78,25 | 1,42552 | 7 | 1    | 1 | 1 | 1            | 1     | 90,54    | 10,94                  | 10,94  |
| 2   | 2007 | 6                             | 432                                  | 13,4                                        | 4                                  | 69,7                             | 1,98546                         | 3     | 5       | 5 | 1    | 1 | 1 | 36,49        | 73,44 | 73,44    | d0, мбар               |        |
| 3   | 2008 |                               |                                      |                                             |                                    |                                  | 0                               | 0     | 0       | 0 | 0    | 0 | 0 |              |       |          | 5                      | 2,3915 |
| 4   | 2009 |                               |                                      |                                             |                                    |                                  | 0                               | 0     | 0       | 0 | 0    | 0 | 0 |              |       |          | 95                     | 1,3949 |
| 5   | 2010 | 5                             | 336                                  | 7,6                                         | 2,3                                | 75                               | 1,63901                         | 6     | 6       | 6 | 1    | 1 | 1 | 77,03        | 89,06 | 89,06    | $T_{\delta}$ , хв.     |        |
| 6   | 2011 | 8                             | 1008                                 | 19,2                                        | 4                                  | 67,8                             | 2,10996                         | 2     | 2       | 4 | 1    | 1 | 1 | 22,97        | 26,56 | 57,81    | 5                      | 1380,3 |
| 7   | 2012 | 11                            | 912                                  | 36                                          | 3,3                                | 73,7                             | 1,72371                         | 5     | 3       | 2 | 1    | 1 | 1 | 63,51        | 42,19 | 26,56    | 95                     | 171,69 |
| 8   | 2013 | 3                             | 576                                  | 22,9                                        | 1,3                                | 70,3                             | 1,94773                         | 4     | 4       | 3 | 1    | 1 | 1 | 50           | 57,81 | 42,19    | $S$ , мм               |        |
| 9   | 2014 | 0                             | 0                                    | 0                                           | 9                                  | 63                               | 2,42093                         | 1     | 0       | 0 | 1    | 0 | 0 | 9,459        |       |          | 5                      | 50,317 |
| 10  | 2015 |                               |                                      |                                             |                                    |                                  | 0                               | 0     | 0       | 0 | 0    | 0 | 0 |              |       |          | 95                     | 0,6164 |

Рисунок. 4.6 – Розрахунок режиму опадів 5 % забезпеченості

Отримані результати були використані для дорожньо-кліматичного районування території України.–А саме, побудовано дерево кластерного аналізу, яке ґрунтується на наступних показниках: середня інтенсивність опадів 5%-м забезпечення (мм), середня місячна температура за липень,  $C^0$  та середня місячна температура за січень,  $C^0$ . Таким чином, охоплені необхідні кліматичні параметри, які використовують в проектній практиці.

Враховуючи зручність та апробованість кластеризації [94, 105, 104, 117 – 120], для побудови кластерного дерева використовувалась програмний комплекс (ПК) STATISTICA. Даний ПК призначений для всебічного статистичного аналізу. У пакеті STATISTICA реалізовані процедури для аналізу даних, управління даними, добування даних та їх візуалізації. У цьому ПК реалізовані класичні методи кластерного аналізу, включаючи методи k-середніх, ієрархічної кластеризації і двохвходового об'єднання. Дані можуть надходити як у початковому вигляді, так і у вигляді матриці відстаней між об'єктами. Спостереження і змінні можна кластеризувати, використовуючи різні заходи



відстані (евклідове, евклідів квадрат, манхеттенівське, Чебишева та ін.) та різні правила об'єднання кластерів (одиначний, повний зв'язок, незважене і зважене попарне, середнє по групах тощо).

У випадку дорожньо-кліматичного районування була використана ієрархічна кластеризація. Спочатку деревовидні діаграми можуть здатися трохи заплутаними, однак після деякого вивчення вони стають більш зрозумілими. Діаграма починається зверху (для вертикальної дендрограми) з кожної метеостанції в своєму власному кластері. При русі вниз, метеостанції, які "тісніше стикаються один з одним" об'єднуються і формують кластери. Кожен вузол діаграми, наведений на рис. 4.7, представляє об'єднання двох або більше кластерів, положення вузлів на вертикальній осі визначає відстань, на якому були об'єднані відповідні кластери.

У результаті побудови дерева кластерного аналізу за показниками середньої інтенсивності опадів 5 % забезпеченості територія України була поділена на 3 групи. У групі А з найвищим показником середньої інтенсивності опадів 5 % (13–15 мм) – Умань, Прилуки Полтава Мелітополь, Ковель, Чернівці, Тернопіль, Рівне, Луцьк, Чернігів, Овруч, Лубни, Суми, Дружба.

До групи Б об'єдналися такі метеостанції, як Первомайск, Запоріжжя, Мелітополь, Сімферополь, Керч, Болград, Запоріжжя, Херсон, Асканія-Нова, Дніпро, Львів. Середня інтенсивність опадів за їх даними сягає від 10 мм до 12 мм.

До групи В віднесені метеостанції за найнижчим рівнем середньої інтенсивності опадів (6–10 мм), як Ужгород, Одеса, Миколаїв, Кіровоград, Харків, Луганськ, Донецьк, Київ, Вінниця, Хмельницький, Житомир та Біла Церква.

Рисунок 4.8 – Карта дорожньо-кліматичного районування території України за показниками середньої інтенсивності опадів



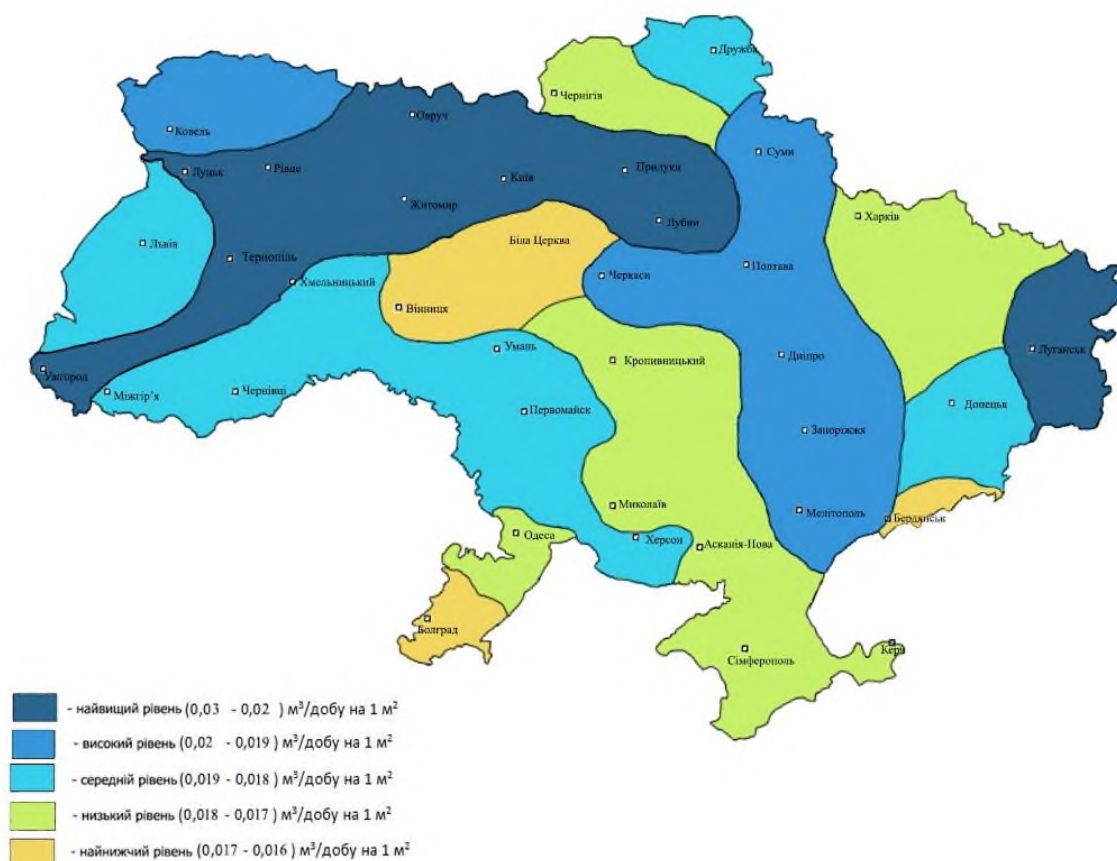


Рисунок 4.10 – Карта дорожньо-кліматичного районування території України за значеннями питомого надлишку води, що надходить в дренажну конструкцію

Згідно даних рис. 4.10 до зони з найвищим рівнем (0,03 – 0,02) м³/добу на 1 м розрахункового значення питомого надлишку вологи увійшли такі станції Північної та Західної частини України, як Лубни, Прилуки, Київ, Овруч, Рівне, Тернопіль, Житомир, Ужгород та Луганськ. До зони з високим рівнем (0,02 – 0,019) м³/добу на 1 м відносяться Північна, Центральна та Південна частини України, а саме Суми, Полтава, Черкаси, Дніпро, Запоріжжя, Мелітополь та Ковель. Зона з середнім рівнем (0,019 – 0,018) м³/добу на 1 м розрахункового значення питомого надлишку включає Львів, Херсон, Первомайськ (Миколаївська область), Чернівці, Міжгір'я, Хмельницький, Дружба (Сумська область) Умань та Донецьк. До зони з низьким рівнем (0,018 – 0,017) м³/добу на 1 м – Кропивницький, Миколаїв, Асканія-Нова, Сімферополь, Керч, Одеса, Харків,

Бердянськ та Чернігів. До зони з найнижчим рівнем (0,017 – 0,016) м<sup>3</sup>/добу на 1 м – Болград, Біла Церква та Вінниця.

На основі результаті виконаної роботи - статистичної обробки та виконання комплексних розрахунків розроблено Довідник № 4. «Кліматичні характеристики та кліматичне районування території України для регулювання водно-теплогового режиму в дорожньому будівництві» [89].

#### **4.6 Практичні аспекти щодо регулювання вологісного режиму дренажувального шару під впливом навантаження від великовагових транспортних засобів**

Товщина дренажувальних, морозозахисних або противоінфільтраційних шарів повинна визначатися з урахуванням комплексу умов їх роботи восени та навесні як поглинаючих та/або осушувальних. Відповідно до запропонованих у пунктах 4.1 – 4.4 методів прийняття проектних рішень та згідно [7, 73], за значеннями питомого надлишку води, що надходить в дренажну конструкцію можна отримати необхідну товщину дренажувального шару  $h_{д.ш.}$ .

При визначенні товщини дренажувального, морозозахисного шару також слід перевірити, чи достатній об'єм незаповнених пор цього шару для розміщення води, що надходить в конструкцію, без зниження міцності дорожнього одягу. Ця умова забезпечується при дотриманні нерівності:

$$h_{мз} \geq h_{нас} + h_{занР}, \quad (4.42)$$

де  $h_{нас}$  – товщина шару, повністю насиченого водою, м;

$h_{занР}$  – запасна додаткова товщина шару, для розміщення додаткового надлишку води за рахунок віджимання в дренажувальний шар під впливом навантаження від великовагових транспортних засобів, м.

Під впливом навантаження вода заповнює всі пори дренажувального шару основи, відповідно до цього, товщина нижньої заповненої водою його частини до

кінця періоду вологонакопичення буде збільшена на величину:

$$h_{\text{зан } P} = \frac{q_{\text{відж.р}}}{W_{\text{ІІВ1}} - W_{\text{opt1}}} . \quad (4.43)$$

Згідно до вихідних даних, наведених у п.р. 3.4, на прикладі І дорожньо-кліматичної зони України, за формулою (4.43) визначена запасна додаткова товщина шару, для розміщення додаткового надлишку води за рахунок віджимання, під впливом навантаження від великовагових транспортних засобів:

- для піщаного дренавального шару, з модулем пружності  $E = 116$  МПа:

$$h_{\text{зан } P(1\text{кат})} = \frac{0,0055}{0,123 - 0,06} = 0,090 \text{ м};$$

$$h_{\text{зан } P(2\text{кат})} = \frac{0,0054}{0,123 - 0,06} = 0,085 \text{ м};$$

$$h_{\text{зан } P(3\text{кат})} = \frac{0,0074}{0,123 - 0,06} = 0,117 \text{ м};$$

$$h_{\text{зан } P(4\text{кат})} = \frac{0,0058}{0,123 - 0,06} = 0,092 \text{ м}.$$

- для піщаного дренавального шару, з модулем пружності  $E = 130$  МПа:

$$h_{\text{зан } P(1\text{кат})} = \frac{0,0055}{0,115 - 0,06} = 0,1 \text{ м};$$

$$h_{\text{зан } P(2\text{кат})} = \frac{0,0043}{0,115 - 0,06} = 0,078 \text{ м};$$

$$h_{\text{зан } P(3\text{кат})} = \frac{0,0071}{0,115 - 0,06} = 0,129 \text{ м};$$

$$h_{\text{зан } P(4\text{кат})} = \frac{0,0054}{0,115 - 0,06} = 0,098 \text{ м};$$

- для щебеневого дренального шару, з модулем пружності  $E = 250$  МПа:

$$h_{\text{зан } P(1\text{кат})} = \frac{0,0025}{0,115 - 0,06} = 0,045 \text{ м};$$

$$h_{\text{зан } P(2\text{кат})} = \frac{0,0027}{0,115 - 0,06} = 0,049 \text{ м},$$

$$h_{\text{зан } P(3\text{кат})} = \frac{0,003}{0,115 - 0,06} = 0,054 \text{ м};$$

$$h_{\text{зан } P(4\text{кат})} = \frac{0,0028}{0,115 - 0,06} = 0,050 \text{ м}.$$

Результати розрахунку з рекомендованою товщиною наведені у табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Запасна додаткова товщина дренального шару, для розміщення додаткового надлишку води за рахунок віджимання під впливом навантаження від великовагових транспортних засобів

| Показники                                                  | I категорія | II категорія | III категорія | IV категорія |
|------------------------------------------------------------|-------------|--------------|---------------|--------------|
| Піщаний дренальний шар, з модулем пружності $E = 116$ МПа  |             |              |               |              |
| $q_{\text{відж.р}}$ , л на $1 \text{ м}^2$                 | 5,5         | 5,4          | 7,4           | 5,8          |
| Рекомендована $h_{\text{зан } P}$ , см                     | 9           | 9            | 12            | 10           |
| Піщаний дренальний шар, з модулем пружності $E = 130$ МПа  |             |              |               |              |
| $q_{\text{відж.р}}$ , л на $1 \text{ м}^2$                 | 5,5         | 4,3          | 7,1           | 5,4          |
| Рекомендована $h_{\text{зан } P}$ , см                     | 10          | 8            | 13            | 10           |
| Щебневий дренальний шар, з модулем пружності $E = 250$ МПа |             |              |               |              |
| $q_{\text{відж.р}}$ , л на $1 \text{ м}^2$                 | 2,5         | 2,7          | 3,0           | 2,8          |
| Рекомендована $h_{\text{зан } P}$ , см                     | 5           | 5            | 6             | 5            |

Для зручності прийняття проектних рішень та з урахуванням технологічних особливостей влаштування дренавальних шарів результати розрахунку у табл. 4.6 округлені.

#### **Висновки по розділу 4**

1. Глобальні перетворення кліматичних умов потребують врахування змін кліматичних показників при прийнятті проектних рішень щодо споруд регулювання водно-теплогового режиму дорожніх конструкцій. У результаті проведених досліджень, з використанням стандартної методики розрахунку, на основі наявної статистичної метеорологічної інформації за десять років, отримані оновлені розрахункові значення глибини промерзання ґрунту дорожньої конструкції відповідно до категорій автомобільних доріг.

2. Для типізації території України та моделювання системотворюючих зв'язків використано кластеризацію територіальних одиниць. На основі кластерного аналізу за значенням питомого надлишку води, що надходить в дренажну конструкцію в основі дорожнього одягу, розроблено карту дорожньо-кліматичного районування території України. За ознаками надходження вологи в дренажі мілкового закладання дорожньої конструкції територія України поділяється на 5 зон. На карті районування виділені зони з різним рівнем загального питомого надлишку води (від найнижчого до найвищого рівня). Розподіл зон враховує як географічне положення місцевості, так і особливості інфільтрації атмосферних опадів, глибину промерзання ґрунту та вологонакопичення у дорожніх конструкціях всіх технічних категорій.

3. За допомогою програмного комплексу Surfer 13, на основі методу радіальних базисних функцій (Radial Basis Functions), побудовані карти глибини промерзання дорожньої конструкції відповідно до типових рішень конструкцій дорожніх одягів різних категорій доріг на території України. З метою прийняття раціональних проектних рішень складена методологія врахування змін кліматичних характеристик при визначенні глибини промерзання дорожніх



конструкцій. Впровадження результатів розробки дає можливість оптимізувати дренажні конструкції мілкового закладання з удосконаленими характеристиками на основі сучасних даних кліматичних показників, оброблених із застосуванням сучасних методів математичної статистики.

4. Для підвищення міцності дорожньої конструкції повинно бути забезпечено швидке та безперервне відведення води з пористих шарів дорожнього одягу. Затримка з відведенням води призводить до зниження несної здатності ґрунтової основи і, як наслідок, зниження міцності конструкції в цілому. Влаштування суцільного дренажного шару під дорожнім одягом дає можливість зібрати надлишкову вологу, яка надходить в шар основи протягом всього року.

5. Існуючі методи розрахунку товщини дренажного шару розроблялися з урахуванням кліматичних характеристик тридцятирічної давнини. У результаті проведення досліджень запропоновано метод, що враховує зміни кліматичних умов України та підвищену кількість атмосферної вологи, яка обумовлена цими змінами. Наряду із середньостатистичними даними запропоновано використання даних про пікові навантаження на дренажний шар під час опадів високої інтенсивності – злив та зливових дощів. Також запропоновано визначення запасної додаткової товщини дренажного шару, для розміщення додаткового надлишку води за рахунок її віджимання в шар під впливом навантаження від великогазових транспортних засобів. В умовах І дорожньо-кліматичної зони, для доріг I – IV категорій запасна додаткова товщина піщаного дренажного шару пропонується в межах від 8 см до 13 см, для щебеневого – 5–6 см. Урахування суттєвих кліматичних змін та застосування даного методу дозволяє удосконалити методи проектування дренажних систем.

6. Результати досліджень четвертого розділу викладено у наступних публікаціях [91, 92, 95, 97, 111 – 113].

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі, що полягає в удосконаленні методу прогнозування вологісного режиму дренажувального шару, за рахунок міграції вологи з нижніх шарів ґрунту ЗП під впливом навантаження від великовагових транспортних засобів на основі числового моделювання напружено-деформованого стану дорожньої конструкції; у виконанні районування території України для регулювання водно-теплогового режиму в дорожньому будівництві.

1. На підставі аналізу існуючих теоретичних та експериментальних досліджень з визначення загального модуля пружності ДК, водно-тепловий режим земляного полотна враховується кліматичною зоною, гідрологічною групою місцевості та розрахунковою вологістю, як сталою величиною без урахування можливості перезволоження ґрунтів ЗП на різних глибинах активної зони. Існуючий метод розрахунку щодо зміни вологісного стану дорожньої конструкції під дією навантаження не відповідає сучасним нормативним вимогам. Ці обставини обумовили суттєві зміни у підходах до розрахунку дорожніх конструкцій, з точки зору міграції вологи і закономірностей процесів просідання ґрунту земляного полотна при його промерзанні та висушуванні, та необхідність залучення сучасних розрахункових комплексів щодо визначення НДС перезволоженої дорожньої конструкції.

2. За результатами експериментальних досліджень визначено режими роботи двох типів дренажних конструкцій мілкового закладання, які відрізняються між собою: дренажувальний шар з митого щебеню, фр. 20–40 мм, мав середню інтенсивність водовідведення 0,0645 л/хв, а шар з середньозернистого піску – 0,0029 л/хв. Дренажна конструкція мілкового закладання з піщаним шаром розглядалася, як конструкція, що працює за принципом осушення, а фактично працювала за принципом поглинання. На підставі проведених досліджень були змодельовані елементи тривимірних дорожніх конструкцій з дренажувальним шаром, побудова скінченно-елементних сіток визначена із умов розмірів штампу

колеса транспортного засобу. При накладанні в'язей опорних вузлів запропоновано не обмежувати переміщення вузлів по її контуру, щоб задання таких в'язей не зменшувало деформації моделі та відповідало реальним умовам роботи дорожньої конструкції.

3. Проведено числове моделювання НДС дорожньої конструкції під впливом навантажень від великовагових транспортних засобів для автомобільних доріг I – IV-ої категорії. Результати серії числових експериментів, а саме розподіл ізополів та ізоліній нормальних напружень  $N_z$  та розподіл деформацій  $Z$  в дорожній конструкції, порівнювались при навантаженнях від великовагових транспортних засобів різницею в 10%, що дозволило визначити товщину шару ґрунту, розміщеного під дренавальним шаром, з якого відбувається віджимання води. Для доріг в умовах I-ої дорожньо-кліматичної зони України, при навантаженні від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН на дорожню конструкції з перезволоженим піщаним дренавальним шаром міграція вологи знизу вгору буде відбуватися з шару ґрунту ЗП під проїзну частину товщиною 50 – 80 см, під узбіччя – товщиною 60 – 90 см.

4. Ґрунтуючись на підході щодо визначення параметрів просідання ґрунту, при його висиханні або розмерзанні, отримано залежність для питомого надлишку віджимання води під дією навантаження від великовагових транспортних засобів. Запропонована залежність поєднує такі показники, як деформація під дренавальним шаром, товщина шару ґрунту, розміщеного під дренавальним шаром, з якого відбувається віджимання води під дією прикладеного навантаження, відносне осідання ґрунту ЗП, коефіцієнт лінійного осідання та коефіцієнт ущільнення дренавального шару і верхнього шару ґрунту ЗП під впливом навантаження. Питомий надлишок віджимання води під дією розрахункового навантаження змінюється від 5,4 л/м<sup>2</sup> до 7,4 л/м<sup>2</sup> для умов I-ої дорожньо-кліматичної зони України.

5. На підставі статистичної обробки кліматичних показників регіонів та використання кластерного аналізу побудовано карту дорожньо-кліматичного районування території України за значеннями питомого надлишку води, що

надходить в дренажну конструкцію. Запропонований підхід враховує пікові навантаження на дренажні конструкції мілкового закладання під час опадів великої інтенсивності, що дозволяє удосконалювати метод розрахунку цих конструкцій в 5-ти зонах України. Для I-ої дорожньо-кліматичної зони України максимальний загальний питомий надлишок води з урахуванням віджимання під впливом понаднормативного навантаження складатиме від  $24,4 \text{ л/м}^2$  до  $37,4 \text{ л/м}^2$ , що дуже суттєво змінить вологісний стан основи дорожнього одягу. Для врахування додаткового надходження вологи в дренажний шар під впливом понаднормативного навантаження великовагових транспортних засобів запропоновано визначення запасної його товщини, для доріг I – IV категорій – від 9 см до 12 см.

Результати дисертаційних досліджень впроваджені на галузевому рівні в організаціях, які входять у сферу управління Державного агентства автомобільних доріг України (Укравтодор) у вигляді Довідника № 4 «Кліматичні характеристики та кліматичне районування території України для регулювання водно-теплогового режиму в дорожньому будівництві» та пропозицій щодо удосконалення методу визначення загального максимального питомого надлишку води, що надходить в дренажну конструкцію.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Н.А. Пузаков, И.А. Золотарь, В.М. Сиденко, А.Я. Тулаев и др. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд. Транспорт, 1971. 413 с.
2. Сиденко В.М. Расчет и регулирование водно-теплого режима дорожных одежд и земляного полотна. Москва: Н-Т изд. Минавтотранса и шос. дорог РСФСР, 1962, 116 с.
3. Сиденко В.М. О методах расчёта водно-теплого режима при парообразном увлажнении дорожных одежд и полотна. Труды ХАДИ, 1961, Вып. 25.
4. Сиденко В.М. Теоретические основы водно-теплого режима дорожных одежд и грунтовых оснований в условиях недостаточного увлажнения. Труды ХАДИ, 1962, Вып. 28.
5. Сіденко В.М., Фомін В.О. Водно-тепловий режим міських доріг. Харків: Видавництво Харківського університету, 1971. 180 с.
6. Kalantari Zahra. Road Drainage in Sweden: Current Practice and Suggestions for Adaptation to Climate Change. *Journal of Infrastructure Systems*, 2013. Vol. 19, Issue 2, P. 47-156. URL: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000119](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000119)
7. Рувинский В.И. Оптимальные конструкции земляного полотна на основе регулирования водно-теплого режима. М. : Транспорт, 1982, 166 с.
8. Тулаев А.Я. Осушение земляного полотна М. : Дориздат, 1948.
9. Седергрэн Г.Р. Дренаж дорожных одежд и аэродромных покрытий : [пер. с англ.]. Москва: Транспорт, 1981. – 280 с.
10. Dawson, Andrew. Water in Road Structures. Nottingham Transportation Engineering Centre University of Nottingham, UK. 2009. P.438.
11. Тулаев А.Я. Конструкция и расчет дренажных устройств. Москва: Транспорт, 1980. 191 с.

12. Корсунський М.Б. Принципы проектирования морозозащитных и дренирующих слоев. Тезисы докладов на Всесоюзной конференции по прочности дорог. Харьков, изд. ХГУ, 1967.
13. Соколов Ю.Д. Про приплив ґрунтових вод до дренажної галереї при похилій лінії водоупору та наявності інфільтрації : перша фаза нестационарного руху. ДАН УРСР. 1952. № 6. С. 439–446.
14. Преферансова Л. А. Расчетный уровень грунтовых вод и методы его определения. Труды Союздорнии. Вып. 13. .М., Союздорнии, 1966.
15. Куканов В.И. Исследование инфильтрации поверхностной влаги в земляне полотно при помощи радиоактивного индикатора трития. Тр./МАДИ, 1972. вып.44. с.13-18.
16. Олейник А.Я. Геогидродинамика дренажа. Киев : Наук. думка, 1981. – 284 с.
17. Поляков В.Л. Расчёт осушительного действия несовершенного дренажа в n-слойных грунтах. Гидромеханика, 1983. Вып. 48. С. 80–83.
18. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод [2-е изд.]. – Москва: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1977. 664 с
19. Славінська О.С., Стьожка В.В. Дослідження процесів вологонакопичення в дорожніх конструкціях з дренажними прошарками. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. Рівне : НУВГП, 2009. Вип. 3, Ч. 1. С. 488–495.
20. Славінська О.С., Стьожка В.В. Аналіз досліджень вологонакопичення у верхній частині дорожньої конструкції. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво : наук.-техн. зб.* Київ: НТУ, 2009. Вип. 77, С. 69–74.
21. Стьожка В.В. Удосконалення методу розрахунку дренажних систем мілкового закладення: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2015.
22. МР В 2.3-02070915-849:2014 Методичні рекомендації щодо регулювання водно-теплового режиму у межах робочого шару земляного полотна автомобільних доріг.

23. Bressan Filippo, Wilson Christopher, Tsakiris Achilles. Development of a Subgrade Drainage Model for Unpaved Roads. Hydrosience& Engineering Department of Civil & Environmental Engineering. *The University of Iowa*, Iowa City, 2015. IA 52242, 34. URL: <http://publications.iowa.gov/id/eprint/20730>
24. Lantieri Claudio, Lamperti Riccardo, Simone Andrea, Vignali Valeria, Sangiorgi Cesare, Dondi Giulio. Mobile Laser Scanning System for Assessment of the Rainwater Runoff and Drainage Conditions on Road Pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2015. Vol. 8, Issue 1, 1-9. URL: [http://dx.doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2015.8\(1\).1](http://dx.doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2015.8(1).1)
25. Dianat M., Skarysz M., Hodgson G., Garmory A. Coupled Level-Set Volume of Fluid Simulations of Water Flowing Over a Simplified Drainage Channel With and Without Air Coflow. *SAE Int. J. Passeng, Cars Mech*, 2017. Sys 10 (1), 369-377 URL: <https://doi.org/10.4271/2017-01-1552>.
26. Šaulys Valentinas, Survilė Oksana, Klimašauskas Mindaugas, Bagdžiūnaitė-Litvinaitienė Lina, Litvinaitis Andrius, Stankevičienė Rasa, Tumavičė Aja, Assessing the Hydraulic Conductivity of Open Drainage for Surface Water in Road Safety Zones. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2017. Vol. 12, Issue 3, P. 174-180. URL: <http://www.bjrbe.vgtu.lt/volumes/en/volume12/number3/05.php>
27. Chen Lu, Battaglia Francine, Flintsch Gerardo W, Kibler David. Highway Drainage at Superelevation Transitions by 3-D Computational Fluid Dynamics Modeling. *Transportation Research Board 96th Annual Meeting*, 14, 2017. URL: <https://trid.trb.org/View/1437588>
28. Кватадзе А. И. Метод визначення розрахункових періодів водно-теплогового режиму для розрахунку дренажних пристроїв. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Київ : НТУ, 2016. Вип. 98. С. 79-84.
29. Кватадзе А.И. Удосконалення методу визначення об'єму вологонакопичення в дорожніх конструкціях дренажними шарами. *Збірник наукових праць «Дороги і мости»*, 2018. Issue 17 (2017). P. 81-88. URL: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2017.17.081>.

30. Han-Cheng Dan, Zhi Zhang, Xiang Liu, Jia-Qi Chen. Transient unsaturated flow in the drainage layer of a highway: solution and drainage performance. *Road Materials and Pavement Design*, 2019. Vol. 20, Is. 3, P. 528-553. URL: <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1397049>
31. Aptalaev M.N., Zhalko M.E. Effect of the water-and-thermal regime of the auto-road base on the pavement state. *Russian journal of transport engineering*, 2016. Vol. 3, no. 4. URL: <http://t-s.today/PDF/02TS416.pdf>
32. Teltayev T.T., Suppes, E.A. Temperature in pavement and subgrade and its effect on moisture. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2018. Vol. 13, p. 357. URL: [https://www.researchgate.net/publication/329198802\\_Temperature\\_in\\_pavement\\_and\\_subgrade\\_and\\_its\\_effect\\_on\\_moisture](https://www.researchgate.net/publication/329198802_Temperature_in_pavement_and_subgrade_and_its_effect_on_moisture)
33. Yangyang Ji, Jianguang Xie, and Mingxi Liu Double layer drainage performance of porous asphalt pavement. *AIP Conference Proceedings* 1973,020031, 2018. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5041415>
34. Elshaer, M., Ghayoomi, M., Daniel, Jo Sias. Methodology to evaluate performance of pavement structure using soil moisture profile. *Road Materials and Pavement Design*, 2016. Vol. 19, Issue 4. P. 952-971. URL: <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1283356>
35. Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс): Учебник для строит. вузов. 4 изд., перераб. и доп., Москва: Высш. школа, 1983. 288 с.
36. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. Механика грунтов): Учебник для строит. вузов. 2 изд., перераб. и доп., Москва: Высш. школа, 1991. 447 с. ISBN 5-06-001819-9
37. Кузло М. Т. Прогноз деформацій масивного природного водонасиченого схилу при його осушенні. Будівельні конструкції. Національний університет водного господарства та природокористування. 83. Рівне, 2016. С. 455-463.
38. Kuzlo M., Vynnykov Y., Ilchenko V., Zhukovska N. Deformations of Soil Massifs Under the Existence of Saline Solutions with Different Concentration and



Temperature. *Proceedings of the 2nd International Conference on Building Innovations «ICBI 2019»*. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. vol 73. 123-131.

39. Мустафаев А.А. Деформации засоленных грунтов в основаниях сооружений. М. 1985.

40. Мустафаев А.А. Расчет оснований и фундаментов на посадочных грунтах. М. 1979.

41. Черкасов И. И. Механические свойства грунтов в дорожном строительстве М. 1976

42. Бубела А. В., Кватадзе А.І. Дослідження режимів роботи дренавальних шарів в дорожніх конструкціях. *RS Global Journals*, 2020. Issue No 5(32) (2020): Science Review. P. 24-29. URL: [https://doi.org/10.31435/rsglobal\\_sr/30062020/7140](https://doi.org/10.31435/rsglobal_sr/30062020/7140).

43. Сиденко В.М. Расчёт глубины промерзания автомобильных дорог. Автомобильные дороги, 1967. № 12.

44. Кудрявцев С.А., Вальцева Т.Ю., Берестяный Ю.Б., Коннов Ю.Н., Конструкции земляного полотна на слабых оивающих основаниях. Путь и путей. х-во. 2008. № 4. С. 34–37.

45. Sun Xuexian, Zhao Jinzhong, Экспериментальное исследование влияния оттаивания и деформации земляного полотна в зоне вечной мерзлоты на сборную дренажную трубу. *China Railwai Sci.*, 2008. V. 29. № 2. С. 12–16.

46. Шинкарук Л.А. Дослідження процесу зволоження піщаного дренажного шару вологою від розтавання дорожньої конструкції. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво : наук.-техн. зб.*, Київ: НТУ, 2014. Вип. 92. С. 178–182.

47. Ершов Э.Д. Физико-химия и механика мерзлых пород. М. : Изд-ство МГУ, 1986. 336 с.

48. Slavinska, O., Savenko, V., Kharchenko, A., Bubela, A. Development of a mathematical model of evaluation of road-andtransport assets as a component of information-and-management system. *Eastern-European Journal of Enterprise*

*Technologies*, 2017. Vol. 6, Issue 4-90. P. 45–57. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118798>

49. Slavinska, O., Stozhka, V., Kharchenko, A., Bubela, A., Kvatadze. Development of a model of the weight of motor roads parameters as part of the information and management system of monetary evaluation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019. Vol. 1, Issue 3-97.P. 46–59. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156519>.

50. Nosov, V.P., Dobrov, E.M., Chistyakov, I.V., Borisiuk, N.V. and Fotiadi, A.A. Mathematical Modelling of Cracking Process in Concrete Pavement Highways. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017. Vol. 12, p. 13158-13164. URL: [http://www.ripublication.com/ijaer17/ijaerv12n23\\_20.pdf](http://www.ripublication.com/ijaer17/ijaerv12n23_20.pdf)

51. Куканов В.И. Исследование поверхностного увлажнения земляного полотна автомобильных дорог с применением радиоактивных изотопов. *Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук*. Москва, 1979. с. 16.

52. Городецкий А.С., Евзеров И.Д., Стрелец-Стрелецкий Е.Б., Боговис В.Е., Гензерский Ю.В., Городецкий Д.А. Метод конечных элементов: теория и численная реализация. Программный комплекс "Лира-Windows". Киев: ФАКТ, 1997.

53. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов М.: Мир, 1977. 349 с.

54. Карпиловский В.С. Методы конструирования конечных элементов. Деп. в УкрНИИНТИ, №3153. Киев, 1980. 20 с.

55. Евзеров И.Д. Оценки погрешности несовместных конечных элементов плиты. Деп. в УкрНИИНТИ, №1467 Киев, 1979. 9 с.

56. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Особенности алгоритмизации метода перемещений при учете дополнительных связей. Метод конечных элементов и строительная механика: Тр.ЛПИ № 349. Л. 1976. С.28–36.

57. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможности их анализа. М, Изд-во ДМК-Пресс, 2007. 600 с.

58. Розин Л.А. Стержневые системы как системы конечных элементов Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1975. 237 с.
59. Makiett R.N., Marcal P.V. Finite Element Analysis of Nonlinear Structures. *Journal Structural Division*. Proc./ASCE, 1968. Vol. 94. No ST9. P. 2081–2105.
60. Блехман И.И., Мышкис А.Д., Пановко Я.Г. Механика и прикладная математика: Логика и особенности приложения математики. Москва: Наука, 1983. 328 с.
61. Вовкушевский А.В., Шойхет Б.А. Расчет массивных гидротехнических сооружений с учетом раскрытия швов. М.: Энергия, 1981. 136 с.
62. Динамический расчет зданий и сооружений. (Справочник проектировщика). М.: Стройиздат, 1979. 320 с.
63. Медведева Н.М., Микитаренко М.А., Перельмутер А.В. Статический и динамический расчет мачт на ЭВМ. Сопротивление материалов и теория сооружений. Вып.48. Київ:Будівельник, 1986. С.79 –82.
64. Смирнов А.Ф. Статическая и динамическая устойчивость сооружений М.: Трансжелдориздат, 1947.
65. Феодосьев В.И. Десять лекций-бесед по сопротивлению материалов М.: Наука, 1975. 174 с.
66. Oden J.T. Finite Elements of Nonlinear Continua. New York: McGraw Hill Book Company, 1972.
67. Sabahi D., Rose T. Special Applications of Global-Local Analysis. MSC/NASTRAN, 1992, *World Users Conference Proceedings*.
68. Schiermeier J.E., Housner J.M., Ranson J.B., Aminpour M.A., Stroud W.J. The Application of Interface Element to Dissimilar Meshes in Global/Local Analysis, MSC 1996 World Users Conference. New York: McGraw Hill Book Company, 1996.
69. Yannanakis M. Computing the minimum fill-in is NP-complete. *SIAM Journal of Algebraic and Discrete Methods*, 1981. T2. № 1, 77–79.

70. Амбарцумян С.А. Теория анизотропных пластин (прочность, устойчивость и колебания). М.: Наука, 1987. 360 с.
71. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. М.: Мир, 1987. 544 с.
72. Вериженко В.Е., Карпиловский В.С., Пискунов В.Г. и др. Расчет неоднородных пологих оболочек и пластин методом конечных элементов. Киев: «Вища школа», 1987. 200 с.
73. Savenko V., Kvatadze A., Davydenko O., Stozhka V., Ianchuk L. Forecasting of the moisture mode of the drainage layer of a road structure under the action of a load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. Vol. 4. Issue NO 7 (106). P. 62-75. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209421>.
74. Кватадзе А. І. Дослідження напружено-деформованого стану дорожньої конструкції з перезволоженою основою. *Theoretical foundations of modern science and practice. XI Міжнародна науково-практична конференція*. 06-07 квітня 2020 р., Мельбурн, Австралія. С. 234 – 235. URL: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2020/04/XI-Conference-06-07-Melbourne-Australia.pdf>
75. Савенко В. Я., Кватадзе А. І. Дослідження процесу віджимання води в дорожній конструкції під впливом понаднормативного навантаження. *Гідротехнічне і транспортне будівництво. Міжнародна науково-технічна конференція*. 28-29 травня 2020 р., Одеса, Україна. С. 102 – 104.
76. Nuzhdin, L.V., Mikhaylov, V.S. Numerical modeling of pile foundations in the structural analysis software SCAD Office. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*, 2018. No. 1, p. 5-18. URL: [10.15593/2224-9826/2018.1.01](https://doi.org/10.15593/2224-9826/2018.1.01).
77. Гаврилкина, А.О., Дремова, О.В., Михайлов, В.С. Расчетные модели грунтовых оснований, реализуемые в программном комплексе Scad Office. *Барнаул: Ползуновский альманах*, №4, 2017, С. 45–48. URL: [http://elib.altstu.ru/journals/Files/pa2017\\_04\\_2/pdf/045gavrilkina.pdf](http://elib.altstu.ru/journals/Files/pa2017_04_2/pdf/045gavrilkina.pdf)
78. ГБН В.2.3–37641918–559:2019 Дорожній одяг нежорсткий. Проектування. К.: Мінінфраструктури України, 2019. 59 с.

79. ДБН В.2.3–4:2015 «Автомобільні дороги» Споруди транспорту. Автомобільні дороги. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво. К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2015. 104 с.

80. Альбом типових конструкцій дорожніх одягів нежорсткого типу під розрахункові навантаження А1, А2, Б. Київ. 2014. 76 с.

81. Slavinska, O., Savenko, V., Bubela, A., Yaremov, A. Investigation of the work of the road construction at the sites by pipedrenes from materials of different origin. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018. Vol. 2, Issue 7-92. P. 18–26. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126512>

82. Das, A. Structural Design of Asphalt Pavements: Principles and Practices in Various Design Guidelines. *Transportation in Developing Economies*. 2015, p. – 25-32. URL: 10.1007/s40890-015-0004-3.

83. Pirmohammad Sadjad, Majd-Shokorlou Yousef. Finite element analysis of road structure containing top-down crack within asphalt concrete layer. *Journal of Central South University*, 2020. Volume 27, p. 242–255. URL: <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4292-3>

84. Uglova, E.V., Tiraturyan, A.N., Lyapin, A.A. Integrated approach to studying characteristics of dynamic deformation on flexible pavement surface using nondestructive testing. *PNRPU Mechanics Bulletin* 2, 2016. 111-130 URL: <https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/article/view/204/119>

85. Talakh S., Dubyk O., Lysnytska K., Ilchenko V. Numerical simulation of hard airdrome coatings stress-strain state when interacting with weak ground base. *Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. П.: ПолтНТУ*, 2019. № 1 (52). С. 124-132.

86. Talakh S., Dubyk O., Bashynska O., Ilchenko V. Some Technical Solutions for the Use of Aerodrome Pavements in the Soft Soil Conditions. *Proceedings of the 2nd International Conference on Building Innovations «ICBI 2019». Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. vol 73. 303-311.

87. Довідник № 1 розрахункових характеристик ґрунтів, матеріалів покриття і основи дорожнього одягу та навантажень від транспортних засобів. Київ, 2017.

88. Заворицкий, В.И. Справочник по проектированию дорожных одежд 1983. Киев: Будівельник. – 104 с.

89. Довідник № 4. Кліматичні характеристики та кліматичне районування території України для регулювання водно-теплогового режиму в дорожньому будівництві [Електронний ресурс] / УКРАВТОДОР: НТУ/ 2018, с. 98. URL:[http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=80182](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80182)

90. Василенко С. В. Сучасні зміни живлення річок басейну Прип'яті (в межах України). Глобальні та регіональні зміни клімату. Киев:Ника-Центр. с. 413-418.

91. Usichenko O., Kvatadze A. Road-climate zoning for water-thermal mode regulation in transport structures. *RS Global Journals*, 2020. – Issue No 3(55) (2020): World Science. P. 8-12. URL: [https://doi.org/10.31435/rsglobal\\_ws/31032020/6966](https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/31032020/6966).

92. Slavinska O., Savenko V., Usichenko O., Kvatadze A. The method of accounting infiltration of atmospheric precipitation to calculate drainage facilities. *Metallurgical and Mining Industry*, 2017. Issue No.1-2017: P. 46-52. URL: [https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI\\_2017\\_1/007Savenko.pdf](https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2017_1/007Savenko.pdf)

93. Балабух В.А., Ягодинец С.Н., Скульбиденко Н.А., Региональные особенности количественных критериев интенсивности конвекции. Труды научного семинара «Проблемы долгосрочного прогнозирования погоды» Киев:Ника-Центр. 2012. с. 108-118.

94. Паламар А. Використання програмного комплексу Surfer у кадастровій оцінці земель, розташованих у зоні впливу гірничо-металургійних підприємств // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва : збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК / Західне геодезичне товариство Українського товариства геодезії і картографії, Національний університет "Львівська політехніка": Видавництво Львівської політехніки. 2014.

Випуск 2 (28). С. 58–59. URL: [http:// ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/25104/1/14-58-59.pdf](http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/25104/1/14-58-59.pdf)

95. Slavinska O., Usichenko O., Kvatadze A., Prykhodko S. Method to incorporate the climatic changes for determining freezing depths of road constructions. *Metallurgical and Mining Industry*, 2017. Issue No.8-2017: P. 8-15. URL: [https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI\\_2017\\_8/1Slavinska-O.pdf](https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2017_8/1Slavinska-O.pdf)

96. Хромов С.П. Метеорология и климатология. М.: МГУ, 2001. 528 с.

97. Савенко В.Я., Кватадзе А. І. Удосконалення періодів водно-теплогового режиму дренажних систем в робочій зоні земляного полотна. *LXXIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету*. : тези доповідей. Київ: НТУ, 2017. С. 118.

98. Савенко В. Я., Славінська О. С., Стьошка В. В. Методика визначення пропускної здатності дренажної конструкції мілкового залягання з урахуванням річного циклу роботи (М 218-02070915-684:2011). Київ: Укравтодор: НТУ. 2011. р. 35.

99. The official site of Ukrainian Hydrometeorological Institute. Zaklyuchnyi zvit za rezultatami NDR «Provedennya prostorovogo analizu zmin vodnogo rezhimu baseyniv poverhnevih vodnih obektiv na teritoriyi Ukrainy vnaslidok zminy klimatu» [The final report of the NDR results "Implementation of the spatial analysis of changes in the water regime of surface water bodies basins in Ukraine as a result of climate change"]. URL: <http://uhmi.org.ua/project/rvndr/avr.pdf>

100. Круглов А.Г. Совершенствование системы регионального дорожно-климатического районирования с учётом влияния грунтово-почвенных составляющих (на примере Астраханской области): автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. тех. наук. Круглов А.Г. Волгоград, 2006. 23 с.

101. Juknevičiūtė-Žilinskienė, Juknevičiūtė-Žilinskienė. Methodology for the Evaluation of the Effect of the Climate of Lithuania on Road Construction and Climatic

Regioning. *eLABa – Lithuanian Academic Electronic Library*, 2010. URL: <https://vb.vgtu.lt/object/elaba:1990887/>

102. Alfredas Laurinavicius, Lina Jukneviciute-Zilinskiene. Eleven years of rwis operation in Lithuania: possibilities for the use of the data collected. *The 8th International Conference May 19–20, 2011, Vilnius, Lithuania Selected papers*. Vilnius Gediminas Technical University, 2011. URL: [https://www.researchgate.net/profile/Alfredas\\_Laurinavicius2/publication/267951476\\_Eleven\\_years\\_of\\_rwis\\_operation\\_in\\_Lithuania\\_Possibilities\\_for\\_the\\_use\\_of\\_the\\_data\\_collected/links/54f440390cf299c8d9e6671f.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Alfredas_Laurinavicius2/publication/267951476_Eleven_years_of_rwis_operation_in_Lithuania_Possibilities_for_the_use_of_the_data_collected/links/54f440390cf299c8d9e6671f.pdf)

103. Agnieszka Cupak, Agnieszka Ziernicka-Wojtaszek, Joanna Krużel, Krzysztof Józwiakowski, Andrzej Wałęga, Antoni Grzywna, Andrzej Bochniak, Radomir Obroślak, Andrzej Mazur and Artur Serafin. The use of hierarchical cluster analysis for grouping atmospheric precipitation in Poland. *The First International Scientific Conference on Ecological and Environmental Engineering*, 2018 Volume 86, Issue E3S Web Conf. p.8. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198600018>

104. Mahfuz Nurshazwani Muhamad; Yusoff Marina; Ahmad Zakiah. Review of single clustering methods. *IAES International Journal of Artificial Intelligence*, 2019. Yogyakarta Vol. 8, Issue 3, P. 221-227. URL: <https://search.proquest.com/openview/6873420c01fed9342ad183704c842ff7/1?pq-origsite=gscholar&cbl=1686339>

105. Pivovarova I.I. Cluster analysis for structuring spatial data. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, 2019 Vol. 10, Issue 02, February 2019, pp. 1085-1109 URL: <http://www.iaeme.com/ijmet/issues.asp?JType=IJMET&VType=10&IType=2>

106. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. Будівельна кліматологія. К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2011. 123 с.



107. Круглов А.Г. Грунтово-гидрогеологическое обоснование уточнения дорожно-климатического районирования территории Астраханской области *Автомоб дороги и безопас. движения: Дальний восток*, 2006. № 6. С. 70–73.

108. Бутырина Л.Н. О необходимости уточнения нормативных гидрологических характеристик при проектировании автомобильных дорог. *Автомоб дороги и безопас. движения: Дальний восток*. 2006. № 6. С. 74–78.

109. Вітвіцька Є.В. Врахування нормативних параметрів клімату міст України у архітектурному проектуванні. Одеса: ОДАБА, 2015. 261 с. ISBN 978-617-7195-13-8.

110. Алексиков И.С. Основы районирования территории Юга РФ по условиям сооружения земляного полотна. Материалы Ежегодной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава и студентов ВолгГАСУ. Волгоград : ВолгГАСУ, 2008. Ч. 1. С. 160–163.

111. Савенко В.Я., Кватадзе А. І. Удосконалення методології врахування кліматичних змін при визначенні вологонакопичення в дорожніх конструкціях. *LXXIV наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету: Науково-технічний збірник*. Київ: НТУ, 2018. С. 171.

112. Кватадзе А. І. Удосконалення методу дорожньо-кліматичного районування на основі врахування зональності та азональності геокомплексів. *Actual aspects of development in the context of globalization. IX Міжнародна науково-практична конференція*. 23-24 березня 2020 р., Флоренція, Італія. С. 255 – 257. URL: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2020/03/IX-Conference-23-24-Florence-Italy.pdf>

113. Савенко В. Я., Кватадзе А.І. Удосконалення методології встановлення розрахункових схем регулювання вологонакопичення в дорожній конструкції. *LXXVI наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів*

*університету : тези доповідей.* Київ: НТУ, 2020. С. 123. URL: <http://vstup.ntu.edu.ua/konf-76.pdf>

114. Глагольев А. А. Разработка комплексной защиты земляного полотна автодорог от переувлажнения атмосферными сточными водами: автореф. дис. канд. техн. наук. Воронеж, 2007.

115. Семенова Т.В. Совершенствование метода проектирования системы поверхностного водоотвода автомобильных и городских дорог по условиям обеспечения безопасности движения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2011.

116. PCC 2013, Climate change 2013: The physical science basis. Fifth Assessment Report (AR5) Working Group 1.

117. Классификация и кластер. Под ред. Дж. Вэн Райзина. М.: Мир, 1980. 390 с.

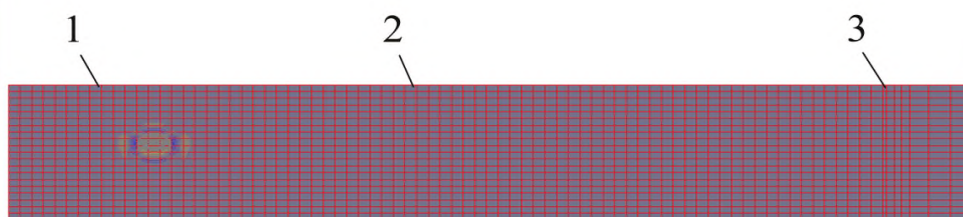
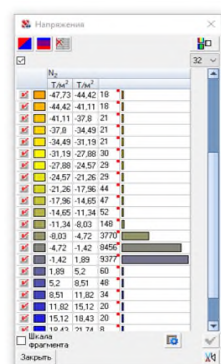
118. Дюран Б., Оделл П. Кластерный анализ. М.: Статистика, 1977. 128 с.

119. Путренко В., Тихоход В. Використання кластерного аналізу для просторового моделювання в геоінформаційних системах. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*. 2013. Вип. 46. С. 312–319.

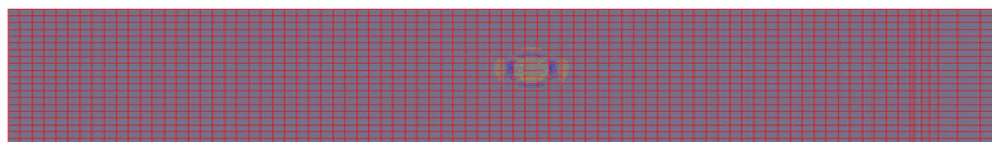
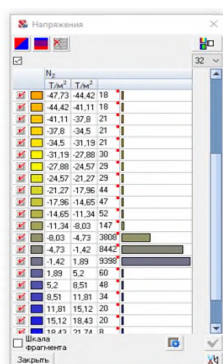
120. Комаров С. И., Полякова Т. О., Савельева Е. Б. Интегральный подход к зонированию территории региона для целей управления земельными ресурсами. *Региональная экономика: теория и практика*. 2016. № 10. С. 190 - 202.

## **ДОДАТОК А**

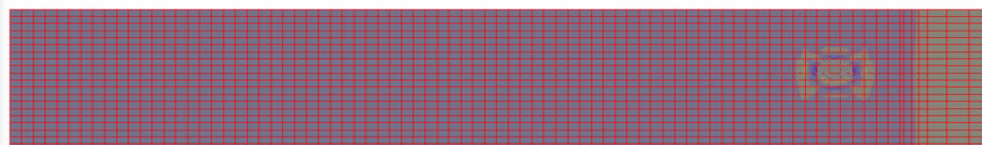
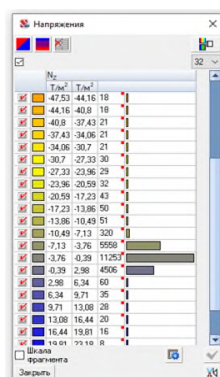
### **РОЗПОДІЛ ІЗОПОЛІВ ТА ІЗОЛІНІЙ НОРМАЛЬНИХ НАПРУЖЕНЬ ТА ДЕФОРМАЦІЙ У ДОРОЖНІЙ КОНСТРУКЦІЇ**



а)



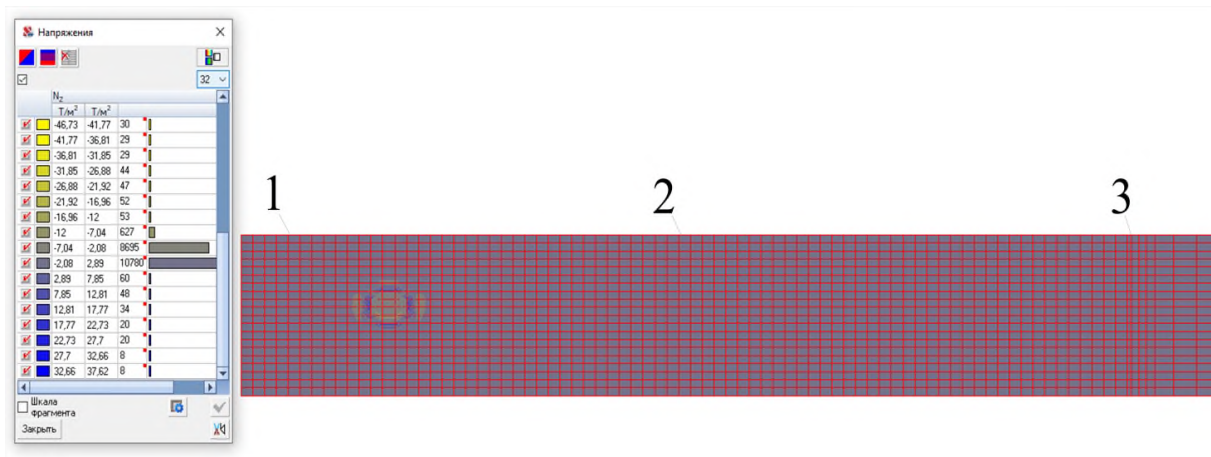
б)



в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

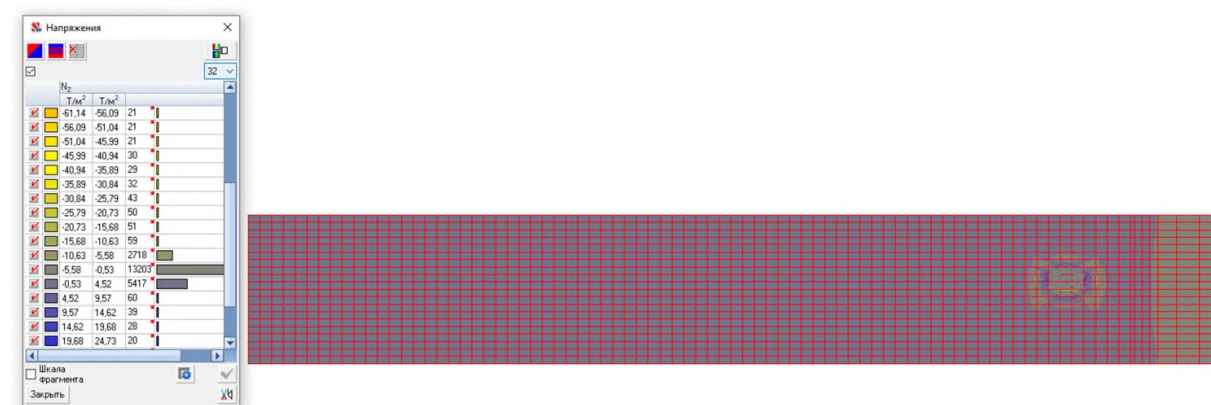
Рисунок А.1 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції I категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 3,12 м від осі дороги, б) на відстані 10,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя (зображення зверху до низу)



а)



б)

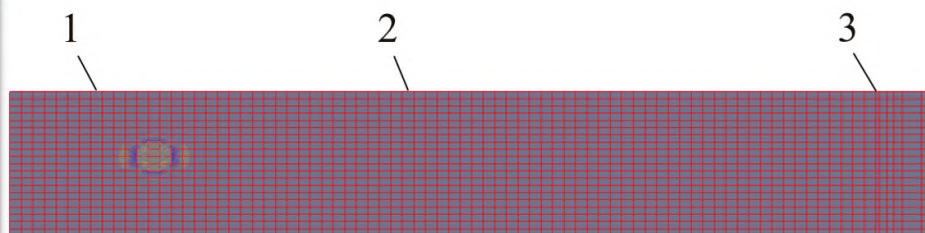
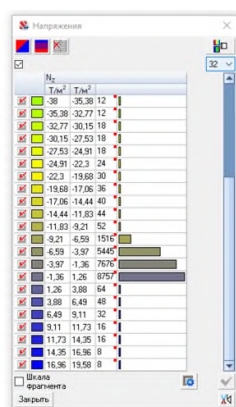


в)

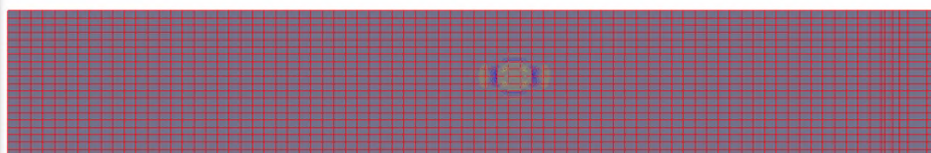
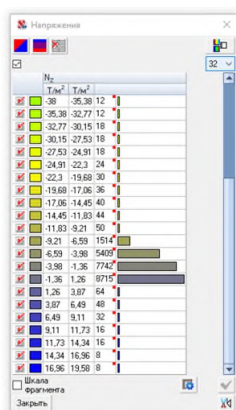
1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

Рисунок А.2 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції I категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 3,12 м від осі дороги, б) на відстані 10,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя (зображення зверху до низу)

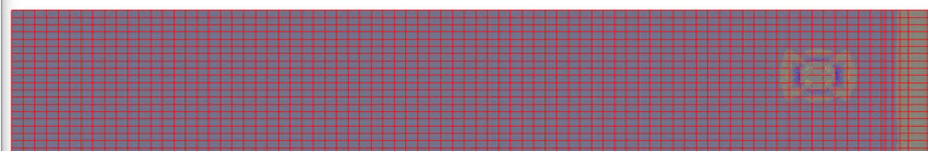
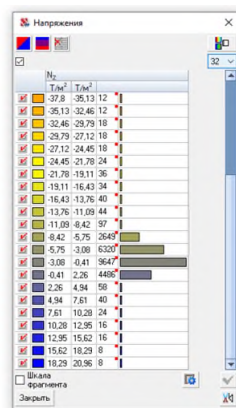




а)



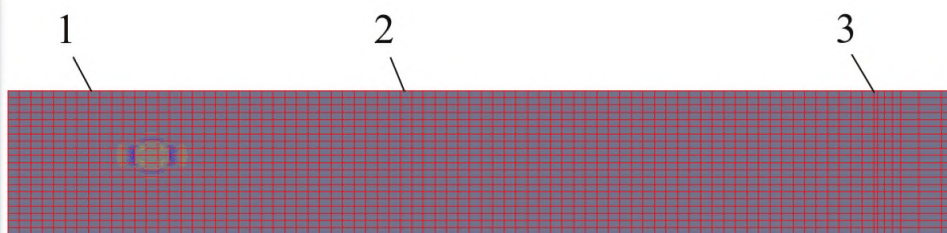
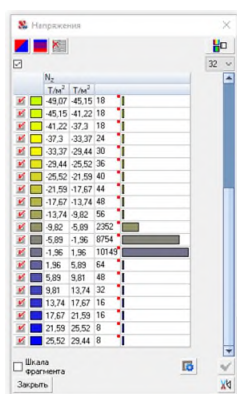
б)



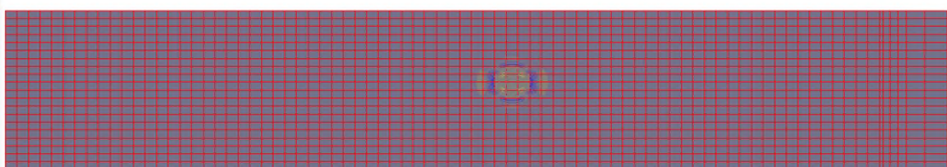
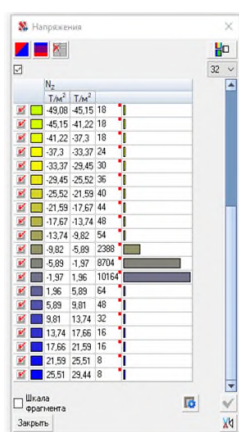
в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

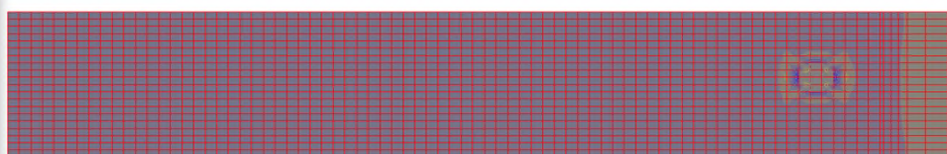
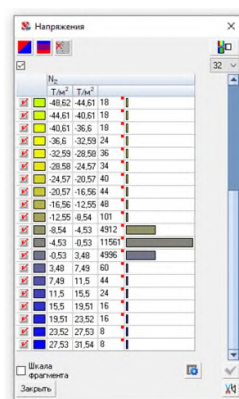
Рисунок А.3 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції I категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 3,12 м від осі дороги, б) на відстані 10,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя (зображення зверху до низу)



а)



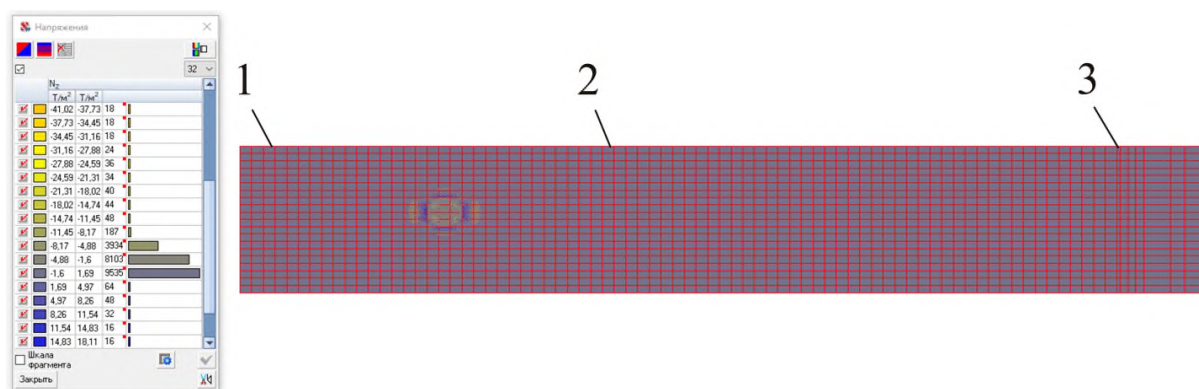
б)



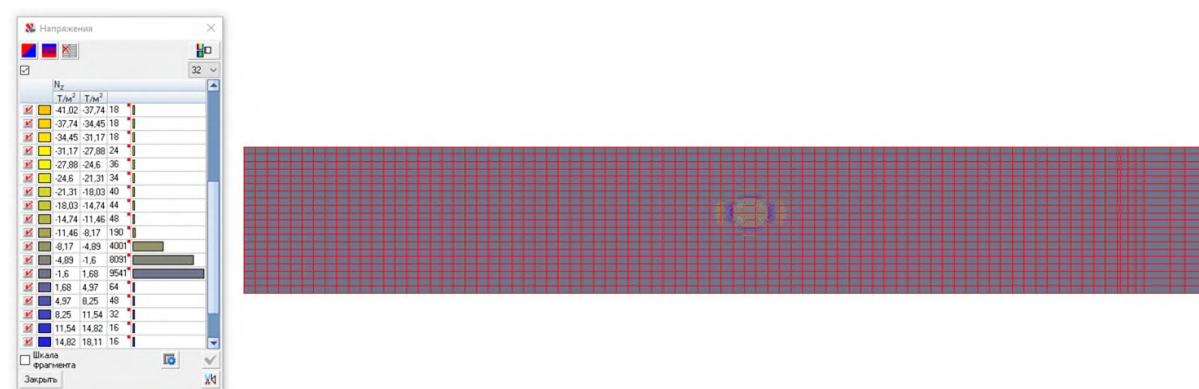
в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

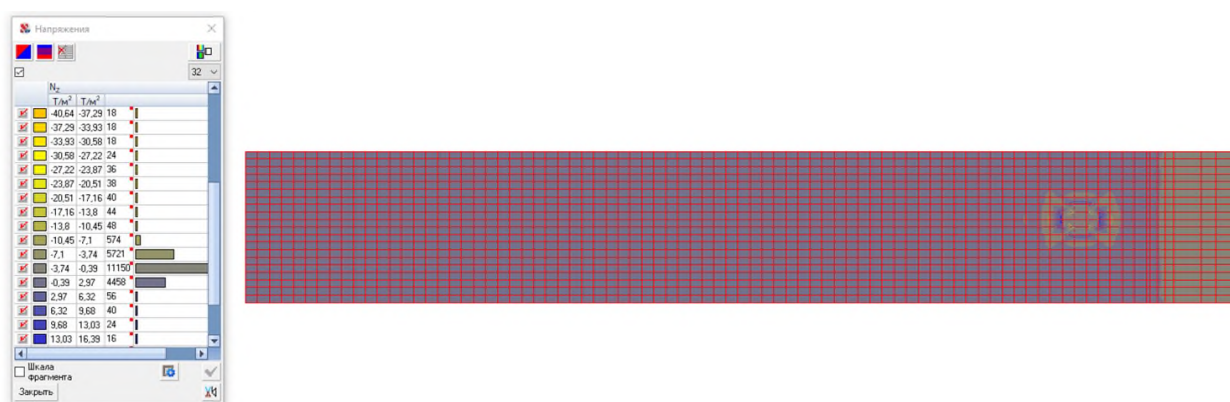
Рисунок А.4 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції I категорії з піщаним дренажним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 3,12 м від осі дороги, б) на відстані 10,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя (зображення зверху до низу)



а)



б)

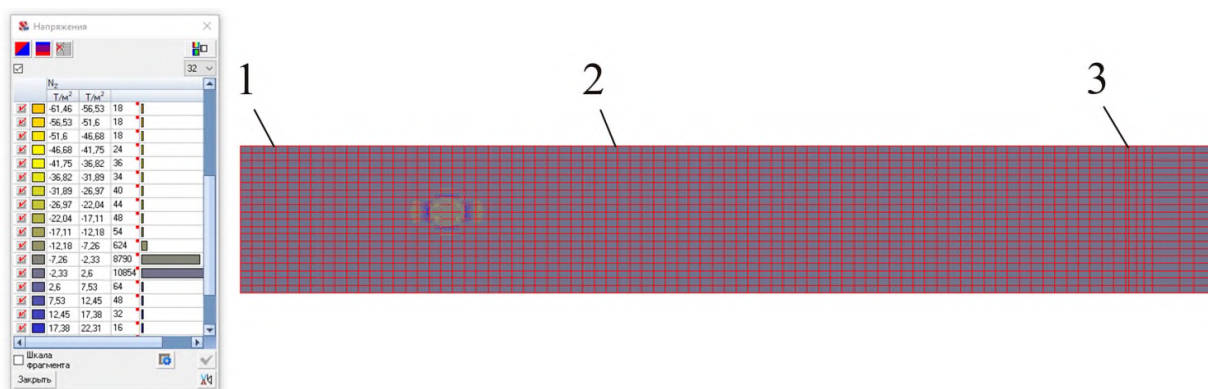


в)

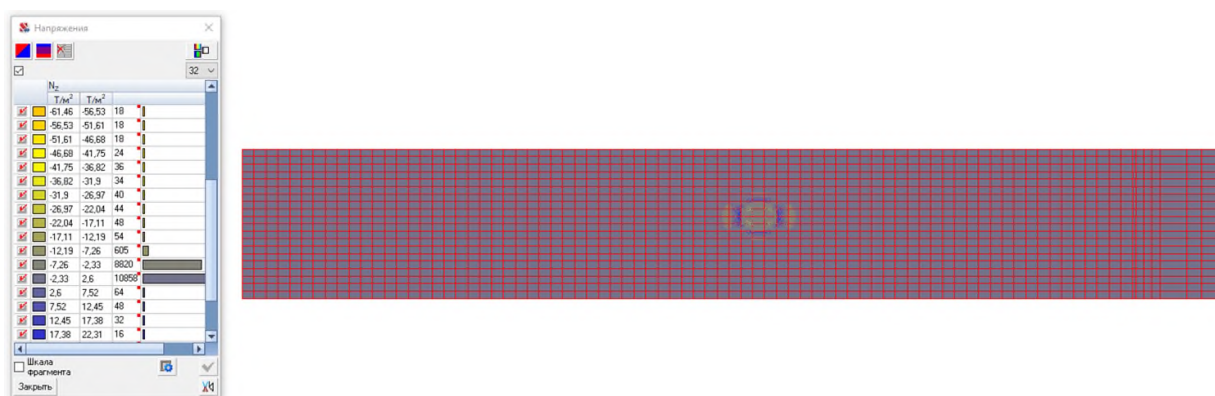
1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

Рисунок А.5 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції I категорії з щебеневим дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 3,12 м від осі дороги, б) на відстані 10,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя (зображення зверху до низу)

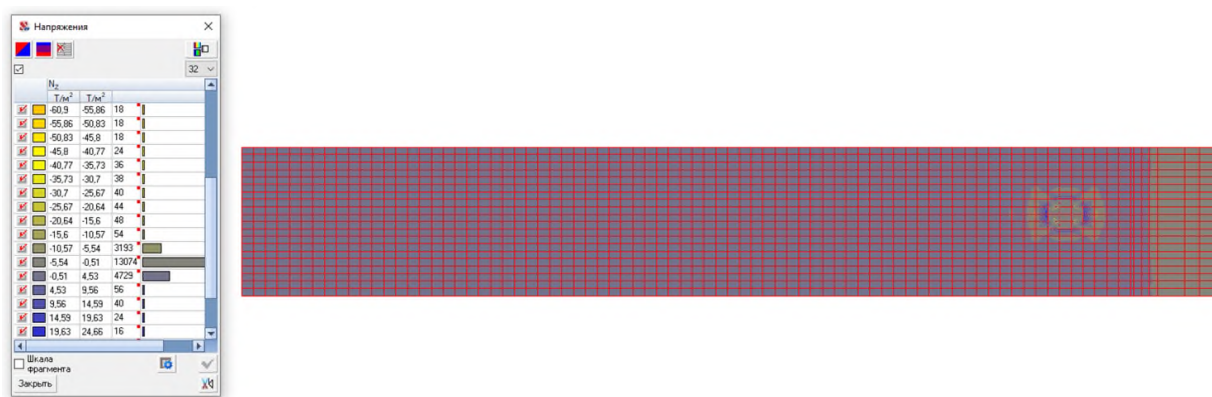




а)



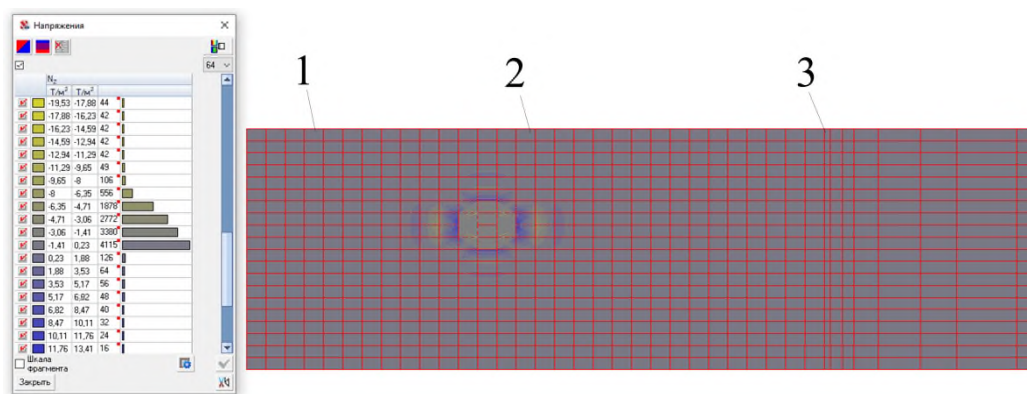
б)



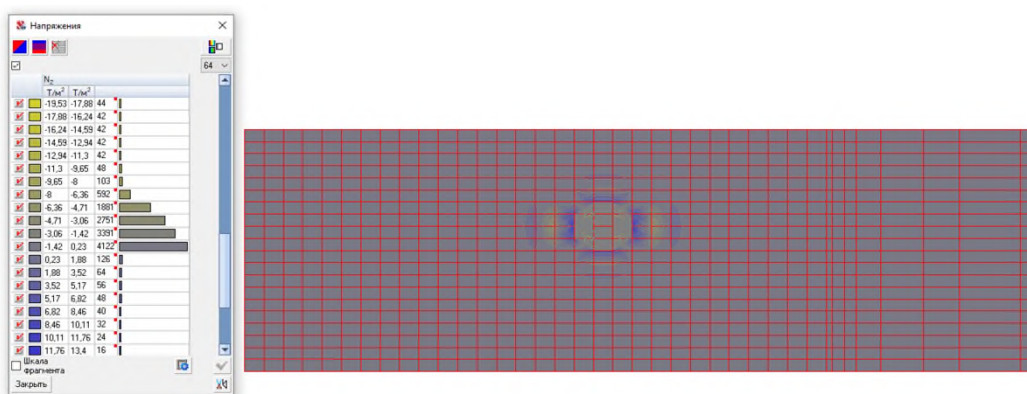
в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

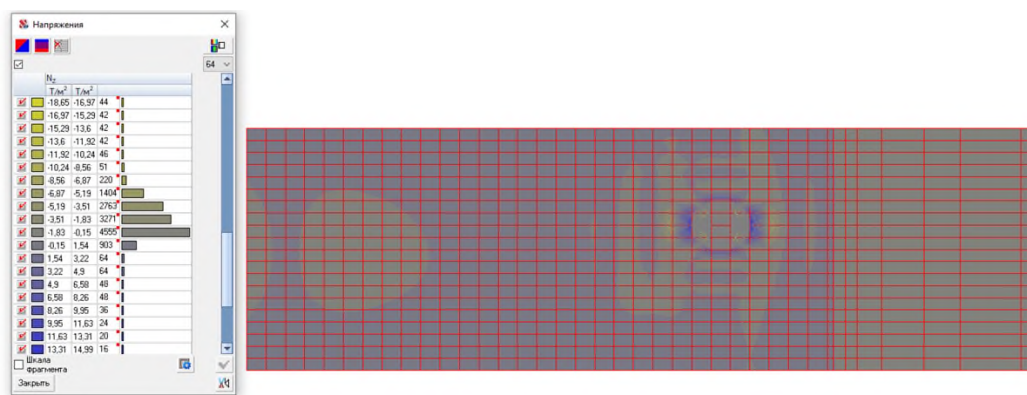
Рисунок А.6 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції I категорії з щебеним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 3,12 м від осі дороги, б) на відстані 10,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя (зображення зверху до низу)



а)



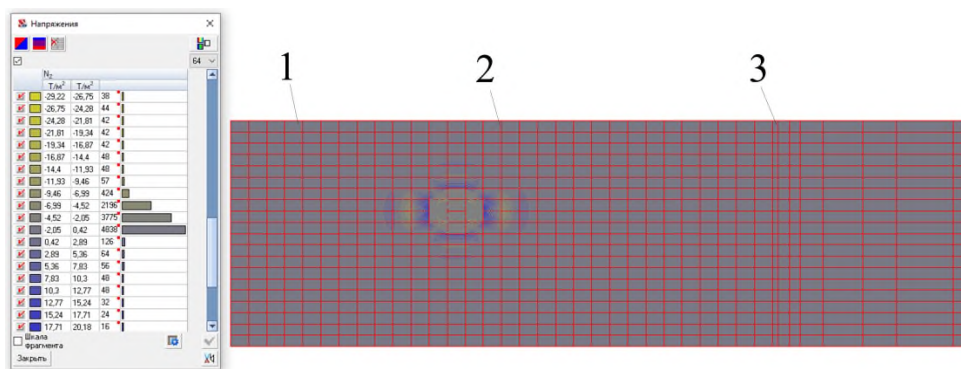
б)



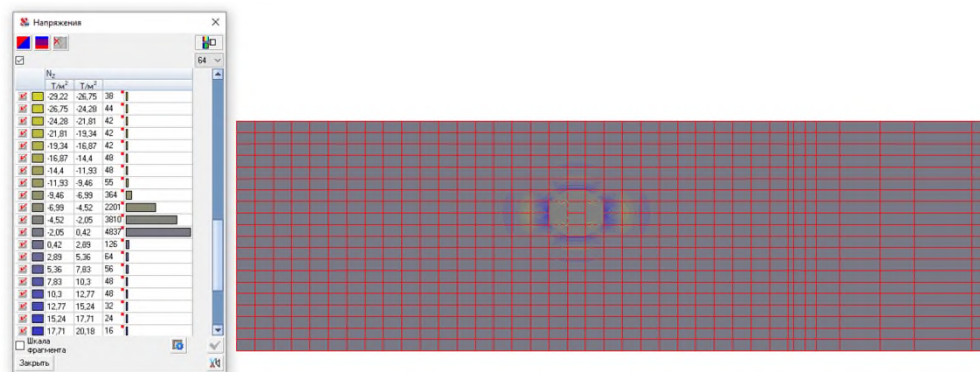
в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

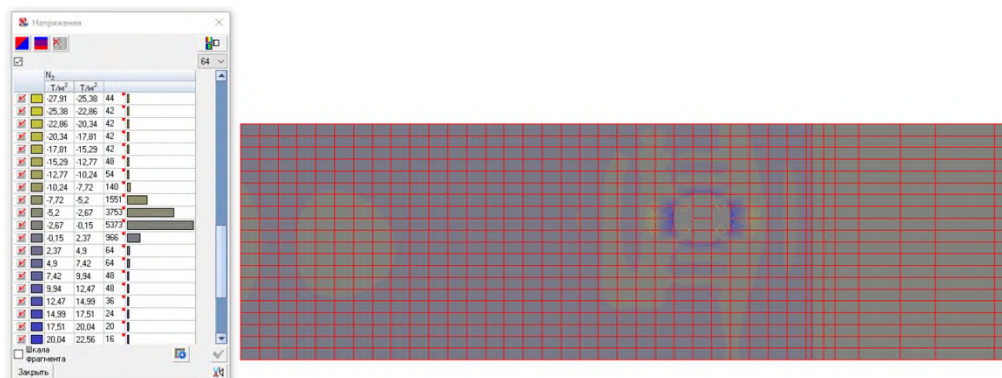
Рисунок А.7 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції II категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 2,4 м від осі дороги, б) на відстані 2,8 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя (зображення зверху до низу)



а)



б)

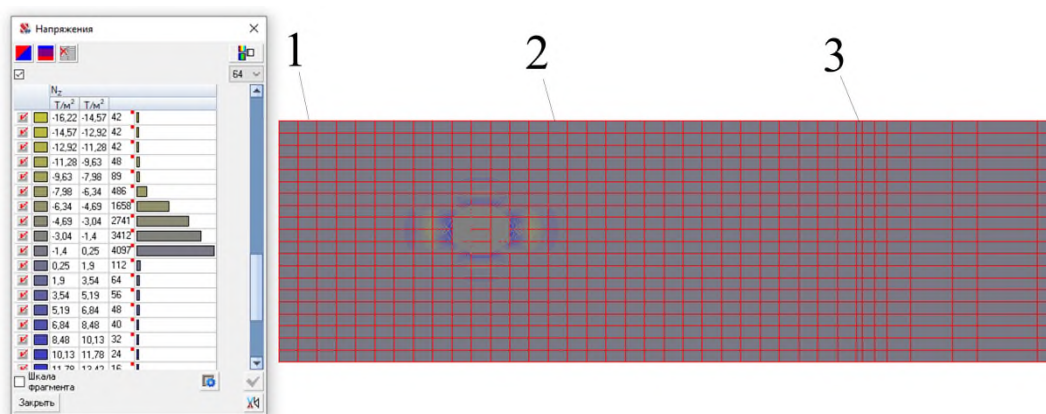


в)

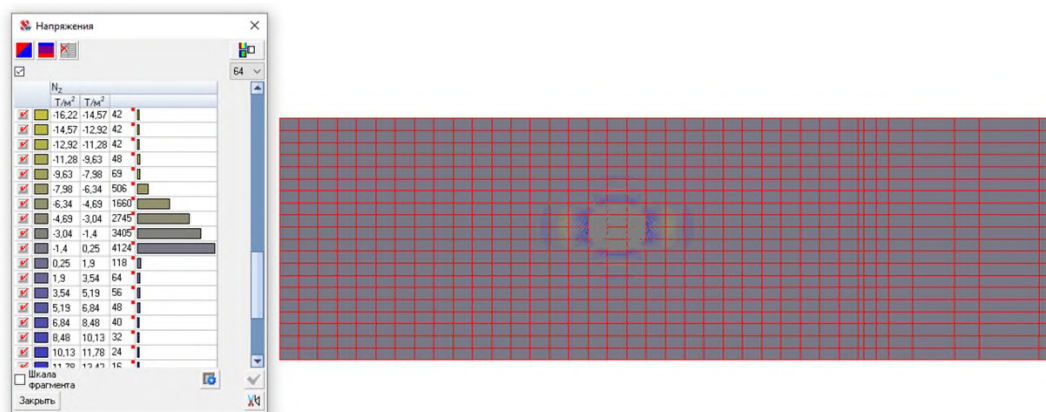
1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

Рисунок А.8 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції II категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 2,4 м від осі дороги, б) на відстані 2,8 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя (зображення зверху до низу)

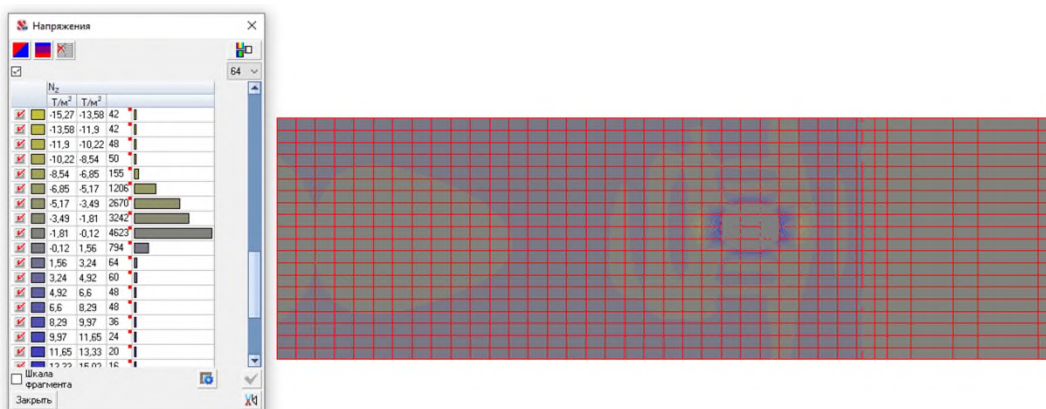




а)



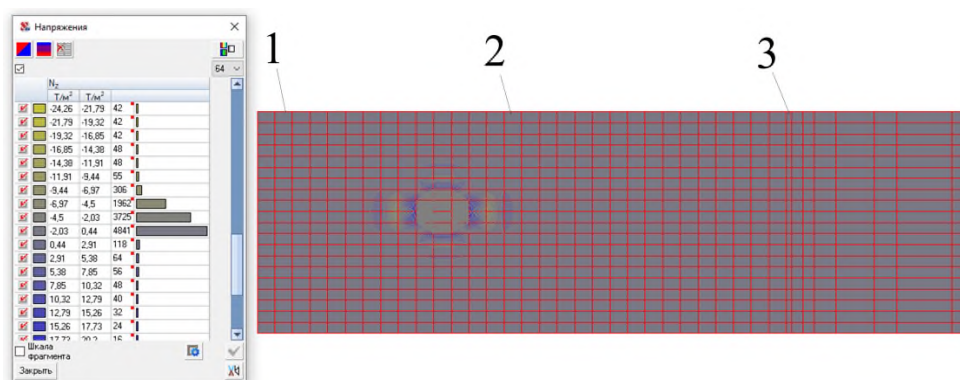
б)



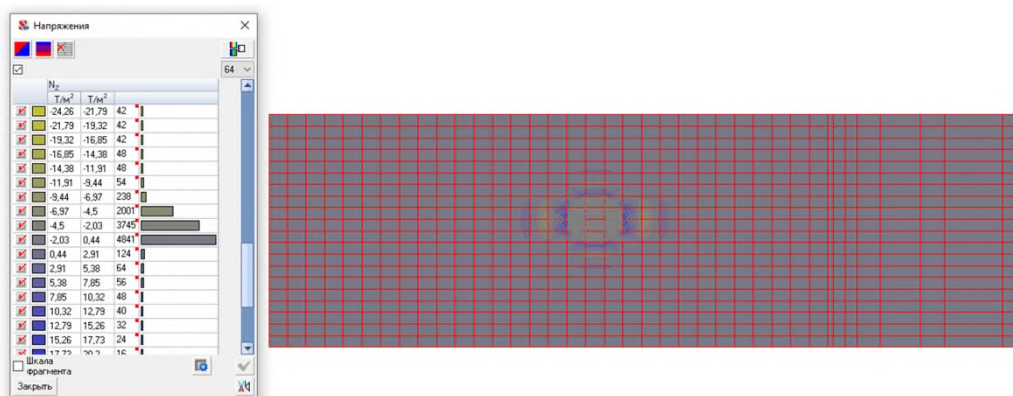
в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

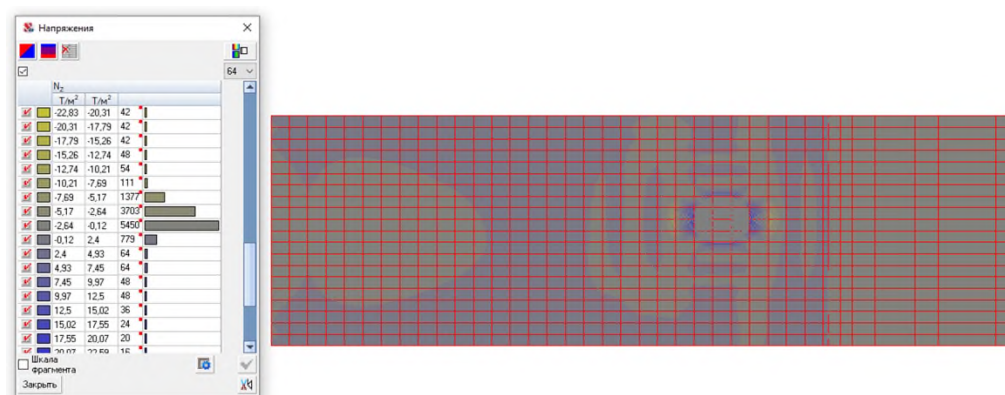
Рисунок А.9 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції II категорії з щебеневим дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 2,4 м від осі дороги, б) на відстані 2,8 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя (зображення зверху до низу)



а)



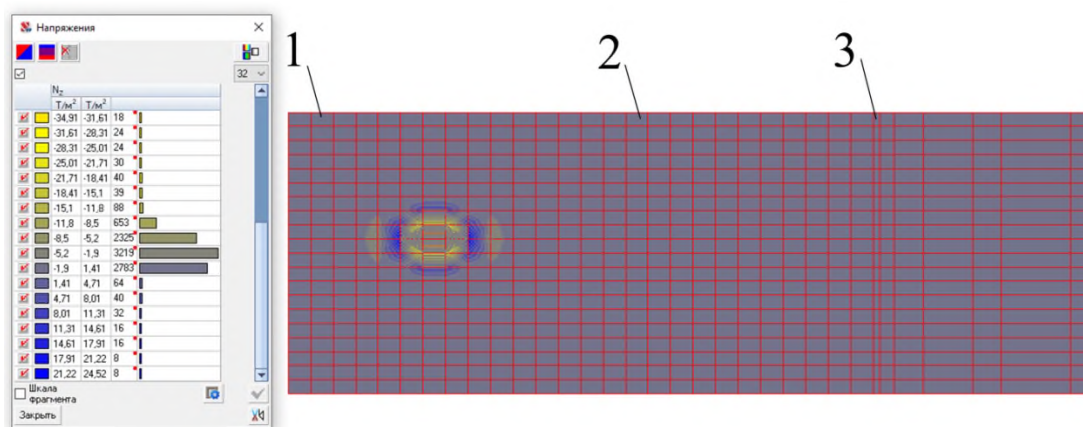
б)



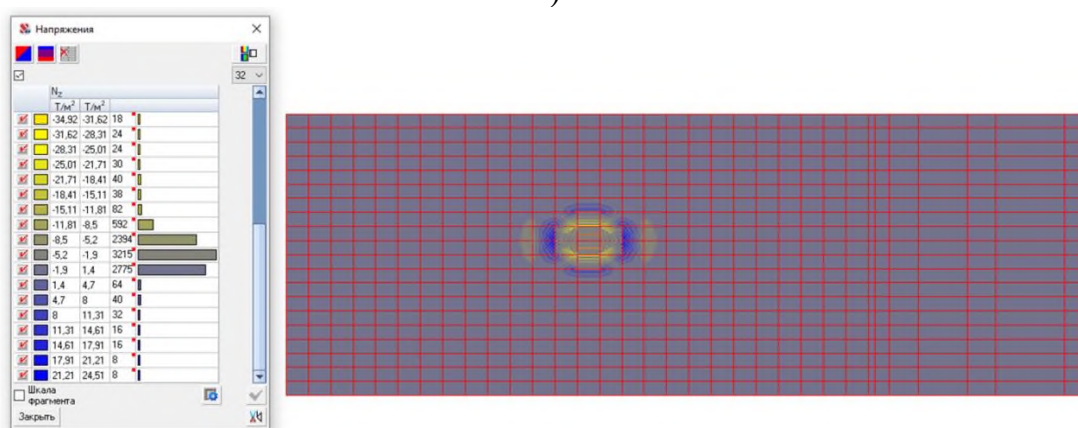
в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

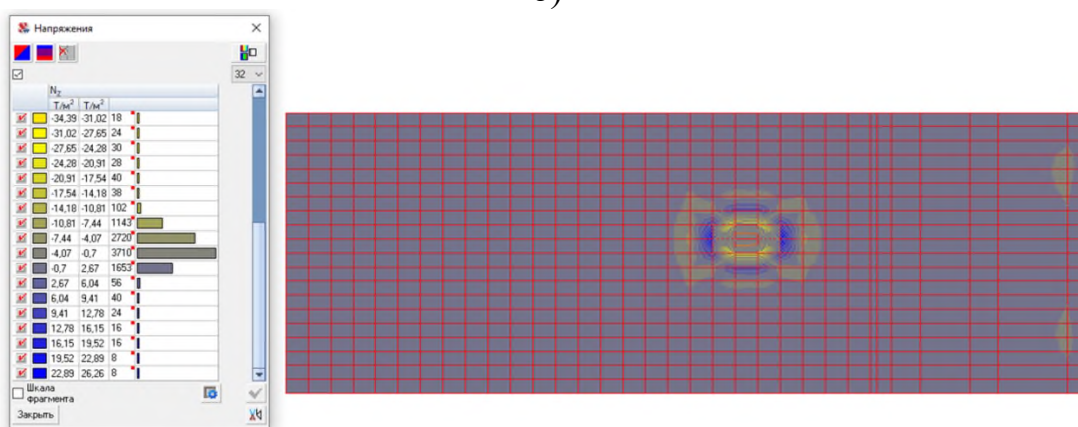
Рисунок А.10 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції II категорії з щебеневим дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 2,4 м від осі дороги, б) на відстані 2,8 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя (зображення зверху до низу)



а)



б)

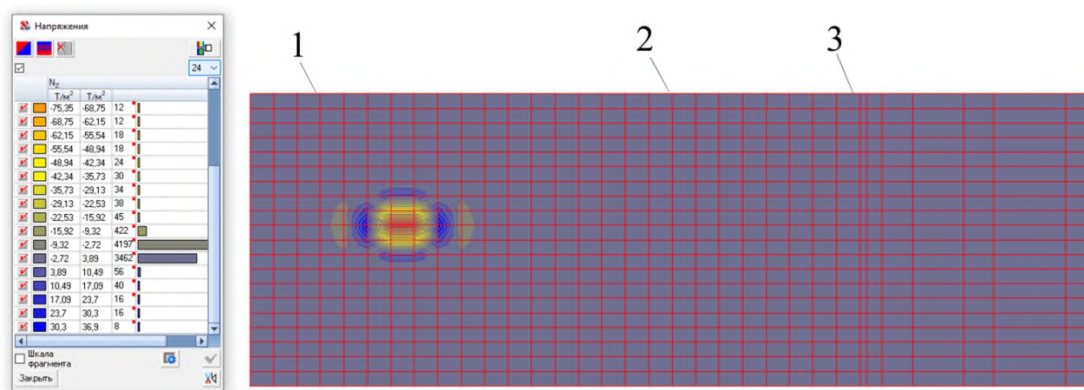


в)

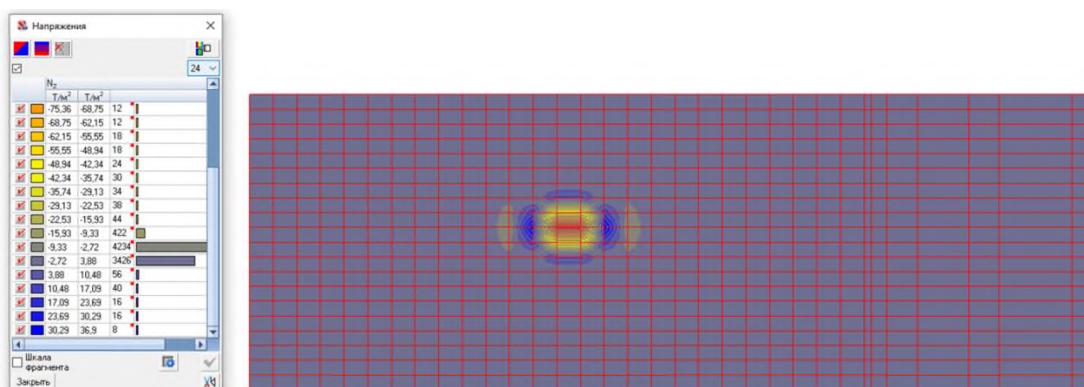
1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

Рисунок А.11 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції III категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 1,68 м від осі дороги, б) на відстані 3,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя (зображення зверху до низу)

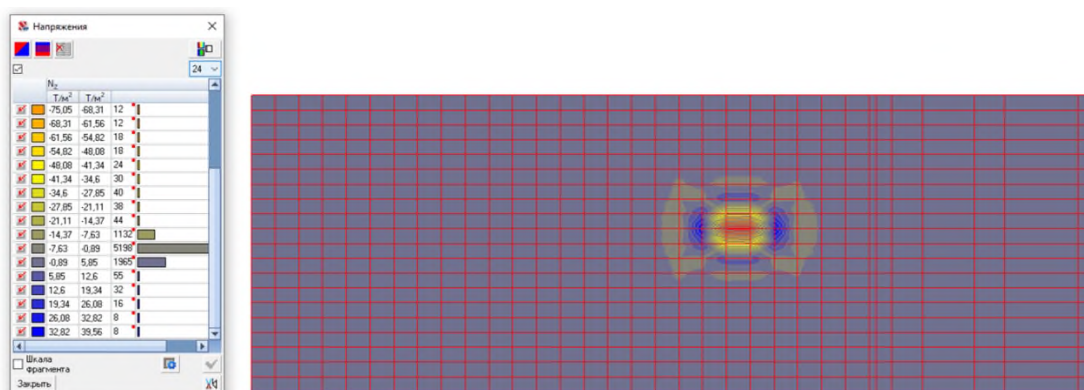




а)



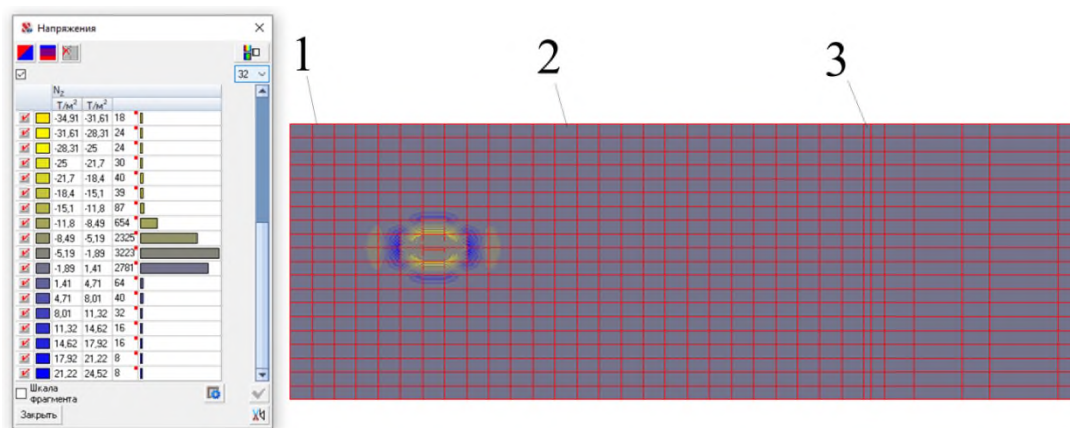
б)



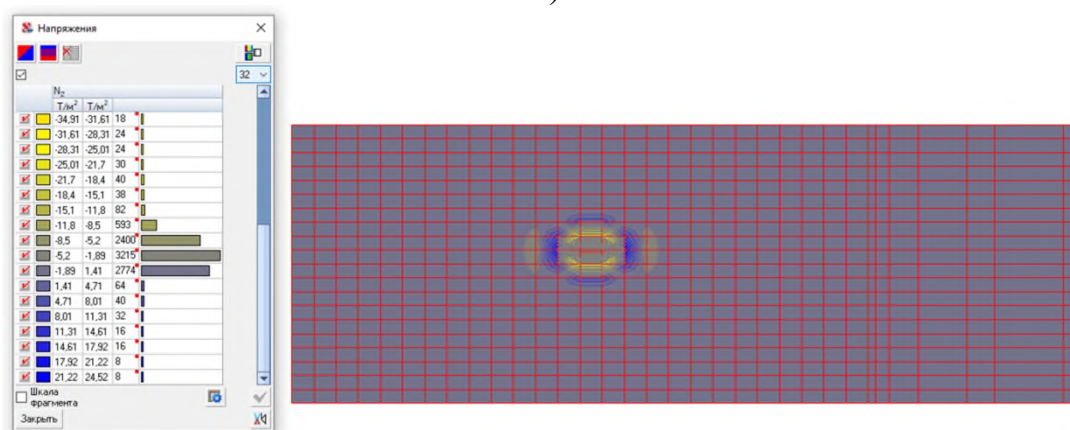
в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

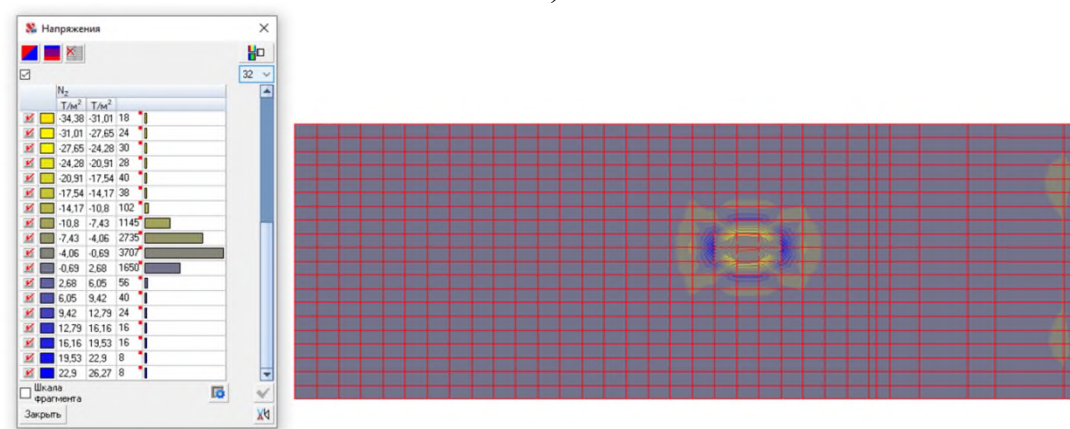
Рисунок А.12 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції III категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 1,68 м від осі дороги, б) на відстані 3,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя (зображення зверху до низу)



а)



б)

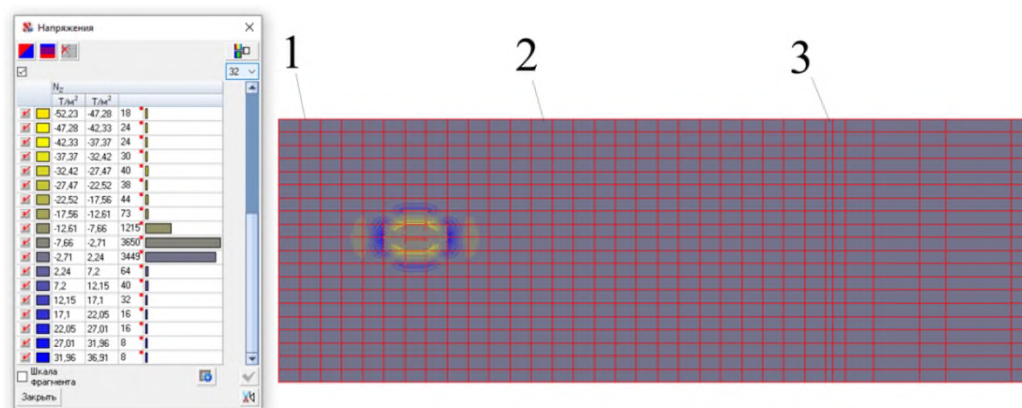


в)

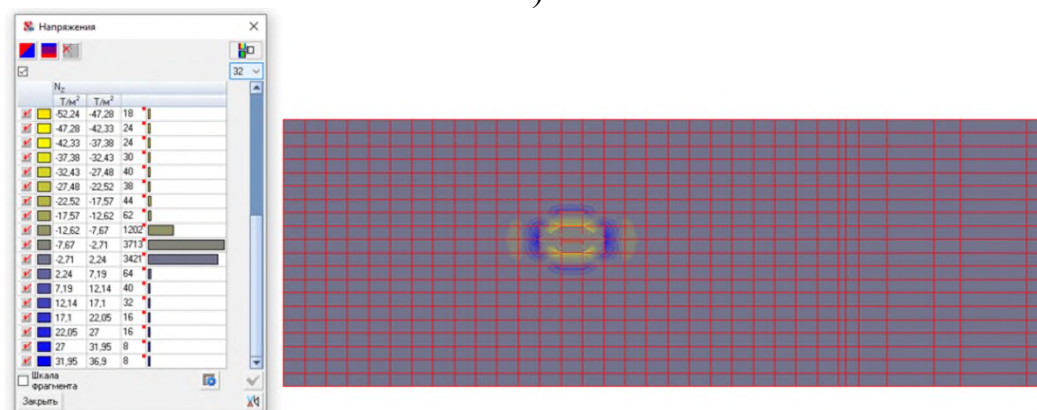
1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

Рисунок А.13 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції III категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 1,68 м від осі дороги, б) на відстані 3,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя (зображення зверху до низу)

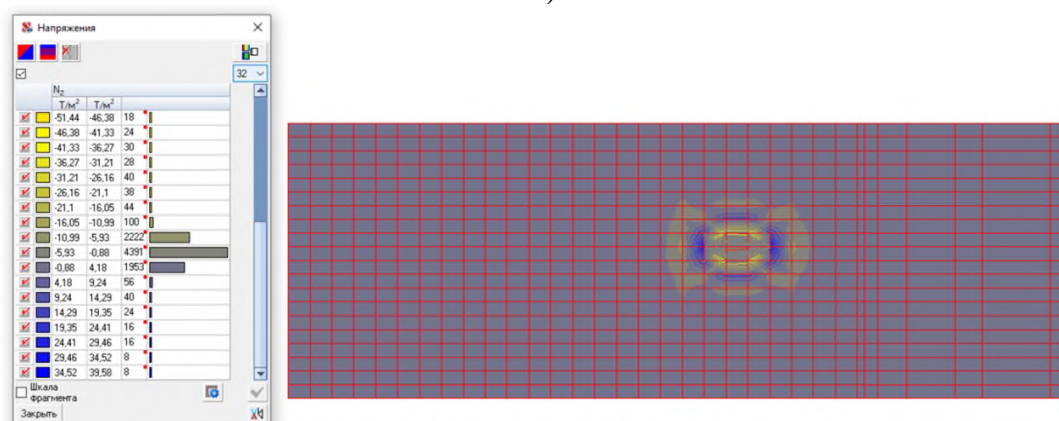




а)



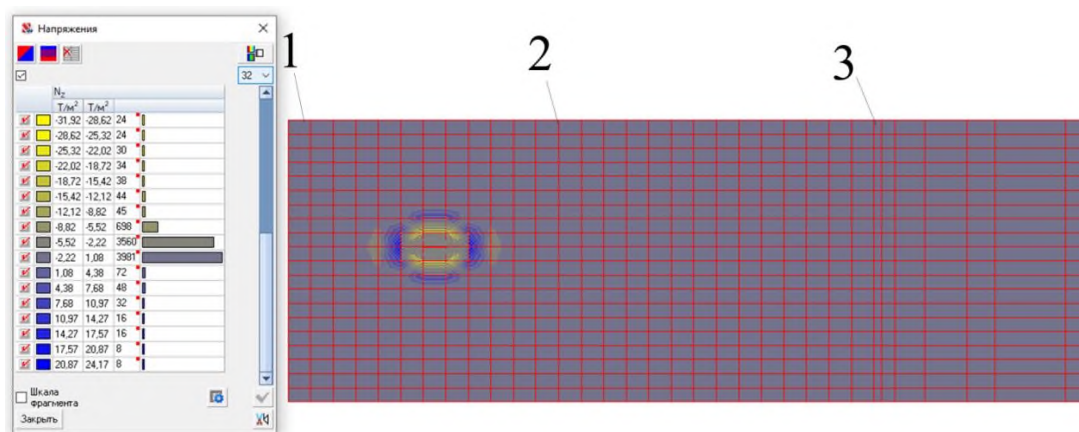
б)



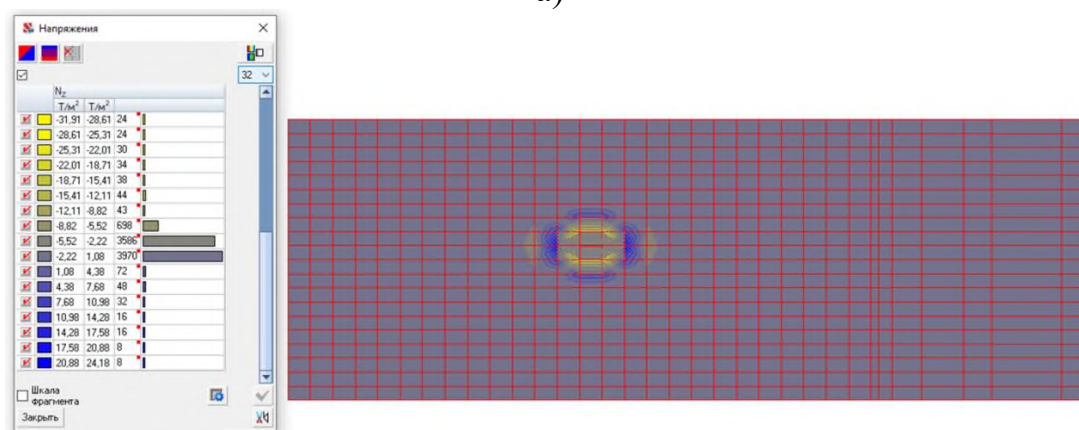
в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

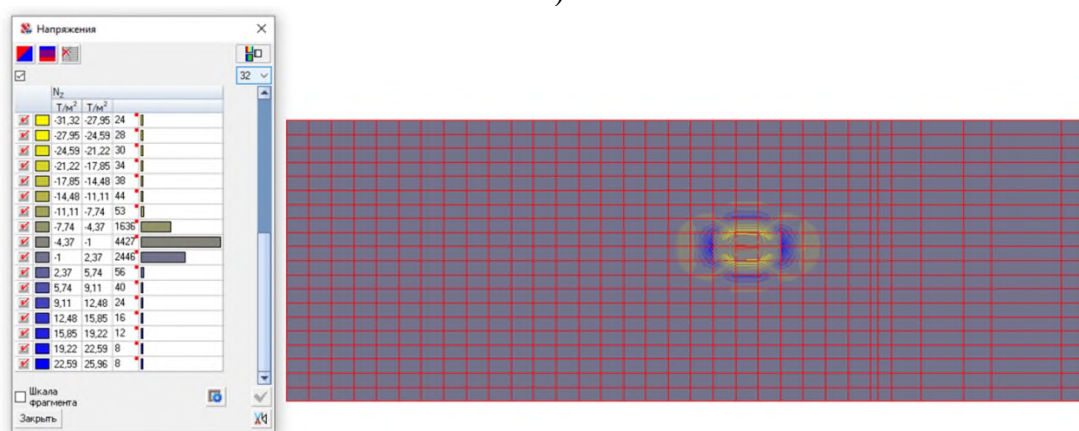
Рисунок А.14 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції III категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 1,68 м від осі дороги, б) на відстані 3,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя (зображення зверху до низу)



а)



б)

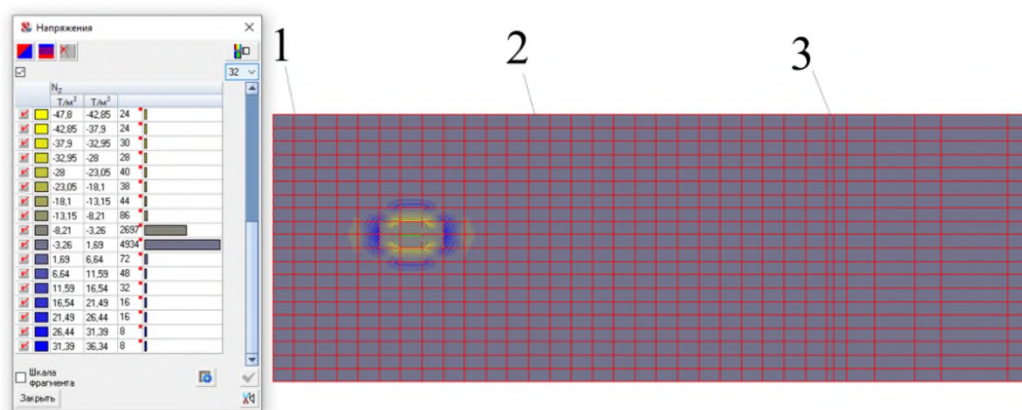


в)

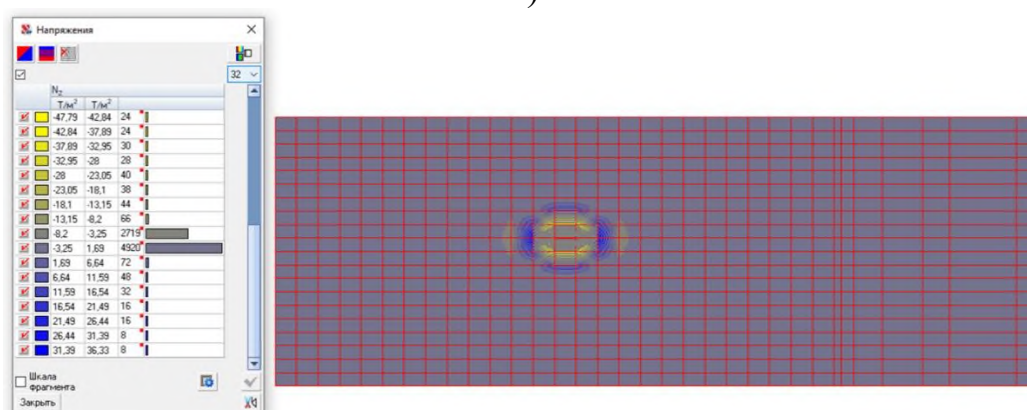
1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

Рисунок А.15 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції III категорії з щебеним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 1,68 м від осі дороги, б) на відстані 3,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя (зображення зверху до низу)

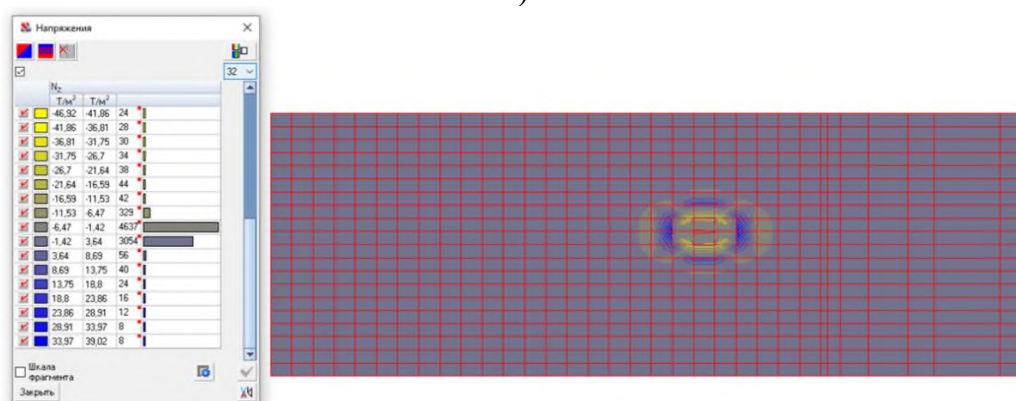




а)



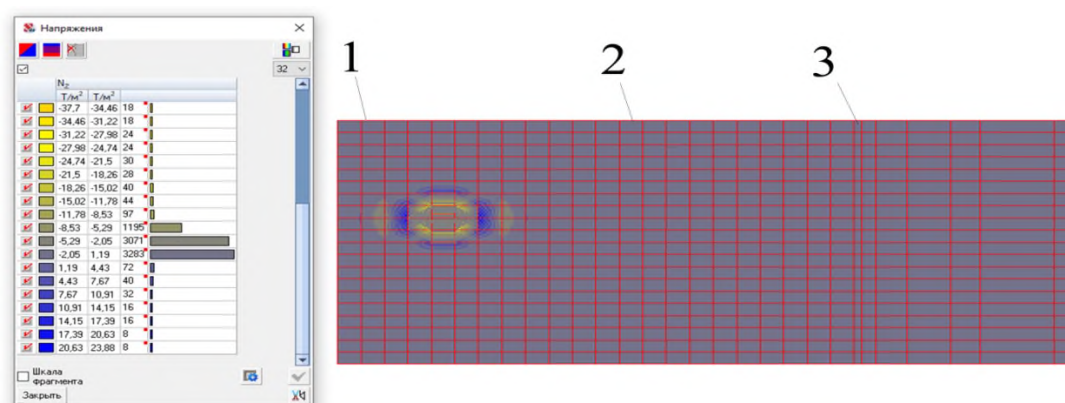
б)



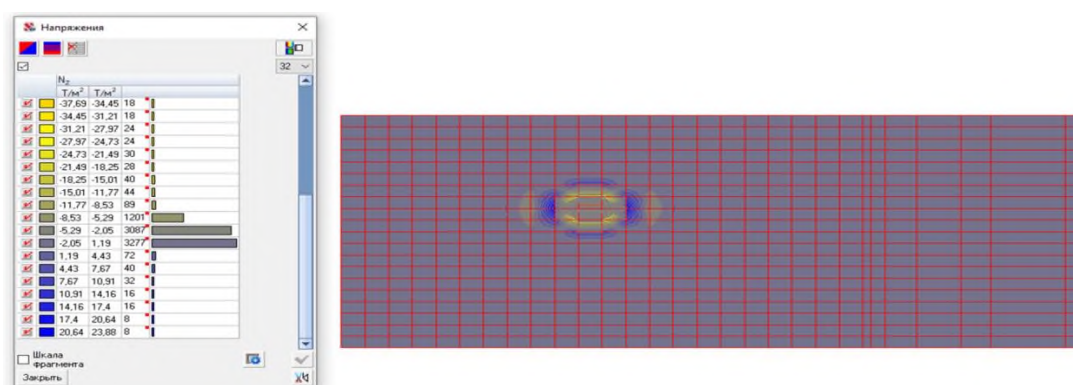
в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

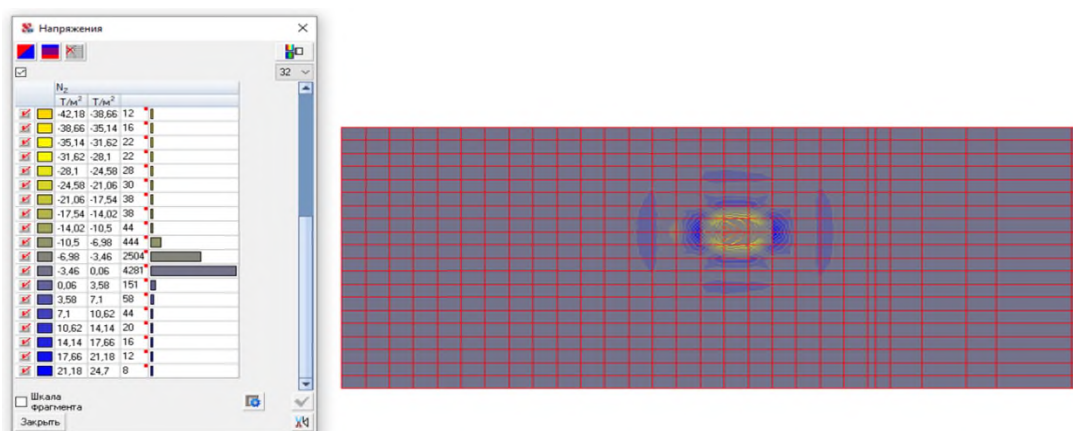
Рисунок А.16 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції III категорії з щебеним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 1,68 м від осі дороги, б) на відстані 3,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя (зображення зверху до низу)



а)



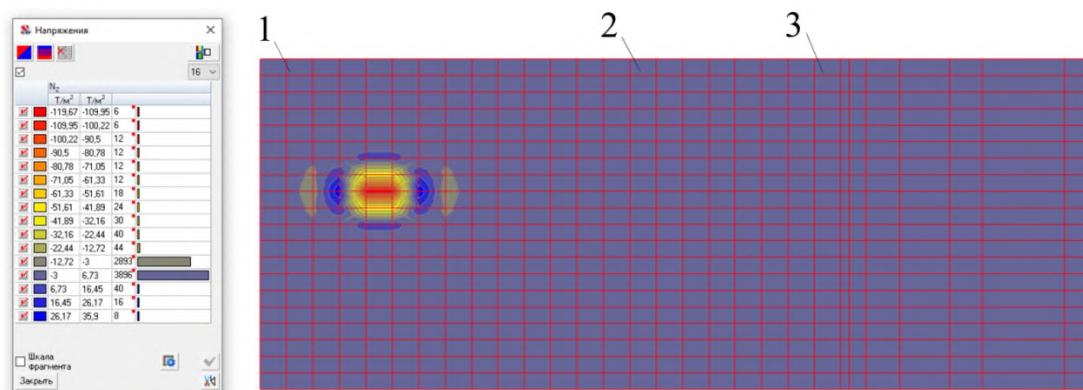
б)



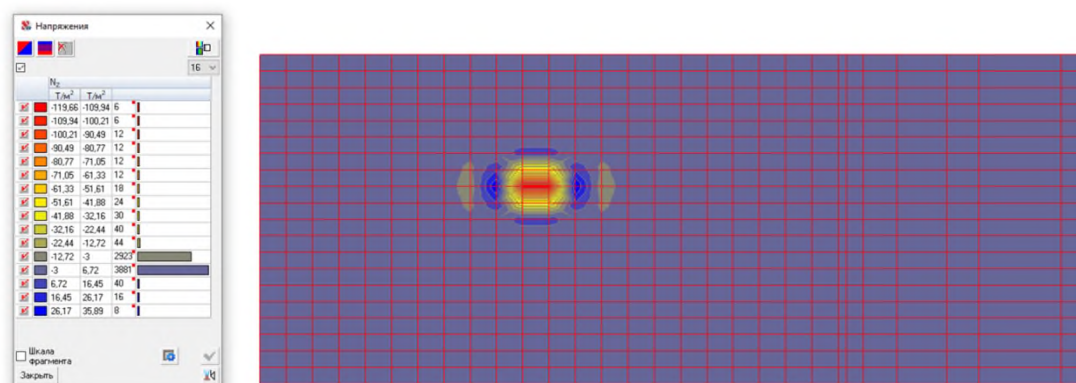
в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

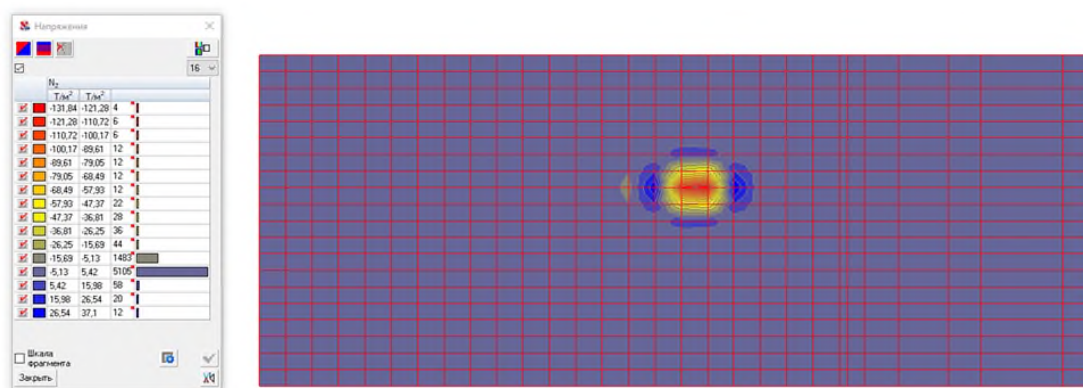
Рисунок А.17 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції IV категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 1,2 м від осі дороги, б) на відстані 2,64 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя (зображення зверху до низу)



а)



б)

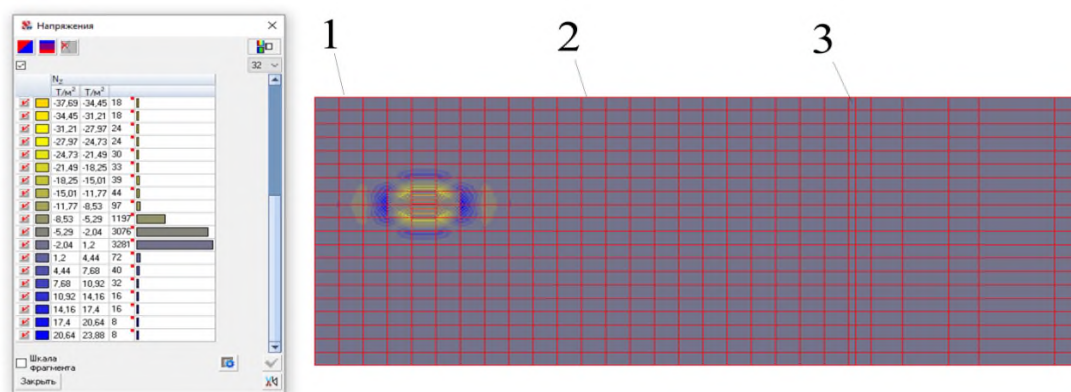


в)

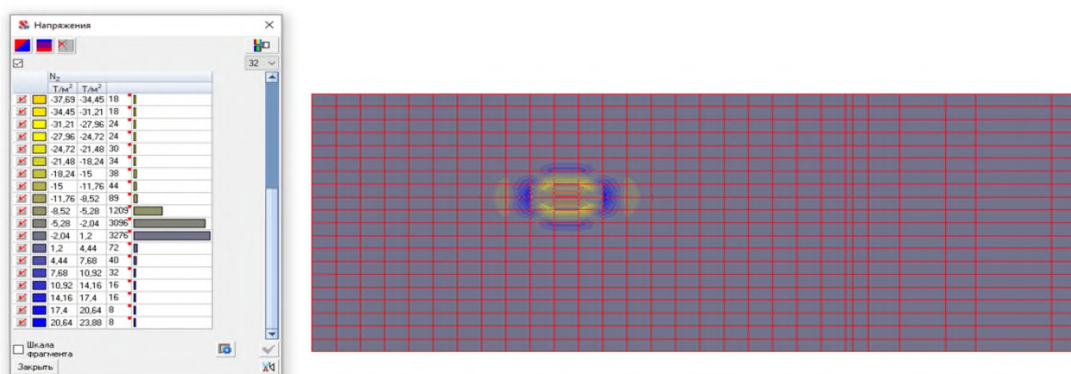
1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

Рисунок А.18 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції IV категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 1,2 м від осі дороги, б) на відстані 2,64 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя (зображення зверху до низу)

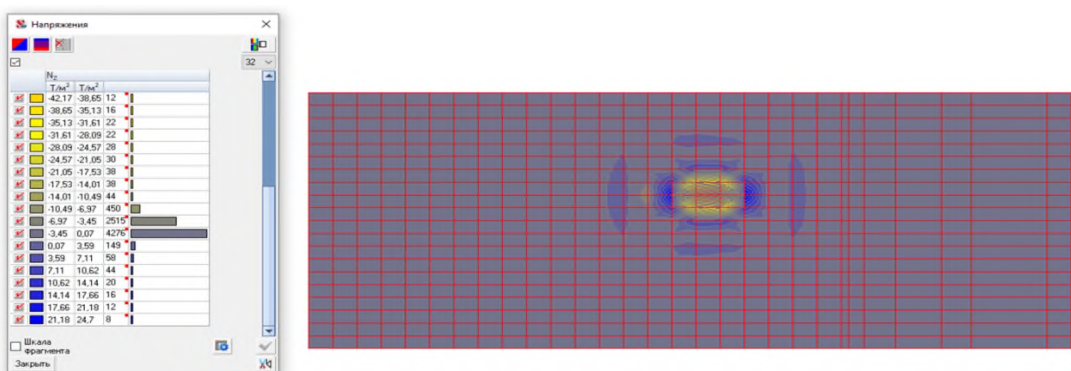




а)



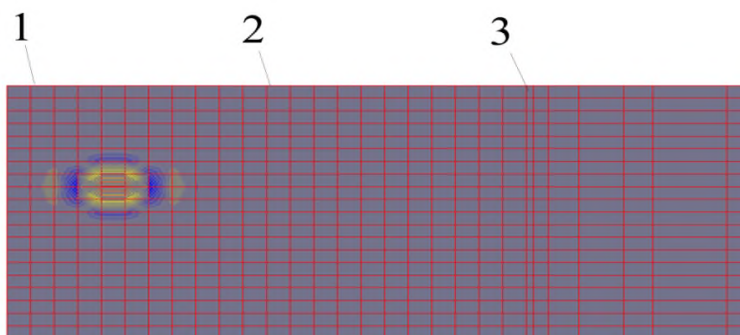
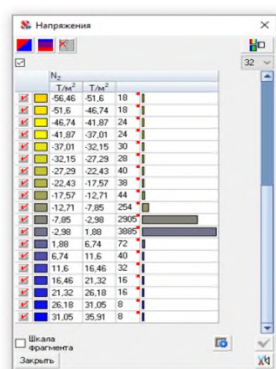
б)



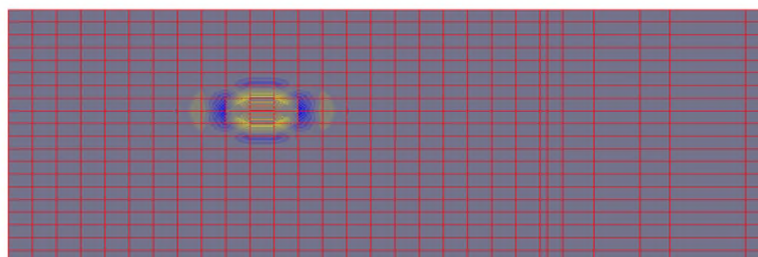
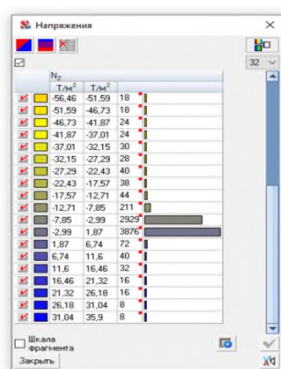
в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

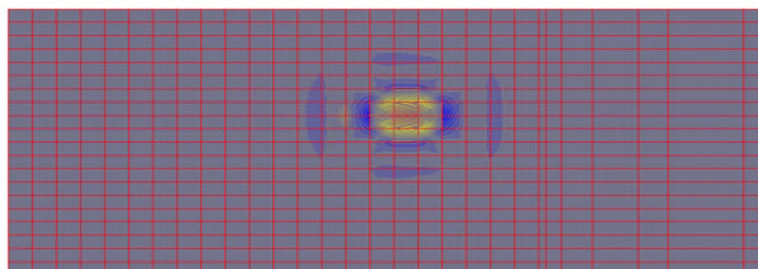
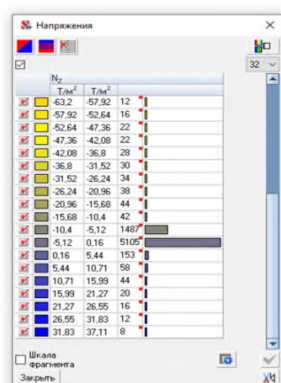
Рисунок А.19 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції IV категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 1,2 м від осі дороги, б) на відстані 2,64 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя (зображення зверху до низу)



а)



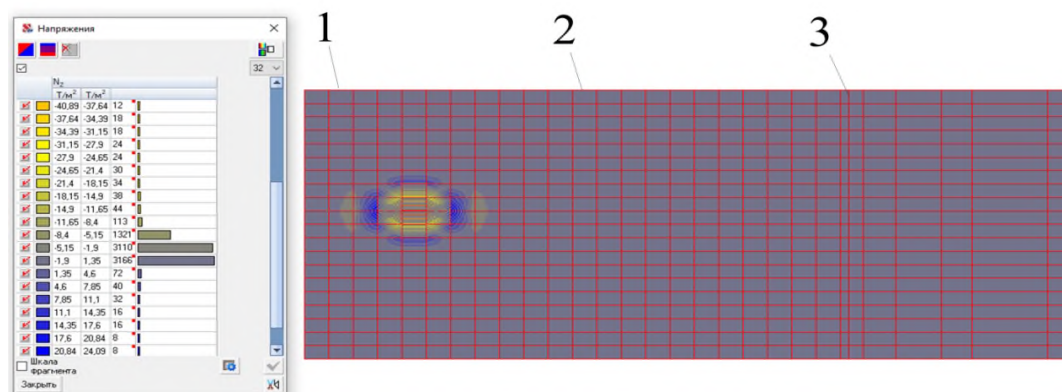
б)



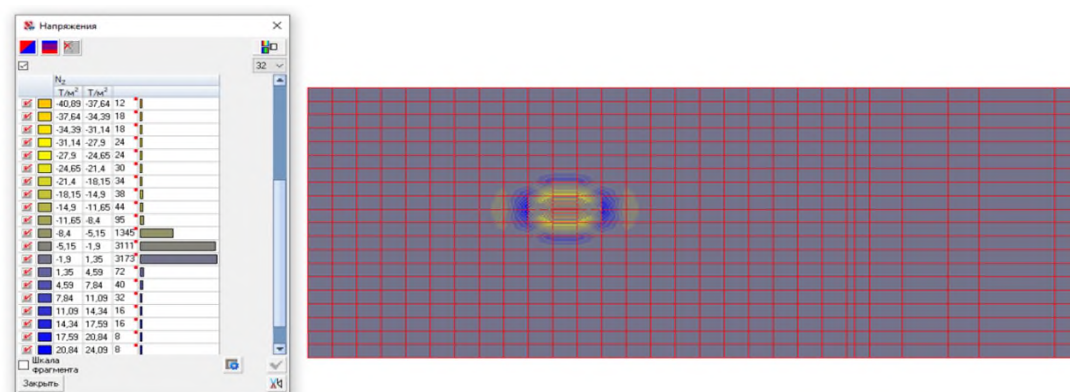
в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

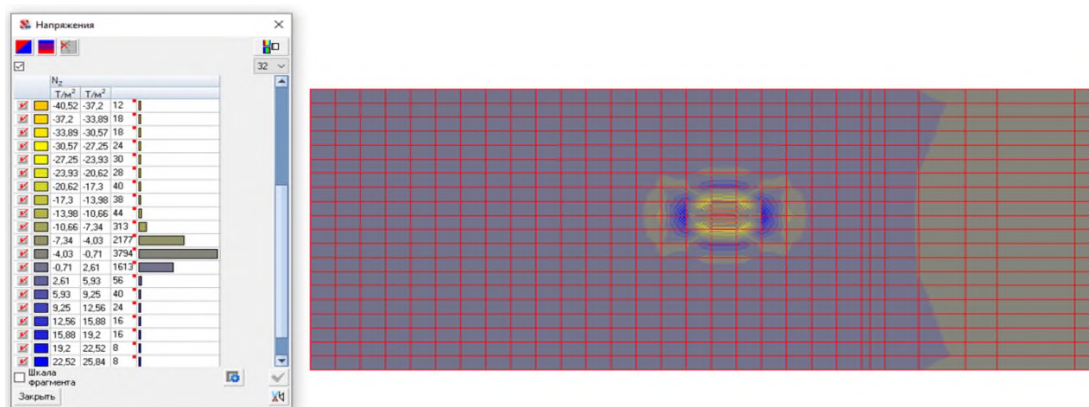
Рисунок А.20 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції IV категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 1,2 м від осі дороги, б) на відстані 2,64 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя (зображення зверху до низу)



а)



б)

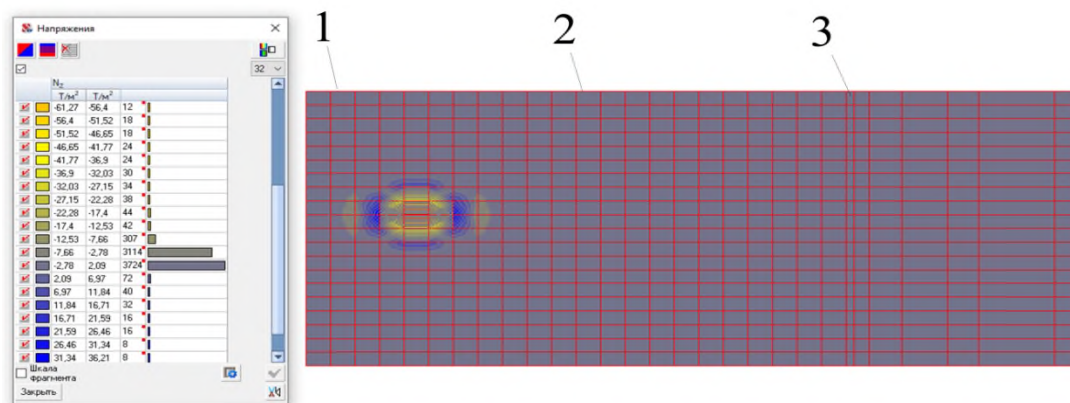


в)

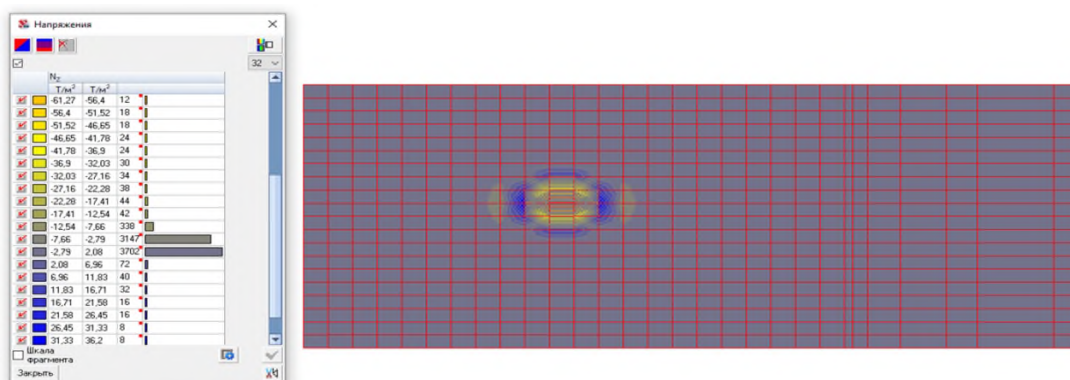
1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

Рисунок А.21 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції IV категорії з щебеним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 1,2 м від осі дороги, б) на відстані 2,64 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя (зображення зверху до низу)

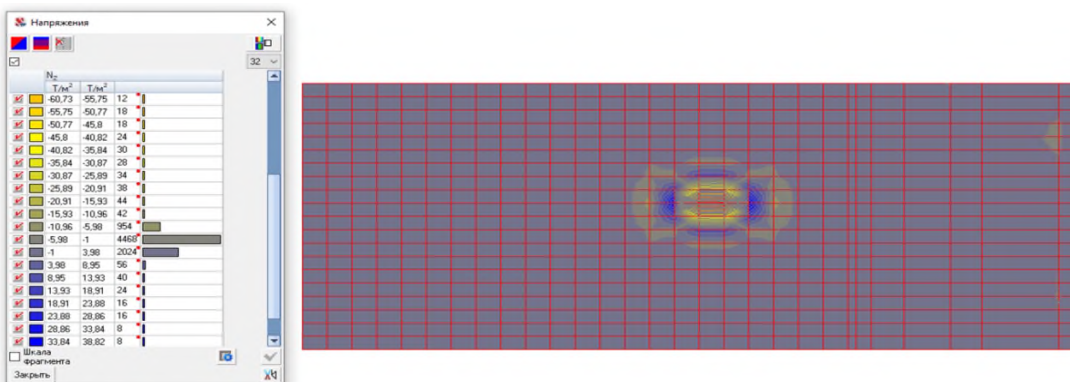




а)



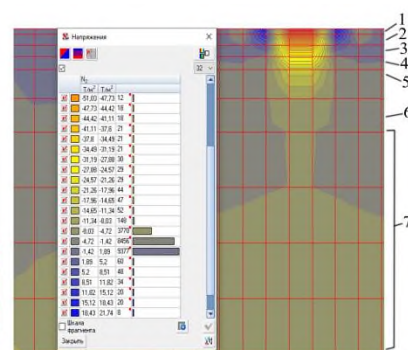
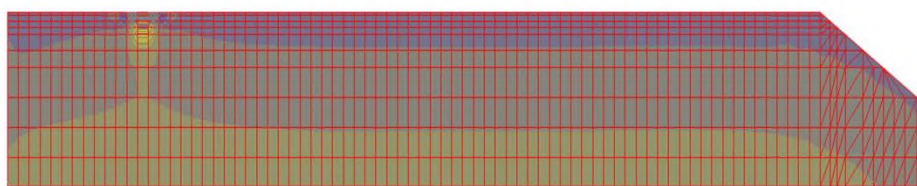
б)

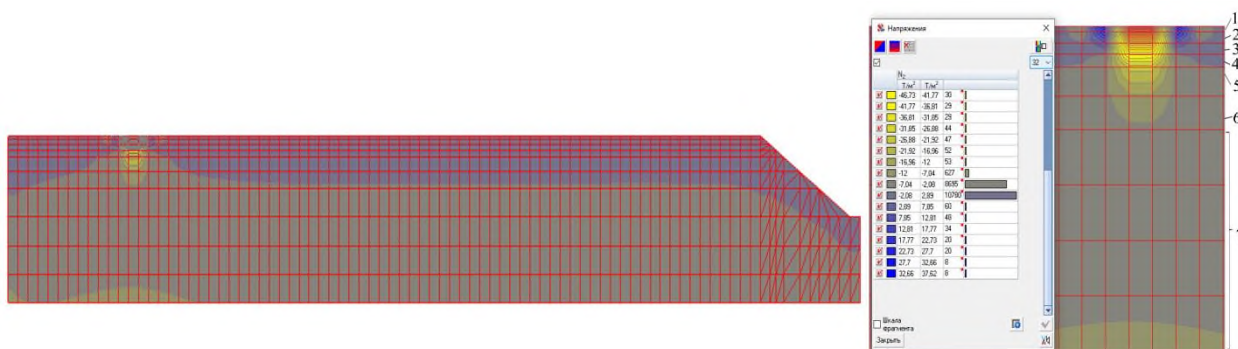


в)

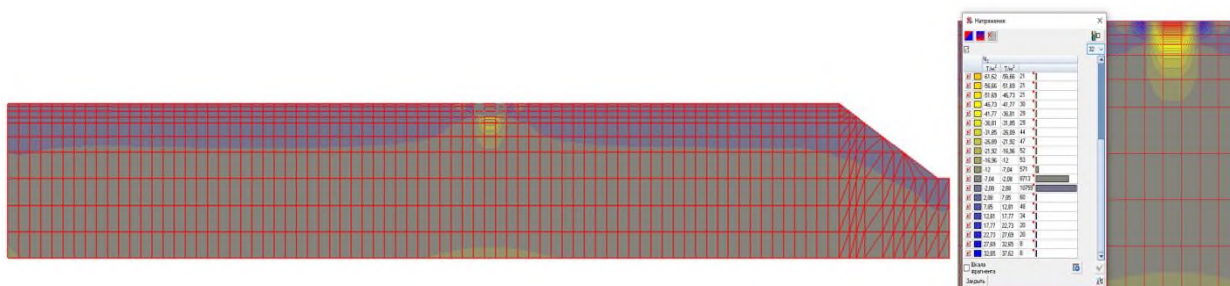
1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

Рисунок А.22 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, в дорожній конструкції IV категорії з щебневим дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 1,2 м від осі дороги, б) на відстані 2,64 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя (зображення зверху до низу)

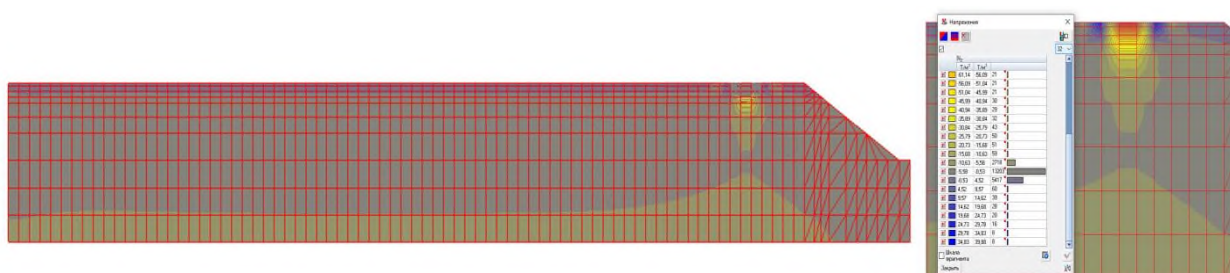




а)



б)

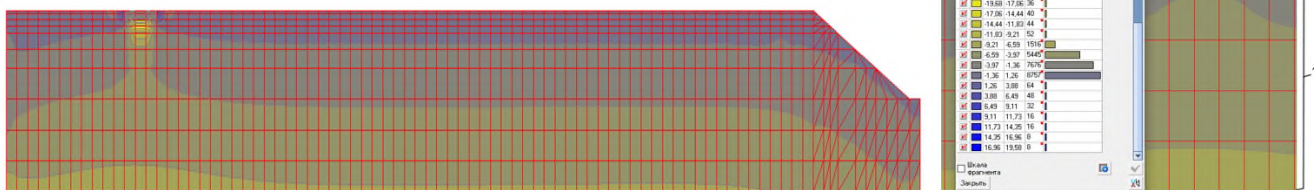


в)

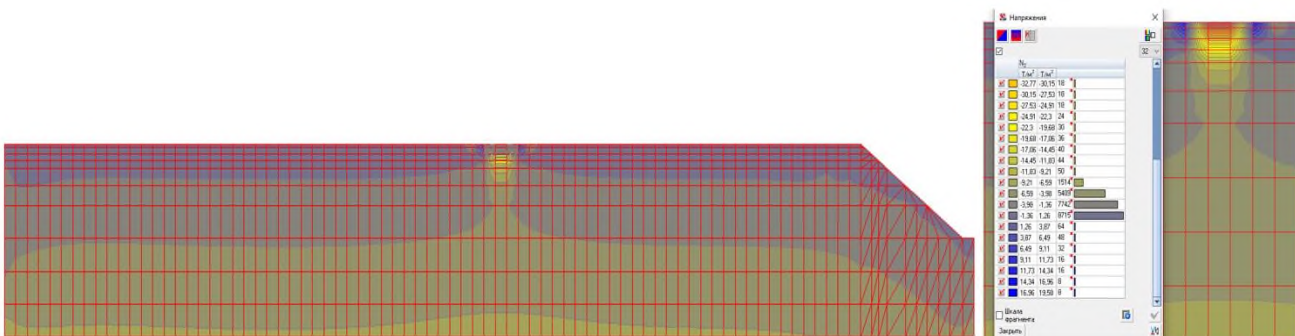
1–7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 3.1

Рисунок А.24 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах в дорожній конструкції І категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 3,12 м від осі дороги, б) на відстані 10,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя

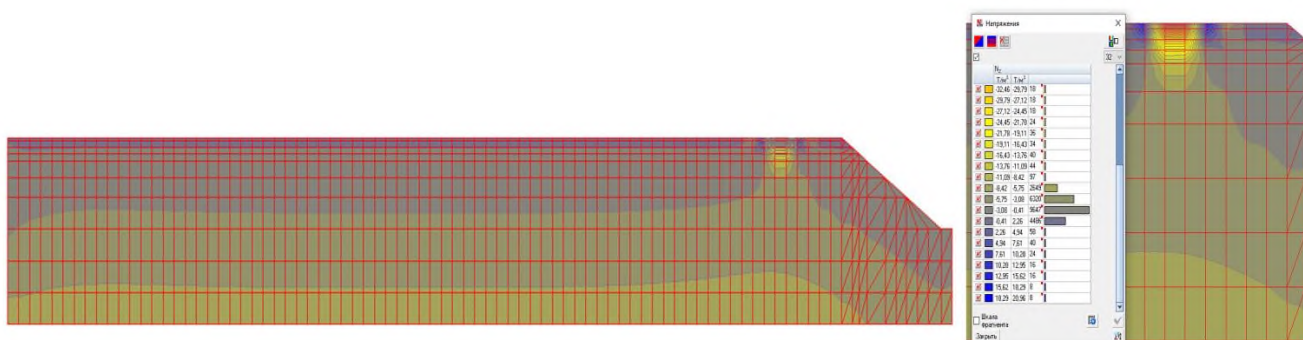




а)



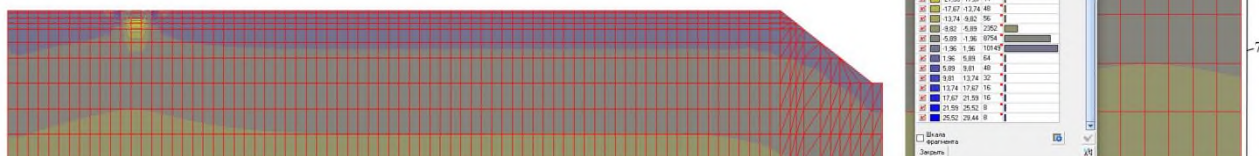
б)



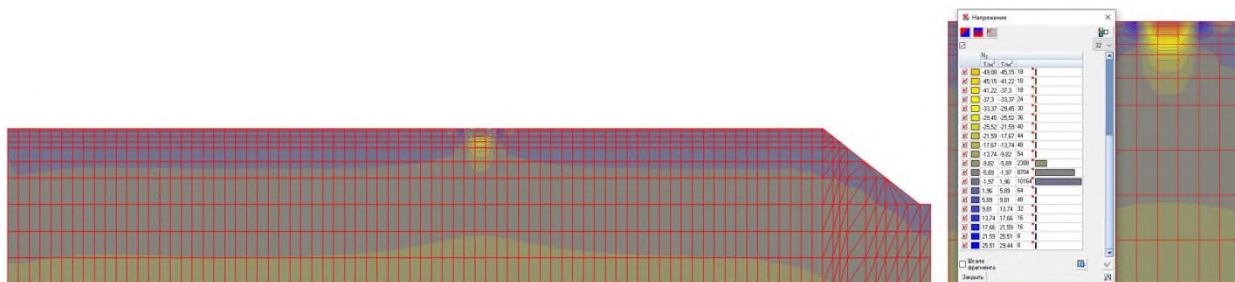
в)

1–7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 3.1

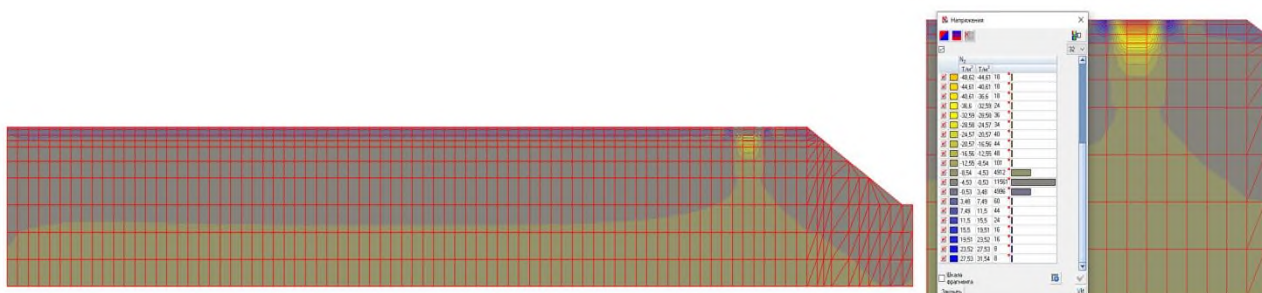
Рисунок А.25 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах в дорожній конструкції I категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 3,12 м від осі дороги, б) на відстані 10,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя



а)



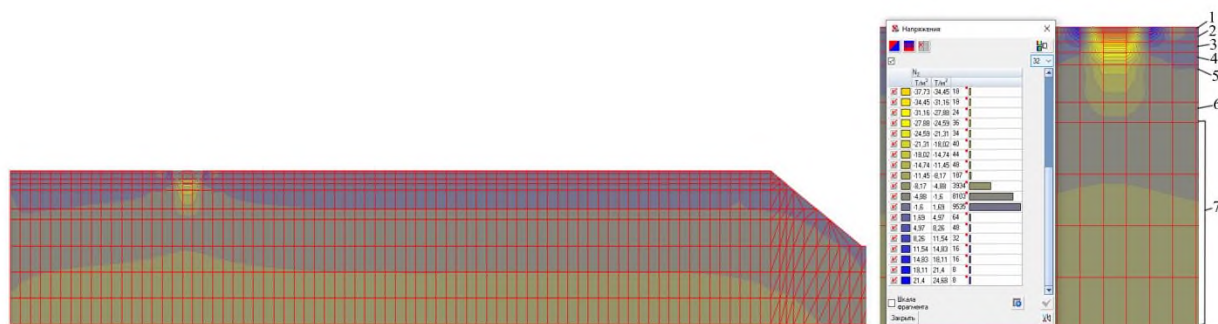
б)



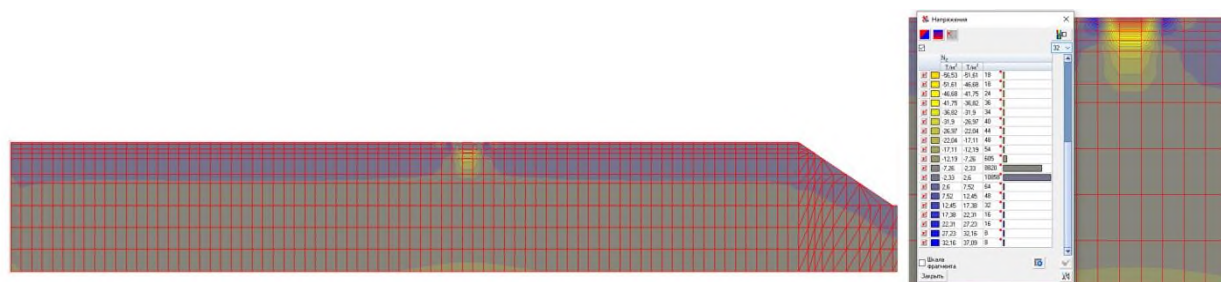
в)

1–7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 3.1

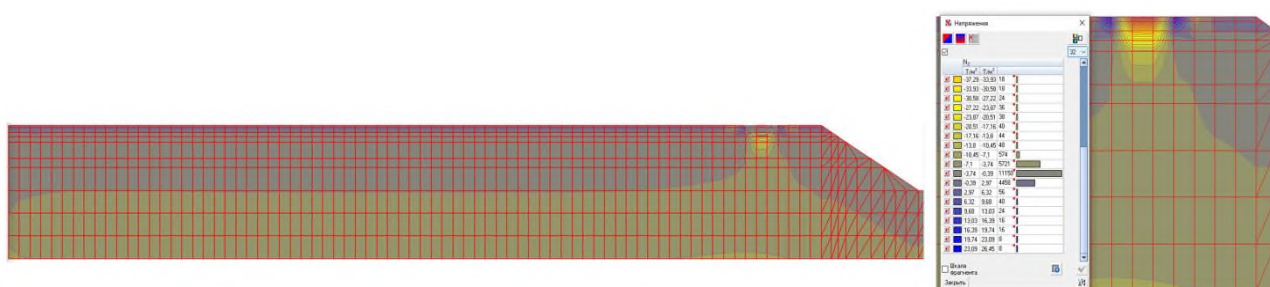
Рисунок А.26 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах в дорожній конструкції I категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 3,12 м від осі дороги, б) на відстані 10,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя



а)



б)

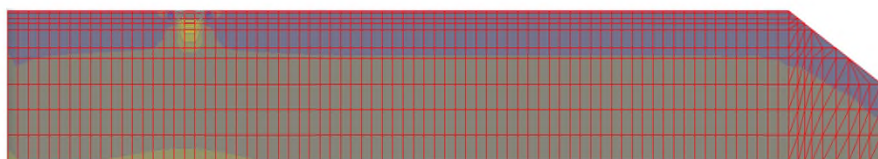


в)

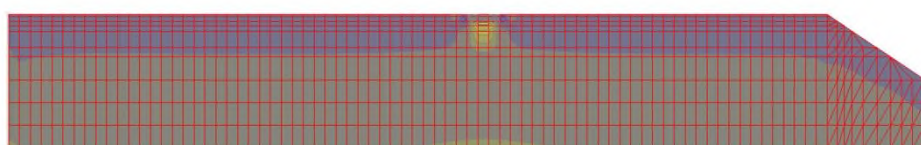
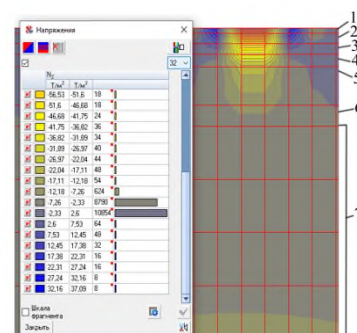
1–7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 3.2

Рисунок А.27 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах в дорожній конструкції I категорії з щебеневим дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 3,12 м від осі дороги, б) на відстані 10,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя

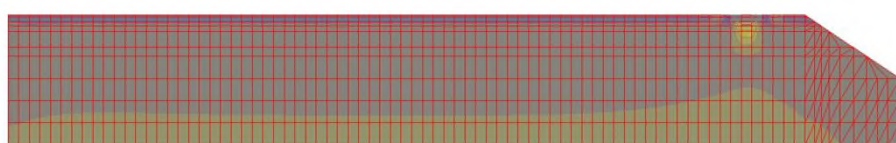
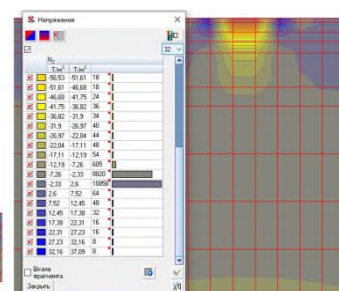




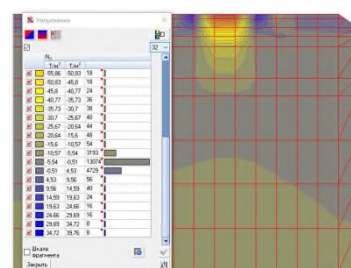
а)



б)

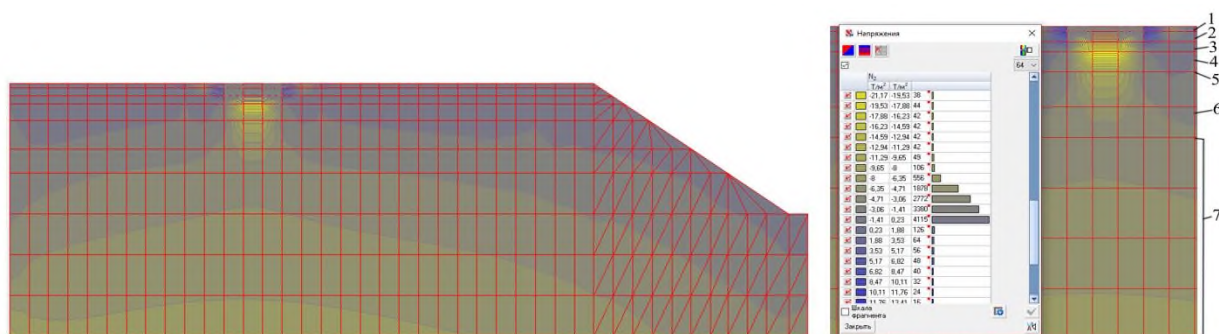


в)

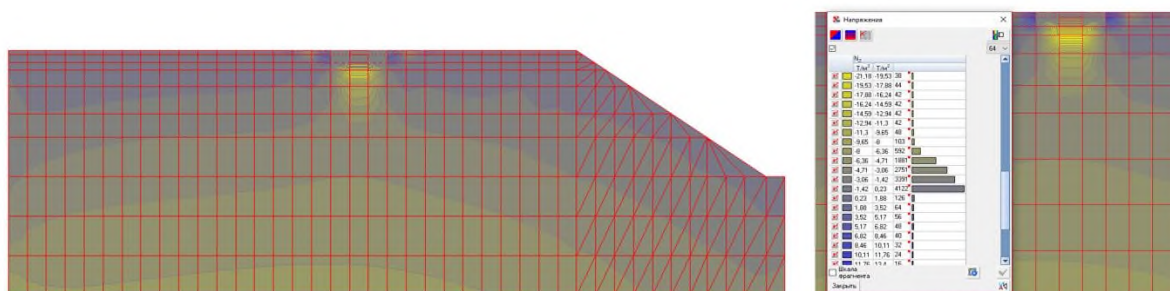


1–7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 3.2

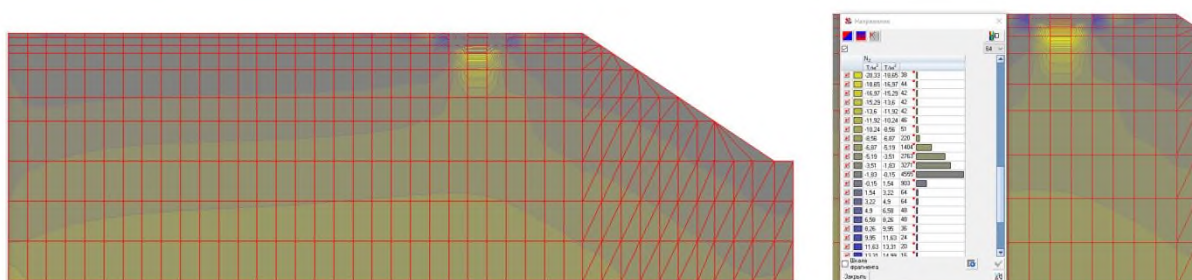
Рисунок А.28 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах в дорожній конструкції I категорії з щебеним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН, проекція на площину  $XOZ$ : а) на відстані 3,12 м від осі дороги, б) на відстані 10,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя



а)



б)

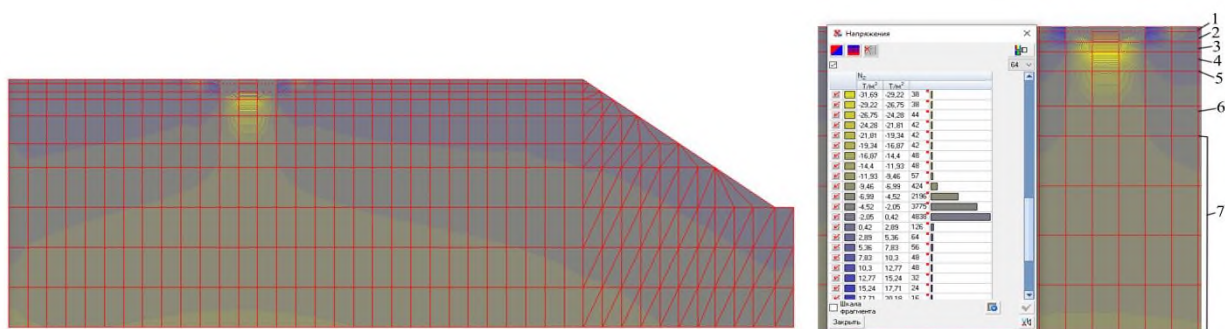


в)

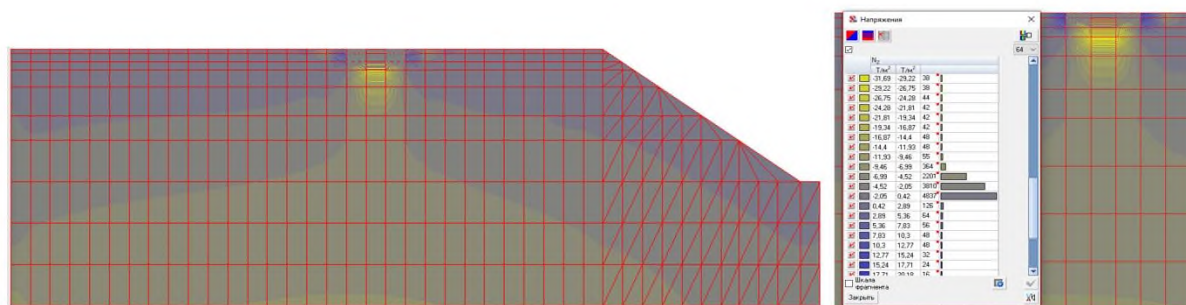
1–7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 3.3

Рисунок А.29 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах в дорожній конструкції II категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 2,4 м від осі дороги, б) на відстані 2,8 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя

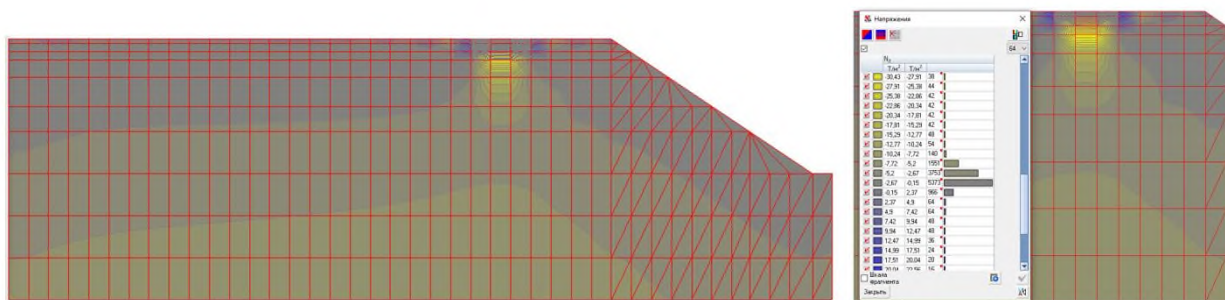




а)



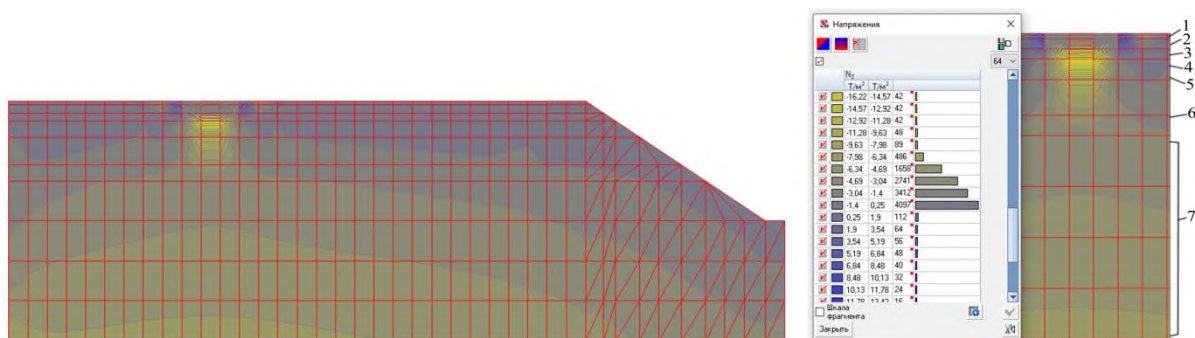
б)



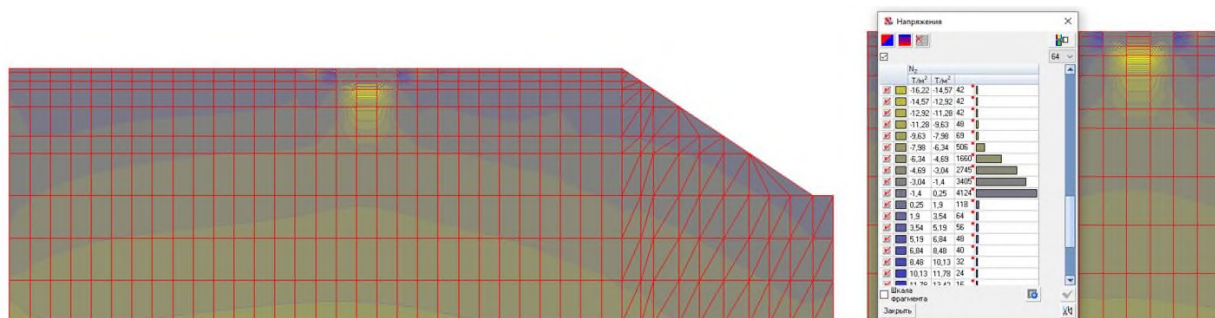
в)

1–7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 3.3

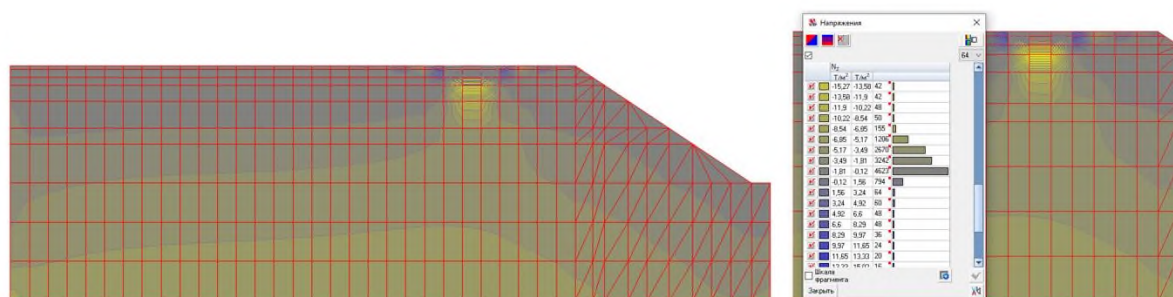
Рисунок А.30 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах в дорожній конструкції II категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 2,4 м від осі дороги, б) на відстані 2,8 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя



а)



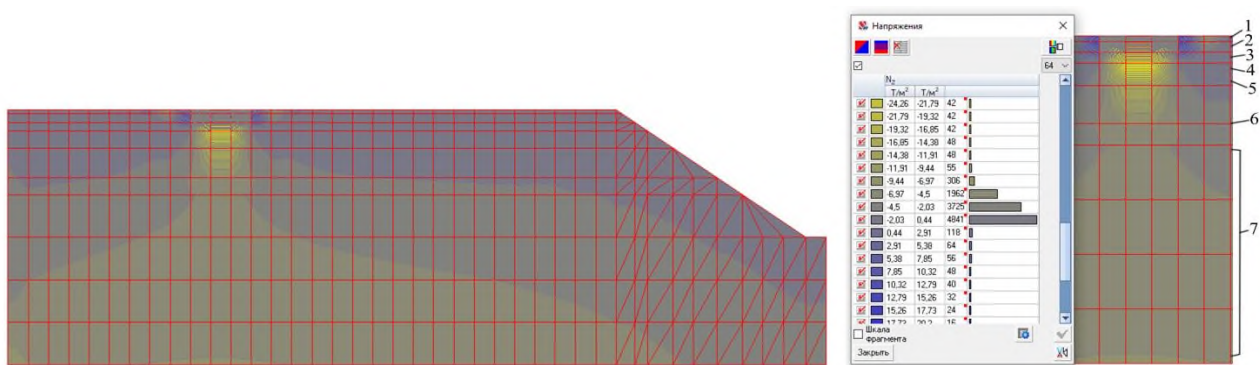
б)



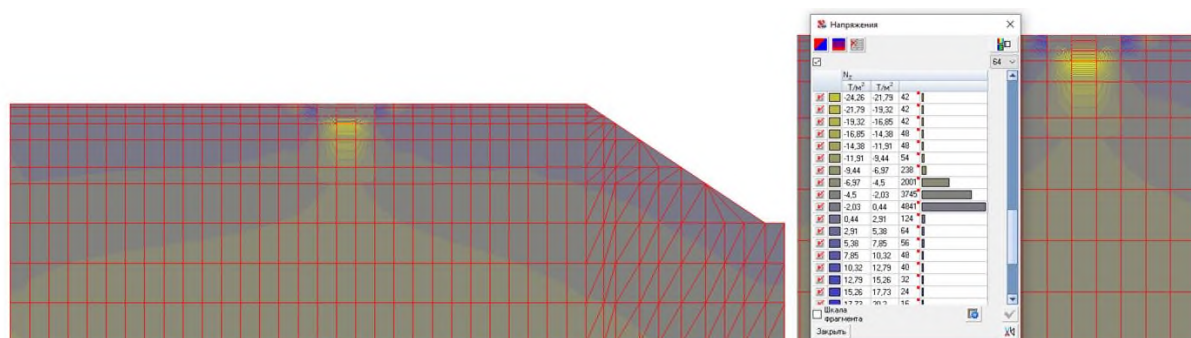
в)

1–7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 3.4

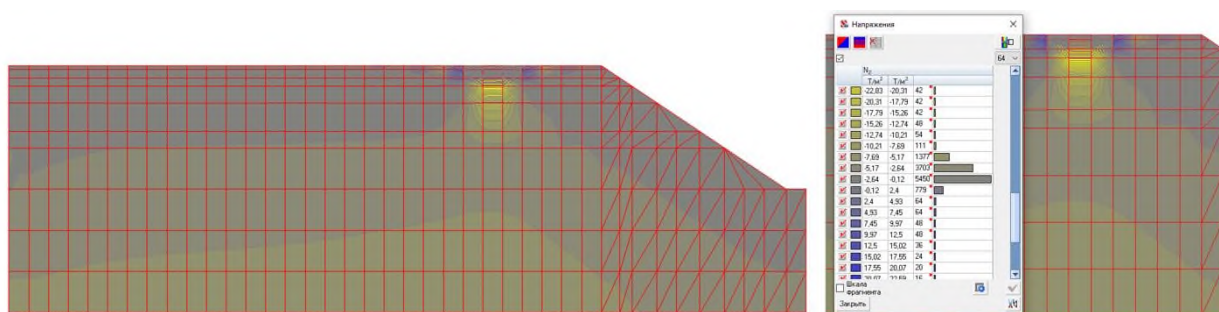
Рисунок А.31 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах в дорожній конструкції II категорії з щебеним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 2,4 м від осі дороги, б) на відстані 2,8 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя



а)



б)

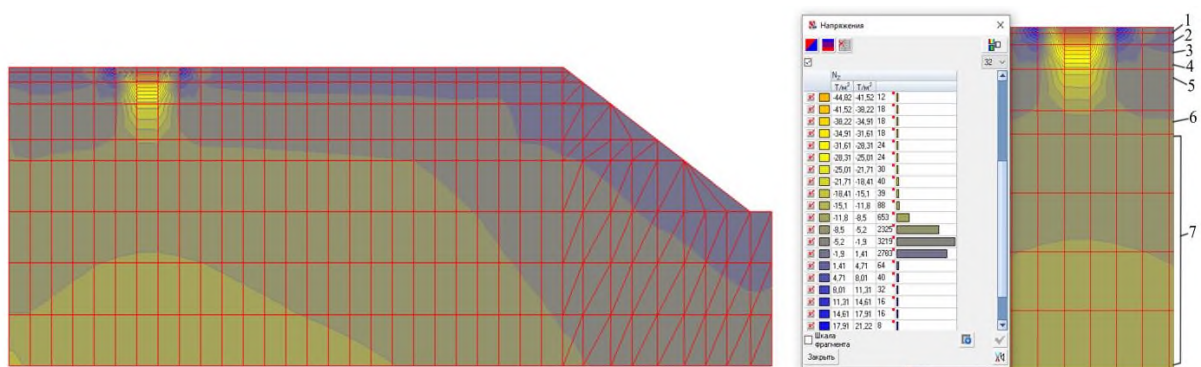


в)

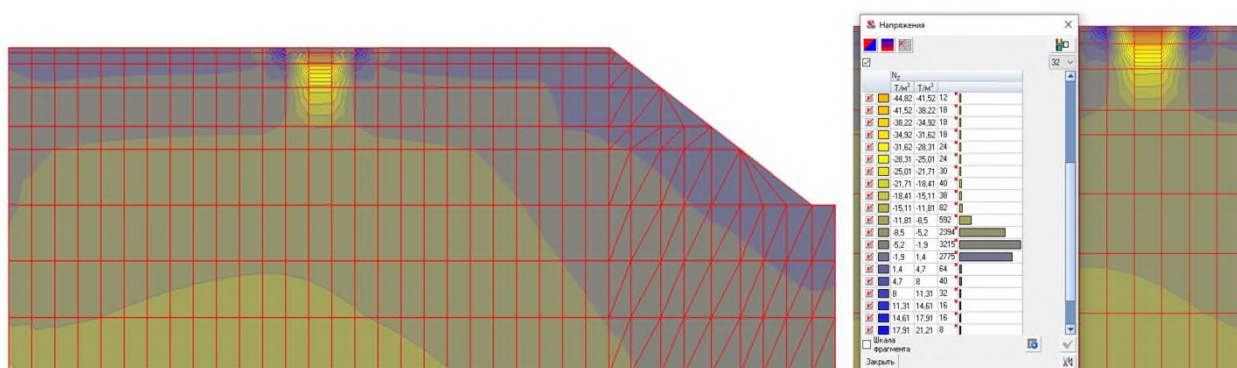
1–7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 3.4

Рисунок А.32 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах в дорожній конструкції II категорії з щебеневим дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 2,4 м від осі дороги, б) на відстані 2,8 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки

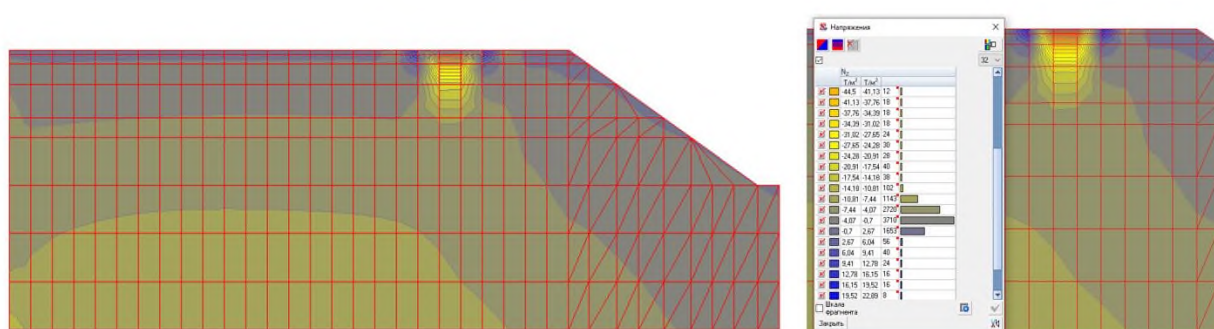




а)



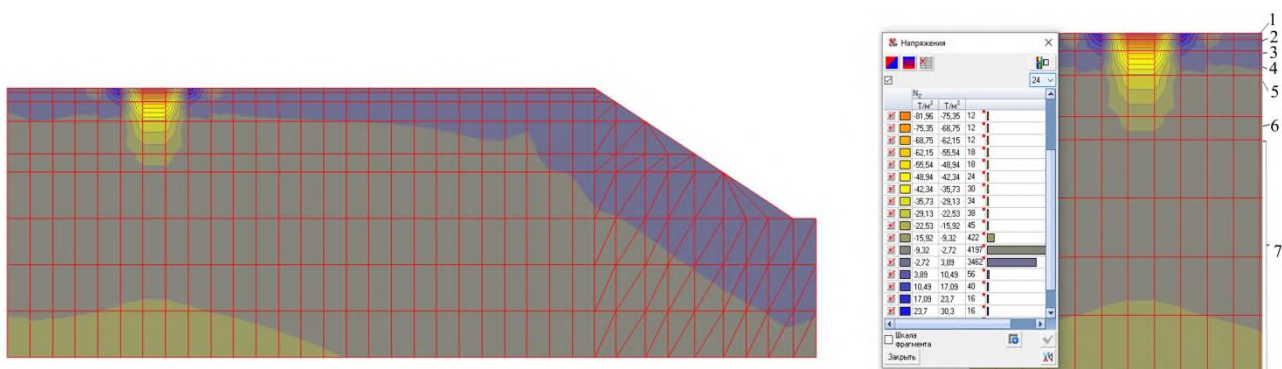
б)



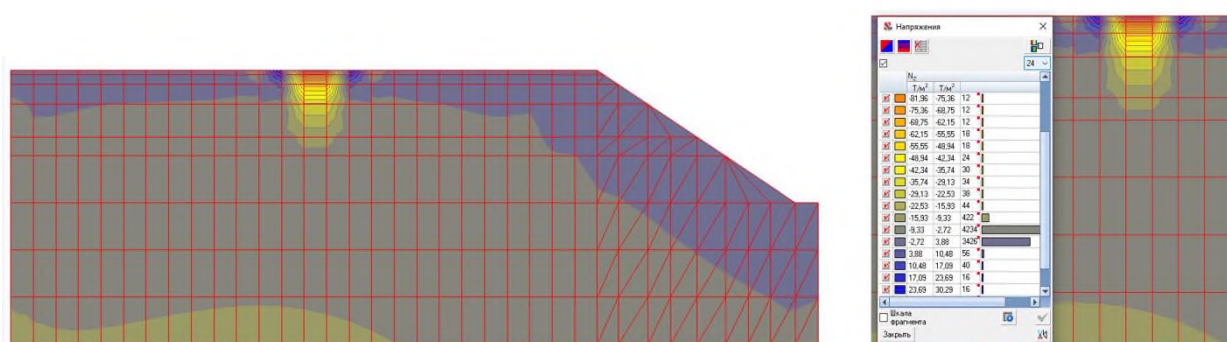
в)

1–7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 3.5

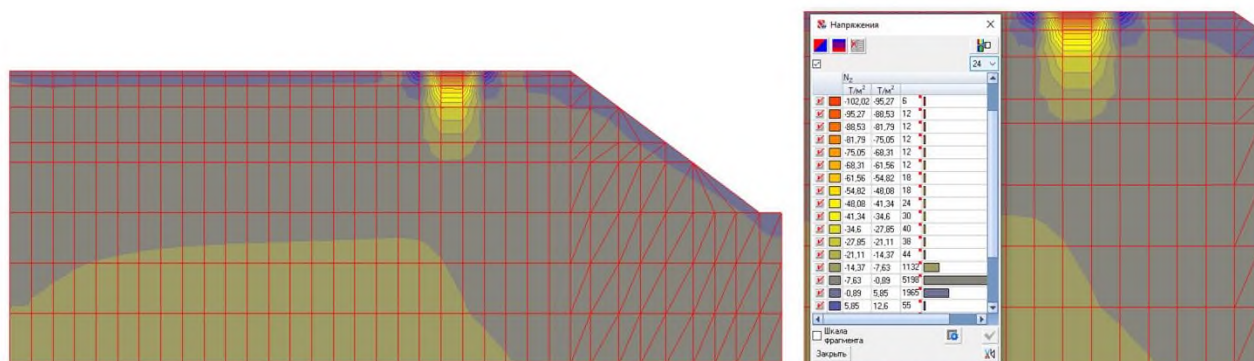
Рисунок А.33 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах в дорожній конструкції III категорії з піщаним дренажним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 1,68 м від осі дороги, б) на відстані 3,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя;



а)



б)

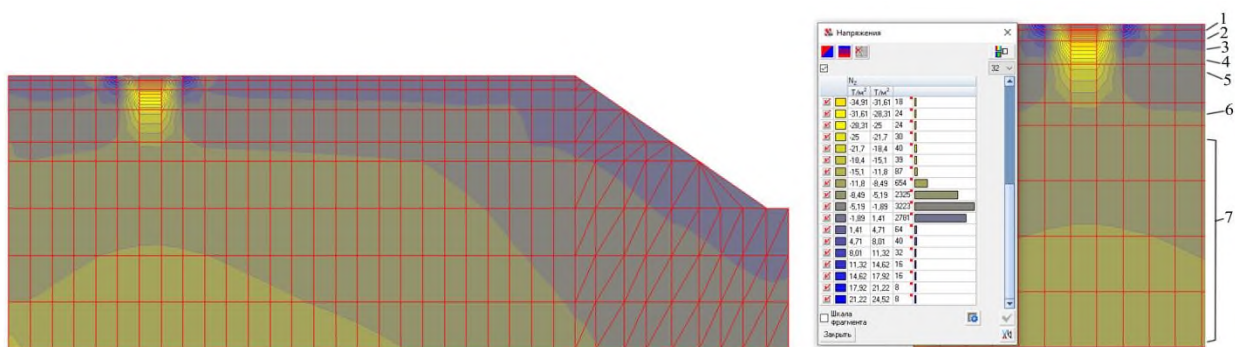


в)

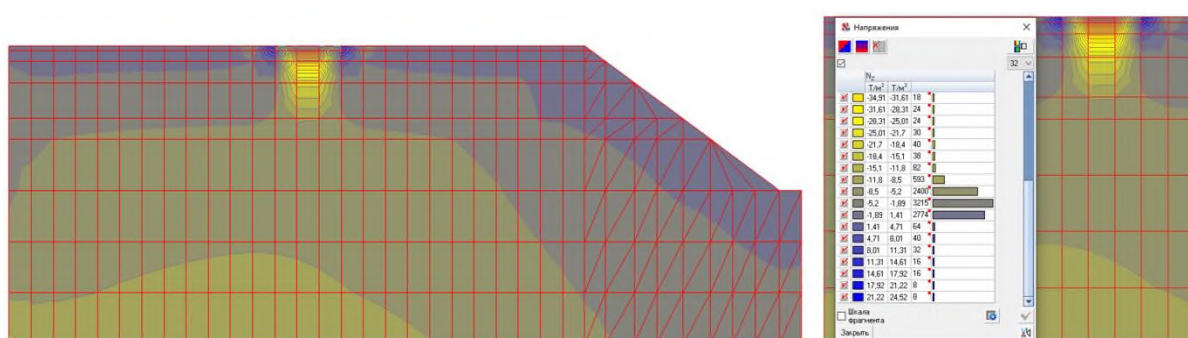
1–7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 3.5

Рисунок А.34 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах в дорожній конструкції III категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 1,68 м від осі дороги, б) на відстані 3,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя

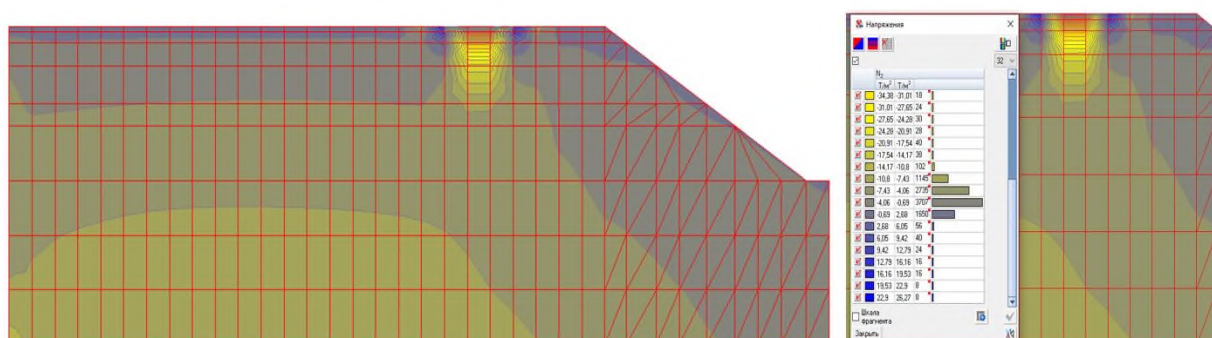




а)



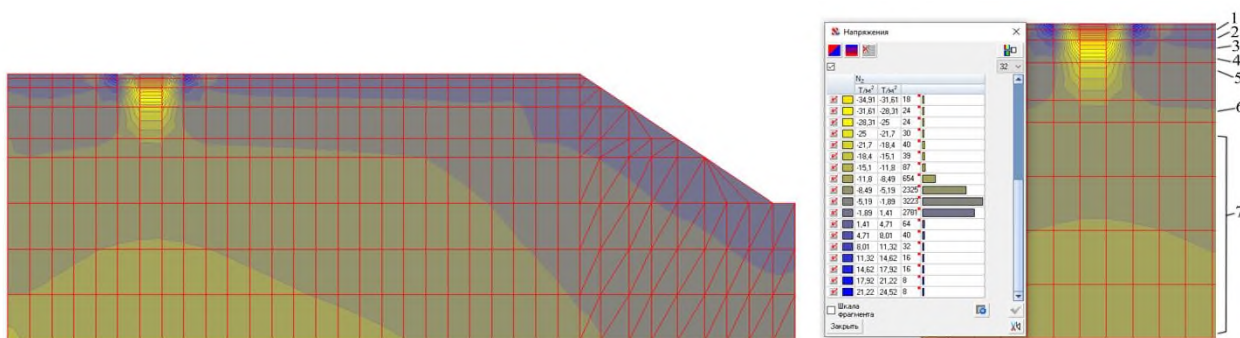
б)



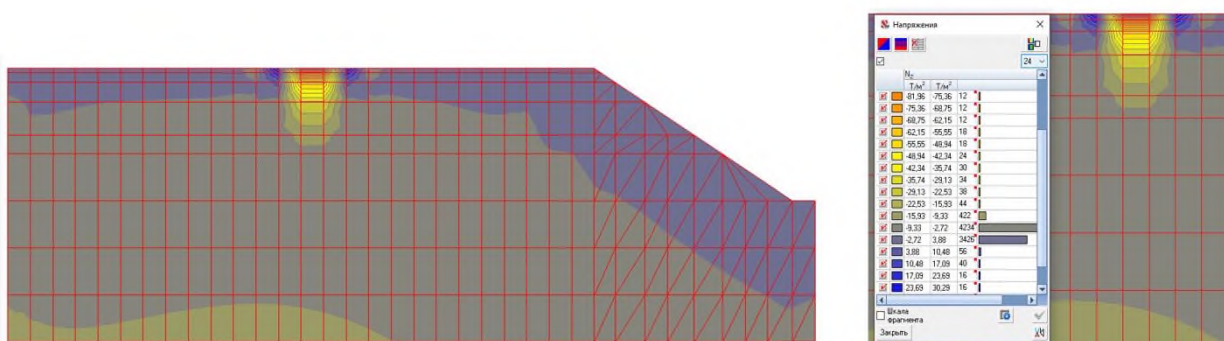
в)

1–7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 3.5

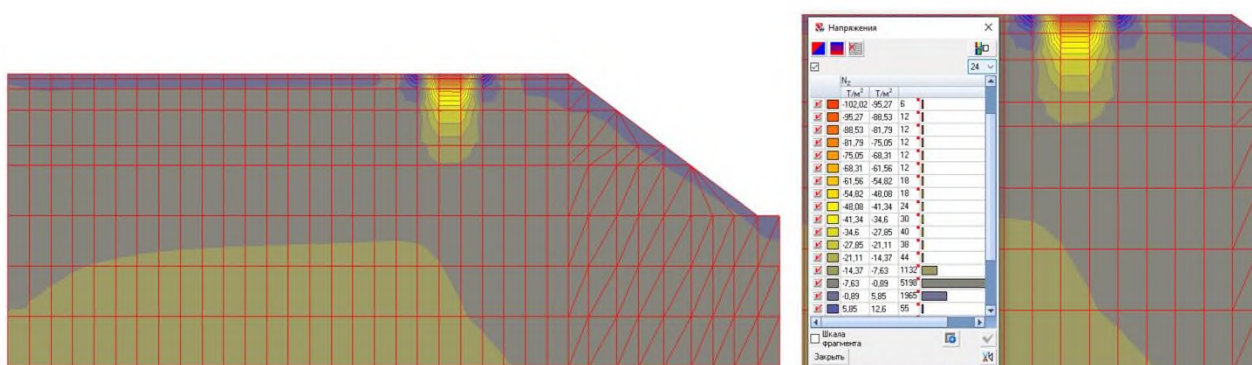
Рисунок А.35 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах в дорожній конструкції III категорії з піщаним дренажним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 1,68 м від осі дороги, б) на відстані 3,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя



а)



б)

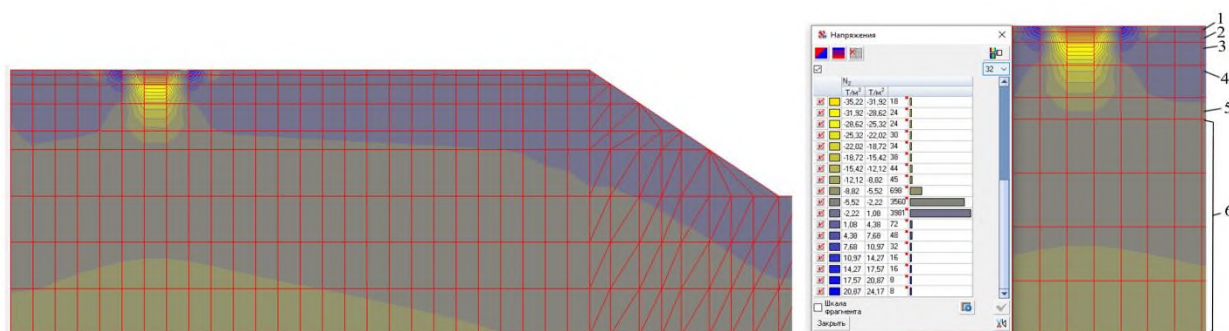


в)

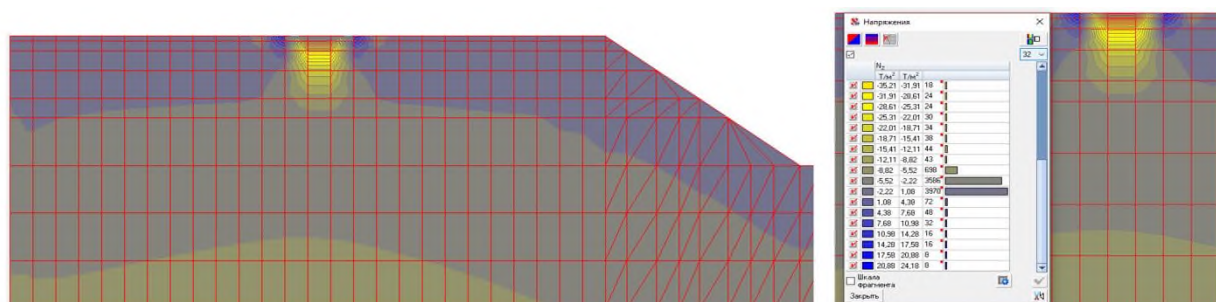
1–7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 3.5

Рисунок А.36 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах в дорожній конструкції ІІІ категорії з піщаним дренажним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 1,68 м від осі дороги, б) на відстані 3,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя

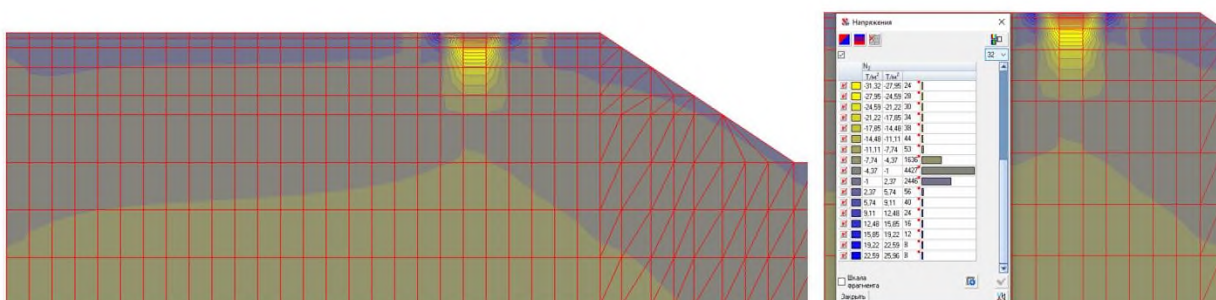




а)



б)

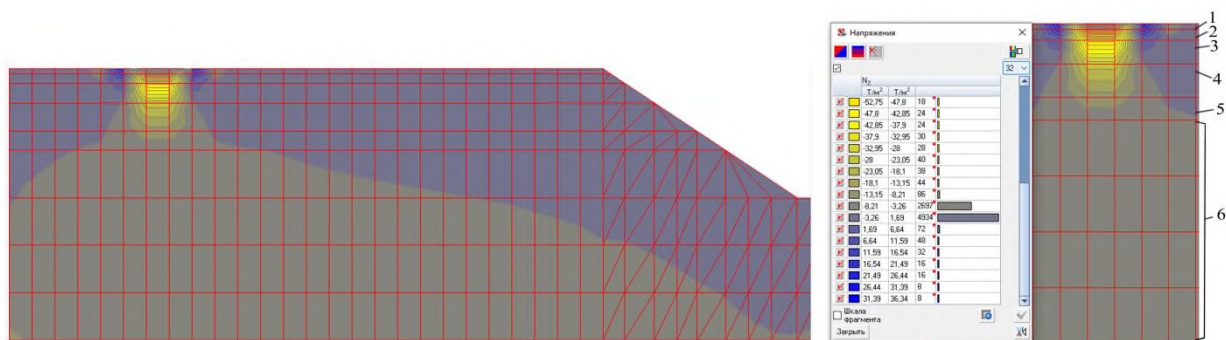


в)

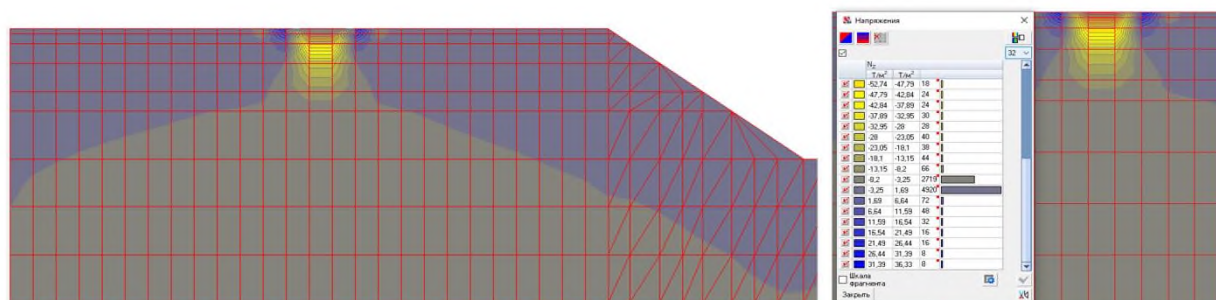
1–7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 3.6

Рисунок А.37 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах в дорожній конструкції III категорії з щебеним дренажним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН, проекція на площину  $XOZ$ : а) на відстані 1,68 м від осі дороги, б) на відстані 3,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя

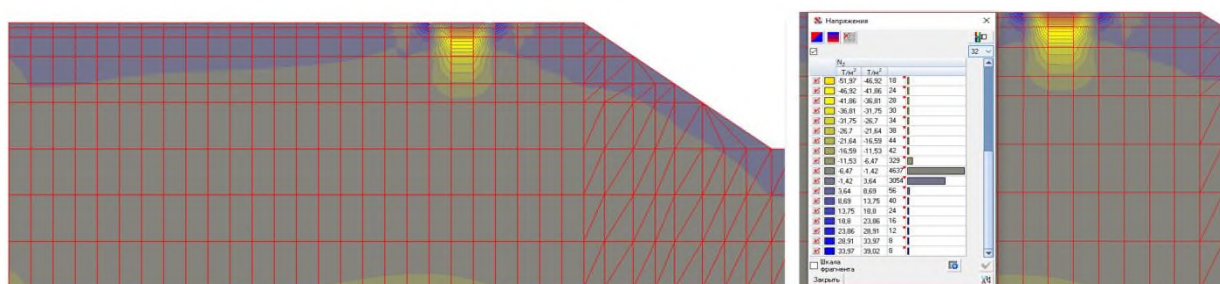




а)



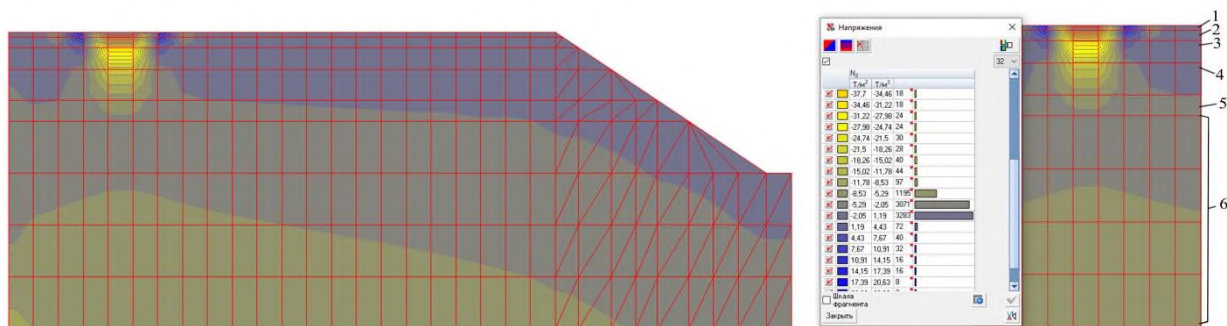
б)



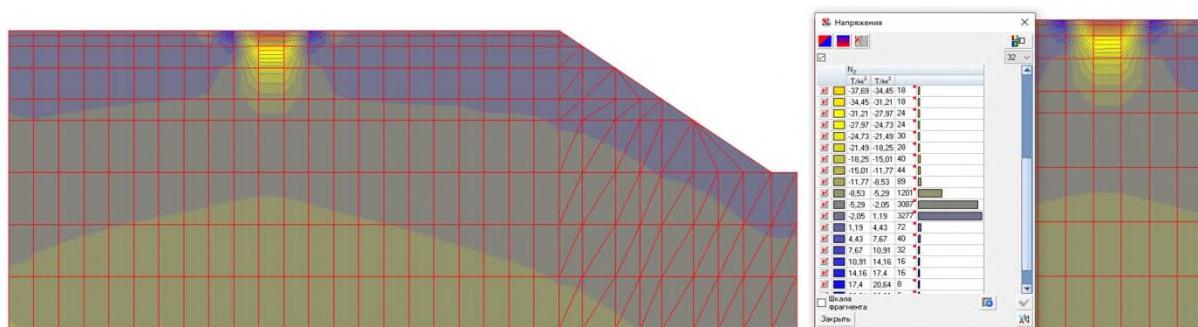
в)

1–7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 3.6

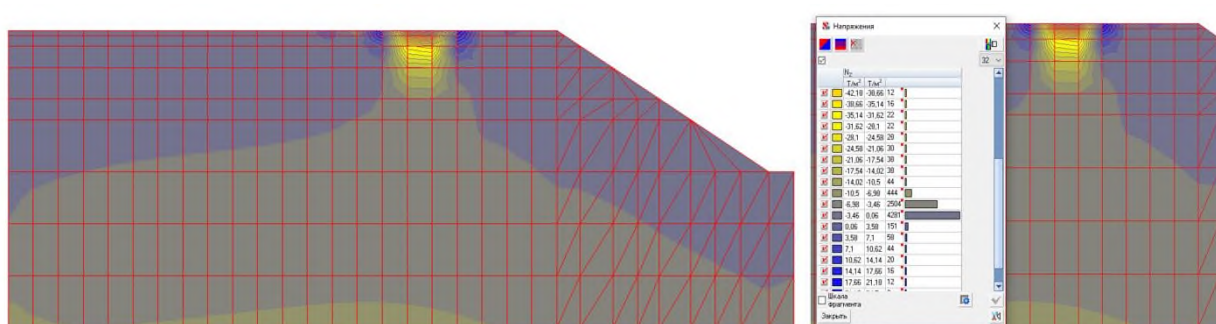
Рисунок А.38 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах в дорожній конструкції ІІІ категорії з щебеневим дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 1,68 м від осі дороги, б) на відстані 3,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя



а)



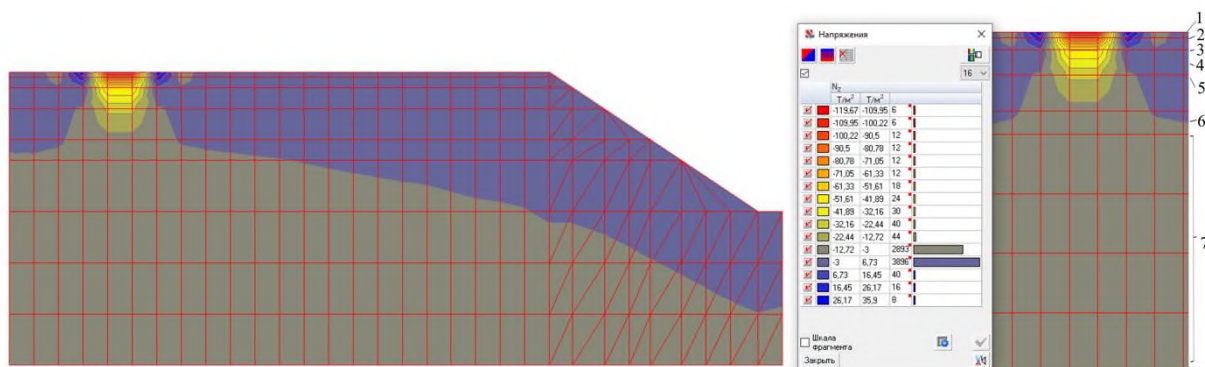
б)



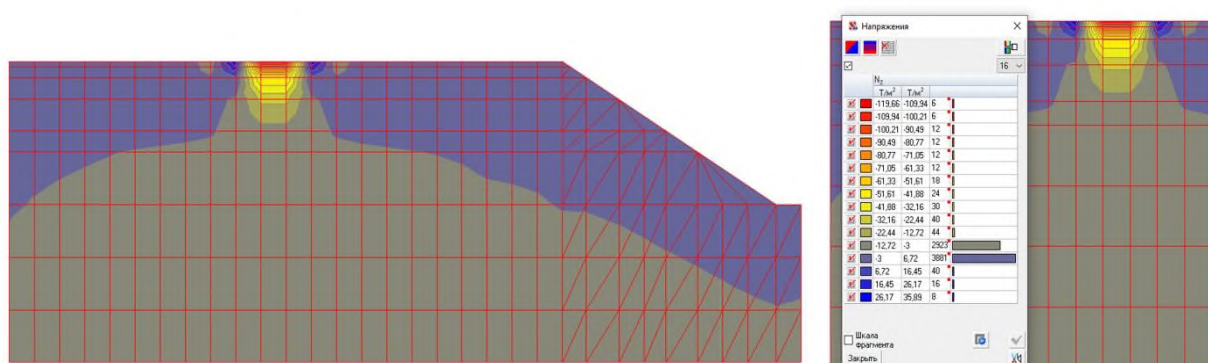
в)

1–7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 3.7

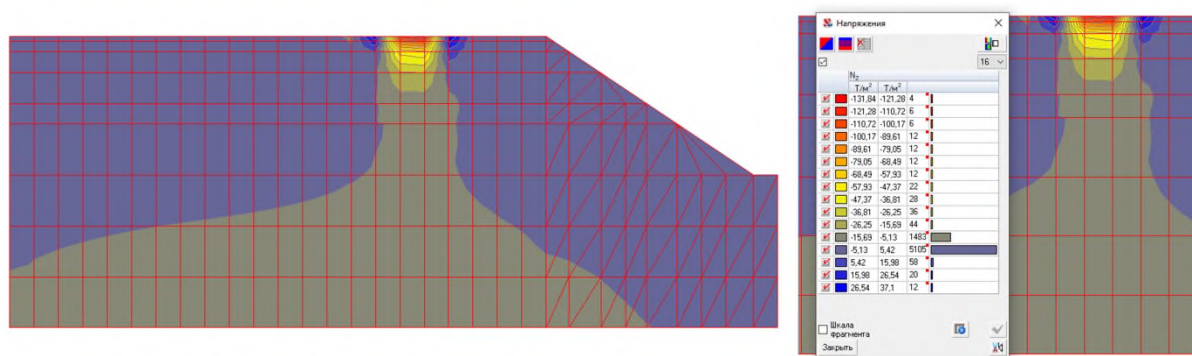
Рисунок А.39 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах в дорожній конструкції IV категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН, проекція на площину  $XOZ$ : а) на відстані 1,2 м від осі дороги, б) на відстані 2,64 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя



а)



б)

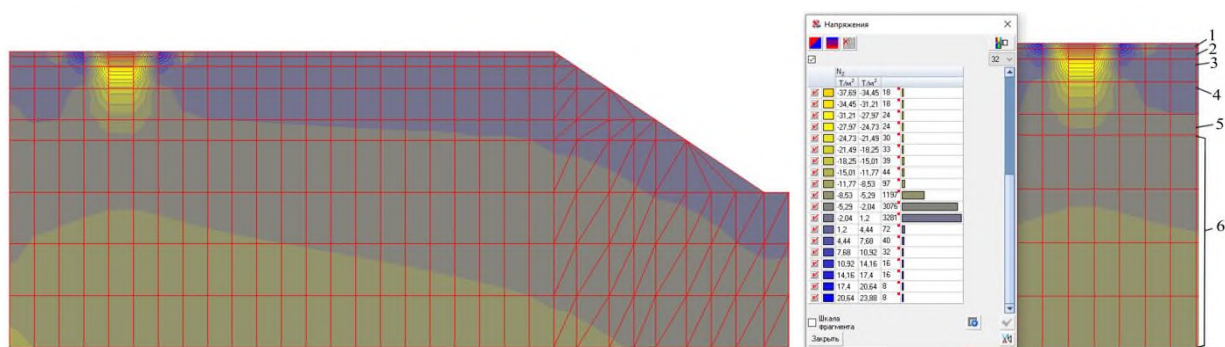


в)

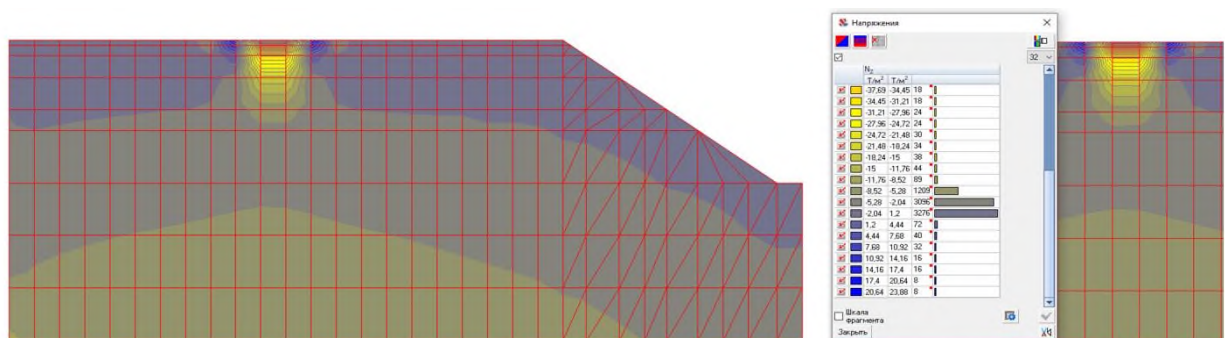
1–7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 3.7

Рисунок А.40 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах в дорожній конструкції IV категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 1,2 м від осі дороги, б) на відстані 2,64 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя

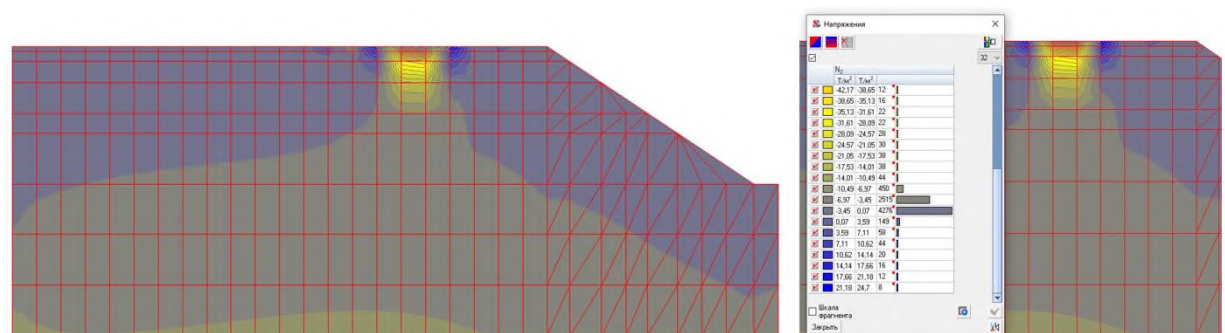




а)



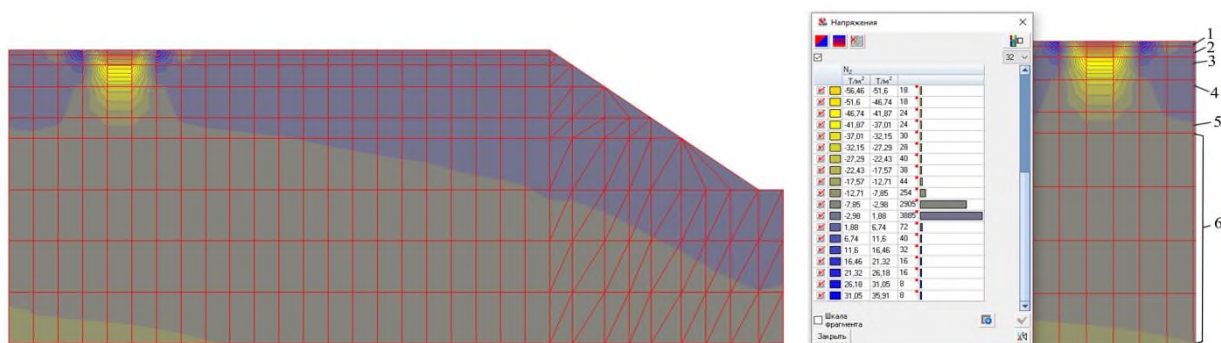
б)



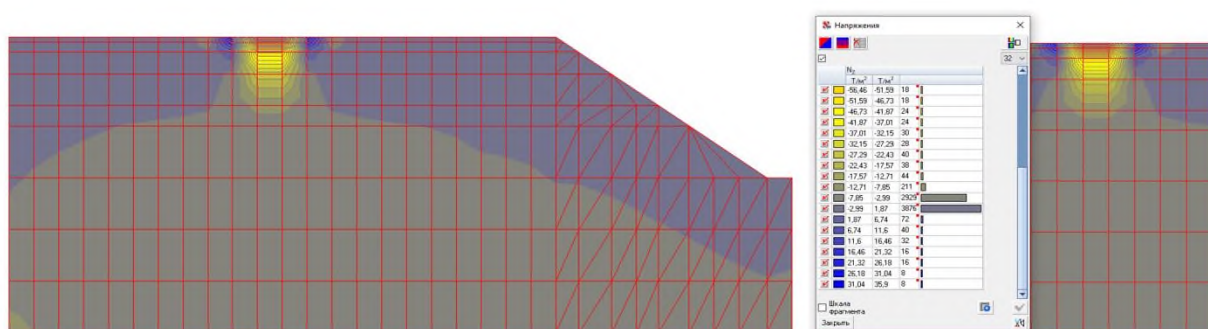
в)

1–7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 3.7

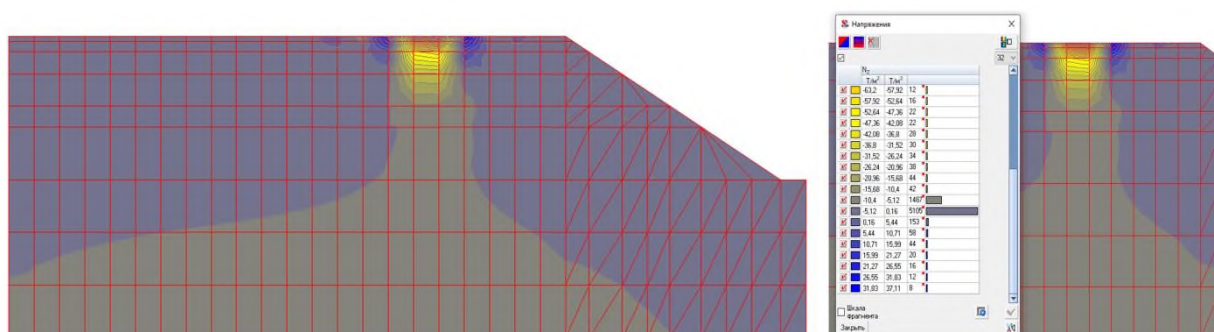
Рисунок А.41 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах в дорожній конструкції IV категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 1,2 м від осі дороги, б) на відстані 2,64 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя



а)



б)

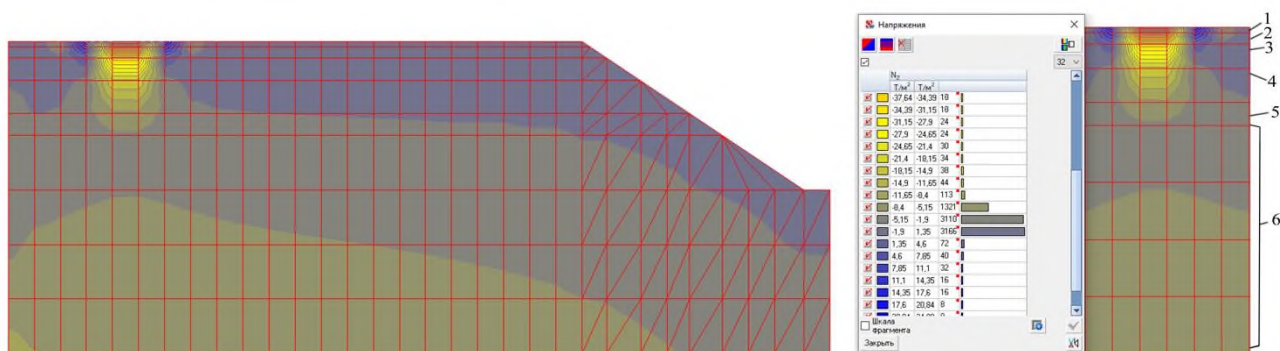


в)

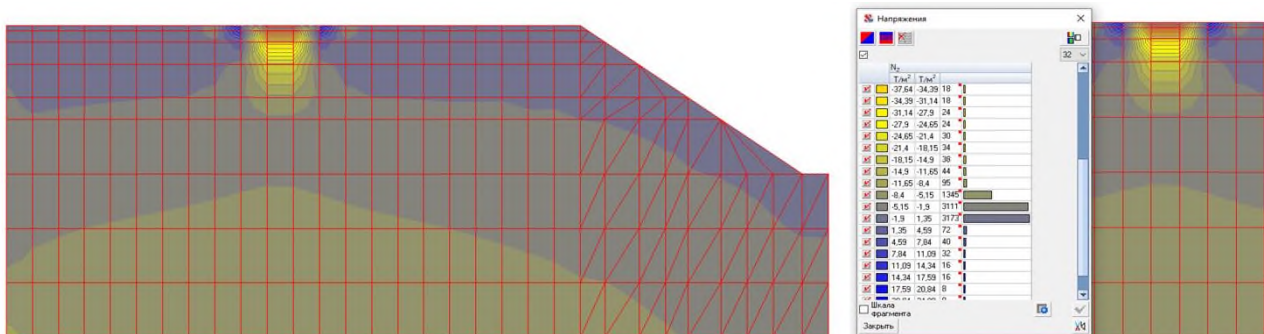
1–7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 3.7

Рисунок А.42 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах в дорожній конструкції IV категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 1,2 м від осі дороги, б) на відстані 2,64 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя

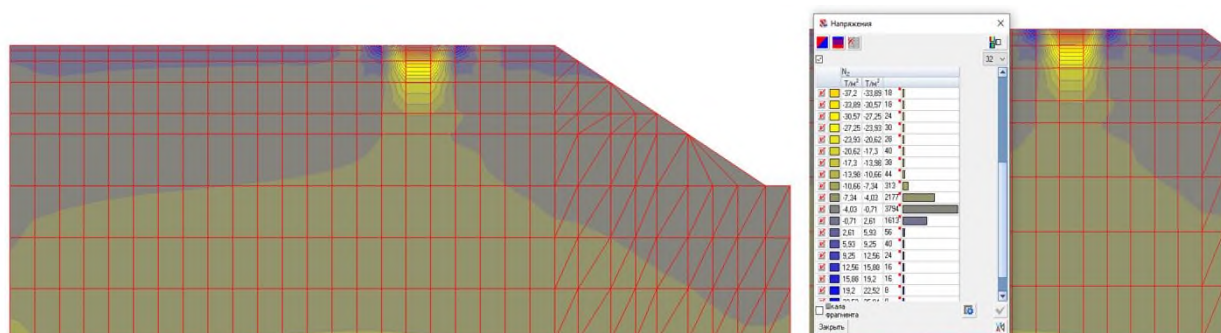




а)



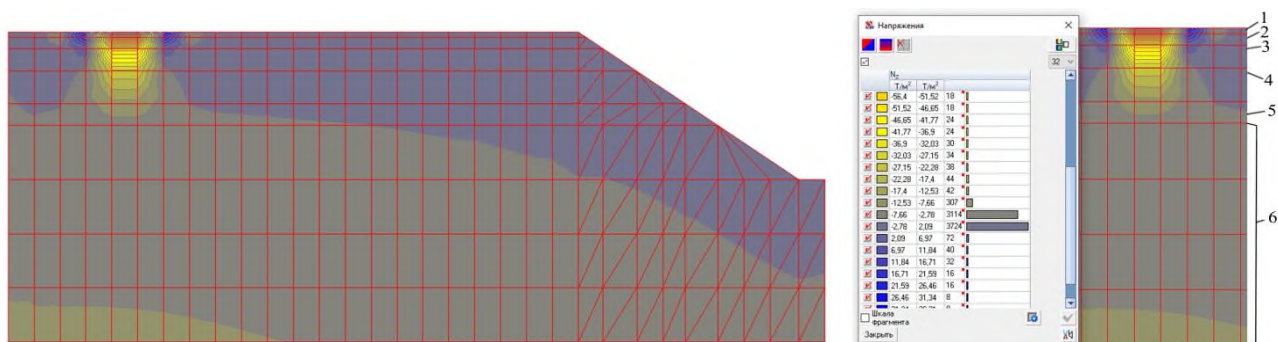
б)



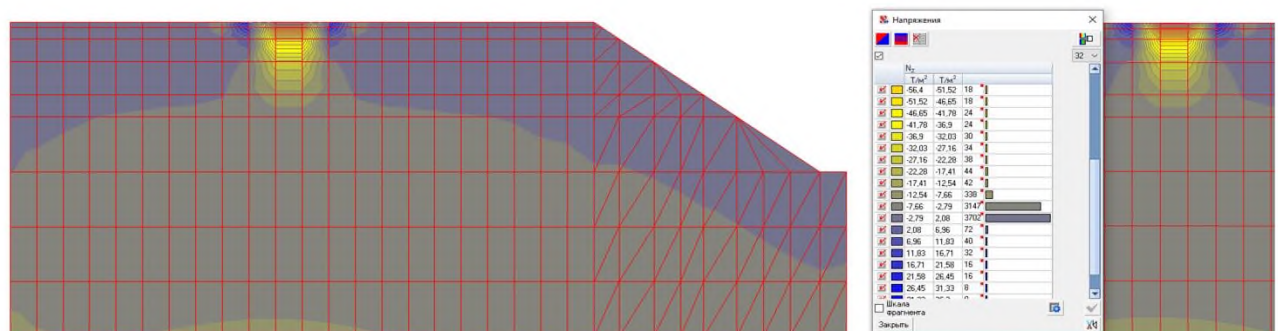
в)

1–7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 3.8

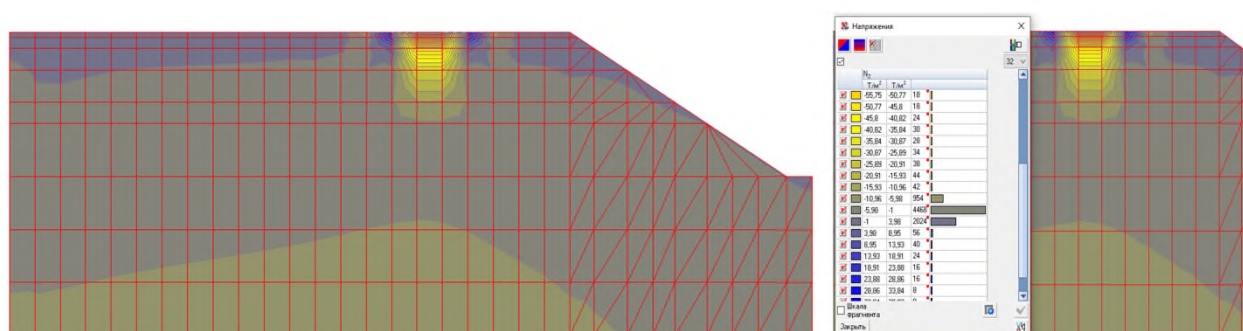
Рисунок А.43 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах в дорожній конструкції IV категорії з щебеним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 1,2 м від осі дороги, б) на відстані 2,64 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя



а)



б)

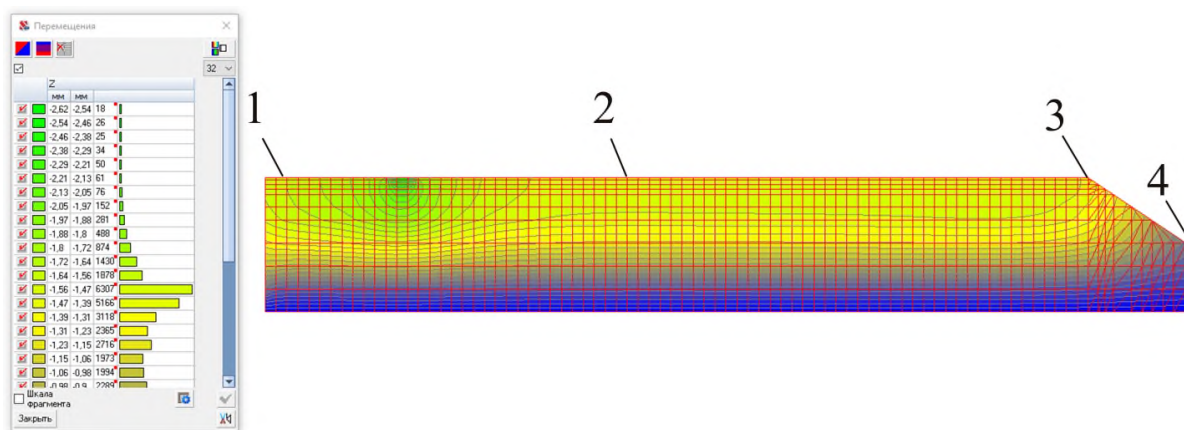


в)

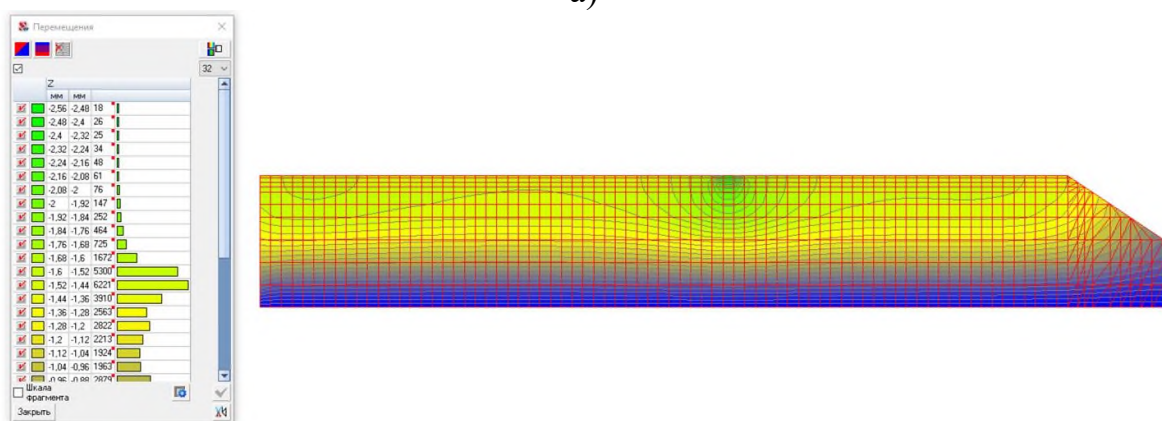
1–7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 3.8

Рисунок А.44 – Розподіл нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах в дорожній конструкції IV категорії з щебеним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа, при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 1,2 м від осі дороги, б) на відстані 2,64 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя

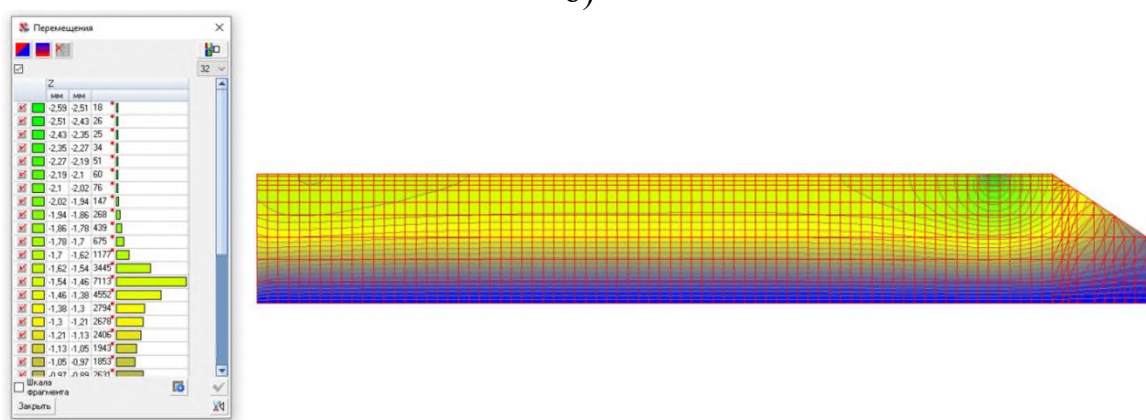




а)



б)

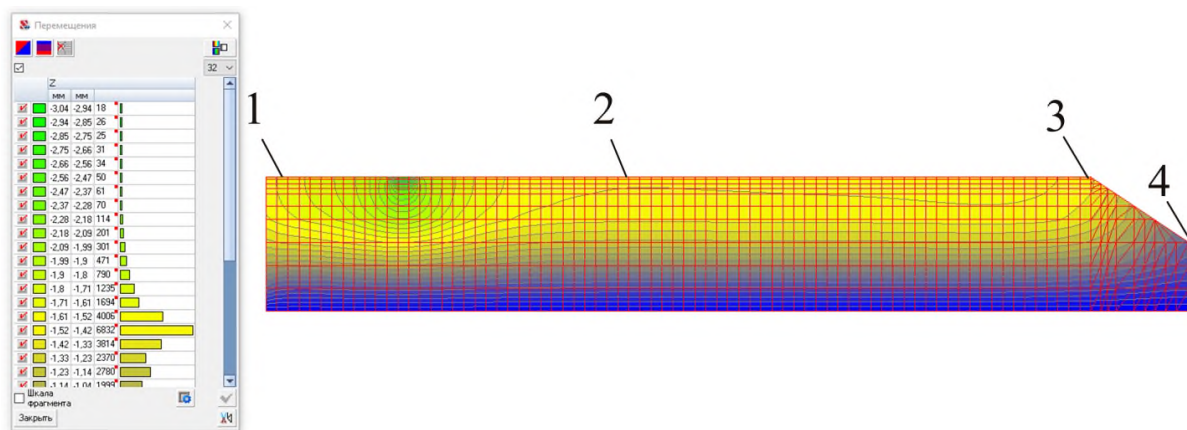


в)

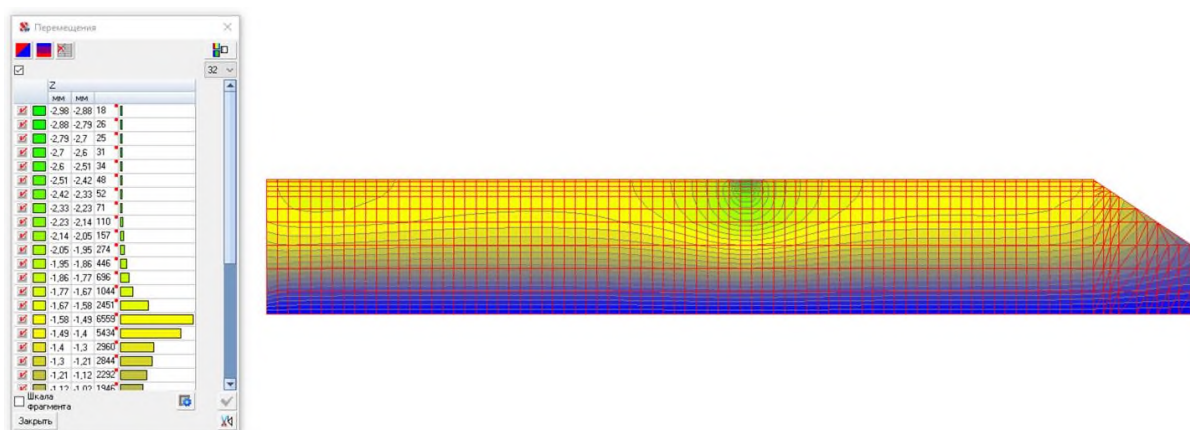
1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП; 4 – кювет

Рисунок А.45 – Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції I категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа: при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 3,12 м від осі дороги, б) на відстані 10,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя,

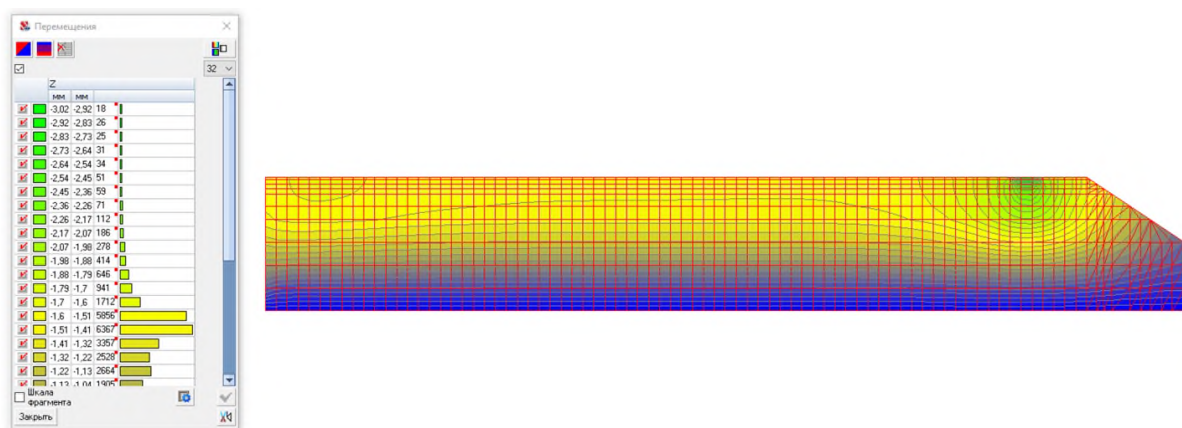




a)



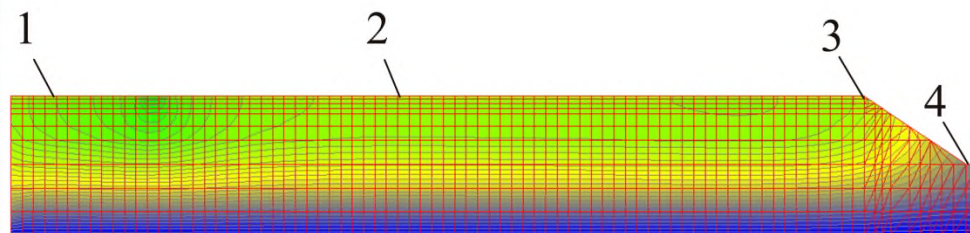
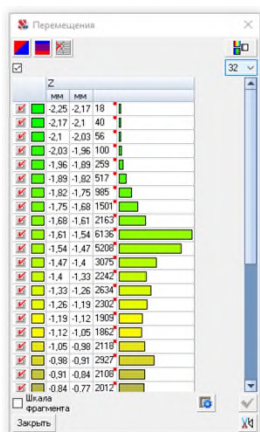
б)



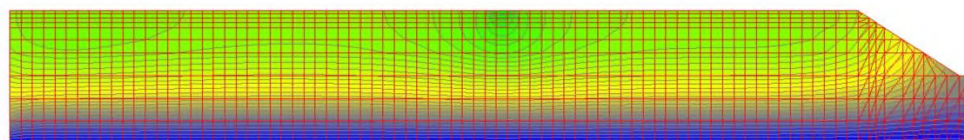
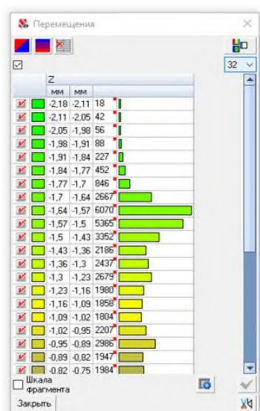
в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП; 4 – кювет

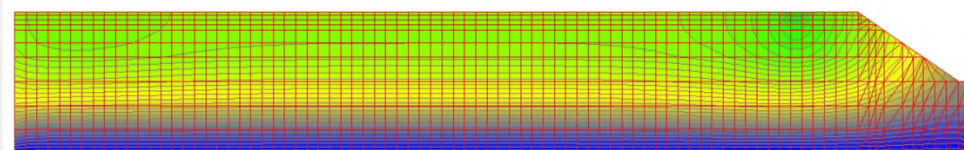
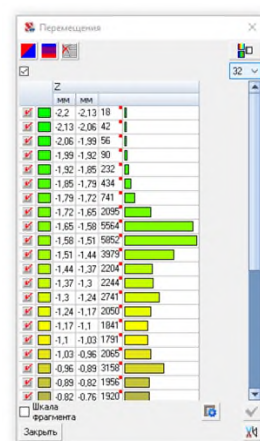
Рисунок А.46 – Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції I категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа: при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а – на відстані 3,12 м від осі дороги, б – на відстані 10,56 м від осі дороги, в – на відстані 1 м від кромки узбіччя



а)



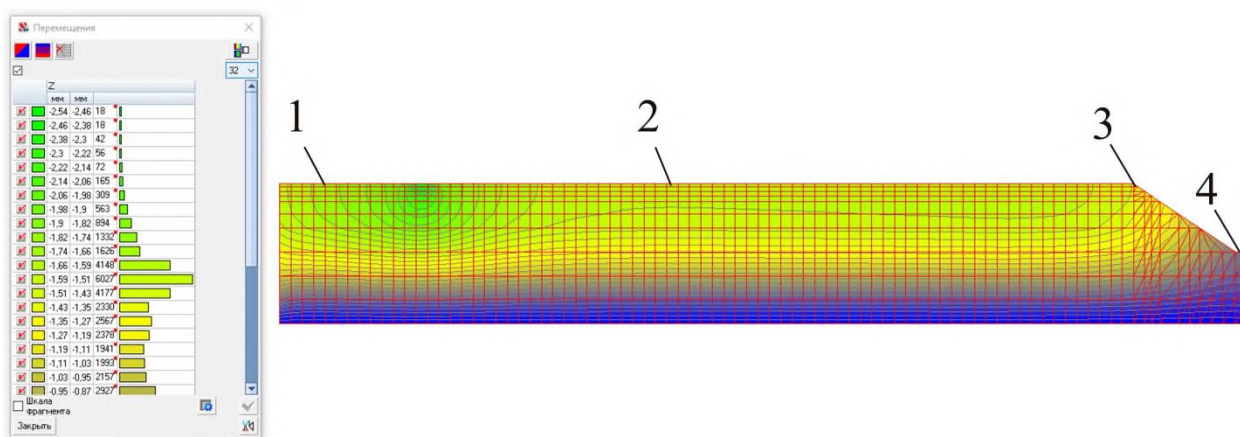
б)



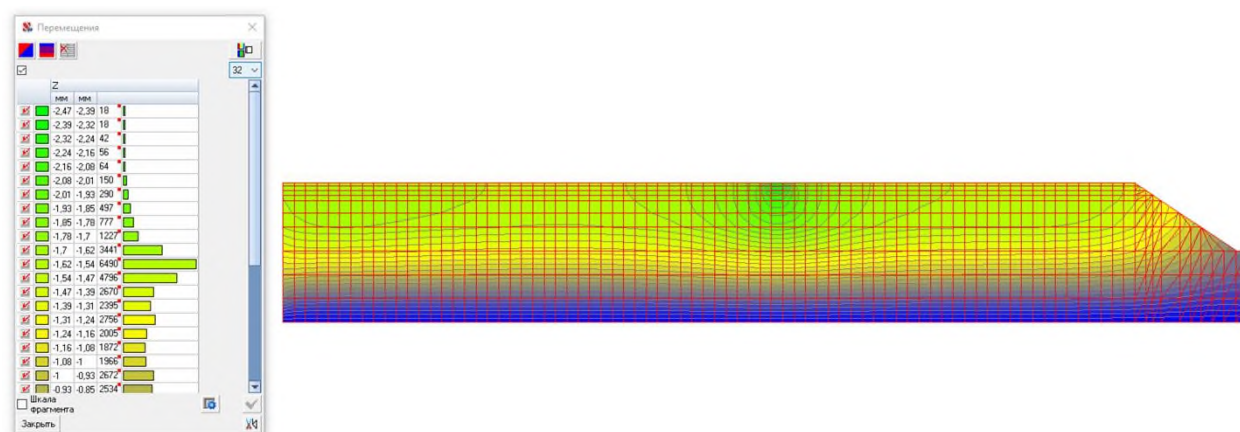
в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП; 4 – кювет

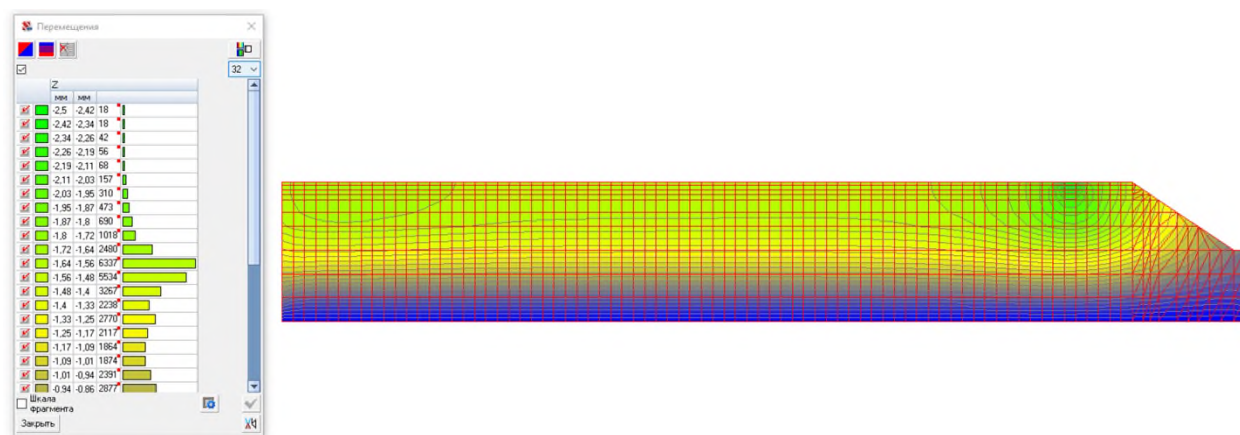
Рисунок А.47 – Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції I категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа: при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а – на відстані 3,12 м від осі дороги, б – на відстані 10,56 м від осі дороги, в – на відстані 1 м від кромки узбіччя



а)



б)

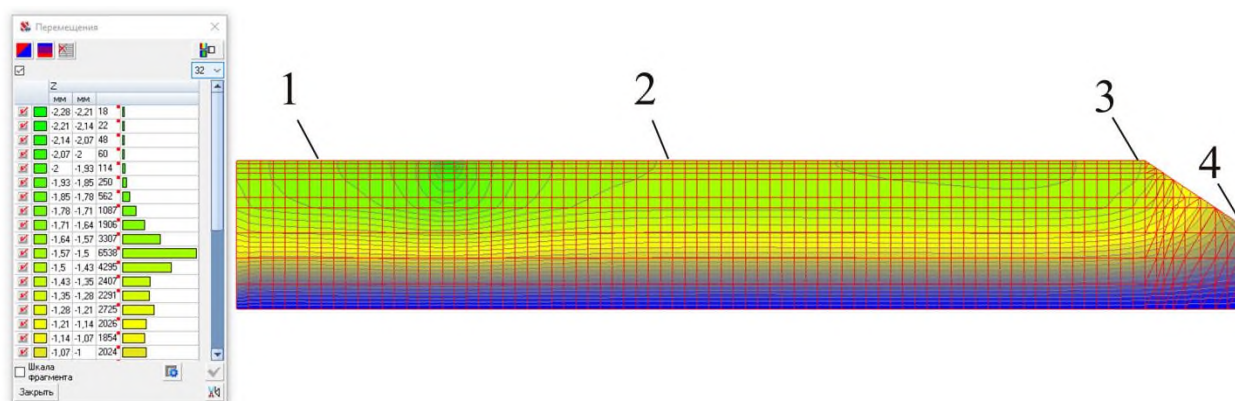


в)

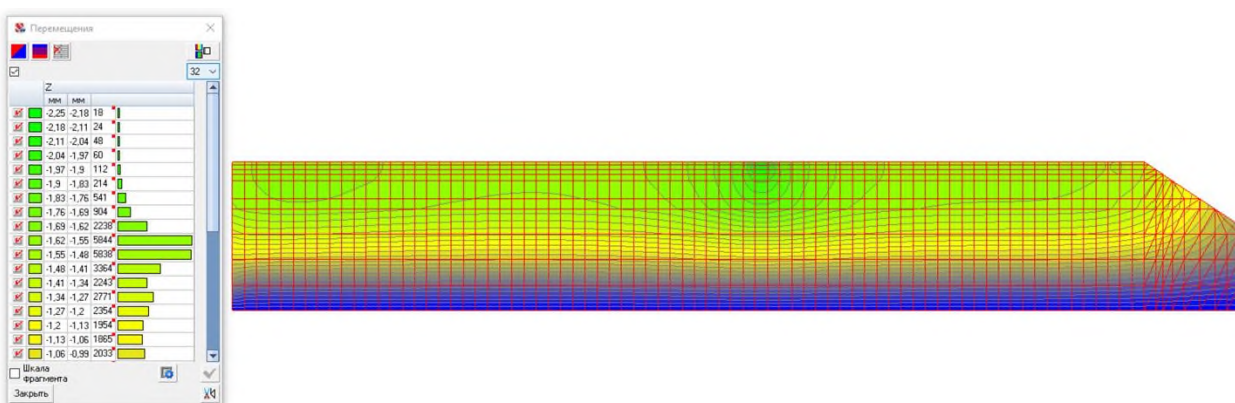
1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП; 4 – кювет

Рисунок А.48 – Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції І категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа: при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН : а) на відстані 3,12 м від осі дороги, б) на відстані 10,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя

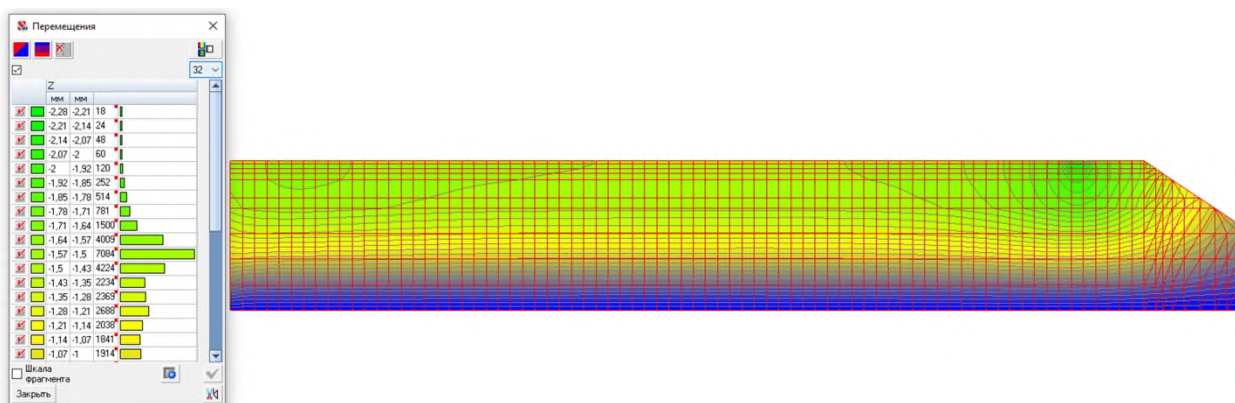




а)



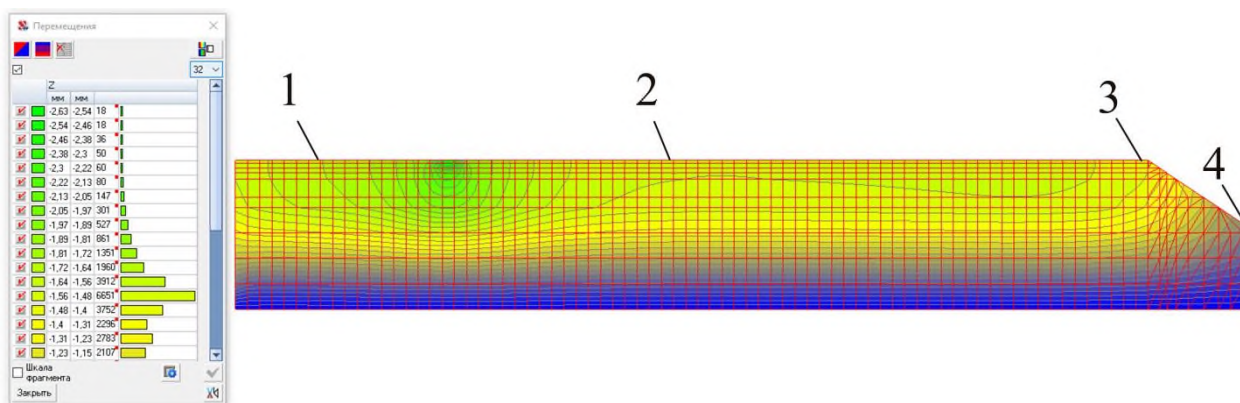
б)



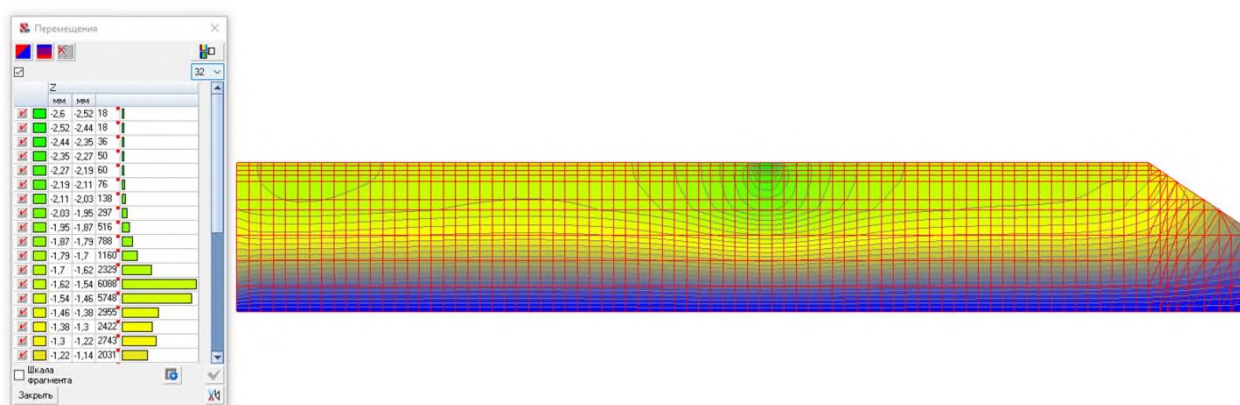
в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП; 4 – кювет

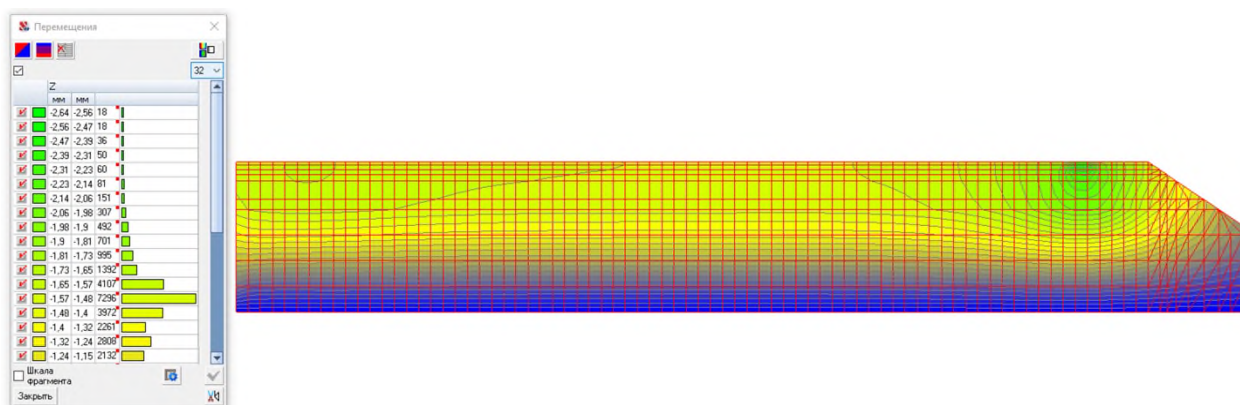
Рисунок А.49 – Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції I категорії з щебеним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа: при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 3,12 м від осі дороги, б) на відстані 10,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя



а)



б)

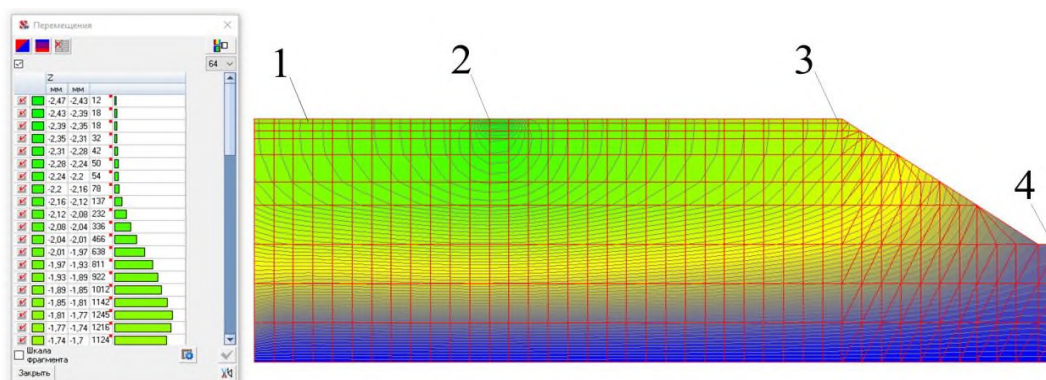


в)

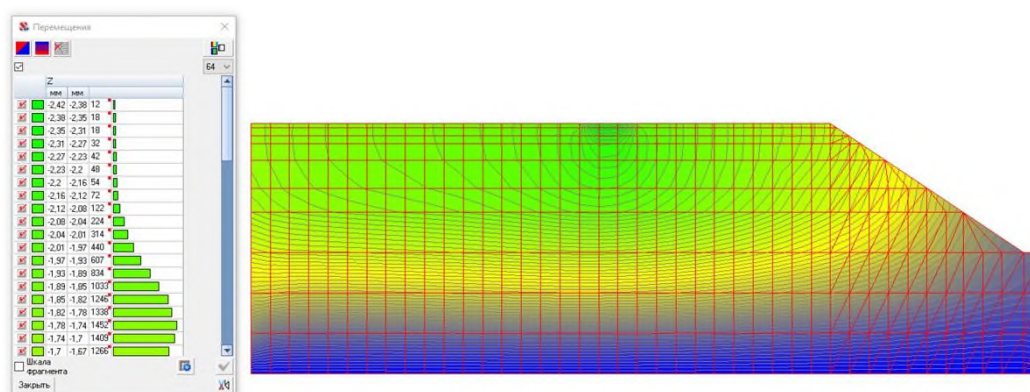
1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП; 4 – кювет

Рисунок А.50 – Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції I категорії з щебеним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа: при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН : а) на відстані 3,12 м від осі дороги, б) на відстані 10,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя

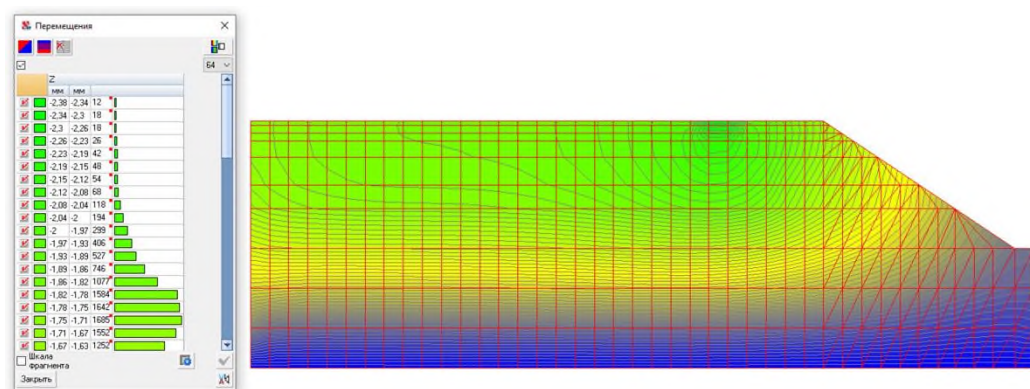




а)



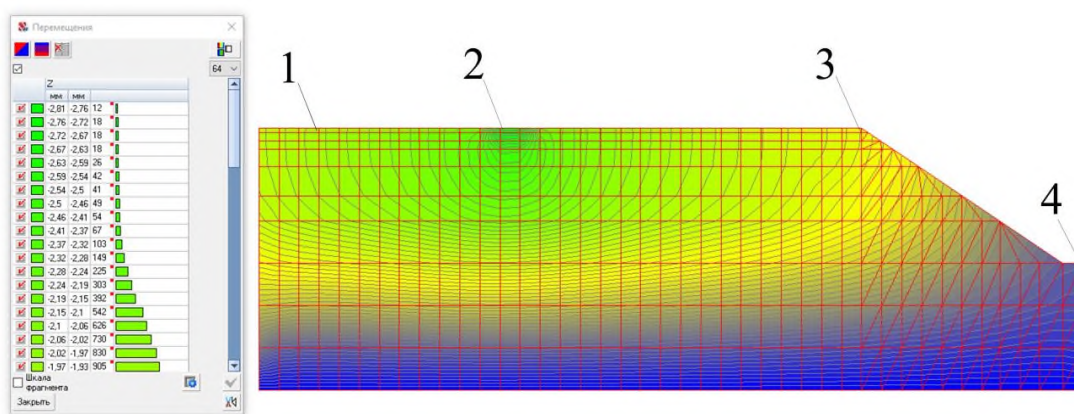
б)



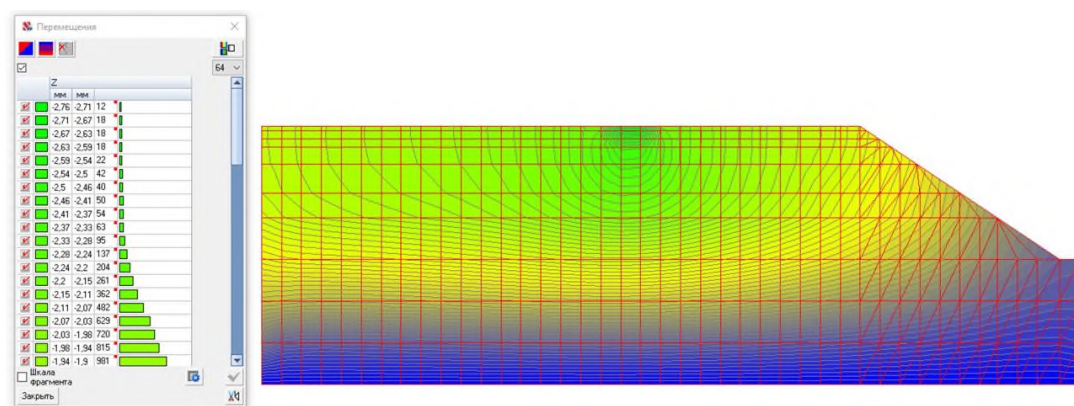
в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП; 4 – кювет

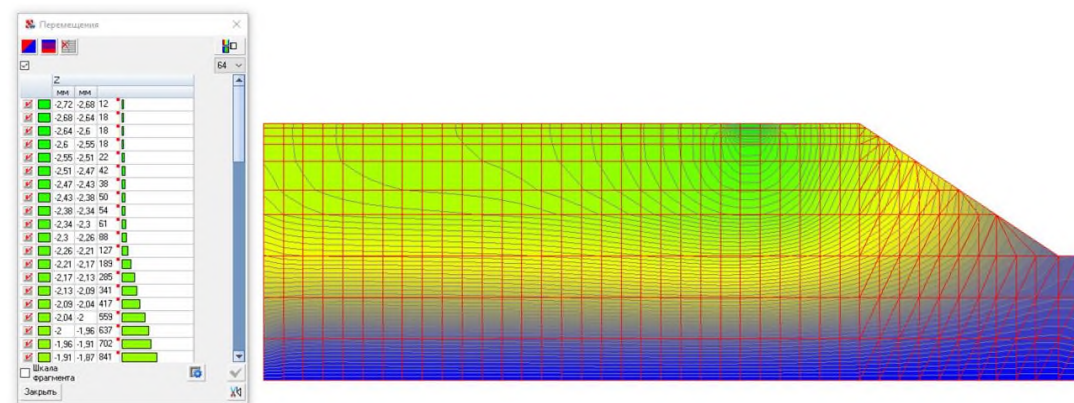
Рисунок А.51 – Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції II категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа: при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 2,4 м від осі дороги, б) на відстані 2,8 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя



а)



б)

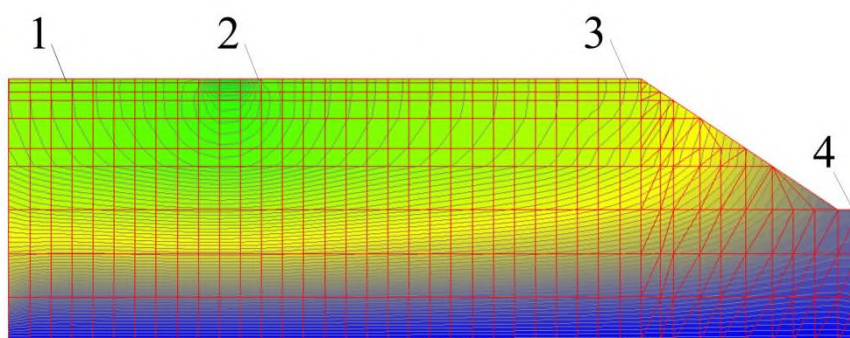
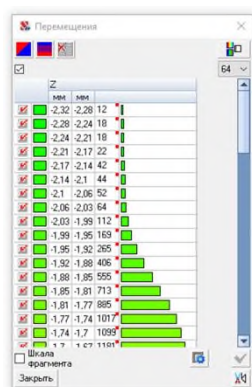


в)

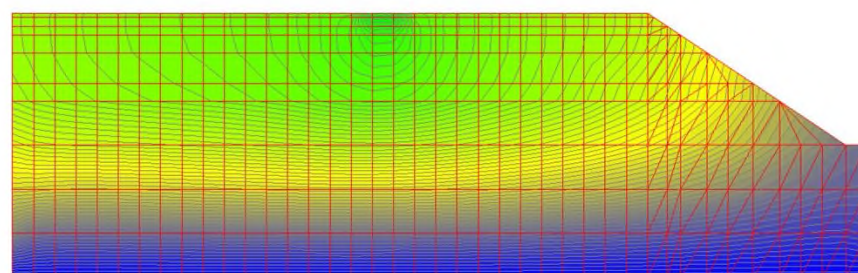
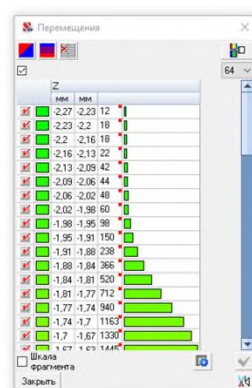
1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП; 4 – кювет

Рисунок А.52 – Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції II категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа: при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН : а) на відстані 2,4 м від осі дороги, б) на відстані 2,8 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя , 1 – смуга руху на проїзній частині

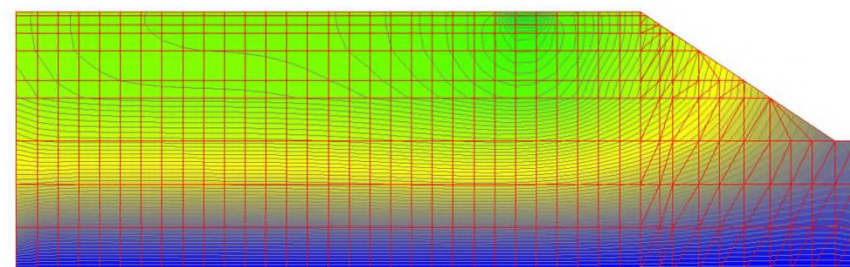
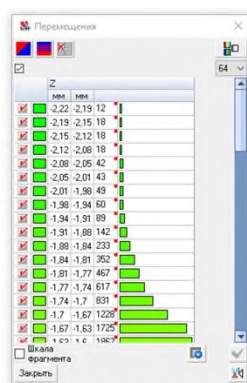




а)



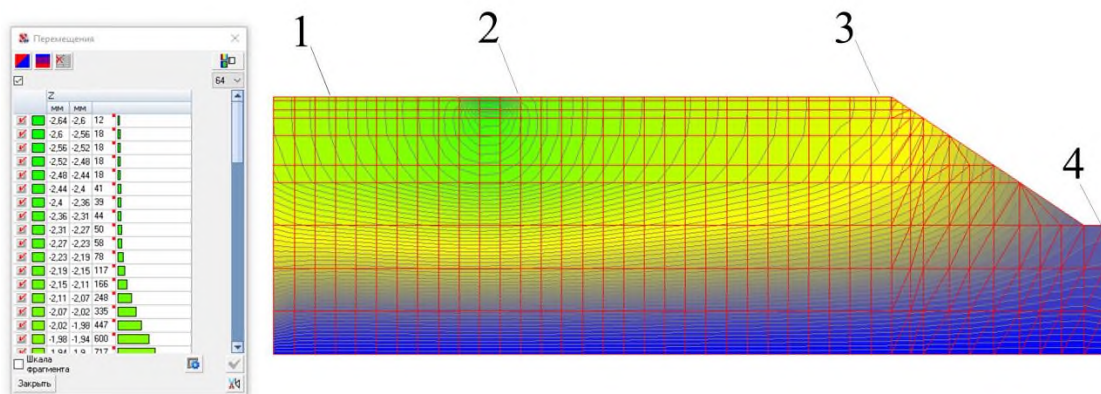
б)



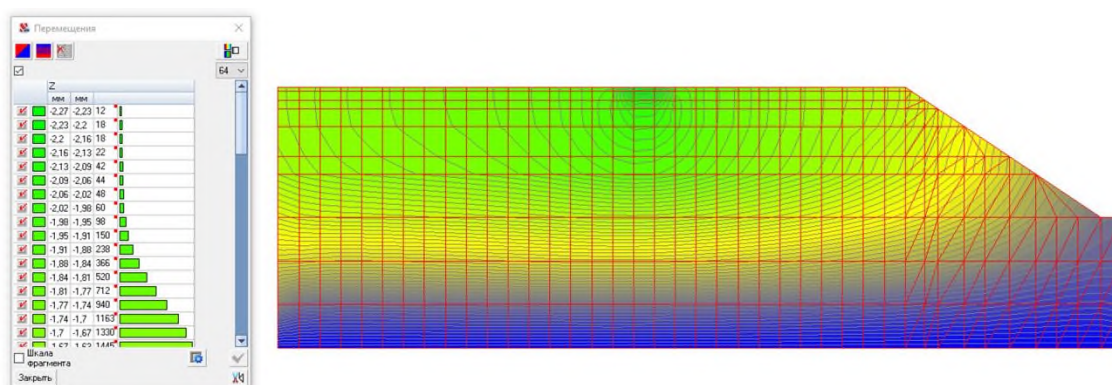
в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП; 4 – кювет

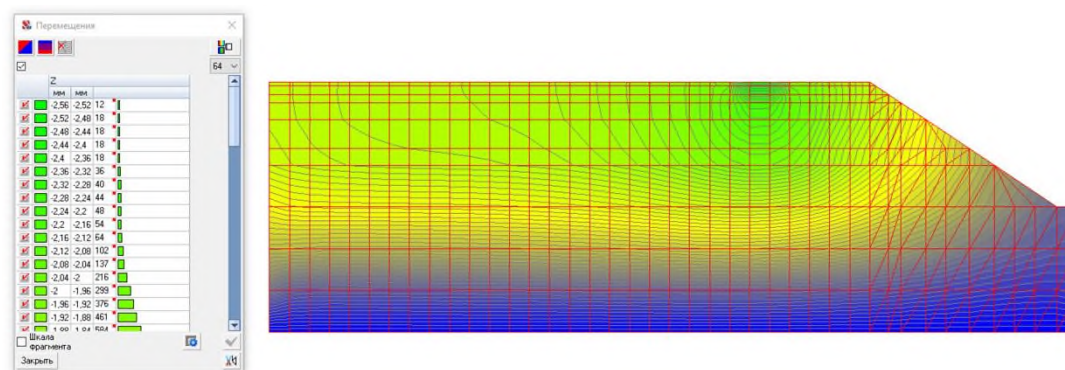
Рисунок А.53 – Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції II категорії з щебеним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа: при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 2,4 м від осі дороги, б) на відстані 2,8 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя



а)



б)

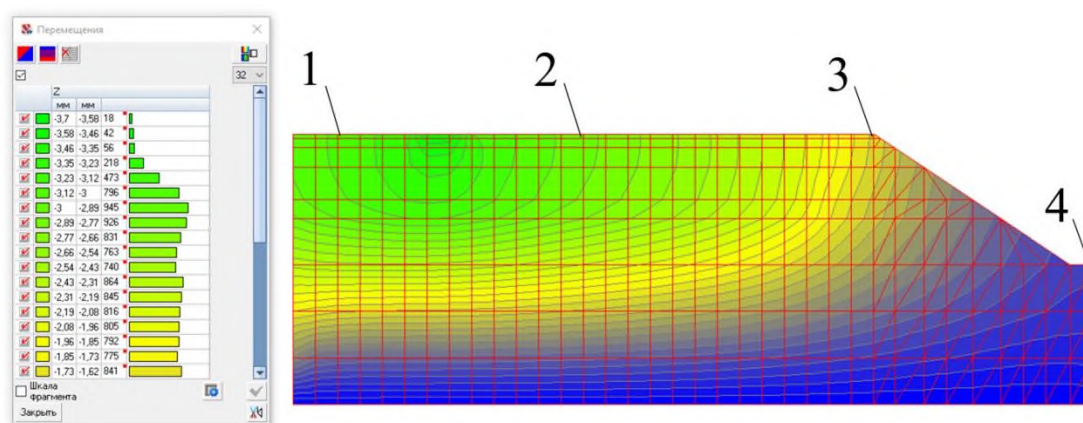


в)

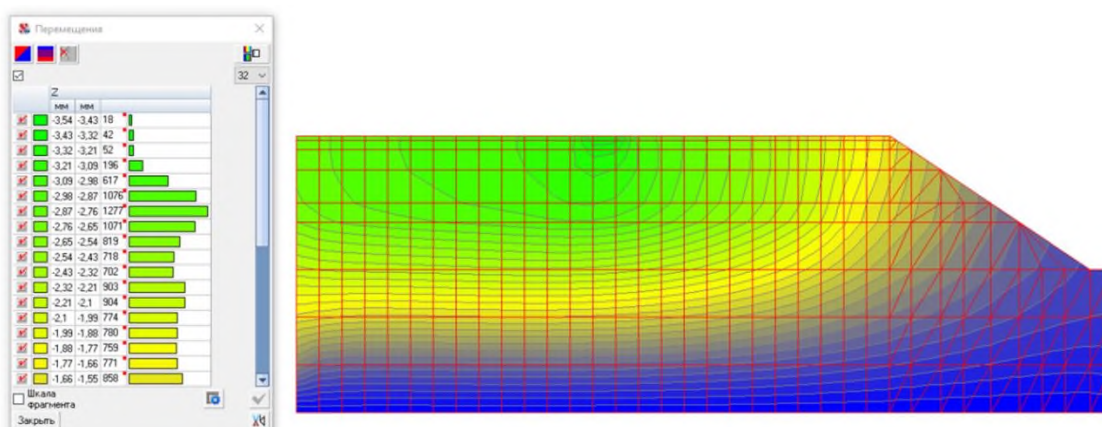
1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП; 4 – кювет

Рисунок А.54 – Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції II категорії з щебеним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа: при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН : а) на відстані 2,4 м від осі дороги, б) на відстані 2,8 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя

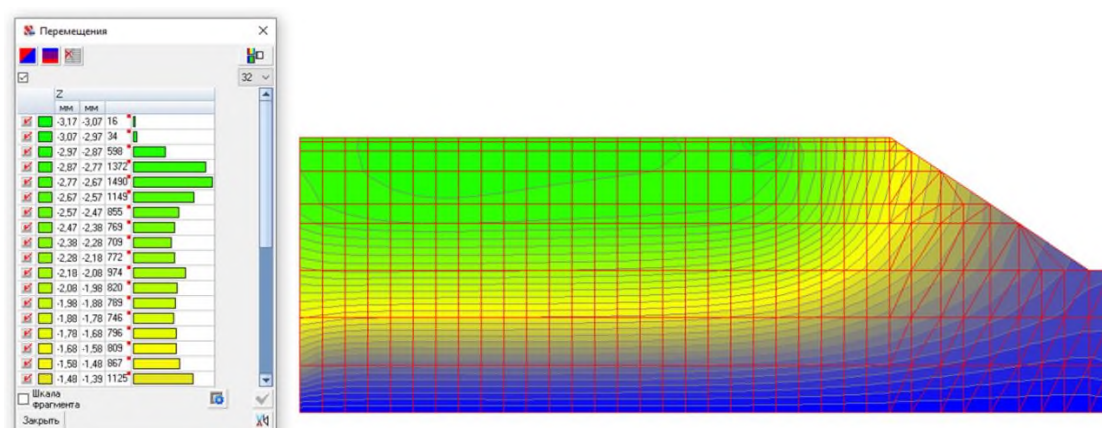




а)



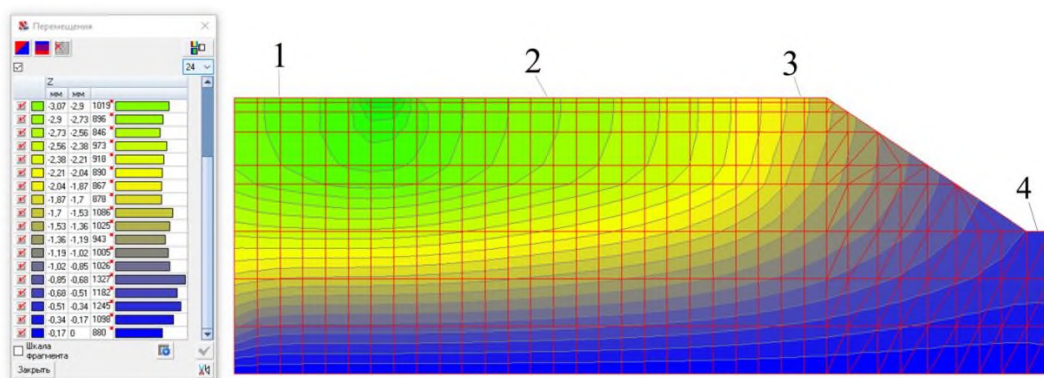
б)



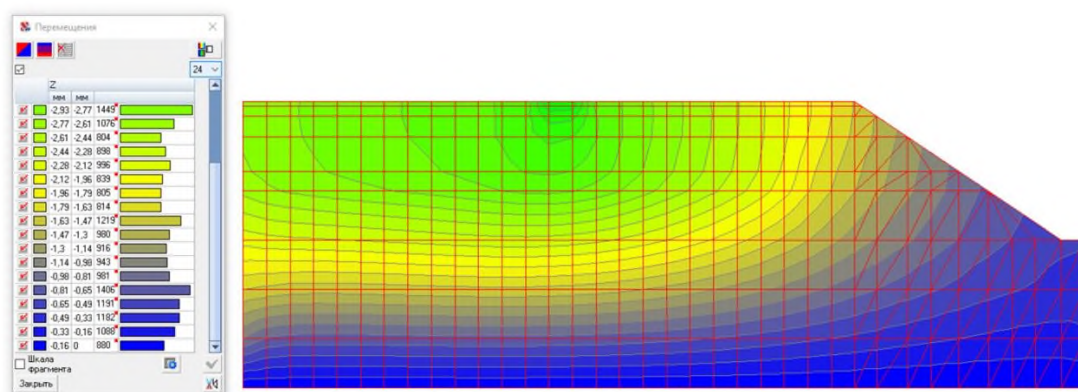
в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП; 4 – кювет

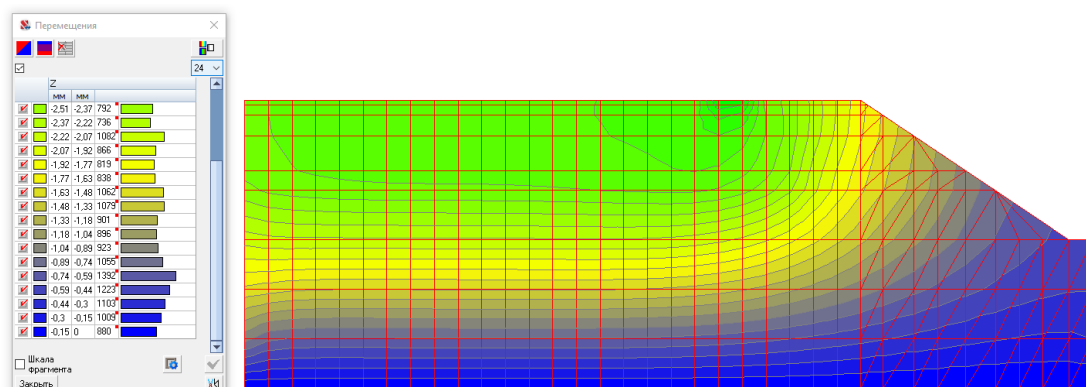
Рисунок А.55 – Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції III категорії з піщаним дренавальним шаром з модулем пружності  $E = 116$  МПа: при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 1,68 м від осі дороги, б) на відстані 3,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя



а)



б)

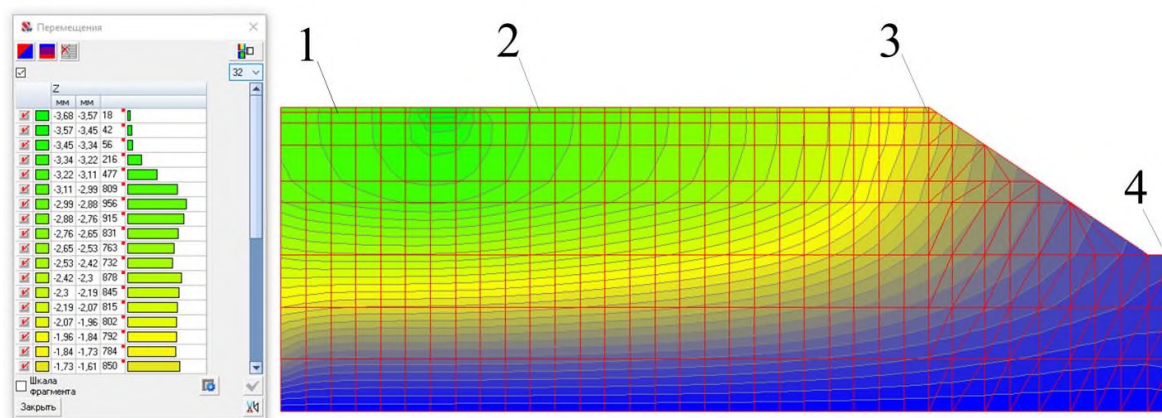


в)

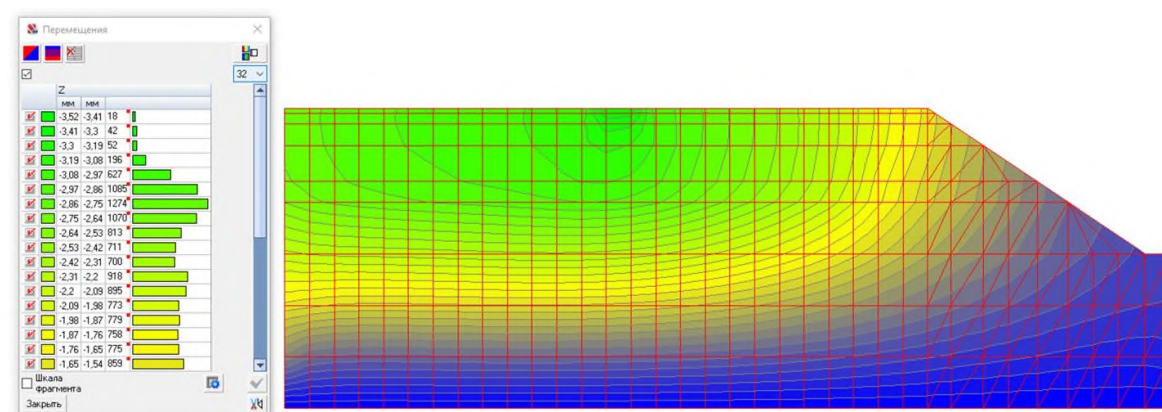
1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП; 4 – кювет

Рисунок А.56 – Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції III категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа: при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН : а) на відстані 1,68 м від осі дороги, б) на відстані 3,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя

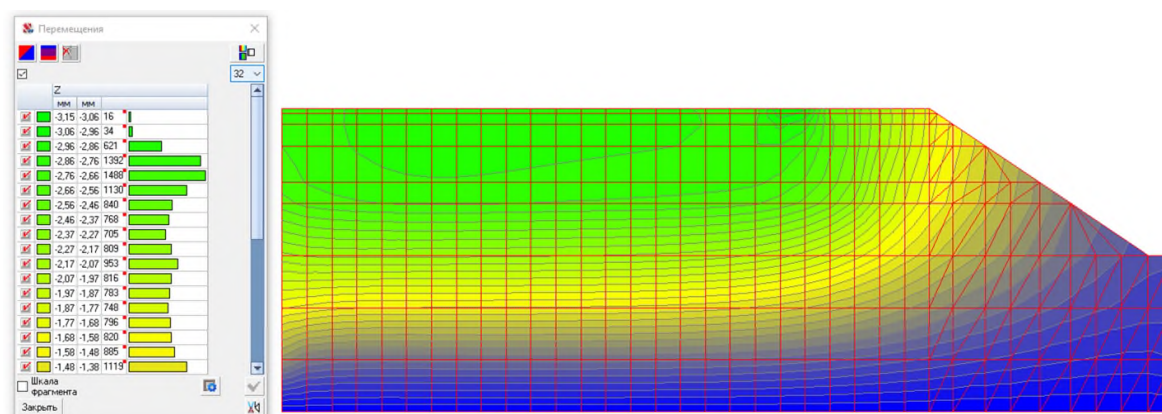




а)



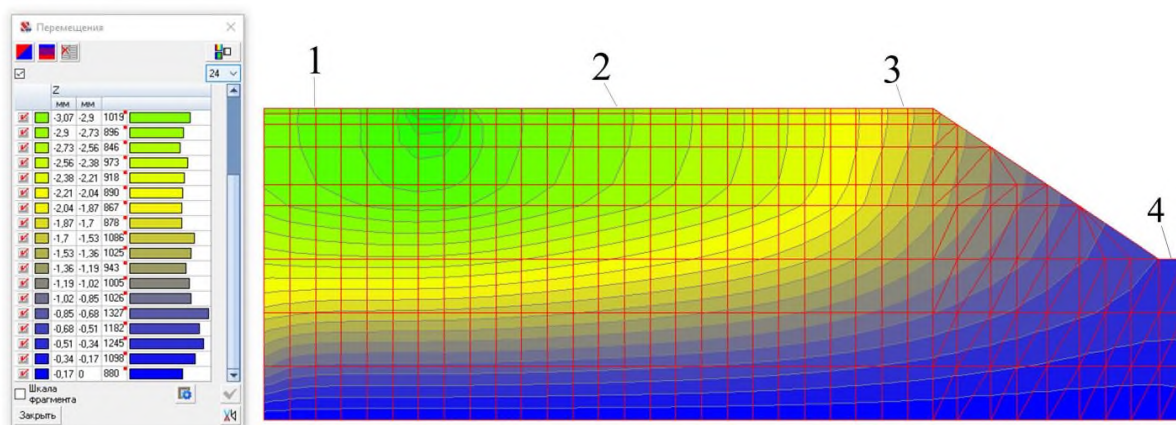
б)



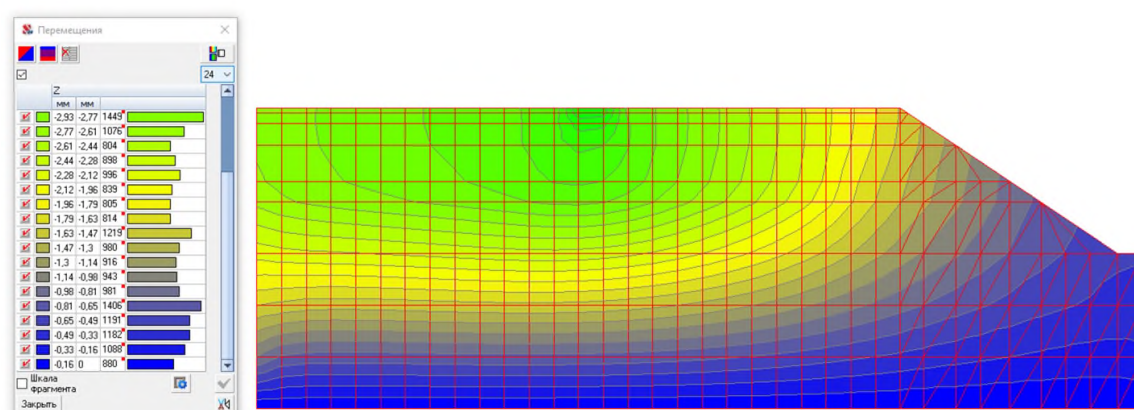
в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс 3П; 4 – кювет

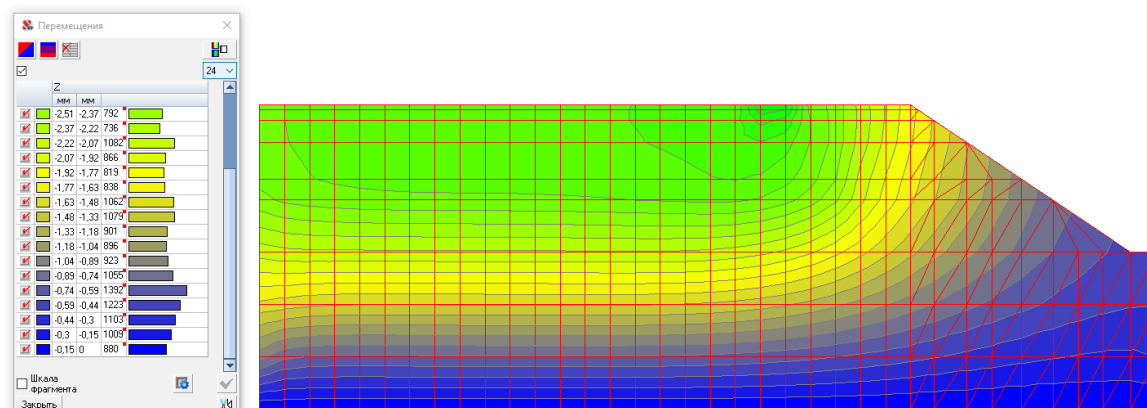
Рисунок А.57 – Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції III категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа: при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 1,68 м від осі дороги, б) на відстані 3,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя



а)



б)

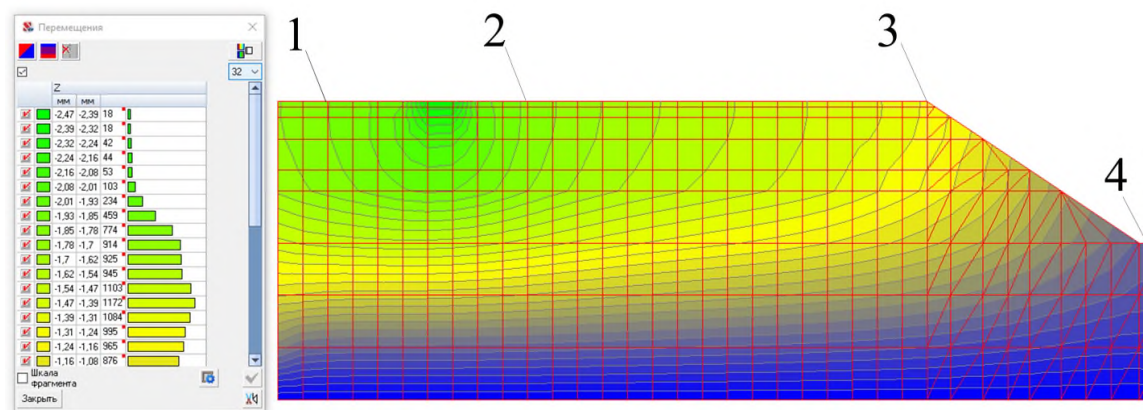


в)

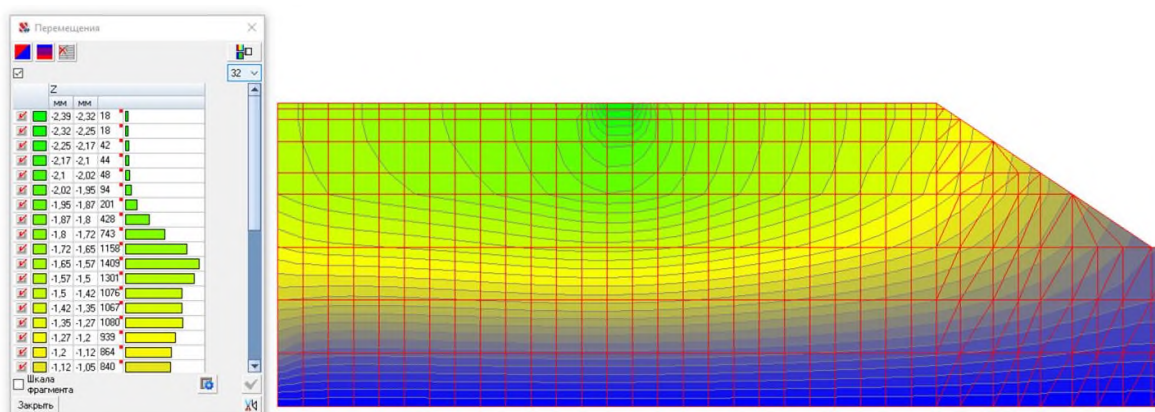
1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП; 4 – кювет

Рисунок А.58 – Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції III категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа: при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН : а) на відстані 1,68 м від осі дороги, б) на відстані 3,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя

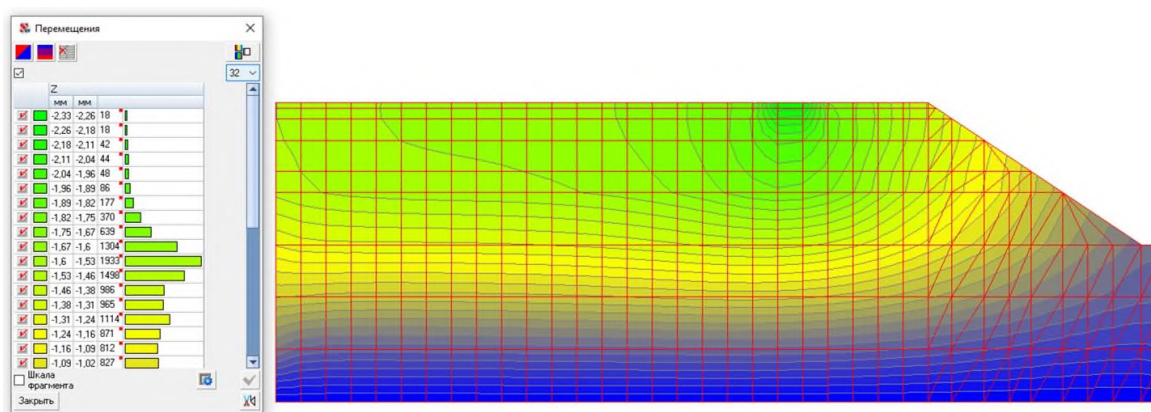




а)



б)

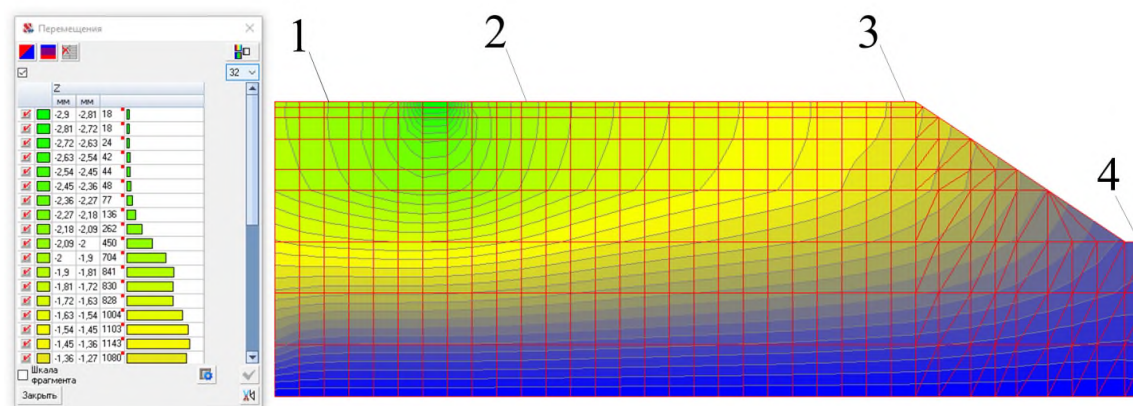


в)

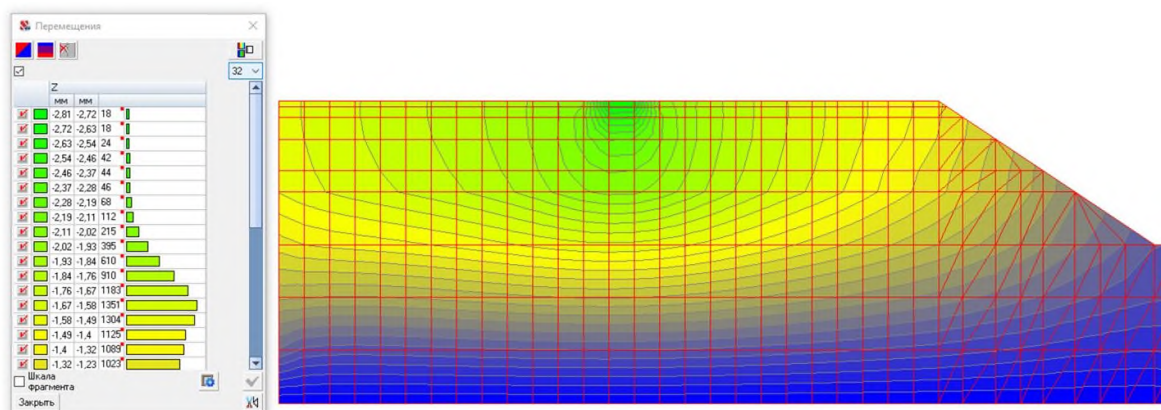
1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП; 4 – кювет

Рисунок А.59 – Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції III категорії з щебеним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа: при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 1,68 м від осі дороги, б) на відстані 3,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя

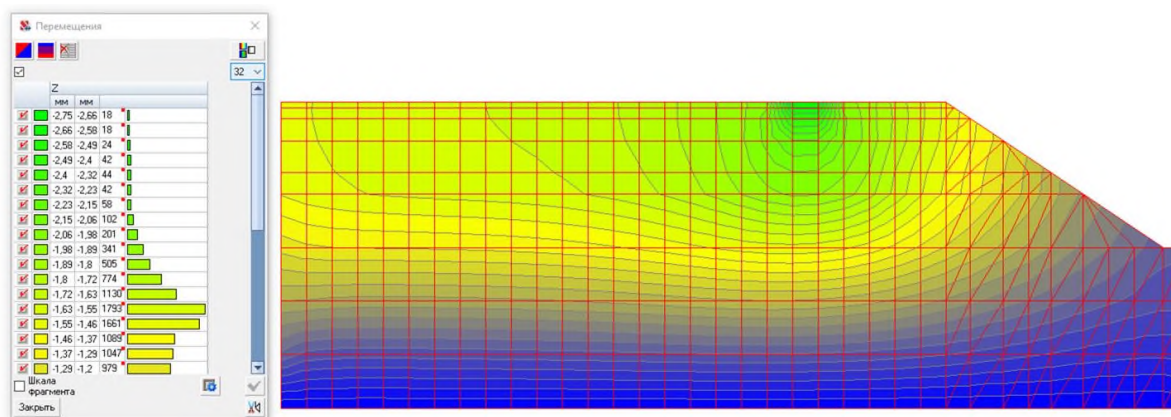




а)



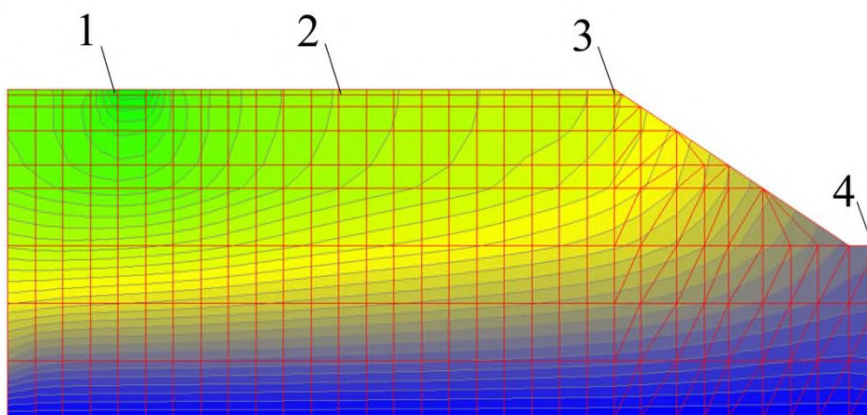
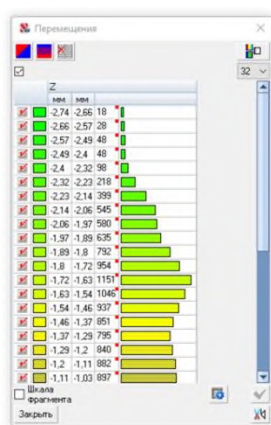
б)



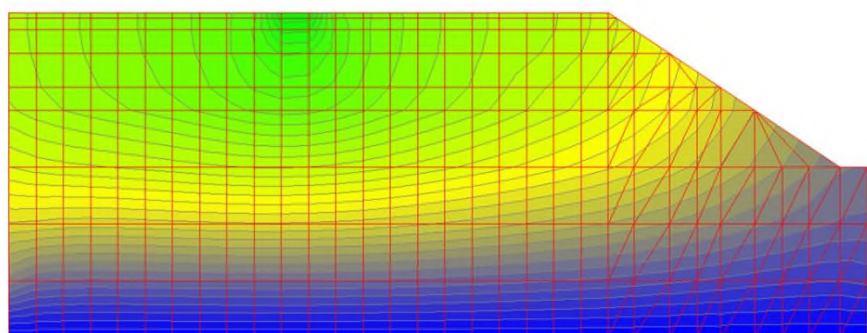
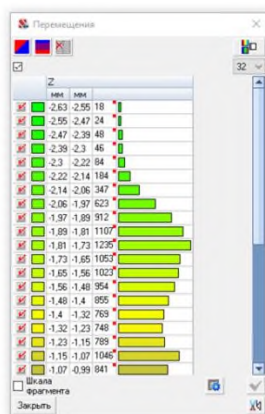
в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП; 4 – кювет

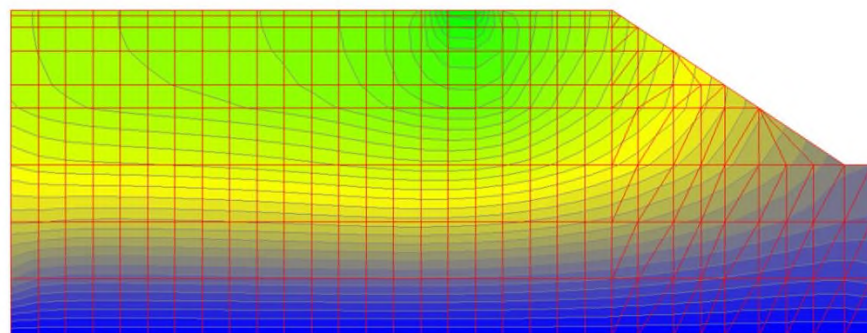
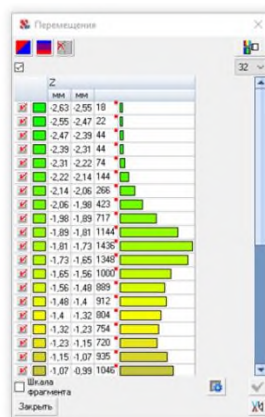
Рисунок А.60 – Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції III категорії з щобеновим дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа: при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 1,68 м від осі дороги, б) на відстані 3,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя



а)



б)

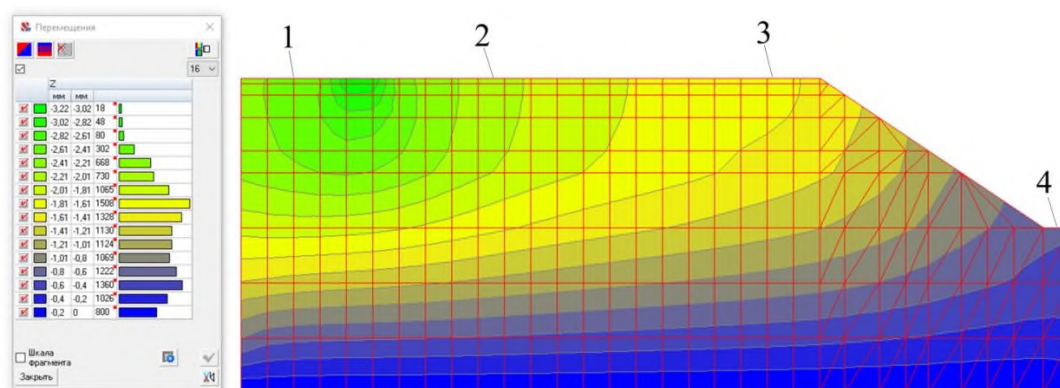


в)

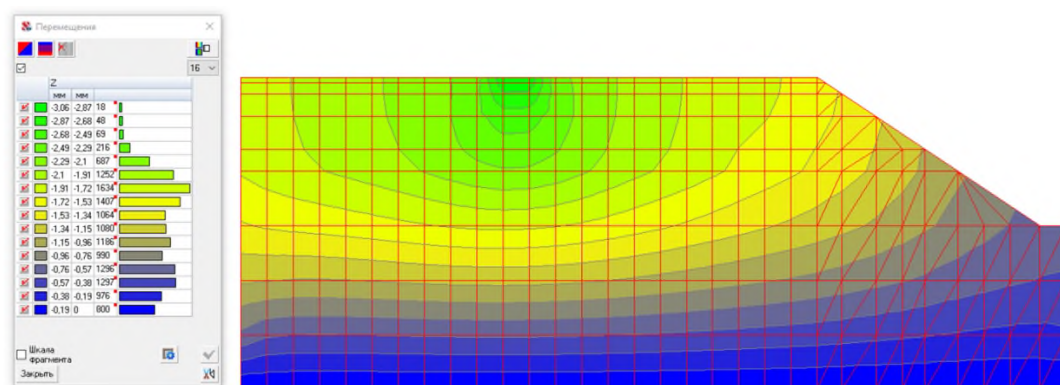
1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП; 4 – кювет

Рисунок А.61 – Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції IV категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа: при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 1,68 м від осі дороги, б) на відстані 3,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя

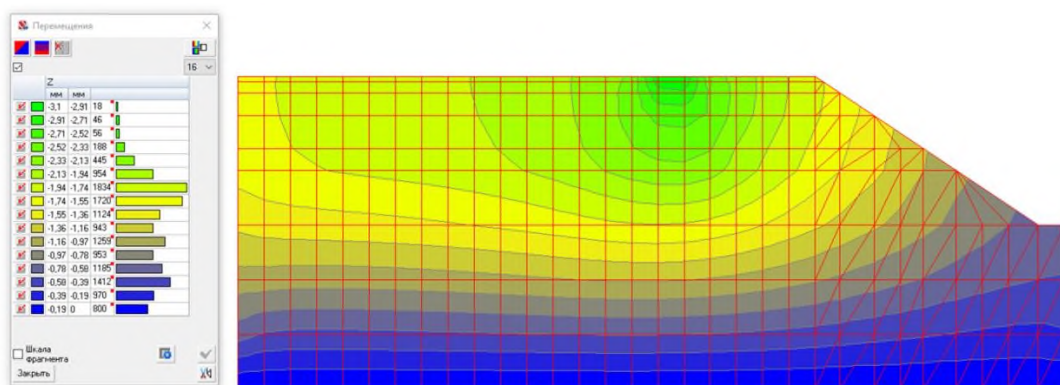




а)



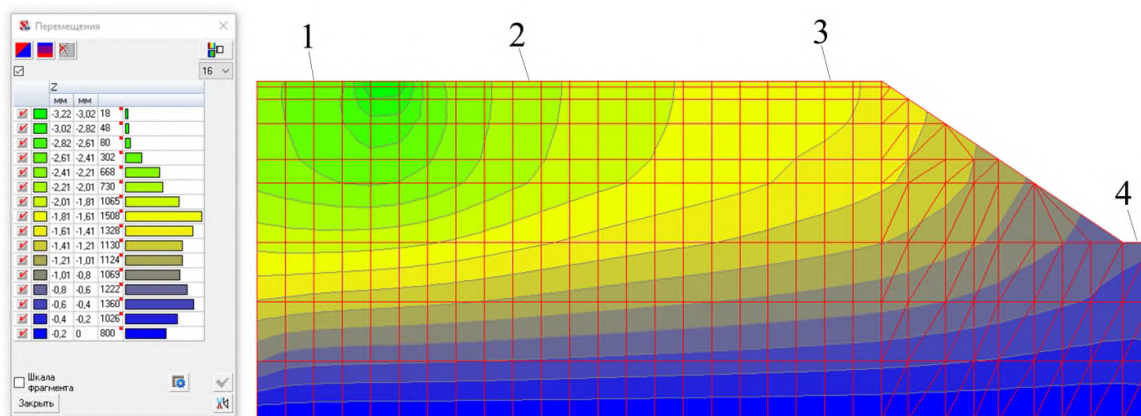
б)



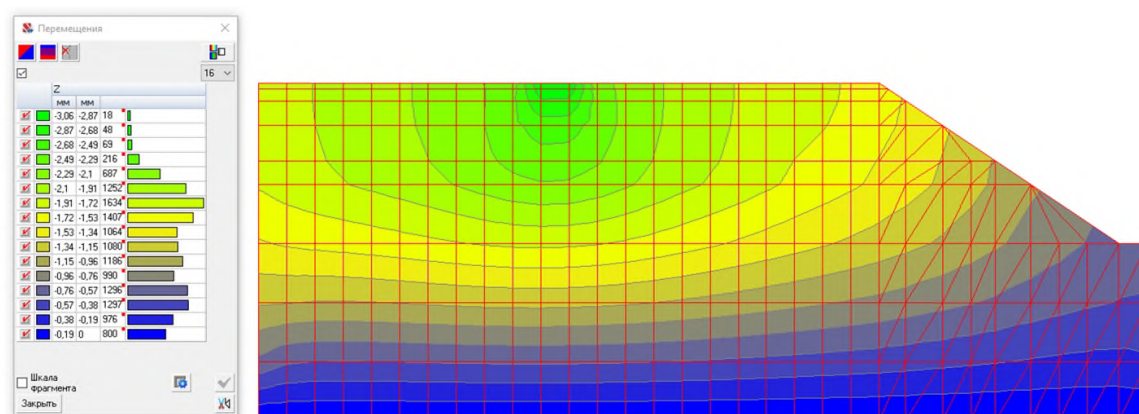
в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП; 4 – кювет

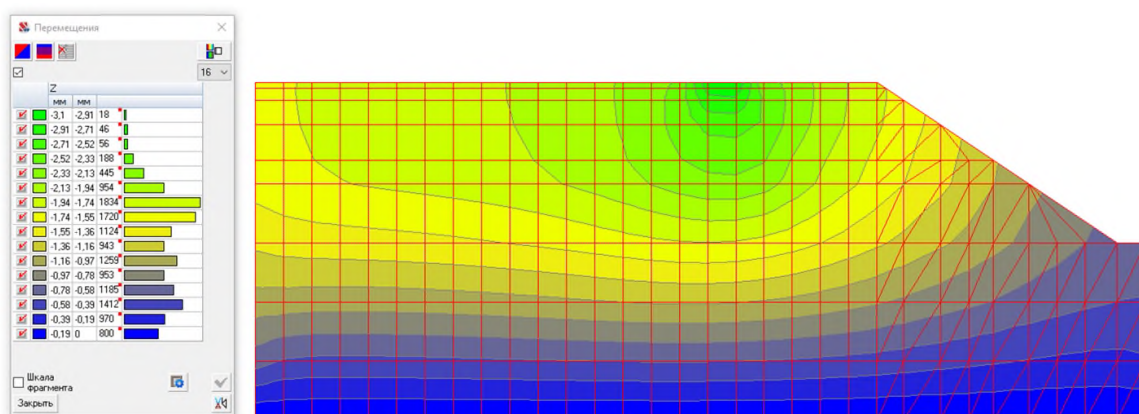
Рисунок А.62 – Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції IV категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 116$  МПа: при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН : а) на відстані 1,68 м від осі дороги, б) на відстані 3,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя



а)



б)

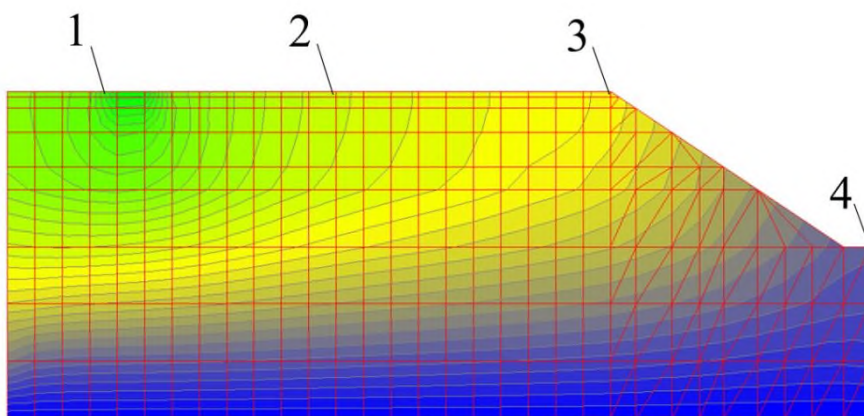
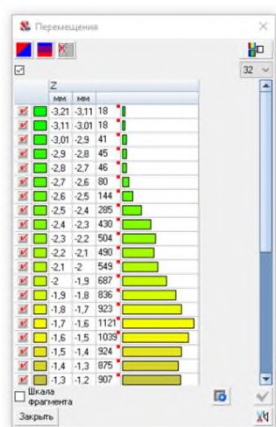


в)

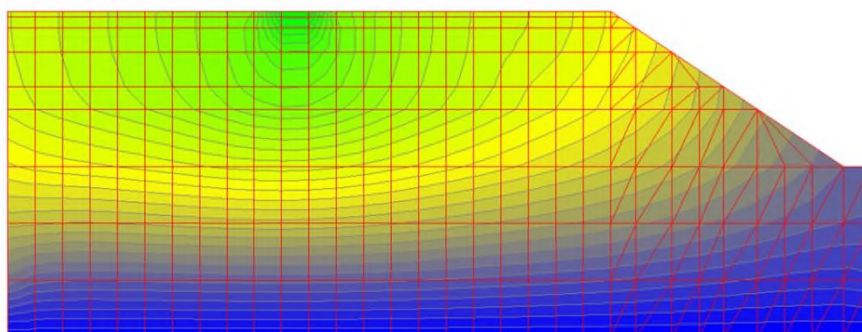
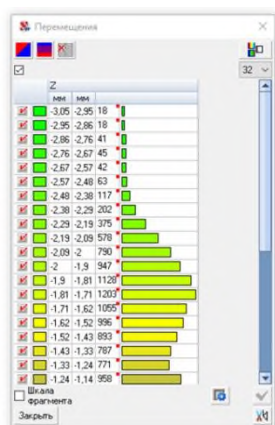
1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс 3П; 4 – кювет

Рисунок А.63 – Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції IV категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа: при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 1,68 м від осі дороги, б) на відстані 3,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя

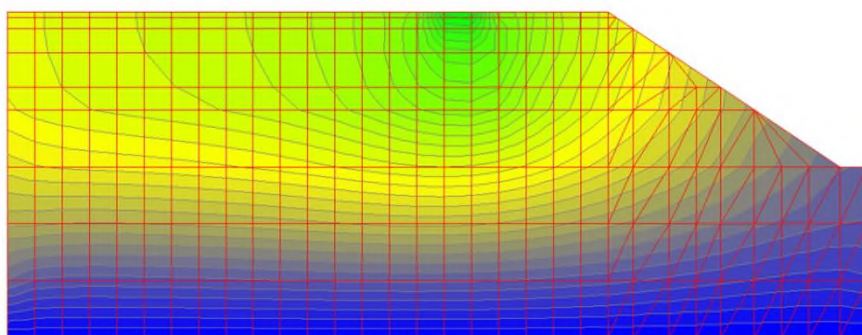
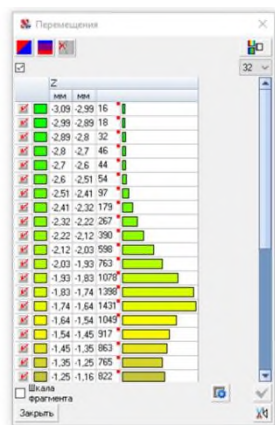




а)



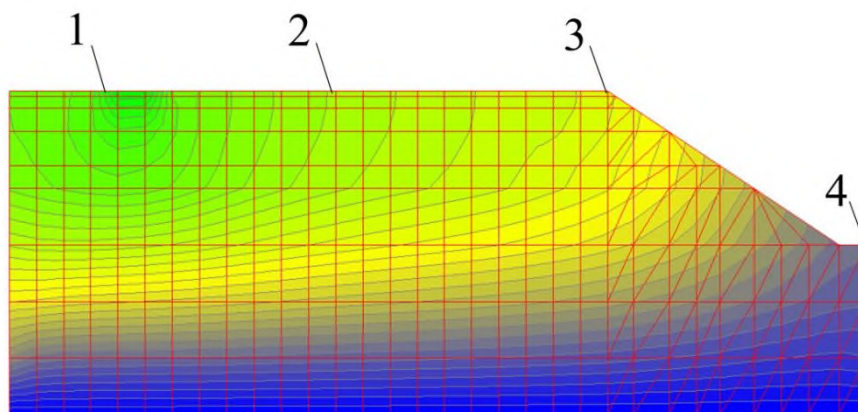
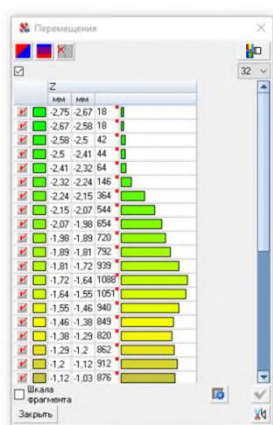
б)



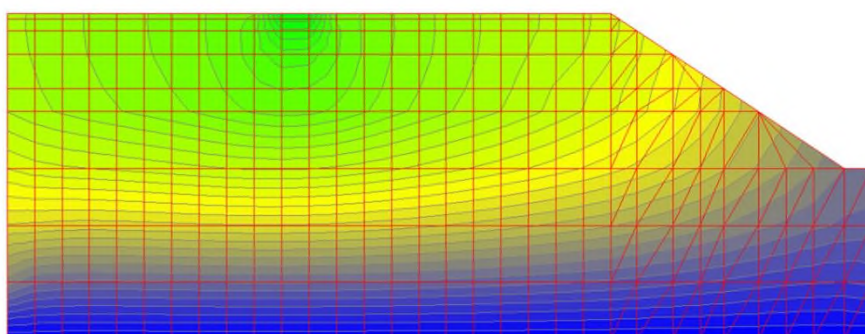
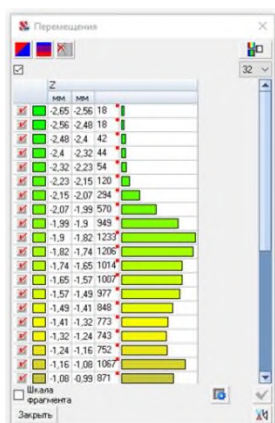
в)

1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП; 4 – кювет

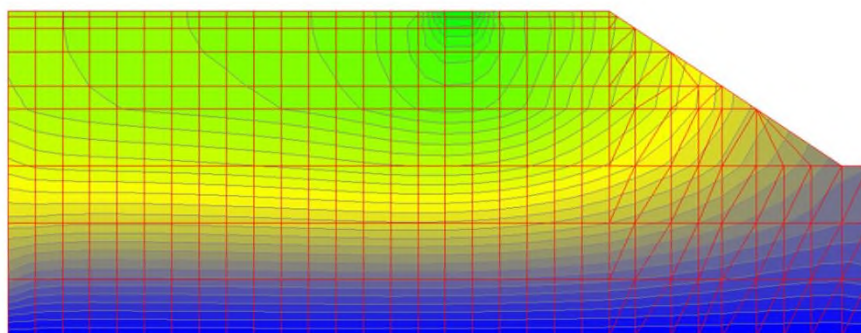
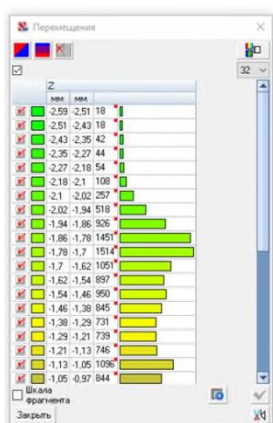
Рисунок А.64 – Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції IV категорії з піщаним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 130$  МПа: при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: а) на відстані 1,68 м від осі дороги, б) на відстані 3,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя



а)



б)

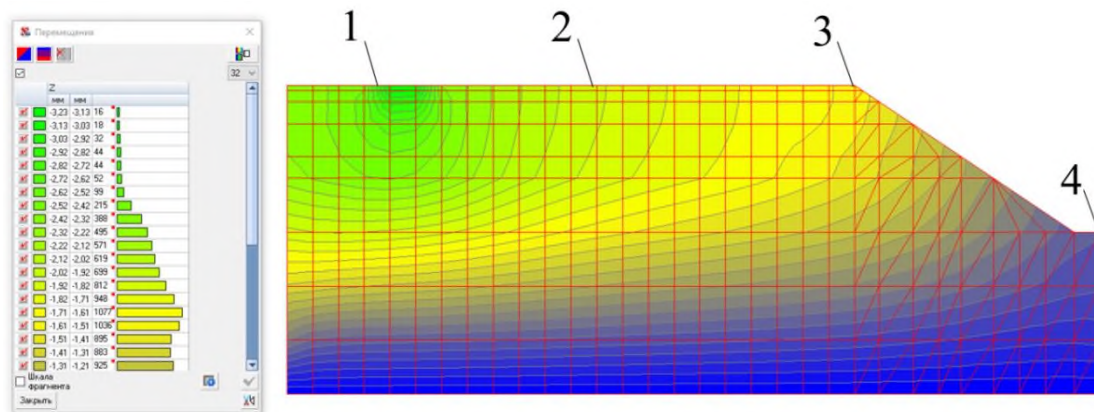


в)

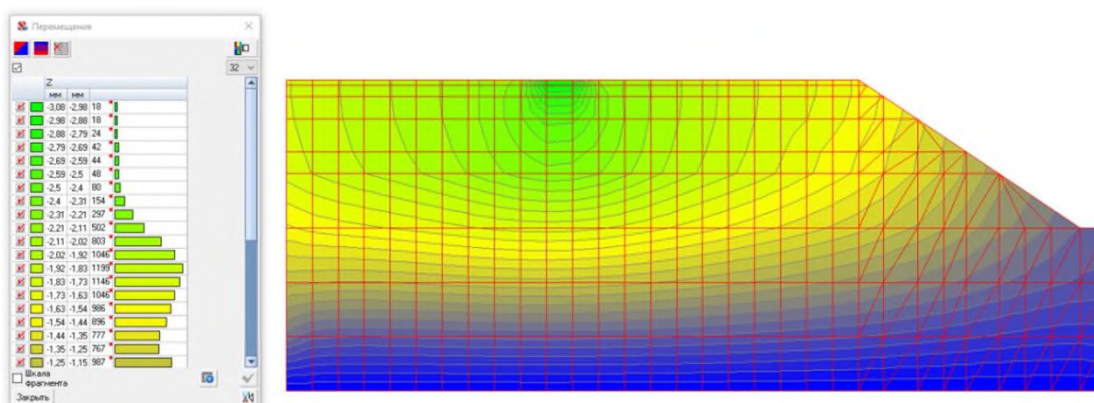
1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП; 4 – кювет

Рисунок А.65 – Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції IV категорії з щебеним дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа: при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: а) на відстані 1,68 м від осі дороги, б) на відстані 3,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя

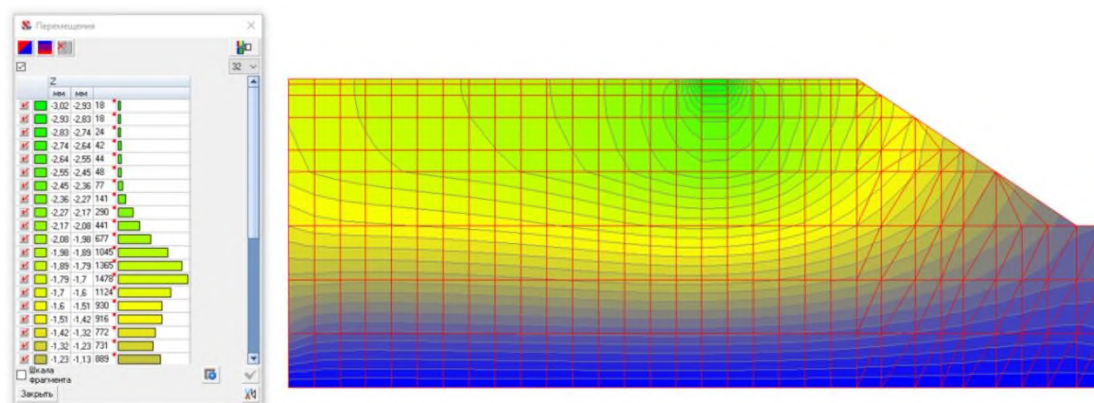




а)



б)



в)

Рисунок А.66 – Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції I категорії з щебневим дренавальним шаром, з модулем пружності  $E = 250$  МПа: при навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН : а) на відстані 1,68 м від осі дороги, б) на відстані 3,56 м від осі дороги, в) на відстані 1 м від кромки узбіччя

## **ДОДАТОК Б**

### **ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ**



### ДОВІДКА

про впровадження результатів науково-дослідної роботи

Результати дисертаційної роботи Кватадзе А.І. за темою «Удосконалення методу прогнозування вологісного режиму дренажного шару дорожньої конструкції під дією навантаження» впроваджено у навчальний процес, а саме при викладанні дисциплін «Механіка земляного полотна», «Будівництво та експлуатація інженерних мереж», та в дипломному проектуванні для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія, ОП «Автомобільні дороги, вулиці та дороги населених пунктів».

Проректор з навчальної роботи НТУ,  
професор



О.К. Гришук

Заступник декана факультету  
транспортного будівництва НТУ,  
доцент

А.В. Бубела

Державне агентство автомобільних доріг України (Укравтодор)

Національний транспортний університет

**РЕКОМЕНДОВАНО**

Науковою радою Державного агентства  
автомобільних доріг України

Протокол від " \_\_\_\_ " \_\_\_\_ 2018 р. № \_\_\_\_

**РЕКОМЕНДОВАНО**

Науково-технічною радою

ДП «ДерждорНДІ»

Протокол від " 14 " 09 2018 р. № 5

**ДОВІДНИК № 4**

**КЛІМАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА КЛІМАТИЧНЕ РАЙОНУВАННЯ  
ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ ВОДНО-ТЕПЛОВОГО  
РЕЖИМУ В ДОРОЖНЬОМУ БУДІВНИЦТВІ**

**ПОГОДЖЕНО**

Завідувач Сектору  
інноваційного розвитку Укравтодору

\_\_\_\_\_  
А.О. Цинка

" 26 " 09 2018 р.

**ПОГОДЖЕНО**

Директор Департаменту розвитку  
мережі доріг

\_\_\_\_\_  
С.Ю. Цепелев

" 26 " 09 2018р.

**ПОГОДЖЕНО**

Начальник відділу стандартизації та  
метрології ДП «ДерждорНДІ»

\_\_\_\_\_  
М.М. Стулій

" 13 " 09 2018р.

**РОЗРОБЛЕНО**

Перший проректор — проректор з  
наукової роботи Національного  
транспортного університету (НТУ)

\_\_\_\_\_  
М.М. Дмитрієв

" 28 " 08 2018 р.

Науковий керівник, декан  
факультету транспортного  
будівництва, професор кафедри  
транспортного будівництва та  
управління майном НТУ

\_\_\_\_\_  
О.С. Славінська

" 28 " 08 2018р.

Відповідальний виконавець,  
професор, завідуючий кафедрою  
транспортного будівництва та  
управління майном НТУ

\_\_\_\_\_  
В.Я. Савенко

" 28 " 08 2018 р.

Київ 2018



# CERTIFICATE

*This is to certify that a participant of the Tempus project  
 “Center of Excellence for young REsearchers” (CERES)  
 544137-TEMPUS-1-2013-1-SK-TEMPUS-JPHES*

**Ms. Alina Kvatadze**

National Transport University

*has participated in Workshop CERES -  
 Modern Experience on Young Researchers Organization  
 held on 5 - 7 July 2017 in Žilina, Slovakia*

**Prof. Karol Matiaško, PhD.**

*project coordinator*



Co-funded by the  
 Tempus Programme  
 of the European Union











**МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ**  
(Мінекономрозвитку України)

вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, тел. 523-93-94, факс 226-31-81  
Web: <http://www.me.gov.ua>, e-mail: [meconomy@me.gov.ua](mailto:meconomy@me.gov.ua), код ЄДРПОУ 37508596

**Р І Ш Е Н Н Я**

**ПРО РЕЄСТРАЦІЮ АВТОРСЬКОГО ПРАВА НА ТВІР**

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України розглянуло заяву

**Славінська Олена Сергіївна, вул. Велика Васильківська, 122, кв. 53, м. Київ, 03150**  
(повне ім'я автора, адреса)

заявка від **22.02.2019** № **87799**

про реєстрацію авторського права на твір і прийняло рішення зареєструвати авторське право на твір Літературний письмовий твір наукового характеру "Розробка моделі вагомостей параметрів автомобільних доріг у складі інформаційно-управлінської системи грошової оцінки"; Славінська Олена Сергіївна, Стюжка Віталій Володимирович, Харченко Анна Миколаївна, Бубела Андрій Володимирович, Кватадзе Аліна Іродіонівна

(вид, повна, скорочена (за наявності) назва твору, повне ім'я, псевдонім (за наявності) автора (ів))

Внесення відомостей до Державного реєстру свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір та видачу свідоцтва будуть здійснені за умови сплати збору за оформлення і видачу свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір відповідно до п.3 постанови Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2001 року № 1756 "Про державну реєстрацію авторського права і договорів, які стосуються права автора на твір".

Якщо протягом трьох місяців від дати одержання заявником рішення про реєстрацію авторського права на твір Управління державних реєстрацій Департаменту інтелектуальної власності Міністерства економічного розвитку і торгівлі України не одержало документ про сплату збору за оформлення і видачу свідоцтва у розмірі та порядку, визначених законодавством, або копію документа, що підтверджує право на звільнення від сплати зазначеного збору, заявка вважається відхиленою і реєстрація авторського права та публікація відомостей про реєстрацію Управлінням державних реєстрацій Департаменту інтелектуальної власності Міністерства економічного розвитку і торгівлі України не проводиться.

**Державний секретар**  
**Міністерства економічного розвитку**  
**і торгівлі України**



**ЗГІДНО З**  
**ОРИГІНАЛОМ**



**О.Ю. Перевезенцев**

# ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ



ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО – УКРАЇНСЬКИЙ  
ДЕРЖАВНИЙ ІНСТИТУТ З ПРОЕКТУВАННЯ  
ОБ'ЄКТІВ ДОРОЖНЬОГО ГОСПОДАРСТВА  
УКРДІПРОДОР

03680, м. Київ, Повітрофлотський пр-кт, 39/1  
тел./факс: (044) 206-64-30  
e-mail: okt@diprodor.com



“24” 06 2020 р.

№ 803-01

## ДОВІДКА

### про використання результатів науково-дослідної роботи

Результати досліджень, які відображені в науково-дослідній роботі здобувачки кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету Кватадзе Аліни Іродіонівни «Удосконалення методу прогнозування вологісного режиму дренажного шару дорожньої конструкції під дією навантаження» використані при виконанні розрахунків товщини дренажувальних шарів у проектах будівництва обходів населених пунктів (с. Красногорівка, с. Покровська Багачка, м. Полтава), при реконструкції та капітальному ремонті автомобільної дороги значення М-03 Київ - Харків - Довжанський на ділянці Лубни - Полтава, Полтавська область.

Проведені розрахунки дали можливість на стадії проектування ділянки автомобільної дороги з підвищеною інтенсивністю великовагових транспортних засобів визначити параметри площинного дренажу, що сприятиме підвищенню надійності дорожньої конструкції.

Проведені розрахунки по запропонованому методу в порівнянні із стандартною методикою дало змогу отримати економічний ефект від зменшення шару - дренажного шару дорожньої конструкції на окремих ділянках, в розмірі 515 (п'ятсот п'ятнадцять) тис. грн.

В.о. Директора



П.В. Майбородюк





ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ

Г Р А Н Б У Д  
Л І Д Е Р

01133, Україна, м. Київ, бул. Лесі Українки, будинок, 34, офіс 305  
код: 42109243 тел. (097) 793-30-36 e-mail: [granbud.lider@gmail.com](mailto:granbud.lider@gmail.com)

№ 07-27-02

«27» липня 2020 року

### ДОВІДКА

**про впровадження результатів наукових досліджень здобувачки кафедри  
транспортного будівництва та управління майном  
Національного транспортного університету**

**Кватадзе Аліни Іродіонівни**

Даною довідкою засвідчується, що результати наукових досліджень Кватадзе А.І. щодо закономірностей зміни вологісного режиму та розрахунку дренажних конструкцій мілкого закладання отримали практичне застосування при плануванні та виконанні робіт з поточного ремонту і експлуатаційного утримання автомобільної дороги загального користування державного значення М-05 Київ – Одеса у межах Кіровоградської області.

Кватадзе А.І. є співавтором Довідника № 4 «Кліматичні характеристики та кліматичне районування території України для регулювання водно-теплогового режиму в дорожньому будівництві». Зазначений документ знайшов практичне застосування при виконанні ремонтних робіт та утриманні дренажного шару на ділянці автомобільної дороги М-05 Київ – Одеса, км 237+108 – км 274+435 упродовж 2018-2020 років.

Директор, канд. техн. наук

В.В. Стьожка



№ 03/08/01  
дата 03 серпня 2020р.

## ДОВІДКА

**Про впровадження результатів  
науково-дослідної роботи  
Кватадзе А.І.**

Даною довідкою засвідчується, що результати досліджень, відображені в науково-дослідній роботі Кватадзе Аліни Іродіонівни «Удосконалення методу прогнозування вологісного режиму дренажного шару дорожньої конструкції під дією навантаження» та у Довіднику №4. «Кліматичні характеристики та кліматичне районування території України для регулювання водно-теплогового режиму в дорожньому будівництві» використані при розробці заходів з регулювання водно-теплогового режиму дорожньої конструкції шляхом влаштування площинного дренажу при розробленні робочого проекту поточного середнього ремонту автомобільної дороги загального користування державного значення Н-11 Дніпро-Миколаїв (через м. Кривий Ріг) на ділянках: км 179+570 – км 188+570, км 188+570 – км 197+570, км 298+000 – км 303+000, км 303+000 – км 308+500 у Миколаївській області.

Проведені розрахунки дозволили визначити товщину дренажного шару для осушення шарів дорожнього одягу та верхньої зони земляного полотна і тим самим зменшити витрати на ремонт та експлуатаційне утримання ділянки автомобільної дороги.

З повагою,  
заступник директора  
ПП «Парк Нових Технологій»



А.Я. Назар'яни



ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ  
(УКРАВТОДОР)

Державне підприємство

«Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна»  
ДП «ДерждорНДІ»

03113, м. Київ,  
проспект Перемоги, 57  
код ЄДРПОУ 03450778



тел/факс (044) 456-34-15  
e-mail: [dor nauka@derndi.org.ua](mailto:dor nauka@derndi.org.ua)  
[www.derndi.org.ua](http://www.derndi.org.ua)  
[www.facebook.com/derndi/](http://www.facebook.com/derndi/)

15.04.2020 № 19.1-5-1496

на № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

### ДОВІДКА

#### про використання результатів науково-дослідної роботи

Результати науково-дослідної роботи здобувачки кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету Кватадзе Аліни Іродіонівни у вигляді Довідника № 4. «Кліматичні характеристики та кліматичне районування території України для регулювання водно-теплогового режиму в дорожньому будівництві», який був розроблений на замовлення Державного агентства автомобільних доріг України (Укравтодор), наразі використовується у практиці проектування дренажних конструкцій мілкового закладання на автомобільних дорогах загального користування.

Директор ДП "ДерждорНДІ",  
канд.ekon. наук



А.О. Безуглий

018001

Наталія Гієвська  
067 231 0757

## ДОДАТОК В

### СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

**Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:**

1. Usichenko O., Kvatadze A. Road-climate zoning for water-thermal mode regulation in transport structures. *World Science*. 2020. Vol. 1, No 3(55). P. 8-12. URL: [https://doi.org/10.31435/rsglobal\\_ws/31032020/6966](https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/31032020/6966)

2. Бубела А.В., Кватадзе А.І. Дослідження режимів роботи дренавальних шарів в дорожніх конструкціях. *Science Review*. 2020. No 5(32). P. 24-29. URL: [https://doi.org/10.31435/rsglobal\\_sr/30062020/7140](https://doi.org/10.31435/rsglobal_sr/30062020/7140)

3. Slavinska O., Stozhka V., Kharchenko A., Bubela A., Kvatadze A. Development of a model of the weight of motor roads parameters as part of the information and management system of monetary evaluation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 1, No 3 (97). P. 46-59. (Scopus) URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156519>

4. Savenko V., Kvatadze A., Davydenko O., Stozhka V., Ianchuk L. Forecasting of the moisture mode of the drainage layer of a road structure under the action of a load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 4, No 7 (106). P. 62-75. (Scopus) URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209421>

**Статті у фахових виданнях:**

5. Кватадзе А.І. Метод визначення розрахункових періодів водно-теплового режиму для розрахунку дренажних пристроїв. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2016. Вип. 98. С. 79-84.

URL: [http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi\\_i\\_stroitelstvo/98/079-084.pdf](http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/98/079-084.pdf)



6. Кватадзе А.І. Удосконалення методу визначення об'єму вологонакопичення в дорожніх конструкціях дренажними шарами. *Дороги і мости*. 2017. Вип. 17. С. 81-88.

URL: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2017.17.081>

**Статті, що додатково відображають зміст дисертації:**

7. Slavinska O., Savenko V., Usichenko O., Kvatadze A. The method of accounting infiltration of atmospheric precipitation to calculate drainage facilities. *Metallurgical and Mining Industry*. 2017. Vol. 1. P. 46-52.

URL: [https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI\\_2017\\_1/007Savenko.pdf](https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2017_1/007Savenko.pdf)

8. Slavinska O., Usichenko O., Kvatadze A., Prykhodko S. Method to incorporate the climatic changes for determining freezing depths of road constructions. *Metallurgical and Mining Industry*. 2017. Vol. 8. P. 8-15.

URL: [https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI\\_2017\\_8/1Slavinska-O.pdf](https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2017_8/1Slavinska-O.pdf)

**Опубліковані праці апробаційного характеру:**

9. Савенко В.Я., Кватадзе А.І. Удосконалення періодів водно-теплогового режиму дренажних систем в робочій зоні земляного полотна. *LXXIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету* : тези доповідей. К. : НТУ, 2017. С. 118.

10. Савенко В.Я., Кватадзе А.І. Удосконалення методології врахування кліматичних змін при визначенні вологонакопичення в дорожніх конструкціях. *LXXIV наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету* : тези доповідей. К. : НТУ, 2018. С. 171.

11. Кватадзе А.І. Удосконалення методу дорожньо-кліматичного районування на основі врахування зональності та азональності геокомплексів. *Actual aspects of development in the context of globalization*. IX Міжнародна

науково-практична конференція. 23-24 березня 2020 р., Флоренція, Італія. С. 255-257. URL: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2020/03/IX-Conference-23-24-Florence-Italy.pdf>

12. Кватадзе А.І. Дослідження напружено-деформованого стану дорожньої конструкції з перезволоженою основою. *Theoretical foundations of modern science and practice*. XI Міжнародна науково-практична конференція. 06-07 квітня 2020 р., Мельбурн, Австралія. С. 234-235.

URL: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2020/04/XI-Conference-06-07-Melbourne-Australia.pdf>

13. Савенко В.Я., Кватадзе А.І. Дослідження процесу віджимання води в дорожній конструкції під впливом понаднормативного навантаження. *Гідротехнічне і транспортне будівництво*. Міжнародна науково-технічна конференція. 28-29 травня 2020 р., Одеса, Україна. С. 102-104.

14. Савенко В.Я., Кватадзе А.І. Удосконалення методології встановлення розрахункових схем регулювання вологонакопичення в дорожній конструкції. *LXXVI наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету* : тези доповідей. К. : НТУ, 2020. С. 123.

URL: <http://vstup.ntu.edu.ua/konf-76.pdf>

#### **Свідоцтва та патенти:**

15. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 86516 Україна. Літературний письмовий твір наукового характеру «Розробка моделі вагомостей параметрів автомобільних доріг у складі інформаційно-управлінської системи грошової оцінки» Славінська О.С., Стьожа В.В., Харченко А.М., Бубела А.В., Кватадзе А.І. Дата реєстрації 01.03.2019 р.