Національний транспортний університет
Міністерство освіти і науки України

Національний транспортний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БУБЕЛА АНДРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 625.7/.8:626.86

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОДОЛОГІЯ ПРОЕКТУВАННЯ ПОПЕРЕЧНИХ ДРЕНАЖІВ МІЛКОГО ЗАКЛАДАННЯ З ОЦІНКОЮ ЯКІСНОГО СТАНУ АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ

05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми

Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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

_____ А.В. Бубела

Науковий консультант –
Славінська Олена Сергіївна
доктор технічних наук,
професор

Ідентичність усіх примірників дисертації
Засвідчую
Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.059.02

_____ О.Ю. Усиченко

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Бубела А.В. Методологія проектування поперечних дренажів мілкого закладання з оцінкою якісного стану автомобільної дороги. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.11 «Автомобільні шляхи та аеродроми» (192 – Будівництво та цивільна інженерія). – Національний транспортний університет, Київ, 2021.

У дисертаційній роботі представлено нове вирішення **актуальної проблеми** щодо методології проектування поперечних дренажів мілкого закладання на основі оцінки якісного стану ділянки автомобільної дороги, яка працює в умовах перезволоження.

Невідповідність наявних міцнісних параметрів автомобільної дороги до постійного зростання вантажонапруженості та швидкості руху призводить до руйнувань дорожнього одягу, що обумовлює його підвищену водопроникність. Для того, щоб уникнути довготривалого перезволоження конструктивних шарів покриття та основи, необхідно запобігти акумулюванню в них великої кількості вільної води шляхом влаштування дренажної системи мілкого закладання, яка дозволяє швидко відвести воду з дорожньої конструкції та забезпечує її міцність. Це також обумовлює необхідність визначення ефективності роботи дренувальних конструкцій мілкого закладання, як за інтенсивністю водовідведення, так і під впливом вібраційної дії транспортних засобів.

У роботі розроблено математичну модель якісного стану ділянки автомобільної дороги, де враховані її проектно-конструктивні параметри, зокрема дренажі мілкого закладання. Концептуальна модель базується на методах кваліметрії та багаторівневій ієрархічній системі показників. Визначені коефіцієнти вагомості для кожного диференційного показника якісного стану елементів дорожньої конструкції та усіх інших об’єктів, розташованих в межах смуги відведення на основі вартісного та експертного методів.

За методом скінчених елементів побудовані моделі дорожньої конструкції з дренувальним шаром в об’ємних елементах з різними типами трубчастих дрен на

основі сучасного програмно-розрахункового комплексу SCAD Office. За результатами числового моделювання, з урахуванням технологічних особливостей влаштування дренувальних шару отримано розподіл ізополів та ізоліній нормальних напружень, на основі якого визначено деформації дорожньої конструкції та безпосередньо у тілі дренажних труб двох типів. В процесі влаштування дренувального шару може відбуватися деформація бетонних труб, що призводить до їх руйнації під час його ущільнення, на відміну від труб ПВХ. Отримані деформації в тілі труб ПВХ класу SN 8 складають 2,3 % від зовнішнього діаметру, що не впливає на водовідведення та підтверджує доцільність їх використання, на відміну від бетонних труб. Порушення цілісності бетонної труби сприятиме накопиченню вологи в дорожній конструкції. У роботі також проведено числове моделювання напружено-деформованого стану двох типів дорожньої конструкції, з дренувальним шаром та з наявністю трубчастих дрен під ним, для двох класів труб SN 2 та SN 8. Отримані результати за тривимірними числовими моделями дозволяють обґрунтувати вибір міцнісних характеристик трубчастих дрен.

Досліджено інтенсивність водовідведення умови роботи двох конструкцій поперечних дренажів мілкого закладання з різними матеріалами-наповнювачами в траншеї під впливом та без дії вібрації. Експеримент проводився у відповідності до реальних несприятливих метеорологічних умов роботи двох конструкцій дренажів мілкого закладання при інтенсивності зливових опадів 5% забезпеченості. Аналіз експериментальних досліджень дозволяє зробити висновок про те, що конструкція поперечного дренажу мілкого закладання з щебеневим ядром відводить більшу кількість води в середньому на 10% без впливу вібрації, та на 14% більше під впливом вібрації, за часом, відповідно, в 7 та 11 разів швидше, ніж конструкція поперечного дренажу мілкого закладання з трубчастою дреною. Це дає підставу стверджувати про її більш високу ефективність роботи. Але на інтенсивність водовідведення конструкції дренажу з трубою вібрація майже не впливає, дія ж вібрації на конструкцію з щебеневим ядром її посилює за рахунок більшого коефіцієнта фільтрації наповнювача траншеї. На основі представлених результатів

отримано кореляційно-регресійні залежності для визначення інтенсивності водовідведення для кожної із дренажних конструкції залежно від початкової вологості земляного. Це дає можливість адаптувати результати експериментальних досліджень до натурних умов при відомих змінах вологості ґрунту, з якого буде влаштовуватись земляне полотно.

Встановлені принципи роботи дренувальних шарів, які дозволяють зробити висновок щодо використання дренажних конструкцій мілкого закладання в залежності від величини надходження питомого надлишку та обумовлюють прийняття проектних рішень з регулювання водно-теплового режиму дорожньої конструкції.

Визначено цільову функцію для пошуку найбільш оптимальної конструкції поперечного дренажу мілкого закладання за двома групами критеріїв: кошторисною вартістю та сукупністю техніко-технологічних показників, що характеризують ефективність їх роботи. За методом колективної експертної оцінки проведено математичну обробку даних анкетного опитування експертів у галузі дорожнього будівництва для виявлення та ранжування сукупності техніко-технологічних параметрів, що визначають роботу конструкцій поперечних дренажів мілкого закладання. Із восьми запропонованих конструкцій було обґрунтовано та рекомендовано до проектування найбільш оптимальну з найкращими техніко-технологічними характеристиками при її мінімальній кошторисній вартості.

Ключові слова: автомобільна дорога, дорожня конструкція, поперечний дренаж мілкого закладання, дренувальний шар, трубчаста дрена.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографії:

1. Славінська О.С., Бубела А.В. Проектування оптимальних конструкцій поперечних дренажів мілкого закладання та оцінка їх впливу на транспортно-експлуатаційний стан автомобільної дороги : монографія. К. : НТУ, 2020. 268 с.

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

2. Slavinska O., Savenko V., Kharchenko A., Bubela A. Development of a mathematical model of evaluation of road-and transport assets as a component of information-and-management system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2017. Vol 6. 4 (90). URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118798 (SCOPUS).

3. 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. 7 (92). URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126512 (SCOPUS).

4. 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. 3 (97). URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156519. (SCOPUS).

5. Slavinska O., Bubela A., Chechuha O., Bondarenko L. The intensity of water removal from shallow drainage systems considering the properties of filler materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol 3. 1 (105). URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203551 (SCOPUS).

6. Bubela A. The methodological basis of determining the operation condition of a road for its technical expertise. *World Science.* 2020. Vol 3 (55), C.4-7. URL: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/31032020/6965

7. Славінська О.С., Бубела А.В., Бондаренко Л.П., Чечуга О.С. Визначення оптимальної дорожньої конструкції з поперечними дренажами мілкого закладання. *International Academy Journal Web of Scholar.* 2020. Vol 5 (47), С. 3-11. URL: https://doi.org/10.31435/rsglobal_wos/31052020/7088

8. Бубела А.В., Кватадзе А.І. Дослідження режимів роботи дренувальних шарів в дорожніх конструкціях. *Science Review.* 2020. 5(32). С. 24-29. URL: https://doi.org/10.31435/rsglobal_sr/30062020/7140

9. Slavinska, O., Bubela, A., Davydenko, O. Prediction of the stress-strain state of a road structure with shallow transverse tubular drainage. *ScienceRise.* 2020. (4), С. 24-32. URL: https://doi.org/10.21303/2313-8416.2020.001396

Статті у фахових виданнях:

10. Bubela A.V. Project management of estimates of the roads based on considerstion of the technical state. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2016. Вип. 97, С. 50-54. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/97/050-054.pdf

11. Bubela A.V. Using differential method in the construction of the highway to the accounting and valuation of assets road sector. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2016. Вип. 98. С. 22-28. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/98/022-028.pdf

12. Бубела А.В. Вплив дорожніх умов на транспортно-експлуатаційний стан автомобільної дороги. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2018. Вип. 103. С. 61-65. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/103/61.pdf

13. Бубела А.В. Багаторівнева модель технічного стану об'єктів транспортного будівництва. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2018. Вип. 104. С. 44-48. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/104/44.pdf

14. Бубела А.В. Дослідження закономірностей зволоження дорожньої конструкції та методи його регулювання. *Автомобільні дороги і дорожнє*

будівництво : науково-технічний збірник. 2019. Вип. 105. С. 44-48. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/105/44.pdf

15. Бубела А.В. Дослідження зміни транспортно-експлуатаційного стану покриттів в умовах перезволоження. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2019. Вип. 106. С. 6-12.

16. Безуглий А., Бібік Ю., Бубела А., Гресько І., Славінська О., Харченко А. Особливості проведення вартісної оцінки автомобільних доріг загального користування. *Дороги і мости* : збірник наукових праць. 2019. Вип. 19-20. С. 5-15. URL: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2019.19.005

17. Onyshchenko A.M., Usychenko O.Y., Bubela A.V. Research of transport and operation condition taken into account of different types and types of asphalt concrete with bonding polygum. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 107. С. 71-77. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/107/71.pdf

18. Slavinska O.S., Onyshchenko A.M., Bubela A.V. Increasing the operational reliability of asphalt concrete coating for the use of modification addition butonal ns 198. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 108. С. 74-83. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/108/74.pdf

19. Бубела А.В. Дослідження ефективності функціонування дренажів мілкого закладання в дорожніх конструкціях. *Вісник Національного транспортного університету.* Серія «Технічні науки» : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 1 (46). С 45-54. DOI: 10.33744/2308-6645-2020-1-46-045-054. URL: http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/46/045.pdf

20. Славінська О.С., Бубела А.В., Бондаренко Л.П., Чечуга О.С. Дослідження роботи дренажів мілкого закладання за інтенсивністю водовідведення з урахуванням впливу вібрації. *Дороги і мости* : збірник наукових праць. 2020. Вип. 21. С. 201-216. URL: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.201

21. Бубела А.В. Визначення залежності інтенсивності водовідведення від конструктивних характеристик поперечних дренажів мілкого закладання. *Дороги і*

мости : збірник наукових праць. 2020. Вип. 22. С. 53-62. URL: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.053

22. Славінська О.С., Бубела А.В., Бондаренко Л.П., Чечуга О.С. Прогнозування режиму водовідведення з дорожньої конструкції. *Автошляховик України* : науково-виробничий журнал. 2020. Вип. 3. С. 28-36. URL: 10.33868/0365-8392-2020-3-263-28-36

23. Bubela A. Comprehensive assessment of the quality condition of the road with drainage system. *Technology audit and production reserves*, 2020, 4/2(54), P. 20-26. URL: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.210556

Опубліковані праці апробаційного характеру:

24. Бубела А.В. Особливості здійснення грошової оцінки ділянки автомобільної дороги з урахуванням техніко-функціональних характеристик. *Європейські стандарти оцінки, землеустрою і кадастру : Проблеми впровадження та шляхи їх реалізації в Україні.* Міжнародна науково-практична конференція. 28 квітня 2016 р., Харків, ХНУМГ ім.О.М.Бекетова. С. 78-83.

25. Бубела А.В. Принципи побудови моделі вартісної оцінки майна дорожньої галузі. *Современные геоинформационные и компьютерно-инновационные технологии дорожной отрасли, аэродромного строительства и землеустройства.* Международная научно-практическая конференция. 26-27 мая 2016, Харьков. С. 58-59.

26. Бубела А.В. Побудова моделі якісного стану автомобільної дороги для проведення майнової оцінки. *Міжнародна науково-практична конференція присвячена п'ятидесятиріччю кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем*. 03 листопада 2016 р., Харків, ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. С. 86.

27. Бубела А.В. Підходи щодо регулювання водно-теплового режиму земляного полотна шляхом влаштування дренажних конструкцій мілкого закладання. *Actual aspects of development in the context of globalization.* IX Міжнародна науково-практична конференція. 23-24 березня 2020 р., Флоренція, Італія. С. 250-251.

28. Бубела А.В. Дослідження роботи піщаних дренажних шарів в дорожніх конструкціях. *Modern approaches to the introduction of science into practice.* X Міжнародна науково-практична конференція. 30-31 березня 2020 р., Сан-Франциско, США. С. 376-377.

29. Бубела А.В. Дослідження роботи дренажів мілкого закладання за інтенсивністю водовідведення. *Theoretical foundations of modern science and practice.* XI Міжнародна науково-практична конференція. 06-07 квітня 2020 р., Мельбурн, Австралія. С. 172-173.

30. Бубела А.В. Дослідження впливу вібрації на дренажну здатність дорожньої конструкції. *Science, trends and perspectives.* XVII Міжнародна науково-практична конференція. 18-19 травня 2020 р., Токіо, Японія. С. 150-151.

31. Бубела А.В. Вплив тривалості водовідведення в дренажних конструкціях на транспортно-експлуатаційний стан автомобільної дороги. *Modern science, practice, society.* XVIII Міжнародна науково-практична конференція. 25-26 травня 2020 р., Бостон, США. С. 242-243.

32. Славінська О.С., Бубела А.В. Дослідження впливу вібрації на інтенсивність водовідведення з дренажної конструкції. *Гідротехнічне і транспортне будівництво*. Міжнародна науково-технічна конференція. 28-29 травня 2020 р., Одеса, Україна. С. 108-110.

33. Славінська О.С., Бубела А.В., Бондаренко Л.П. Метод визначення оптимальної дорожньої конструкції з поперечними дренажами мілкого закладання. *Perspective directions for the development of science and practice.* XX Міжнародна науково-практична конференція. 08-09 червня 2020 р., Афіни, Греція. С. 274-276.

34. Бубела А.В. Дослідження роботи дренажних шарів з поперечними дренажами мілкого закладання. *Current trends in the development of science and practice.* XXI Міжнародна науково-практична конференція. 15-16 червня 2020 р., Хайфа, Ізраїль. С. 89-91.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

35. Slavinska O., Savenko V., Bondarenko L., Bubela A. Improvement of methods of the property valuation based on mathematical and numerical modeling. *EUREKA: Physics and Engineering.* 2017. 6. C. 3-14. URL: http://eu-jr.eu/engineering/article/view/496/476.

36. Slavinska O., Kharchenko A., Bubela A., Chechuha O. Development of road sector's lend valuation method for aims of asset management. *Technology audit and production reserves*. 2020. 2/2(52). P. 43-46. URL: https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.200743

Свідоцтва та патенти:

37. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 76497 Україна. Літературний письмовий твір науково-практичного характеру «Методичні рекомендації з проведення вартісної оцінки автомобільних доріг і споруд на них» Славінська О.С., Харченко А.М., Бубела А.В., Чесноков С.В. Дата реєстрації 01.02.2018 р.

38. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 76682 Україна. Літературний письмовий твір наукового характеру «Розробка математичної моделі вартісної оцінки дорожньо-транспортних активів як складової інформаційно-управлінської системи» Славінська О.С., Савенко В.Я., Харченко А.М., Бубела А.В. Дата реєстрації 06.02.2018 р.

39. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 83580 Україна. Літературний письмовий твір наукового характеру «Дослідження роботи дорожньої конструкції на ділянках з трубчастими дренами з матеріалів різного походження» Славінська О.С., Савенко В.Я., Бубела А.В., Яремов А.П. Дата реєстрації 11.12.2018 р.

40. 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.

41. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 93710 Україна. Літературний письмовий твір «Альбом типових проектних рішень конструкцій земляного полотна автомобільних доріг загального користування» Славінська О.С., Чечуга О.С., Савенко В.Я., Бубела А.В. Дата реєстрації 05.11.2019 р.

ABSTRACT

Bubela A. Methodology for the design of transverse drainage of shallow laying with assessment of the quality of the road. – As a manuscript.

The dissertation for doctor of technical sciences degree in specialty 05.22.11 «Highways and airfields». (192 – Construction and Civil Engineering). – National transport university, Kyiv, 2021

The dissertation work presents the new decision of the current problem on methodology of design of transverse shallow drainage laying on the basis of the assessment of the quality condition of the road section which operates in wet conditions.

The discrepancy between the existing strength of the road and the constant increase in traffic tension and speed results in the destruction of road clothing, which makes it more water-resistant. In order to avoid long-term wetting of the structural layers of the cover and the base, it is necessary to prevent the accumulation of large quantities of free water in them by means of a shallow drainage system, which enables the water to be quickly removed from the road structure and ensures its strength. This also makes it necessary to measure the performance of shallow drainage structures, both in terms of drainage rates and vehicle vibration.

The work has developed a mathematical model of the quality of the road section, which takes into account its design and design parameters, in particular the shallow-level drainage. The conceptual model is based on a quamiletric method and a tiered hierarchical system of indicators. Weighting factors have been determined for each differential indicator of the quality of road structure elements and all objects situated within the withdrawal strip on the basis of cost and expert methods.

According to the method of finite elements, models of road construction with a drainage layer in three-dimensional elements with different types of tubular dredges are constructed on the basis of the modern software-calculation complex SCAD Office. According to the results of the numerical simulation, taking into account the technological features of the device of the drainage layer, a distribution of the normal voltage isofield and insulation is obtained, on the basis of which deformations of the road structure and directly in the body of two types of drainage pipes are determined. During the device of the drainage layer, deformation of concrete pipes may occur, which causes their destruction during the compaction thereof, as opposed to PVC pipes. The resulting deformations in the body of PVC pipes of class SN 8 are 2.3 per cent of the outer diameter, which does not affect drainage and confirms the advisability of their use as opposed to concrete pipes. Failure of concrete tube integrity contributes to moisture storage in road construction. The work also included a numerical simulation of the stress-strain condition of two types of road construction, with a drainage layer and with tubular drains below it, for two classes of tubes SN 2 and SN 8. The results obtained from three-dimensional numerical models justify the choice of strength characteristics of tubular drains.

The intensity of water drainage conditions of two structures of transverse drainage of shallow laying with different materials-fillers in the trench under influence and without the action of vibration was investigated. The experiment was conducted in accordance with the actual unfavourable meteorological conditions of the two shallow drainage constructions, with a rainfall intensity of 5 percent. The analysis of experimental studies suggests that the design of a cross-section drainage of shallow gravel core drains more water on average by 10% without vibration, and 14% more by vibration, over time, respectively, 7 and 11 times faster than the structure of a transverse drainage of a shallow laying with a tubular drainage. This gives rise to claims of greater efficiency. However, the intensity of drainage of the structure with the pipe is almost not affected by the vibration, and the effect of the vibration on the structure with the gravel core amplifies it due to a higher coefficient of filtration of the trench filler. On the basis of the results presented, correlation and regression relationships were obtained to determine the rate of drainage for each drainage structure in relation to the initial humidity of the ground. This

makes it possible to adapt the results of experimental studies to in situ conditions with known changes in soil moisture from which the earth canvas will be constructed.

Established principles of operation of drainage layers, which make it possible to draw conclusions on the use of shallow drainage structures depending on the input of a specific surplus and condition the decision-making on water regulationthermal regime of road construction.

A target function has been defined to find the most optimal construction for the drainage of shallow laying base according to two groups of criteria: the estimated cost and the set of technical and technological indicators characterizing their performance. On the basis of the method of collective expert evaluation of the conduct of mathematical processing of the data of the questionnaire survey of experts in the field of road construction in order to identify and rank the totality of technical and technological parameters, determining the work of constructions of transverse drainage of shallow laying. Of the eight proposed designs, the best possible designs with the best technical and technological characteristics were justified and recommended for design with a minimum estimated cost.

Key words: highway, road construction, of transverse drainage of shallow laying, drainage layer, tubular drainage.

ЗМІСТ

ВСТУП 17

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗМІНИ ТРАНСПОРТНО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО СТАНУ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ ЗГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ В УМОВАХ ПЕРЕЗВОЛОЖЕННЯ 27

1.1 Вплив дорожніх умов на транспортно-експлуатаційний стан автомобільної дороги 27

1.2 Теоретичні основи закономірностей зволоження дорожньої конструкції 40

1.3 Методи розрахунку дренажних конструкцій мілкого закладання 54

1.4 Методи визначення термінів водовідведення дренувальними шарами 65

1.5 Аналіз натурних та експериментальних досліджень водно-теплового режиму земляного полотна 77

Висновки по розділу 1 82

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ ЯКІСНОГО СТАНУ ПЕРЕЗВОЛОЖЕНИХ ДІЛЯНОК АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОПЕРЕЧНИХ ДРЕНАЖІВ МІЛКОГО ЗАКЛАДАННЯ 84

2.1 Теоретичні основи з визначення якісного стану автомобільної дороги 84

2.2 Розробка математичної моделі якісного стану ділянки автомобільної дороги з дренажними конструкціями 104

2.3 Визначення відстані між поперечними дренажними прорізями для дренажів мілкого закладання 117

2.4 Визначення часу водовідведення дренажними конструкціями мілкого закладання 139

2.5 Удосконалений метод розрахунку відстані між дренажними прорізями та часу водовідведення для поперечних дренажів мілкого закладання 144

Висновки по розділу 2 149

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДОРОЖНЬОЇ КОНСТРУКЦІЇ З ДРЕНАЖНИМИ КОНСТРУКЦІЯМИ 152

3.1 Аналіз методів проектування дорожніх конструкцій 152

3.2 Моделювання напружено-деформованого стану дорожньої конструкції на ділянках з трубчастими дренами 162

3.3 Визначення технологічних параметрів при влаштуванні щебеневих дренувальних шарів 179

3.4 Визначення технологічних параметрів при влаштуванні піщаних дренувальних шарів 186

3.5 Результати числового експериментального дослідження на дорожній конструкції з дренажем мілкого закладання у тривимірних елементах 192
3.6 Визначення напружено-деформованого стану дорожньої конструкції з дренувальним шаром під впливом дії транспортних засобів..... 197
Висновки по розділу 3 200
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ПОПЕРЕЧНИХ ДРЕНАЖІВ МІЛКОГО ЗАКЛАДАННЯ ЗА ІНТЕНСИВНІСТЮ ВОДОВІДВЕДЕННЯ 203
4.1 Дослідження ефективності функціонування поперечних дренажів мілкого закладання в дорожніх конструкціях 203
4.2 Отримання кореляційно-регресійний залежностей на основі результатів експериментальних досліджень за двома типами поперечних дренажів мілкого закладання..... 219
4.3 Результати експериментальних досліджень режимів роботи двох типів поперечних дренажів мілкого закладання під дією вібрації 237
4.4 Дослідження режимів роботи двох типів дренувальних шарів у дорожніх конструкціях 248
4.5 Порівняння результатів експериментальних досліджень з аналітичним методом визначення інтенсивності водовідведення, отриманим на основі теоретичних розробок О.Я. Тулаєва 255
Висновки по розділу 4 259
РОЗДІЛ 5 ПРОЕКТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ДОРОЖНІХ КОНСТРУКЦІЙ З ПОПЕРЕЧНИМИ ДРЕНАЖАМИ МІЛКОГО ЗАКЛАДАННЯ 262
5.1 Основні принципи проектування оптимальних дорожніх конструкцій з дренажами мілкого закладання..... 262
5.2 Визначення оптимальної дорожньої конструкції з поперечними дренажами мілкого закладання..... 268
5.3 Методи регулювання водно-теплового режиму дорожньої конструкції способом дренування..... 276
5.4 Проведення експериментальних досліджень щодо режиму водовідведення з дорожньої конструкції..... 280
Висновки по розділу 5 291
ВИСНОВКИ..... 293
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ..... 298

ДОДАТОК А РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ДМЗ. ДОСЛІДЖЕННЯ НДС ДОРОЖНЬОЇ КОНСТРУКЦІЇ НА ЕТАПІ ВЛАШТУВАННЯ ДРЕНУВАЛЬНОГО ШАРУ 325

ДОДАТОК Б ДОСЛІДЖЕННЯ НДС ДОРОЖНЬОЇ КОНСТРУКЦІЇ ПІД ВПЛИВОМ ВЕЛИКОВАГОВИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ..... 381

ДОДАТОК В МОДЕЛЮВАННЯ УСТАНОВКИ дорожньої конструкції з ПОПЕРЕЧНИМ ДРЕНАЖЕМ МІЛКОГО ЗАКЛАДАННЯ 394

ДОДАТОК Г ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ..... 404

ДОДАТОК Д СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ 421

ВСТУП

Актуальність роботи. Переважна більшість автомобільних доріг на території України мають асфальтобетонне покриття. Цілісність покриття має суттєвий вплив на транспортно-експлуатаційний стан автомобільної дороги за рахунок збереження конструктивно-запроектованих міцнісних характеристик всіх шарів дорожнього одягу (ДО). Під впливом атмосферних опадів, ґрунтових вод, температурних змін, промерзання, відлиг, навантажень, особливо від великовагових транспортних засобів (ТЗ), відбуваються деформації та руйнування дорожньої конструкції (ДК). Основними факторами, що впливають на тріщиноутворення і механічне пошкодження асфальтобетонних покриттів є знос і втома під впливом багаторазових навантажень та наявність надлишкової вільної води у весняний період та під час відлиг.

Найчастіше вода, яка вже знаходиться в шарах ДК, обумовлює в них незворотні деформаційні процеси. Для забезпечення міцності та довговічності ДК, особливо на характерних ділянках (у виїмках, нульових відмітках, невисоких насипах, угнутих в поздовжньому профілі та з поздовжнім похилом більшим за поперечний), необхідно передбачати ефективні методи відведення води. Одним з економічно обґрунтованих шляхів вирішення цієї проблеми є влаштування дренажів мілкого закладання (ДМЗ).

До теперішнього часу оцінка транспортно-експлуатаційного стану проводилась без врахування функціональності дренажних конструкцій. Одним з можливих напрямків оцінки вагомості впливу дренажних конструкцій на цей стан є використання кваліметричних моделей. Такі моделі дають можливість одночасно враховувати різні методи їх оцінювання, зокрема експериментальний, розрахунковий та експертний, для визначення рівня їх фізичного і функціонального зносу.

Влаштування дренажних конструкцій обумовлює необхідність розв’язування актуальної проблеми водовідведення з ДК на трьох взаємопов’язаних етапах: проектування, будівництва та експлуатації дороги. Важливим параметром на етапі

проектування цих конструкцій є визначення відстані між дренажними прорізями та інтенсивності їх водовідведення.

ДК з трубчастими дренами під шарами ДО є нетиповими, на відміну від стандартних. Такі проектні рішення є обґрунтованими, проте проблемі їх використання не було приділено належної уваги. Не врахування технологічних особливостей влаштування дренажних конструкцій мілкого закладання на стадії будівництва призводить до розвитку деформацій на початковому етапі експлуатації. Це вимагає розроблення спеціальних технологічних рішень щодо режимів ущільнення шарів основи та оцінки стану труб з матеріалів різного походження.

На сучасному етапі не проводилися дослідження напружено-деформованого стану (НДС) ДК з урахуванням послаблюючих зон, за рахунок наявності дренажних труб. Специфіка таких підземних конструкцій, які працюють під навантаженням в робочій зоні земляного полотна (ЗП), виключає можливість будь-яких натурних спостережень за ефективністю їх роботи. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є проведення лабораторних досліджень на установці ДК, параметри якої відповідають реальним умовам їх роботи. Вище наведені актуальні проблеми обумовлюють необхідність в розробленні методології проектування дренажних конструкцій з оцінкою якісного стану автомобільної дороги.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні дослідження теоретичного і прикладного характеру виконані згідно з тематикою науково-дослідних робіт, що виконувались кафедрою транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету: «Розробити аналітичну систему технічної експертизи та грошової оцінки автомобільної дороги як складової матеріально-технічної бази дорожнього господарства», № держреєстрації НДР 0117U002326, 2017 – 2018 рр. та планами науково-дослідних і проектно-конструкторських робіт Державного агентства автомобільних доріг України «Укравтодор», в рамках виконання господарсько-договірних науково-дослідних робіт: «Розробити методичні рекомендації з проведення вартісної оцінки автомобільних доріг і споруд на них» (ДерждорНДІ, договір № 294/15-16 від

23.09.2016 р.), «Виконати аналіз та розробити альбом типових проектних рішень земляного полотна автомобільних доріг загального користування» (державний реєстраційний № 0117U001962), «Провести дослідження процесів дренування поверхневих вод на моделях дорожньої конструкції з дренажами мілкого закладання та розробити методичні рекомендації з вибору оптимальних конструкцій дренажів мілкого закладання для дорожньо-кліматичних зон України» (державний реєстраційний № 0118U000722), «Виконати аналіз та розробити національний стандарт щодо проектування і влаштування споруд поверхневого водовідведення та альбом типових рішень таких споруд для автомобільних доріг загального користування» (державний реєстраційний № 0118U000723), «Провести експериментальні дослідження процесів вологопроникності укосів земляного полотна та розробити пакет технологічних документів для проектування та влаштування конструкцій укріплення укосів земляного полотна на автомобільних дорогах загального користування» (державний реєстраційний № 0120U103312), «Провести експериментальні дослідження процесів вологопровідності ґрунтів земляного полотна та розробити методику з визначення коефіцієнта вологопровідності ґрунтів та відповідну розрахунково-аналітичну систему» (державний реєстраційний № 0120U103311).

Мета і завдання дослідження.

Мета роботи полягає у розробленні методології проектування поперечних дренажів мілкого закладання на підставі оцінки якісного стану автомобільної дороги.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

- провести аналіз існуючих теоретичних та експериментальних методів проектування дренажів мілкого закладання та їх роботи з урахуванням транспортно-експлуатаційного стану ділянок доріг, які працюють в умовах перезволоження;
- розробити математичну модель якісного стану ділянки автомобільної дороги для отримання комплексного показника фізичного та функціонального зносу.

- удосконалити метод розрахунку параметрів поперечних дренажів мілкого закладання на основі рівнянь нерівномірного руху фільтраційного потоку;
- дослідити напружено-деформований стан дорожньої конструкції з поперечним трубчастим дренажем мілкого закладання на етапі влаштування дренувальних шарів для встановлення параметрів технологічних рішень;
- розробити числові тривимірні моделі для прогнозування напружено-деформованого стану дорожньої конструкції з поперечним трубчастим дренажем мілкого закладання з різними міцнісними характеристиками, для визначення режиму їх роботи на стадії експлуатації;
- провести експериментальні дослідження роботи дренажних конструкцій поперечних дренажів мілкого закладання для встановлення умов формування фільтраційного потоку та прогнозування інтенсивності його водовідведення;
- дослідити вплив вібрації від дії транспортних засобів на дренажні конструкції для визначення їх інтенсивності водовідведення;
- розробити методику вибору оптимальних конструкцій дренажів мілкого закладання з урахуванням встановлених закономірностей впливу різних факторів на інтенсивність їх водовідведення.

Об’єкт дослідження – процес водовідведення дренажними конструкціями мілкого закладання на автомобільних дорогах.

Предмет дослідження – методи проектування поперечних дренажів мілкого закладання з аналізом напружено-деформованого стану дорожньої конструкції.

Методи дослідження: аналітичні методи; методи математичного моделювання; числове моделювання; метод скінченних елементів з використанням положень теорії пружності; експериментальні методи; методи регресійного аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів:

- розроблено кваліметричну модель якісного стану перезволоженої ділянки автомобільної дороги для визначення вагомості дренажної конструкції на її транспортно-експлуатаційні показники;

- удосконалено метод розрахунку параметрів поперечних дренажів мілкого закладання на основі інтегрування рівнянь нерівномірного плавнозмінного руху ґрунтових вод;

- вперше проведено числові експериментальні дослідження напружено-деформованого стану тривимірних моделей дорожньої конструкції, на стадії влаштування дренувальних шарів з трубчастими дренами, що дало можливість визначити величини деформації в тілі труб з різних матеріалів;

- вперше отримано розподіл напружень та деформацій в дорожній конструкції з трубчастими поперечними дренажами мілкого закладання на основі числового моделювання за методом скінченних елементів під впливом від великовагових транспортних засобів, що дозволяє оцінити міцнісні характеристики конструкції в цілому;

- вперше проведено моделювання в лабораторних умовах дорожньої конструкції з поперечним дренажем мілкого закладання, яка відповідає реальним умовам їх роботи, що дало можливість візуалізувати формування фільтраційного потоку та визначити інтенсивність водовідведення;

- вперше досліджено вплив на дорожню конструкцію вібрації, змодельованої від транспортного потоку на основі параметру вібропереміщення, що дало можливість оцінити зміну інтенсивності водовідведення дренажними конструкціями;

- удосконалено метод визначення параметрів оптимальної дорожньої конструкції з поперечним дренажем мілкого закладання на основі кошторисної вартості та техніко-технологічних показників, що визначають ефективність її роботи.

Практичне значення отриманих результатів полягає в:

- отриманні математичної моделі якісного стану ділянки автомобільної дороги з дренажними конструкціями. Ця модель враховує її фізичний та функціональний знос і дозволяє визначити комплексний показник якісного стану з урахуванням вагомості дренажних систем. На основі цього було розроблено та

впроваджено методичні рекомендації МР Д 1.2-37641918-884:2017 «Методичні рекомендації з проведення вартісної оцінки автомобільних доріг і споруд на них»;

- вирішенні технологічної задачі щодо ущільнення дренувальних шарів з трубчастими дренами в робочій зоні земляного полотна різними типами дорожніх котків. За результатами числового моделювання отримано розподіл деформацій в тілі труб, що дає можливість приймати проектні рішення щодо доцільності застосування трубчастих дрен з різних матеріалів;
- проведенні числового моделювання дорожньої конструкції з трубчастою дреною, за методом скінченних елементів, який дозволяє визначити розподіл нормальних напружень та деформацій для оцінки міцності конструкції;
- розробленні методу визначення цільової функції пошуку оптимальної дорожньої конструкції з поперечним дренажем мілкого закладання з урахуванням її кошторисної вартості та впровадженні на галузевому рівні методичних рекомендацій МР В.2.3-37641918-913:2020 «Методичні рекомендації з вибору оптимальних конструкцій дренажів мілкого закладання з урахуванням дорожньо-кліматичних зон України»;
- розробленні та впровадженні у нормативних та технічних документах на галузевому рівні, в організаціях, які входять у сферу управління Державного агентства автомобільних доріг України: АД А.2.4-37641918-006:2018 «Альбом типових проектних рішень конструкцій земляного полотна на автомобільних дорогах загального користування»; А В.2.4-37641918-011:2020 «Альбом типових проєктних рішень споруд поверхневого водовідведення на автомобільних дорогах загального користування», ДСТУ 9057:2020 «Настанова з проектування та влаштування споруд поверхневого водовідведення на автомобільних дорогах загального користування», Посібник до ДСТУ 9057:2020 «Настанова з проектування та влаштування споруд поверхневого водовідведення на автомобільних дорогах загального користування».

Результати наукових досліджень впроваджено в навчальний процес Національного транспортного університету при підготовці фахівців зі

спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» за освітньо-професійною програмою «Автомобільні дороги, вулиці та дороги населених пунктів».

В лекційних курсах з дисциплін «Будівництво та експлуатація інженерних мереж» та «Механіка земляного полотна» запропоновано методи та методики з визначення основних характеристик дорожньої конструкції для проведення лабораторних занять, курсового і дипломного проектування, виконання магістерських науково-дослідних робіт.

Апробація основних теоретичних і практичних результатів дисертації на підприємствах та в організаціях підтверджується відповідними актами про впровадження.

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

– розробленні математичної моделі якісного стану перезволоженої ділянки автомобільної дороги за методом кваліметрії;

– розробленні методу розрахунку відстані між дренажними прорізями та часу водовідведення;

– моделюванні елементу тривимірної дорожньої конструкції з трубчастим поперечним дренажем мілкого закладання методом скінчених елементів;

– створенні лабораторної установки дорожньої конструкції з поперечним дренажем мілкого закладання та проведенні експериментальних досліджень, які відповідають реальним умовам її роботи;

– моделюванні впливу вібрації від транспортного потоку на дорожню конструкцію за параметром вібропереміщення.

Здобувачем в роботах, надрукованих у виданнях іноземних держав та у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз (Scopus): в [2, 37, 38] – розроблено математичну модель для визначення транспортно-експлуатаційного стану автомобільної дороги; [3, 39] – визначено основні параметри трубчастих дрен з матеріалів різного походження та проведено моделювання роботи дренажних конструкцій; [4, 40] – визначено основні

параметри показників функціонального та фізичного зносу автомобільної дороги та їх вагомості; [5] – досліджено особливості роботи дренажних конструкцій з різними матеріалами-наповнювачами; [7] – встановлено сукупність техніко-технологічних параметрів, що визначають роботу дорожньої конструкції з поперечним дренажем мілкого закладання; [8] – проведено дослідження з визначення режимів роботи дренувальних шарів з матеріалів двох типів; [9] – проведено числове моделювання напружено-деформованого стану двох типів дорожньої конструкції з трубчастими дренами (труба ПВХ та бетонна труба);

Здобувачем в роботах, надрукованих у наукових фахових виданнях: [16] – визначено основні показники, які визначають стан автомобільної дороги, та їх кількісні характеристики; [17, 18] – досліджено закономірності стійкості асфальтобетонного покриття утворення колії в асфальтобетонному покритті за рахунок в’яжучих матеріалів; [20] – досліджено вплив вібрації та визначено параметри, які впливають на інтенсивність водовідведення дренажних конструкцій; [22] – досліджено режими водовідведення з дорожньої конструкції під впливом поверхневих опадів, у відповідності до реальних метеорологічних умов.

Здобувачем у працях апробаційного характеру [32] – визначено вплив вібропереміщення на інтенсивність водовідведення з дренажної конструкції; [33] – визначено оптимальні параметри дорожньої конструкції з поперечними дренажами мілкого закладання.

Здобувачем у працях, які додатково відображають наукові результати дисертації: [35] – досліджено методи оцінки на основі математичного та числового моделювання; [36] – проведено аналіз методів вартісної оцінки об’єктів дорожнього господарства.

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; співпадінням експериментальних досліджень та числових

розрахунків з результатами інших авторів; апробацією результатів роботи на різних рівнях.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення та практичні результати дисертаційних досліджень доповідались, обговорювались і отримали позитивну оцінку на науково-практичних та науково-технічних, міжнародних конференціях та семінарах, серед яких: Міжнародна науково-практична конференція «Європейські стандарти оцінки, землеустрою і кадастру : Проблеми впровадження та шляхи їх реалізації в Україні», 28 квітня 2016 р., Харків; Международная научно-практическая конференция «Современные геоинформационные и компьютерно-инновационные технологии дорожной отрасли, аэродромного строительства и землеустройства», 26-27 мая 2016 г., Харьков; Міжнародна науково-практична конференція присвячена п'ятидесятиріччю кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем. 03 листопада 2016 р., Харків; IX Міжнародна науково-практична конференція «Actual aspects of development in the context of globalization», 23-24 березня 2020 р., Флоренція, Італія; X Міжнародна науково-практична конференція «Modern approaches to the introduction of science into practice», 30-31 березня 2020 р., Сан-Франциско, США; XI Міжнародна науково-практична конференція «Theoretical foundations of modern science and practice», 06-07 квітня 2020 р., Мельбурн, Австралія; XVII Міжнародна науково-практична конференція «Science, trends and perspectives», 18-19 травня 2020 р., Токіо, Японія; XVIII Міжнародна науково-практична конференція «Modern science, practice, society», 25-26 травня 2020 р., Бостон, США; Міжнародна науково-технічна конференція «Гідротехнічне і транспортне будівництво», 28-29 травня 2020 р., Одеса; XX Міжнародна науково-практична конференція «Perspective directions for the development of science and practice», 08-09 червня 2020 р., Афіни, Греція; XXI Міжнародна науково-практична конференція «Current trends in the development of science and practice», 15-16 червня 2020 р., Хайфа, Ізраїль; наукові конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів Національного транспортного університету 2015 – 2020 роках.

Публікації. За темою дисертаційного дослідження опубліковано 41 наукову працю, у тому числі: 1 колективна монографія; 4 статті у закордонних виданнях, у тому числі 1 – одноосібна; 4 статті включені до міжнародних наукометричних баз Scopus; 14 статей опубліковано у фахових виданнях України, у тому числі 9 – одноосібних; 11 праць апробаційного характеру, у тому числі 9 – одноосібних; 2 статті, які додатково відображають наукові результати; 5 свідоцтв авторського права.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, п’яти розділів, загальних висновків та 5-и додатків. Робота містить 280 сторінок основного тексту, на яких 35 таблиць і 46 рисунків, список використаних джерел із 238 найменувань.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗМІНИ ТРАНСПОРТНО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО СТАНУ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ ЗГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ В УМОВАХ ПЕРЕЗВОЛОЖЕННЯ

1.1 Вплив дорожніх умов на транспортно-експлуатаційний стан автомобільної дороги

Збільшення кількісного складу ТЗ, зростання вантажопідйомності та швидкості руху автомобілів обумовлюють необхідність поліпшення дорожніх умов практично всієї мережі автомобільних доріг України. Для встановлення відповідності окремих, а також побудованих за старими нормативами ділянок доріг до вимог безпечного руху у процесі експлуатації, виникає гостра потреба в проведенні оцінки їх техніко-функціонального стану.

Якість доріг комплексно охоплює всі аспекти дорожнього будівництва та становить найважливішу проблему в дорожньо-будівельній галузі. Актуальність цієї проблеми встановлюється: безперервним зростанням інтенсивності руху і осьових навантажень; поліпшенням якості автомобілів і можливістю розвивати велику швидкість; зростаючою кількістю дорожньо-транспортних пригод; відносно низькою середньою швидкістю руху автомобілів і порівняно високою собівартістю перевезень; зростаючою вартістю доріг; підвищеними вимогами пасажирів до естетики доріг і комфортабельності руху [1].

У зв’язку з збільшенням кількості та тяжкості дорожньо-транспортних пригод, в сучасних умовах руху автомобілів, в роботі [2] розглянуті методи поліпшення транспортно-експлуатаційного стану дорожніх покриттів автомобільних доріг. Роль дорожніх умов в забезпеченні безпеки руху та значення їх вдосконалення, на сучасному етапі ще в належній мірі недооцінюються. Вони можуть бути повністю виявлені тільки на основі широких наукових досліджень аналізу причин ДТП та вивченню режимів руху автомобілів в різних дорожніх умовах.

Для покращення транспортно-експлуатаційних якостей дороги необхідно систематично вивчати її стан, режими руху транспортних засобів, регулярно проводити паспортизацію та інвентаризацію доріг.

В роботі [3] виконано моделювання руху транспортних потоків та дослідження його пропускної здатності. Реалізовано уточнення моделі розподілу інтервалів для оцінки можливості виконання обгонів, що необхідно для моделювання транспортних потоків на ділянках доріг з різними дорожніми умовами на двосмугових дорогах.

Розтріскування поверхні покриття, наявність водних калюж на автомобільній дорозі сприяють послабленню несної здатності та в десятки разів збільшують витрати на утримання дороги [4]. Наслідки поганого водовідведення, суттєво впливають на безпеку дорожнього руху та на міжремонтні терміни, що детально розглянуто в роботах [5, 6]. Це обумовлює необхідність обґрунтування методів та підходів щодо індивідуального проектування заходів з регулювання водно-теплового режиму дорожньої конструкції.

В роботі [7] розглядаються різні види деформацій дорожнього покриття, які виникли через надмірні великі навантаження від ТЗ та недоліки структури дорожнього одягу, що негативно впливають на безпеку руху. Проїзд вантажного автомобіля порушує рівновагу стаціонарного стану ДО, особливо за наявності в ньому вологи. Це спричиняє перерозподіл навантаження на шари дорожньої конструкції, що призводить до порушення цілісності покриття проїзної частини та її деформації [8, 9].

Для оцінки якісного стану ділянок автомобільних доріг використовують групи змінних за часом показників, що характеризують транспортну роботу дороги, техніко-експлуатаційні властивості ДО та ЗП, умови дорожнього руху.

Оцінку транспортно-експлуатаційних показників дороги виконують в осінньо-весняний період року з використанням двох критеріїв – показника якості і стану дороги та коефіцієнта забезпечення розрахункової швидкості руху. Якість дороги – це ступінь відповідності комплексу показників технічного рівня,

експлуатаційного стану, інженерного обладнання і благоустрою, а також рівня утримання дороги нормативним вимогам [10].

Відхилення розмірів геометричних елементів, які допущені при будівництві автомобільних доріг, істотно впливають на режим транспортного потоку в процесі їх експлуатації. Основними з таких елементів є ширина проїзної частини, узбіч, розділювальної смуги і т.і. Фактична ширина новопобудованих і, особливо, доріг, що експлуатуються, може суттєво відрізнятися від проектних розмірів та, як правило, не відповідати допустимим значенням. Мають місце відхилення фактичних поперечних похилів проїзної частини від проектних, а також несиметричні похили. Зменшення похилів або їх відсутність призводить до застою води біля дороги, що викликає руйнування земляного полотна та дорожнього покриття [11].

Нерівності покриття в процесі експлуатації збільшуються, як під впливом поштовхів коліс автомобілів, так і від нерівномірного зволоження земляного полотна та основи. Фактичний стан покриття, з точки зору забезпечення його рівності, у багатьох випадках не відповідають допустимим нормам. Неприпустимим також є наявність на дорогах вибоїн, інших деформацій та руйнувань. Як відомо, від ширини проїзної частини, її рівності, поздовжніх і поперечних похилів залежить швидкість руху, а отже, пропускна здатність автомобільних доріг. У разі руйнування кромки проїзної частини зменшується її ефективна ширина, що також є причиною зменшення швидкості руху транспортних засобів [12].

Дуже складним є рух автомобіля на кривих ділянках дороги. На таких ділянках виникають бокові сили, що діють на верхній шар дорожнього покриття та впливають на стійкість автомобіля. Таким чином, рух автомобіля супроводжується дією на покриття системи сил, різних за напрямом і величиною. Велике значення має рівність дорожнього покриття, що дозволяє знизити негативну дію автомобіля на дорогу. Наявність нерівностей на дорозі викликає ударну дію шини колеса на покриття, що негативно впливає на дорогу, автомобіль, водія та транспортну роботу загалом [10].

Об’єктивне оцінювання реальних дорожніх умов забезпечує ефективні проектні рішення щодо реконструкції доріг, а також планових поточних заходів щодо їх ремонту та підвищення безпеки руху. Такі оцінювання ґрунтуються на аналізі закономірностей руху одиночних автомобілів, транспортних потоків, пропускної здатності дороги, на результатах дослідження причин аварійності та погіршення умов праці водіїв. Транспортно-експлуатаційні властивості автомобільних доріг обумовлені швидкістю та собівартістю перевезень, безпекою і зручністю проїзду, а також їх пропускною здатністю. Перелічені характеристики складно виразити одним узагальненим показником. Тому під час оцінювання якості стану дороги або її окремих ділянок потрібно використовувати методи, які визначають вказані властивості. Ці показники також слід використовувати під час оцінювання варіантних рішень та розробки заходів, спрямованих на підвищення транспортно-експлуатаційних властивостей ділянок дороги. Досить надійно оцінюють стан дороги за допомогою таких показників, як швидкість руху, пропускна здатність, безпека руху, рівність і слизькість дорожнього покриття. На основі цих показників будують графіки пропускної здатності дороги, коефіцієнтів аварійності, коефіцієнтів безпеки, коефіцієнтів рівності і коефіцієнтів зчеплення коліс автомобіля з покриттям. За графіками виявляють ділянки можливих заторів та місць дорожньо-транспортних пригод, оцінюють економічність та зручність руху, визначають заходи щодо поліпшення умов руху транспортних засобів на автомобільній дорозі або на окремих найбільш небезпечних її ділянках [10].

В роботі [13] розглянуто процедуру оцінки вихідних даних для розробки техніко-економічних обґрунтувань капітального ремонту автомобільної дороги. Прогнозування інтенсивності руху транспортних потоків є типовою задачею проектування та експлуатації автомобільних доріг. Прогнозування базується на даних обліку середніх значень добової інтенсивності. Середньорічне підвищення рівня інтенсивності дорожнього руху на основних автомобільних дорогах країни останнім часом становить до 20 відсотків. У складі транспортних потоків зростає частка великовагових та великогабаритних транспортних засобів, що призводить

до швидкого руйнування автомобільних доріг та мостів, які розраховані на значно менші навантаження.

Наявність нерівностей на ділянці автомобільної дороги і, пов'язане з ними, зниження швидкості, збільшують витрату палива на перевезення вантажів та пасажирів на 30 – 35% [10, 14]. Натурні дослідження свідчать про те, що часто фактична вісь дороги на кривих не збігається з проектною. Замість кругових і перехідних кривих мають місце ламані лінії. Порушення в дотриманні проектних розмірів автомобільної дороги погіршують її архітектурно-ландшафтну привабливість. Таким чином, транспортно-експлуатаційний стан дороги є визначальним фактором ефективної роботи як автомобільної дороги, так і транспортних засобів. Крім транспортно-експлуатаційних показників на якісний стан дороги впливають також організаційні заходи щодо удосконалення умов дорожнього руху. Для прискореної оцінки змісту доріг можна використовувати кваліметричну модель, за якою оцінюється стан ділянки автомобільної дороги та споруд на ній.[1]

Переважна більшість конструктивних заходів автомобільних доріг не завжди забезпечують швидке відведення води. Вільна вода, перебуваючи в асфальтобетонних покриттях, сприяє виникненню тріщин, окислення та збільшення жорсткості шару покриття, що може привести до зниження міцності, розтріскування і загального руйнування шарів зносу та основи.

У світовій практиці, одним із найбільш економічних та індустріально-ефективних заходів запобігання і попередження передчасного руйнування дорожнього покриття є влаштування тонкошарових покриттів. Так, в роботі [15], визначено основні завдання влаштування тонкошарових покриттів з литих емульсійно-мінеральних сумішей, які полягають у продовженні терміну служби існуючих покриттів за рахунок герметизації волосяних тріщин і невеликих вибоїн, суттєвого підвищення шорсткості та зчіпних властивостей, рівності покриття, попередження тріщиноутворення, захисту від водонасичення, загалом – відновлення зношеного або збереження існуючого верхнього шару дорожнього покриття.

В роботі Ендрю Доусона (Andrew Dawson) [16] визначено, що проникність асфальтобетонних покриттів залежить від наявності в них тріщин та деформацій. Визначено основні фактори, які впливають на швидкість інфільтрації через тріщини в покритті. Проведено моделювання фізичних процесів пошкоджень асфальтобетонних покриттів, які викликані водою, на тривимірних моделях. Наведені умови невідповідності характеристик дорожньо-будівельних матеріалів, які було визначено в лабораторії та з яких фактично побудована дорога.

В роботі [17] запропоновано оцінювати граничний стан асфальтобетонних шарів з позиції тріщиностійкості, на підставі положень кінетичної теорії міцності твердих тіл з урахуванням: часу дії навантаження; диференціації умов роботи за характером навантаження; характеру розподілу коліс транспортних засобів по ширині смуги руху; наявності горизонтальних розтягуючих напружень на поверхні шару; кліматичних, конструктивно-матеріалознавчих-технологічних і транспортних факторів.

Відомо, що в останні роки збільшується інтенсивність руху та вагові параметри транспортних засобів (вантажопідйомність, осьове навантаження, кількість осей транспортного засобу, питомий тиск автомобільних шин на покриття). В результаті цих обставин почали більш інтенсивно з’являтися деформації асфальтобетонного покриття, у тому числі і на покритті із щебенево-мастикового асфальтобетону (ЩМА), особливо на похилах при дії горизонтальних зусиль від ТЗ. Внаслідок чого скорочується строк служби асфальтобетонного покриття та суттєво погіршуються показники безпеки руху. При вирішенні питання підвищення стійкості щебенево-мастикового асфальтобетонного покриття до дії транспортних навантажень на похилах доріг і вулиць в роботі [18] розглядається не тільки вплив дії транспортного навантаження при гальмуванні на спуску або при зрушенні з місця на підйомі, а також довготривала дія власної ваги, особливо за високих температур покриття у літній період року.

Робота [19] присвячена дослідженню в лабораторних умовах бітумного в'яжучого «Полігум» на вплив стійкості до утворення колії різних типів асфальтобетону. Вона включає в себе дослідження дрібнозернистих

асфальтобетонів типів А, Б, В та ЩМА з максимальним розміром частинок зерна 10 мм на бітумному в'яжучому «Полігум» та бітумі БНД 40/60 до накопичення залишкових деформацій у вигляді колії. Результати вказують на те, що досліджуваний асфальтобетон на бітумному в'яжучому «Полігум» майже в 1,5-2 рази має меншу колію ніж асфальтобетон з бітумом БНД 40/60.

Що стосується покращення якості асфальтобетонних сумішей, то в роботі [20] наведені рішення забезпечення міцності асфальтобетонних покриттів та збільшення довговічності у дорожньому будівництві завдяки, покращенням підбору та складу сумішей, а також процесу їх підготовки. Для визначення меж міцності на розрив при згинанні зразки випробовували на вигин з концентрованою силою за статично встановленою схемою у вигляді пучка на двох опорах. Результати останніх досліджень показують, що одним з найперспективніших способів збільшення міцності асфальтобетону є термопластичні та термоеластопластичні полімери, як модифікатори бітуму та асфальтобетонної суміші. Такі бітумні полімери демонструють певну залежність зміцнення зв'язуючого агента та зростаючу появу еластичності від збільшення кількості полімеру. Чутливість до зниження температури знижується. Ці факти створюють передумови для збільшення міцності та стійкості асфальтобетону, а також його опору зсуву та стійкості до росту тріщин у дорожньому покритті. Одним з таких модифікаторів є катіонний латекс BASF Butanol NS 198, який, за результатами досліджень американських учених, покращує теплостійкість, еластичність та адгезійні властивості бітуму.

Серйозну небезпеку для ТЗ і великі додаткові затрати, пов’язані з утриманням доріг, викликають тріщини, які є першопричиною виникнення вибоїн. Тріщини на асфальтобетонних покриттях можуть бути поперечні, повздовжні, косі, ромбовидні, локальні, наскрізні, температурні та у вигляді сітки [21]. В багатьох випадках утворення тріщин пов’язано з дією навантаження та наявністю вільної води в шарах дорожнього одягу (рис 1.1), де виникають небезпечні за розмірами деформації, які спричиняються наступними причинами:

1. Утворення сіткових тріщин:

– конструктивні недоліки, тобто недостатні розміри або недостатня несна здатність основи;

– дуже тверде в’яжуче;

– відсутність контакту між шарами дорожнього одягу.

2. Виникнення поздовжніх тріщин:

– недостатні розміри або невірне виконання будівельних робіт;

– передчасні утомлені явища в асфальті.

– утворення лінз з льоду в несучій конструкції.

3. Виникнення поперечних тріщин:

– використання неузгоджених з районом експлуатації будівельних матеріалів, наприклад, дуже твердого в’яжучого;

– глибокі тріщини після укочування.

а)

б)

Рисунок 1.1 – Пошкодження дорожнього одягу за рахунок проникнення вологи: *а*) – тріщини; *б*) – вибоїни

За глибиною, більшість тріщин поширюються на всю товщину шарів покриття, однак, при недостатній міцності дорожнього одягу, тріщини можуть поширюватися і в шари основи. Результати цього впливу приховані під поверхнею і не обов'язково виявляються безпосередньо. Зниження міцності покриття через його перезволоження – це поступовий процес, і протягом перших кількох років його результати можуть залишатися непоміченими.

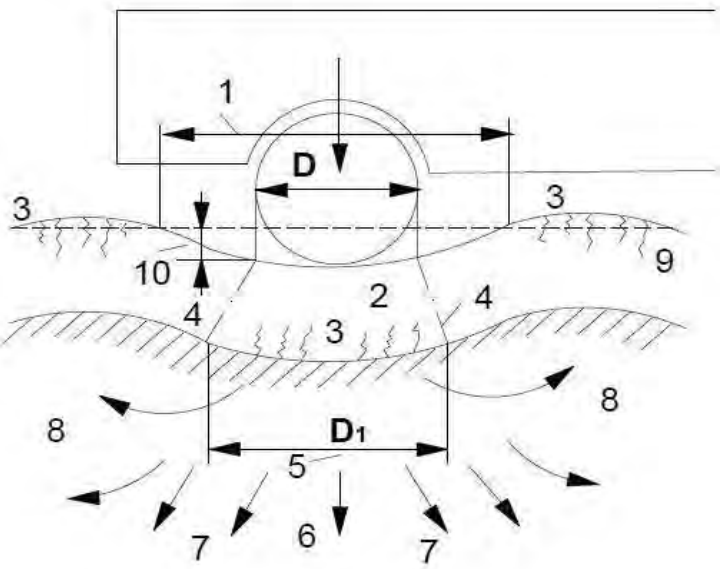
Коли вільна вода потрапляє в проміжки між конструктивними шарами дорожньої конструкції, багатошарова система під впливом вібрації покриттів, яка створюється навантаженнями від транспорту, починає діяти подібно діафрагмовому насосу [22]. Під дією навантажень від транспортних засобів швидкість пошкодження зростає в багато разів у порівнянні зі швидкістю при їх відсутності.

В результаті навантажень від коліс автомобілів дорожній одяг прогинається, потім поступово відновлюється. При великій інтенсивності і високій швидкості руху навантаження від коліс вантажних автомобілів можуть повторюватися через кожні 1,5–6 с.

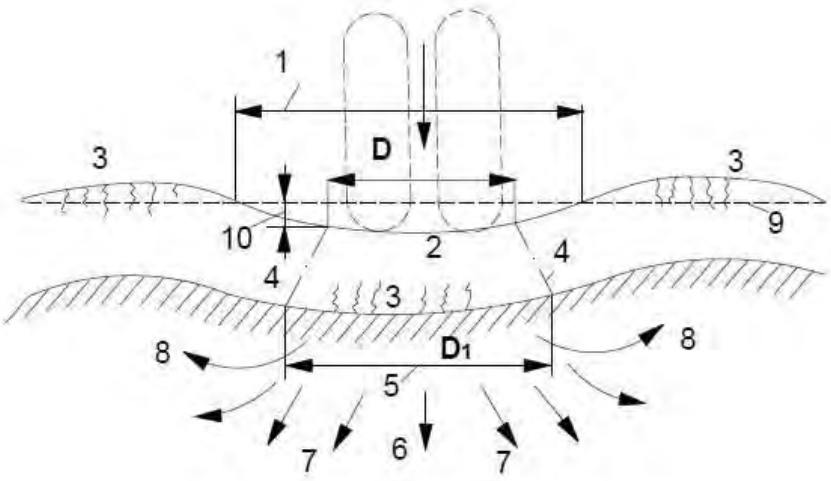
Прогин від колеса важкого вантажного автомобіля розповсюджується в усі напрямки, створюючи чашу, яка переміщується в напрямку руху автомобіля (рис. 1.2). Чаші прогинів частково перекривають одна одну, охоплюючи всю ширину смуги руху. При цьому в шарах дорожнього одягу виникають напруження стиску, розтягу, згину та зсуву[23].

Дорожній одяг повинен розподіляти діюче на нього навантаження від колеса автомобіля на велику площу. У весняний чи осінній періоди, коли внаслідок перезволоження знижується міцність ґрунту, існуюча товщина дорожнього одягу не забезпечує необхідну величину тиску, і при проїзді дуже важких автомобілів можуть виникати його руйнування. Величина тиску залежить також від величини прогину дорожнього одягу і ступеня защемлення води під покриттям. Кожен прогин покриття під впливом великого навантаження змушує воду рухатися по поверхні розділу між верхнім шаром покриття і основою, що призводить до розмивання матеріалу, виштовхування і розбризкування його через тріщини на

поверхню та в результаті утворюються порожнечі і порожнини, що викликають руйнування покриття.



а)



б)

Рисунок 1.2 – Виникнення деформації та руйнувань під дією навантаження від автомобіля: *а)* – повздовжня дія; *б)* – поперечна дія; 1 – чаша прогину; 2 – зона стиску одягу; 3 – зона розтягування; 4 – поверхня зрізу одягу; 5 – площа передачі тиску на ґрунт; 6 – ущільнення ґрунту в основі дорожнього одягу;7 – напрямок стиску ґрунту; 8 – напрямок випирання ґрунту; 9 – тріщини в дорожньому одязі; 10 – деформації дорожнього одягу.

У початковий період вода може вийти тільки через відкриті тріщини. Однак з часом в разі виникнення умов, сприятливих для утворення підсосу води з ґрунту основи, вона зазвичай прокладає собі шлях для виходу між узбіччям і кромкою покриття. В покриттях, покладених на дрібнозернистому ґрунті природної основи, викид або витікання води супроводжується змішуванням дрібних фракцій ґрунту з водою, яка забирає з собою і дрібні фракції. В результаті утворюється порожнеча, яка під впливом багаторазового застосування транспортних навантажень поступово стає все більше і більше (рис 1.3).

а)

б)

Рисунок 1.3 – Деформація покриття, яка спричинена несприятливим водно-тепловим режимом

Надмірні напруження від транспортних навантажень призводять до виникнення деформацій [24], а накопичення залишкових деформацій призводить до руйнування дорожнього покриття. Такі деформації майже ніколи не проявляються відразу після будівництва. Їм, як правило, передують тривалі внутрішні процеси, які в кінцевому підсумку знижують міцнісні властивості ґрунтів і сприяють утворенню ослаблених зон в тілі земляного полотна. Іноді на перший погляд дрібні порушення і пошкодження переростають в дефекти, що створюють аварійні ситуації і тягнуть за собою значні економічні збитки.

При обстеженні дорожніх конструкцій було встановлено, що найбільша неоднорідність вологості та щільності спостерігається у верхній частині земляного полотна в місцях утворення тріщини. В цих місцях середня вологість ґрунту полотна на 15–30% вища, ніж в місцях де немає порушення поверхні покриття, що веде до значного зниження щільності і міцності ґрунту, а також ослаблення в цих місцях дорожніх конструкцій в цілому [25].

Проникненню води в дорожню конструкцію та, відповідно, підвищенню її вологості сприяє наявність тріщин в дорожньому покритті. Особливо активно процес виникнення тріщин розвивається у весняний період, коли відбувається коливання температури повітря та покриття. Проникаючи в раковини та мікротріщини покриття, вода здійснює розклинюючу дію, за рахунок фізико-механічних властивостей при її замерзанні. Зв’язки між частками матеріалу послаблюються і під впливом коліс автомобіля утворюється вибоїна, яка може швидко збільшитися (рис. 1.4).

У роботі [26] була запропонована модель для кількісного визначення водного балансу між поверхневими водами і дренувальним шаром в дренажній конструкції для оцінки ступеня водопроникнення. Результати кількісного аналізу показали, що проникнення в дорожню конструкцію пропорційне ширині розкриття тріщини, довжині тріщини, товщині дренувального шару і водопроникності шарів дорожнього одягу; навпаки, проникнення в шари дорожнього одягу обернено пропорційне відстані між тріщинами, товщині поверхні і водопроникності дренувального шару.

Негативний вплив тріщин у шарі асфальтобетонного покриття полягає в тому, що вода проникає через весь дорожній одяг в основу, порушуючи його цілісність. Проникнення води обумовлює розвиток наступних процесів:

– підвищення вмісту води в неукріплених шарах знижує несну здатність конструктивних шарів дорожньої конструкції;

– замерзаючи, вода в дорожній конструкції може призвести як до відшаровування та місцевого руйнування асфальтобетонного покриття, так і до здимання у нижніх шарах, викликаних морозом.

Наїжджаючи на вибоїну, колесо отримує поштовх, що призводить по повторних динамічних навантажень на дорожнє покриття. При багаторазовому повторенні цього навантаження утворюється наступна раковина або тріщина, які потім зливаються в одну велику вибоїну (рис. 1.4).

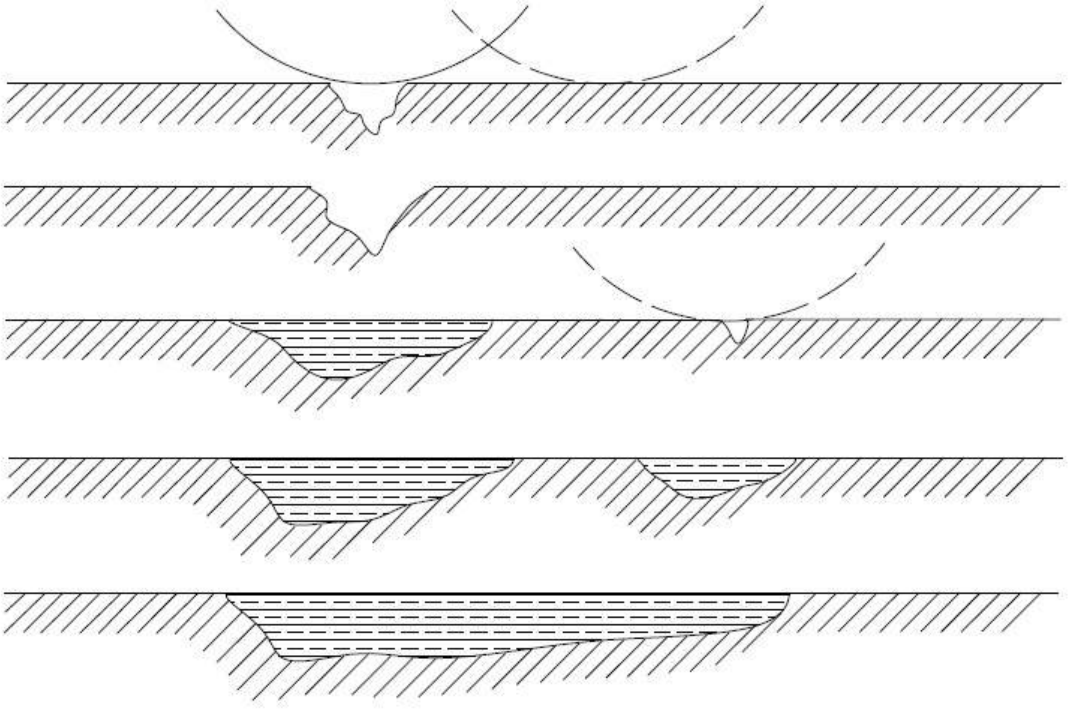


Рисунок 1.4 – Динаміка розвитку тріщин та утворення вибоїн

Збиток, заподіяний у результаті цього, пов'язаний, як правило, з ремонтом шару асфальтобетонного одягу, або навіть із повним відновленням дорожньої конструкції. Крім того, через проникнення кисню крізь тріщини прискорюється процес старіння бітуму.

Повністю уникнути появу тріщин в дорожніх покриттях майже не можливо. Цей процес пов'язаний з дією транспортних навантажень, перепадами температур, наявністю тріщин в нижчих шарах, слабкої основи, відмінністю теплофізичних властивостей матеріалів суміжних шарів.

Відомо про кілька напрямків щодо забезпечення тріщиностійкості асфальтобетонних покриттів, основні з яких на стадії проекту – матеріалознавчий (пов'язаний з покращенням властивостей асфальтобетонів на сприйняття напружень) і конструктивно-технологічний (заснований на виборі ефективного конструктивного рішення).

1.2 Теоретичні основи закономірностей зволоження дорожньої конструкції

Зазвичай збільшення автомобільного потоку є причиною багатьох проблем, але основним фактором передчасного руйнування покриттів, особливо на перезволожених ділянках автомобільних доріг слід вважати те, що не забезпечується належного відводу води з робочої зони ДК.

Теоретичні основи щодо закономірностей роботи дренажних систем ґрунтуються на дослідженнях міліоративних дренажів.

Прикладні дослідження в області визначення ефективності роботи меліоративних дренажів, зокрема їх елементів, проведено такими вченими, як О. Я. Олійник, М. Г. Пивовар, А. М. Тугай, М. Г. Бугай, В. В. Внучков, О. О. Добронравов, І. С. Жовтоног, М. І. Жовтоног, В. С. Кремез, В. П. Насіковський, С. В. Телима, Р. О. Баер, Б. В. Лютаєв, В. Л. Фрідріхсон та ін; у країнах СНД – А. М. Айвазов, А. К. Бехбудов, В. А. Духовний, Л. В. Кірейчева, О. В. Колганов, Н. М. Решоткіна та ін.[26 – 46].

Для осушення значних територій від розміщення високого рівня ґрунтових вод часто доводиться влаштовувати різноманітні дренажні системи або канали. Особливо це питання є актуальним при влаштуванні гідромеліоративних осушувальних систем. При цьому виникає необхідність з визначення положення депресійної поверхні в ґрунтовому масиві на будь-який момент часу при пониженні рівня води в горизонтальних дренах або відкритих водотоках з різною

інтенсивністю. В роботі [47] отримано аналітичний розв'язок диференціального рівняння нестаціонарної фільтрації при осушенні ґрунтового масиву, що дає можливість встановити положення депресійної поверхні в ґрунтовому масиві у будь-який момент часу при пониженні рівня води в горизонтальних паралельних дренах з різною інтенсивністю.

Для дорожнього покриття вкрай важливо запобігти проникненню вологи в дорожню конструкцію, що є одним з суттєвих факторів, який впливає на її надійність та довговічність. Так у роботах [48, 49] було проведено довготривалі натурні дослідження з метою отримання польових даних про міграцію вологи в покриттях, де проводились вивчення впливу вологи на характеристики дренажної траншеї з щебню.

Вагомою причиною погіршення стану автомобільної дороги є дощова вода [50]. Під час опадів частина води попадає на поверхню покриття, а частина її просочується в шари основи. Просочення води залежить, як від інтенсивності опадів, так і від експлуатаційного стану дорожнього покриття та узбіч.

Вплив інтенсивності і тривалості дощових опадів на характеристики розподілу вологості в дорожній конструкції було проаналізовано в роботі [51] шляхом побудови числової та фізичної моделей. При цьому інтенсивність дощових опадів значно перевищувала коефіцієнт водопроникності ґрунтів, тим самим демонструючи ефект затримання вологи. Інтенсивність впливає на збільшення розмірів зони інфільтрації дорожньої конструкції. Переривчасті опади менше впливають на розподіл полів вологості в дорожній конструкції, ніж безперервні. Лишається відкритим питання розподілу полів вологості саме в дренувальних системах мілкого закладання, як під впливом переривчастих, так і безперервних опадів.

Дослідженням регулювання ВТР ДК займались такі провідні вчені, як проф. О.Я. Тулаєв, І.А. Золотарь, М.А. Пузаков, В.М. Сіденко, В.І. Рувинський, М.Б. Корсунський, Л.О. Преферансова, П.Д. Россовський та ін. [52-73] В роботах цих авторів основна увага приділялася питанням, пов'язаним з методами регулювання ВТР та вибором раціональних параметрів водовідвідних споруд. Основним

завданням ДМЗ є забезпечення оптимального ВТР ДК, шляхом акумулювання та відведення вільної води, при цьому не зменшуючи її міцнісні характеристики.

У роботі [52] водно-тепловий режим поділяється на 5 стадій в залежності від сезонного зволоження та зміни температурного режиму автомобільної дороги загального призначення в річному циклі.

Перша стадія – початкова, пов'язана з осіннім періодом зволоження. Вологість земляного полотна W_e внаслідок інфільтрації вільної води сприяє підвищенню до W_e= (0,7–0,75)W_T, де W_T – нижня межа текучості ґрунту. Стадія триває до встановлення середньодобової від'ємної температури повітря мінус -3–5 °С, коли приплив вологи q=0. Рівень ґрунтових вод також підвищується. Але це не так суттєво впливає на вологість ґрунтів верхньої частини земляного полотна, тому основним джерелом його зволоження є проникання поверхневої води.

Друга стадія – зимове накопичення. При промерзанні ґрунту накопичена з осені волога перерозподіляється завдяки силам кристалізації. З огляду на запаси вологи, що накопичилися під час першої стадії, відбувається льодоутворення, яке може супроводжуватися нерівномірним морозним здиманням покриття, з погіршенням його транспортно-експлуатаційних якостей. Волога з більш глибоких теплих шарів ґрунту переміщується у верхню частину земляного полотна.

Третя стадія водно-теплового режиму земляного полотна – вимерзання води з дренувального шару і рівноважний стан вологи в ґрунтах його верхньої частини. У цей період спостерігається найнижча температура. Глибина промерзання $h_{пром}$ досягає максимуму. З підвищенням глибини $h_{пром}$ збільшується і морозне здимання, хоча швидкість здимання в кілька разів менше, її дія триваліша, ніж в період другої стадії. Вологість у верхній частині земляного полотна практично не змінюється, так як рівень ґрунтових вод продовжує знижуватися, досягаючи найбільшої глибини.

Четверта стадія – насичення. У цей період сходить сніговий покрив, спостерігається різкий підйом ґрунтових вод. У міру відтавання знижується морозне здимання ґрунту. З'являється надлишок q вільної води, який віджимається в дренувальний шар дорожнього одягу під дією: динамічного впливу транспорту та защемленого повітря, що розширюється при різниці температур ≥ +3ºС.

Зі збільшенням вантажного руху вільна вода інтенсивніше віджимається в корито, причому частина зв'язаної води під дією вібрації, що виникає при русі автомобіля, переходить у вільну воду. Іноді вода віджимається навіть через тріщини покриття. У цей період знизу і з боків ґрунт ще знаходиться в мерзлому стані.

Нерівномірність відтавання супроводжується перезволоженням ґрунтів під дорожнім одягом, що викликає різке зниження його міцності. Наявність снігових валів навіть у брівки узбіч сприяє проникненню вільної води в місцях їх сполучення з проїзною частиною, які найбільш швидко відтають; в таких місцях ґрунт водопроникний, здебільшого піщаний, а нерідко гравелистий або укріплений щебнем.

У період четвертої стадії водно-теплового режиму земляного полотна в залежності від коефіцієнта міцності дорожніх одягів, спостерігається утворення дрібної сітки тріщин, колій та повне руйнування асфальтобетонного покриття. Швидкість відтавання надає винятковий вплив на процес зміни вологості земляного полотна. Чим триваліше затяжна весна з нічними заморозками, які змінюються теплими сонячними днями без опадів, тим швидше знижується вологість ґрунту внаслідок підвищеного випаровування вдень і морозного вимерзання вночі [52].

У разі ж дощової весни, яка характеризується високою швидкістю відтавання, навпаки, збільшується кількість деформацій на покриттях через зниження міцності ґрунту і матеріалу дренувального шару.

П'ята стадія водно-теплового режиму земляного полотна – відновлення літнього режиму. При повному відтаванні земляного полотна відновлюється його річний водно-тепловий режим; в ґрунтах залишається лише місцями капілярно-розімкнута (підвішена) вода.

Для визначення впливу окремих джерел зволоження на міцність та морозостійкість дорожнього одягу, у діючій нормативній документації [74] регламентується розподіл місцевостей за рис.1.5

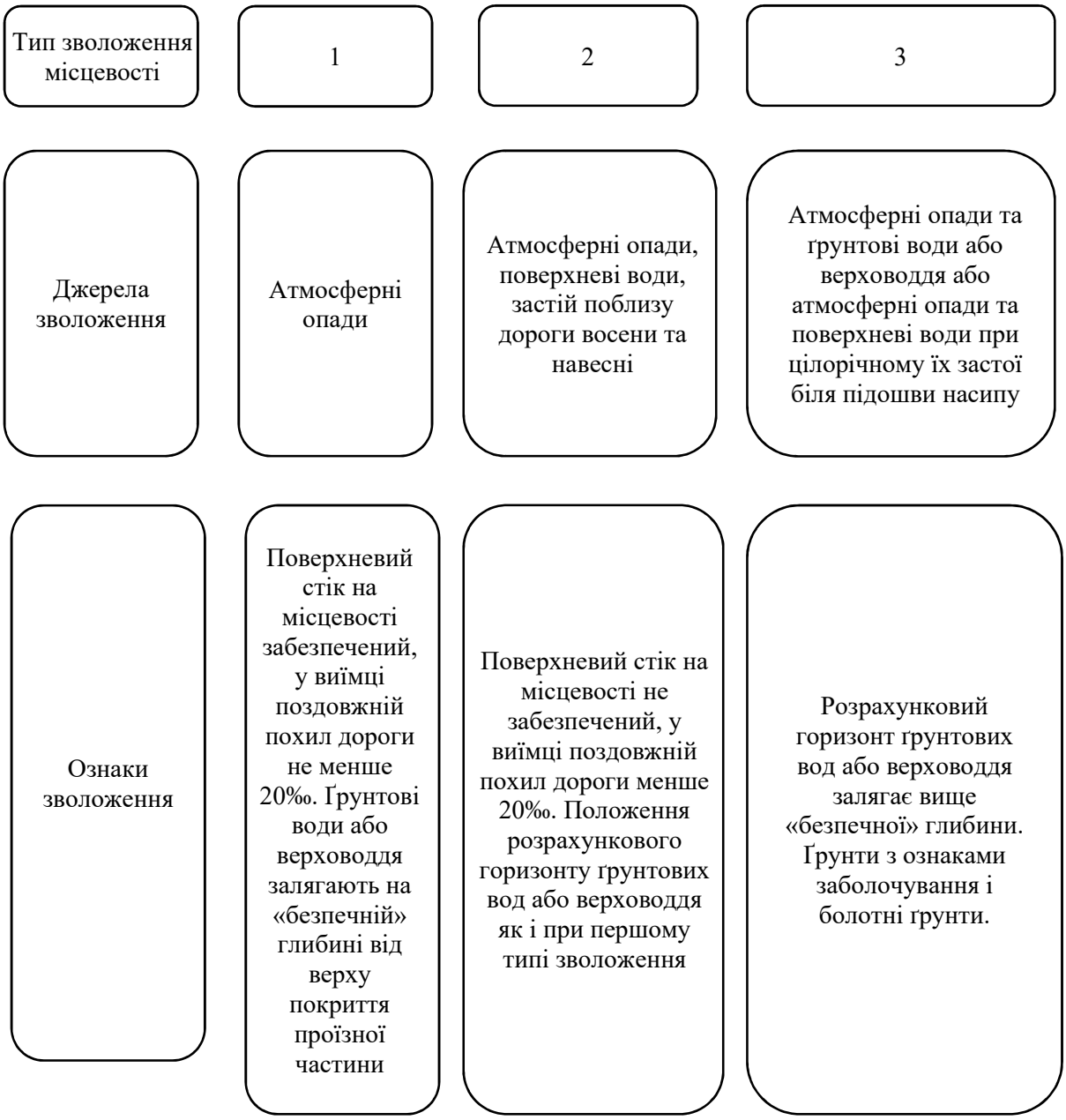


Рисунок 1.5 – Розподіл місцевості за типами зволоження

Відповідно до розподілу місцевості (рис. 1.5) у роботах [53, 54] пропонується сім типів (або розрахункових схем) водно-теплового режиму, які характерні як для автомобільних доріг загального користування, так і для міських доріг: дифузний режим, при якому вода мігрує у формі ненасиченої або насиченої водяної пари. Дифузно-плівковий режим, коли вода мігрує у двофазному стані до насиченої водяної пари додається плівкова або капілярна вода; капілярний режим вода знаходиться у рідкій фазі за рахунок впливу дощових опадів та підвищення рівня

ґрунтових вод; локально-капілярний режим відрізняється від попереднього за рахунок окремих витоків води; інфільтраційний режим, для якого характерний вплив дощових опадів, за рахунок яких відбувається періодичне зволоження ґрунтової основи; модифікації інфільтраційного режиму: інфільтраційний, що переміщується та локально-інфільтраційний, за рахунок впливу води прориву водоносних комунікацій.

Більш спрощений підхід щодо періодів водно-теплового режиму за рахунок зміни вологонакопичення запропонований у роботі [55]. Перший починається восени з моменту вологонакопичення в земляному полотні і закінчується взимку при стійкому промерзанні ґрунту, другий має місце при відтаванні ґрунтів під проїзною частиною та узбіччями під час зимових відлиг, третій починається навесні з моменту відтавання робочого шару земляного полотна і закінчується при перевищенні випаровування води над поглинанням опадів.

Опади, що випадають в кількості понад 60 мм, сприяють, особливо в I та II дорожньо-кліматичних зонах України, додаткове зволоження і без того дуже вологих ґрунтів земляного полотна. Під час дощу, внаслідок нерівномірного опускання покриття в період відтавання, на ньому затримується поверхнева вода, яка проникає через тріщини покриттів, місця стикувань асфальтобетонних покриттів, а також через неукріплені і нерідко погано сплановані узбіччя. Тріщини на покритті щорічно збільшуються по ширині і через кілька років експлуатації навіть досягають великих значень. Залиті тріщини після зими виявляються відкритими, оскільки бітумна мастика стає крихкою. Чим ефективніше працюють дренувальні пристрої, тим швидше відновлюється літній режим і підвищується модуль пружності ґрунту.

Для того, щоб запобігти або мінімізувати майбутні пошкодження та руйнування, особливо на ділянках за II та III типами зволоження (рис. 1.5), а також підвищити експлуатаційні характеристики автомобільної дороги на сьогоднішній день застосовують наступні заходи для зниження руйнування дорожнього одягу, від дії надлишкової води:

– істотне збільшення товщини конструктивних шарів дорожнього одягу, що призводить до його подорожчання;

– влаштування дренажів мілкого закладання, що є ефективним способом зниження зволоження в активній зоні земляного полотна, який зарекомендував себе як надзвичайно позитивний та економічний.

Для роботи дорожньої конструкції у сприятливих умовах водно-теплового режиму необхідно, щоб сумарний приток вологи від різних джерел зволоження $\sum Q$ не перевищував сумарної кількості вологи, що відводиться $\sum I$ [55]:

$$Q_{Інф} + Q_{Роз} + Q_{Кап} \le I_{Вип} + I_{Інф} + I_{Зм} + I_{Вис} + I_{Др}, \qquad (1.1)$$

де $Q_{Інф}$ – величина надходження інфільтраційної вологи в основу дорожнього одягу від атмосферних опадів через узбіччя, тріщини покриття, розділювальну смугу;

$Q_{Роз}$ – об’єм води, що звільняється при відтаванні ґрунту під проїзною частиною та узбіччями (відтискається із нижніх шарів земляного полотна у весняний період);

$Q_{Кап}$ – кількість капілярної вологи, що надходить знизу в активну зону ДК;

$I_{Вип}$ – обсяг води, яка випаровується;

$I_{Інф}$ – обсяг води, що припадає на поперечну інфільтрацію з просочуванням через узбіччя;

$I_{Зм}$ – обсяг води, що припадає на просочування в ґрунтову основу і на змочування дренувального шару;

$I_{Вис}$ – обсяг води, який виступає на поверхню покриття через тріщини і шви;

$I_{Др}$ – обсяг води, який відводиться дренажною системою.

Виходячи з виразу (1.1) можна визначити кількість води, яку відводить дренажна система:

$$I_{Др} = \left(Q_{Інф} + Q_{Роз} + Q_{Кап}\right) - \left(I_{Вип} + I_{Інф} + I_{Зм} + I_{Вис}\right) \qquad (1.2)$$

При аналізі притоку води, яка проникає в конструктивні шари, основна увага повинна бути направлена на виявлення джерел, що мають суттєве значення, та оцінку кількості вірогідного надходження води. У залежності від погодних умов та конструкції поперечного профілю автомобільної дороги деякі із доданків виразу (1.1) можуть бути відсутні. Спостереження протягом останніх 30–35 років 20 століття [55] дозволяють зробити висновки про те, що $Q_{Інф}$, тобто поверхнева інфільтрація, часто буває головним, якщо не єдиним джерелом притоку води в покриття. Для тих випадків, коли поверхнева інфільтрація $Q_{Інф}$ є єдиним джерелом надходження води, основна формула (1.1) може бути записана наступним чином:

$$Q_{Інф} \le I_{Др} \tag{1.3}$$

Даний вираз застосовується для випадків, коли об'єми $I_{Вип}$, $I_{Інф}$, $I_{Зм}$ та $I_{Вис}$ достатньо малі і до уваги не приймаються, що зустрічається дуже часто.

Розрахункова витрата води при проектуванні зазвичай визначається з деяким коефіцієнтом запасу ($K_{зап}$) [75]. Тоді вираз (1.1) набуває такого вигляду:

$$K_{зап} \sum Q \le \sum I , \tag{1.4}$$

а вираз (1.3) прийме наступний вигляд:

$$K_{зап} \sum Q_{Інф} \le \sum I_{Др} . \tag{1.5}$$

Для того, щоб врахувати неточність і відступи від реальної оцінки ряду факторів і показників, які впливають на інфільтрацію та відведення води з покриття, допускають, що коефіцієнт запасу повинен бути рівний 4 або 5, згідно [75].

У випадках, коли покриття не має достатньо-ефективної дренажної системи, вода, яка надходить в активну зону дорожньої конструкції, може накопичуватися там у великій кількості та тримати систему в надзвичайно перезволоженому стані протягом тривалого періоду. За цей час відбувається відносно невелика втрата води через поверхневе випаровування $I_{Вип}$, тому, ця величина може мати ймовірно несуттєве значення в загальному водному балансі. Деяка кількість води $I_{Вис}$ може виходити через шви і тріщини в покриттях під впливом різних факторів [25]. Вода, крім того, просочується донизу в ґрунтову основу $I_{Зм}$, але вплив цього фактору в більшості випадків також несуттєвий.

У більшості випадків при влаштуванні дренувальних шарів використовують піщані ґрунти, які є досить проникними. Але відомо, що такі шари мають коефіцієнти фільтрації в діапазоні від 1 до 5 м/добу, що говорить про невисоку їх дренувальну здатність, особливо в зимовий та весняний періоди. Проблема полягає в тому, що відведення води з покриття є повільним процесом.

При наявності матеріалів з коефіцієнтом фільтрації понад 5 м/добу постає питання у спроможності дренажної системи відвести всю воду, яка інтенсивно надходить до дорожньої конструкції. Незначні поперечні похили дренувальних шарів ускладнюють відведення води з них. Дренувальну здатність поверхні можна значно підвищити, використовуючи матеріал з надзвичайно високою водопроникністю. Відведення води з дренувальних шарів, зазвичай, ускладнене через малий гідравлічний похил і незначну товщину шару.

Як правило, при розрахунках дренажів мілкого закладання основним джерелом зволоження вважається волога, яка звільняється при відтаванні ґрунту під проїзною частиною та узбіччями (відтискається із нижніх шарів земляного полотна у весняний період). Проте, враховуючи той факт, що дорожні одяги автомобільних доріг та конструкції узбіч не забезпечують повної водонепроникності, кількість інфільтраційної вологи від атмосферних опадів може перевищувати кількість вологи від зимового вологонакопичення [24]. З огляду на це, стоїть питання визначення розрахункового (найбільш несприятливого) періоду

індивідуально для кожного регіону з урахуванням режиму випадання опадів та температурних коливань.

Загальний питомий надлишок води у такому випадку буде складатися із суми питомих надлишків від інфільтрації, визначених за результатами багаторічних спостережень, та загальної кількості вологи, яка вивільнилася протягом періоду розтавання конструкції, розділеної на тривалість періоду розтавання до глибини, рівної такій, з якої вода може відтискатися на поверхню.

Проф. В.В. Ведерніков запропонував при розрахунку дренувальної конструкції визначати витрату Q в ґрунтовій товщі з врахуванням процесу фільтрації води в капілярній зоні на основі загальної глибини потоку[76]:

$$\sum h = h_1 + ah_k, \tag{1.6}$$

де h_1 – глибина потоку вільної води, м;

a – коефіцієнт, $a<1$;

h_k – висота капілярного підняття в ґрунтовій товщі, яка спостерігається підчас періоду відтавання, м, $h_k = \frac{h_v}{\cos\alpha}$;

h_v – глибина фільтруючого потоку капілярної води, м.

Тоді сумарна витрата становитиме:

$$Q = k_ф(h_1 + ah_k)iL \tag{1.7}$$

де i – похил;

$k_ф$ – коефіцієнт фільтрації;

L – довжина ділянки дороги, м.

Коефіцієнт *a* залежить від однорідності ґрунтової товщі та змісту в ній защемленого повітря. Перехід води з капілярного стану у вільний відбувається при глибині фільтраційного потоку $h_1 > h_v$, коли тиск на воду перевищує атмосферний.

Зі збільшенням щільності ґрунту знижується коефіцієнт фільтрації в капілярній зоні, але в значно меншому ступені, ніж у зоні вільної води. Зниження коефіцієнта фільтрації пов'язано, перш за все, з підвищенням вмісту кисню в ґрунтових порах фільтраційного потоку. Зміна кількості повітря в порах піску супроводжується зміною коефіцієнта фільтрації в 2–2,5 рази [76–78]. У зв'язку з цим коефіцієнт фільтрації в капілярній зоні дренувального шару з підвищенням вологості до повного водонасичення ґрунту буде збільшуватися, наближаючись до значення коефіцієнта фільтрації, рівному при повному заповненні пор водою:

$$k_{фk} = \eta k_{фn} \tag{1.8}$$

де $k_{фn}$ – коефіцієнт фільтрації при повному насиченні ґрунту вільною водою (повна вологоємність $W_{ПВ}$);

$k_{фk}$ – коефіцієнт фільтрації в капілярно-повітряній зоні, яка характеризується капілярною вологоємністю W_k;

η – коефіцієнт водонасиченості ґрунту внаслідок наявності в порах повітря, складає $\eta < 1$.

У роботі [40] витрату води в дренувальних шарах пропонується визначати за рівнянням:

$$Q = Q_n + Q_k = Q_n + \beta Q_n = Q_n(1+\beta) = k\frac{\Delta H}{(b/2)}(h_{cp} + \beta h_k) \tag{1.9}$$

де $b/2$ – шлях фільтрації, при двосхилому поперечному профілі проїзної частини шириною *b*, м;

ΔH – різниця напорів, яка дорівнює $\Delta H = h_1 - h_2 + i(\frac{b}{2} - b') + h_2'$;

$h_{ср}$ – середня глибина фільтраційного потоку, м;

i – поперечний похил поверхні земляного полотна, що приймається в межах 0,03–0,04;

h_1 та h_2 – допустимі глибини фільтраційного потоку по осі дороги (з двосхилою проїзною частиною) та біля трубчастої дрени, м;

h_2' – глибина і b' - ширина (по верху) траншеї для створення вакуум-напору h_v, м.

У роботі [55] пропонується уніфікована залежність для визначення припливу води в ґрунт (в м^3 на 1 м^2 поверхні) при зволоженні атмосферними опадами, що випадають на проїзну частину ($q_{атм(пр.ч.)}$) і такий же від атмосферних опадів, що випадають на узбіччя, та від стоку води з проїзної частини на узбіччя ($q_{атм(узб)}$):

$$q_{атм(пр.ч.)} = 10^{-3} \alpha_{пр} H_{пог(пр.ч.)} \overline{\omega}_{гр}; \quad (1.10)$$

$$q_{атм(узб)} = 10^{-3} \alpha_{пр} (H_{пог(узб)} - H_{вип(узб)}) \overline{\omega}_{гр} \quad (1.11)$$

де $\alpha_{пр}$ – коефіцієнт, що враховує додатковий приплив води, що надходить у ґрунт до та після розрахункового місяця, $\alpha_{пр} = 1{,}3$;

$H_{пог(пр.ч.)}$ – кількість води, яка поглинається протягом місяця розрахункового року в ґрунт земляного полотна під проїзною частиною, мм;

$H_{пог(узб)}$ – те ж на узбіччях, мм;

$H_{вип(узб)}$ – кількість води, що випаровується з ґрунту земляного полотна на узбіччях протягом місяця розрахункового року, мм;

$\overline{\omega}_{гр}$ – площа, м^2 ($\overline{\omega}_{гр} = 1 м^2$).

У роботі О.Я. Тулаєва [52] пропонується визначати сумарну кількість вільної води (Q, м^3/м^2 проїзної частини) протягом періоду відтавання двома способами:

Перший спосіб. Якщо в результаті спостережень відомі вологість і відповідна щільність ґрунтів для типової ділянки, то можна підрахувати загальний надлишок води (в м^3/л), що надходить навесні в дренувальний шар:

$$Q = h_o(W_e - 0,75W_T)\rho + Q_1, \qquad (1.12)$$

де W_e – природна вологість ґрунту, яка спостерігалася безпосередньо на дорозі, % за масою;

W_T – нижня межа текучості ґрунту, % за масою;

h_o – розрахункова товщина шару ґрунту, з якого вода віджимається в корито, м;

ρ– щільність ґрунту, кг/м^3;

Q_1 – кількість води, що інфільтрується через покриття, узбіччя і розділювальну смугу, м^3/м^2.

Величина h_o визначається за формулою:

$$h_o = (3,5 - 4D) - h_{до}, \qquad (1.13)$$

де D – діаметр кола, рівновеликого відбитку колеса розрахункового автомобіля, м;

$h_{до}$ – загальна товщина дорожнього одягу, м.

Віджимання вільної води в дренувальний шар під дією динамічного навантаження зі зв'язного ґрунту можливе при його відносній вологості $W_e > 75\%$. Загальний питомий надлишок води можна визначити за формулою:

$$q = 1000Q / T_{відт} + q_n + q_o + q_{рп}, \qquad (1.14)$$

де $q_п$ – питомий надлишок води, що проникає через покриття, л/м^2 за добу;

$q_о$ – те ж, що надходить з узбіч, л/м^2 за добу;

$q_{рп}$ – те ж, що надходить з розподільних зелених смуг, л/м^2 за добу;

$T_{відт}$ – тривалість відтавання дорожнього одягу та земляного полотна шаром загальною товщиною $h_о$, доба.

Другий спосіб. Визначення ґрунтується на тому, що на типових ділянках заміряють морозне здимання покриття, Q (в м^3 / л проїзної частини) розраховують за формулою:

$$Q = lK_л + Q_1, \tag{1.15}$$

де l – морозне здимання покриття, мм;

$K_л$ – коефіцієнт переходу льоду в вільну воду, який дорівнює 0,6.

У методичних рекомендаціях [79] пропонується визначення питомого надлишку води, що надходить у дренувальний шар при відтаванні ґрунту, м^3/доба на 1 м^2 поверхні за формулою:

$$q_{i\ вг} = \frac{q_{i\ вг}^{пч} \cdot b + q_{i\ вг}^{у} \cdot l}{b + l} \tag{1.16}$$

де $q_{i\ вг}^{пч} = h_i \times \left(W_{вес} \times \rho_{вес} - \beta_{гр} \times W_T \times \rho_d \right)$ – об’єм води, що звільняється при відтаванні ґрунту під проїзною частиною (м^3/доба на 1 м^2 поверхні);

$q_{i\ вг}^{у} = q_{i\ вг}^{пч} \times \frac{2 \times l}{b}$ – об’єм води, що звільняється при відтаванні ґрунту під узбіччям (м^3/доба на 1 м^2 поверхні);

h_i – товщина шару ґрунту, в якому розтає лід за одну добу в активній зоні земляного полотна, м;

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

$\rho_{вес}$ – щільність ґрунту при розрахунковій вологості, г/см^3;

$\beta_{гр}$ – коефіцієнт, що показує, яка кількість води утримується в порах ґрунту, ущільненого до потрібної щільності, в долях від вологості при межі текучості ґрунту;

W_T – вологість на межі текучості ґрунту, в долях одиниці;

ρ_d – щільність сухого ґрунту, г/см^3;

l – ширина узбіччя, м;

b – ширина проїзної частини, м.

Необхідні вихідні дані для визначення питомого надлишку ґрунтуються на багаторічних метеоспостереженнях та визначаються згідно [80]. Розрахунок основних параметрів ДМЗ виконується на основі загального питомого надлишку води, яка надходить у найбільш несприятливий весняний період від усіх можливих джерел зволоження. При проектуванні дренувальних систем мілкого закладання та відповідного упередження деформації дорожнього покриття важливо знати не тільки час, за який вода надходить в дорожню конструкцію, але і час, необхідний для її відведення з шарів основи дорожнього одягу після припинення притоку. Особливого значення це набуває для випадку поверхневої інфільтрації при випаданні атмосферних опадів. На ділянках з поздовжнім похилом більшим за поперечний (у виїмках, нульових відмітках, невисоких насипах) вільна вода рухається у дренувальному шарі вздовж дороги. Вода захоплює найдрібніші частинки, які накопичуються у місцях увігнутих вертикальних кривих, а також на переході з виїмок в насип.

1.3 Методи розрахунку дренажних конструкцій мілкого закладання

Для того щоб витрати на будівництво та експлуатацію покриттів з урахуванням терміну їх служби були зведені до мінімуму, треба так проектувати конструктивні шари дорожнього одягу, щоб забезпечити можливість їх самостійного швидкого осушення за короткий проміжок часу. Дану функцію забезпечують дренажі мілкого закладання (ДМЗ), які влаштовуються в робочій зоні

дорожньої конструкції, де має місце накладання двох видів найбільшого навантаження: від рухомого транспорту та власної ваги конструкції.

Основним завданням ДМЗ є забезпечення оптимального водно-теплового режиму дорожньої конструкції, шляхом акумулювання та відведення вільної води, при цьому не зменшуючи її міцнісні характеристики. Конструкція ДМЗ можлива з різних матеріалів, які характеризуються фізико-хімічними властивостями, що впливають на інтенсивність водовідведення.

Індивідуальні проектно-конструктивні параметри шарів дорожнього одягу та ДМЗ, на відміну від стандартних підходів, дозволяють збільшити строк експлуатації автомобільної дороги, зменшити утворення тріщин, пошкоджень та витрати на експлуатаційне утримання.

У минулому питання проектування дренажних систем для покриттів зазвичай розглядалися як якісні завдання, засновані на загальновідомих положеннях. Насправді ж, питання інфільтрації і дренажу слід розглядати як кількісні завдання з індивідуальним рішенням для кожного конкретного випадку [81]. Руйнуючі дії, що завдаються водою на покриття, можуть регулюватися таким шляхом: 1) недопущення води до місць, де вона може заподіяти пошкодження, 2) швидкого і надійного відведення води, що надійшла в шари покриття, за допомогою дренажних пристроїв [82]. Крім того, вважалося, що звичайні заходи, які вживаються для ущільнення конструктивних шарів, виявляться достатніми для того, щоб запобігти проникненню поверхневої води в покриття, і що дренажні системи необхідні тільки для регулювання рівня ґрунтової і джерельної води або інших підземних вод.

Неправильно розрахований дренаж призводить до різного роду серйозних пошкоджень і руйнувань покриттів, в тому числі до утворення колій і вибоїн на дорогах з покриттям нежорсткого типу, підсосу і вибризкуванню розрідженого ґрунту на поверхню бетонних покриттів, а також утворення глибин незалежно від типу покриття.

Докладний аналіз обстежень показав, що при проектуванні автомобільних доріг покриття розраховується так, щоб забезпечити його міцність без відводу з

конструктивних шарів покриття інфільтраційної води. Всебічні натурні обстеження проведені в різних районах США, а також дослідження, виконані на ділянках, обраних спеціально для вирішення питання з дренування, показали, що значна частина передчасних пошкоджень та сучасних покриттів відбувається в результаті дії надлишкової води, в основному поверхневої, яка попадає в конструктивні шари (рис 1.6).

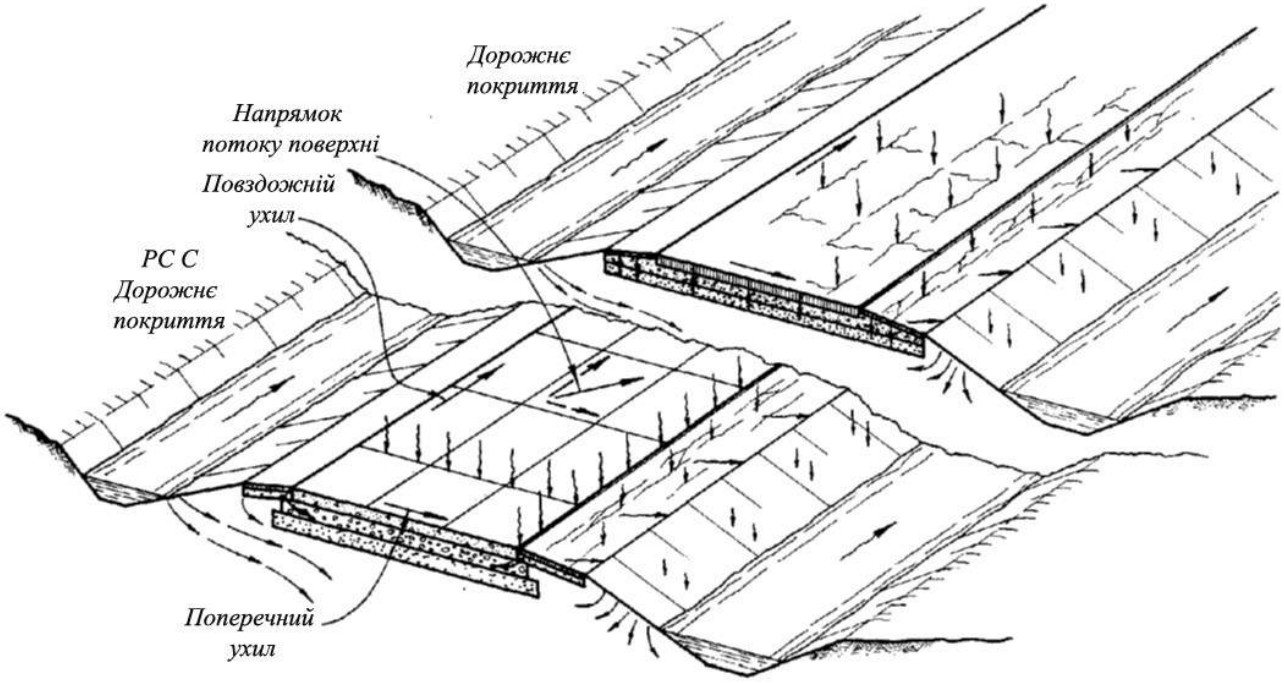


Рисунок 1.6 – Джерела надходження вологи до дорожньої конструкції з різними типами покриття, згідно [82]

Покриття автомобільних доріг, аеродромів, великих стоянок для автомобілів, міських вулиць мають великі площі, схильні до дії інфільтраційної води, що надходить від різних джерел.

Через свої широкі і пологі форми покриття надзвичайно уразливі для води, що надходить з багатьох джерел, таких, як: 1) спрямований вниз потік, здатний проникати через пористі поверхні, розгерметизовані шви, відкриті усадочні тріщини і т.д.; 2) бічний (намивний) потік з боку, створюваний водою, що стікає з сусідніх водозбірних площ, наприклад з широких роздільних смуг; 3) спрямований

вгору потік, створюваний напором ґрунтової або джерельної води, а також підтоплення покриття в разі підйому рівня води в довколишніх водоймищах; 4) капілярне підняття води з нижчого водного дзеркала; 5) конденсаційна вода, що утворюється в результаті різких коливань температури повітря. Навіть локалізоване надходження води від деяких з цих джерел може привести до акумулювання її в конструктивних шарах, що в свою чергу призводить до пошкоджень, наслідки від яких значно перевищують розміри порушеної ними площі.

Для виправлення недоліків пов'язаних з незадовільним дренажем в 90–х роках минулого століття та на початку 2000–х в США виконано велику кількість наукових розробок направлених на внутрішнє відведення води з зернистих та пористих шарів. Так в нормах США AASHTO (Американська Асоціація державних дорожньо-транспортних робочих) та Федеральною Американською дорожньою асоціацією (FHWA) наведено різні схеми відведення води з пористих шарів основи дорожнього одягу. При цьому коефіцієнт фільтрації матеріалу основи має бути не менше 30 м/добу.

Дренажні конструкції на автомобільних дорогах влаштовуються для забезпечення стійкості земляного полотна та максимального захисту від перезволоження основи дорожнього одягу поверхневими та підземними водами [83]. Вода під покриття просочується шляхом капілярного підняття та через пори і тріщини покриття, появу яких та розподіл по площині передбачити заздалегідь неможливо. Тому дренажна конструкція повинна забезпечити акумулювання та відведення води з будь-якої точки покриття без переривання руху протягом річного циклу.

В роботі [84] розглянуті питання щодо існуючих водовідвідних та дренажних систем, які призначені для запобігання підтоплення аеродромів. Приділено увагу методам їх розрахунку, наведено типи і види дренажів з різних матеріалів та їх конструктивні схеми, визначено основні параметри дренувальних шарів аеродромних покриттів, які впливають на час осушення аеродромних покриттів.

У роботі О.Я. Тулаєва [52] було запропоновано розраховувати дренувальний шар за одним з двох методів: осушення та поглинання. Перший метод ґрунтується на тому, що вся кількість води, що надходить під шари дорожнього одягу, поглинається дренувальним шаром, другий виходить з того, що вся вільна вода видаляється з дренувального шару.

Основним розрахунковим показником дренувального шару, який працюватиме за методом осушення є коефіцієнт фільтрації. Переважно влаштовують піщані дренувальні шари. Чим більше коефіцієнт фільтрації пісків $K_ф$, тим менше природна вологість, а тому вище їх міцність. Зі збільшенням $K_ф$ пісків знижується висота капілярного підняття і підвищується швидкість поглинання ними води. Вологість піщаного шару при його осушенні більш рівномірна, ніж при поглинанні. Аерація пісків також пов'язана з величиною $K_ф$ [52].

Таким чином, коефіцієнт фільтрації пісків $K_ф$ є не тільки розрахунковим параметром осушення, але й, згідно з [52], непрямою міцнісною характеристикою.

Необхідне значення коефіцієнта фільтрації визначається за співвідношенням, згідно [52]:

$$K_ф = \frac{q l_{пч}^2}{0,67(2h_1 + h_2) i_0 l_{пч} + h_1^2 - h_2^2} \qquad (1.17)$$

де q – розрахункове значення питомого надлишку води;

$l_{пч}$ – ширина проїзної частини, м;

i_0 – поперечний похил проїзної частини;

h_1 – глибина фільтраційного потоку, м;

h_2 – глибина фільтраційного потоку у дрени, м.

У рівнянні (1.17) розрахункове значення питомого надлишку води q приймають в залежності від природних умов місцевості [80], а глибину фільтраційного потоку h_1 визначають з урахуванням необхідної міцності піску.

Дренувальний шар працює за методом осушення після відтавання поперечних випусків [76]. При відсутності поперечних випусків дренувальний шар працює за методом поглинання.

При влаштуванні дренувальних шарів за рекомендацією О.Я. Тулаєва, які працюють за методом поглинання, можна використовувати і місцеві піски зі зниженим коефіцієнтом фільтрації. Але розрахункова товщина дренувального шару виходить приблизно в 1,5 рази більше, ніж при розрахунку за методом осушення.

При наявності в дренувальному шарі вільної води міцність його нижче, ніж в разі наявності тільки капілярної води.

При $k > 2$ м/добу, товщина дренувального шару $h_д$ на дорогах з перехідними типами покриттів визначають за формулою:

$$h_д = \frac{Q_p}{q_3 - q_1} = \frac{Qk_nk_3}{q_3 - q_1}, \qquad (1.18)$$

де Q_p – розрахункове значення загального надлишку води, що надходить в дренувальний шар у розрахунковий період року, становить $Q_p = Qk_nk_3$;

k_n – коефіцієнт «пік», який характеризує нестаціонарний процес руху води;

k_3 – коефіцієнт гідрологічного запасу;

q_3 – кількість вільної води, що поглинається дренувальним шаром товщиною 1 см на площі 1 м^2, л;

q_1 – кількість води, що знаходиться в дренувальному матеріалі перед розрахунковим періодом.

Відповідно до цього товщину дренувального шару $h_{дш}$ приймають:

$$h_{дш} = h_{\max} + h_{зап}, \qquad (1.19)$$

де h_{max} – максимально допустима глибина вільної води в дренувальному шарі, що дорівнює h_1 при двосхилому поперечному профілі по осі дороги;

$h_{зап}$ – запасна товщина шару, яка приймається в залежності від необхідного модуля пружності матеріалу дренувального шару.

Вся кількість води, що залишилася, має перебувати у вільному стані при товщині шару:

$$h_{\max} = \frac{Q_p - (q_2 - q_1)h_k\varphi}{q_3 - q_1}, \tag{1.20}$$

де q_1 – кількість капілярної води, що поглинається дренувальним шаром товщиною 1 см на площі 1 м^2, л;

φ – коефіцієнт заповнення пор водою в капілярно-насиченому шарі піску, який залежить від висоти цього шару h_k.

Величину h_{max} визначають за наближеним розрахунком:

$$h_{\max} = \frac{qk_nk_3T_{пв}}{q_3 - q_1} = \frac{q_pT_{пв}}{q_3 - q_1}, \tag{1.21}$$

де $T_{пв}$ – тривалість бездіяльності поперечних випусків води, відтавання яких відбувається пізніше від дренувального шару (рахуючи по осі дороги).

Знаючи кількість води, що надходить в розрахунковий період до дренувального шару у роботі [52], запропоновано визначення її частини, що потрібно відводити:

$$Q_4 = \left(Q + Q_3\right) - Q_2, \tag{1.22}$$

де Q – весняний надлишок води, розрахований за формулами(1.12–1.15), л/м^2;

Q_1 – кількість поверхневої води, яка надходить до дренувального шару за розрахунковий період, л/м^2;

Q_2 – максимальна кількість капілярної води, що утримується силами поверхневого натягу в дренувальному шарі товщиною $h_д$, л/м^2;

Q_3 – кількість води, яка знаходиться в дренувальному шарі тієї ж товщини перед розрахунковим періодом, л/м^2.

Якщо $Q_2 \geq Q+Q_3$, то не потрібне відведення води з дренувального шару. Кількість води Q_2 залежить від коефіцієнта заповнення пір водою φ та обчислюється за формулою:

$$Q_2 = \frac{W_k \varphi h_{дш} \rho}{100}, \tag{1.23}$$

де W_k – капілярна вологоємність піску, що визначається в лабораторних умовах при ступені вологості, яка характерна для його роботи в дорожньому одязі (причому заміряють їх при капілярному насиченні шару піску товщиною не більше 5 см, коли його пори повністю заповнені водою),%;

ρ – те ж, середня щільність, т/м^3;

$h_{дш}$ – проектна товщина дренувального шару, м.

На основі значення W_e, можна визначити кількість води (в л/м^2), що знаходиться в дренувальному шарі товщиною $h_{дш}$ (в см) у передвідтавальний період:

$$Q_3 = \frac{W_e h_Д \delta}{100}, \tag{1.24}$$

На основі залежностей для Q_2 та Q_3, отримано наступний вираз (1.25) загальної кількості вільної води (в л/м^2), що відводиться з дренувального шару протягом розрахункового періоду:

$$Q_4 = Q + Q_3 - Q_2 = Q + \frac{h_Д}{100}(W_e - W_k \varphi). \tag{1.25}$$

Розрахунковий питомий надлишок води q (в л/м^2 на добу), що відводиться дренувальним шаром за 1 добу розрахункового періоду, виразиться формулою:

$$q = \frac{Q_4}{T_{пв}} = \frac{1}{T_{пв}}\left[Q + \frac{h_{дш}}{100}(W_e - W_k\varphi)\rho \right]. \quad (1.26)$$

При конструюванні дренувальних систем враховують відведення води, яка надходить в конструктивні шари дорожнього одягу від впливу ґрунтових вод та внаслідок весняного вологонакопичення, не надаючи уваги інфільтраційній волозі. Але після детального вивчення випадків та причин руйнування покриттів від перезволоження інфільтраційною водою було зроблено висновки про те, що дренажна система повинна влаштовуватись майже завжди, крім як у посушливих районах та у місцевостях з незначною кількістю опадів [75].

Існуючі проектні методи не повністю враховують дію усіх можливих джерел зволоження, особливості клімату регіону проходження дороги, режими руху рідини у пористому середовищі дренувального прошарку тощо.

В результаті одночасного впливу несприятливого водно-теплового режиму та великовагового транспорту, внаслідок порушення стійкості дорожнього одягу, виникають і розвиваються незворотні деформації. Водно-тепловий режим впливає протягом року нерівномірно, і тому дорожній одяг працює з різним запасом міцності. Оскільки товщина дорожнього одягу розраховується за весняним періодом, то в літній і тим більше в зимовий періоди дорожній одяг працює за рахунок збільшення товщини шарів покриття.

Для розміщення в порах та подальшого відведення інфільтраційної води необхідно влаштовувати протиінфільтраційні (дренувальні) шари. Доцільність влаштування таких шарів в основі дорожнього одягу на контакті з земляним полотном обумовлене не тільки осушенням при весняному відтаванні ґрунту земляного полотна, але і врахуванням факторів впливу осіннього періоду.

В період довготривалих дощів малої інтенсивності, при найбільш несприятливому характері опадів, стоком з поверхні узбіч можна знехтувати [56]. Але вода, що стікає по поверхні вдосконалених покриттів, внаслідок нерівності поверхні на узбіччях затримується, що призводить до утворення елементарного

шару води в тілі та в укісній частині земляного полотна, яка живить інфільтрацію. Кількість води, що проникає через тріщини в покритті, визначити складно.

Волога понад 70% від межі текучості віджимається навесні з ґрунту вгору в згаданий шар під дією ваги верхніх шарів та рухомого навантаження [52]. Відповідна товщина інфільтраційного шару повинна забезпечувати необхідний обсяг пор з урахуванням інфільтрації, припливу води в шар при відтаванні ґрунту і швидкості відтоку (відведення) води по шару. Товщина протиінфільтраційних шарів повинна визначатися з урахуванням комплексу умов їх роботи восени та навесні як осушувальних земляне полотно.

Для інфільтраційного шару в наближеному розрахунку можна прийняти, що велика інфільтрація в одиниці об'єму шару буде мати місце під узбіччями, а не під покриттям. Вбирання восени дощових опадів через узбіччя може бути безперервним протягом усього періоду або періодичним.

Умова безперервного вбирання має вигляд:

$$q_{вз} \le \sum r - E_{ср}\tau_{вол} \qquad (1.27)$$

де $q_{вз}$ – кількість води, яку може вбирати ґрунт, г/см^2;

$\sum r$ – сума опадів за період $\tau_{вол}$, см;

$E_{ср}$ – середня за період $\tau_{вол}$ інтенсивність випаровування, г/см^{2}год.

Умова періодичного вбирання може бути прийнята у вигляді:

$$q_{вз} > \sum r - E_{ср}\tau_{вол} \qquad (1.28)$$

Останнє співвідношення означає, що можливий (за властивостями ґрунту) обсяг вбирання перевищує суму опадів за вирахуванням випаровування і тому інфільтрація буде періодичною.

Для з'ясування виконання умов (1.27) та (1.28) величина $q_{вз}$ повинна бути попередньо визначена зі співвідношення:

$$q_{вз} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \rho_{скгр} (W_{пв} - W_o) \sqrt{k_1 \tau_{вол}}, \qquad (1.29)$$

де $\rho_{скгр}$ – об'ємна вага скелета ґрунту, г/см^2;

$W_{пв}$ та W_o – відповідно повна вологоємність і оптимальна вологість, вагові, виражені в частках одиниці;

k_1 – коефіцієнт вологопровідності ґрунту, см^2/год та визначається на основі лабораторних досліджень.

За умови поглинання води в шарі без виходу останньої і осушення шару протягом періоду, товщина нижньої заповненої водою частини дренувального шару $h_н$ до кінця періоду вологонакопичення буде дорівнювати:

$$h_н = \frac{q_{вз}}{W_{пв}^{\ д} - W_0^д} \qquad (1.30)$$

або при дотриманні умови (1.28)

$$h_н = \frac{\sum r - E_{ср} \tau_{вол}}{W_{ПВ}^{\ дш} - W_0^{дш}}, \qquad (1.31)$$

де $W_{ПВ}^{\ дш}$ – повна вологоємність (об'ємна) матеріалу дренуючого шару;

$W_0^{дш}$ – початкова об'ємна вологість матеріалу цього шару.

Такі найбільш несприятливі умови можуть виникати у процесі експлуатації доріг внаслідок замулювання виходів дренувального шару в укоси земляного

полотна, більш повільного їх відтавання навесні або поверхневого промерзання ґрунту укосів при осінніх заморозках.

1.4 Методи визначення термінів водовідведення дренувальними шарами

Оцінюючи загальний розмір пошкоджень від руху транспорту по перезволоженому покриттю, важливо знати не тільки час, за який основна маса води поступає в покриття, але і час, необхідний для її відведення з основи покриття після припинення притоку. Особливого значення це набуває для випадку поверхневої інфільтрації при випаданні атмосферних опадів. Якщо ефективно діючі дрени не передбачені, стікання проходить в основному шляхом просочування води вниз у напрямку ґрунтової основи.

При застосуванні під покриттям високопроникних дренувальних шарів основи відкритого типу осушування зазвичай проходить достатньо швидко, а сам період насиченого стану конструкції короткочасний і, у більшості випадків, це відбувається в період зливових дощів. Якщо вказаного типу шари достатньо проникні і забезпечують швидке дренування, загальна річна незахищеність систем проти надлишкової води взагалі буде обмеженою. Якщо ж використовуються матеріали з дуже низькою проникністю, рівень насиченості може високо піднятися, а після надходження води буде повільно спадати. Щоб визначити загальну річну кількість годин, протягом яких вода знаходиться в конструкції (від поверхневої інфільтрації), необхідно встановити:

1. загальну кількість годин в рік насиченого випадіння атмосферних опадів та надходження води від інших джерел;
2. тривалість зниження насичення в дренувальному шарі після припинення надходження до нього води.

Статистика випадіння атмосферних опадів вказує на те, що в середньому за рік буває декілька дощів, які можуть призвести до великого перезволоження порівняно зі звичайним рівнем опадів. Інтенсивність випадіння опадів і відповідне накопичення води, яке може “витримати” дане покриття, змінюється при різній ширині його поверхні і похилів, характеристик поверхневого стоку, властивостей

покриттів, таких, як проникність шарів дорожньої конструкції, в тому числі і ґрунтових основ, а також рівня ґрунтових вод та деяких інших факторів.

В дорожньо-кліматичних зонах України, де промерзання може поширюватися на глибину понад 1 м, дренажну систему слід проектувати так , щоб виключити замерзання води у дренувальному шарі. Для цього необхідно, щоб час добігання води через дренувальний шар не перевищував допустимої межі. Особливо важливо виключити замерзання води у перехідні періоди та при відлигах з позитивними температурами повітря вдень і від'ємними вночі у співвідношенні з випаданням опадів або таненням снігу та льоду. При повільному водовідведенні циклічні коливання температури можуть привести до утворення великої кількості лінз льоду. Промерзання ґрунту земляного полотна з утворенням льодяних лінз є однією з причин зниження його міцності при відтаванні. Зниження міцності ґрунтової основи дорожньої конструкції обумовлено не тільки перезволоженням, але також розрихлюванням ґрунту, зменшенням щільності та можливою зміною його структури. Міцність ґрунтів, які утримують велику кількість лінз льоду, суттєво знижується при відлигах.

Розрахунок швидкості руху води в дренувальних системах може бути виконаний за формулою Дарсі, яка має вигляд:

$$V_S = \frac{K_ф i}{p} = \frac{V_ф}{p}, \qquad (1.32)$$

де p – активна пористість ґрунту;

$V_ф$ – швидкість фільтрації, м/добу.

Час проходження води через шар дренувального матеріалу визначається за формулою:

$$t_{дш} = \frac{L_i}{V_ф} \quad , \qquad (1.33)$$

де L_i – відстань, яку проходить вода, м.

Згідно досліджень результатів спостережень, наведених у роботі [82], для автомобільних доріг, які знаходяться в районах з холодним кліматом, максимальний час добігання води не повинен перевищувати 0,5 години, в усіх інших районах – не більше однієї години, що повинно слугувати критерієм, який гарантує попередження затримки води в конструктивних шарах протягом довгого періоду. Для влаштування дренувальних шарів такої високої проникності потрібен однорозмірний дрібний щебінь невеликої фракції 5–10 мм з вузьким діапазоном. Необхідна проникність може бути визначена розрахунком за величиною фільтрації згідно закону Дарсі. Дренувальні шари піску, які широко застосовуються для будівництва дорожньої основи, не забезпечують швидке відведення води з-під дорожніх покриттів до початку замерзання при різкому похолоданні. В районах з холодним кліматом часто виникають важкі пошкодження покриттів, які побудовані на малопроникних неморозостійких основах. Спроба вирішення цієї проблеми призвела до необхідності застосовувати не чуттєві до промерзання матеріали. І в цьому випадку, щоб уникнути утворення лінз льоду в конструктивних шарах покриття, воду з дренувального шару необхідно відводити до заморозків.

Для встановлення часу, впродовж якого вільна вода знаходиться в конструктивних шарах після кожного “насиченого” випадання атмосферних опадів, необхідно знати час відведення води з дренувального шару, який можна визначити розрахунком за формулою Дарсі для декількох рівнів зниження насиченого водою дренувального шару. Для розрахунку інтенсивності зниження насичення в дренувальних шарах автомобільних доріг, які мають повздовжній ДМЗ, в роботі [82] пропонується наступна формула:

$$t = \frac{p b_{осн}^2}{2880 K_ф H_0}, \qquad (1.34)$$

де $b_{осн}$ – ширина основи укосу, м;

$K_ф$ – коефіцієнт фільтрації;

H_0 – п’єзометричний похил основи, $H_0 = H + i_n b_{осн}$;

H та i_n – відповідно товщина і поперечний похил основи.

Відповідно до роботи [84], де проводилися дослідження роботи дренажних систем, осушення дренувального шару аеродромного покриття реалізується протягом двох фаз: фази формування депресійної кривої в межах всієї о довжини дренуючого шару L і п'єзометричних напорів $h_H = const$ та $H_0 = const$» за час T_1 та фази остаточного вичерпання дренажної води в дренувальному шарі T_2 (рис. 1.7).

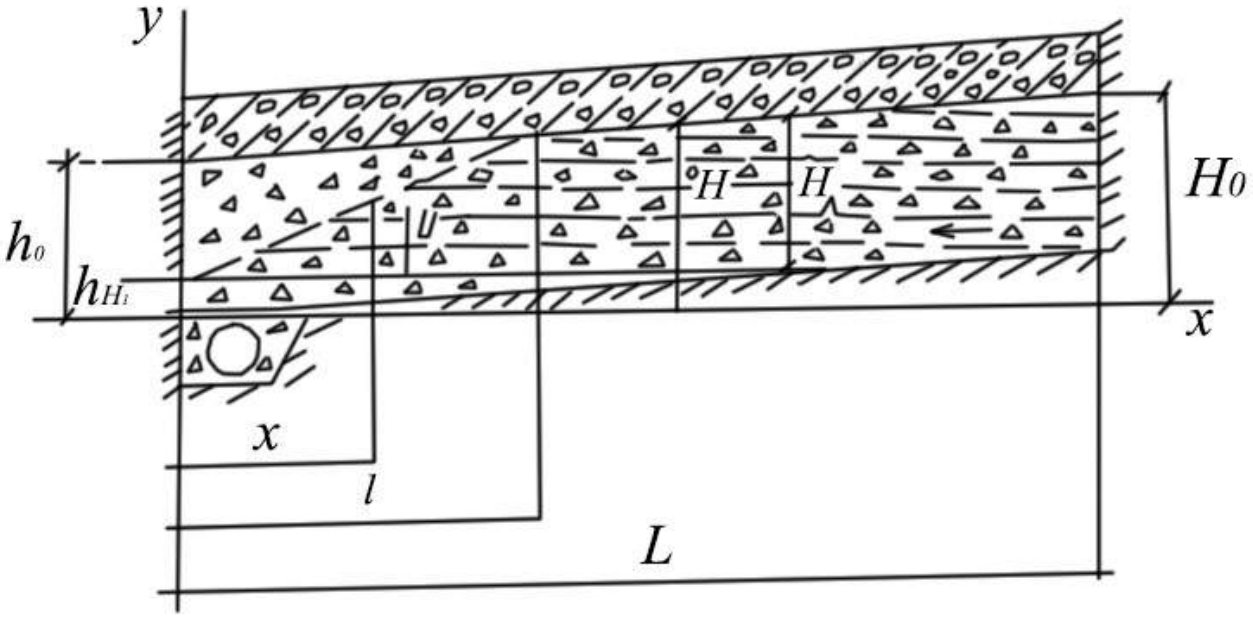


Рисунок 1.7 – Розрахункова схема області фільтрації дренувального шару: $H_Д$ – потужність дренувального шару; h_0 та H_0 – висоти п'єзометричних напорів на початку і в кінці дренувального шару в момент t=0; $h_н$ та H – висоти п'єзометричних напорів дренажних вод на початку лінії депресії і в її кінці в момент часу t; L – довжина депресії в момент часу t; x, y – абсциса і ордината розрахункового перетину області фільтрації.

У результаті розв’язання диференціального рівняння неусталеної фільтрації

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[y\left(\frac{\partial y}{\partial x} + i \right) \right] = \frac{\mu}{K_\phi} \frac{\partial h}{\partial t} \tag{1.35}$$

та доведення ідентичності рівнянь кривої депресії для підземної галереї і дренувального шару аеродромного покриття були отримані розрахункові формули для визначення параметрів дренування води, що міститься в дренувальному шарі, згідно [84]:

Тривалість першої фази осушення дренувального шару

$$T_1 = \frac{\mu L_\phi}{3K_\phi H_0 \left(1+\delta_0\right)^2} \left[1 + 2\delta_0 + \frac{\varepsilon\left(0,7 + 3\delta_0 + 3\delta_0^2\right)}{\left(1+\delta_0\right)^2} + \frac{\varepsilon^2\left(0,5 + 3,5\delta_0 + 7\delta_0^2 + 7\delta_0^3\right)}{\left(1+\delta_0\right)^4} \right]; \tag{1.36}$$

Тривалість другої фази фільтрації дренажних вод

$$T_2 = \frac{4\mu {L_\phi}^2}{3K_\phi H_0} \left\{ \frac{1}{p}\left(1 + \frac{\delta_0^3}{2p^3} \right) - \left(1 + \frac{\delta_0^3}{2} \right) + \frac{\varepsilon}{3}\left[\frac{1}{p^2}\left(1 - \frac{\delta_0^2}{2p^2} \right) - \left(1 + \frac{\delta_0^2}{2} \right) \right] + \frac{\varepsilon}{5}\left(\frac{1}{p^3} - 1 \right) \right\}, \tag{1.37}$$

де L_ϕ – довжина шляху фільтрації, м;

μ – коефіцієнт водовіддачі;

p – міра осушення дренувального шару, в долях одиниці;

$\delta_0 = \frac{h_0}{H_0}$; $\varepsilon = i\frac{L}{H_0}$;

i – результуючий похил.

Виконані розрахунки за формулами (1.36 – 1.37), згідно [84], дозволяють зробити висновок, що суттєвого зниження часу осушення дренуючого шару аеродромного покриття можна досягнути завдяки використанню матеріалів, які мають великі значення коефіцієнта фільтрації. Використання піщаних ґрунтів і піщано-гравійних сумішей призводить до передчасного руйнування аеродромних покриттів внаслідок їхньої тривалої експлуатації у перезволоженому стані. Очевидно також, що від конструкції аеродромних покриттів (потужності

дренувального шару, похилу дна корита, довжини схилу корита) залежить тривалість осушення покриттів. З підвищенням потужності дренувального шару і похилу його підошви, а також зі зменшенням довжини шляху фільтрації, час осушення аеродромного покриття буде знижуватися.

У роботах І.В. Ципріановича вважається, що прорізі менш ефективно осушують дренувальний шар, ніж поздовжні дрени, так як мають значно більший приплив води. Але площа, що підлягає осушенню поперечними ДМЗ, в кілька разів перевищує площу осушення поздовжніх ДМЗ. Також до переваг прорізей відноситься те, що вони наскрізні і тому додатково забезпечують повітряне осушення. Чим південніше райони будівництва, тим ефективніше застосування наскрізних прорізей на сирих і мокрих ділянках. Крім того, прорізі починають працювати вже при відтаванні по осі дороги дренувального шару.

У роботі [52] отримано залежність для визначення часу насичення дренувального шару $T_{нас}$. Тривалість насичення дренувального шару $T_{нас}$ в умовах І дорожньо-кліматичної зони України становить 2-3 доби і може збільшуватися до 5 діб. Але чим більш тривалий період насичення буде прийнятий при розрахунках, тим більша ймовірність розм'якшення ґрунту земляного полотна, а також зниження міцності піску дренувального шару.

Тривалість насичення дренувального шару при розрахунку за сталим режимом становить:

$$T_{нас} = \frac{nh_{\max}}{4q_h} \left(\ln \frac{1+(\frac{h}{h_{\max}})}{1-(\frac{h}{h_{\max}})} \right)_{h=0,95h_{\max}} . \qquad (1.38)$$

та за змінним:

$$T_{нас} = \frac{nh_{\max}}{4q_h} \left(\ln \frac{1+(\frac{h}{h'_{\max}})}{1-(\frac{h}{h'_{\max}})} \right)_{h=0,95h_{\max}} . \qquad (1.39)$$

де $h_{\max}$ – максимальна глибина фільтраційного потоку при сталому режимі, м;

$h'_{\max}$ – максимальна глибина фільтраційного потоку при змінному режимі, м;

h – глибина фільтраційного потоку, м;

n – пористість матеріалу дренувального шару в частках одиниці;

q_h –питомий надлишок води, який відповідає максимальній глибині $h_{\max}$ фільтраційного потоку в перерізі кількості витікання води в дні «пік».

Аналіз рівнянь (1.38 та 1.39) показує, що час T_1 при асимптотичному наближенні глибини h до $h_{\max}$ прямує до нескінченності. Отже, сталий режим руху води повинен спостерігатися через нескінченно великий проміжок часу. Але оскільки h/h_{max} пов'язано з часом T_1 через експоненціальні функції, то асимптотичне наближення глибини h до $h_{\max}$ практично можна вважати, що настає уже при h = 0,95 $h_{\max}$, що було прийнято у роботі [52]. Збільшення ж глибини h від 0,95 $h_{\max}$ до $h_{\max}$ не має практичного значення при розрахунку відстані між прорізями.

Для визначення відстані між дренажними прорізями, у роботі [52] витрата води визначалася згідно з конфігурацією кривої депресії.

Згідно спрощеної розрахункової схеми (рис. 1.8) при i=0, запропонованої у роботі [52], витрату води можна визначити за рівнянням:

$$Q = K_\phi z \frac{dz}{dx} \text{ або } Qdx = K_\phi z dz \qquad (1.40)$$

де K_ϕ – коефіцієнт фільтрації, м/добу;

z – глибина фільтраційного потоку вільної води, м;

x – відстань у фільтраційному потоці, м;

h – глибина шару вільної води безпосередньо у прорізі, м.

Приймемо $2Qx = K_\phi z^2 + C$, але при x=0, z=h,

$$C = -K_ф h^2 . \tag{1.41}$$

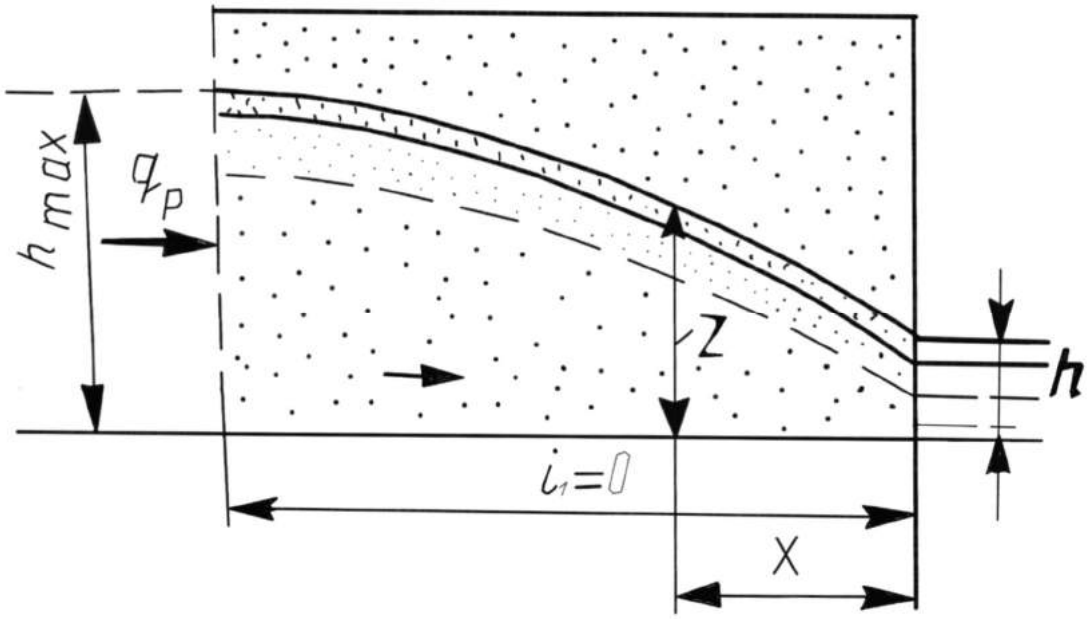


Рисунок 1.8 – Схема руху фільтраційного потоку на ділянках з горизонтальним дном (i=0) [52]

На основі формул (1.40) та (1.41) було отримано:

$$Q = \frac{K_ф (z^2 - h^2)}{2x} \tag{1.42}$$

У роботі [52] вводиться припущення, що біля трубчастих випусків поперечних прорізів значення h дуже мале в порівнянні з z і тому, при поздовжньому похилі $i_1=0$, витрата визначається за спрощеною формулою:

$$Q = \frac{K_ф z^2}{2x} \tag{1.43}$$

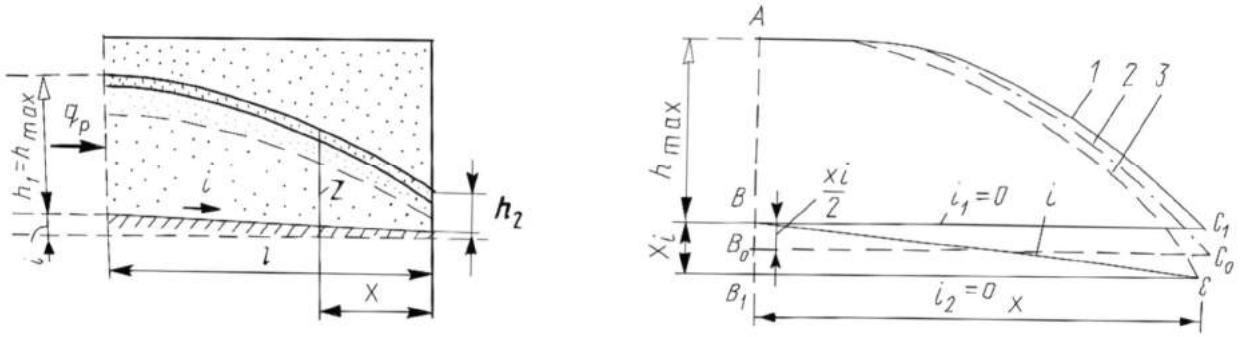
Але для таких умов значення Q за рівнянням (1.43) будуть заниженими. При наявності поздовжнього похилу витрата фільтраційного потоку у дренувальному шарі підвищується при збільшенні гідравлічного градієнту dz/dx (рис. 1.9). З метою уточнення величини Q, фільтраційний потік розглянуто при поздовжньому похилі $i_1 = 0$, але при початковій глибині насичення не h_{max}, а $h_{max} + i_1 l$, при цьому вважається, що гідравлічний градієнт dz/dx практично не зміниться. Значення витрати води Q приймається як середнє (рис. 1.9, б) при:

$$h_{\max ср} = h \pm \frac{i_1 l}{2}. \tag{1.44}$$

При $x=l$ рівняння (1.43) прийняло вид:

$$Q = \frac{K_ф (h_{\max} + \delta)^2}{2l} \tag{1.45}$$

де $h_{\max}$ – максимальна глибина фільтраційного потоку в перерізі «горба» дренувального шару; $\delta = \frac{i_1 l}{2}$.



а) *б)*

Рисунок 1.9 – Схема руху фільтраційного потоку на ділянках з поздовжнім похилом i_1: *1* – напір h_{max}; *2* – напір $h_{max} + xi_1$; *3* – напір $h_{max} + xi_1/2$: *а* –

розрахункова схема ділянки з похилом; *б* – розрахункова схема ділянки з припущенням $h=0$, при $i=0$.

Допускаючи при розрахунках рівномірний надлишок води за площею дренувального шару, вода з ділянки довжиною l_1 надходить в нижню прорізь, а з ділянки довжиною l_2 – в верхню. З підвищенням поздовжнього похилу ділянки дороги i_1 довжина ділянки l_1 буде збільшуватися за рахунок зменшення довжини ділянки l_2. Загальна витрата Q на ділянці $l= l_1+ l_2$:

$$Q = Q_1 + Q_2 , \tag{1.46}$$

де Q_1 – витрата води на зливній частині ділянки довжиною l_1;

Q_2 – витрата води на підпірній частині ділянки довжиною l_2.

У роботі [52] розглянуто роботу фільтраційного потоку при сталому режимі. Прийнято приплив води в дренувальний шар рівним її витраті при максимальній глибині h_{max} фільтраційного потоку, нехтуючии впливом величини діаметра дрени, згідно з розрахунковою схемою (рис. 1.9, б) і рівнянням (1.45) отримано рівняння для витрати води Q_1 на зливній частині ділянки довжиною l_1 (розраховуючи на 1 м ширини корита)

$$Q_1 = \frac{K_\phi (h_{\max} + \frac{i_1 l_1}{2})^2}{2l_1}. \tag{1.47}$$

Аналогічне рівняння прийнято і для підпірної частини ділянки довжиною l_2

$$Q_2 = \frac{K_\phi (h_{\max} - \frac{i_1 l_2}{2})^2}{2l_2}, \tag{1.48}$$

$$\text{де } Q_1 = q_p l_1 \text{ та } Q_2 = q_p l_2, \tag{1.49}$$

де q_p – розрахунковий питомий надлишок води.

У наведеному спрощеному методі [52] враховуються основні фактори, що впливають на величину витрати води Q та дозволяють визначити відстань між дренажними прорізями при сталому русі:

$$l = l_1 + l_2 = h_{\max}\left(\frac{1}{\gamma + \frac{i_1}{2}} + \frac{1}{\gamma - \frac{i_1}{2}}\right) = \frac{2h_{\max}\gamma}{\gamma^2 - \left(\frac{i_1}{2}\right)^2}, \qquad (1.50)$$

де $\gamma = \sqrt{\frac{2q_p}{K_\phi}}$

При $\gamma = \frac{i_1}{2}$ коефіцієнт μ обернеться в безкінечність, $l_2 = 0$, крива спаду не буде мати розділу фільтраційного потоку в точці A.

З рівняння (1.50) видно, що існує пряма залежність між l та h_{max}, так як $l = \alpha h_{\max}$ де

$$\alpha = \frac{2\gamma}{\gamma^2 - \left(\frac{i_1}{2}\right)^2} \qquad (1.51)$$

Для визначення відстані між прорізями при змінному режимі отримано рівняння:

$$l^{\beta/h'_{\max}} = \frac{1 + \left(\frac{h_{\max}}{h'_{\max}}\right)}{1 - \left(\frac{h_{\max}}{h'_{\max}}\right)}, \qquad (1.52)$$

де l – розрахункова відстань між поперечними прорізями мілкого закладання;

β – коефіцієнт, який пов'язаний з $T_{нас}$ та q_h.і визначається як $\beta = Mh_o = \frac{4T_{нас}q_h}{p}$

Звідки

$$\frac{h_{\max}}{h'_{\max}} = \frac{l^{\beta/h'_{\max}} - 1}{l^{\beta/h'_{\max}} + 1} \text{ та } h_{\max} = h'_{\max} \frac{l^{\beta/h'_{\max}} - 1}{l^{\beta/h'_{\max}} + 1} \quad (1.53)$$

На основі рішень (1.53) у роботі запропоновано визначити максимальну глибину $h_{\max}$ фільтраційного потоку, відповідну змінному режиму при різних значеннях $h'_{\max}$ з умови сталого режиму, з метою підвищення розрахункової відстані l між прорізями.

Тривалість осушення дренувального шару при сталому режимі фільтрації, згідно [52], становитиме:

$$T_{oc} = \frac{p\alpha h_{\max}}{2q_1} arctg \frac{h}{\alpha h_{\max}} \quad (1.54)$$

і у випадку змінного режиму:

$$T_{oc} = \frac{p\alpha h'_{\max}}{2q_1} arctg \frac{h}{\alpha h'_{\max}} \quad (1.55)$$

де $\alpha = \sqrt{\frac{q_1}{q_н}}$; q_1 – приведений приток води, який надходить до дренувального шару.

Щоб ґрунт ЗП менше часу перебував в перезволоженому стані, необхідно тривалість осушення T_{oc} зменшувати до можливого мінімуму за рахунок більш ефективної роботи дренувальних шарів. Весною, коли випадає багато опадів, міцність дорожнього одягу знижується та за рахунок інтенсивного руху великовагового транспорту, протягом дуже короткого часу, відповідно, можуть спостерігатися деформації і навіть руйнування. Щоб знизити тривалість осушення $T\,oc$, треба зменшити відстань між дренажними прорізями.

1.5 Аналіз натурних та експериментальних досліджень водно-теплового режиму земляного полотна

Польові спостереження за ВТР ЗП в районах надмірного зволоження проводилися СоюздорНДІ, його філіями, а також МАДІ, ЛАДІ до 90-х років минулого століття [56]. Для дослідження процесів переміщення і накопичення вологи в земляному полотні та явищ здимання [52] під керівництвом Н.В. Орнатського та О.Я. Тулаєва були організовані, стаціонарні спостереження на здимальних станціях (Карельської, Ленінградської, Каширської, Горьківської, Київської та Далекосхідної) перед початком промерзання, в кінці зими та 2-3 рази в період відтавання. При кожному спостереженні відбиралися зразки для визначення вологості та інших властивостей ґрунтів. Одночасно фіксувалися положення межі промерзання-відтавання та глибина залягання ґрунтових вод.

Спостереження дозволили уточнити розподіл місцевості на типи за характером зволоження і встановити їх зовнішні ознаки. Характер розподілу залежав від джерела зволоження, а величина вологості – погодних умов. Спостереження підтвердили наявність значного зимового вологонакопичення та великого розущільнення при недостатньому ступені ущільнення земляного полотна.

Спостереження на майданчиках та лабораторні дослідження, проведені в СоюздорНДІ [57], показали, що величина вбирання вологи ґрунтом залежить від цілого ряду факторів: від початкової вологості ґрунтів, сумарної кількості опадів і тривалості їх випадання, дефіциту вологості повітря та ін. Найменший приплив вологи спостерігався восени, коли осінні опади значно перевищували середню багаторічну норму і початкова вологість ґрунту була найвищою. В таких умовах процес вбирання вологи супроводжувався процесом її фільтрації в більш глибокі шари за межі активної зони ДК. Тривалі спостереження ХАДІ дозволили встановити закономірності водно-теплового режиму доріг в степових і лісостепових районах [58, 59, 85–87].

Лабораторні дослідження на моделях, що відповідають натурним умовам, також представлені в роботі [56]. Було влаштовано корито на половині ширини дороги розміром $B/2 = 3{,}5$ та $L = 3{,}5$ м з поперечним похилом $i = 30‰$ та поздовжнім $i = 5‰$. Глибина корита по осі дороги становила $h = 0{,}25$ м. Випробування проводилося з пісками різної крупності з травня по жовтень. Заміри глибин фільтраційного потоку та відповідної кількості води, що профільтрувалась, знімалися через 1 год (рис. 1.10).

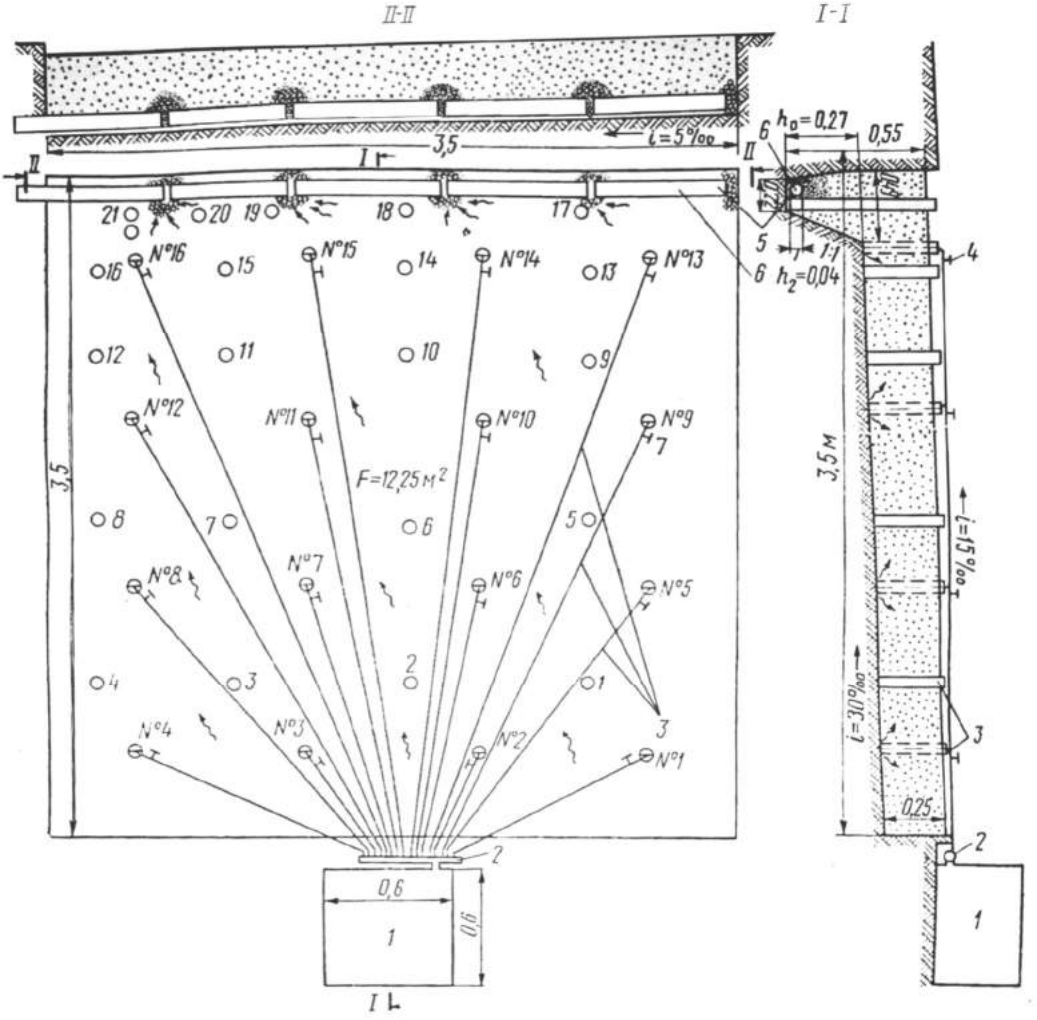


Рисунок 1.10 – Схема моделі для визначення пропускної здатності дренувального шару: *1* – бак з водою; *2* – патрубок для подачі води; *3* – гумові трубки для подачі води; *4* – зажими; *5* – щебінь фр. 5–10 мм.; *6* – азбоцементна труба

Рух фільтраційних потоків був представлений у вигляді гідроізогіпси для кожного ступеня подачі [56]. Повний процес фільтрації води в дренувальному шарі

послідовно проходив сім стадій: перша – характеризувалася насиченням піску водою, коли дренувальний шар не працює; друга – відповідала фільтрації в ньому води тільки в капілярному вигляді, за відсутності в п'єзометрах вільної води; третя – була пов'язана з появою в п'єзометрах вільної води, що вказує на фільтрацію її у вільному вигляді; четверта – була обумовлена фільтрацією лише вільної води з глибиною фільтраційного потоку, яка досягає максимуму, що супроводжується найбільшою пропускною спроможністю дренувального шару.

У Ленінградській філії СоюздорНДІ були проведені експерименти на малих моделях, де досліди відбувалися на гідравлічному лотку (довжина шляху фільтрації 68 см), в якому одна бокова стінка була зроблена прозорою. Вода в фільтраційному потоці була підфарбована (рис. 1.11). Цими дослідами було встановлено взаємозв'язок руху води в капілярній зоні з потоком вільної води. Для кількісної оцінки витрат води в зоні повного насичення та в капілярній зоні для пісків різної крупності було проведено серію дослідів на малому лабораторному лотку розміром 20х30 см також із прозорою стінкою.

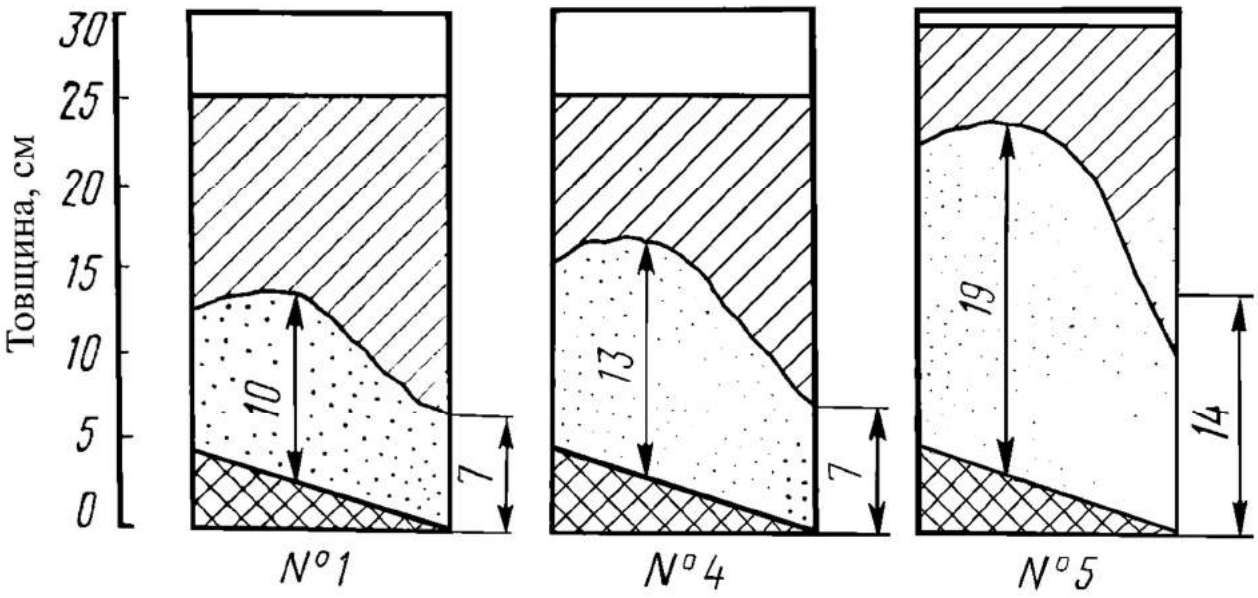


Рисунок 1.11 – Схема руху води в капілярній зоні піску: №1 – крупнозернистий пісок; №4 – середньозернистий пісок; №5 – дрібнозернистий пісок

Щоб врахувати вплив на фільтраційний процес не тільки крупності піску, але і ступеня його одномірності, крім дослідів з природними пісками різного гранулометричного складу, також проводилися випробування з відсіяними фракціями. В результаті проведення експериментів, встановлено, що висота капілярної зони, де рухається вода, у різних за крупності пісків є неоднаковою.

Також були проведені експерименти в спеціальних триколінних трубках загальною довжиною до 8,5 м. Складові трубки діаметром 40 – 60 мм і довжиною кожна по 370 мм завантажували дрібнозернистим піском з оптимальною вологістю, забезпечуючи при цьому задану об'ємну вагу. На початку дослідження трубки монтувалися у вигляді трьох колін. Одне коліно заввишки $H_2 \le 0,5h_k$ піднімалося догори, а друге довжиною $H_1 = h_k$ опускалося донизу. У верхнє коліно наливалася вода і потім підтримувався постійний її рівень (рис.1.12).

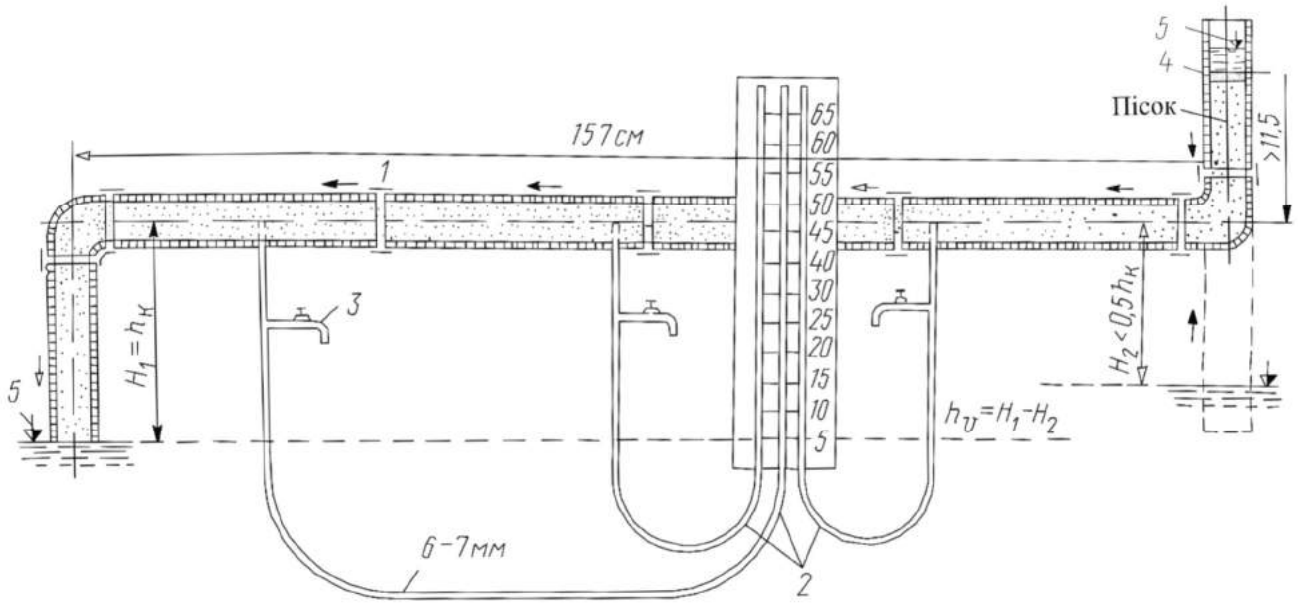


Рисунок 1.12 – Розріз прибору для спостерігання за фільтрацією води в капілярній зоні: *1* – відкриті стики; *2* – п’єзометри; *3* – зажим; *4* – металева сітка; *5* – рівень води

Під впливом напору, рівного $H_1 + H_2$, вода у вільному стані фільтрувалася в трубці і заміряласяїї кількість Q_n, яка витекла з коліна, опущеного донизу. Знаючи довжину трубки, тиск та витрату Q_n, обчислювалося значення коефіцієнта фільтрації піску $K_ф$.

На основі аналізу результатів представлених лабораторних досліджень зроблені наступні висновки: коефіцієнт фільтрації пісків в капілярній зоні залежить перш за все від їх крупності і вологості; з підвищенням щільності пісків знижується і коефіцієнт їх фільтрації в капілярній зоні, але в значно меншому ступені, ніж в зоні фільтрації гравітаційної води; зі збільшенням шляху фільтрації L при одному і тому ж вакуум-напорі h_v зменшується і значення $K_ф$.

В роботі [88], було проведено експериментальні дослідження з отримання достовірної кількісної оцінки руху дренувальних вод з урахуванням різних факторів, що мають на нього вплив. Для цього був виготовлений фільтраційний лоток, який являв собою ємність, що заповнена пористою породою і має необхідні улаштування для завдання граничних умов та вимірювання напорів у встановлених окремих точках. Так, у процесі експерименту забезпечувалися умови завдання: необхідного повздовжнього похилу лотка (дна корита) та потрібної потужності дренувального шару. Експериментально було визначено функціональні залежності, що характеризують вплив похилу дна корита покриття, товщини дренувального шару покриття та коефіцієнту фільтрації матеріала-наповнювача дренувального шару на тривалість його осушення.

Польові дослідження в роботі [52] показали, що при наявності відповідної якості дренувального шару тривалість осушення дорожніх одягів і верхньої частини земляного полотна в залежності від природних умов місцевості становить здебільшого $T_{ос} > T_{нас} > 3$ доби.

На багатьох прикладах польових досліджень доводиться фактична невідповідність реального стану ґрунтів природної основи дорожніх одягів (робочий шар) теоретичним (проектним, табличним) вимогам до показників міцності і деформативності ґрунтів основи цього конструктивного елемента, що обумовлює швидку втрату рівності нежорстких і тріщини жорстких дорожніх одягів на таких ділянках доріг [54].

Проектування нових та реконструкція існуючих автомобільних доріг у нульових відмітках і невисоких насипах вимагає значної уваги і розуміння того, що в цьому разі для забезпечення надійної роботи дорожніх одягів, особливо

капітального типу, зазвичай необхідно закладати в проект або повну заміну ґрунту на глибину не меншу ніж товщина робочого шару, або потужне армування основи геосинтетичними матеріалами і збільшення висоти насипу саме з умов забезпечення динамічної стійкості дорожніх одягів [90].

Також необхідне усвідомлення, що вартість будівництва сучасних дорожніх одягів суттєво залежить не тільки від вартості матеріалів дорожнього одягу, але і від правильної оцінки стану ґрунтової основи, а вразі необхідності – її значного підсилення.

Висновки по розділу 1

1. Проведення оцінки техніко-функціонального стану окремих ділянок доріг, особливо тих, які побудовані за старими нормативами, обумовлено встановленням їх відповідності до вимог безпечного руху в процесі експлуатації, необхідністю обґрунтування методів та підходів щодо розробки проектних заходів з регулювання водно-теплового режиму дорожньої конструкції. Для оцінки якісного стану ділянок автомобільних доріг використовують групи змінних за часом показників, що характеризують транспортну роботу дороги, техніко-експлуатаційні властивості дорожнього одягу та земляного полотна, умови дорожнього руху. Надмірні напруження від великовагових транспортних засобів призводять до накопичення залишкових деформацій, яким передують тривалі внутрішні процеси, що знижують міцнісні властивості ґрунтів і сприяють утворенню послаблених зон в тілі земляного полотна та дефектів покриття і тягнуть за собою значні економічні збитки.

2. Проаналізовано і узагальнено результати попередніх досліджень щодо зміни водно-теплового режиму дорожньої конструкції протягом річного циклу. Встановлені етапи, виділені основні характеристики та визначені межі характерних періодів водно-теплового режиму. Найбільш широко розповсюдженими методами його регулювання є влаштування морозозахисних (теплоізоляційних) шарів; дренувальних шарів за двома схемами (акумуляції води в тілі шару та поперечного відведення води з дорожньої конструкції); дренажів мілкого закладання;

проектування протиінфільтраційних шарів. Встановлено закономірності розподілу вологи в дорожній конструкції та впливу вибраних методів на зміну водно-теплового режиму земляного полотна.

3. У більшості випадків при влаштуванні дренувальних шарів використовують піщані ґрунти, які є досить проникними, але мають невисоку дренувальну здатність, що обумовлює повільний процес водовідведення з дорожньої конструкції. Відведення води з таких дренувальних шарів також ускладнене через малий гідравлічний похил та незначну їх товщину. Проблема полягає в тому, що при проектуванні дренажних систем на перезволожених ділянках необхідно знати не тільки час, за який вода надходить в дорожню конструкцію, але і час, необхідний для її відведення з шарів основи дорожнього одягу після припинення притоку. Проведений аналіз дає можливість сформувати основні напрямки досліджень із забезпеченням оновленого підходу щодо методів регулювання водно-теплового режиму дорожньої конструкції з дренажами мілкого закладання.

4. На основі аналізу існуючих натурних та експериментальних досліджень щодо процесів міграції та накопичення вологи в земляному полотні визначено розподіл місцевості на типи за характером зволоження, встановлено їх зовнішні ознаки; визначено величину вбирання вологи ґрунтами, яка залежить від їх початкової вологості, сумарної кількості та тривалості випадання опадів, дефіциту вологості повітря. На багатьох прикладах натурних досліджень доводиться фактична невідповідність реального стану ґрунтів земляного полотна (робочого шару) теоретичним (проектним) вимогам, що обумовлює швидку втрату рівності та міцності нежорстких дорожніх одягів на перезволожених ділянках доріг. Це обумовлює необхідність проведення досліджень на повномасштабних експериментальних моделях з можливістю візуалізації. Таке завдання досить складне, оскільки ДМЗ є підземними спорудами і дослідити процеси формування фільтраційного потоку в дренажній траншеї на реальних об’єктах неможливо.

5. Результати досліджень першого розділу викладено у наступних публікаціях [11. 12, 23, 24, 75].

РОЗДІЛ 2
РОЗРОБКА МОДЕЛІ ЯКІСНОГО СТАНУ ПЕРЕЗВОЛОЖЕНИХ ДІЛЯНОК АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОПЕРЕЧНИХ ДРЕНАЖІВ МІЛКОГО ЗАКЛАДАННЯ

2.1 Теоретичні основи з визначення якісного стану автомобільної дороги

Забезпечення належного транспортно-експлуатаційного стану та оптимізація мережі автомобільних доріг є одним із найважливіших шляхів соціально-економічного розвитку України, який забезпечить підвищення економічної ефективності транспортних процесів перевезення вантажів та пасажирів, підвищення безпеки дорожнього руху, підвищення мобільності, економії коштів на паливо-мастильні матеріали та обслуговування транспортних засобів. Проведення інвентаризації, систематизація інформації про якісний стан автомобільної дороги та споруд на ній, відповідне оновлення баз даних дозволить підвищити ефективність організаційно-технологічних рішень щодо об’єктів дорожньо-транспортної інфраструктури [91, 92].

На сучасному етапі розвитку наукових досліджень у дорожній галузі існує ряд робіт, в яких запропоновані моделі оцінки якісного стану транспортних споруд. Переваги застосування фундаментальних принципів кваліметрії для інтерпретації якісних параметрів виробничого середовища доводяться багатьма дослідниками в різних галузях [93–95].

Метод визначення якісного стану об’єкта, який ґрунтується на кваліметричній моделі, пропонується в роботах [96, 97]. Однак труднощі з використанням запропонованого методу можуть бути пов’язані з його специфічними особливостями та багатопараметричністю. Принципово нові методичні підходи до визначення вагомостей характеристик та параметрів об’єктів оцінки наведені в [98, 99]. Проте, зазначені підходи можуть бути використані лише частково і тільки для побудови методології визначення вагомостей параметрів автомобільної дороги. В цих роботах пропонується розглядати та враховувати фізичний і функціональний знос у вигляді рівневого коефіцієнта якісного стану. Але, залишається відкритим

питання визначення рівня якісного стану кожного елементу та його впливу на загальний транспортно-експлуатаційний стан автомобільної дороги.

Обґрунтування вагомостей характеристик та параметрів об'єкта оцінки було запропоновано в роботі [95] як базове з вимірювання та оцінки якості в поєднанні з проблемою управління якістю та робіт у суспільному виробництві. Проте, цей підхід стосувався лише об'єктів цивільного та промислового будівництва.

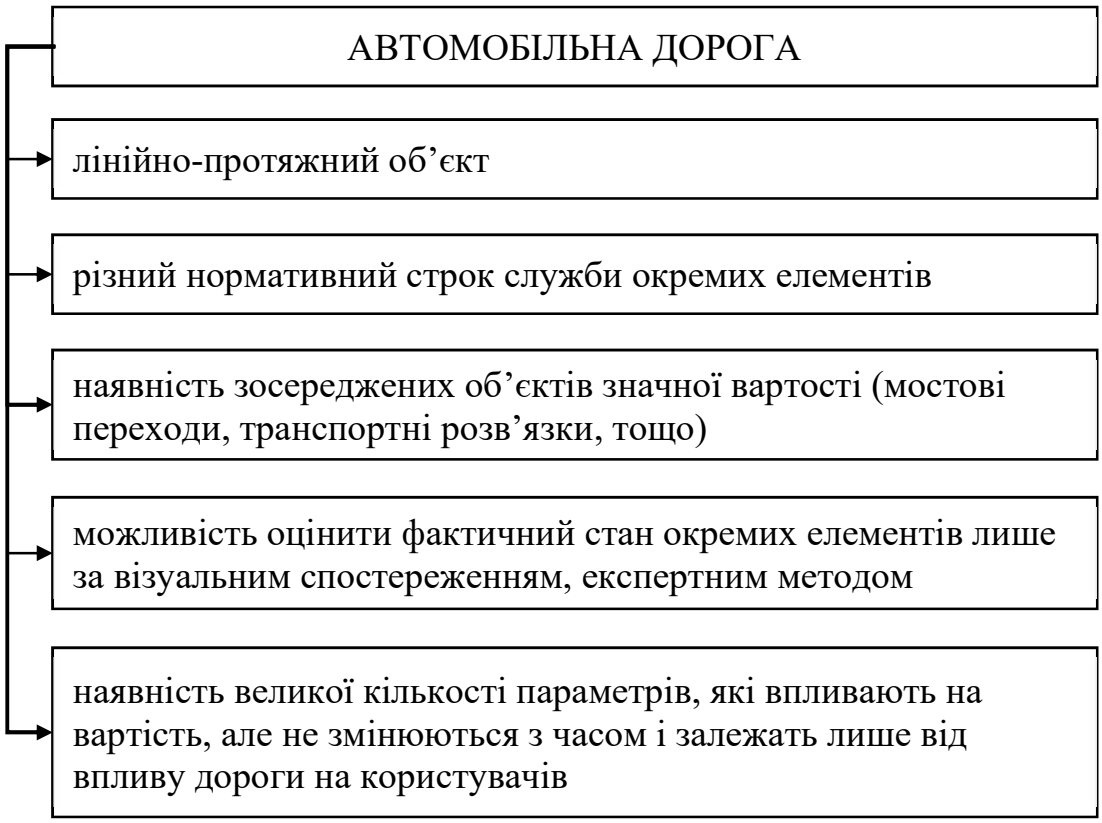
Сучасні дослідження базуються на оцінюванні рівня якості за безрозмірною шкалою [1], використовуючи інформаційно-процесну модель [100]. Такий підхід до оцінки рівня якісного стану докорінно відрізняється від традиційного, за умови, що властивості об'єкта дослідження не розглядаються окремо, а визначається один узагальнений показник, який характеризує сумісний вплив кожної властивості на об'єкт. Важливість математичної формалізації інформації про рівень якісного стану об'єктів дорожньо-транспортного комплексу підкреслюється в [74]. Проте більшість проаналізованих математичних моделей в наведених дослідженнях не дозволяють визначити вплив рівня якісного стану.

Це визначає перспективним напрямок розробки математичної моделі якісного стану перезволожених ділянок автомобільної дороги.

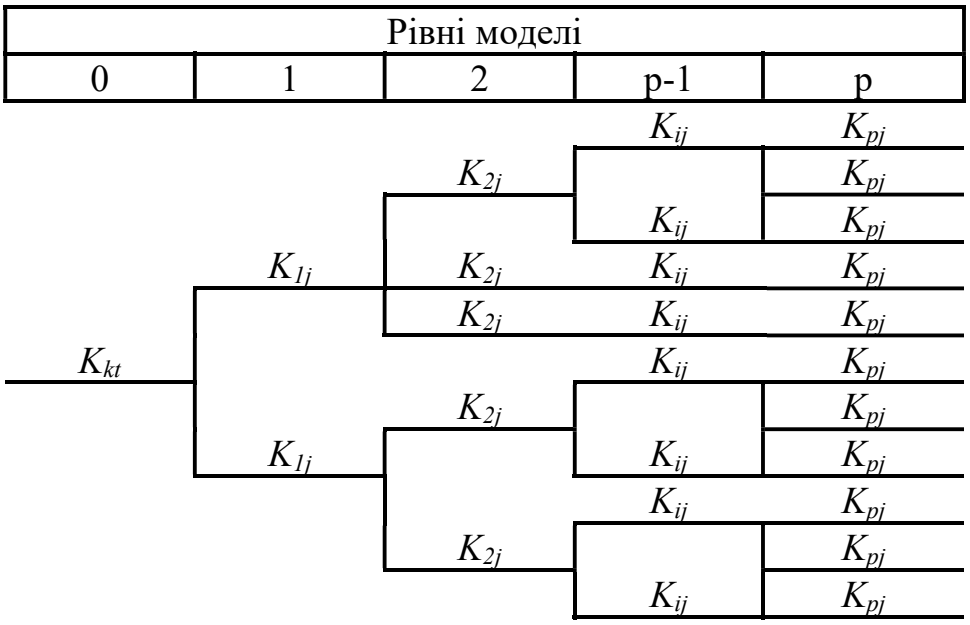
Автомобільна дорога – це складний комплекс інженерних споруд, метою функціонування якого є задоволення потреб кінцевих споживачів, де слід виділити наступні особливості, наведені на рис 2.1, а.

Якісний стан об'єкта залежить від властивостей, характеристик та параметрів. Спочатку необхідно визначити перелік (номенклатуру) цих якостей, сукупність яких є достатньою та в повній мірі характеризує об'єкт. На наступному етапі необхідно оцінити властивості кількісно і порівняти з властивостями аналогічних об'єктів або еталонними (нормативними) значеннями самих властивостей.

Стан автомобільної дороги можна представити у вигляді ієрархічної моделі сукупності властивостей (рис. 2.1, б) згідно [1, 95,100].



а)



б)

Рисунок 2.1 – Структурні схеми: *а*) – особливостей автомобільної дороги; *б*) – кваліметричної моделі якісного стану ділянки автомобільної дороги

Така модель – це штучна багаторівнева система показників, яка всебічно і обґрунтовано характеризує якісні ознаки автомобільної дороги. Комплексний показник (K_{kt}) знаходиться на нульовому рівні і включає суму всіх диференційних показників, які знаходяться на першому (високому) рівні та формуються з простих властивостей, що розташовані на найнижчому (p-му) рівні моделі. На кожному i-му рівні моделі формується j-сукупність диференційних показників (K_{ij})[101, 102].

Вибір кількості рівнів залежить від мети оцінки ділянки автомобільної дороги, її значення (державна або місцева) і категорії, наявності тих чи інших зосереджених об’єктів та ін. Зі зростанням числа рівнів кваліметричної моделі (p) збільшується інформація про якісні ознаки об'єкта, що складають його властивості, а, отже, призводить до збільшення числа вимірювань та обчислень. Тому, кваліметрична модель, за можливості, повинна мати мінімальну кількість рівнів, проте достатню для оцінки якості із заданою точністю і відповідно до поставленої мети.

При складанні моделей нові зв'язки необхідно вводити так, щоб вони краще відповідали на даному рівні вимогам з оцінювання і розкривали властивості попереднього рівня. Показники кожного, крім нульового рівня, повинні бути еквівалентними, тобто рівнозначно характеризувати об'єкт. Кожен рівень моделі повинен мати мінімальне, але достатнє число зв'язків, обумовлене повнотою опису властивостей.

В першу чергу, розділяють показники визначення стану ділянки автомобільної дороги на дві основні групи: фізичний знос та функціональні показники [103, 104]. Фізичний знос змінюються з часом і його можна охарактеризувати числовим значенням або певними нормативними показниками, що регламентують відповідність або невідповідність вимогам належного функціонування ділянки дороги. Функціональні показники з часом не змінюються, але їх відповідність залежить від споживачів транспортних послуг (рис. 2.2).

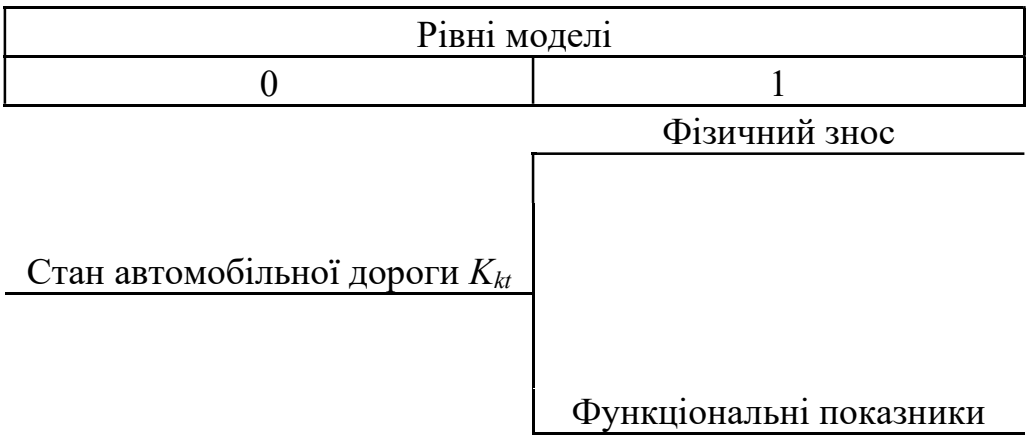


Рисунок 2.2 – Нульовий та перший рівні кваліметричної моделі ділянки автомобільної дороги

Далі пропонується розділити дві основні групи показників (фізичні та функціональні) на підгрупи.

До першої групи (функціональних показників) віднесемо характеристики дороги, які впливають на зручність та безпеку користувачів, швидкість перевезень, але не залежать від якості і довговічності матеріалів та інтенсивності впливу навантажень на дорожню конструкцію [91]. Такі показники, зазвичай, закладено уже на етапі проектування, що здебільшого пов’язано із прогресивним розвитком нормативно-технічної бази та відставанням у виконанні планових ремонтів.

До другої групи (фізичних показників) віднесемо підгрупи в залежності від складових конструктивних елементів автомобільної дороги відповідно до будівельних норм [74].

Рівень якісного стану є величиною залежною від сукупності показників вищої підгрупи з урахуванням їх вагомості, згідно з кваліметричною моделлю [94, 105–106]:

$$K_{kt} = \sum_{j=1}^{l} K_{1j} \cdot m'_{1j}, \tag{2.1}$$

m'_{1j} – коефіцієнт вагомості складних (комплексних) властивостей, що характеризують якісний стан на першому (вищому) рівні моделі;

l – кількість груп показників, $\{l \in N\}$.

Причому рівень якісного стану, згідно кваліметричної моделі [107 – 110], визначається як коефіцієнт за формулою (2.1) тоді:

$$K_{kt} = \sum_{j=1}^{l} \left(\sum_{i=1}^{n} P_i \cdot m_i \right) m'_j, \tag{2.2}$$

де K_{kt} – диференційний відносний показник властивості з коефіцієнтом m'_j;

P_i – одиничний диференційний показник якісного стану автомобільної дороги;

m_i – коефіцієнт вагомості простих властивостей, що характеризують якісний стан об'єкта оцінки;

m'_j – коефіцієнт вагомості складних (комплексних) властивостей, що характеризують якісний стан об'єкта оцінки;

n – кількість показників розглянутого елемента дороги, $\{n \in N\}$;

Оберненим показником коефіцієнту (K_{kt}), який є показником рівня якісного стану, буде коефіцієнт зносу:

$$K_{kt} = 1 - K_D, \tag{2.3}$$

де K_D – коефіцієнт зносу елементу активу (фізичного та/або функціонального), $K_D \in [0;1,0] \ \{K_D \in Q\}$;

Q – множина раціональних чисел.

На кожному рівні будь-яку властивість об’єкта оцінки кількісно оцінюють одиничним (диференційованим) показником якісного стану елементу згідно номенклатури за формулою:

$$P_{pj} = \frac{P_{pj}^{a}}{P_{pj}^{b}} \text{ або } P_{pj} = \frac{P_{pj}^{b}}{P_{pj}^{a}}, \tag{2.4}$$

де P_{pj}^{a} – значення j-го абсолютного показника якісного стану на найнижчому рівні моделі (p);

P_{pj}^{b} – значення j-го базового (еталонного) показника якісного стану на найнижчому рівні моделі (p).

Якісна ознака визначає стан окремих споруд і конструктивних елементів дороги (земляне полотно, дорожній одяг, штучні споруди, тощо). Збільшення одиничного показника відповідає покращенню загального якісного стану об’єкта оцінки, тобто є безрозмірною величиною, яка визначає рівень якісного стану, де найкращий дорівнює 1 або 100 при представленні у відсотках. Для встановлення абсолютних показників якісного стану автомобільної дороги застосовують як правило три методи: експериментальний, розрахунковий і експертний [1, 12].

Експериментальний метод визначення показників – основний. Він забезпечує найбільш надійні результати оцінки. Достовірність експериментального методу залежить від якості засобів вимірювань і кількості вимірювань. Для засобів вимірювань, що пройшли повірку, достовірність показника залежить від числа вимірювань. Розрахунковий метод ґрунтується на експериментальному визначенні показника якісної властивості та визначення по ній показника якісного стану об’єкта оцінки. Експертний метод заснований на аналізі думок висококваліфікованих фахівців-експертів [111].

Процес визначення показника K_{ij} в моделі ускладнюється тим, що потрібно чітко визначити вагомість кожного показника в ієрархічній системі [1].

Визначити значення коефіцієнтів вагомості можна наступними методами: вартісним, експертним, статистичним та комбінованим [105]. Використання перших двох передбачає визначення взаємозв'язку між одиничними показниками із залученням експертів. Проте, основним недоліком цієї групи методів є суб'єктивний підхід. Суть вартісного методу полягає у спрощеному підході до визначення показників вагомості, тобто за зведеним кошторисним розрахунком вартості будівництва ділянки автомобільної дороги у відповідності до сучасних цін. Але слід зауважити, що вартість – це непостійна величина, яка залежить від багатьох факторів, тому при незначних її коливаннях може значно знижуватися достовірність отриманих значень вагомостей [112 – 116].

Вартісний метод ґрунтується на припущенні, що якість пропорційна вартості, а вагомість ідентична витратам:

$$m_{ij} = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^{l'} C_j}, \tag{2.5}$$

де m_{ij} – коефіцієнт вагомості j-тої властивості на i-му рівні;

C_j – кошторисна вартість j-тої властивості (автомобільної дороги, складової або конструктивного елементу ділянки автомобільної дороги);

$\sum_{j=1}^{l'} C_j$ – повна кошторисна вартість ділянки автомобільної дороги, складової або елементу;

l' – кількість показників (властивостей) розглянутої ділянки автомобільної дороги, складової або елементу на i-му рівні моделі.

Перевагою вартісного методу є спрощений підхід до визначення показників вагомості. Але є параметри автомобільної дороги, характеристики яких практично не можливо оцінити вартісним методом. Для таких характеристик необхідно застосовувати експертний або інші методи.

Експертний метод визначення коефіцієнтів вагомості заснований на аналізі думок фахівців, які оцінюють властивість елементів об’єкта оцінки. По відношенню середньої оцінки експертів до загальної суми середніх оцінок визначають групові коефіцієнти вагомості по кожній властивості об'єкта. Коефіцієнт вагомості *i*-ї властивості даної групи визначається за формулою:

$$m_i' = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} N_{ij}}{\frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k}\sum_{i=1}^{n} N_{ij}}, \tag{2.6}$$

де N_{ij} – *i*-а властивість у балах, що оцінюється *j*-м експертом;

k – кількість властивостей у групі;

n – кількість експертів.

Після аналогічного визначення коефіцієнтів вагомості показника по кожній групі розраховуються рівневі коефіцієнти вагомості кожної властивості.

Визначення коефіцієнтів вагомості деяких характеристик автомобільної дороги можна здійснити двома способами: визначити середньоарифметичну величину або використати математичне зважування. Найкращим є спосіб суб’єктивного зважування кінцевих результатів – визначення коефіцієнтів вагомості за формулою:

$$m_{ij} = \sum_{j=1}^{q} m_j z_j , \tag{2.7}$$

де m_{ij} – коефіцієнт вагомості простих властивостей, що характеризують стан, визначений *j*-тим методом;

j – номер застосованого методу, $\{j \in N\}$;

q – кількість застосованих методів;

z_j – питомий коефіцієнт *j*-того методу.

За відсутності даних про деякі показники, коефіцієнти вагомості решти розрахованих показників збільшують наступним чином:

$$m_{ijн} = m_{ij} + \frac{\sum_{i=1}^{n} m'_{ij}}{n-q}, \tag{2.8}$$

де $m_{ijн}$ – нове значення коефіцієнта вагомості;

q – число відсутніх факторів з коефіцієнтами вагомості m'_{ij}.

З урахуванням основних принципів кваліметрії [1], побудовано загальну кваліметричну модель стану автомобільної дороги (рис. 2.3).

Рівні моделі			
0	**1**	**2**	
K_{kt}	Функціональний знос	Інтенсивність руху	Експертний метод
		Параметри елементів плану і поздовжнього профілю	
		Параметри поперечного профілю автомобільної дороги	
	Фізичний знос	Показники ділянки автомобільної дороги з безпеки дорожнього руху	
		Оцінка впливу на навколишнє середовище	
		Земляне полотно	Вартісний метод
		Споруди дорожнього водовідведення	
		Дорожній одяг	
		Узбіччя	
		Транспортні споруди	
		Дорожні інженерні облаштування	
		Споруди дорожньої служби	
		Об'єкти дорожнього сервісу	
		Засоби організації дорожнього руху	

Рисунок 2.3 – Рівні від 0 до 2 загальної кваліметричної моделі стану автомобільної дороги

Побудуємо 3-й та 4-й рівні для показника «функціональний знос» кваліметричної моделі стану автомобільної дороги (рис. 2.4, а).

Розглянемо показники функціонального зносу третього рівня (рис. 2.4, а). Інтенсивність руху, оцінка впливу на навколишнє середовище та показники ділянки автомобільної дороги з безпеки дорожнього руху залежать від певної сукупності факторів. До них належать: соціально-економічний розвиток регіону, стан ділянки дороги, час експлуатації ділянки дороги після останнього поточного (капітального) ремонту, сезонність завантаження дороги та ін.

У залежності від перспективної інтенсивності руху призначається технічна категорія автомобільної дороги, при невідповідності фактичної інтенсивності руху на ділянці дороги відповідній технічній категорії необхідно проводити реконструкцію цієї ділянки.

Всі показники мають нормативні вимоги до їх граничних значень, або визначаються за діючими нормативними документами [74], методиками.

Якщо фактична інтенсивність руху на ділянці автомобільної дороги не відповідає вимогам до технічної категорії дороги, то вартість цієї ділянки знижується на відповідний відсоток. Такий самий підхід пропонується застосовувати і до показників шумового забруднення, рівня забруднення внаслідок транспортних викидів, відстані від крайки проїзної частини до зелених насаджень, забудови; наявності місць концентрації ДТП; видимості дороги у плані та профілі.

Показники «параметри поперечного профілю автомобільної дороги» та «параметри елементів плану і поздовжнього профілю» закладаються ще на стадії проектування та будівництва ділянки дороги. Оскільки ці параметри мають лінійний характер та їх відповідність діючим вимогам може бути різною на окремих ділянках, їх вагомість слід враховувати пропорційно довжині окремих ділянок з невідповідністю параметрів (рис. 2.4, а), як це описано в роботі [91]. Крім того, для першої технічної категорії на вагомість показників додатково будуть впливати відповідні параметри розділювальної смуги: ширина неукріпленої частини розділювальної смуги та ширина укріпленої смуги на розділювальній смузі, що враховано на четвертому рівні моделі. Визначення коефіцієнтів вагомості для ділянки автомобільної дороги представлено нижче у прикладі (табл. 2.2)

Показники фізичного зносу є змінними в часі у зв’язку із зношенням та старінням елементів дороги, яких вони стосуються. Слід звернути увагу, що вагомість показників фізичного зносу на другому рівні кваліметричної моделі пропонується визначати вартісним методом, тобто пропорційно їх вартості у кошторисі об’єкту.

Такий підхід буде найбільш об’єктивним, оскільки зосереджені штучні споруди часто мають в рази більшу кошторисну вартість від вартості лінійних (дорожній одяг, розмітка та ін.), а їх стан значно важче охарактеризувати фізичними показниками.

Розглянемо показник «фізичний знос» кваліметричної моделі стану автомобільної дороги та побудуємо 3-й, 4-й і 5-й рівні (рис. 2.4, б, в).

Розглянемо окремо показники фізичного зносу, починаючи з третього рівня кваліметричної моделі (рис. рис. 2.4, б).

Стан елементів земляного полотна пропонується оцінювати експертним методом. Слід врахувати, що, відповідно до [117], руйнування поверхні ґрунтових узбіч, розділювальних смуг та укосів земляного полотна не допускається глибиною більше ніж 4 см. У роботі [91] емпіричним шляхом встановлено, що вагомість показника «стан неукріпленої частини узбіччя» складає 30 %, показника «укоси» – 70 %. Таке співвідношення прийнято з урахуванням середніх геометричних розмірів та складності усунення дефектів. Відповідно, на четвертому рівні моделі показник «укоси» характеризується двома показниками: «стан укосів» (70 %) та крутизна укосів (30 %).

Споруди дорожнього водовідведення є зосередженими, тому їх вагомість пропонується приймати пропорційно кошторисній вартості, а стан оцінювати експертним методом. Природньо-кліматичні фактори впливають на стан автомобільної дороги за рахунок зміни умов водно-теплового режиму та руху транспортних засобів. Найбільшу руйнівну дію на всі споруди, будови та елементи дороги чинить вода, різкі коливання температури, вплив великовагового транспорту [118].

Вода відіграє ключову роль в життєвому циклі будь-якої транспортної споруди, впливаючи на її транспортно-експлуатаційні характеристики. Відомо, що відсутність надлишку вологи в дорожніх конструкціях і ґрунтах земляного полотна означає належне її функціонування. Надмірний вміст вологи знижує несну здатність, сприяє розвитку деформацій покриття, що призводить до прискореного руйнування та скорочення терміну служби дороги. У таких випадках на ділянках дороги з проблемами водовідведення необхідно більш частий ремонт. При визначенні виду ремонтних робіт витрати на влаштування покриття необхідно порівнювати з витратами на підтримку в належному стані системи водовідведення.

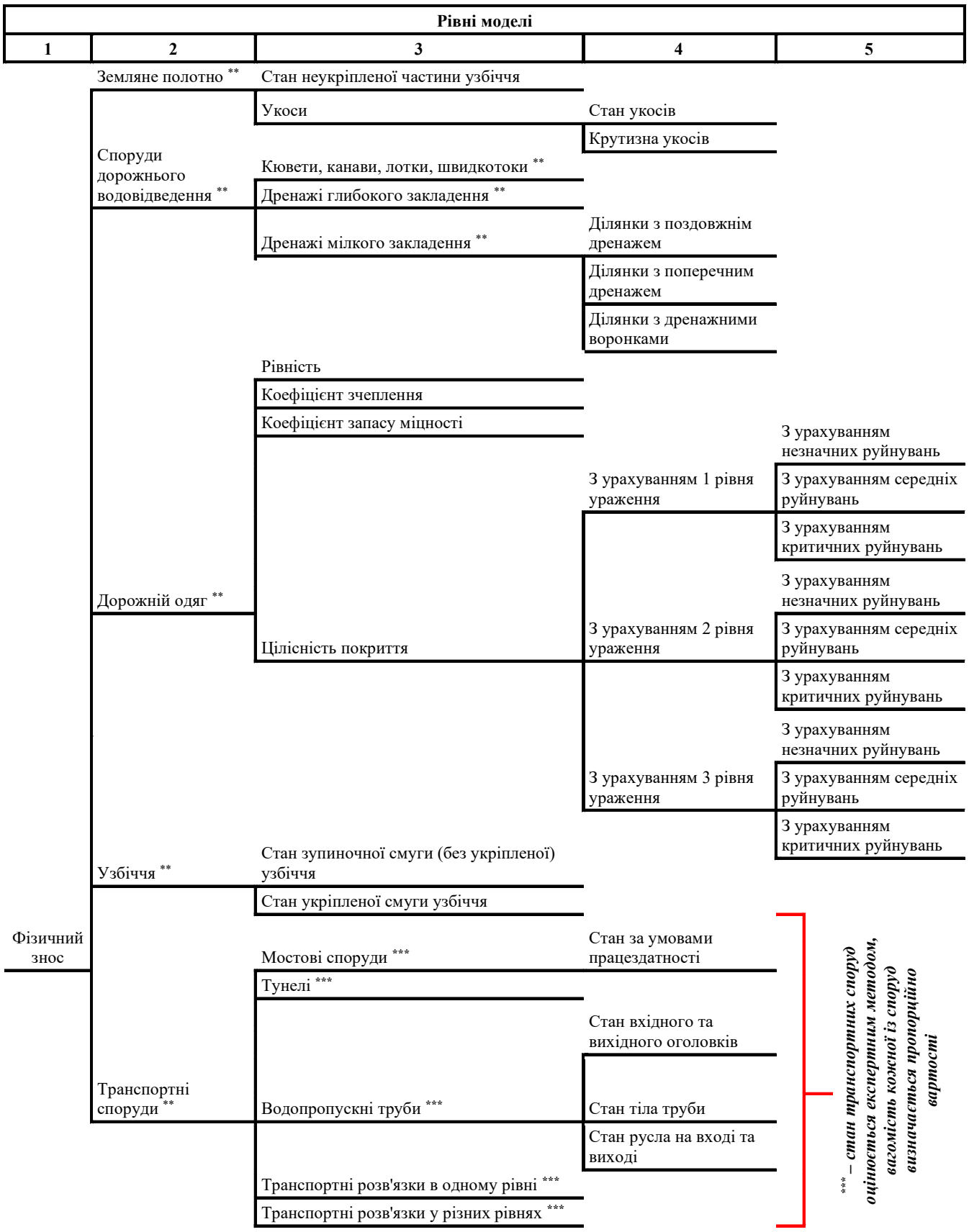
Для забезпечення якісного стану ділянки автомобільної дороги з витратами на експлуатаційне утримання, зведеними до мінімуму, треба так спроектувати конструктивні шари, щоб була можливість їх швидкого осушення за короткий проміжок часу. Для робочої зони дорожньої конструкції цю функцію виконують ДМЗ, які влаштовують з різних матеріалів за фізико-хімічними властивостями, що впливають на інтенсивність водовідведення.

Існуючі методи визначення вагомостей параметрів дренажних систем мілкого закладення в дорожній конструкції носять розрізнений характер і, перш за все, направлені на забезпечення достатньої водопропускної спроможності.

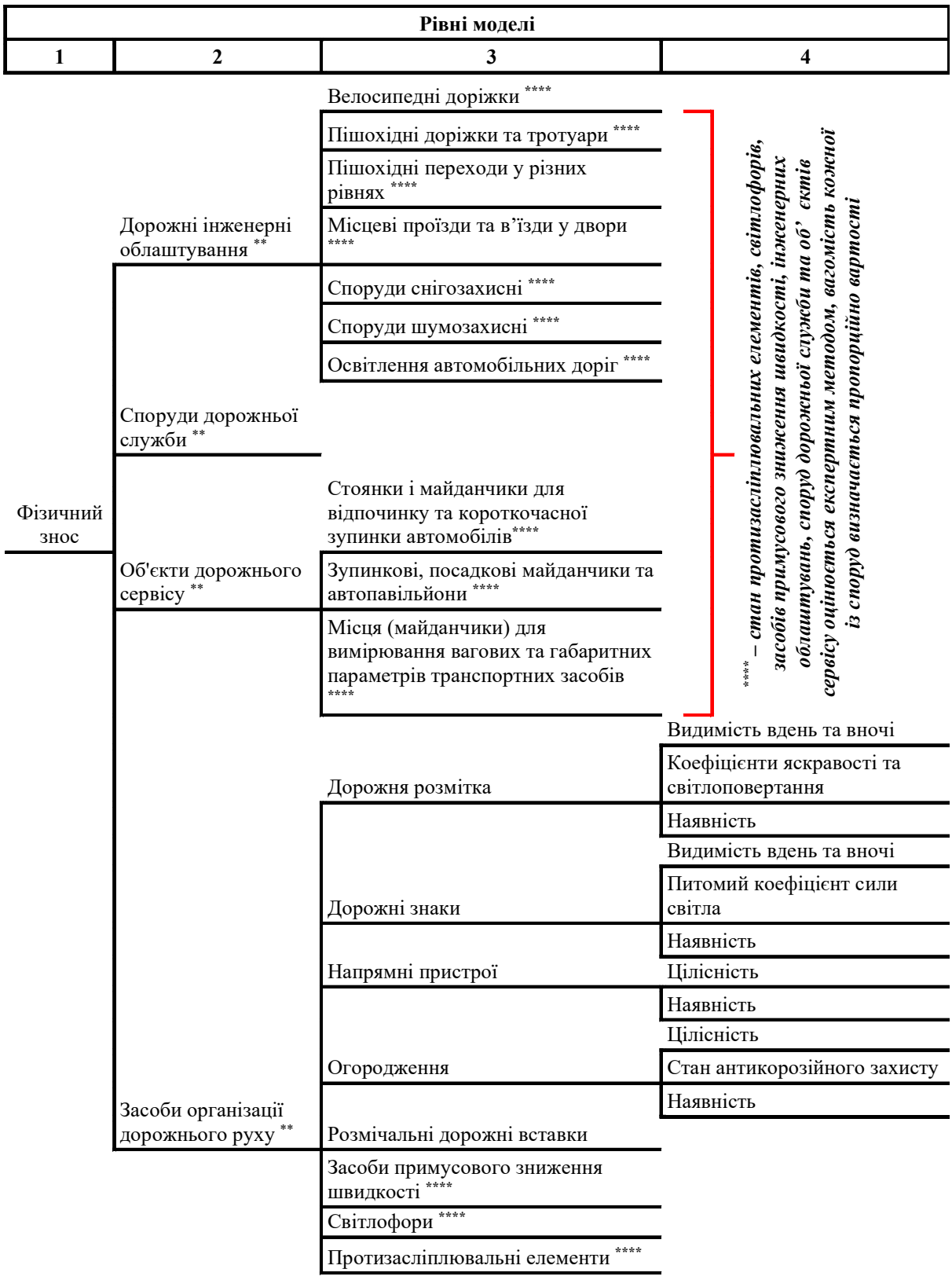
Найпоширенішими транспортними спорудами на автомобільних дорогах загального користування є мостові споруди, тунелі, водопропускні труби, транспортні розв'язки в одному рівні та транспортні розв'язки у різних рівнях. Ці споруди мають високу кошторисну вартість та великий, у порівнянні з більшістю елементів дороги, розрахунковий термін експлуатації. Стан транспортних споруд оцінюється експертним методом, вагомість кожної із споруд визначається пропорційно вартості. Для отримання повної інформації про актуальний стан мостових споруд доцільно користуватися базами даних аналітичних експертних систем управління мостами, які повноцінно функціонують в дорожній галузі різних країн.

Рівні моделі			
1	**2**	**3**	**4**
Функціональний знос	Інтенсивність руху		
	Параметри елементів плану і поздовжнього профілю	Поздовжній похил ділянки дороги	Ділянки з поздовжнім похилом меншим за поперечний
			Ділянки з поздовжнім похилом більшим за поперечний
		Радіус кривої у плані	
	Параметри поперечного профілю автомобільної дороги	Радіус опуклої кривої у профілі	
		Радіус увігнутої кривої у профілі	
		Ширина проїзної частини	
		Поперечні похили проїзної частини	
		Ширина узбіччя	Ширина укріпленої смуги
			Ширина зупиночної смуги
			Ширина неукріпленої смуги
		Поперечні похили узбіч	
		Висота / глибина в поперечному профілі	Ділянки - виїмками
			Ділянки - насипами
			Ділянки в нульових відмітках
		Ширина розділювальної смуги*	Ширина укріпленої смуги на розділювальній смузі*
			Ширина неукріпленої частини розділювальної смуги*
	Показники ділянки автомобільної дороги з безпеки дорожнього руху	Показники коефіцієнтів безпеки	
		Видимість дороги у плані та профілі	
	Оцінка впливу на навколишнє середовище	Наявність місць концентрації ДТП	
		Відстань від краю проїзної частини до зелених насаджень, забудови та ін.	
		Рівень забруднення внаслідок транспортних викидів	
		Шумове забруднення	

а)


Рівні моделі
1
2
3
4
5
Фізичний знос
Земляне полотно **
Споруди дорожнього водовідведення **
Дорожній одяг **
Узбіччя **
Транспортні споруди **
Стан неукріпленої частини узбіччя
Укоси
Стан укосів
Крутизна укосів
Кювети, канави, лотки, швидкотоки **
Дренажі глибокого закладення **
Дренажі мілкого закладення **
Ділянки з поздовжнім дренажем
Ділянки з поперечним дренажем
Ділянки з дренажними воронками
Рівність
Коефіцієнт зчеплення
Коефіцієнт запасу міцності
Цілісність покриття
З урахуванням 1 рівня ураження
З урахуванням 2 рівня ураження
З урахуванням 3 рівня ураження
З урахуванням незначних руйнувань
З урахуванням середніх руйнувань
З урахуванням критичних руйнувань
Стан зупиночної смуги (без укріпленої) узбіччя
Стан укріпленої смуги узбіччя
Мостові споруди ***
Тунелі ***
Водопропускні труби ***
Транспортні розв'язки в одному рівні ***
Транспортні розв'язки у різних рівнях ***
Стан за умовами працездатності
Стан вхідного та вихідного оголовків
Стан тіла труби
Стан русла на вході та виході
*** – стан транспортних споруд оцінюється експертним методом, вагомість кожної із споруд визначається пропорційно вартості

б)



в)

Рисунок 2.4 – Кваліметрична модель автомобільної дороги: *а* – функціонального стану; *б* – фізичного стану (частина 1); *в* – фізичного стану (частина 2); * – в дужках вказані дані для І технічної категорії; ** – визначається пропорційно вартості[91]

Окремо слід розглянути дорожній одяг та частину засобів організації дорожнього руху, які наявні на усіх, без винятку, автомобільних дорогах. На них безпосередньо впливають транспортні засоби, погодно-кліматичні чинники, діяльність з експлуатаційного утримання доріг. Стан цих елементів постійно змінюється, а термін експлуатації є порівняно нетривалим. Інформацію про стан дорожнього одягу можна отримати на основі експериментального, розрахункового та експертного методів.

Критеріями стану дорожнього одягу є його міцність (характеризується модулем пружності), рівність (індекс IRI або рівність за поштовхоміром), зчіпні якості (коефіцієнт зчеплення) та міра ураження руйнуваннями і деформаціями. Вимоги до зазначених показників для доріг при введенні в експлуатацію після будівництва або при прийманні робіт після поточних ремонтів, а також під час експлуатації дороги регламентовані нормативними документами.

У залежності від фактичного модуля пружності дорожнього одягу приймають рішення щодо доцільності капітального ремонту ділянки автомобільної дороги, а за аналізом показників рівності та коефіцієнту зчеплення – щодо поточного середнього ремонту. Деформації та руйнування усуваються при виконанні реконструкції, капітального ремонту, поточних ремонтів, а також при експлуатаційному утриманні. Тому при оцінці ділянки дороги характеристики дорожнього одягу слід розглядати у чіткій послідовності.

Вагомість коефіцієнту запасу міцності емпірично визначено у розмірі 60 % [91]. Це значення приймається, якщо він нижчий від допустимого і хоча б один із решти показників не відповідає вимогам норм. Якщо коефіцієнт запасу міцності є достатнім, то його величина становить 0 %. При виконанні першої умови решта показників далі не розглядаються.

Далі слід розглядати коефіцієнт зчеплення, оскільки рівність безпосередньо залежить від наявності дефектів на покритті. Невідповідність коефіцієнту зчеплення діючим вимогам є критерієм прийняття рішень щодо виконання поточного середнього ремонту. Вагомість даного показника встановлено експертним методом. Якщо коефіцієнт зчеплення нижчий від допустимого,

показники рівності та міри ураження деформаціями і руйнуваннями у подальшому не розглядаються.

Аналогічно до розрахунку диференційного показника міцності проводиться розрахунок диференційних показників коефіцієнту зчеплення для кожної смуги руху, кожного напрямку, кожного кілометра автомобільної дороги.

На наступному етапі побудови моделі слід розглянути показник рівності. Необхідно зазначити, що більше числове значення цього показника означає гірший стан покриття. Крім того, якщо рівність не відповідає вимогам, а на ділянці наявні дефекти покриття, то цей показник слід повторно виміряти після усунення дефектів. Експертним методом будо визначено, що вагомість рівності необхідно приймати у розмірі 30 %, якщо на ділянці відсутні дефекти покриття, і 20 %, якщо дефекти є. У разі наявності дефектів та при незадовільній рівності вагомість цих показників додається.

Розрахунок диференційних показників рівності дорожнього покриття виконують за формулами (2.9) та (2.10).

Диференційні показники міцності для кожного кілометра (для І категорії – прямого та зворотного напрямку окремо) автомобільної дороги розраховують за формулою:

$$P_i = \frac{P_{\text{ф}}}{P_{\text{н}}}, \tag{2.9}$$

де $P_{\text{ф}}$ – фактичне значення показника;

$P_{\text{н}}$ – нормативно допустиме значення показника [74];

$\{P \in E, S, \varphi\}$

Диференційний показник міцності для сукупності ділянок з невідповідністю параметрів встановленим нормативним вимогам розраховують за формулою:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\left(P_i \cdot k_l\right) \cdot n'\right)}{\sum n'}, \qquad (2.10)$$

де $P_i < 1 \to P_i, P_i \geq 1 \to P_i = 1$, n – кількість ділянок з невідповідністю параметрів встановленим нормативним вимогам, $\{n \in N\}$;

n' – кількість ділянок з однаковим значенням показника, $\{n' \in N\}$;

k_l – коефіцієнт пропорційності довжини ділянки (приймається 1,0 для ділянки в один кілометр, для ділянок меншої довжини – вираховується пропорційно), $k_l \in [0;1,0]$.

Руйнування та деформації (дефектність) дорожнього одягу прийнято характеризувати мірою його ураження тим або іншим типом дефектів. Крім того, враховують розповсюдженість його на ділянці дороги в один кілометр (у відсотках сумарної протяжності ділянок з даним типом руйнувань або деформацій). Класифікація руйнувань та деформацій включає п'ятнадцять видів, кожен з яких має три рівня [91, 119].

Оцінка кожного показника здійснюється візуально групою експертів, яка повинна складатися мінімум з п’яти – семи чоловік. Далі визначається середньозважений показник.

Спочатку визначені характеристики ураження потрібно усереднити з врахуванням рівнів ураження за формулою, запропонованою авторами у роботі [91], %:

$$D^m_{i-(i+1)} = 0,25 \cdot D_1 + 0,5 \cdot D_2 + D_3, \qquad (2.11)$$

де $D_1, D_2, D_3, D^m_{i-(i+1)} \in [0;100]$, D_1, D_2, D_3 – міра ураження ділянки деформаціями (руйнуваннями) першого, другого та третього рівнів, відповідно, %;

$D^m_{i-(i+1)}$ – усереднене значення міри ураження ділянки дороги від км i до км (i+1) деформацією (руйнуванням) типу m, %; $\{i \in n\}$;

n – кількість ділянок з невідповідністю параметрів встановленим нормативним вимогам; $\{n \in N\}$; $\{m \in N\}$.

На наступному етапі відбувається усереднення усіх типів дефектів у межах окремих *i*-тих кілометрових ділянок.

Усереднене значення міри ураження ділянки від км i до км (i+1) усіма наявними типами деформацій (руйнувань) визначається за формулою:

$$\sum_{III}^{I} D_{i-(i+1)} = 0,5 \cdot D^{I}_{i-(i+1)} + 0,7 \cdot D^{II}_{i-(i+1)} + D^{III}_{i-(i+1)}, \qquad (2.12)$$

де $D^{I}_{i-(i+1)}, D^{II}_{i-(i+1)}, D^{III}_{i-(i+1)}, \sum_{III}^{I} D_{i-(i+1)} \in [0;100]$, $D^{I}_{i-(i+1)}$, $D^{II}_{i-(i+1)}$, $D^{III}_{i-(i+1)}$ – сума усереднених значень міри ураження ділянки дороги від км i до км (i+1) деформаціями (руйнуваннями) I (незначні), II (середні) та III (критичні) типів, відповідно, %; $\{i \in n\}$;

n – кількість ділянок з невідповідністю параметрів встановленим нормативним вимогам; $\{n \in N\}$.

Проводимо розрахунок диференційного показника міри ураження сукупності ділянок автомобільної дороги з невідповідністю параметрів встановленим нормативним вимогам окремо по кожному з експертів за формулою:

$$D^{\text{експ. k}} = \frac{\sum_{1}^{i} \frac{\left(\sum_{III}^{I} D_{n-(n+1)} \right)}{100} \cdot l_i}{L}, \qquad (2.13)$$

де l_i – протяжність *i*-тої ділянки з невідповідністю параметрів встановленим нормативним вимогам, $\{i \in n\}$;

n – кількість ділянок з невідповідністю параметрів встановленим нормативним вимогам, $\{n \in N\}$;

L – загальна довжина оцінюваної дороги;

k – присвоєний умовний номер експерта, $\{k \in N\}$.

Розрахунок по кожному з експертів виконується спочатку окремо, потім визначається середньозважене значення для ділянки дороги:

$$\overline{D} = \frac{\sum_{1}^{r} D^{\text{експ. k}}}{r}, \tag{2.14}$$

де r – кількість експертів, $\{r \in N\}$.

2.2 Розробка математичної моделі якісного стану ділянки автомобільної дороги з дренажними конструкціями

Встановимо номенклатуру показників якісного стану ділянки дороги на стадії експлуатації за видами та групами. Визначимо оптимальне число рівнів кваліметричної моделі вартісної оцінки якісного стану дороги (рис. 2.5). Вихідними даними для визначення вагомостей вартісним методом є глави зведених кошторисних розрахунків будівництва автомобільної дороги (табл. 2.1).

Для перетворення якісних ознак об’єкта оцінки були застосовані диференційний та експертний методи. Розроблення концептуальної моделі процедури технічної експертизи базувалось на результатах натурних досліджень, нормативної бази та даних, отриманих на основі експертного методу. Результати натурних досліджень включали: вимірювання геометричних параметрів ділянки автомобільної дороги, визначення міри ураження стану покриття та елементів дорожньої конструкції, визначення стану транспортних споруд та ін.

Для отримання коефіцієнта вагомості показника (стовпчик 5 табл. 2.1), необхідно використовувати кошторисну вартість показника (стовпчик 4 табл. 2.1)

та його коефіцієнт вагомості в групі (стовпчик 3 табл. 2.1), який визначають діленням значення кошторисної вартості конкретного показника на загальну кошторисну вартість та заокруглюють до сотих [120].

Таблиця 2.1 – Розрахунок фізичного зносу автомобільної дороги згідно зведених кошторисних розрахунків будівництва

Ч.ч.	Конструктивні елементи	Коефіцієнт вагомості, в групі фізичний знос	Кошторисна вартість, тис. грн	Коефіцієнт вагомості показника відносно *Kkt*
1	**2**	**3**	**4**	**5**
1	Земляне полотно	0,14	12349,55	0,10
2	Дренажна система	0,20	18524,32	0,15
3	Дорожній одяг	0,39	35813,69	0,29
4	Транспортні споруди	0,12	11114,59	0,09
5	Дорожні інженерні облаштування	0,05	4939,82	0,04
6	Споруди дорожньої служби	0,01	1234,95	0,01
7	Об'єкти дорожнього сервісу	0,01	1234,95	0,01
8	Засоби організації дорожнього руху	0,07	6174,77	0,05
Всього:		**1,00**	**91386,65**	**0,74**

При диференційному методі оцінка рівня якісних ознак здійснювалась за одиничними показниками – співвідношенням показника якісної властивості до нормативного показника, згідно (2.4).

За експертним методом визначалися середньозважені показники стану конструктивного елементу автомобільної дороги (рис. 2.5, а, б). При застосуванні цього методу на будь-якому рівні кожна властивість оцінювалась не тільки диференційним показником, але й коефіцієнтом вагомості згідно формули (2.6). Для визначення коефіцієнтів вагомості також був використаний вартісний метод за формулою (2.6). Застосування такої відносної кількісної оцінки якісних ознак дає можливість привести до єдиного показника моделі всі властивості, тобто трансформувати всі прості властивості за єдиною шкалою [121].

Таблиця 2.2 – Визначення показників якісного стану елементів автомобільної дороги та коефіцієнтів вагомості

Ч.ч	Оцінка експертів					Середня оцінка	Сума середніх оцінок	Груповий коефіцієнт вагомості властивості	Коефіцієнт вагомості показника	Рівневий коефіцієнт вагомості властивості	Конструктивний елемент
	1	2	3	4	5						
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
1	43	44	43	41	39	42	169	0,25	0,1	0,0250	Стан неукріпленої частини узбіччя
2	48	47	45	44	46	46		0,273		0,0273	Коефіцієнт ущільнення
3	38	41	42	39	40	40		0,235		0,0235	Вологість
4	41	42	41	40	41	41		0,242		0,0242	Укоси
5	62	63	61	60	59	61	89	0,684	0,0242	0,0166	Стан укосів
6	29	27	26	28	30	28		0,316		0,0076	Крутизна укосів
7	87	86	84	83	85	85	254	0,335	0,15	0,0503	Кювети, канави, лотки, швидкотоки
8	86	89	88	85	87	87		0,342		0,0513	Дренажі глибокого закладання
9	84	81	82	80	83	82		0,323		0,0485	Дренажі мілкого закладання
10	76	74	72	73	75	74	358	0,206	0,0485	0,0100	Замулювання дренажної траншеї
11	97	99	98	97	99	98		0,273		0,0132	Інтенсивність водовідведення дренажної траншеї
12	95	96	92	94	93	94		0,263		0,0128	Стійкість до деформації дренажної конструкції від впливу великовагових ТЗ під час експлуатації або від впливу дорожніх машин під час влаштування
13	43	48	45	46	48	46		0,129		0,0063	Коефіцієнт фільтрації наповнювача
14	48	47	42	49	44	46		0,129		0,0063	Коефіцієнт пористості наповнювача
15	68	70	65	69	68	68	361	0,187	0,29	0,0542	Рівність
16	82	86	83	84	85	84		0,233		0,0676	Шорсткість (коефіцієнт зчеплення)
17	89	93	88	91	89	90		0,25		0,0725	Міцність (коефіцієнт запасу міцності)
18	43	44	45	41	42	43		0,119		0,0345	Усереднений коефіцієнт фільтрації шарів основи
19	79	72	74	78	77	76		0,211		0,0612	Цілісність покриття
20	66	68	66	67	68	67	204	0,33	0,0612	0,0202	1 рівень ураження
21	67	71	68	70	69	69		0,34		0,0208	2 рівень ураження
22	65	69	64	68	69	67		0,33		0,0202	3 рівень ураження

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
23	н/в	н/в	н/в	н/в	н/в	26	26	1	0,09	0,0900	Транспортні споруди
24	н/в	н/в	н/в	н/в	н/в	30	30	1	0,04	0,0400	Дорожні інженерні облаштування
25	н/в	н/в	н/в	н/в	н/в	32	32	1	0,01	0,0100	Споруди дорожньої служби
26	н/в	н/в	н/в	н/в	н/в	31	31	1	0,01	0,0100	Об'єкти дорожнього сервісу
27	н/в	н/в	н/в	н/в	н/в	24	24	1	0,05	0,0500	Засоби організації дорожнього руху
28	38	37	40	36	39	38	118	0,319	0,07	0,0223	Радіус кривих у плані
29	36	34	37	38	40	37		0,313		0,0219	Радіус кривих у поздовжньому профілі
30	45	46	42	43	44	44		0,368		0,0258	Поздовжній похил ділянки дороги
31	56	58	55	54	57	56	104	0,5	0,0219	0,0110	Опуклі криві у плані
32	48	49	50	46	47	48		0,5		0,0110	Увігнуті криві у плані
33	64	63	62	65	61	63	124	0,5	0,0258	0,0129	Ділянки з поздовжнім похилом меншим за поперечний
34	61	62	59	63	60	61		0,5		0,0129	Ділянки з поздовжнім похилом більшим за поперечний
35	94	95	93	91	92	93	321	0,289	0,07	0,0202	Ширина проїзної частини
36	57	59	56	55	58	57		0,177		0,0124	Ширина узбіччя
37	55	57	59	53	56	56		0,173		0,0121	Поперечний похил узбіччя
38	62	61	58	57	62	60		0,186		0,0130	Поперечний похил проїзної частини
39	54	60	61	52	53	56		0,175		0,0123	Висота/глибина в поперечному профілі
40	74	76	75	77	73	75	150	0,5	0,0124	0,0062	Ширина укріпленої смуги
41	36	37	39	38	40	38		0,25		0,0031	Ширина зупиночної смуги
42	38	36	37	40	39	38		0,25		0,0031	Ширина неукріпленої смуги
43	49	48	51	50	52	50	150	0,33	0,0123	0,0041	Ділянки в нульових відмітках
44	50	52	53	51	49	51		0,34		0,0042	Ділянки - насипами
45	48	50	52	49	51	50		0,33		0,0041	Ділянки - виїмками
46	30	29	33	32	31	31	31	1	0,06	0,0600	Показники ділянки з безпеки дорожнього руху
47	25	29	26	28	27	27	118	0,23	0,06	0,0138	Забруднення внаслідок транспортних викидів
48	25	24	26	20	25	24		0,2		0,0120	Шумове забруднення
49	8	9	10	11	7	9		0,08		0,0048	Освітлення
50	21	17	19	20	18	19		0,161		0,0097	Естетичність
51	20	19	19	17	20	19		0,164		0,0098	Озеленення
52	22	18	17	19	19	19		0,165		0,0099	Відведення стічних вод

Примітка: н/в – не визначається експертним методом

РІВЕНЬ				
0	**1**	**2**	**3**	**4**

0	1	2	3				4			
Стан автомобільної дороги Ккt	Фізичний знос 0,74	Земляне полотно К1 0,1	Стан неукріпленої частини узбіччя	0,25	Р1	0,025				
			Коефіцієнт ущільнення сезонний	0,273	Р2	0,0273				
			Вологість сезонна	0,235	Р3	0,0235				
			Укоси	0,242		0,0242	Стан укосів	0,684	Р4	0,0166
							Крутизна укосів	0,316	Р5	0,0076
		Дренажна система К2 0,15	Кювети, канави, лотки, швидкотоки	0,335	Р6	0,0503	Замулювання дренажної траншеї	0,206	Р8	0,0100
			Дренажі глибокого закладання	0,342	Р7	0,0513	Інтенсивність водовідведення дренажної траншеї	0,273	Р9	0,0132
			Дренажі мілкого закладання	0,323		0,0485	Стійкість до деформації дренажної конструкції від впливу великовагових ТЗ під час експлуатації або від впливу дорожніх машин під час влаштування	0,263	Р10	0,0127
							Коефіцієнт фільтрації наповнювача	0,129	Р11	0,0063
							Коефіцієнт пористості наповнювача	0,129	Р12	0,0063
		Дорожній одяг К3 0,29	Рівність	0,187	Р13	0,0542				
			Шорсткість (коефіцієнт зчеплення)	0,233	Р14	0,0676	1 рівень ураження	0,33	Р15	0,02019
			Цілісність покриття	0,211		0,0612	2 рівень ураження	0,34	Р16	0,0208
			Міцність (коефіцієнт запасу міцності)	0,25	Р18	0,0725	3 рівень ураження	0,33	Р17	0,02019
			Усереднений коефіцієнт фільтрації шарів основи	0,119	Р19	0,0345				
		Транспортні споруди К4 0,09		0,09	Р20	0,09				
		Дорожні інженерні облаштування К5 0,04		0,04	Р21	0,04				
		Споруди дорожньої служби К6 0,01		0,01	Р22	0,01				
		Об'єкти дорожнього сервісу К7 0,01		0,01	Р23	0,01				
		Засоби організації дорожнього руху К8 0,05		0,05	Р24	0,05				

а)

РІВЕНЬ									
0	**1**	**2**	**3**			**4**			
Стан автомобільної дороги Kkt									
		Параметри елементів плану та поздовжнього профілю автомобільної дороги К9	Радіус кривих у поздовжньому профілі	0,313		0,0219	Опуклі	0,5	Р25	0,0110
							Увігнуті	0,5	Р26	0,0110
			Радіус кривих у плані	0,319	Р27	0,0223				
			Поздовжній похил ділянки дороги	0,368		0,0258	Ділянки з поздовжнім похилом меншим за поперечний	0,5	Р28	0,0129
		0,07					Ділянки з поздовжнім похилом більшим за поперечний	0,5	Р29	0,0129
		Параметри поперечного профілю автомобільної дороги К10	Ширина проїзної частини	0,289	Р30	0,0202	Ширина укріпленої смуги	0,5	Р31	0,0062
			Ширина узбіччя	0,177		0,0124	Ширина зупиночної смуги	0,25	Р32	0,0031
		0,07					Ширина неукріпленої смуги	0,25	Р33	0,0031
			Поперечний похил проїзної частини	0,186	Р34	0,013				
			Поперечний похил узбіччя	0,173	Р35	0,0121	Ділянки в нульових відмітках	0,33	Р36	0,0040
			Висота / глибина в поперечному профілі	0,175		0,0123	Ділянки - насипами	0,34	Р37	0,0042
							Ділянки - виїмками	0,33	Р38	0,0040
	Функціональні показники	Показники ділянки автомобільної дороги з безпеки дорожнього руху К11		0,06	Р39	0,06				
	0,26	0,06								
		Оцінка впливу на навколишнє середовище К12	Забруднення внаслідок транспортних викидів	0,23	Р40	0,0138				
			Шумове забруднення	0,2	Р41	0,012				
			Освітлення	0,08	Р42	0,0048				
		0,06	Естетичність	0,161	Р43	0,0097				
			Озеленення	0,164	Р44	0,0098				
			Поверхневе водовідведення	0,165	Р45	0,0099				

б)

Рисунок 2.5 – Кваліметрична модель якісного стану автомобільної дороги: *а* – фізичний знос; *б* – функціональний знос

Відповідно, визначивши коефіцієнт вагомості показника (стовпчик 10 табл. 2.2), розраховуємо груповий коефіцієнт вагомості властивості конкретного показника (стовпчик 9 табл. 2.2). Знаючи груповий коефіцієнт вагомості властивості та коефіцієнт вагомості показника, визначаємо рівневий коефіцієнт вагомості властивості (стовпчик 11 табл. 2.2). Значення рівневого коефіцієнта вагомості кожної властивості необхідно помножити на значення даної властивості. Стан автомобільної дороги *Kkt* визначаємо за формулою (2.2) за побудованою кваліметричною моделлю (рис. 2.5, а, б).

Математичну модель якісного стану ділянки автомобільної дороги можна представити як:

$$\begin{aligned} K_{kt} = {} & 0,0250 \cdot P_1 + 0,0273 \cdot P_2 + 0,0235 \cdot P_3 + 0,0166 \cdot P_4 + 0,0076 \cdot P_5 + 0,0503 \cdot P_6 + \\ & + 0,0513 \cdot P_7 + 0,0100 \cdot P_8 + 0,0132 \cdot P_9 + 0,0128 \cdot P_{10} + 0,0063 \cdot (P_{11} + P_{12}) + 0,0543 \cdot P_{13} + \\ & + 0,0676 \cdot P_{14} + 0,0725 \cdot P_{15} + 0,0345 \cdot P_{16} + 0,0202 \cdot (P_{17} + P_{19}) + 0,0208 \cdot P_{18} + \\ & + 0,0900 \cdot P_{20} + 0,0400 \cdot P_{21} + 0,0100 \cdot (P_{22} + P_{23}) + 0,0500 \cdot P_{24} + 0,0223 \cdot P_{25} + \\ & + 0,0110 \cdot (P_{26} + P_{27}) + 0,0129 \cdot (P_{28} + P_{29}) + 0,0202 \cdot P_{30} + 0,0121 \cdot P_{31} + 0,0130 \cdot P_{32} + \\ & + 0,0062 \cdot P_{33} + 0,0031 \cdot (P_{34} + P_{35}) + 0,0040 \cdot (P_{36} + P_{38}) + 0,0042 \cdot P_{37} + 0,0060 \cdot P_{39} + \\ & + 0,0138 \cdot P_{40} + 0,0120 \cdot P_{41} + 0,0048 \cdot P_{42} + 0,0097 \cdot P_{43} + 0,0098 \cdot P_{44} + 0,0099 \cdot P_{45}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Для наукового обґрунтування прогнозу за експертним методом важлива оцінка ступеня узгодженості думок експертів. Кінцевий висновок для прийняття рішення щодо вибору найприйнятнішого фактора можливий лише за умови певного рівня узгодженості їх думок. Оцінка ступеня узгодженості думок експертів оцінюється для всієї групи за допомогою коефіцієнта конкордації.

У випадку відсутності однакових (стандартизованих) рангів коефіцієнт конкордації розраховується за формулою [55]:

$$K_{кон} = \frac{12 \sum_{j=1}^{n} d_j^2}{m^2 (n^3 - n)}, \quad (2.16)$$

де d_j^2 – відхилення суми рангів j -го фактору від середньої суми рангів;

m – кількість експертів, які приймали участь;

n – кількість факторів.

За наявності однакових (стандартизованих) рангів коефіцієнт конкордації розраховується за формулою:

$$K_{кон} = \frac{12\sum_{j=1}^{n} d_j^2}{m^2(n^3 - n) - m\sum_{i=1}^{m} T_i}, \tag{2.17}$$

$$T_i = \sum_{l=1}^{L} (t_l^3 - t_l), \tag{2.18}$$

де l – кількість груп зв'язних (однакових) рангів;

t_i – кількість зв'язних рангів у кожній групі.

Проведемо розрахунок коефіцієнта конкордації, для цього на основі наведених у табл. 2.2 параметрів складемо зведену матрицю вихідних даних.

За даними матриці балів здійснюється ранжування факторів, результати якого надані у матриці рангів (табл. 2.3).

Сума рангів, призначених експертами j-му фактору, визначається за формулою:

$$S_j = \sum_{i=1}^{m} R_{ij}, \tag{2.19}$$

де R_{ij} – це ранг оцінки i-м експертом j-го фактора.

Сума рангів розраховується у порядку за табл. 2.3 для всіх факторів і зростає у міру збільшення відносної важливості досліджуваних факторів.

Таблиця 2.3 – Зведені матриці вихідних даних та рангів після здійснення ранжування факторів

Вихідні дані					
Фактори	Експерти				
	1	2	3	4	5
1	43	44	43	41	39
2	48	47	45	44	46
3	38	41	42	39	40
4	62	63	61	60	59
5	29	27	26	28	30
6	87	86	84	83	85
7	86	89	88	85	87
8	76	74	72	73	75
9	97	99	98	97	99
10	95	96	92	94	93
11	43	48	45	46	48
12	48	47	42	49	44
13	68	70	65	69	68
14	82	86	83	84	85
15	89	93	88	91	89
16	43	44	45	41	42
17	66	68	66	67	68
18	67	71	68	70	69
19	65	69	64	68	69
20	38	37	40	36	39
21	56	58	55	54	57
22	48	49	50	46	47
23	64	63	62	65	61
24	61	62	59	63	60
25	94	95	93	91	92
26	55	57	59	53	56
27	62	61	58	57	62
28	74	76	75	77	73
29	36	37	39	38	40
30	38	36	37	40	39
31	49	48	51	50	52
32	50	52	53	51	49
33	48	50	52	49	51
34	30	29	33	32	31
35	25	29	26	28	27
36	25	24	26	20	25
37	8	9	10	11	7
38	21	17	19	20	18
39	20	19	19	17	20
40	22	18	17	19	19

Значення рангів після ранжування факторів					
Фактори	Експерти				
	1	2	3	4	5
1	26	27	27	27	30
2	22	25	24	26	25
3	29	29	28	30	28
4	15	14	15	16	17
5	34	35	34	34	34
6	5	6	6	7	6
7	6	5	4	5	5
8	8	9	9	9	8
9	1	1	1	1	1
10	2	2	3	2	2
11	26	23	24	24	23
12	22	25	28	22	26
13	10	11	12	11	12
14	7	6	7	6	6
15	4	4	4	3	4
16	26	27	24	27	27
17	12	13	11	13	12
18	11	10	10	10	10
19	13	12	13	12	10
20	29	30	30	32	30
21	18	18	19	18	18
22	22	22	23	24	24
23	14	14	14	14	15
24	17	16	16	15	16
25	3	3	2	3	3
26	19	19	16	19	19
27	15	17	18	17	14
28	9	8	8	8	9
29	32	30	31	31	28
30	29	32	32	29	30
31	21	23	22	21	20
32	20	20	20	20	22
33	22	21	21	22	21
34	33	33	33	33	33
35	35	33	34	34	35
36	35	36	34	36	36
37	40	40	40	40	40
38	38	39	37	36	39
39	39	37	37	39	37
40	37	38	39	38	38

Таблиця 2.4 – Приклад переформування рангів експерта при пов’язаних рангах в оцінці показників

Порядковий номер місця фактору в ранжованому ряді	Оцінка експерта	Новий ранг
1	**2**	**3**
1	43	27
2	45	25
3	42	28,5
4	61	15
5	26	35
6	84	6
7	88	4,5
8	72	9
9	98	1
10	92	3
11	45	25
12	42	28,5
13	65	12
14	83	7
15	88	4,5
16	45	25
17	66	11
18	68	10
19	64	13
20	40	30
21	55	19
22	50	23
23	62	14
24	59	16,5
25	93	2
26	59	16,5
27	58	18
28	75	8
29	39	31
30	37	32
31	51	22
32	53	20
33	52	21
34	33	33
35	26	35
36	26	35
37	10	40
38	19	37,5
39	19	37,5
40	17	39

Оскільки у таблиці 2.3 є пов'язані ранги (однаковий ранговий номер) в оцінках всіх експертів, зробимо їх переформування на прикладі 3-го експерта (без зміни думки експерта, тобто між ранговими номерами зберігаються відповідні співвідношення “<”, “>”, “=”). Також не рекомендується ставити ранг вище 1 і нижче значення рівного кількості параметрів (в даному випадку n =40). Переформування рангів проводиться в табл. 2.4.

За даними матриці рангів (табл. 2.3), розрахуємо кількість груп зв’язних рангів l = 29 тобто (24; 24; 24); (23; 23) … l. Звідси t_{l1} = 3; t_{l2} = 3 … L.

Для визначення коефіцієнта конкордації використані дані табл. 2.3. Розрахунки наведені в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Розрахунки характеристик параметрів ранжування

Фактори	Експерти					Сума рангів, S_j	Відхилення S_j від середньої суми, d_j	d_j^2
	1	2	3	4	5			
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
1	27	27,5	27	27,5	31	140	-37,5	1406,25
2	23,5	25,5	25	26	25	125	-22,5	506,25
3	30	29	28,5	30	28,5	146	-43,5	1892,25
4	15,5	14,5	15	16	17	78	24,5	600,25
5	34	35	35	34,5	34	172,5	-70	4900
6	5	6,5	6	7	6,5	31	71,5	5112,25
7	6	5	4,5	5	5	25,5	77	5929
8	8	9	9	9	8	43	59,5	3540,25
9	1	1	1	1	1	5	97,5	9506,25
10	2	2	3	2	2	11	91,5	8372,25
11	27	23,5	25	24,5	23	123	-20,5	420,25
12	23,5	25,5	28,5	22,5	26	126	-23,5	552,25
13	10	11	12	11	12,5	56,5	46	2116
14	7	6,5	7	6	6,5	33	69,5	4830,25
15	4	4	4,5	3,5	4	20	82,5	6806,25
16	27	27,5	25	27,5	27	134	-31,5	992,25
17	12	13	11	13	12,5	61,5	41	1681
18	11	10	10	10	10,5	51,5	51	2601
19	13	12	13	12	10,5	60,5	42	1764
20	30	30,5	30	32	31	153,5	-51	2601
21	18	18	19	18	18	91	11,5	132,25
22	23,5	22	23	24,5	24	117	-14,5	210,25
23	14	14,5	14	14	15	71,5	31	961

Кінець таблиці 2.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
24	17	16	16,5	15	16	80,5	22	484
25	3	3	2	3,5	3	14,5	88	7744
26	19	19	16,5	19	19	92,5	10	100
27	15,5	17	18	17	14	81,5	21	441
28	9	8	8	8	9	42	60,5	3660,25
29	32	30,5	31	31	28,5	153	-50,5	2550,25
30	30	32	32	29	31	154	-51,5	2652,25
31	21	23,5	22	21	20	107,5	-5	25
32	20	20	20	20	22	102	0,5	0,25
33	23,5	21	21	22,5	21	109	-6,5	42,25
34	33	33,5	33	33	33	165,5	-63	3969
35	35,5	33,5	35	34,5	35	173,5	-71	5041
36	35,5	36	35	36,5	36	179	-76,5	5852,25
37	40	40	40	40	40	200	-97,5	9506,25
38	38	39	37,5	36,5	39	190	-87,5	7656,25
39	39	37	37,5	39	37	189,5	-87	7569
40	37	38	39	38	38	190	-87,5	7656,25
Разом						4100		132382
Середнє значення						102,5		

Проведемо розрахунки за формулою (2.18):

$$\sum_{i=1}^{m} T_i = (3^3 - 3) + (2^3 - 2) + \ldots = 318$$

Визначаємо коефіцієнт конкордації згідно формули (2.17):

$$K_{кон} = \frac{12 \cdot 132382}{5^2 (40^3 - 40) - 5 \cdot 318} = 0,9944$$

Коефіцієнт конкордації змінюється в межах від 0 до 1,0. Чим більше значення коефіцієнта конкордації, тим вище ступінь узгодженості думок експертів. Якщо $K_{кон} = 1$, то є повна узгодженість думок експертів; якщо $K_{кон} = 0$, то узгодженість повністю відсутня. Значення коефіцієнта $K_{кон} = 0,9944$ свідчить про наявність високого ступеню узгодженості думок експертів, що підтверджує надійність вхідних даних до розробленої кваліметричної моделі.

Статистична істотність коефіцієнта конкордації перевіряється за критерієм Пірсона:

$$\chi_p^2 = \frac{12\sum_{j=1}^{n} d_j^2}{mn(n+1) - \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{m} T_i}. \qquad (2.20)$$

Отже

$$\chi_p^2 = \frac{12 \cdot 132382}{5 \cdot 40 \cdot (40+1) - \frac{1}{40-1} \cdot 318} = 193{,}92$$

Отже, критерій Пірсона склав $\chi_p^2 = 193{,}92$. Порівняємо розраховане значення з табличним для числа ступенів свободи $k = n - 1 = 40 - 1 = 39$ і при рівні значимості $\alpha = 0{,}05$. Маємо $\chi_T{}^2 = 50{,}91898$, тобто $193{,}92 > 50{,}91898$, отже $K_{кон} = 0{,}9944$ – величина не випадкова, а отримані результати достовірні та можуть бути використані в подальших дослідженнях.

Вагомість дренажних конструкцій та системи поверхневого водовідведення складає 15 % для комплексного показника та 20 % для показника фізичного зносу в порівнянні з дорожнім одягом, який є найбільш вагомим та визначальним при прогнозуванні якісного стану ділянки автомобільної дороги.

2.3 Визначення відстані між поперечними дренажними прорізями для дренажів мілкого закладання

На теперішній час існуючі методи визначення параметрів дренажних систем мілкого закладення в дорожній конструкції носять розрізнений характер щодо забезпечення достатньої водопропускної спроможності. Одним з важливих проектних параметрів поперечного ДМЗ є відстань між дренажними прорізями. Для визначення цієї відстані розглянемо основне диференційне рівняння нерівномірного плавнозмінного руху рідини у відкритих руслах [123]:

$$i = \frac{d}{dl}\left(\frac{\alpha V^2}{2g}\right) + i_t, \qquad (2.21)$$

де i – похил вільної поверхні потоку:

$$i = -\frac{dz}{dl}; \tag{2.22}$$

l – довжина ділянки потоку, м;

g – прискорення вільного падіння, м/с^2;

α – коефіцієнт кількості руху потоку, який фізично виражає відношення дійсної кількості руху, підрахованого за місцевими швидкостями до руху, який підраховано за середньою швидкістю за одиницю часу;

i_t – похил тертя.

Знак «мінус» у співвідношенні (2.22) прийнятий, щоб дійсному пониженню вільної поверхні потоку, тобто зменшенню її координати z, відповідало б позитивне значення похилу вільної поверхні потоку. Для відкритого потоку похил поверхні i виражається через похил дна русла i_o та похідну від глибини h за відстанню l:

- для ділянки русла з прямим похилом дна ($i_o>0$):

$$i = i_o - \frac{dh}{dl}; \tag{2.23}$$

- для ділянки русла зі зворотним похилом дна ($i_o<0$):

$$i = -\left(i_o + \frac{dh}{dl}\right); \tag{2.24}$$

- для ділянки русла з горизонтальним дном ($i_o=0$):

$$i = -\frac{dh}{dl}. \tag{2.25}$$

При нерівномірному русі похил тертя i_t в перетині глибиною h визначається за такими ж залежностями, як і при рівномірному русі з цією ж глибиною:

$$i_t = \frac{V^2}{C^2 R} = \frac{V^2}{W^2}, \tag{2.26}$$

або

$$i_t = \frac{Q^2}{K_\phi^2}, \tag{2.27}$$

де W та K – швидкісна та витратна характеристики, які відповідають глибині h нерівномірного руху.

З урахуванням (2.21 – 2.23 та 2.27), основне диференційне рівняння руслового потоку зі змінними глибиною та глибиною l має такий вигляд:

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i_o - \frac{Q^2}{K_\phi^2}\left(1 - \frac{\alpha C^2 R}{g\omega}\frac{d\omega}{dl}\right)}{1 - \frac{\alpha Q^2}{g}\frac{B}{\omega^3}}. \tag{2.28}$$

де Q – загальна витрата потоку;

K – витратна характеристика, що відповідає глибині потоку h при нерівномірному русі, м^3/с;

C – коефіцієнт Шезі;

R – гідравлічний радіус потоку, м;

ω – площа живого перетину потоку, м^2;

B – ширина потоку, м.

Рівняння (2.28) отримане за умовою, що α – величина постійна, яка не залежить від глибини та використовується для призматичних русел, де їх форма і розміри не змінюються вздовж потоку, а саме $\frac{d\omega}{dl}=0$. З урахуванням цього, рівняння (2.28) буде мати такий вигляд:

- для ділянки русла з прямим похилом дна ($i_o>0$):

$$\frac{dh}{dl}=\frac{i_o-\frac{Q^2}{K^2}}{1-\frac{\alpha Q^2 B}{g\omega^3}}; \tag{2.29}$$

- для ділянки русла зі зворотнім похилом дна ($i_o<0$):

$$\frac{dh}{dl}=\frac{i_o+\frac{Q^2}{K^2}}{\frac{\alpha Q^2 B}{g\omega^3}-1}. \tag{2.30}$$

- для ділянки русла з горизонтальним дном ($i_o=0$):

$$\frac{dh}{dl}=\frac{\frac{Q^2}{K^2}}{\frac{\alpha Q^2 B}{g\omega^3}-1}; \tag{2.31}$$

За аналогією отримаємо рівняння для фільтраційних підземних потоків. Для цього, в першу чергу, розглянемо рівномірний рух рідини, який є окремим випадком плавнозмінного руху. При такому русі лінії струменів паралельні лінії дна, і тому похил вільної поверхні i протягом всього потоку однаковий і рівний

похилу дна i_0.

Швидкість ґрунтових вод для рівномірного руху набуває вигляду:

$$V_0 = K_\phi i \ , \tag{2.32}$$

а витрата відповідно буде:

$$Q = \omega_0 V_0 = \omega_0 K_\phi i \, , \tag{2.33}$$

де ω_0 – площа поперечного перерізу ґрунтового потоку при рівномірному русі h_0 , м^2.

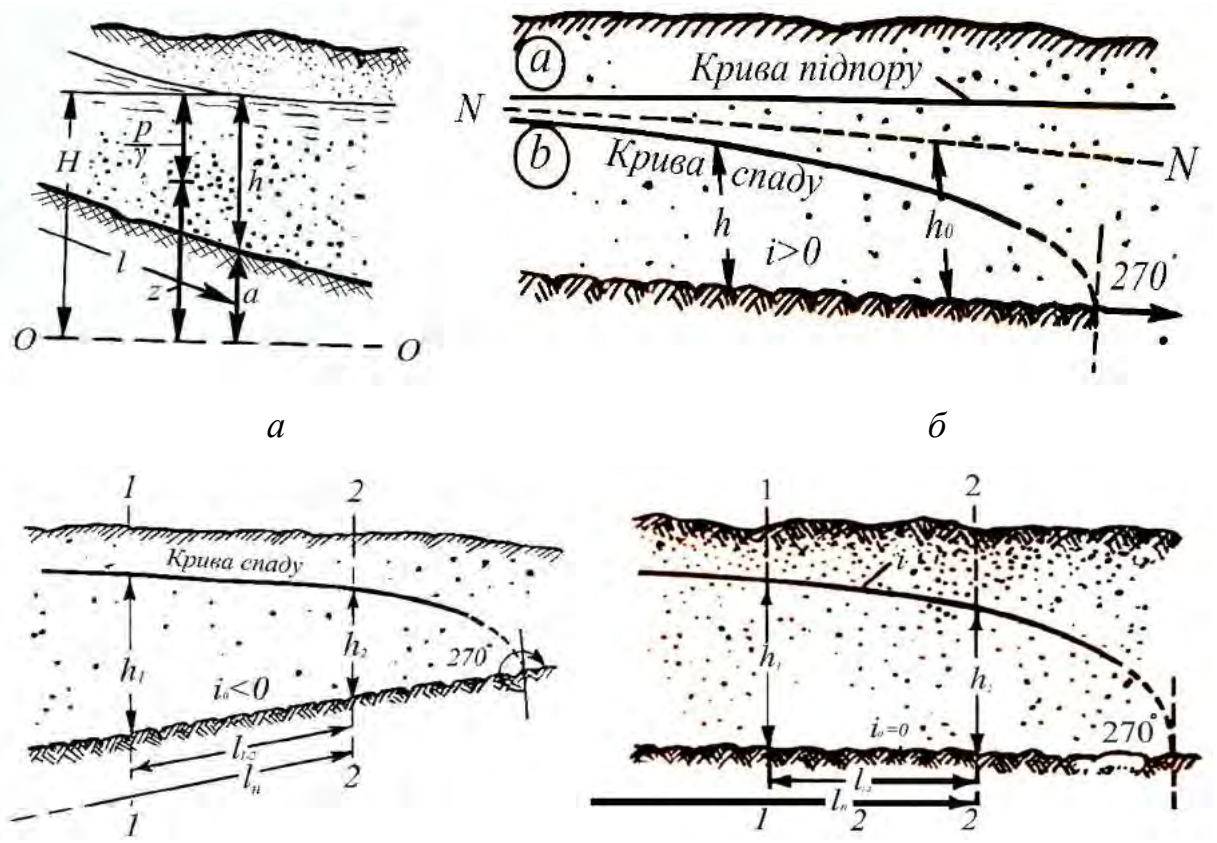


Рисунок 2.6 – Формування фільтраційного потоку та типи кривих його вільної поверхні: *а* – визначення напору ґрунтового потоку; *б* – типи кривих вільної

поверхні на ділянці з прямим похилом; *в* – крива вільної поверхні на ділянці зі зворотнім похилом; *г* – крива вільної поверхні на ділянці з горизонтальним дном.

Термін «живий перетин» для ґрунтового потоку має умовний характер. Під живим перетином приймається вся площа поперечного перерізу фільтра, ґрунтовий потік рухається вздовж водоупору з постійною витратою. Ґрунтові потоки зазвичай бувають значної ширини, в зв'язку з чим можна розглядати плоску задачу.

Для плоского ґрунтового потоку його питома витрата $q = \frac{Q}{b}$, м^3/добу·м, буде

$$q = K_ф h_0 i\,, \tag{2.34}$$

де h_0 представляє собою нормальну глибину потоку, м.

У практиці рівномірний рух ґрунтових вод зустрічається рідко, представлені рівняння будуть використані як допоміжні, при розрахунках нерівномірного руху ґрунтових вод.

Розглянемо плавно змінний ґрунтовий потік в призматичному руслі. В основу розрахунків використаємо формулу Дюпюї:

$$V = -K_ф \frac{dH}{dl}\,. \tag{2.35}$$

Для напору можна представити

$$H = z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g}\,, \tag{2.36}$$

де швидкісним напором $\frac{\alpha V^2}{2g}$, ураховуючи на його мализну, можна знехтувати; при плавному змінюється русі (рис. 2.6, а) у всіх точках поперечного перерізу:

$$z + \frac{P}{\gamma} = a + h\,, \tag{2.37}$$

де h – глибина ґрунтового потоку в перерізі, що знаходиться на відстані від деякого початкового перетину;

a – відмітка підстильного шару в тому ж перерізі, віднесена до умовної площини відліку $O-O$, тому можна прийняти $H = a + h$ та

$$I = -\frac{dH}{dl} = -\frac{da}{dl} - \frac{dh}{dl} = i_0 - \frac{dh}{dl}, \tag{2.38}$$

де $i_0 = -\frac{da}{dl}$ – похил основи (знак «мінус» вказує на те, що зі збільшенням i відмітка a зменшується). Тоді формула (2.35) може бути представлена у вигляді:

$$V = K_\phi \left(i_0 - \frac{dh}{dl} \right), \tag{2.39}$$

а рівняння для витрати ґрунтового потоку у вигляді:

$$Q = \omega V = K_\phi \omega \left(i_0 - \frac{dh}{dl} \right). \tag{2.40}$$

Помножимо обидві частини рівняння (2.40) на довільний позитивний похил i і введемо відповідну йому витрату, яку можна визначити за формулою рівномірного руху:

$$Q' = K_\phi \omega i' . \tag{2.41}$$

Тоді замість (2.40) будемо мати:

$$Qi' = Q' \left(i_0 - \frac{dh}{dl} \right), \tag{2.42}$$

звідки отримаємо:

$$\frac{dh}{dl} = i'\left(\frac{i_0}{i'} - \frac{Q}{Q'}\right). \tag{2.43}$$

Рівнянням (2.43) скористаємося для дослідження форм кривих вільної поверхні ґрунтового потоку або кривих депресії. При прямому похилі підстилаючого шару ($i_0 > 0$) рівняння (2.43) приводиться до вигляду:

$$\frac{dh}{dl} = i_0\left(1 - \frac{Q}{Q'}\right). \tag{2.44}$$

Фіктивна витрата Q' приймає змінне значення $Qi' = K_\phi \omega i'$, відмінне від дійсного значення витрати $Q = K_\phi \omega_0 i_0$.

Провівши для даної витрати Q лінію нормальних глибин *N-N* (рис. 2.6, б), можна отримати дві зони області руху ґрунтового потоку: зону *a* при глибинах $h > h_0$ і зону *b* при $h < h_0$. При наявності трубчатих дрен має місце зона *b*, $h < h_0$ і в даному випадку $\omega < \omega_0$, то згідно (2.44) $\frac{dh}{dl} < 0$, тобто глибина ґрунтового потоку вниз за течією зменшується і крива вільної поверхні буде кривою спаду. У цьому випадку дослідження другої похідної показує, що крива вільної поверхні буде своєї увігнутістю спрямована вниз. Далі можна встановити, що при $h \to h_0$ отримаємо $\frac{dh}{dl} \to 0$, у верхній своїй частині крива вільної поверхні має за асимптоту лінію нормальних глибин *N – N*. Коли $h \to 0$, то $\frac{dh}{dl} \to \infty$ і крива вільної поверхні становить з лінією підстилаючого шару кут у 270^0. В цій зоні і поблизу неї порушена основна передумова про плавну змінність руху ґрунтового потоку.

У випадку, коли зворотний похил підстилаючого шару (i_0<0) (рис. 2.6, в) приймаємо $i_0 = -|i_0|$ і рівняння (2.43) набуває вигляду до рівняння

$$\frac{dh}{dl} = -|i_0|\left(1 + \frac{Q}{Q'}\right), \tag{2.45}$$

яке дає тільки $\frac{dh}{dl} < 0$, отже, глибина h завжди тільки зменшуються, і є лише одна форма кривої вільної поверхні – крива спаду. Друга похідна також буде завжди негативною, і тому можна зробити висновок, що крива вільної поверхні на всьому протязі звернена увігнутістю вниз. При $h \to 0$ рівняння дає $\frac{dh}{dl} \to \infty$, при $h = 0$ дотична до кривої вільної поверхні, як і у попередньому випадку (рис. 2.6, б), перетинає лінію підстилаючого шару під кутом у 270°. При $h \to \infty$ маємо $\frac{dh}{dl} \to -|i_0|$, крива вільної поверхні асимптотично прагне до горизонтальної прямої.

Рівняння витрати при нульовому похилі отримаємо з (2.40), прийнявши i_0=0, у вигляді

$$Q = -K_\phi \omega \frac{dh}{dl}\ , \tag{2.46}$$

з якого видно, що $\frac{dh}{dl}$ повинна бути тільки $\frac{dh}{dl} < 0$. Крива вільної поверхні матиме тільки одну форму – крива спаду (рис. 2.6, г).

Потік ґрунтових вод в дренувальному шарі дорожньої конструкції формується також в призматичному руслі. Фільтраційний потік між дренажними прорізями можна розділити на дві зони 1І та 2І або 1ІІ та 2ІІ (рис. 2.7), крива поверхні яких (крива депресії) складається з двох кривих спаду.

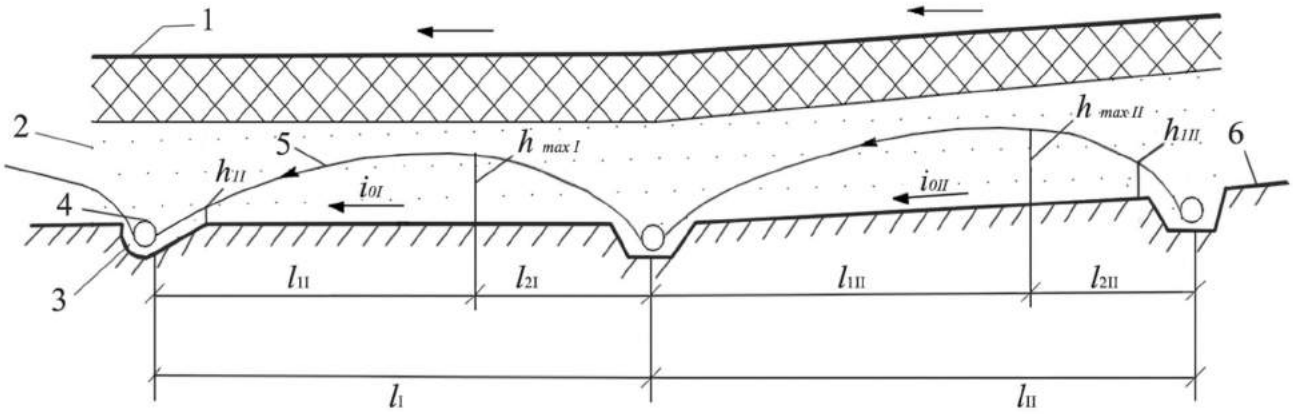


Рисунок 2.7 – Формування міграції води в дренувальному шарі на ділянці з поздовжнім похилом більшим за поперечний: *1* – покриття; *2* – основа; *3* – дренажна траншея; *4* – дренажна труба; *5* – крива депресії; *6* – земляне полотно

У періоди максимального водонасичення глибина фільтраційного потоку підвищується, набуваючи виду кривої спаду з максимальною його глибиною h_{max}.

Кожна зона потоку має змінну глибину h та довжину ділянки l, де формується депресивна крива його поверхні, від глибини h_{max} до глибини на вході в дренажну прорізь $h_{i,}$.

Глибина h_{max} не повинна перевищувати допустимої межі, що залежить від товщини $h_{д}$ дренувального шару та якості дренувального матеріалу, щоб попередити перезволоження шарів покриття та утворення деформацій на покритті.

Дренувальний шар під покриттям розмерзається раніше від скидів води з прорізів. Навесні, режим роботи поперечних ДМЗ буде відповідати режиму накопичення та поглинання вологи, що обумовлене збільшенням глибини h_{max} шару вільної води, від якого залежить відстань між дренажними прорізями та, відповідно, витрата води в дренувальних шарах. Витрата води Q залежить перш за все від глибини h фільтраційного потоку та поздовжнього похилу ділянки дороги.

Прийнявши спрощення щодо похилу депресивної кривої фільтраційного потоку в дренувальному шарі [123] $\frac{dh}{dl}=I_{сер}$ та замінивши характеристики K, C, R для відкритого русла на відповідні параметри фільтраційного потоку, зокрема

$K = K_{\phi}\Delta h$, отримаємо загальне рівняння для відстані між дренажними прорізями (b=1м) з урахуванням наявності двох зон фільтраційного потоку з кривими спаду

$$L_n = \sum_{i=1}^{2} l_i \,, \tag{2.47}$$

де l_i – довжина зони фільтраційного потоку, м.

Для цього виразимо величину швидкості течії фільтраційного потоку через витрату, за рівнянням, згідно [123]:

$$Q_i = V\varepsilon p\omega \,, \tag{2.48}$$

де ε – коефіцієнт, який враховує утворення в порах дренувального шару застійних областей водного потоку;

p – пористість дренувального шару.

ω можна представити на 1 м по ширині b проїзної частини $\omega = h_i$, таким чином на ширину поперечного профілю:

$$Q_i = V\varepsilon p h_i \,, \tag{2.49}$$

При усталеному русі, коли в певному перетині глибина фільтраційного потоку досягає h_{max}, із розрахунку на 1 м ширини корита витрату можна визначити як:

$$Q_i = q_p l_i \,, \tag{2.50}$$

де q_p – розрахунковий питомий надлишок води;

l_i – довжина ділянки від перетину з глибиною h_{max} до трубчастої дрени, м.

На основі формули (2.49) та (2.50) отримаємо:

$$V\varepsilon ph_i = q_p l_i, \tag{2.51}$$

Швидкість потоку визначимо зі співвідношення (2.51):

$$V = \frac{Q}{\omega} = \frac{q_p l}{\varepsilon pbh} = \frac{q_p l}{\varepsilon ph}. \tag{2.52}$$

З урахуванням припущень щодо рівномірної фільтрації, які були попередньо прийняті, втрату енергії можна виразити через співвідношення:

$$i_w = \frac{V_\phi^{\,2}}{K_\phi^2} \tag{2.53}$$

де i_w – втрата енергії на одиницю довжини фільтраційного потоку;

V_ϕ – швидкість фільтрації, м/с.

Для виразу швидкості фільтрації V_ϕ через дійсну середню швидкість течії води скористуємося виразом (2.48):

$$V_\phi = \varepsilon pV. \tag{2.54}$$

Співвідношення (2.53) з урахуванням перетворень можна представити у вигляді:

$$i_w = i_t = \frac{V_\phi^2}{K_\phi^2} = \frac{\varepsilon^2 p^2 V^2}{K_\phi^2} = \frac{q_p^2 l^2}{K_\phi^2 h^2}. \tag{2.55}$$

Тоді, на основі рівняння (2.29), отримаємо:

$$I_{сер} = \frac{i_o - \frac{q_p^2 l^2}{K_ф^2 \Delta h^2}}{1 - \frac{\alpha q_p^2 l^2}{g\varepsilon^2 p^2 \Delta h^2}}. \qquad (2.56)$$

Аналогічним чином можна отримати рівняння для ділянок зі зворотнім поздовжнім похилом. Провівши певні розрахунки та скорочення з виразом (2.56), отримаємо рівняння для визначення довжини l_i в зонах формування фільтраційного потоку:

- на ділянці дороги з прямим (поздовжнім) похилом ($i_o>0$):

$$l_i = \sqrt{\frac{i_o - I_{сер}}{\frac{q_p^2}{\Delta h^2}\left(\frac{1}{K_ф^2} - \frac{\alpha I_{сер}}{g\varepsilon^2 p^2}\right)}}, \qquad (2.57)$$

- на ділянці дороги зі зворотнім похилом ($i_o<0$):

$$l_i = \sqrt{\frac{|i_o| + I_{сер}}{\frac{q_p^2}{\Delta h^2}\left(\frac{\alpha I_{сер}}{g\varepsilon^2 p^2} - \frac{1}{K_ф^2}\right)}}, \qquad (2.58)$$

- на ділянці дороги з похилом ($i_o=0$):

$$l_i = \sqrt{\frac{I_{сер}}{\frac{q_p^2}{\Delta h^2}\left(\frac{\alpha I_{сер}}{g\varepsilon^2 p^2} - \frac{1}{K_ф^2}\right)}}, \qquad (2.59)$$

де $K_ф$ – коефіцієнт фільтрації дренувального шару, м/добу;

$I_{сер}$ – середній похил кривої депресії, залежить від різних типів ґрунту;

q_p – розрахункова витрата фільтраційного потоку, що надходить в дренувальний шар, м^3/добу на м^2, для перезволожених ділянок автомобільних доріг можна визначити на основі довідника [80];

$\Delta h = h_{max} - h_i$.

У роботі [52] розглянуто особливості розрахунку дренувальних шарів поблизу увігнутих переломів поздовжнього профілю дороги. У нижній частині ділянки дороги вільної води в дренувальному шарі більше, ніж у верхній, що пов'язано з її фільтрацією уздовж осі дороги. М. Б. Корсунським рекомендовано визначати кількість води, що надходить за добу в дренувальний шар (на 1 м^2 проїзної частини), за формулою:

$$q_{увіг} = q_p K_{пер}, \tag{2.60}$$

$K_{пер}$ – коефіцієнт, що характеризує накопичення води в переломі поздовжнього профілю.

Якщо похили ділянки біля перелому профілю мають однакове направлення, то коефіцієнт $K_{пер}$ пропонується визначати за номограмою, залежно від зіставлення похилів $\frac{i_1 - i_2}{i_2}$ та характеристики піску $\frac{K_ф i_2}{P}$.

При зустрічних похилах поздовжнього профілю коефіцієнт розраховують за формулою:

$$K_{пер} = 1 + \frac{K_ф \left(T_{зап} + 1\right)}{2P}\left(i_1 + i_2\right), \tag{2.61}$$

$T_{зап}$ – час запізнення початку роботи випусків води, доба;

i_1 та i_2 – відповідно поздовжній похил вище та нище перелому профілю;

P – пористість піску.

Таким чином, при розрахунку прорізів поблизу увігнутих вертикальних кривих пропонується збільшувати питомий надлишок вільної води за допомогою коефіцієнта $K_{пер}$. У рівняннях (2.57) та (2.58) не враховується взаємовплив процесу формування фільтраційного потоку у 1 та у 2 зонах на ділянці I або II (рис. 2.7). Тому за рівняннями (2.57) та (2.58) можна отримати мінімальне допустиме значення відстані між дренажними прорізями.

При розрахунку перехідних ділянок, що сполучають призматичні русла на ділянках переломів похилу дна, відстань від перетину з глибиною h_{maxII} до нижньої дрени (зона 1 рис. 2.7) доцільно визначати за формулою (2.57), а відстань від верхньої дрени до перетину h_{maxI} за формулою (2.58), як мінімально допустиме. З метою отримання відстаней в умовах, наближених до реальних в дренувальних шарах доцільно використовувати метод В.І. Чарномського, який пропонується у роботі [124]. Цей метод заснований на числовому інтегруванні основного диференціального рівняння нерівномірного руху в енергетичній формі (2.21)

$$\frac{dE}{dl} = i_0 - i_t . \tag{2.62}$$

Відстань $l_{1\text{-}2}$ між перетинами з глибинами h_1 і h_2 визначається згідно залежності:

$$l_{1-2} = \frac{E_2 - E_1}{i_0 - i_{tcp}}, \tag{2.63}$$

де $E_2 = h_2 + \dfrac{\alpha Q^2}{2g\omega_2^2}$ – питома енергія перерізу з глибиною h_2;

$E_1 = h_1 + \dfrac{\alpha Q^2}{2g\omega_1^2}$ – питома енергія перерізу з глибиною h_1;

i_{tcp} – середній похил тертя на ділянці,

$$i_{tcp} = \frac{i_{t1} + i_{t2}}{2}, \tag{2.64}$$

де $i_{t1} = \frac{Q^2}{K_1^2}$, $i_{f2} = \frac{Q^2}{K_2^2}$.

Для отримання більш надійних результатів рекомендується брати на ділянці русла якомога більше число проміжних перетинів. Тоді довжина кривої вільної поверхні між перетинами з глибинами $h_{поч}$ і $h_{кін}$ буде дорівнювати сумі відстаней між усіма прийнятими перетинами:

$$l_{кр} = l_{1-2} + l_{2-3} + \cdots + l_{(n-1)-n}, \tag{2.65}$$

де $l_{2-3} + \cdots + l_{(n-1)-n}$ – визначаються аналогічно відстані l_{1-2}, причому $h_1 = h_{поч}$, а $h_2 = h_{кін}$.

Такий підхід зменшує похибку, що виникає при заміні дійсного похилу тертя його осередненим значенням на ділянці між двома перетинами.

Спираючись на запропонований у роботі [124] метод, отримаємо залежність для визначення відстані між дренажними прорізями, яка буде мати збільшене значення за рахунок взаємовпливу зон 1 та 2 (рис. 2.7) та, відповідно, похилу тертя (2.64). Відповідно до формули (2.64) та рівняння (2.55), по аналогії з рівняннями (2.29) та (2.30), отримаємо

$$i_{w\,сер} = i_{t\,сер} = \frac{1}{2}\left(\frac{q_p^2 l_{ji}^{\,2}}{K_ф^2 h_i^{\,2}} + \frac{q_p^2 l_{ij}^{\,2}}{K_ф^2 h_j^{\,2}} \right), \tag{2.66}$$

та

$$I_{сер} = \frac{i_o - \frac{q_p^2}{2K_ф^2}\left(\frac{l_{ji}^{\,2}}{\Delta h_i^{\,2}} + \frac{l_{ij}^{\,2}}{\Delta h_j^{\,2}} \right)}{1 - \frac{\alpha q_p^2 l_{ji}^{\,2}}{g\varepsilon^2 p^2 \Delta h_i^{\,2}}}, \tag{2.67}$$

де перший індекс, *i* або *j*, відповідає зоні кривої депресії на ділянці між прорізями, а другий – ділянці дороги з відповідним поздовжнім похилом (рис. 2.7), приймається – *i*=1 та *j*=2.

Також можна отримати рівняння для ділянки зі зворотнім поздовжнім похилом. Довжина зони від перерізу з глибиною h_{max} до нижньої дрени на ділянці дороги з прямим (поздовжнім) похилом ($i_o>0$) можна визначити за рівнянням:

$$l_{ij} = \sqrt{\frac{i_o - I_{сер} - \frac{q_p^2}{2K_ф^2}\frac{l_{ji}^2}{\Delta h_i^{\,2}}}{\frac{q_p^2}{\Delta h_j^{\,2}}\left(\frac{1}{2K_ф^2} - \frac{\alpha I_{сер}}{g\varepsilon^2 p^2}\right)}}. \tag{2.68}$$

Довжина зони від нижньої дрени до перерізу з глибиною h_{max} на ділянці дороги зі зворотнім похилом ($i_o<0$) можна визначити за рівнянням:

$$l_{ji} = \sqrt{\frac{|i_o| + I_{сер} + \frac{q_p^2}{2K_ф^2}\frac{l_{ij}^2}{\Delta h_j^{\,2}}}{\frac{q_p^2}{\Delta h_i^{\,2}}\left(\frac{\alpha I_{сер}}{g\varepsilon^2 p^2} - \frac{1}{2K_ф^2}\right)}}. \tag{2.69}$$

Загальна максимальна відстань між дренажними прорізями, з урахуванням особливостей формування фільтраційного потоку, визначається за формулою (2.47) або

$$L_n = l_{ij} + l_{ji} \tag{2.70}$$

Дренажні прорізі, як правило, влаштовують у місцях перелому поздовжнього профілю. Таким чином необхідно визначити максимально допустиму величину відстані від верхньої дрени до нижньої або від верхніх дрен до нижньої, на угнутій ділянці, для забезпечення водовідведення з застійних зон дренувальних шарів.

Загальна відстань між дренажними прорізями на ділянках зміни поздовжнього профілю, з урахуванням наявності двох зон фільтраційного потоку з кривими спаду, визначається

- на ділянці від верхньої дрени до нижньої дрени, що влаштована в місці перелому поздовжнього профілю,

$$L_n = l_{ij} + l_{jj}, \tag{2.71}$$

де l_{jj} визначається за рівнянням (2.57), l_{ij} – за рівнянням (2.68).

- на ділянці від дрени, що влаштована в місці перелому поздовжнього профілю, до нижньої від неї дрени

$$L_n = l_{ii} + l_{ji}, \tag{2.72}$$

де l_{ii} визначається за рівнянням (2.58), l_{ji} – за рівнянням (2.69).

Визначимо початкові та межові умови для реалізації рівнянь (2.57) – (2.59) та (2.68), (2.69). Для цього попередньо перетворимо рівняння (2.43), ввівши нову змінну

$$z^x = \frac{Q}{Q'}, \tag{2.73}$$

де x – довільно обраний показник ступеня.

Приймемо, як і у випадку наземних потоків, наступний зв'язок між dh і dz: $dh = a dz$, де $a = \frac{dh}{dz} \approx \frac{\Delta h}{\Delta l} = \frac{h_2 - h_1}{z_2 - z_1}$.

Тоді, розв’язуючи рівняння (2.43) щодо dl, отримаємо:

- для прямого похилу (i_0>0) дна

$$dl = \frac{a}{i_0}\frac{dz}{1-\frac{1}{z^x}} = \frac{a}{i_0}\frac{\left(1-z^x\right)-1}{1-z^x}dz = \frac{a}{i_0}\left(1-\frac{1}{1-z^x}\right)dz\,, \qquad (2.74)$$

або остаточно

$$dl = \frac{a}{i_0}\left(1-\frac{dz}{1-z^x}\right); \qquad (2.75)$$

- для зворотного похилу (i_0<0) дна

$$dl = -\frac{a}{|i_0|}\frac{dz}{1+\frac{1}{z^x}} = -\frac{a}{|i_0|}\frac{\left(1+z^x\right)-1}{1+z^x}dz = -\frac{a}{|i_0|}\left(1-\frac{1}{1+z^x}\right)dz = \frac{a}{|i_0|}\left(-1+\frac{1}{1+z^x}\right)dz \qquad (2.76)$$

або

$$dl = \frac{a}{|i_0|}\left(-dz+\frac{dz}{1+z^x}\right); \qquad (2.77)$$

- для горизонтальних ділянок ($i_0 = 0$)

$$dl = -\frac{a}{i'}z^x dz\,, \qquad (2.78)$$

де i' – довільний позитивний похил.

Проведемо інтегрування отриманих рівнянь на ділянці довжиною $l_{1-2} = l_2 - l_1$, де l_1 и l_2 – відстані від якогось нульового створу до початкового і кінцевого створів розглянутої ділянки. Отримаємо формули для визначення довжини l_{1-2}:

- для прямого похилу i_0>0

$$l_{1-2} = \frac{a}{i_0}\{z_2 - z_1 - [\Phi(z_2) - \Phi(z_1)]\}, \quad (2.79)$$

де $\Phi(z) = \int \frac{dz}{1 - z^x} + C$;

- для зворотного похилу (i_0<0)

$$l_{1-2} = \frac{a}{|i_0|}\{-(z_2 - z_1) + [F(z_2) - F(z_1)]\}, \quad (2.80)$$

де $F(z) = \int \frac{dz}{1 + z^x} + C$;

- для горизонтальних ділянок (i_0=0)

$$l_{1-2} = \frac{a}{i'}[f(z_2) - f(z_1)], \quad (2.81)$$

де $f(z) = \int z^x dz + C$.

Рівняння ґрунтових потоків (2.79 – 2.81) можна представити у більш простому вигляді:

- для i_0>0

$$l_{1-2} = \frac{a}{i_0}[\varphi(z_2) - \varphi(z_1)], \quad (2.82)$$

де $\varphi(z) = z - \Phi(z)$;

- для i_0<0

$$l_{1-2} = \frac{a}{|i_0|}[\varphi'(z_2) - \varphi'(z_1)], \quad (2.83)$$

де $\varphi'(z) = -z + F(z)$;

- для i_0=0 рівняння лишається в колишньому вигляді (2.81).

У випадку, коли ґрунтовий потік формується в дренувальному шарі у «правильному» руслі з поперечним перетином, наближеним до прямокутної форми $\omega = bh$, $z^x = \frac{Q'}{Q} = \frac{k\omega i'}{k\omega_0 i} = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{h}{h_0}$. Позначимо $\frac{h}{h_0} = \eta$, тоді $a \approx \frac{\Delta h}{\Delta \eta} = \frac{h_2 - h_1}{\left(h_2 - h_1\right)/h_0} = h_0$. Відповідно розрахунок кривої депресії за рівняннями (2.81 – 2.83) для «правильних» русел можна проводити, приймаючи $a = h_0$; $z = \frac{h}{h_0} = \eta$.

При розрахунках можна прийняти припущення, що ґрунтовий потік має велику ширину в порівнянні з глибиною і його можна замінити на плоский з прямокутною формою русла та прийняти в рівняннях (2.81 – 2.83) x=1. У цьому випадку функції (2.81 – 2.83) приймають найбільш просту форму:

$$\left.\begin{array}{l} \varphi(\eta) = \eta + \ln(\eta - 1) + C \quad при \quad \eta > 1 \\ \varphi(\eta) = \eta + \ln(1 - \eta) + C \quad при \quad \eta < 1 \end{array}\right\}; \tag{2.84}$$

$$\varphi'(\eta) = -\eta + \ln(1 + \eta) + C; \tag{2.85}$$

$$f(\eta) = \frac{\eta^2}{2} + C. \tag{2.86}$$

З урахуванням прийнятих спрощень рівняння (2.81 – 2.83) можна представити у наступній формі:

- для i_0>0 при $\eta < 1$ (спад)

$$l_{1-2} = \frac{h_0}{i_0}\left(\eta_2 - \eta_1 + \ln\frac{1 - \eta_2}{1 - \eta_1}\right); \tag{2.87}$$

- для i_0 <0

$$l_{1-2} = \frac{h_0}{|i_0|}\left(\eta_1 - \eta_2 + \ln\frac{\eta_2 + 1}{\eta_1 + 1}\right); \tag{2.88}$$

- для $i_0 = 0$

$$l_{1-2} = \frac{K_ф}{2q_p}\left(h_1^2 - h_2^2\right). \tag{2.89}$$

Останнє рівняння отримано шляхом заміни довільного похилу i' в рівнянні (2.89) виразом $\frac{q}{kh_0}$ згідно з формулою рівномірного руху $q = kh_0 i'$. Отримані спрощені рівняння є початковими для розрахунку рівнянь (2.57 – 2.59) з використанням умови $h_{\max} < h_0$.

В якості початкових умов для h_{max} можна використати співвідношення між питомою витратою та коефіцієнтом фільтрації.

Згідно [123] при невідомій довжині потоку l витрата фільтраційного потоку може визначатися за залежністю: $q_p = K_ф I_{сер} \frac{h_{\max} + h}{2}$

за умови $h \to 0$ приймемо:

$$q_p = K_ф I_{сер} \frac{h_{\max}}{2}, \tag{2.90}$$

на ділянках з похилом

$$q_p = K_ф \left(-i_0 - \frac{I_{сер}}{2} \right) h_{\max}, \tag{2.91}$$

для глибини

$$h_{\max} = q_p \Big/ K_ф \left(-i_0 - \frac{I_{сер}}{2} \right). \tag{2.92}$$

Для визначення відстаней між прорізями лишається відкритим питання щодо визначення глибини на вході в дренажну прорізь h_i. Зона входу фільтраційного потоку в прорізь має перетин з найменшою глибиною та, відповідно, з найбільшою

швидкістю. Для прямокутної форми поперечного перетину фільтраційного потоку по відношенню до h_i при b=1м отримана формула:

$$h_i = \sqrt[3]{\frac{\alpha q_p^2 l_i^2}{g p^2 \varepsilon^2}}, \tag{2.93}$$

При малих витратах q_p глибина $h_i \to 0$.

2.4 Визначення часу водовідведення дренажними конструкціями мілкого закладання

Одним із важливих показників ефективної роботи дренажних конструкцій мілкого закладання (ДКМЗ) є час водовідведення, визначення якого залежить від таких факторів, як питомий надлишок води, що надходить в конструкцію, втрати за рахунок фільтрації в дренувальних шарах та властивостей матеріалів-наповнювачів дренажних траншей. В загальному випадку при змінному напорі підземного потоку рівняння балансу має вигляд:

$$\Omega dz = q_P dt - q_{вит} dt, \tag{2.94}$$

де $q_{вит}$ – витрата витоку води, м^3/добу;

Ω – площа потоку в плані, м^2;

dz – зміна рівня потоку за час dt, який, відповідно визначається за залежністю

$$dt = \frac{\Omega dz}{q_p - q_{вит}}. \tag{2.95}$$

Для використання наведених залежностей (2.94 – 2.95) необхідно знати як змінюється за часом витрата притоку та закономірність зміни площі живого перетину, зокрема глибини потоку.

Витрата притоку для дренажних конструкцій відповідає питомому надлишку води, що надходить в дренажну конструкцію, визначається згідно розрахунку за [79] або підбирається за [80].

Загальну витрату в дренувальному шарі, згідно припущень (1.43) та на ширину потоку b=1 м, можна визначити за формулою:

$$\Omega dz = V_{ф}\omega\tau_{нас} = K_{ф}\frac{z}{L_{п}}\tau_{нас}dz, \qquad (2.96)$$

де $\tau_{нас}$ – час водонасичення дренувального шару, доба.

Час насичення дренувального шару водою $\tau_{нас}$ залежить від властивостей та початкової вологості матеріалу. Згідно натурних спостережень [52], тривалість водонасичення, порівняно з часом осушення навесні, невелика. Згідно методу, запропонованому у роботах [53, 56], час водонасичення залежить від коефіцієнту водонасичення

$$k_1 = \frac{\pi}{4}\frac{q^2_{нас}}{\rho^2_{ск\ \max\ гр}(W_{ПВ} - W_{opt})^2\tau_{нас}}, \qquad (2.97)$$

де $q_{нас}$ – кількість води, яка насичує шар ґрунту за час $\tau_{нас}$, кг/м^2;

$\rho_{ск\ \max гр}$ – максимальна щільність скелету ґрунту за методом стандартного ущільнення, кг/м^3;

$W_{ПВ}$ – повна вологоємність ґрунту, в долях одиниці;

W_{opt} – оптимальна вологість ґрунту, в долях одиниці.

Повну вологоємність ґрунту, розраховують за формулою:

$$W_{ПВ} = \frac{p\cdot\rho_{в}}{\rho_{гр}}, \qquad (2.98)$$

$\rho_{гр}$ – щільність частинок ґрунту, кг/м^3.

Коефіцієнт водонасичення визначається за методом, запропонованим у роботі [56] або за результатами лабораторних випробувань на основі використання приладу для визначення коефіцієнта вологопровідності «Frowag».

Глибина потоку у дренувальному шарі z зменшується за рахунок втрат напору у процесі фільтрації. Втрати напору, згідно формули, запропонованої у роботі [124] та з урахуванням (2.32) припущень для випадку швидкості фільтрації визначаються як

$$h_{вт} = \frac{\Psi V_ф z}{d_e^2} = \frac{\Psi K_ф I_{сер} z}{d_e^2}, \tag{2.99}$$

де d_e – еквівалентний діаметр зерен дренувального матеріалу, м;

ψ – параметр, який залежить від типу матеріалу дренувального шару та кінематичної в’язкості води, м·с, який визначається як:

$$\Psi = \frac{187\gamma_ф (1-p)^2 \nu}{p^2 g}, \tag{2.100}$$

де $\gamma_ф$ – коефіцієнт, який враховує відмінність форми зерен фільтруючого матеріалу від шароподібної, згідно [123];

ν – кінематична в’язкість води, м^2/с.

Таким чином, глибина потоку в дренувальному шарі корегується коефіцієнтом

$$\alpha_z = 1 - \frac{\Psi K_ф I_{сер}}{d_e^2}. \tag{2.101}$$

Середня кількість води, яка насичує дренувальний шар на 1 м ширини перед випуском води через дренажні прорізі, можна визначити за формулою

$$q_{нас} = \rho_в p \frac{L_n}{2} h_{нас}, \tag{2.102}$$

де $h_{нас}$ – максимальна глибина фільтраційного потоку вільної води в дренувальному шарі, залежить віт типу зволоження місцевості та типу дренувального матеріалу [52], м.

Згідно (2.97) та (2.102) можна визначити час водонасичення:

$$\tau_{нас} = \frac{\pi}{16} \frac{\left(pL_n h_{нас} \rho_в\right)^2}{\rho^2_{ск\ \max дш} (W_{ПВ} - W_{opt})^2 k_1}, \tag{2.103}$$

де $\rho_{ск\ \max дш}$ – максимальна щільність скелету ґрунту за методом стандартного ущільнення, дренувального шару, кг/м^3.

Витрату витоку дренажною системою можна визначити за наступною формулою:

$$q_{вит} = z\alpha_z l_{тр} K_{ф\ тр} i_{тр}, \tag{2.104}$$

де $l_{тр}$ – довжина дренажної траншеї на половині проїзної частини, відповідно до проекту та категорії дороги, м;

$K_{ф\ тр}$ – коефіцієнт фільтрації матеріалу-наповнювача дренажної траншеї. м/добу;

$i_{тр}$ – похил дренажної траншеї.

З урахуванням залежностей (2.96–2.101, 2.104), рівняння з визначення часу має наступний вид

$$dt = \frac{\frac{K_ф}{L_n} z\alpha_z \tau_{нас} dz}{q_p - z\alpha_z l_{тр} K_{ф\,тр} i_{тр}}, \qquad (2.105)$$

яке для зручності можна представити в такому вигляді

$$dt = \frac{\beta z dz}{q_p - \gamma z}, \qquad (2.106)$$

де $\beta = \frac{K_ф}{L_n}\alpha_z \tau_{нас}$ на 1 м по ширині потоку;

$\gamma = \alpha_z l_{тр} K_{ф\,тр} i_{тр}$;

середній час водовідведення $t=T$.

Отримаємо формулу для визначення часу водовідведення T шляхом інтегрування (2.106)

$$T = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\beta z dz}{q_p - \gamma z}, \qquad (2.107)$$

а саме

$$T = -\beta\left(\frac{z_2}{\gamma} - \frac{q_p \ln(z_2\gamma - q_p)}{\gamma^2}\right) + \beta\left(\frac{q_p \ln(-q_p + z_1\gamma)}{\gamma^2} + \frac{z_1}{\gamma}\right). \qquad (2.108)$$

Приймемо $z_1 = h_i$ та $z_2 = h_{\max}$. Рівняння з визначення часу водовідведення з дренувального шару, отримане на основі загального рівняння балансу водного потоку, можна представити як

$$T = -\beta\left(\frac{h_{\max}}{\gamma} - \frac{q_p \ln(h_{\max}\gamma - q_p)}{\gamma^2}\right) + \beta\left(\frac{q_p \ln(-q_p + h_i\gamma)}{\gamma^2} + \frac{h_i}{\gamma}\right). \qquad (2.109)$$

Урахування похилу ділянки дороги, де влаштовано поперечний дренаж мілкого закладання, можна виконати за спрощеним підходом: згідно (1.44), величина z_2 приймається як $z_2 = h_{\max} - \delta_i$, де $\delta_i = \frac{i_0 L_n}{2}$.

2.5 Удосконалений метод розрахунку відстані між дренажними прорізями та часу водовідведення для поперечних дренажів мілкого закладання

Для отримання однозначного розв'язку розглядуваної задачі, а саме визначення відстані між дренажними прорізями та часу водовідведення з дренувального шару з початковими та межовими умовами нижче представлено метод їх розрахунку.

1. Всі розрахунки проводяться за вихідними даними (табл. 2.6), які задаються або розраховуються.

Таблиця 2.6 – Вихідні данні для розрахунку відстані між дренажними прорізями та часу водовідведення для поперечних ДМЗ

№	Назва параметра	Позначка	Од. вим.	Примітка (у якому вигляді задається)
1	**2**	**3**	**4**	**5**
1	Поздовжній похил ділянки дороги	i_0	-	числове значення
2	Товщина дренувального шару	$h_{дш}$	м	числове значення
3	Коефіцієнт кількості руху потоку	α	-	числове значення
4	Коефіцієнт, який враховує утворення в порах дренувального шару застійних областей водного потоку	ε	-	числове значення
5	Пористість дренувального шару	p	% або у долях одиниці	числове значення
6	Розрахунковий питомий надлишок води, що надходить в дренувальний шар	q_p	$м^3$/добу на м	числове значення
7	Коефіцієнт фільтрації дренувального шару	$K_ф$	м/добу	числове значення
8	Середній похил кривої депресії, залежить від різних типів ґрунту	$I_{сер}$	-	числове значення
9	Повна вологоємність ґрунту	$W_{ПВ}$	в долях одиниці	числове значення *(розрахунок п.2.4)*

Кінець таблиці 2.6

1	2	3	4	5
10	Оптимальна вологість ґрунту	W_{opt}	в долях одиниці	числове значення
11	Еквівалентний діаметр зерен дренувального матеріалу	d_e	м	числове значення
12	Коефіцієнт, який враховує відмінність форми зерен фільтруючого матеріалу від шароподібної	$\gamma_ф$	-	числове значення
13	Кінематична в'язкість води (в залежності від температури води)	ν	м^2/с	152×10^{-8}
14	Максимальна глибина фільтраційного потоку вільної води в дренувальному шарі	$h_{нас}$	м	числове значення *(залежить від типу зволоження місцевості)*
15	Максимальна щільність скелету ґрунту за методом стандартного ущільнення, дренувального шару	$\rho_{сг\ max\ дш}$	кг/м^3	числове значення
16	Довжина дренажної траншеї, відповідно до проекту та категорії дороги	$l_{тр}$	м	числове значення
17	Коефіцієнт фільтрації матеріалу - наповнювача дренажної траншеї	$K_{ф\ тр}$	м/добу	числове значення
18	Похил дренажної траншеї	$i_{тр}$		числове значення
19	Прискорення вільного падіння	g	м/с^2	9,81
20	Густина води фільтраційного потоку	$\rho_в$	кг/м^3	998
21	Щільність частинок ґрунту	$\rho_{гр}$	кг/м^3	числове значення
22	Коефіцієнт водонасичення	k_1	м^2/добу	числове значення

2. Розраховуються початкові та межові умови. Послідовність розрахунку передбачає визначення параметрів, наведених нижче.

2.1 Визначають нормальну глибину фільтраційного потоку: $h_0 = \dfrac{q_p}{K_ф i_0}$.

2.2 Задають глибину на вході в дренажну прорізь як $h_i = 0$ м. Розраховують максимальну глибину фільтраційного потоку (за формулою (2.92)): $h_{\max} = \dfrac{q_p}{K_ф\left(-i_0 - (I_{сер}/2)\right)}$, при цьому повинна виконуватись умова $h_{\max} < h_0$.

2.3 З урахуванням прийнятих спрощень за рівняннями (2.87), (2.88) и (2.89) визначають початкові відстані зон формування фільтраційного потоку між дренажними прорізями (рис. 2.6):

- для $i_0>0$ $l_{12}=\frac{h_0}{i_0}\left(-\frac{h_{\max}}{h_0}+\ln\frac{1}{1-h_{\max}/h_0}\right)$;

- для $i_0<0$ $l_{21}=\frac{h_0}{|i_0|}\left(\frac{h_{max}}{h_0}+\ln\frac{1}{h_{max}/h_0+1}\right)$;

- для $i_0 = 0$ визначають, як загальну відстань $L_{1-2}=\frac{K_\phi h_{\max}^2}{2q_p}$.

3. Перераховують відстань між поперечними дренажними прорізями.

3.1 Визначають глибину на вході в дренажну прорізь за формулою (2.93):

$$h_i=\sqrt[3]{\frac{\alpha q_p^2 l_i^2}{gp^2\varepsilon^2}}.$$

3.2 Визначають мінімальні відстані зон формування фільтраційного потоку між дренажними прорізями (рис. 2.7):

- на ділянці дороги з прямим (поздовжнім) похилом $i_o>0$ за формулою (2.57)

$$l_1=\sqrt{\frac{i_o-I_{сер}}{\frac{q_p^2}{\left(h_{\max}-h_1\right)^2}\left(\frac{1}{K_\phi^2}-\frac{\alpha I_{сер}}{g\varepsilon^2p^2}\right)}},$$

- на ділянці дороги зі зворотнім похилом $i_o<0$ за формулою (2.58)

$$l_2=\sqrt{\frac{|i_o|+I_{сер}}{\frac{q_p^2}{\left(h_{\max}-h_2\right)^2}\left(\frac{\alpha I_{сер}}{g\varepsilon^2p^2}-\frac{1}{K_\phi^2}\right)}},$$

- - на ділянці дороги з похилом $i_o=0$ $l_{1-2}=\sqrt{\frac{I_{сер}}{\frac{q_p^2}{\left(h_{\max}-h_i\right)^2}\left(\frac{\alpha I_{сер}}{g\varepsilon^2p^2}-\frac{1}{K_\phi^2}\right)}}$.

3.3 Визначають максимальні відстані зон формування фільтраційного потоку між

дренажними прорізями (рис. 2.7):

- на ділянці дороги з прямим (поздовжнім) похилом $i_o>0$ за формулою (2.68)

$$l_{12}=\sqrt{\frac{i_o-I_{сер}-\frac{q_p^2}{2K_ф^2}\frac{l_{21}^2}{\left(h_{\max 1}-h_{11}\right)^2}}{\frac{q_p^2}{\left(h_{\max 1}-h_{21}\right)^2}\left(\frac{1}{2K_ф^2}-\frac{\alpha I_{сер}}{g\varepsilon^2 p^2}\right)}},$$

- на ділянці дороги зі зворотнім похилом $i_o<0$ за формулою (2.69)

$$l_{21}=\sqrt{\frac{\left|i_o\right|+I_{сер}+\frac{q_p^2}{2K_ф^2}\frac{l_{12}^2}{\left(h_{\max 2}-h_{22}\right)^2}}{\frac{q_p^2}{\left(h_{\max 2}-h_{12}\right)^2}\left(\frac{\alpha I_{сер}}{g\varepsilon^2 p^2}-\frac{1}{2K_ф^2}\right)}},$$

де l_{12}, l_{21} визначаються з п.2.3.

3.4 Визначають загальну відстань між дренажними прорізями за формулою (2.70).

4. Визначають відстань між поперечними дренажними прорізями для ділянок доріг з переломом поздовжнього профілю або для увігнутих ділянок.

4.1 Відстань між дренажними прорізями на ділянці від верхньої дрени до нижньої дрени, що влаштована в місці перелому поздовжнього профілю:

$$L_1=\sqrt{\frac{\left|i_{o1}\right|+I_{сер}}{\frac{q_p^2}{\left(h_{\max 1}-h_1\right)^2}\left(\frac{\alpha I_{сер}}{g\varepsilon^2 p^2}-\frac{1}{K_ф^2}\right)}}+\sqrt{\frac{i_{o1}-I_{сер}-\frac{q_p^2}{2K_ф^2}\frac{l_{21}^2}{\left(h_{\max 1}-h_{11}\right)^2}}{\frac{q_p^2}{\left(h_{\max 1}-h_{21}\right)^2}\left(\frac{1}{2K_ф^2}-\frac{\alpha I_{сер}}{g\varepsilon^2 p^2}\right)}},$$

де довжина зони формування кривої депресії l_{21} визначається з попереднього розрахунку, п.3 для ділянки дороги з прямим (поздовжнім) похилом $i_o>0$.

4.2 Відстань між дренажними прорізями на ділянці від дрени, що влаштована в місці перелому поздовжнього профілю, до нижньої від неї дрени:

$$L_2 = \sqrt{\frac{i_{o2} - I_{сер}}{\frac{q_p^2}{(h_{\max 2} - h_{12})^2}\left(\frac{1}{K_ф^2} - \frac{\alpha I_{сер}}{g\varepsilon^2 p^2}\right)}} + \sqrt{\frac{|i_{o2}| + I_{сер} + \frac{q_p^2}{2K_ф^2}\frac{l_{12}^2}{(h_{\max 2} - h_{22})^2}}{\frac{q_p^2}{(h_{\max 2} - h_{12})^2}\left(\frac{\alpha I_{сер}}{g\varepsilon^2 p^2} - \frac{1}{2K_ф^2}\right)}},$$

де довжина зони формування кривої депресії l_{12} визначається з попереднього розрахунку, п.3 для ділянки дороги зі зворотнім похилом $i_o<0$.

5. Визначають час водовідведення дренувальним шаром з дренажними прорізями.

5.1 Розраховують параметр, який залежить від типу матеріалу дренувального матеріалу за формулою (2.100) $\Psi = \frac{187\gamma_ф (1-p)^2 v}{p^2 g}$.

5.2 Розраховують повну вологоємність ґрунту за формулою (2.98) $W_{ПВ} = \frac{p \cdot \rho_в}{\rho_{гр}}$.

5.3 Згідно (2.103) визначають час водонасичення $\tau_{нас} = \frac{\pi}{16}\frac{\left(pL_n h_{нас}\rho_в\right)^2}{\rho^2_{ск\ \max\ дш}(W_{ПВ} - W_{opt})^2 k_1}$.

5.4 Розраховують допоміжні параметри $\beta = \frac{K_ф}{L_n}\alpha_z \tau_{нас}$, $\gamma = \alpha_z l_{тр} K_{ф\,тр} i_{тр}$ та $\delta_i = \frac{L_n i_0}{2}$. Далі визначають час водовідведення

- на ділянці дороги з похилом $i_o \neq 0$

$$T = -\beta\left(\frac{h_{\max} - \delta_i}{\gamma} - \frac{q_p \ln((h_{\max} - \delta_i)\gamma - q_p)}{\gamma^2}\right) + \beta\left(\frac{q_p \ln(-q_p + h_i\gamma)}{\gamma^2} + \frac{h_i}{\gamma}\right);$$

- на ділянці дороги з похилом $i_o = 0$

$$T = -\beta\left(\frac{h_{\max}}{\gamma} - \frac{q_p \ln(h_{\max}\gamma - q_p)}{\gamma^2}\right) + \beta\left(\frac{q_p \ln(-q_p + h_i\gamma)}{\gamma^2} + \frac{h_i}{\gamma}\right).$$

Для умов І-ї дорожньо-кліматичної зони України, в межах якої має місце максимальний загальний питомий надлишок води, що надходить в дренажну конструкцію, визначено відстань між дренажними прорізями для піщаного дренувального шару. Результати розрахунку наведені у додатку А, п.А.1. Визначено мінімальне та максимальне значення відстані між дренажними прорізями в залежності від поздовжнього похилу ділянки автомобільної дороги, та коефіцієнту фільтрації дренувального шару. На ділянці дороги з поздовжнім похилом i_0=0,025, з коефіцієнтом фільтрації $K_ф$=4,5 м/добу максимальна відстань між прорізями складає до 40 м. Розраховано час водовідведення, при загальному питомому надлишку 25 л/добу на 1 м^2, що складає 1,5 доби. При цьому слід зазначити, що максимальна глибина сформованого фільтраційного потоку h_{max} = 0,2 м, цій величині прямопропорційна відстань між дренажними прорізями, отримана за методом О.Я. Тулаєва (1.50), вона має маленьке значення – до 3 м.

Висновки по розділу 2

1. Природньо-кліматичні фактори впливають на стан автомобільної дороги за рахунок зміни умов водно-теплового режиму та руху транспортних засобів. Вода, різкі коливання температури, вплив великовагового транспорту відіграють ключову роль в життєвому циклі будь-якої транспортної споруди, впливаючи на її транспортно-експлуатаційні характеристики. Визначення комплексного показника якісного стану ґрунтується на сукупності окремих показників, які його всебічно характеризують з урахуванням впливу вагомостей кожного параметру та конструктивного елементу автомобільної дороги. Це враховується в багаторівневій квалиметричній моделі, яка складається з двох основних груп фізичного та функціонального зносу. Показники фізичного зносу змінюються з часом та характеризуються відповідністю певним нормативним показникам і вимогам. Функціональні – з часом не змінюються, але залежать від потреб споживачів транспортних послуг. Вибір кількості рівнів моделі залежить від вагомості техніко-функціональних характеристик ділянки автомобільної дороги. Інформація про ділянку та про складові її властивостей збільшується з зростанням числа рівнів. Їх

оптимальна кількість обумовлює обсяги вимірювань та обчислень при отриманні комплексного показника якісного стану.

2. Результати дослідження дозволили розробити комплексний метод оцінки якісного стану перезволоженої ділянки автомобільної дороги, де необхідно влаштовувати дренажну систему. Розроблений метод ґрунтується на експертному підході визначення фізичних та функціональних показників, кількість яких визначається в залежності від параметрів автомобільної дороги. Обґрунтовано номенклатуру показників якісного стану перезволоженої ділянки автомобільної дороги та сформована модель з оптимальною кількістю показників, які всебічно та в повному обсязі дозволяють охарактеризувати всі її конструктивні елементи за фізичним та функціональним зносом. З урахуванням такої кількості якісних ознак стану автомобільної дороги розроблено математичну модель якісного стану ділянки автомобільної дороги, яка дає можливість привести до єдиного показника моделі всі властивості, тобто трансформувати всі прості властивості за єдиною шкалою. За результатами проведеного дослідження, значення коефіцієнта конкордації $K_{кон} = 0{,}9944$ свідчить про наявність високого ступеню узгодженості думок експертів, що підтверджує надійність вхідних даних до розробленої кваліметричної моделі. Вагомість дренажних конструкцій та системи поверхневого водовідведення складає 15 % для комплексного показника та 20 % для показника фізичного зносу в порівнянні з дорожнім одягом, який є найбільш вагомим та визначальним при прогнозуванні якісного стану ділянки автомобільної дороги.

3. На основі диференційного рівняння нерівномірного плавнозмінного руху рідини у відкритих руслах модифіковано рівняння фільтраційних підземних потоків для призматичних русел, що дозволило отримати залежності для визначення відстані між дренажними прорізями. Досліджено форми кривих вільної поверхні ґрунтового потоку або кривих депресії для ділянок з прямим та зворотнім похилом. Фільтраційний потік в дренувальному шарі дорожньої конструкції формується в призматичному руслі та поділяється на дві зони між дренажними прорізями, крива поверхні яких складається з двох кривих спаду. Отримано залежність для визначення максимально допустимої величини відстані на ділянках

зміни поздовжнього профілю для забезпечення водовідведення з застійних зон дренувальних шарів. Отримано залежність для визначення часу водовідведення, яке враховує приріст втрат фільтраційного потоку з дотриманням умов нерозривності. Для отримання однозначного розв'язку розглядуваної задачі, а саме визначення відстані між дренажними прорізями та часу водовідведення з дренувального шару з початковими та межовими умовами розроблено метод їх розрахунку. Для умов І-ї дорожньо-кліматичної зони України, в межах якої має місце максимальний загальний питомий надлишок води, що надходить в дренажну конструкцію, визначено відстань між дренажними прорізями для піщаного дренувального шару з коефіцієнтом фільтрації 4,5 м/добу, яка складає 40 м. Розраховано час водовідведення при загальному питомому надлишку 25 л/добу на 1 м^2, що складає 1,5 доби.

4. Результати досліджень другого розділу викладено у наступних публікаціях [91, 101, 111, 118, 120, 121].

РОЗДІЛ 3
ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДОРОЖНЬОЇ КОНСТРУКЦІЇ З ДРЕНАЖНИМИ КОНСТРУКЦІЯМИ

3.1 Аналіз методів проектування дорожніх конструкцій

Всередині минулого століття конструкції ДО нежорсткого типу розраховувалися як шаруваті пружні середовища під дією нерухомого навантаження [125–128]. Найбільш поширеним з цих методів є емпіричний метод AASHO без врахування теоретичних основ, що обумовило проблему його адаптації в інших кліматичних умовах для групи ґрунтів [125,127–129].

Більшість закордонних методів використовують показник несної здатності (CBR) ґрунту ЗП та матеріалів шарів основи [125,127–128]. Визначенням НДС конструкцій нежорстких ДО під дією багатоколісних ТЗ в СРСР займалися Б.С. Радовський та А.С. Супрун, які розробили метод розрахунку для визначення напружень, переміщень та деформацій. Однак, в рішеннях, запропонованих [130], не враховувалося накопичення залишкових деформацій, як в шарах покриття, так в шарах основи та ґрунту ЗП.

Дослідженням впливу ТЗ на НДС конструкцій нежорстких ДО займалися такі закордонні вчені, як А.С. Конорьов [131], О.В. Смірнов [132], Steit D.A., Wollyung R.J. [133], Heath A. [134]. А.С. Конорьов отримав формулу, що дозволяла визначити значення коефіцієнту приведення транспортних засобів до розрахункового навантаження [131]:

$$S_m = b(c_1^v)(c_2^M), \tag{3.1}$$

де v – швидкість руху ТЗ, км/год;

M – загальна вага ТЗ, т;

b, c_1, c_2 – емпіричні коефіцієнти, які залежать від індексу рівності покриття.

О.В. Смірнов розглядав НДС суцільних і шаруватих середовищ при динамічному ударі [132], отримав статичне рішення задачі про вплив вертикального навантаження на шарувату конструкцію ДО нежорсткого типу.

Вдосконаленням методу проектування підсилення існуючих нежорстких ДО, з урахуванням перспективних навантажень, займався А.Т. Аміров [135], який розробив відповідну розрахункову схему з урахуванням часткової втрати шаром, що підсилюється, «плитного ефекту» та встановив коефіцієнти перевантаження від великовагових ТЗ.

Прогнозуванням НДС ґрунтового масиву з використанням числових методів займались: О.С. Городецький, М.Т. Кузло, В.В. Семенов, А.Н. Соколовський, С.Б. Ухов, А.Б. Фадєєв, В.А. Флорін, В.К. Цихановський [136–139].

Розрахунком конструкцій нежорстких дорожніх одягів під дією багаторазового навантаженням у рамках пружно-в'язко-пластичній задачі займався Л. Хвоїнський [140]. У роботі [140] враховувалося накопичення залишкових деформацій, як в шарах покриття, так і в шарах основи. Однак запропонований метод не врахував фізичну і геометричну нелінійність роботи матеріалів шарів конструкції, розташування транспортного засобу на проїзній частині, що є визначальними параметрами при проектуванні конструкцій ДО нежорсткого типу.

Новий метод вирішення крайової задачі для складних областей в просторовій постановці для розрахунку нежорстких ДО побудували С.К. Іліополов та М.Г. Селезньов [141], але в цих дослідженнях не був даний прогноз по накопиченню залишкових деформацій.

В Україні розрахунком і конструюванням ДО нежорсткого типу займалися такі вчені: В.М. Ряпухін, І.П. Гамеляк, В.Я. Савенко, Н.В. Павленко, Н.О. Арсеньєва, В.О. Богомолов, В.К. Жданюк, С.В. Богомолов, В.О. Золотарьов, А.К. Приварников, Н.В. Довгополова, Н.В. Сметанкіна, С.В. Угрімов, С.В. Долгополов і ін. [142–150]. І.П. Гамеляк провів широкий спектр досліджень та розробив загальні теоретичні основи з оцінки надійності ДО [148, 149].

За останні роки на автомобільних дорогах України суттєво зросла частка великовагових ТЗ. Тому, як для нових доріг, так і для тих, що експлуатуються,

особливо III-ї категорії, додається проблема міжнародного транзиту, яка допускає навантаження до 130 кН/вісь.

Дослідженням НДС ДО нежорсткого типу з використанням МСЕ в Україні займались Н.О. Арсеньєва [142], Н.В. Довгополова, Н.В. Сметанкіна, С.В. Угрімов, С.В. Довгополов [151–153], які розглядали питання математичного моделювання НДС багатошарових пластин на пружній основі при статичному навантаженні. За результатами числового моделювання НДС конструкцій нежорстких ДО Н.О. Арсеньєвою отримані розрахункові значення напружень в асфальтобетонних шарах покриття з урахуванням їх термопластичних властивостей [142]. Дорожко Є.В. виконав розрахунок НДС тонкого асфальтобетонного шару на цементобетонній плиті з врахуванням часу дії транспортного навантаження та температурного деформування [154]. Однак лишається відкрите питання щодо використання програмного комплексу ANSYS при визначенні НДС ДО з урахуванням впливу та просторового характеру прикладання навантаження.

В.П. Матуа [128, 155, 156] розробив числовий метод розв’язування динамічних задач в просторовій постановці, отримав рішення щодо напружень та переміщень, які виникають в анізотропній і багатошаровій ДК при рухомому навантаженні.

Переважна більшість мережі автомобільних доріг України має нежорстке дорожнє покриття. Але руйнування нежорстких покриттів відбувається не тільки при перевантаженні, а і при деформуванні земляного полотна та основ дорожнього одягу. Більш ефективними заходами підвищення міцності земляного полотна є влаштування армуючих прошарків або регулювання його водно-теплового режиму, ніж збільшення товщини дорожньої конструкції за рахунок верхніх вартісних шарів. Особливо гостро ця проблема постає на ділянках автомобільних доріг з похилом більшим за поперечний, в місцях увігнутих вертикальних кривих за поздовжнім профілем дороги та на переходах з виїмок в насипи, де, як правило, влаштовують дренажі мілкого закладання. На таких ділянках, з метою забезпечення оптимальних термінів осушення основи дорожнього одягу, дорожня конструкція містить трубчасті дренажні прорізі.

Наявність трубчастих дренажів мілкого закладання під шарами дорожнього одягу вимагає розглядати цю проблему з іншого ракурсу. Така дорожня конструкція є нетиповою на відміну від стандартних. Як правило, передбачаються заходи з регулювання ВТР ЗП з наступним підбором параметрів дренажних труб, але без урахування їх впливу на НДС конструкції в цілому. Дренаж повинен забезпечувати не тільки оптимальний режим водовідведення, а також не знижувати міцність дорожньої конструкції.

В роботах [157–161] розглянуто проблеми проектування, будівництва та експлуатації дренажних систем на автомобільних дорогах загального користування. У проектних розрахунках часто використовують емпіричні залежності [157]. Більше уваги приділяється проблемі регулювання водного-теплового режиму дорожніх конструкцій, розподілу систем поверхневого водовідведення [158, 159], впливу стану мокрого покриття та пошкоджених узбіч на безпеку руху [160]. Важливим також є проведення аналізу даних натурних спостережень за дослідними ділянками автомобільних доріг України [161], що дозволило розглянути вплив зміни товщини дренувального шару на загальний модуль пружності дорожнього одягу. Запропоновані в роботах [157–161] методи розрахунків та проектування дренажних систем мілкого закладання, в першу чергу, ґрунтуються на визначенні об’ємів вологонакопичення в земляному полотні та діаметрів трубчастих дрен, а також є основою для розробки технологічних заходів з регулювання водно-теплового режиму дорожньої конструкції.

Однією з нагальних проблем функціонування дренажних систем є екологічні аспекти, обумовлені блокуванням відходами будівельного, сільськогосподарського виробництва [162], забрудненням міської води [163]. Основним напрямком цих досліджень є визначення ефективності використання стійких матеріалів різного походження в дренажних конструкціях. Наведені результати [163] дозволили представити низку заходів на зменшення забруднення поверхневих вод, які містять тверді речовини, важкі метали, але не дають відповіді на питання щодо характеристики НДС дорожньої конструкції з круговими отворами – дренажними трубами. До теперішнього часу взагалі не проводилися дослідження НДС

дорожньої конструкції з урахуванням послаблюючих зон за рахунок наявності круглих отворів – дренажних труб.

Такий підхід щодо розрахунку НДС під дією навантаження в дорожніх конструкціях без наявності трубчастих дрен є загальноприйнятним і ґрунтується, тільки на фізико-механічних властивостях шарів покриття та основи.

Лабораторні дослідження [164] з оцінки впливу труби з високоміцної поліетиленової сталі в дренажі мілкого закладання дали можливість визначити деформацію дорожнього покриття при циклічному навантаженні за рахунок впливу віддзеркалювання обрису труби на шари дорожнього одягу. Щоб запобігти утворенню наступних деформацій, визначалася глибина закладання трубчастої дрени. Але виникає питання відповідності глибини закладання дрени до глибини формування водного фільтраційного потоку під покриттям дорожнього одягу.

При не відповідних фізико-механічних властивостях матеріалів різного походження, недостатніх міцнісних характеристик дренажних труб, може мати місце руйнування самих дрен. Доцільність використання полівінілхлоридних (ПВХ) труб наведено в роботі [142]. Запропоновано новий метод виміру жорсткості зразків ПВХ труб після впливу різних середовищ, наведені експлуатаційні характеристики для використання в ґрунтових середовищах з урахуванням власної маси. Але не вирішеним є питання міцності матеріалу трубчастих дрен від впливу навантаження на етапах влаштування ДК.

Наслідки поступового руйнування, як трубчастих дрен, так і покриття на відносно тривалий термін залишаються майже непомітними, але наявність деформацій сприяє збільшенню вологонакопичення під шарами дорожнього одягу. Відповідно, виникає потреба дослідження розподілу напружень в ДК з трубчастим дренажем мілкого закладання, особливо на етапах влаштування шарів основи дорожнього одягу. Ці шари повинні забезпечувати зменшення прогину покриття від навантаження транспортних засобів та дорожніх машин, а також перерозподіляти напруження на ґрунт земляного полотна до припустимих значень [143, 144]. Але робота цих шарів, їх напружено-деформований стан, не розглядається в комплексі з круглими отворами трубчастих дрен.

Трубчасті дрени від початку експлуатації ділянки автомобільної дороги повинні витримувати стискаючі напруження та зберігати необхідні конструктивні властивості протягом тривалого часу від шарів дорожнього одягу, які розташовані вище, та тимчасових навантажень рухомого складу.

Тому при виконанні розрахунків нестандартних ДК пропонується використати числовий метод – МСЕ, який має ряд переваг, оскільки дозволяє врахувати наявність трубчастих дрен.

МСЕ є методом наближеного прямого визначення невідомих функцій на основі будь-якого варіаційного принципу [165–171]. Запропонований у будівельній механіці, він набув широкого використання у вирішенні різних проблем математичної фізики – в задачах теплопровідності, гідро- та аеродинаміки, фільтрації та інших задачах механіки суцільних середовищ. Найбільш поширеним є метод, пов'язаний з варіаційним принципом Лагранжа і може бути представлений як вдосконалена модифікація методу Рітца, згідно якого переміщення u та v задають у наступному вигляді [172]:

$$u = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i f_{ui}(x,y) \text{ та } v = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i f_{vi}(x,y), \tag{3.2}$$

де α_i – узагальнені переміщення (числа), які необхідно визначити;

f_i – базисні функції, які необхідно задавати в межах площі пластини.

Труднощі застосування методу Рітца полягають у тому, що для тіла складної форми практично неможливо підібрати систему базисних функцій *f(x,y)* у виразі (3.2), яка, для заданої на всьому полі пластини з контуром L (рис. 3.1, а) дозволяла б врахувати різні місцеві особливості її НДС. МСЕ усуває цю проблему.

Для цього пластину розбивають сіткою на окремі елементи кінцевих розмірів, як це показано на рис. 3.1, б. Поле переміщень u та v задають окремо в межах кожного скінченного елемента. В якості узагальнених переміщень приймають переміщення вузлових точок елемента, які позначають як Z_i (рис. 3.1, в*)*

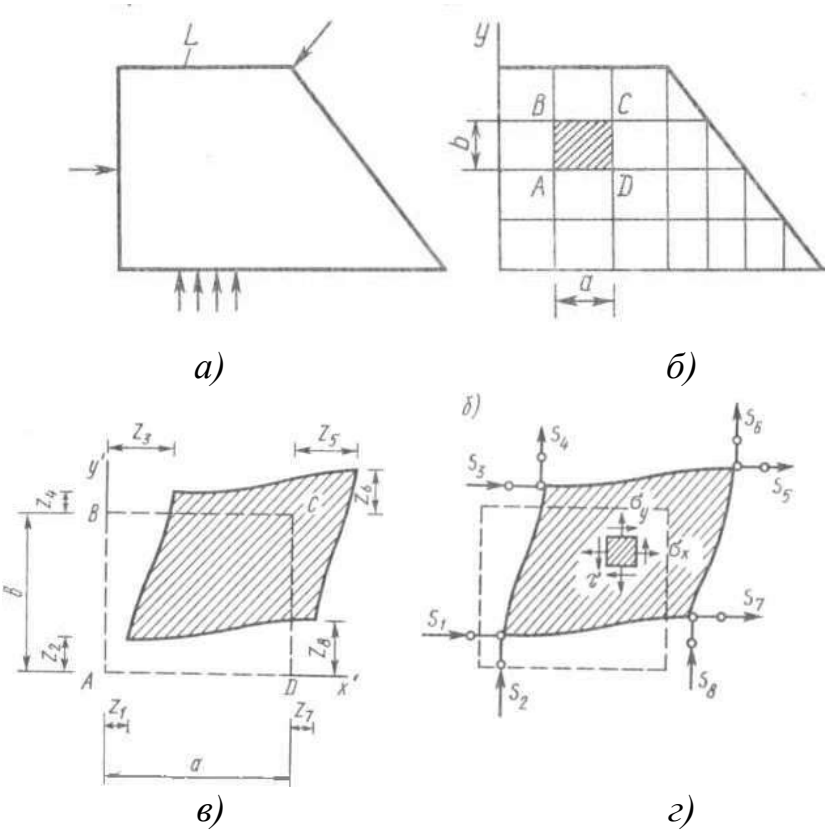


Рисунок 3.1 – Схема переміщень, які повністю визначають деформований стан елемента ABCD [172], де *а)* – контур пластини; *б)* – пластина з елементами ABCD; *в)* – переміщення Z_i; *г)* – сили пружності S_i

Поле переміщень елементу виражають через вузлові переміщення в системі координат $x'y'$, яка пов'язана з елементом (місцевої системи координат)

$$u = \sum_{i=1}^{8} Z_i N_{ui} \text{ та } v = \sum_{i=1}^{8} Z_i N_{vi}\,, \tag{3.3}$$

де $N_{ui} = N_{ui}(x', y')$ та $N_{vi} = N_{vi}(x', y')$ – базисні функції, що задані в межах елемента.

Їх будують так, щоб у відповідних вузлових точках вони мали значення, яке дорівнює одиниці, а в інших вузлах оберталися в нуль. В (3.3) множники Z_i, набувають сенсу як би амплітудного значення для відповідного доданку. Наприклад, вводять такі чотири функції (рис. 3.2):

$$
\begin{aligned}
N_A &= (a - x')(b - y'), \\
N_B &= (a - x')(y' / ab), \\
N_C &= (x'y' / ab), \\
N_D &= (x'(b - y') / ab).
\end{aligned}
\tag{3.4}
$$

Вирази (3.3) записують відповідно до зазначеної властивості базисних функцій:

$$
\begin{aligned}
u &= Z_1 N_A + Z_3 N_B + Z_5 N_C + Z_7 N_D, \\
v &= Z_2 N_A + Z_4 N_B + Z_6 N_C + Z_8 N_D.
\end{aligned}
\tag{3.5}
$$

При такому визначені переміщень енергія деформації елементу, що розглядається, буде повністю визначатися його вузловими переміщеннями $Z_1, ..., Z_8$. Тому співвідношення між узагальненими силами пружності та переміщеннями представляють як:

$$
\vec{S} = R'\vec{Z}, \tag{3.6}
$$

де $\vec{S} = \left[S_1, S_2 ... S_8\right]^T$;

R' – матриця жорсткості скінченного елемента в місцевій системі координат:

$$
R' = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{18} \\ \dots & \dots & \dots \\ r_{81} & \dots & r_{88} \end{bmatrix}. \tag{3.7}
$$

Робота цих сил на переміщеннях $\vec{Z}$ дорівнює роботі внутрішніх сил пружності елемента при будь-яких деформованих станах, що визначаються переміщеннями $\vec{Z}$. Відповідно, узагальнені сили представляють як зосереджені у вузлах елементу таким чином, щоб вони здійснювали роботу на відповідних вузлових переміщеннях Z (рис. 3.1, в).

З теоретичної механіки відомо, що узагальнена сила дорівнює похідній від енергії за узагальненим переміщенням з протилежним знаком. Таку силу

розглядають як силу, протилежно спрямовану силі пружності, тобто врівноважуючи цю силу, відповідно до представленої схеми на рис. 3.1, г. У вузлові точки елементу введені зв'язки, яким відповідають переміщення $Z_1, ..., Z_8$. Виниклі у зв'язках реакції $S_1, ..., S_8$, що врівноважують пружні сили деформованого елементу, і є ті, що знаходяться за допомогою матриці жорсткості R' та співвідношення (3.6). Для цього розглядають окремий вузол сітки скінченних елементів, у якого переміщення будуть Z_k і Z_{k+1} (рис. 3.2).

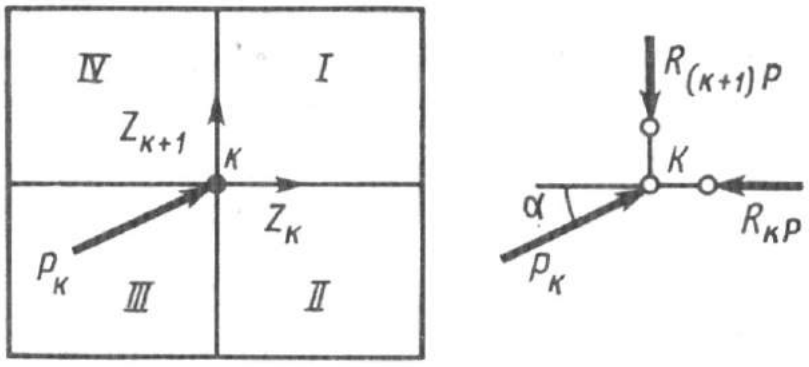


Рисунок 3.2 – Схема окремого вузла сітки скінченних елементів [172]

Він оточений чотирма елементами: I, II, III і IV. Умову рівноваги k-го вузла, згідно з методом Рітца, записують як рівність нулю сумарних узагальнених сил за k-м і $(k + 1)$-м напрямками:

$$S_k + R_{kP} = 0,$$
$$S_{k+1} + R_{(k+1)P} = 0, \tag{3.8}$$

де

$$S_k = \frac{\partial U}{\partial Z_k} = S_k^I + S_k^{II} + S_k^{III} + S_k^{IV}. \tag{3.9}$$

Аналогічно отримують вираз і для S_{k+1}, який показує, що в рівняння рівноваги типу (3.8) входять узагальнені пружні сили тільки від СЕ, що прилягають до вузла. Це визначають з механічної моделі узагальнених пружних сил, представленої на рис. 3.1, г. Це доводять тим, що енергія деформації пластини дорівнює сумі енергій окремих елементів:

$$U = U^{I} + U^{II} + U^{III} + U^{IV} + \Delta U, \tag{3.10}$$

де через ΔU позначена енергія всіх інших елементів, крім *I,..., IV*.

Згідно способу завдання полів переміщень в елементі (3.3), ΔU не залежить від Z_k, і при підстановці U у (3.9) отримують тільки чотири зазначених там доданки.

Якщо для кожного з чотирьох прилеглих до *k*-го вузла елементів побудована матриця жорсткості $R'_I,...,R'_{IV}$, то з рівності (3.6) визначають пружні сили $S_k^I,...,S_k^{IV}$, і, підсумовуючи їх, отримують рівняння (3.8). Вузлова зовнішня сила P_k дає грузові компоненти (як реакції в зв'язках):

$$\begin{aligned} R_{kP} &= -P_k \cos\alpha, \\ R_{(k+1)P} &= -P_k \sin\alpha. \end{aligned} \tag{3.11}$$

У результаті, рівняння, що виражають рівновагу всіх вузлів скінченно-елементної системи, мають вигляд:

$$R\vec{Z} + \vec{R}_P = 0, \tag{3.12}$$

де

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & \dots & R_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ R_{n1} & \dots & R_{nn} \end{bmatrix}; \vec{Z} = \begin{bmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ Z_n \end{bmatrix}, \tag{3.13}$$

де n – загальне число невідомих узагальнених переміщень в конструкції;

R – матриця жорсткості скінченних елементів, що утворюють задану конструкцію.

Кожен елемент її будується шляхом відповідного підсумовування елементів матриць жорсткості, які прилягають до вузла СЕ. СЕ можуть бути побудовані різної форми, для різних видів деформації (плоска задача, вигин пластин, деформації елементу оболонки, стержня і т.і.). Кожен з елементів характеризується його матрицею жорсткості R'. Якщо вони побудовані, то метод скінченних елементів дозволяє за викладеною схемою створювати будь-які композиції з різних скінченних елементів. Причому визначення деформованого стану такої композиції зводиться до складання та розв'язування системи лінійних алгебраїчних рівнянь типу (3.12). В даний час існують автоматизовані комплекси програм, що дозволяють розраховувати за методом скінченних елементів дуже складні конструкції з числом невідомих переміщень, що становить тисячі або навіть десятки тисяч одиниць.

Використання числового моделювання щодо НДС ДК, послабленої трубчастим дренажем, на основі сучасного обчислювального комплексу SCAD, дасть можливість визначити напруження та деформації в зоні тіла трубчастих дрен на стадії влаштування дренувальних шарів.

Вище наведений аналіз обумовлює актуальність та необхідність проведення досліджень з визначення ефективності роботи дренажних конструкцій мілкого закладання (ДКМЗ) на етапі будівництва під впливом дії дорожніх машин.

3.2 Моделювання напружено-деформованого стану дорожньої конструкції на ділянках з трубчастими дренами

Наявність трубчастих дрен, які влаштовують в шарах основи дорожнього одягу на певних ділянках з метою запобігання вологонакопичення, суттєво змінює розрахункову схему при проектуванні дорожньої конструкції. Ці задачі непередбачені в стандартних підходах, згідно [74, 173, 174].

В умовах України дренажні прорізі в ДК з розрахунковою витратою води понад 0,72 м^3/добу влаштовують тільки з трубчастими дренами, згідно [83]. Трубчасті дрени повинні працювати в безнапірному режимі в робочій зоні ЗП, яка сприймає подвійне навантаження від дорожніх машин та власної ваги на етапі

будівництва, від транспортних засобів на етапі експлуатації. В процесі влаштування шарів дорожнього одягу, основне навантаження на дренувальний шар здійснюють дорожні котки, тому основною задачею є визначення технологічних умов за якими забезпечується цілісність дренувальних труб з різних типів матеріалів.

В якості інструментарію для дослідження НДС нетипових дорожніх конструкцій з круглими отворами використовувався проектно-розрахунковий комплекс (ПРК) SCAD Office, який базується на методі скінченних елементів (МСЕ) [175] та призначений для числового дослідження міцності і стійкості широкого класу конструкцій об'єктів будівництва від статичних і динамічних дій. Тип СЕ та його опис міститься в документації до ПРК з посиланням на його номер, тобто ідентифікаційну ознаку в бібліотеці СЕ.

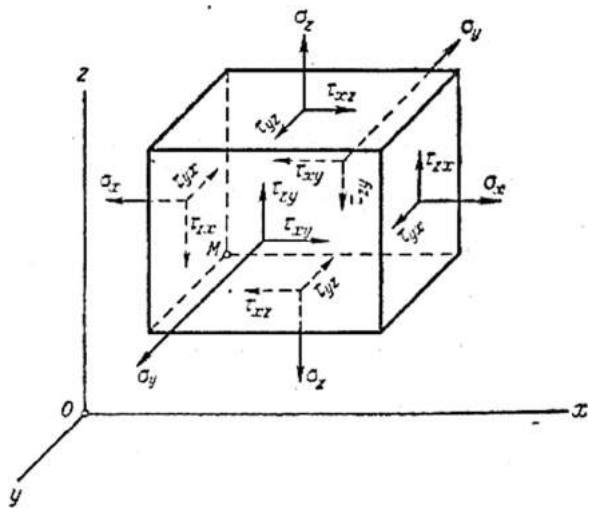


Рисунок 3.3. – Позначення компонентів напружень, по гранях нескінченно малого паралелепіпеда

Для випадку самого найпростішого тіла, а саме для лінійного пружного тіла, зв'язок між компонентами тензорів (і девіатором) напруг та деформацій легко встановити шляхом поширення на загальний випадок просторового напруженого стану в точці, відомих із законів Гука, для одновісного розтягнення-стиснення та чистого зсуву в ідеально пружному тілі [176]. Практична можливість такої екстраполяції виправдовується досвідом для більшості матеріалів, що застосовуються в техніці, при дотриманні наступних умов:

- одночасна наявність всіх компонентів напружень, а також їх дія порізно не переводять матеріал в пластичний стан, тобто матеріал відчуває пружні деформації;
- матеріал вважається ізотропним;
- деформації мізерно малі в порівнянні з розмірами досліджуваного тіла.

Таким чином, наявність всіх компонентів напружень, показаних на рис. 3.3, визначає наступні складові деформації:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E}(\sigma_x - v\sigma_y - v\sigma_z), \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}(\sigma_y - v\sigma_x - v\sigma_z), \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}(\sigma_z - v\sigma_x - v\sigma_y) \end{aligned} \tag{3.14}$$

$$\begin{aligned} \gamma_{xy} &= \frac{1}{G}\tau_{xy}, \\ \gamma_{yz} &= \frac{1}{G}\tau_{yz}, \\ \gamma_{zx} &= \frac{1}{G}\tau_{zx} \end{aligned} \tag{3.15}$$

де ε_x, ε_y, ε_z, γ_{xy}, γ_{yz}, γ_{zx} – відносні лінійні та кутові деформації;

σ_x, σ_y, σ_z, τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{zx} – нормальні та дотичні напруження;

E – модуль Юнга з головних напрямків пружності;

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

v – коефіцієнт Пуассона, що характеризують поперечне скорочення при стисненні або розширення при розтягуванні в напрямку осей координат та показує напрямок деформації.

У формулах (3.14 та 3.15) складові деформації виражені через складові напруги. Але часто буває необхідно мати також і зворотні залежності, тобто напруги, виражені через деформації.

Однією з найважливіших характеристик моделі СЕ є максимальний діаметр елементів з яким часто пов'язують оцінки похибки методу.

$$h = \max_{e}(\sup_{x,y\in\Omega}|x-y|) \tag{3.16}$$

де h – це мінімальний діаметр кулі, в який можна вкласти будь-який кінцевий елемент розрахункової схеми.

В МСЕ апроксимуючі функції є поліноміальними або частково-поліноміальними (метод підобластей), хоча й існують елементи з дрібно-раціональними (так звані ізопараметричні елементи), тригонометричними, логарифмічними та іншими апроксимаціями поля переміщень. Вибір ступенів свободи елемента і відповідних апроксимуючих функцій повністю визначає швидкість збіжності та оцінку похибки МСЕ [177–180]. Суцільна область Ω, яку займає конструкція, має нескінченне число ступенів свободи, а також апроксимується дискретною моделлю. Дана модель складається із сукупності підобластей, які мають кінцеве число ступенів свободи, що взаємодіють між собою тільки в вузлових точках.

За умови фіксації всіх параметрів розрахункової моделі СЕ, за винятком розміру кінцевих елементів, можна отримати певну послідовність наближених рішень даної задачі, за рахунок зміни цього розміру. Ця концепція моделювання задачі СЕ базується на ефективному та прямому вирішенні задачі розрахунку. В останні роки в деяких подібних програмних системах набув визнання інший тип кінцевого елементу – так званий *p*-елемент. Вони можуть безпосередньо представляти кривизну поверхні та особливості полів напружень на більш простих сітках, що містять менше число елементів. Точність аналізу управляється *p*-рівнем (порядком полінома), присвоєним кожному елементу: вище *p*-рівень – більше точність.

Незважаючи на багато позитивні характеристики *p*-елементів, *h*-елементи мають ряд переваг. Для аналізу глобального поведінки конструкції

використовують *h*-елементи. Вони також краще вирішують задачі, в яких є розриви напружень, як, наприклад, в ребристих пластинах, а також при вирішенні нелінійних задач. Взагалі *h*-елементи пов'язані з детально відпрацьованою обчислювальною технологією, перевіреною часом. Саме виходячи з таких міркувань бібліотека кінцевих елементів ПРК SCAD представлена тільки *h*-елементами.

Для вирішення просторової задачі теорії пружності СЕ допускають такі навантаження:

– зосереджені навантаження, які задаються у вигляді значень сил, що діють в заданому напрямку і прикладених до точки елемента. Навантаження і координати точки її застосування можуть задаватися як в місцевій системі координат елемента, так і в загальній системі координат;

– рівномірно розподілені навантаження, які діють в заданому напрямку і задаються у вигляді інтенсивності сили (величиною сили, що припадає на одиницю об'єму). Навантаження діє по всьому об'єму елемента і може задаватися як в місцевій, так і в загальній системах координат;

– власну вагу, яка діє уздовж осі Z загальної системи координат. Вказується питома вага матеріалу та коефіцієнт обліку власної ваги елемента;

– трапецієподібні навантаження на кінцеві елементи, які діють в заданому напрямку і задаються у вигляді значень інтенсивності сили, відповідних у всіх вершинах елемента. Навантаження діє по всьому об'єму елемента, де вона апроксимується за лінійним законом в кожному з напрямків. Напрямок її дії може задаватися як в місцевій, так і в загальній системах координат. Порядок задавання значень інтенсивності навантаження повинен відповідати порядку нумерації вузлів елемента, наведеним при його описі в даному розділі;

– рівномірно розподілені по межі елемента навантаження, які діють в заданому напрямку. Вони задаються порядковими номерами граней, наведеними при описі елемента, 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;

– температурний вплив у вигляді загального нагріву (охолодження) по відношенню до температури замикання.

У базовій системі одиниць навантажень ПРК SCAD параметри задаються в наступних одиницях виміру [181–184]: зосереджені сили в т., розподілені по площі сили в т/м^2 розподілені за обсягом в т/м^3, температура в градусах Цельсія, прив'язки в м.

Наведемо основні властивості, якими характеризується СЕ:

– геометрична форма – найчастіше є однією з найпростіших геометричних фігур (прямокутник, відрізок прямої, трикутник, чотирикутник, тетраедр і т.і.);

– набір ступенів свободи, які віднесені найчастіше до вузлів – переміщення, повороти і т.і.;

– фізичний закон, що визначає залежність між внутрішніми зусиллями та переміщеннями;

– розмірність простору, який використовується (одновимірна, двовимірна, тривимірна);

– набір вузлів, що розташовані на лініях (поверхнях) розділу елементів і є загальними для межі між ними;

– правила, які визначають залежність між переміщеннями вузлів кінцевого елемента та вузлами системи. Вузли елемента прикріплюються до вузлів системи двома способами: шарнірно або жорстко;

– система функцій апроксимації, які визначені всередині області Ω та дозволяють наближено виразити компоненти переміщень елемента через його ступінь свободи в будь-якій точці;

– класом задач, до яких застосовується даний тип СЕ;

– набір допустимих навантажень та впливів, які можуть бути включені до кінцевого елементу, та способи їх завдання;

– перелік обмежень та рекомендацій щодо застосування.

Можливе існування трьох різних місцевих систем координат на кожному плоскому СЕ:

– система координат осей ортотропії;

– система координат обчислення зусиль і напружень;

– місцева система координат елемента.

Перші дві системи координат збігаються з місцевою системою координат елемента. Місцеві системи координат всіх елементів визначаються згідно порядку нумерації їх вузлів та мають певні особливості, які пов'язані з тим, що поверхня передбачається розташованою в площині XOY або паралельна їй. Елементи плоскої задачі теорії пружності розташовуються в площині XOZ, а довільне положення в просторі можуть займати лише елементи оболонки, які призначені для визначення НДС континуальних об'єктів та масивних просторових конструкцій з однорідного матеріалу [185–194].

Для ізотропного тіла в системі ПРК SCAD реалізовані наступні варіанти пружних властивостей матеріалу:

У кожному з вузлів кінцевих елементів знаходиться по три ступені свободи: *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, ізопараметричними – для інших елементів. Переміщення будь-якої точки суцільного тіла визначається трьома функціями *u*, *v*, *w*, а деформація даної точки визначається шістьма функціями $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$, тобто якщо задані три функції то цим визначаються всі шість складових деформації, так як вони виражаються через перші похідні від складових переміщення. Таким чином, очевидно, що всі шість функцій для компонентів деформації довільно задати не можливо, між ними повинні існувати певні залежності. Число таких залежностей – шість, і вони діляться на дві групи: I група – залежності між складовими деформації в одній площині і II група – залежності між складовими деформації в різних площинах.

В основу фізичної моделі покладено гіпотези, які визначають закон зміни по товщині багатошарової оболонки поперечних дотичних напружень σ_{j3} та нормального напруження σ_{33}, а також поперечної деформації e_{33}:

$$\sigma_{j3} = q_j^+ \frac{h_1 + z}{h} + q_j^- \frac{h_2 - z}{h} + G_{j3}(z) f'_j(z) \psi_j(x_1, x_2), \qquad (3.17)$$

$$\sigma_{33} = q_j^+ \frac{h_1 + z}{h} + q_j^- \frac{h_2 - z}{h} + \phi(z)\, p(x_1, x_2), \qquad (3.18)$$

$$e_{33} = f_3''(z) \psi_3(x_1, x_2), j = 1,2, \qquad (3.19)$$

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

$\psi_s s(x_1, x_2)$ – функції, що дозволяють врахувати поперечний зсув (s = 1, 2) та обтиснення (s = 3). Вони доповнюють класичні функції переміщень $\nu_j(x_1, x_2), (j = 1,2)$ та $w(x_1, x_2)$;

$f_s(z), \phi(z)$ – 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;

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

Допоміжні функції $f_s(z), (s = 1,2,3)$ вибираються виходячи із закону розподілу по товщині оболонки величин $\sigma_{j3} (j = 1,2)$ та σ_{33}, отриманого на основі класичних гіпотез, а функція розподілу поперечних нормальних напружень по товщині шаруватої оболонки $\phi(z)$ призначається з умови безперервності та рівності нулю на зовнішніх поверхнях оболонки $\phi(-h_1) = \phi(h_2) = 0$.

Геометрична модель деформованого стану пружної шаруватої оболонки, отримана зі співвідношень Коші та прийнятих гіпотез і дозволяє висловити значення переміщень в будь-якій точці через значення шуканої функції $v_i(x_1,x_2)$, $w(x_1,x_2)$, $\psi(x_1,x_2)$, має вигляд:

$$u_j(x_1,x_2,z)=v_j(x_1,x_2)-\frac{1}{A_j}z\frac{\partial w}{\partial x_j}+f_j(z)\psi_j(x_1,x_2)-f_3(z)\frac{1}{A_j}\frac{\partial \psi_3}{\partial x_j}+u_j^{(0)} \qquad (3.20)$$

$$u_3(x_1,x_2,z)=w(x_1,x_2)+f_3^{'}(z)\psi_3(x_1,x_2), j=1,2, \qquad (3.21)$$

де $u_j^{(0)}$ – додаткові складові, які відповідають навантаженню зовнішніх поверхонь оболонки тангенціальними навантаженнями.

Така модель дозволяє поряд з переміщеннями, обумовленими на основі класичної теорії оболонок, додатково врахувати переміщення, обумовлені явищами поперечного зсуву та нормального обтиску.

Складові деформації в площині приведення e_{11},e_{22},e_{12} знаходяться при звичайних для пологих оболонок спрощення за формулами Коші через переміщення, а компоненти поперечної деформації за формулою:

$$u_{j3}=\frac{1}{2}\left[f_j^{'}(z)\psi_j(x_1,x_2)+u_{j3}^{(0)}\right], j=1,2. \qquad (3.22)$$

Тензор напружень $\sigma_{ij}(i,j=1,2,3)$ визначається, виходячи з узагальненого закону Гука для ортотропного пружного тіла.

Узагальнені переміщення, складові вектор узагальнених переміщень, можна умовно розбити на дві групи переміщень, що мають однаковий математичний сенс:

а) $v_i,\psi_i(i=1,2)$ – «мембранна» група узагальнених переміщень, що входить у функціонал потенційної енергії з похідними не вище першого порядку;

б) w,ψ_3 – «вигнута» група узагальнених переміщень, що входить у функціонал потенційної енергії з похідними не вище другого порядку.

За умови, що матеріал елементів однорідний по товщині, то при цьому є можливість врахувати різні варіанти пружною симетрії матеріалу. Наведемо їх для площини XOY, використовуючи такі позначення:

ε_x, ε_y, γ_{xy} – відносні лінійні та кутові деформації;

σ_x, σ_y, σ_{xz}, τ_{xy} – нормальні та дотичне напруження;

E_i – модуль Юнга по *i*- му головному напрямку пружності;

G_{ij} – модуль зсуву, що характеризує зміну кута між *i*-м та *j*-м головними напрямками;

v – коефіцієнт Пуассона, що характеризують поперечне скорочення при стисненні або розширення при розтягуванні в напрямку осей координат та показує напрямок деформації.

$\eta_{ij,k}$ – коефіцієнти взаємовпливу першого роду, що характеризують зсуви в площинах, паралельних координатним, під дією нормальних напружень;

$\eta_{k,ij}$ – коефіцієнти взаємовпливу другого роду, що характеризують викликані дотичними напруженнями подовження в напрямках, паралельних координатним осях.

Для ізотропних тіл в системі SCAD реалізовані наступні варіанти пружних властивостей матеріалу:

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

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - v\sigma_y), \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - v\sigma_x), \varepsilon_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy}; \qquad (3.23)$$

б) для плоскої деформації:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{\overline{E}}(\sigma_x - \overline{v}\sigma_y), \varepsilon_y = \frac{1}{\overline{E}}(\sigma_y - \overline{v}\sigma_x), \varepsilon_{xy} = \frac{1}{\overline{G}}\tau_{xy}, \sigma_z = v_{13}\sigma_x + v_{23}\sigma_y \qquad (3.24)$$

$$\overline{E} = \frac{E}{(1-\nu^2)}, \bar{\nu} = \frac{\nu}{(1-\nu)}, \overline{G} = \frac{\overline{E}}{2(1+\nu)}, \nu = \nu_{13} = \nu_{23}. \qquad (3.25)$$

В основу побудови фізичної моделі може бути покладена гіпотеза, якщо не враховується обтиснення шарів, яка визначає закон зміни багатошарової оболонки поперечних дотичних напружень $\sigma_{j3}(x_i, z)$ за товщиною, а також допущення про відсутність поперечних нормальних напружень та деформацій:

$$\sigma_{j3} = G_{j3}(z)\sum_{p=1}^{2} f_{pj}(z)\psi_{pj}(x_1, x_2), \qquad (3.26)$$

$$\sigma_{33}, e_{33} = 0; j = 1,2, \qquad (3.27)$$

де: $\psi_{pj}(x_1, x_2)$ – функції зсуву першого та другого наближень (при $p = 1$ – доповнюють класичні функції переміщень $\nu_j(x_1, x_2)$ 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 за товщиною пакету шарів, які обираються так, щоб задовольнити умови рівності поперечних дотичних напружень на поверхнях контакту шарів, а також 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.

Кінематична модель деформованого стану пружної шаруватого оболонки, отримана з співвідношень Коші та прийнятих гіпотез, яка дозволяє виразити значення переміщень в будь-якій точці через значення шуканої функції $\nu_j(x_1, x_2)$, $w_j(x_1, x_2)$, $\psi_{pj}^{(s)}(x_1, x_2)$ має вигляд:

$$u_j(x_1,x_2,z)=v_j(x_1,x_2)-\frac{1}{A_j}z\frac{\partial w}{\partial x_j}-\sum_{p=1}^{2}f_{pj}(z)\psi_{pj}(x_1,x_2). \qquad (3.28)$$

Така модель поряд з переміщеннями, обумовленими на підставі класичної моделі, додатково враховує переміщення, обумовлені явищами поперечного зсуву, а також тангенціальні навантаження на зовнішніх поверхнях оболонки – при $p = 2$.

Складові деформації в площині приведення e_{ij} знаходяться при звичайних для пологих оболонок спрощення за формулами Коші через переміщення. Компоненти поперечної деформації зсуву визначаються співвідношеннями:

$$e_{j3}=\frac{1}{2}f'_{pj}(z)\psi_{pj}(x_1,x_2),\ j=1,2 \qquad (3.29)$$

Тензор напружень $\sigma_{pj}(i,j=1,2,3)$ визначається виходячи з узагальненого закону Гука для ортотропного пружного тіла.

Узагальнені переміщення, складові вектору узагальнених переміщень, можна умовно розбити на дві групи, що мають однаковий математичний сенс:

а) v_i,ψ_{pi} – «мембранна» група узагальнених переміщень, що входить у функціонал потенційної енергії з похідними не вище першого порядку $(i,p=1,2)$;

б) w – «вигнута» група узагальнених переміщень, що входить у функціонал потенційної енергії з похідними не вище другого порядку.

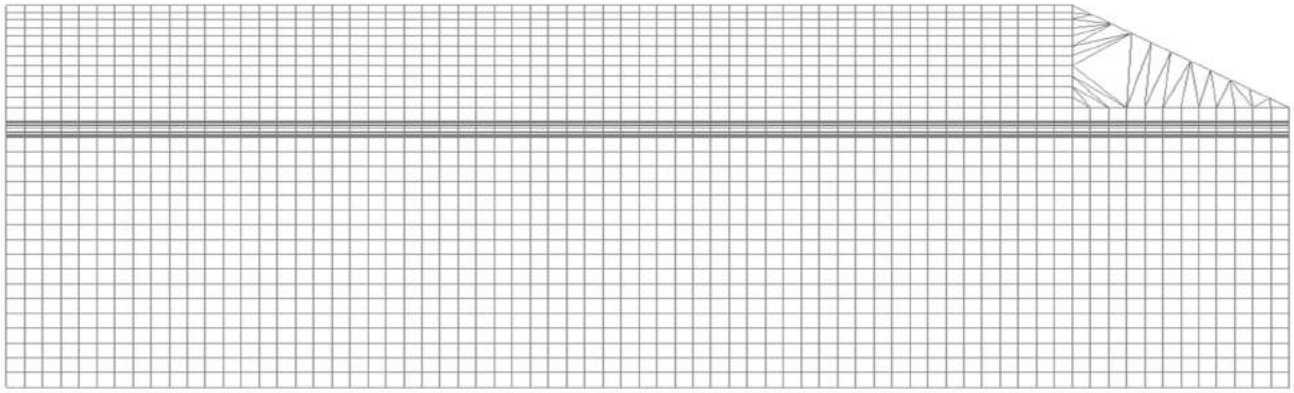
Різні варіанти зовнішніх і торцевих зв'язків (перші визначають закріплення контуру в цілому, а другі – перешкоджають деформації поперечного зсуву на контурі) визначаються відповідними даними. Відзначені ступені свободи, у напрямку яких переміщення або кути повороту дорівнюють нулю. Контур оболонки (пластини) або його частину з певним видом торцевих діафрагм може мати будь-які зовнішні зв'язки, де n та m – нормаль і дотична до контуру, що лежать на поверхні оболонки, ψ_n,ψ_m, – проекції функцій ψ_1,ψ_2 на n та m.

Комбінуючи представлені групи зв'язків, можна розраховувати оболонки і пластини з різними конструктивними особливостями на контурі, тобто межові

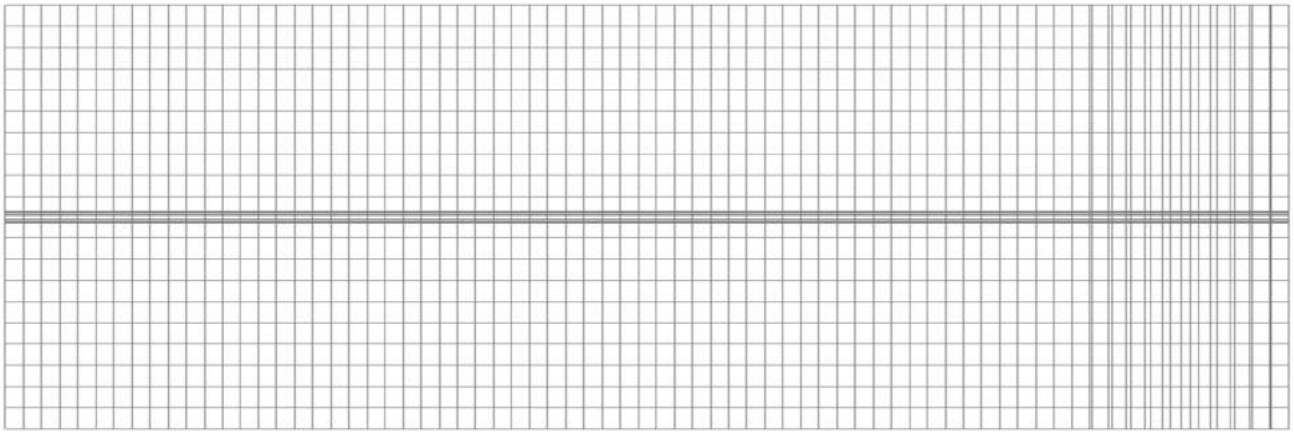
умови дають можливість врахувати різного типу діафрагми жорсткості на торцях конструкції, що значно розширює клас вирішуваних завдань.

В розглянутих СЕ облік впливу обтиску шарів або міжшарових зсувів дозволяє розрахувати навіть одношарові конструкції, які являють собою плити та оболонки середньої товщини.

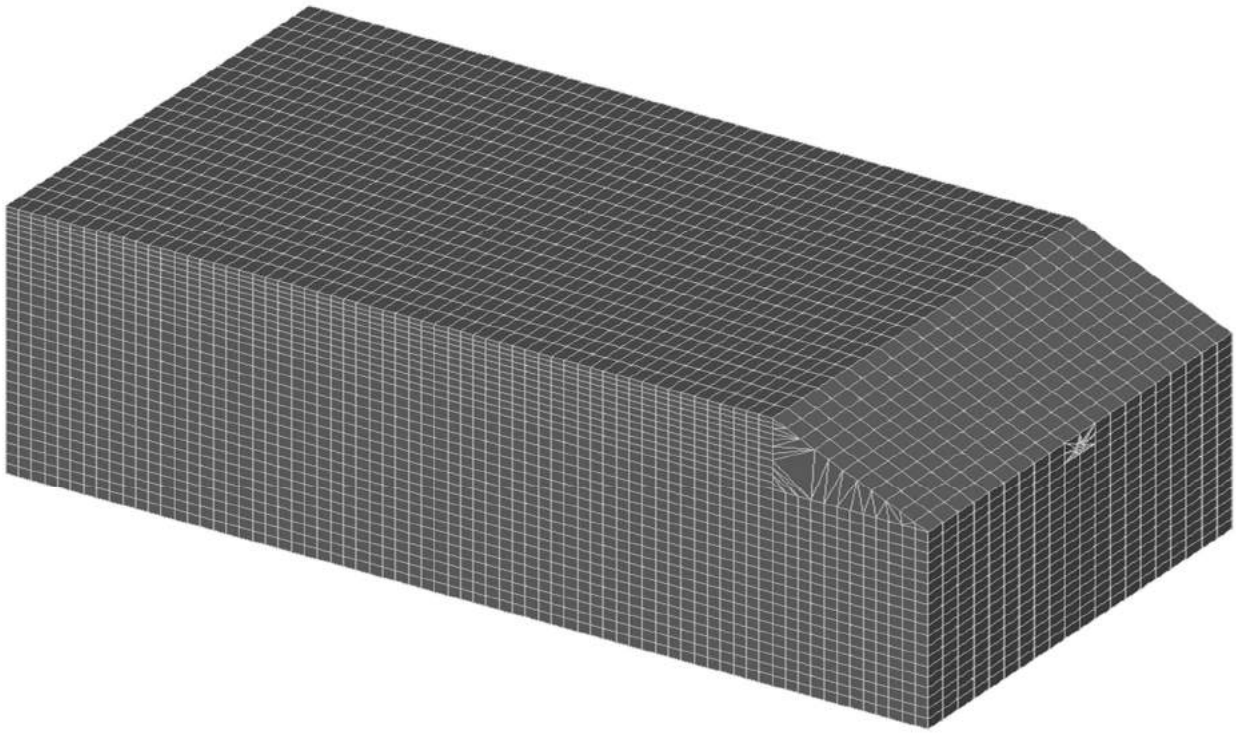
Для моделювання було обрано наступну схему моделі, що складається із вище згаданих СЕ [195–199]: ділянка довжиною 3,6 м, шириною 9,9 м (ширина покриття – 3,5 м; ширина узбіччя – 3,5 м; ширина укосу – 2,9 м; висота конструкції – 3,1 м). Обрана схема моделі є типовим проектним рішення автомобільної дороги ІІІ-ї категорії в розрізі по межі крайньої смуги руху з узбіччям та укосом з похилом 1:1,5. Побудова скінченно-елементних сіток була визначена із умов штампу вальця або пневмошини котка за статичним навантаженням, що регламентується [74, 173] та рекомендаціями керівництва користувача SCAD для забезпечення найменшої похибки розрахунку (рис. 3.4).



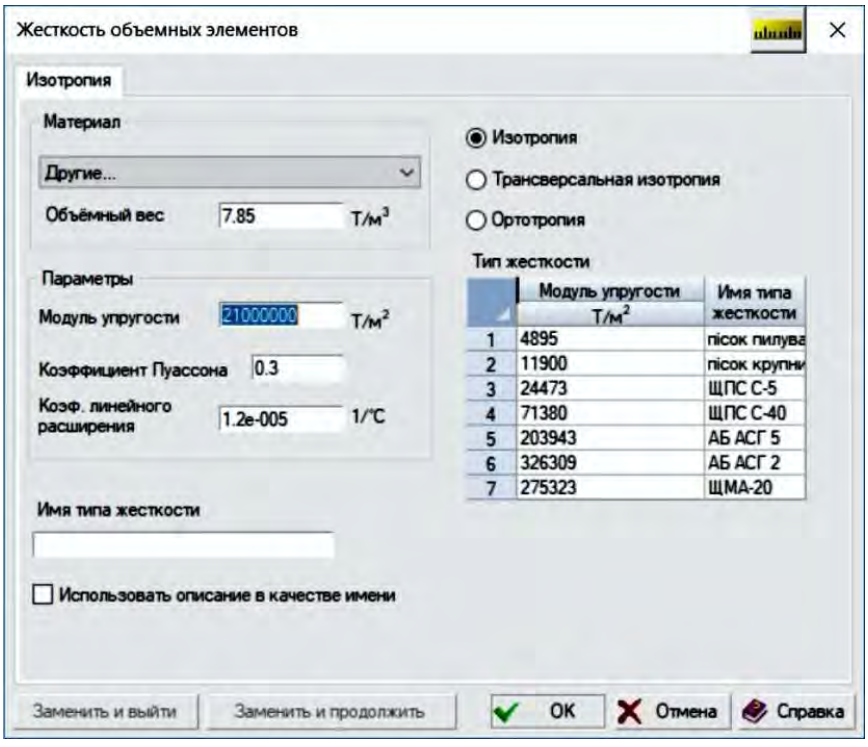
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.4 – Модель ДК з трубчастим отвором: *а* – в поперечному перерізі; *б* – в плані; *в* – в об’ємних елементах; *а* – фізико-механічні характеристики шарів ДК

Для створення моделі ДК з трубчастими отворами виникає задача обмеження переміщень ґрунтового масиву в опорних вузлах (по крайнім граням масиву). Проаналізувавши роботи [175, 200, 201] можна дійти до висновку, що обмеження переміщень по краям моделі значно зменшить деформації по вертикальним крайнім граням ґрунтового масиву. В такій схемі горизонтальні деформації будуть рівними нулю, відповідно і вертикальні будуть зменшуватися ближче до країв моделі [202]. Завдяки достатній товщині ґрунтового масиву в моделі не виникає додаткових зусиль в зоні розташування в'язів.

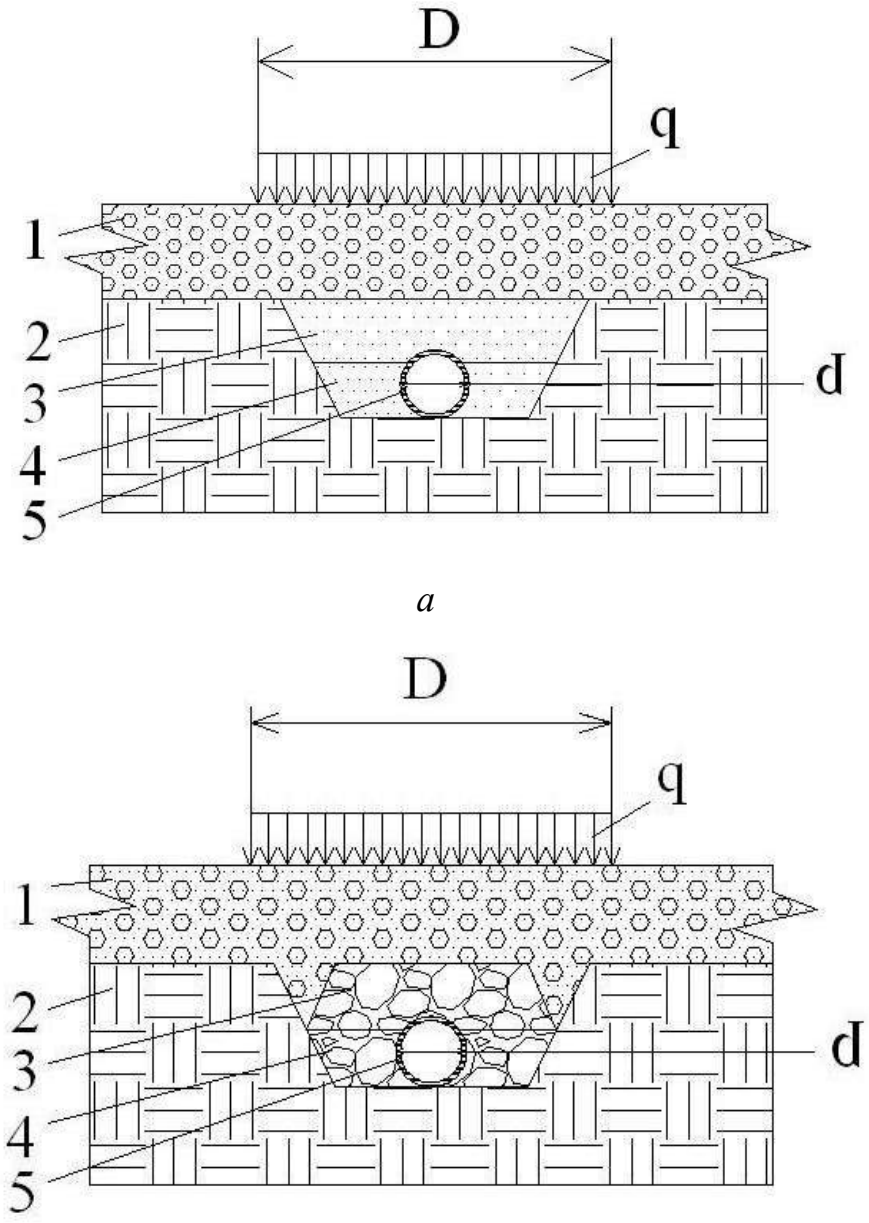
Проблемним питанням є об'єднання траншеї з трубчастим елементом та з суцільною шаруватою ДК. На початковому етапі побудова моделей ДК проводилася в тривимірній системі автоматизованого проектування і креслення AutoCAD, що дозволило врахувати особливості та параметри конструктивних елементів, надалі їх адаптувати в середовищі ПРК SCAD Office.

Для прогнозування НДС дренувальних шарів з поперечним трубчастим ДМЗ на ЗП були проведені серії числових експериментів. При числовому моделюванні розглядуваної конструкції використовувалось навантаження статичне, як найбільш несприятливе за тривалістю при процесі формування вологісного режиму перезволоженого дренувального шару та ґрунту ЗП. Навантаження на вісь приймалось з урахуванням рівномірного розподілу по 6-м вузлам розрахункової сітки по прямокутнику (площа прямокутника відповідає площі штампу). Побудовано моделі тривимірних ДК (без шарів ДО) у відповідності до типів трубчастих дрен (ПВХ або бетонна труба) та матеріалів-наповнювачів дренажних траншей і дренувальних шарів (щебінь або пісок) (табл. 3.1).

Для двох типів матеріалів трубчастих дрен моделювались реальні умови будівництва, які передбачають поетапне ущільнення дренувальних шарів. Враховуючи технологічні особливості, виконання цих робіт в запропонованих розрахункових конструктивних схемах передбачено різні коефіцієнти ущільнення та відповідні модулі пружності дренувальних шарів.

Таблиця 3.1 – Характеристики матеріалів шарів дорожньої конструкції з піщаним та щебеневим дренувальним шаром

№ п/п	Шари дорожньої конструкції	Модуль пружності E, МПа	Товщина шару h, м	Коефіцієнт Пуассона	Питома вага, т/м^3
Дренувальний шар					
1	Пісок середньозернистий	116	0,3	0,3	2,0
	Дренажна траншея №1				
2	Пісок середньозернистий (наповнювач траншеї)	116	0,25	0,3	2,0
3	Дренажна труба ПВХ SN 8, внутрішній діаметр 100 мм, зовнішній діаметр 120 мм.	3600	0,11	0,38	1,4
	Дренажна траншея №2				
2	Щебінь фр. 5–10 мм. (наповнювач траншеї)	240	0,25	0,3	2,4
3	Бетонна труба, внутрішній діаметр 100 мм, зовнішній діаметр 118 мм.	2500	0,118	0,2	2,3
	Земляне полотно				
4	Супісок пилуватий	48	2	0,3	2,0
Дренувальний шар					
1	Щебінь фр. 20–40 мм.	240	0,12	0,3	2,4
	Дренажна траншея №1				
2	Пісок середньозернистий (наповнювач траншеї)	116	0,25	0,3	2,0
3	Дренажна труба ПВХ SN 8, внутрішній діаметр 100 мм, зовнішній діаметр 120 мм.	3600	0,11	0,38	1,4
	Дренажна траншея №2				
2	Щебінь фр. 5–10 мм. (наповнювач траншеї)	240	0,25	0,3	2,4
3	Бетонна труба, внутрішній діаметр 100 мм, зовнішній діаметр 118 мм.	2500	0,118	0,2	2,3
	Земляне полотно				
4	Супісок пилуватий	48	2	0,3	2,0



а

б

Рисунок 3.5 – Моделі дорожніх конструкцій з трубчастим дренажем мілкого закладання: *а* – з трубою ПВХ; *б* – з бетонною трубою; D – діаметр площі відбитку вальця котка (пневмошини), q – рівномірно розподілене навантаження, d – діаметр труби; 1 – дренувальний шар; 2 – ґрунт земляного полотна; 3, 4 – заповнювач траншеї; 5 – трубчаста дрена (табл. 3.1)

Було проведено серію числових експериментів, які включали збільшення нормативного навантаження на 10–50 % при перезволоженні дренажного шару і

ґрунту ЗП (табл. 3.1, ряди 6 та 7), що відповідає реальним умовам роботи автомобільних доріг на певних ділянках.

Для розрахунку напружень та деформацій в ДК з дренувальним шаром та трубчастими дренами (без шарів ДО) необхідно враховувати не тільки власну вагу, а і зміну навантаження від дорожніх машин. При виборі засобів ущільнення під час влаштування дренувальних шарів обов'язково слід враховувати вид матеріалу, його вологість та модуль пружності. До уваги повинні прийматися значення параметрів на початку та в кінці процесу ущільнення. Особливо важливим є прикінцевий етап, на якому відбувається остаточне формування міцнісної структури.

3.3 Визначення технологічних параметрів при влаштуванні щебеневих дренувальних шарів

Дренажні прорізі під дренувальними шарами влаштовують при зв'язних ґрунтах:

- на сирих і мокрих ділянках при поздовжньому похилі більше за поперечний;
- в місцях увігнутих вертикальних кривих і переходах з виїмок в насипу у I та IV дорожньо-кліматичних зонах України;
- в самій нижній частині ділянок доріг, що перебудовують;
- в місцях перелому поздовжнього профілю;
- в районах I дорожньо-кліматичної зони, на ділянках I типу зволоження з поздовжнім похилом $i_0 > 0{,}02$, при відсутності поздовжніх дренажів і укріплювальних смуг на узбіччях, а також на ділянках з $i_0 > 0{,}04$, незалежно від наявності поздовжніх дренажів або укріплювальних смуг.

У поперечному перерізі прорізі дренажна траншея глибиною до 0,2 м з шириною по дну не менше 0,25 м укладають перфоровану трубу від 80 до 120 мм. Як правило, бетонні труби обсипають щебнем фр. 5-10 мм і товщиною шару не менше 0,05 м, труби ПВХ обгортають протизамулюючим ГСМ.

Невелика глибина траншеї рекомендується для запобігання нерівномірного морозного здимання. При меншій глибині струминки води будуть рухатись під

проріззю, при більшій – покриття, безпосередньо над прорізями, буде нерівномірно здиматися.

У плані прорізі влаштовують наскрізними, і якщо їх похил більше 0,03 або висота насипу більше товщини дорожнього одягу то це посилює осушення дренувального шару повітряною аерацією та, відповідно, забезпечує їх переміщення над дном бічних водовідвідних канав не менше ніж на 0,2 м.

При влаштуванні дренувального шару з щебню використовують котки з гладкими вальцями. Рух пухкими ґрунтами даних котків практично неможливо, тому їх застосовують переважно для укатки незв'язних ґрунтів та поверхні ґрунтових основ перед влаштуванням дорожнього одягу.

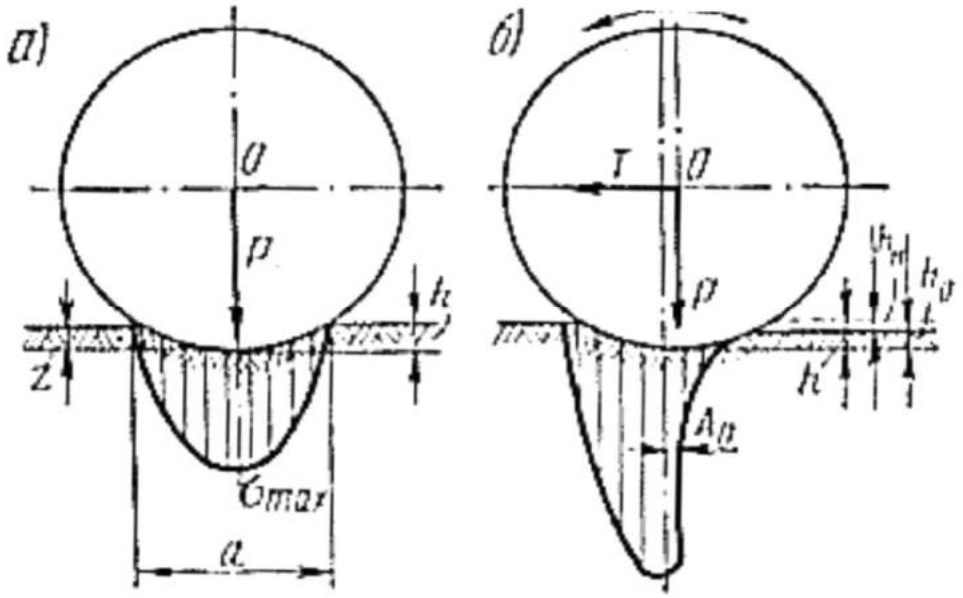


Рисунок 3.6 – Розподіл тисків під жорстким колесом: *а* – за статичного навантаження; *б* – за динамічного навантаження [203].

Для того, щоб стосовно конкретних заданих умов правильно обрати каток, необхідно визначити тиски, які розвиваються на поверхні контакту його з ґрунтом, а також знайти оптимальну товщину шару, що ущільнюється.

Рівняння рівноваги для нерухомого колеса може бути представлено у вигляді (рис. 3.6 *а*):

$$P = 2B\int_0^h \sigma(z)dz, \tag{3.30}$$

де B – ширина колеса.

Якщо відома закономірність розподілу контактних тисків по поверхні контакту, то рішення цього рівняння стає можливим. Однак немає надійних експериментальних даних, які дозволили б отримати розв'язок за такою закономірністю. Тому при вирішенні контактної задачі в такій постановці робляться припущення, з яких набуло поширення:

$$\sigma = Cz^{v}, \tag{3.31}$$

де C та v – відповідно коефіцієнт пропорційності і показник ступеня, які часто вважають константами ґрунту, залежними від його виду і стану.

Якщо припустити, що v = 0,5, то глибина занурення в ґрунт колеса прямо пропорційна наданому на нього навантаженню, що добре узгоджується з дослідними даними. Максимальний контактний тиск можна обчислити, користуючись формулою (3.31), визначивши, що $z = h$, де h – глибина колії від проходу вальця, м. Але користуватися цим методом важко у зв'язку з невизначеністю констант ґрунту C та v. Тому контактні тиски, які розвиваються при укоченні ґрунтів, найкраще знаходити на основі теорії Герца–Бєляєва [73]. В результаті, для розрахунку максимального контактного тиску $\sigma_{\max}$, що виникає при стисненні вальця з площиною, отримана формула:

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\frac{q}{\pi^2 R(\vartheta_1 - \vartheta_2)}}, \tag{3.32}$$

де $\sigma_{\max}$ – максимальний контактний тиск;

q – лінійний тиск, кгс/см^2, $q = \dfrac{P}{B}$;

P – загальне навантаження на колесо, кг;

B – ширина колеса, см;

R – радіус колеса, см;

ϑ_1, ϑ_2 – коефіцієнти пружності колеса та площини, см^2 / кгс.

У загальному вигляді коефіцієнт пружності визначається:

$$\vartheta = \frac{1-\mu^2}{\pi E}, \tag{3.33}$$

де μ – коефіцієнт Пуассона;

E – модуль Юнга.

Аналогічна формула може бути виведена на основі експериментальних або натурних спостережень. Вище згадувалося, що занурення в ґрунт вальця h прямо пропорційне зусиллю, яке діє на нього. Така закономірність добре перевірена досвідом і справедлива не тільки для колісних, а і для сферичних штампів. Тому для випадку вальця має місце рівність:

$$h = \psi q, \tag{3.34}$$

де ψ – відповідний коефіцієнт

Якщо врахувати, що довжина контактної площі з вальцем вираховується за формулою:

$$a \simeq 2\sqrt{2Rh}, \tag{3.35}$$

то лінійний тиск може бути виражено через середній контактний тиск $\sigma_{ср}$ як:

$$q = \sigma_{ср} a, \tag{3.36}$$

Відповідно,

$$\sigma_{ср} = 0{,}35\sqrt{\frac{q}{R\psi}}. \tag{3.37}$$

Для моделювання впливу дорожніх котків на НДС щебеневого дренувального шару з трубчастою дреною було обрано два типи котків з гладкими вальцями: CAT 8 та CAT 13. Основні параметри яких наведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Параметри котків з гладкими вальцями

Тип котків	Вага котка, т	Кількість вальців, од	Статичне лінійне навантаження, кг/см	Ширина вальця, м, B	Діаметр вальця, см, D	Навантаження на валець, кг	Сила, з якою валець діє на поверхню, Н
CAT 8	8,070	2	26,9	1,5	110,8	4035,0	39543
CAT 13	13,2	2	33	2	130,0	6600,0	64680

Глибина активної зони при укоченні дорівнює приблизно двом діаметрам штампа або подвоєному мінімальному поперечному розміру поверхні контакту котка з ґрунтом. Активна зона – це обмежений за глибиною шар ґрунту, нище якого ущільнення під дією власної ваги вже настільки велике, що тиск від зовнішнього навантаження не може його збільшити [204.]. Зважаючи на значну ширину вальця, мінімальним розміром завжди є довжина хорди, що стягує занурену в ґрунт частину окружності вальця, тому для визначення глибини активної зони може бути використано наступний вираз:

$$a = \beta \sqrt{\frac{qR}{E_o}} \tag{3.38}$$

Підставляючи в даний вираз значення модулів деформації E_o, для визначення глибини активної зони отримано наступні формули [203]:

для зв’язних ґрунтів

$$h_o = 0,3 \frac{W}{W_{opt}} \sqrt{qR} \tag{3.39}$$

для незв’язних ґрунтів

$$h_o = 0,4\frac{W}{W_{opt}}\sqrt{qR} \qquad (3.40)$$

де W_{opt} – оптимальна вологість ґрунту, %;

W –вологість ґрунту при ущільненні, %;

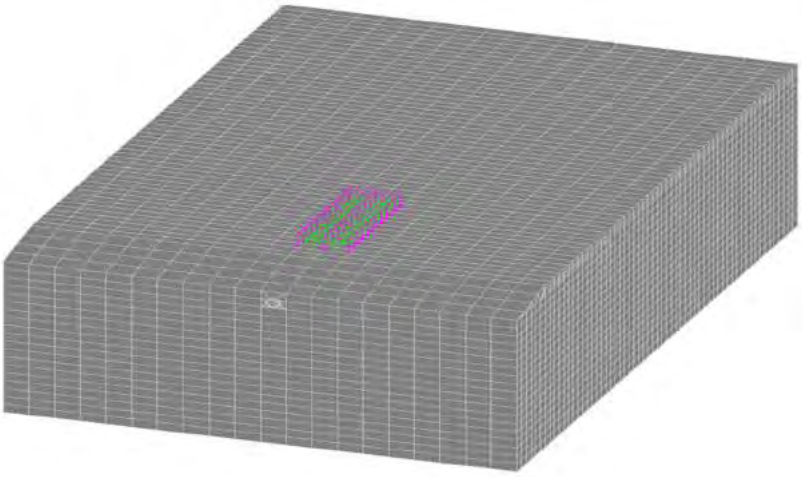
З формул видно, що глибина активної зони, а отже, і оптимальна товщина шару ґрунту, який ущільнюється, в рівній мірі залежать від лінійного тиску і радіусу вальця котка, Тому раціонально використовувати котки з великим діаметром вальців.

Для проведення числових експериментальних досліджень, згідно (3.35) були визначені технологічні параметри для ущільнення щебеневого дренувального шару, які наведені у табл. 3.3.

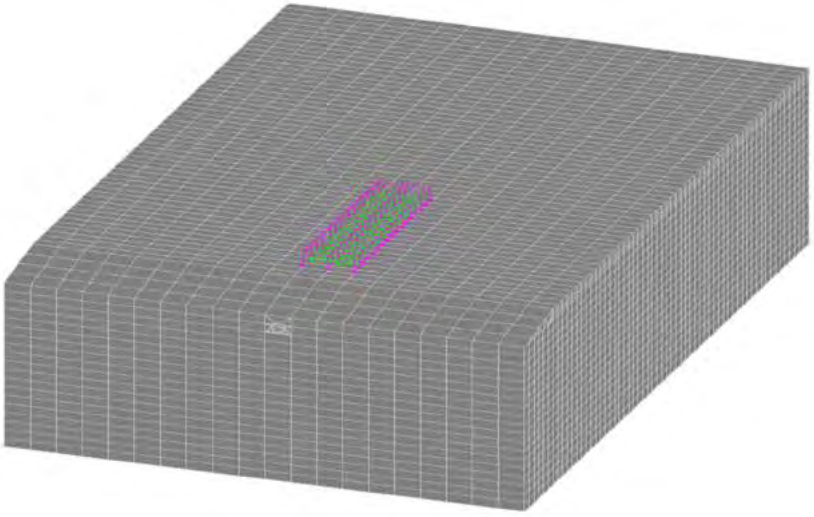
Таблиця 3.3 – Технологічні параметри для ущільнення щебеневого дренувального шару

Тиск вальця на поверхню шару, що ущільнюється, МПа	a, розрахункова довжина штампа, см			S, розрахункова площа штампа, м^2		
	при h=1 см	при h=2 см	при h=3 см	при h=1 см	при h=2 см	при h=3 см
0,12	20	40	40	0,32	0,44	0,56
0,14	20	40	40	0,46	0,64	0,8

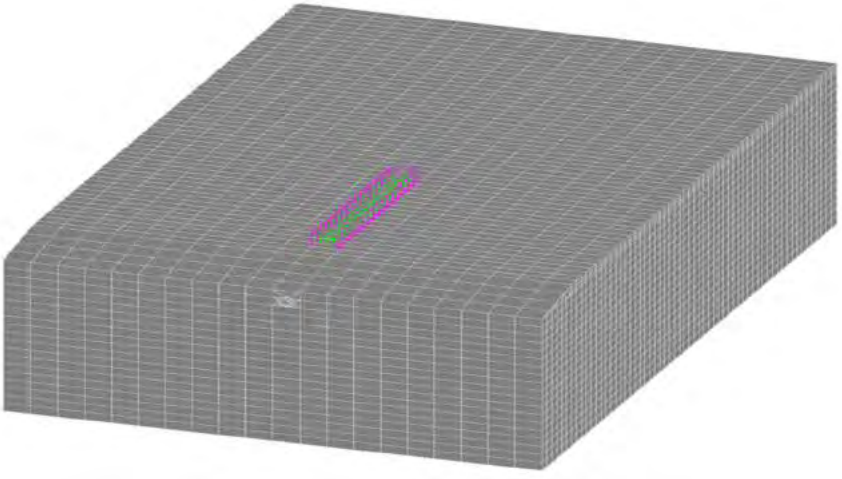
Побудовані моделі ДК у тривимірних елементах з розрахунковою сіткою у відповідності з розмірами штампу вальця котка. Моделі наведені на рис 3.7.



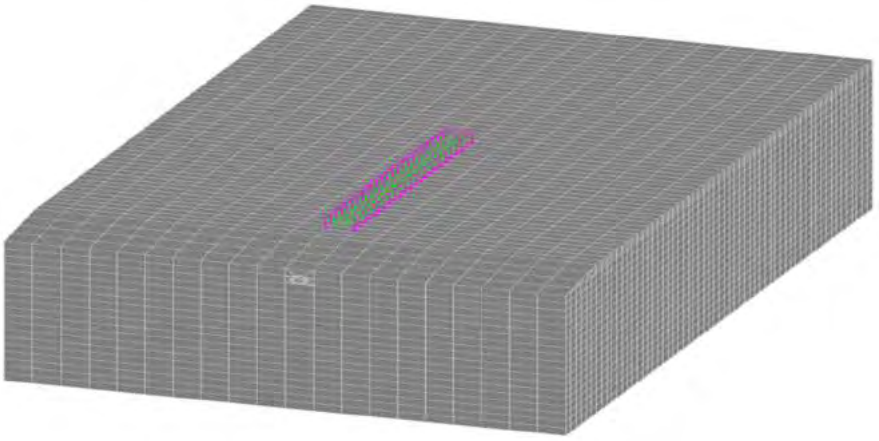
а)



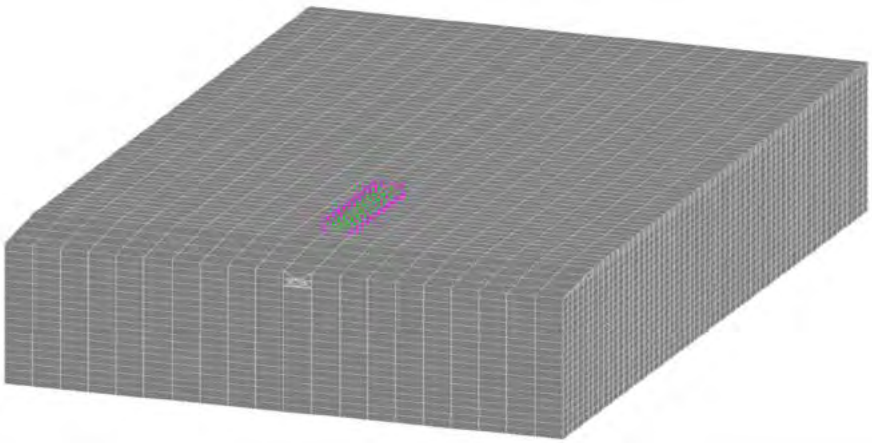
б)



в)



г)



д)

Рисунок 3.7 – Моделі ДК у тривимірних елементах з розрахунковою сіткою у відповідності з розмірами штампу вальця котка: *а* – легкий каток штамп 1,1 на 0,4 м.; *б* – легкий каток штамп 1,6 на 0,2 м.; *в* – важкий каток штамп 1,6 на 0,4 м.; *г* – важкий каток штамп 2,3 на 0,2 м.; *д* – важкий каток штамп 1,0 на 0,2 м.

3.4 Визначення технологічних параметрів при влаштуванні піщаних дренувальних шарів

При влаштуванні дренувального шару з середньозернистого піску використовують пневмокотки різних модифікацій. В даний час є модифікації котків, де в процесі ущільнення можливо регулювати як навантаження на колесо, так і тиск повітря в шинах. Навантаження на колесо можна змінювати баластуванням в 2–3 рази, що дозволяє одну і ту ж модель котка застосовувати для ущільнення різних ґрунтів. Підвищення маси котка дозволяє збільшити товщину

шару, що ущільнюється, однак щільність ґрунтів, яка досягається в результаті, майже не відрізняється за рівних тисків повітря в шинах.

Ефект ущільнення залежить від розмірів поверхні контакту шини з ґрунтом, якими визначається глибина активної зони, а отже, і оптимальна товщина шару, що ущільнюється, а також від тиску на цій контактній поверхні.

Розміри контактної поверхні і максимальний контактний тиск залежать від багатьох факторів, у тому числі: опір ґрунту до зовнішніх навантажень, розмір і тип шин, тиск повітря в них та навантаження на колесо. При перших проходах котків на початку процесу ущільнення, коли ґрунт ще пухкий, деформується, в основному, тільки сам ґрунт. У процесі ущільнення ґрунт стає щільнішим і тому поступово починає деформуватися пневматичне колесо. В кінці процесу ущільнення, коли ґрунт вже щільний, деформація пневматичного колеса є максимальною.

З метою обґрунтування розмірів штампу форма контакту пневматичної шини з твердою поверхнею являє собою еліпс. За еліпс може бути також прийнята і контактна поверхня шини з щільним ґрунтом. Відношення осей еліпса контактної поверхні визначається конструкцією шини, її геометричними розмірами, а також тиском повітря в них і навантаженням на колесо. Якщо при постійному тиску повітря в шині поступово збільшувати діюче на неї навантаження, то деформація шини в поперечному напрямку стає все більш помітною. Тому у однієї і тієї ж шини контактні поверхні можуть бути з різним співвідношенням між їх осями, а однакові поверхні контактів можуть бути отримані при різних співвідношеннях між навантаженням на колесо і тиском повітря в шині.

Вплив на контактні тиски двох факторів – тиску повітря і навантаження на колесо – дозволяє компенсувати значення одного з них за рахунок збільшення іншого. Таким чином, при одному і тому ж колесі одні і ті ж значення середніх контактних тисків можуть бути отримані при різних навантаженнях і тисках повітря в шинах.

В межах оптимальних товщин шарів, що ущільнюються, одна і та ж щільність матеріалу може бути досягнута укочуванням його легким і важким катком.

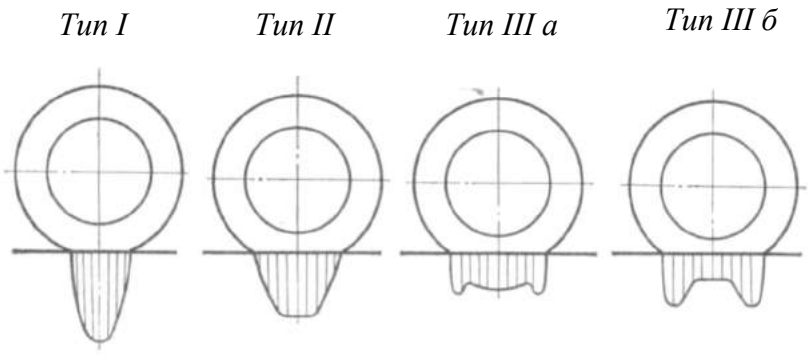


Рисунок 3.8 – Епюри розподілу тисків по контактній поверхні шини з ґрунтом [203]

Характер розподілу тисків по поверхні контакту шини з щільним ґрунтом в межах 0,8-6 кгс/г не залежить від швидкостей руху колеса, а визначається навантаженням на нього і тиском повітря в шині. Залежно від цих факторів можуть бути різні епюри розподілу тисків по осях еліпса контактної поверхні, які зводять до трьох типів (рис. 3.8).

Знизити максимальні контактні тиски при незмінному навантаженні на колесо можна шляхом значного збільшення тиску в шинах, в результаті якого зім’яття шин, як правило, перевершить допустимі межі, що призведе до значного їх зносу. Тому попереднє ущільнення ґрунтів слід вести більш легким катком. Однак поступове підвищення тиску повітря в шинах як при укатці, так і при остаточному ущільненні сприяє формуванню щільної і міцної структури шару ДО.

Максимальні тиски повітря в шинах котків, які відповідають кінцю процесу ущільнення, повинні бути найбільш близькими до меж міцності ґрунтів в їх щільному стані. Ця рекомендація не може бути виконана при зв'язних ґрунтах, які володіють високими межами міцності, так як тиск в стандартних шинах, як правило, не перевищує 5,5–6 кгс / см^2. При таких тисках завершують процес ущільнення зв'язних ґрунтів. Для ґрунтів малозв’язних і незв'язних цей тиск є надмірно великим і його, залежно від виду і стану ґрунту, знижують до 3–4 кгс/см^2. Для цих ґрунтів особливо важливо мати можливість регулювати тиск в шинах, а процес ущільнення найкраще починати при тиску повітря в шинах 2 кгс / см^2.

Вважаючи співвідношення між великою і малою осями еліпса контактної поверхні рівним 1:3 можна визначити ширину контактної поверхні:

$$b = 1{,}2\sqrt{\frac{P}{\sigma_{\max}}}, \tag{3.41}$$

де b – ширина контактної поверхні, м.

Тоді визначають глибину активної зони для одиночного пневматичного колеса при ущільненні зв'язних ґрунтів:

$$h_0 = 2{,}4\frac{W}{W_0}(1 - e^{-2{,}5\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_p}})\sqrt{\frac{P}{\sigma_{\max}}} \tag{3.42}$$

Для моделювання впливу котків на НДС піщаного дренувального шару з трубчастою дреною було обрано два типи пневмокотків, згідно технології влаштування: середній ДУ – 31А вагою 16 т та великий ДУ – 29 вагою 30 т. Основні параметри пневмокотків наведено у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Параметри пневмокотків

Тип котка	Вага котка, т	Кількість коліс, од	Навантаження на колесо, кг	Ширина колеса, м	Тиск в шинах фактичний, МПа		Сила, з якою колесо діє на поверхню, Н	Площа відбитку колеса котка, м^2	
					мінімальний	максимальний		за мінімального тиску	за максимального тиску
ДУ-31А	16	7	2285,714	0,32	0,3	0,55	22422,857	0,075	0,041
ДУ-29	30	7	4285,714	0,37	0,35	1	42042,857	0,120	0,042

Вертикальне навантаження забезпечує створення тиску від колеса на поверхню. Розрахункова ширина штампу залежить від ширини колеса та складає [205]:

$$b = B(0{,}65\ldots0{,}75), \tag{3.43}$$

де b – ширина штампу, м;

B – ширина колеса пневмокотка, м.

Розрахункова довжина штампу залежить від сили, з якою колесо діє на поверхню, тиску у колесі та розрахункової ширини штампу:

$$a = \frac{F}{b \cdot P}, \tag{3.44}$$

де a – довжина штампу, м;

F – сила, з якою колесо діє на поверхню, Н.

Зі збільшенням тиску в шинах котка стає більшою глибина колії та меншою площа відбитку. Тому початкове ущільнення дренувального шару з середньозернистого піску виконують з мінімально допустимим тиском в шинах середнього котка. Зі збільшенням кількості проходів котка зростає тиск в колесах і, відповідно, тиск на поверхню.

Відповідні значення, перш за все, забезпечують підбором тиску повітря в шинах, згідно табл. 3.4. З урахуванням вихідних параметрів пневмокотків та визначенням довжини і ширини штампу, площу штампу визначають як:

$$S_{ш} = a \cdot b, \tag{3.45}$$

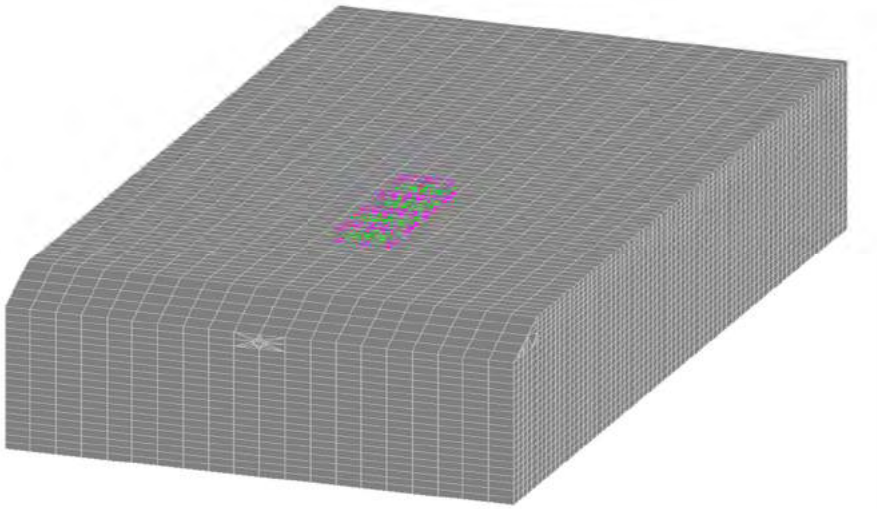
де $S_{ш}$ – площа штампу, м^2.

Згідно залежностей (3.43–3.45), визначені технологічні параметри для ущільнення піщаного дренувального шару, які наведені у табл. 3.5.

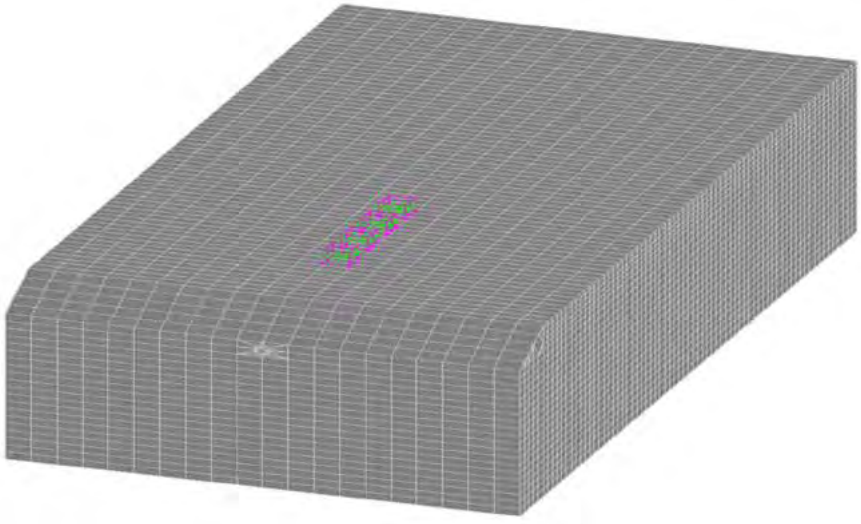
Таблиця 3.5 – Технологічні параметри для ущільнення піщаного дренувального шару

Тип котка	b, розрахункова ширина штампа, м		a, розрахункова довжина штампа за мінімального тиску, м		a, розрахункова довжина штампа за максимального тиску, м		S за мінімального тиску, $м^2$	S за максимального тиску, $м^2$
	b=B(0,65)	b=B(0,75)	b=B(0,65)	b=B(0,75)	b=B(0,65)	b=B(0,75)	b=B(0,65) та b=B(0,75)	b=B(0,65) та b=B(0,75)
ДУ-31А	0,208	0,24	0,3593	0,3114	0,1960	0,1698	0,0747	0,0407
ДУ-29	0,2405	0,2775	0,4994	0,432	0,1748	0,1515	0,1201	0,0420

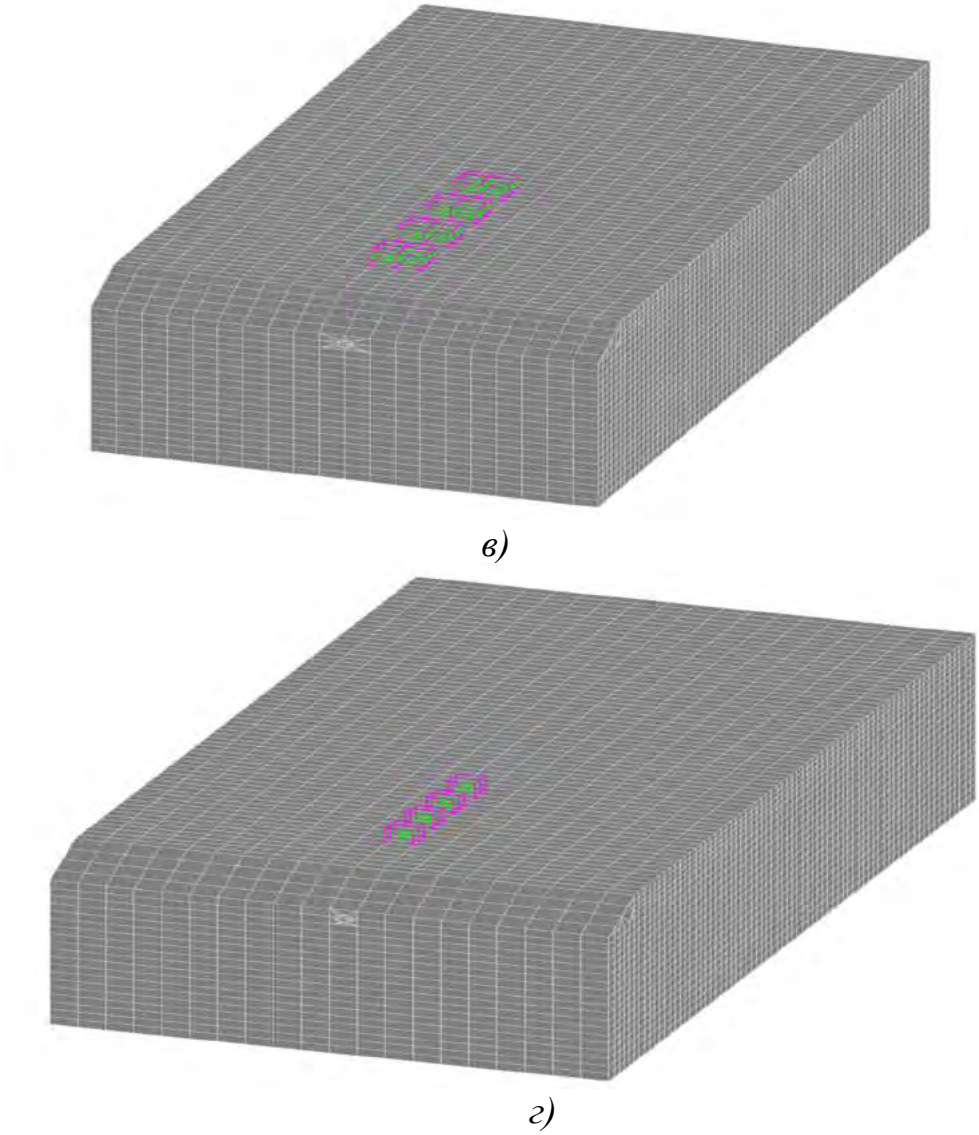
Побудовані моделі ДК у тривимірних елементах з розрахунковою сіткою у відповідності з розмірами штампу колеса пневмокотка. Моделі наведені на рис 3.9.



а)



б)



в)

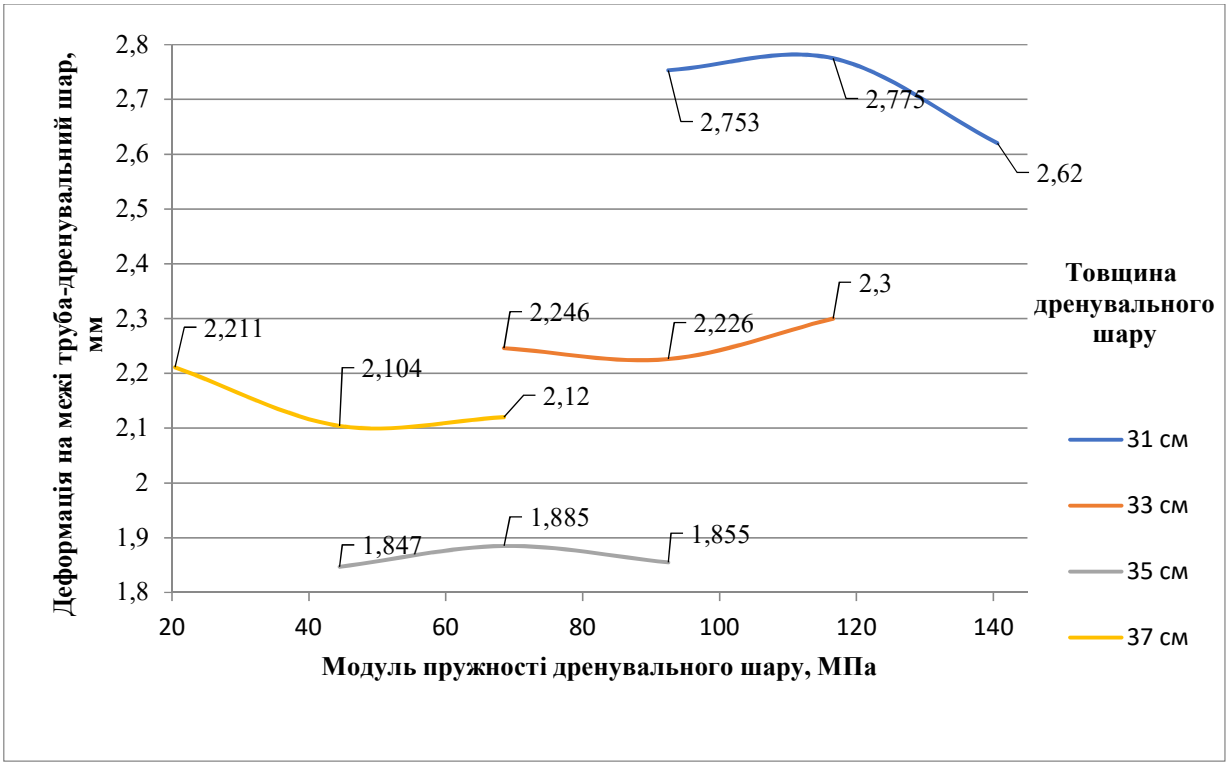
г)

Рисунок 3.9 – Моделі ДК у тривимірних елементах з розрахунковою сіткою у відповідності з розмірами штампу колес пневмокотка: *а*, *б* – легкий каток; *в, г* – важкий каток.

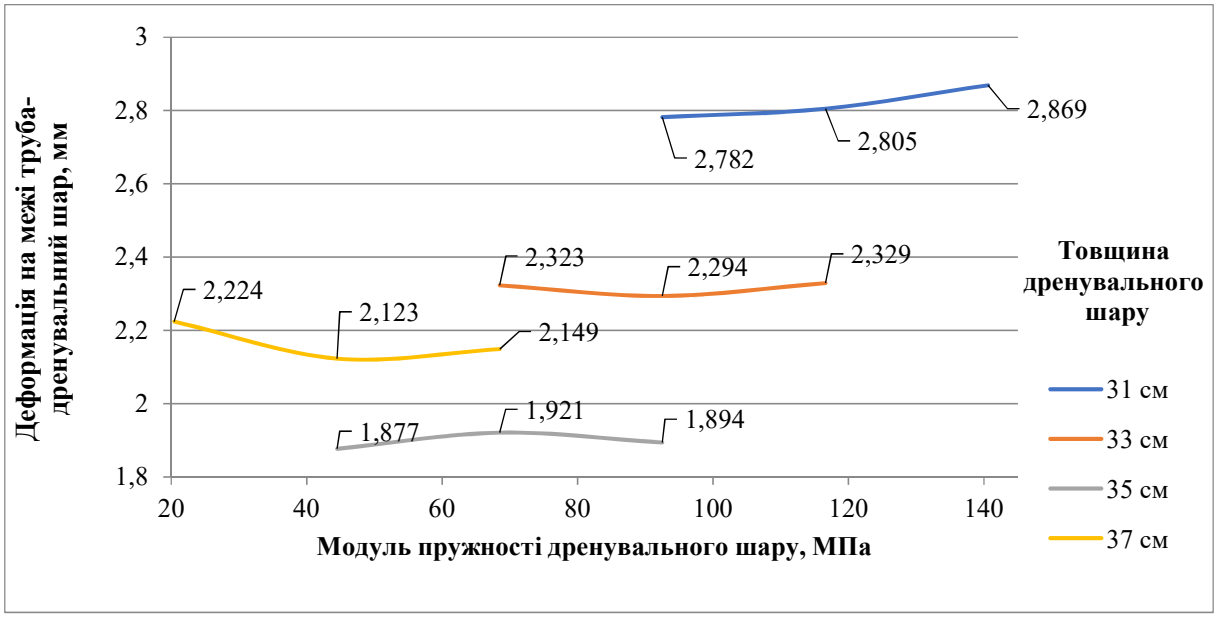
3.5 Результати числового експериментального дослідження на дорожній конструкції з дренажем мілкого закладання у тривимірних елементах

Відповідно до вихідних даних були отримані ізополя та ізолінії розподілу нормальних напружень *Nz* та деформацій *Z* в ДК з ДМЗ з дренувальним шаром. Відповідно, для кожного типу трубчастих дрен визначено загальний розподіл нормальних напружень *Nz* та деформацій *Z* під впливом навантаження від дорожніх котків в ДК з щебеневим та піщаним дренувальними шарами.

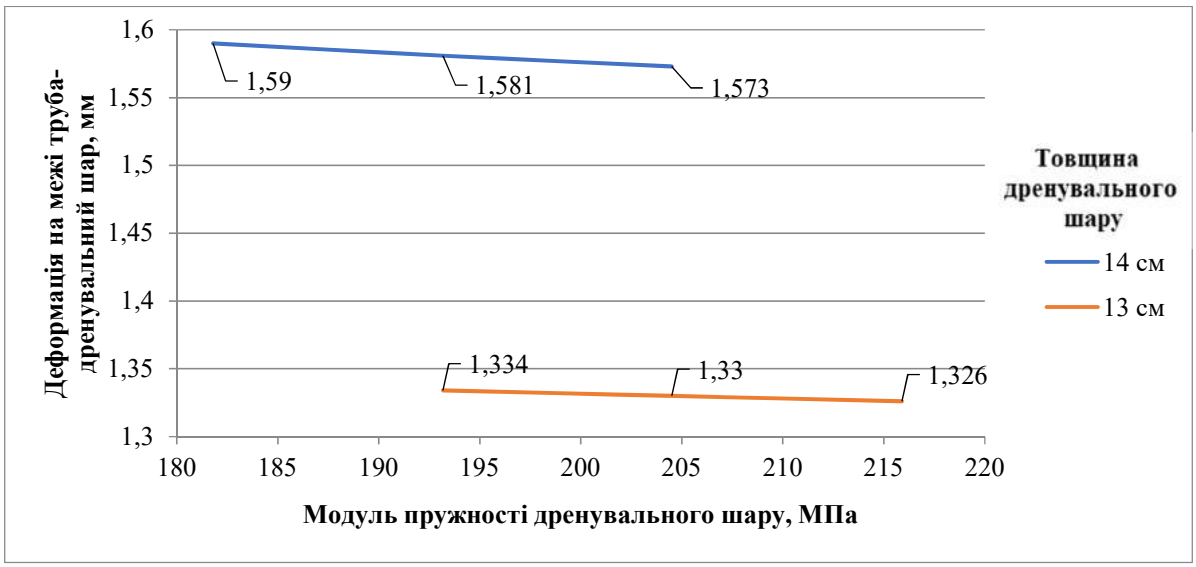
Відповідно до технології влаштування дренувальних шарів з піску, було визначено вихідну товщину дренувального шару – 37 см, щоб отримати в кінці процесу ущільнення шар товщиною 30 см. Залежність деформацій *Z* від зміни модуля пружності піщаного дренувального шару представлено на рис. 3.10 а,б, а зміна деформацій на межі труба - щебеневий шар – рис. 3.10 в, г, д, е.



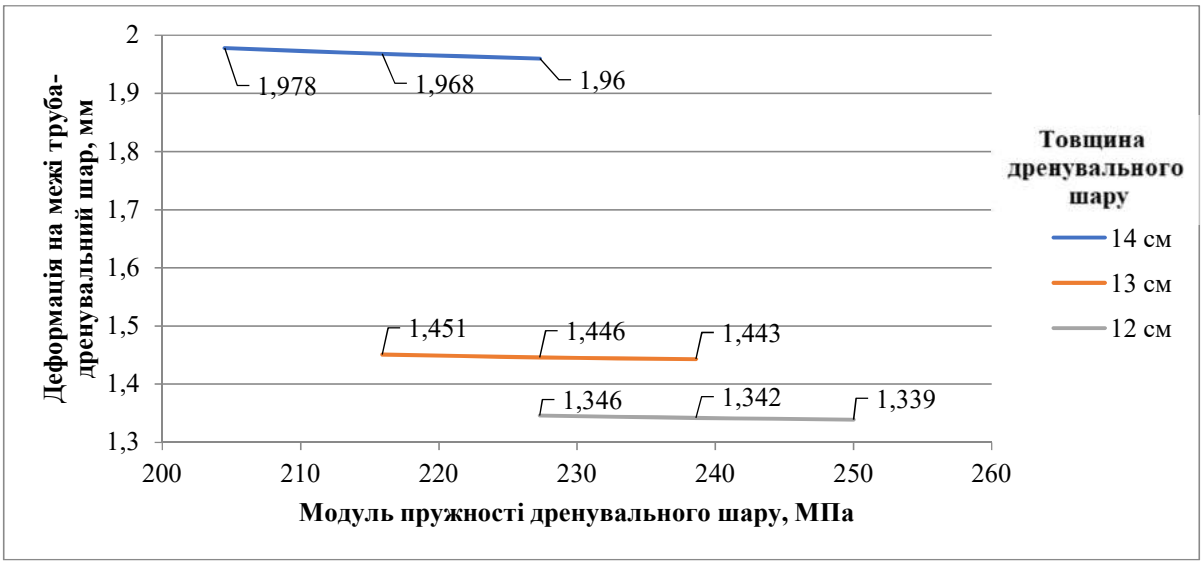
а)



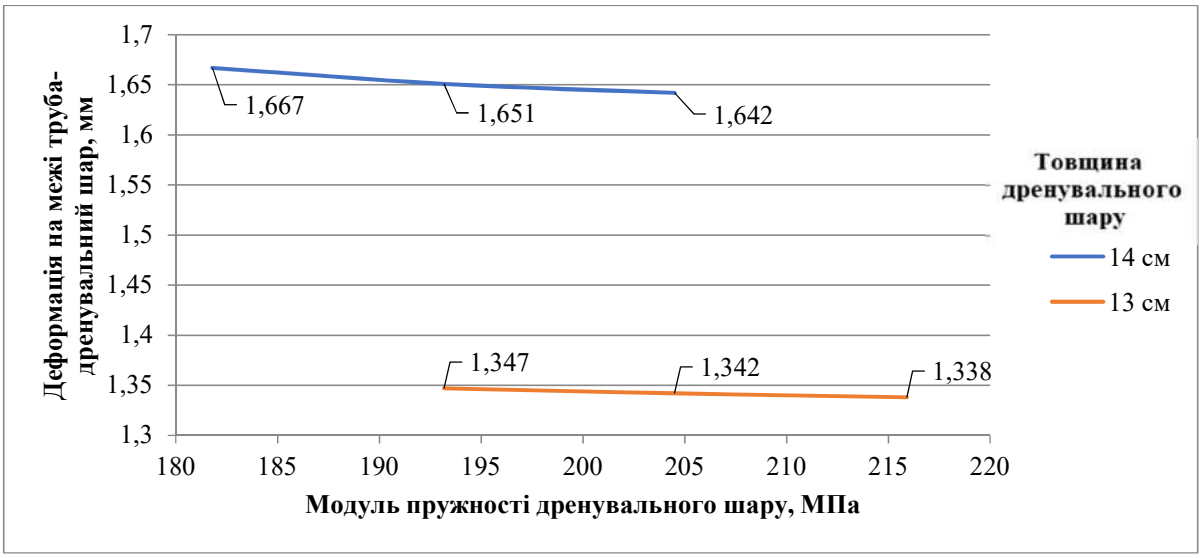
б)


Деформація на межі труба-дренувальний шар, мм
1,6
1,55
1,5
1,45
1,4
1,35
1,3
1,59
1,581
1,573
1,334
1,33
1,326
180
185
190
195
200
205
210
215
220
Модуль пружності дренувального шару, МПа
Товщина дренувального шару
14 см
13 см

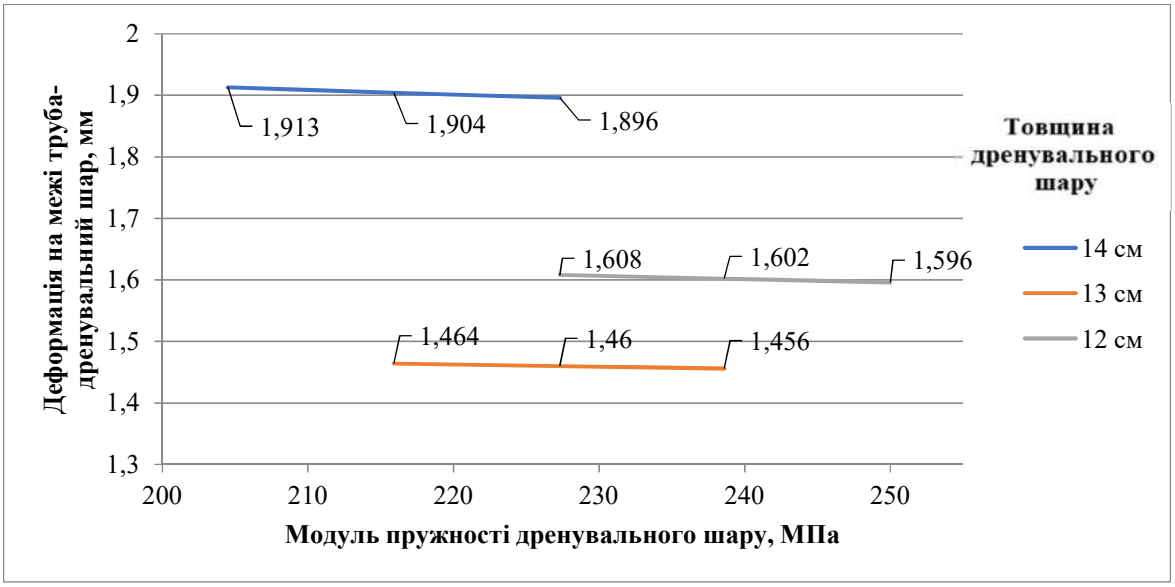
в)


Деформація на межі труба-дренувальний шар, мм
2
1,9
1,8
1,7
1,6
1,5
1,4
1,3
1,978
1,968
1,96
1,451
1,446
1,443
1,346
1,342
1,339
200
210
220
230
240
250
260
Модуль пружності дренувального шару, МПа
Товщина дренувального шару
14 см
13 см
12 см

г)


Деформація на межі труба-дренувальний шар, мм
1,7
1,65
1,6
1,55
1,5
1,45
1,4
1,35
1,3
1,667
1,651
1,642
1,347
1,342
1,338
180
185
190
195
200
205
210
215
220
Модуль пружності дренувального шару, МПа
Товщина дренувального шару
14 см
13 см

д)



е)

Рисунок 3.10 – Залежність деформацій *Z* від модуля пружності: піщаного дренувального шару: *а* – з бетонною трубою; *б* – з трубою ПВХ; щебеневого дренувального шару: *в* – з бетонною трубою при ущільненні легким котком; *г* – з бетонною трубою при ущільненні важким котком; *д* – з трубою ПВХ при ущільненні легким котком; *е* – з трубою ПВХ при ущільненні важким котком

Результати серії числових експериментів по визначенню нормальних напружень та деформації в тілі трубчастих дрен на розрахункових моделях з щебеневим (рис. А.1–А.15 та А.16–А.30) та піщаним (рис. А.31–А.42 та А.43–А.54) дренувальними шарами порівнювались для бетонної труби та труби ПВХ (табл.3.6) [206].

В процесі влаштування піщаного дренувального шару може відбуватися деформація бетонних труб, що призводить до їх руйнації, на відміну від ПВХ, для яких такі деформації допустимі.

Згідно результатів розрахунку на моделі з трубою ПВХ в стандартних умовах ущільнення дренувального шару тіло труби сприймає максимальні нормальні напруження 3,86 МПа, що складає 15,4 % від допустимого напруження цього матеріалу на розтяг.

Таблиця 3.6 – Результати числових експериментальних досліджень з визначення деформації в ДК з різними трубчастими дренами

Тип трубчастої дрени	Розміри штампу, м	Тиск в шинах, МПа	Деформація, мм	Напруження, т на м2	Коефіцієнт ущільнення дренувального шару
бетонна	0,2 на 0,4	0,3	2,1	265,19	0,8
ПВХ SN 8			2,12	186,73	0,8
бетонна	0,2 на 0,2	0,55	2,021	387,39	0,85
ПВХ SN 8			2,046	231,39	0,85
бетонна	0,3 на 0,4	0,35	2,29	242,72	0,9
ПВХ SN 8			2,27	350,93	0,9
бетонна	0,2 на 0,2	1	2,75	641,95	0,95
ПВХ SN 8			2,805	394	0,95

На відміну від цього, модель з бетонною трубою працює в гранично-напруженому стані. Згідно чого, було передбачено влаштування щебеневої обсипки, яка додатково сприймала та перерозподіляла навантаження на тіло труби. За стандартних умов ущільнення піщаного дренувального шару, тіло бетонної труби випробовує максимальні напруження 6,3 МПа, що значно перевищує допустимі напруження на розтяг бетону.

Руйнація бетонної труби може призводити до подальших суттєвих деформацій конструктивних шарів дорожнього одягу та дорожньої конструкції в цілому і, як наслідок, до суттєвої зміни волого-теплового режиму. Накопичення інфільтрату вологи, створення льодових лінз призводить до руйнації шарів дорожнього одягу в зимовий та весняний періоди.

Проведений аналіз результатів досліджень на моделях ДК дороги ІІІ категорії на етапі будівництва, показав, що доцільними до використання в дренажних конструкціях є ПВХ труби.

3.6 Визначення напружено-деформованого стану дорожньої конструкції з дренувальним шаром під впливом дії транспортних засобів

ДК проектують як суцільну шарову конструкцію, з відповідними модулями пружності для кожного шару покриття, основи та ґрунту земляного полотна, згідно [173]. Навесні або восени перезволожені ділянки автомобільних доріг (виїмки, в нульових відмітках) працюють в перевантаженому режимі зі зменшеним модулем пружності шарів основи та верхньої частини земляного полотна. Ця проблема особливо гостро виникає при порушенні умов експлуатації автомобільних доріг перенавантаженими великоваговими ТЗ. При розрахунку загального модуля пружності ДК не враховується наявність трубчастих отворів, а при експлуатації, як і при будівництві, дренажних труб також виникає проблема щодо типу матеріалів з яких вони виготовлені. Важливим лишається питання не тільки визначення режиму їх роботи з точки зору виведення води з основи дорожнього одягу, а також щодо їх цілісності, зокрема, розподілу напружено-деформованого стану (НДС).

В багатьох країнах світу лишається актуальною проблема водовідведення з проїзної частини та з шарів основи дорожнього одягу автомобільної дороги. Переважно використовуються щебеневі або піщані шари, а також прошарки з геотекстилю та геокомпозиту. Підбір параметрів трубчастих дренажних конструкцій переважно проводиться аналітичним методом.

Оцінку впливу динамічного навантаження від ТЗ на дорожнє покриття проведено в роботі [6], представлено числові результати залежності дії вібрації від нерівності дорожнього покриття та від збільшення швидкості руху транспорту. Навантаження від ТЗ викликають в багатошаровому масиві конструкції дороги тривимірний напружено-деформований стан з суттєвими градієнтами стискаючих, розтягуючих та зсувних напружень, як зазначено в роботі [209]. Асфальтобетонне покриття по-різному чинить опір цим видам напружень і особливо їх комбінації.

Новий підхід визначення НДС багатошарової дорожньої конструкції, послабленої трубчастими отворами, наведено в роботі [24]. Цей підхід дозволяє визначити конструктивні параметри шарів ДК, зокрема, ДМЗ, для забезпечення

загальної несної здатності ділянкам автомобільних доріг. Було проведено серії числових експериментів, які включали два типи трубчастих дрен: ПВХ та бетонну труби. Відповідно до кожного типу матеріалу трубчастої дрени моделювалися різні матеріали-заповнювачі траншей. Результати числового моделювання дозволили отримати епюри нормальних напружень та деформацій конструктивних шарів. Представлені дослідження проводилися на двовимірних моделях, які не дозволяють в повному обсязі отримати розподіл міцнісних показників НДС ДК.

НДС ДК з поперечними трубчастими ДМЗ також, як і в п.3, можливо дослідити на основі тривимірних моделей в програмно-розрахунковому комплексі (ПРК) SCAD Office. Це дозволить отримати ізополя нормальних напружень та розподіл деформацій, проаналізувати роботу як і самої ДК, так і трубчастих дрен декількох типів.

В якості трубчастих ДМЗ розглянемо два види ДК – без трубчастої дрени та з нею. Другий вид конструкції – з двома типами труб ПВХ класу SN 8 та класу SN 2 з внутрішнім діаметром 100 мм. Труба ПВХ укладаються в траншею земляного полотна під дренувальний шар дорожнього одягу, згідно [174], та обсипається наповнювачем – крупнозернистим піском. Піщаний шар та наповнювач траншеї працюють в перезволоженому режимі, що обумовлює їх зменшений модуль пружності.

Створення розрахункової моделі також виконано в програмному комплексі SCAD. Розглядалася ділянка автомобільної дороги загального користування III категорії, довжиною 3,6 м, згідно вимог [74]. Модель побудована з урахуванням площі штампу навантаження та розміру зовнішнього діаметру труби з прямокутних елементів розміром 0,1 м та 0,18 м, відповідно в поперечному та повздовжньому напрямках. Навантаження було рівномірно розподілено по прямокутнику 0,2 м на 0,36 м, що за площею відповідає штампу, діаметром 0,303 м, згідно [210]. З метою відповідності до реальних умов роботи ДК приймалися навантаження типу A_2 для доріг з капітальним типом покриття, а також навантаження, яке перевищувало нормативне в 1,5 рази.

Числові експериментальні дослідження дозволили отримати тривимірний розподіл ізополів та ізоліній міцнісних показників НДС. Результати наведені у Додатку Б. Для кожного типу трубчастих дрен представлено загальний розподіл нормальних напружень *Nz* та деформацій *Z* у поперечному профілі автомобільної дороги під впливом навантаження 57,5 кН (рис. Б.1, 2, 5, 6, 9, 10) та навантаження 86,25 кН (рис. Б.3, 4, 7, 8, 11, 12).Розглядалося три випадки прикладання навантажень на поверхню ДК: 1,68 м від осі, 3,65 м від осі та 1м від кромки узбіччя.

Значення нормальних напружень *Nz* в ДК без труби при навантаженнях 57,5 кН та 86,25 кН під піщаним дренувальним шаром змінюється, відповідно, від 0,0412 МПа до 0,0618 МПа, що відповідає показникам деформацій *Z* від 1,74 мм до 1,99 мм. Для ДК з трубою класом SN 2 при навантаженнях 57,5 кН та 86,25 кН *Nz* змінюється від 0,0422 МПа до 0,0628 МПа, що відповідає показникам деформацій *Z* від 1,77 мм до 1,96 мм, яка розповсюджується на 0,9 м та 1,55 м, відповідно, по тілу труби. Для ДК з трубою класом SN 8 при навантаженнях 57,5 кН та 86,25 кН *Nz* також змінюється від 0,0422 МПа до 0,0628 МПа, що відповідає показникам деформацій *Z* від 1,72 мм до 1,95 мм, яка розповсюджується на 0,5 м та 0,7 м, відповідно, по тілу труби. Більш детальний аналіз, щодо розподілу деформацій під дренувальним шаром в суцільній ДК та у ДК з трубами ПВХ класу SN 2 та SN 8, наведено у додатку Б, табл. Б.1.

Деформації в трубі ПВХ класу SN8 не перевищують 2 % від зовнішнього діаметру труби, що є допустимим для умов її роботи. У процесі експлуатації труба ПВХ класу SN2 буде деформуватися на значну довжину, що може порушити цілісність тіла самої труби і, як наслідок, з часом до погіршення роботи всієї дренажної конструкції, порушення функції водовідведення.

Вирішення проблеми щодо міцності, стійкості та надійності ДК з трубчастим ДМЗ, як правило, не досліджується. В роботі [24] авторами була розглянута ця проблема за спрощеним двовимірним підходом в ПК SCAD. Деформація в тілі труб ПВХ змінюється в межах 0,11 – 0,13 мм, на відміну від отриманих результатів досліджень, які перевищують попередні на 2 порядки. Це пов’язано з відмінністю між двовимірним та тривимірним моделюванням. Проведення числового

моделювання на представлених тривимірних моделях дозволило врахувати наявність трубчастих отворів в суцільній шаруватій ДК під впливом навантажень від великовагових ТЗ. В якості конструктивних елементів поперечних трубчастих ДМЗ доцільно використовувати труби ПВХ класу SN 8 або труби на відміну від труб класу SN 2. Порушення цілісності труби ПВХ класу SN 2 сприятиме не відведенню, а навпаки накопиченню вологи в ДК з наступними негативними наслідками у процесі експлуатації перезволоженої ділянки автомобільної дороги. Запропоноване дослідження підіймає нагальне питання про можливість застосування нових видів матеріалів трубчастих дрен, що будуть забезпечувати очікувану надійність в умовах відсутності контролю пропуску наднормативних вантажів дорогами загального користування.

Представлені результати роботи є відправною точкою для розробки типових конструктивних рішень трубчастих дрен в дорожніх конструкціях, які будуть запроектовані з врахуванням пропуску великовагових ТЗ і забезпечувати безперебійні функції водовідведення.

Висновки по розділу 3

1. Проаналізовано методи проектування дорожніх конструкцій, більшість яких ґрунтується показниках несної здатності ґрунту земляного полотна та матеріалів шарів основи дорожнього одягу. Одним із ефективних заходів підвищення міцності дорожньої конструкції є регулювання її водно-теплового режиму, особливо на ділянках автомобільних доріг з похилом більшим за поперечний, в місцях увігнутих вертикальних кривих за поздовжнім профілем дороги та на переходах з виїмок в насипи. На таких ділянках, з метою забезпечення оптимальних термінів осушення основи дорожнього одягу, дорожня конструкція містить трубчасті дренажні прорізі. Наявність трубчастих дренажів мілкого закладання під шарами дорожнього одягу вимагає розглядати цю проблему з іншого ракурсу. Така дорожня конструкція є нетиповою на відміну від стандартних. Як правило, передбачаються заходи з регулювання ВТР ЗП з наступним підбором параметрів дренажних труб, але без урахування їх впливу на

НДС конструкції в цілому.

2. Вище наведений аналіз обумовив актуальність та необхідність проведення досліджень з визначення ефективності роботи дренажних конструкцій мілкого закладання на етапі будівництва під впливом дії дорожніх машин. В якості інструментарію для дослідження НДС нетипових дорожніх конструкцій з круглими отворами використовувався проектно-розрахунковий комплекс SCAD Office, який базується на методі скінченних елементів. Для моделювання було обрано схему моделі дорожньої конструкції, яка є типовим проектним рішення автомобільної дороги ІІІ-ї категорії. Побудова скінченно-елементних сіток була визначена із умов штампу вальця або пневмошини котка за статичним навантаженням. Для прогнозування НДС дренувальних шарів з поперечним трубчастим ДМЗ на ЗП були проведені серії числових експериментів. При числовому моделюванні розглядуваної конструкції використовувалось навантаження статичне, як найбільш несприятливе за тривалістю при процесі влаштування дренувального шару. Для двох типів матеріалів трубчастих дрен моделювались реальні умови будівництва, які передбачають поетапне ущільнення дренувальних шарів.

Це дозволило встановити технологічні режими ущільнення дренувальних шарів з наявністю трубчастих дрен в робочій зоні земляного полотна, з урахуванням модуля пружності шару та типу дорожнього котка, зовнішній діаметр труб 120 мм: щебеневий шар (190 – 220 МПа) – прослідковується лінійна залежність зменшення деформацій труб від модуля пружності шару (для труби ПВХ SN 8 змінюється від 1,91 до 1,34 мм, для бетонної труби –від 1,98 до 1,32 мм); піщаний шар (40 – 120 МПа) – прослідковується нелінійна залежність зміни деформацій в трубі від модуля пружності шару (для труби ПВХ SN 8 змінюється від 1,88 до 2,87 мм, для бетонної труби –від 1,85 до 2,77 мм). Отримані деформації у бетонних трубах призводять до їх руйнування, а в трубах ПВХ такі деформації є допустимими, що підтверджує доцільність їх влаштування.

3. Побудовані моделі ДК в об’ємних елементах без та з різними типами трубчастих дрен ДМЗ, проведено числове моделювання їх напружено-деформованого стану. Отримано епюри нормальних напружень та деформацій

конструктивних шарів дорожнього одягу та у тілі дренажних труб. Отримані результати за тривимірними числовими моделями дозволяють обґрунтувати вибір міцнісних характеристик трубчастих дрен, які забезпечують безвідмовну роботу поперечних дренажів мілкого закладання на стадії експлуатації, наприклад в дорожній конструкції без труби деформація під дренувальним шаром складає 1,74 мм, з трубою SN 2 – 1,8 мм, з трубою SN 8 – 1,76 мм. Оскільки деформація труби SN 2 перевищує 3 % від її зовнішнього діаметру, то можливе порушення умов роботи дренажної конструкції в цілому.

4. Результати досліджень третього розділу викладено у наступних публікаціях [24, 206, 208].

РОЗДІЛ 4
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ПОПЕРЕЧНИХ ДРЕНАЖІВ МІЛКОГО ЗАКЛАДАННЯ ЗА ІНТЕНСИВНІСТЮ ВОДОВІДВЕДЕННЯ

4.1. Дослідження ефективності функціонування поперечних дренажів мілкого закладання в дорожніх конструкціях

Експериментально процес інфільтрації води в ґрунт проводили дослідження G.B. Bodman and C.A. Colman, T.I. Marshall and G.B. Stirk, D.E. Miller and F. Richards, В.М. Сіденко, І.І. Судніцин та ін. Аналізуючи їх роботи, можна вказати на те, що товщина ґрунту, змочена інфільтрованою вологою, може бути розділена на чотири зони:

1. Зона насичення товщиною близько 1 см. У цій зоні гідравлічний напір відсутній, причому вологість шару дорівнює повній вологоємності за рахунок набухання ґрунту.

2. Перехідна зона товщиною близько 15 см. Вологість ґрунту змінюється від повної вологоємності до 70-80 % від неї. Гідравлічний напір, за даними G.B. Bodman та C.A. Colman, дорівнює 30 см вод. ст., а за даними І.І. Судніцина – 50-70 см вод. ст.

3. Зона зволоження. Вологість ґрунту в цій зоні майже постійна з деяким зменшенням донизу, збільшення її може статися зі збільшенням глибини промочування. Гідравлічний напір дорівнює гідравлічному напору, який є в нижній частині перехідної зони.

4. Фронт змочування. Вологість ґрунту тут змінюється (зменшується) стрибкоподібно, так само зменшується і гідравлічний натиск. Межа змочування залежить від вологості ґрунту: якщо ґрунт має невелику вологість (меншу за оптимальну), то межа змочування виділяється дуже різко і пересування рідкої вологи перед нею не спостерігається.

ВТР впливає протягом року нерівномірно, відповідно до цього дорожній одяг працює з різним запасом міцності. Тому під час проектування земляного полотна та дорожнього одягу необхідно всіляко прагнути до вирівнювання стійкості

дорожнього одягу в річному періоді, що може бути досягнуто завдяки забезпеченню більшої стабільності ВТР.

Зазвичай під час розрахунків основним джерелом зволоження вважається волога, що звільняється при відтаванні ґрунту під проїзною частиною та узбіччями (відтискається із нижніх шарів земляного полотна у весняний період). Проте, враховуючи той факт, що дорожній одяг та конструкція узбіч не забезпечують повної водонепроникності, кількість інфільтраційної вологи від атмосферних опадів може перевищувати кількість вологи від зимового вологонакопичення.

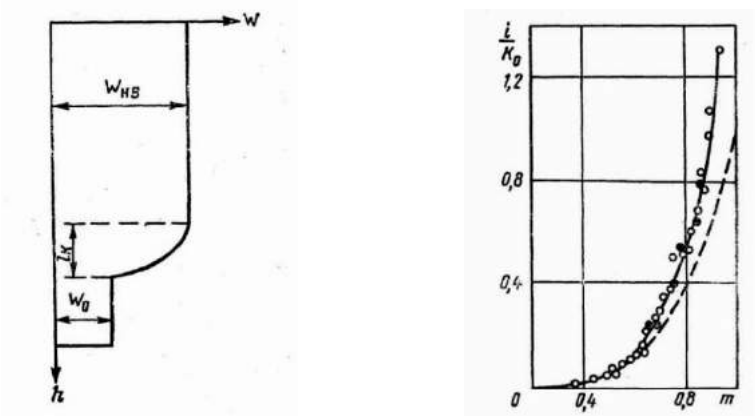
За умови повільного водовідведення в зимовий період циклічні коливання температури можуть призвести до утворення великої кількості лінз криги. Промерзання ґрунту з утворенням крижаних лінз є однією з причин зниження його міцності під час відтавання. Зниження міцності ґрунтової основи обумовлено не тільки перезволоженням, а також розрихлюванням ґрунту, зменшенням щільності й, можливо, зміною його структури. Міцність ґрунтів, які утримують велику кількість лінз криги, суттєво знижується за відлиг.

Для того, щоб уникнути тривалого перезволоження конструктивних шарів покриття і основи потрібно запобігти акумулюванню в них великої кількості вільної води шляхом влаштування дренажної системи мілкого закладання, яка швидко відведе воду та забезпечить міцність дорожньої конструкції.

У роботах [53] та [56] показано, що за відносної вологості ґрунту $W > 0,7$ переміщення вологи у тілі земляного полотна в основному відбувається у фазі рідини. Дослідження змін вологості ґрунтів було виконано зі зразками з насипних ґрунтів і ґрунтів, взятими в умовах природнього залягання.

Під час просочення зразка ґрунту вологість верхньої його частини збільшується до величини, що відповідає найменшій вологоємності $W_{НВ}$. Величина $W_{НВ}$ є найбільша за кількістю підвішеної вологи, тобто вологи, не пов’язаної капілярно з ґрунтовою водою, яка може утримуватися ґрунтом. На рис. 4.1 представлена схема зволоження ґрунтів за А.І. Будаговським [77].

А.А. Роде відзначив, що вологість, яка була встановлена в межах промоченої товщі, не залежить від глибини останньої, норми поливу і початкової вологості ґрунту [211].



а) *б)*

Рисунок 4.1 – Схеми зволоження ґрунту: *а* – згідно з дослідженнями А.І. Будаговського (W_0 – початкова вологість, t_k – зона тимчасової вологості («клин вбирання»); *б* – залежність насиченості від інтенсивності дощування: о – пісок; • – піщаний підзолистий ґрунт (пунктирна крива – за рівнянням А.І. Будаговського)

Із цим висновком варто погодитися, оскільки величина $W_{НВ}$ визначається переважно активністю поверхні ґрунтових частинок і агрегатів та за визначеного фізико-механічного стану ґрунту (щільність, пористість, наявність защемленого повітря) повинна бути величиною постійною.

Як видно з рис. 4.1, б, за відносної інтенсивності дощу $\frac{i}{k_0} > 0{,}5$ (де k_0 – коефіцієнт фільтрації) ступінь заповнення пір у промоченій частині ґрунту m починає наближатися до одиниці. Коли $i = k_0 \left(\frac{i}{k_0} = 1 \right)$ пори в промоченому ґрунті повністю заповнені водою, тобто $m = 1$ (пунктирна крива на рис. 4.1, б).

Для зв’язних ущільнених ґрунтів, як правило, в період осіннього вологонакопичення $i > k_0$ і тому під впливом інтенсивності дощових опадів величиною вологості, що встановлюється в промоченій товщі, можна знехтувати.

А.А. Роде вважав, що найбільш зручно величину $W_{НВ}$ визначати через повну вологоємність ґрунту $W_{ПВ}$, яку легко отримати за відомою об'ємною вагою скелета ґрунту $\gamma_{ск}$ і питомій вазі його твердої фази Δ зі співвідношення:

$$W_{ПВ} = 1 - \frac{\gamma_{ск}}{\Delta}. \qquad (4.1)$$

На основі аналізу результатів експериментів переліку дослідників А. А. Роде для ґрунтів в природному заляганні рекомендував залежність:

$$\frac{W_{НВ}}{W_{ПВ}} = 0,55 - 0,75 \qquad (4.2)$$

Очевидно, що співвідношення (4.1) не може використовуватися в тих випадках, коли об'ємна вага і пористість ґрунту виходять за межі зміни цих характеристик у згаданих експериментах. У дослідах Г.З. Біяшева, також проаналізованих А.А. Роде, було доведено, що величина відношення $\frac{W_{НВ}}{W_{ПВ}}$ дуже залежить від щільності ґрунту. Відповідні дані наведені в табл.4.1.

Зміна вологості в ґрунтах після поливу в низці випадків може повністю відповідати принциповій схемі, наведеній на рис. 4.1. А. А. Роде вважає, що нижче промоченого ґрунту з вологістю, яка дорівнює $W_{НВ}$, є перехідна зона, що характеризується великими градієнтами вологості.

Таблиця 4.1 – Результати досліджень зміни вологості ґрунту залежно від щільності

$\gamma_в$, г/см^3	Загальна пористість,% від об'єму	$W_{НВ}$, % від об'єму	Ступінь заповнення пор ґрунту за вологості рівній $W_{НВ}$, %
1,05	60,3	29,3	49
1,25	52,8	36,1	68
1,45	45,3	39,4	78
1,65	37,7	35,9	95

Із цих даних табл. 4.1 видно, що для ущільнених ґрунтів співвідношення (4.2) не зовсім є справедливим, причому величина $W_{НВ}$ може наближатися до $W_{ПВ}$ і, отже, для кожного конкретного значення щільності ґрунту значення $W_{НВ}$ має встановлюватися з окремих досліджень.

У низці випадків схема на рис. 4.1 буде справедлива для затоплюваних природних або штучно ущільнених піщаних основ. У тих же випадках, коли йдеться про зволоження земляного полотна дощовими опадами і навіть внаслідок затоплення, ця схема не зовсім є придатною. Для регулювання ВТР, відповідно зменшення вологості дорожньої конструкції, існують декілька видів дренажів мілкого закладання [74], тому постає питання у встановленні ефективності функціонування дорожньої конструкції під впливом атмосферних опадів та інфільтраційної вологи.

Перед початком робіт проводять лабораторні дослідження параметрів матеріалів, які будуть вкладатися в дренажну конструкцію. Для ґрунтів визначають їхню щільність r, г/см^3, вологість W, %, щільність скелета ґрунту, r_d г/см^3, щільність часток ґрунту, ρ_s, г/см^3, пористість ґрунту n, коефіцієнт пористості e, коефіцієнт водонасичення ґрунту S_r. Також визначають максимальну щільність скелету ґрунту, що досягається за оптимальної вологості.

За результатами випробувань можна зробити такі висновки:

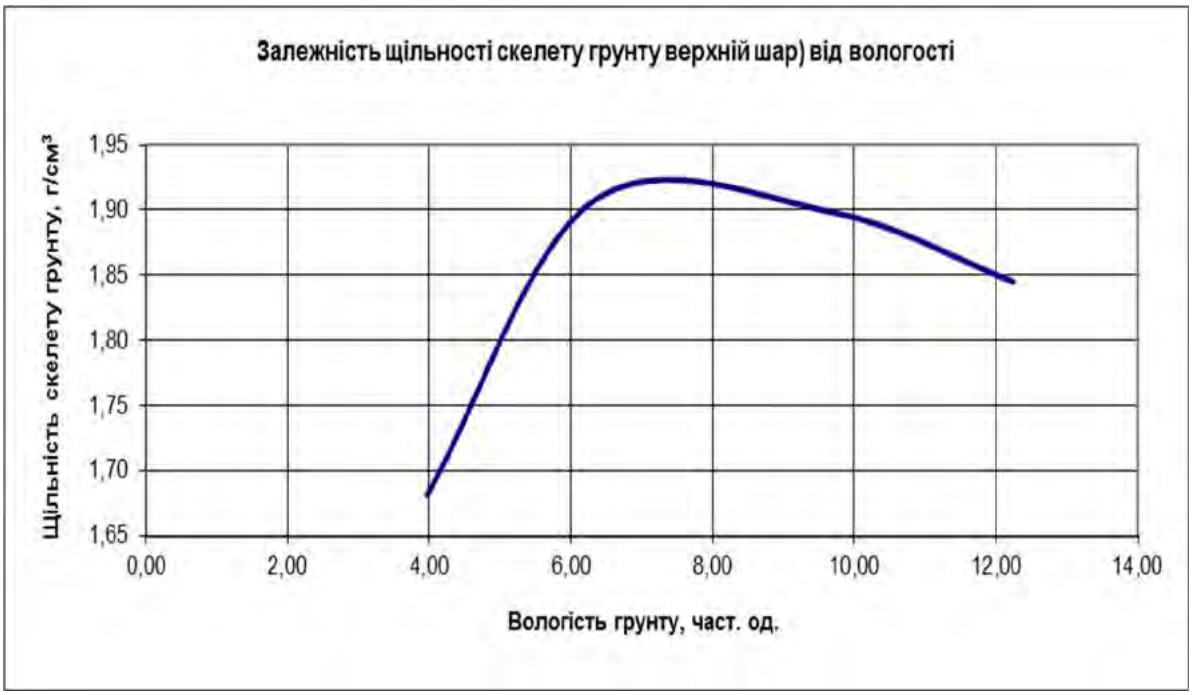
1. Максимальна щільність скелету глинистого ґрунту (1,90 г/см^3) досягається за оптимальної вологості в межах від 6,5 % до 9,5 %. Максимальна щільність скелету піску (1,74 г/см^3) досягається за оптимальної вологості, приблизно рівній 13,0 %.

Таблиця 4.2 – Результати випробувань глинистого ґрунту та піску

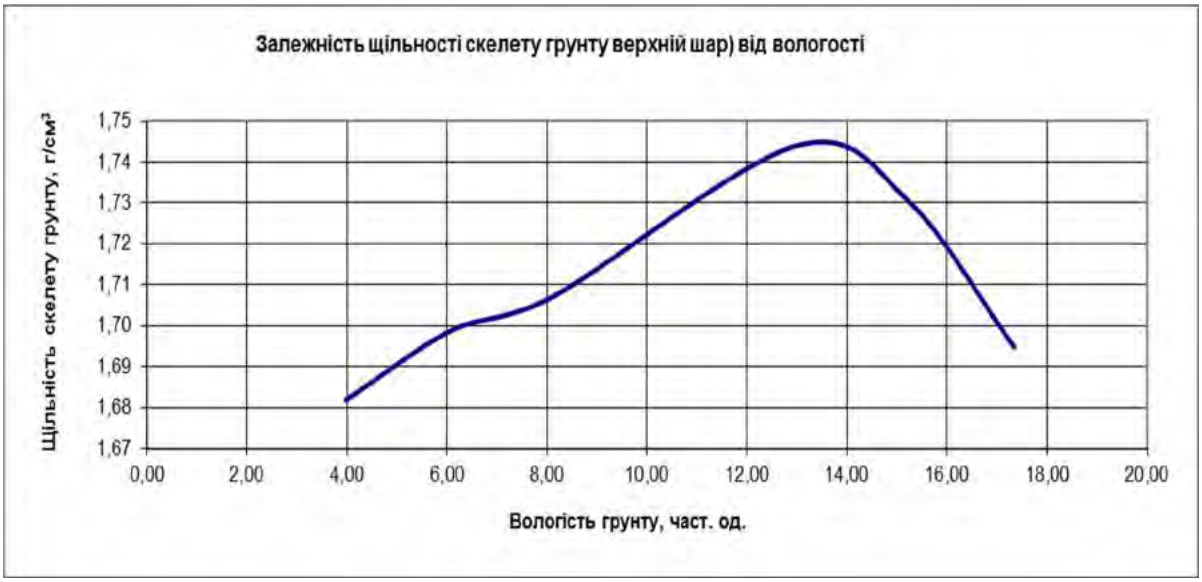
Номер випро-бування	Щіль-ність ґрунту r, г/см^3	Воло-гість ґрунту *W*, %	Щільність скелета ґрунту, r_d г/см^3	Щільність часток ґрунту, ρs, г/см3	Пористість ґрунту n	Коефіцієнт пористості e	Коефіцієнт водо-насичення ґрунту Sr
Глинистий ґрунт							
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1,75	3,97	1,68	2,38	0,29	0,41	0,23
2	2,03	6,32	1,90	2,38	0,20	0,25	0,61
3	2,08	9,66	1,90	2,38	0,20	0,25	0,91
4	2,07	12,25	1,85	2,38	0,22	0,29	1,01
Глинистий ґрунт							
1	1,75	3,97	1,68	2,39	0,30	0,42	0,22
2	1,80	6,09	1,70	2,39	0,29	0,41	0,36
3	1,85	8,12	1,71	2,39	0,29	0,40	0,48
5	1,97	13,00	1,74	2,39	0,27	0,37	0,84
6	1,99	15,22	1,73	2,39	0,28	0,38	0,95
7	1,99	17,34	1,69	2,39	0,29	0,41	1,01

2. За показниками пористості ґрунту та коефіцієнту пористості більш пористим є пісок, менший об’єм пор має глинистий ґрунт. Для піску значення пористості ґрунту та коефіцієнту пористості, за оптимальної вологості, рівні 0,27 і 0,37 відповідно. Для глинистого ґрунту такі значення становлять 0,20 і 0,25 відповідно.

3. Глинистий ґрунт має значну неоднорідність, яку потрібно врахувати під час влаштування експериментальних конструкцій.



а)



б)

Рисунок 4.2 – Залежність щільності скелету верхнього шару від вологості: *а*) – ґрунту; *б*) – піску

У табл. 4.3 наведено рекомендації щодо рецептів піщаної суміші в якості заповнювача дренажної траншеї, а також визначення коефіцієнта фільтрації суміші за підібраним складом.

Таблиця 4.3 – Рецепти піщаної суміші в якості заповнювача дренажної траншеї та визначення коефіцієнта фільтрації за підібраним складом піщаної суміші

Найменування фракції	Співвідношення компонентів у рецептах				
	фр. 2-3 мм	Рецепт №1	Рецепт №2	Рецепт №3	Рецепт №4
фр. 2-3	100%	60,0%	75,0%	60,0%	75,0%
фр. 0,315-0,63	0%	0,0%	0,0%	20,0%	12,5%
фр. 0,14-0,315	0%	40,0%	25,0%	20,0%	12,5%
Щільність, г/см^3	1,691	2,065	1,976	2,055	1,898

Значення коефіцієнта фільтрації							
Лабораторний номер ґрунту (номер рецепту)	Градієнт напору, ***i***	Температура води ***T***, ^{0}C	Тривалість фільтрації ***t***, с	Об`єм профільтрованої води ***Q***, см^3	Температурна поправка ***r***	Площа поперечного перерізу зразка ґрунту ***F***, см^2	Коефіцієнт фільтрації за 10^{0}C $K_{\phi}^{(10)}$, м/доб.
Рецепт #2 фр. 2-3 – 75,0% фр. 0,14-0,315 – 25,0%	1	19,5	60	6	1,285	25	2,689494
	1	19,5	504	100	1,285	25	5,336298
Рецепт #3 фр. 2-3 – 60,0% фр. 0,315-0,63 – 20,0% фр. 0,14-0,315 – 20,0%	1	19,5	60	10	1,285	25	4,48249
	1	19,5	555	100	1,285	25	4,845935

Експериментальні дослідження проводилися в навчально-науковій лабораторії кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету на спеціальній моделюючій установці ДК [212–215]. Параметри установки дають змогу влаштовувати один погонний метр ДК (від осі дороги половину в поперечному профілі) відповідно до реальних

натурних умов для доріг III та IV категорій. Установка має розмір 1,0 м × 4,0 м × 1,5 м. Передня стінка корпусу установки влаштована з органічного скла, що дає змогу безпосередньо спостерігати за формуванням фільтраційного потоку в дренажній траншеї.

Під час проведення досліджень використовувалися типові конструкції поперечних дренажів мілкого закладання (ПДМЗ) із різних матеріалів-наповнювачів [216]. На дні установки влаштовано шар піску товщиною 0,05 м, зверху накритий шаром ГСМ. На пісок відсипано та ущільнено шарами із супіщаного ґрунту ЗП, загальною товщиною 0,55 м. Верхній шар ґрунту ЗП відповідає похилу проїзної частини – 25 ‰.

У верхньому шарі ґрунту було влаштовано прямокутну дренажну траншею глибиною 0,20 м та шириною 0,25 м, обкладену по периметру геосинтетичним матеріалом (ГСМ) (Геотекстиль 200). Похил дна траншеї прийнято рівним похилу верхнього шару ґрунту. На лабораторній установці проводилися дослідження умов роботи двох типів ПДМЗ із різних матеріалів-наповнювачів траншеї з визначення інтенсивності водовідведення.

На дно траншеї ПДМЗ № 1 згори розкладеного по периметру ГСМ укладають перфоровану трубу ПВХ (типу SN2), яку попередньо обгорнуто ГСМ із перекриттям 0,1 м. ГСМ на трубі зшито синтетичною ниткою. Дренажну трубу щільно засипано митим кварцовим крупнозернистим піском фракції від 2 мм до 3 мм. Фільтруючу обсипку закрито краями ГСМ із перекриттям 0,3 м та закріплено дерев’яними шпичками з кроком 0,25 м. Технологію влаштування, як приклад, ПДМЗ №1 наведено у Додатку Г, а конструктивну схему експериментальної установки з трубою ПВХ наведено на рис. 4.3 а, б.

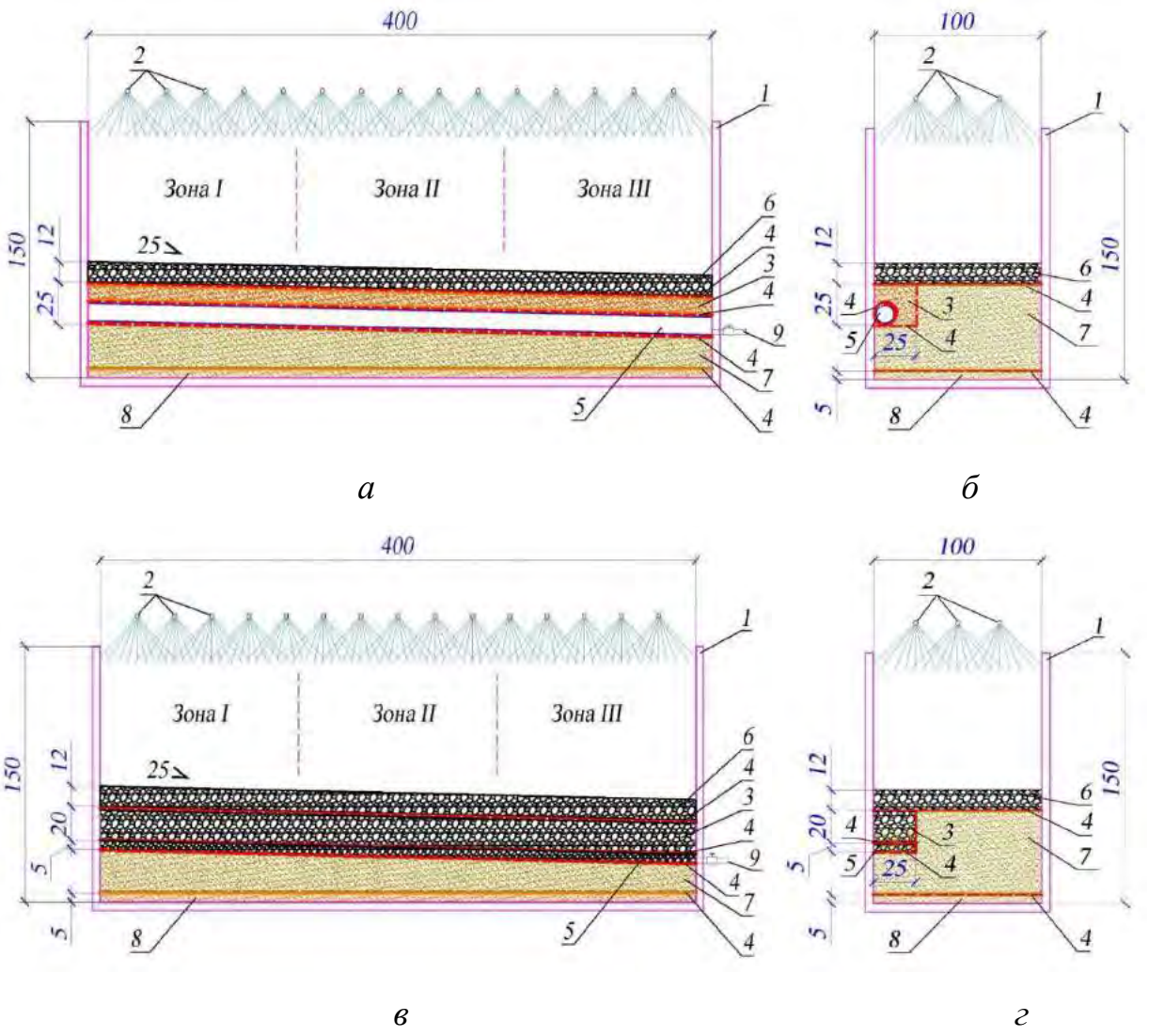


Рисунок 4.3 – Експериментальна установка з: ПДМЗ № 1 з трубою ПВХ: *а* – бокова площина, *б* – торцева площина; ПДМЗ № 2 зі щебеневого ядра: *в* – бокова площина, *г* – торцева площина

Умовні познаки на рис. 4.3:

1 – корпус експериментальної установки;

2 – система імітації дощових опадів;

3 – заповнювач дренажної траншеї – кварцовий митий пісок фракції від 2 мм до 3 мм (*а, б*);

3 – заповнювач дренажної траншеї – митий щебінь фракції від 20 мм до 40 мм (*в, г*);

4 – прошарок ГСМ;

5 – дренажна труба ПВХ діаметром 100 мм з отворами (*а, б*);

5 – заповнювач дренажної траншеї – митий щебінь фракції від 5 мм до

10 мм (*в, г*);

6 – дренувальний шар – митий щебінь фракції від 20 мм до 40 мм;

7 – ґрунт – супісок пилуватий;

8 – шар дрібнозернистого піску;

9 – відвідний отвір (кран);

10 – передня стінка корпусу експериментальної установки з оргскла.

У ПДМЗ № 2 на дно траншеї укладено шар митого щебню фракції від 5 мм до 10 мм товщиною 0,05 м, вкрито ГСМ та укладено наступний шар до верху траншеї з митого щебню фракції від 20 мм до 40 мм товщиною 0,2 м. Щебеневе ядро також закрито краями ГСМ з перекриттям 0,3 м та закріплено дерев'яними шпичками з кроком 0,25 м. ПДМЗ № 2 зі щебеневим ядром наведена на рис. 4.3 в, г.

Траншею та ЗП вкрито ГСМ та було влаштовано дренувальний шар із митого щебню фракції від 20 мм до 40 мм товщиною 0,12 м. Влаштування щебеневого шару обумовлене тим, що він має контактну, пористу структуру з коефіцієнтом фільтрації 200 м/д, не затримує воду, що дозволяє більш ефективно дослідити роботу дренажної траншеї та визначити ефективність її роботи за інтенсивністю водовідведення.

З метою визначення тривалості та кількості відведення вологи з ґрунту ЗП ПДМЗ було визначено кількість води, що випаде на 4 м^2 поверхні лабораторної установки дорожньої конструкції. Кількість води відповідала кількості зливових опадів 5 % забезпеченості. Для розрахунку використовувались метеорологічні дані: інтенсивність зливових опадів 5 % забезпеченості $i_{зд5}$ та тривалість злив 5 % забезпеченості $T_з$, згідно з [80]. Кількість зливових опадів 5 % забезпеченості ($q_{зд5}$), м^3 на 4 м^2 визначалась за формулою $q_{зд5}=i_{зд5}\cdot T_з\cdot 4\cdot 10^{-3}$. Для умов Київської області кількість зливових опадів 5 % забезпеченості $q_{зд5}$=25 л на 4 м^2.

Ця визначена кількість опадів надходила на поверхню дренуючого шару за допомогою системи імітації дощових опадів (рис. 4.3), яка забезпечувала рівномірний розподіл вологи за площиною лабораторної установки. Під час проведення кожного дослідження перед зволоженням проводилося вимірювання

вологості ґрунту ЗП відповідно до табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Експериментальні вимірювання вологості ЗП перед зволоженням (I, II, III – відповідні зони на експериментальній установці)

Дата проведення експерименту	Вологість ґрунту W, %			
	Зона I	Зона II	Зона III	Середнє значення
ПДМЗ № 2 з щебеневого ядра				
11.02.2020	14,5	13,2	12,3	13,2
12.02.2020	13,1	12,9	13,1	13,1
14.02.2020	13,5	12,5	13,1	13,0
ПДМЗ № 1 з труби ПВХ				
17.02.2020	12,4	10,2	11,5	11,4
19.02.2020	12,2	9,7	11,9	11,3
21.02.2020	10,8	10,6	11,5	11,0

На основі результатів проведених вимірів побудовано графіки зміни:

− вологості в ґрунті та модуля деформації земляного полотна до зволоження та після того, як дренажна конструкція відвела воду (дренажна конструкція № 1) (рис. 4.4, а, б);

− вологості в ґрунті та модуля деформації земляного полотна та в основі дорожнього одягу до зволоження та після того, як дренажна конструкція відвела воду (дренажна конструкція № 1) (рис. 4.4, в, г);

− вологості в ґрунті земляного полотна та в основі, модуля деформації на основі дорожнього одягу до зволоження та після того, як дренажна конструкція відвела воду (дренажна конструкція № 2) (рис. 4.4, д, е).

Показники на глибині 15 см відповідають показникам ґрунту до зволоження (рис. 4.4 а, б). Кількісні показники на глибині 5 см свідчать про те, що ґрунт протягом 40 хвилин після зволоження починає насичуватись вологою (рис. 4.4, а, б). Середня вологість ґрунту до зволоження складає 11,3 %, Середня вологість ґрунту після зволоження водою – 13,13 %. Після зволоження ґрунту земляного полотна кількістю вологи, що відповідає зливовим опадам 5 % забезпеченості (для

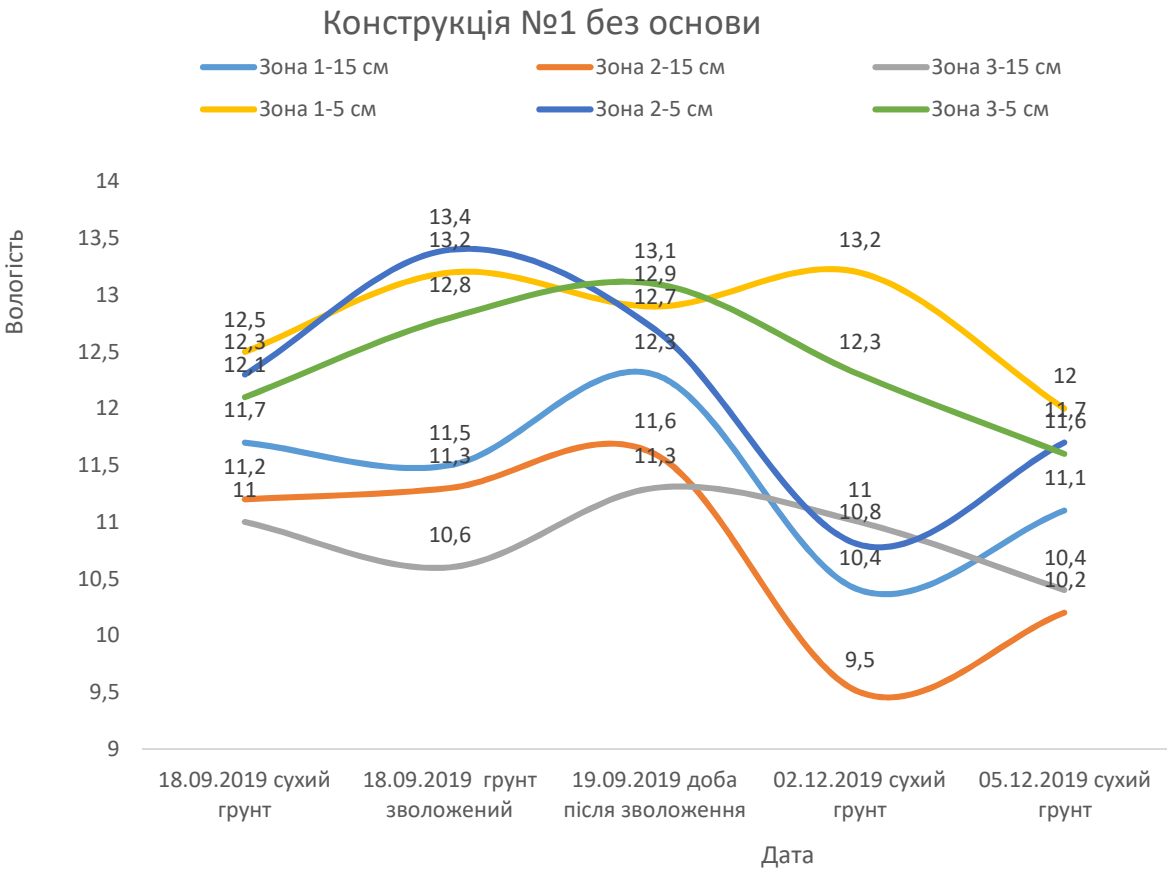
умов Київської області у весняний період) відбувається зменшення модуля деформації в середньому на 34 %.

За умови збільшення вологості у верхній зоні земляного полотна зменшується модуль деформації. Навпаки, після просушування ґрунту з часом вологість зменшується орієнтовно на 10 %, що суттєво впливає на значення модуля деформації, який збільшується майже удвічі (рис. 4.4, б). Дослідження на конструкції № 1 повторили через декілька днів. Результат досліджень відповідав першим вимірам. Конструкція також відвела близько 6 л води з 25 л і майже за той же термін до 40 хвилин.

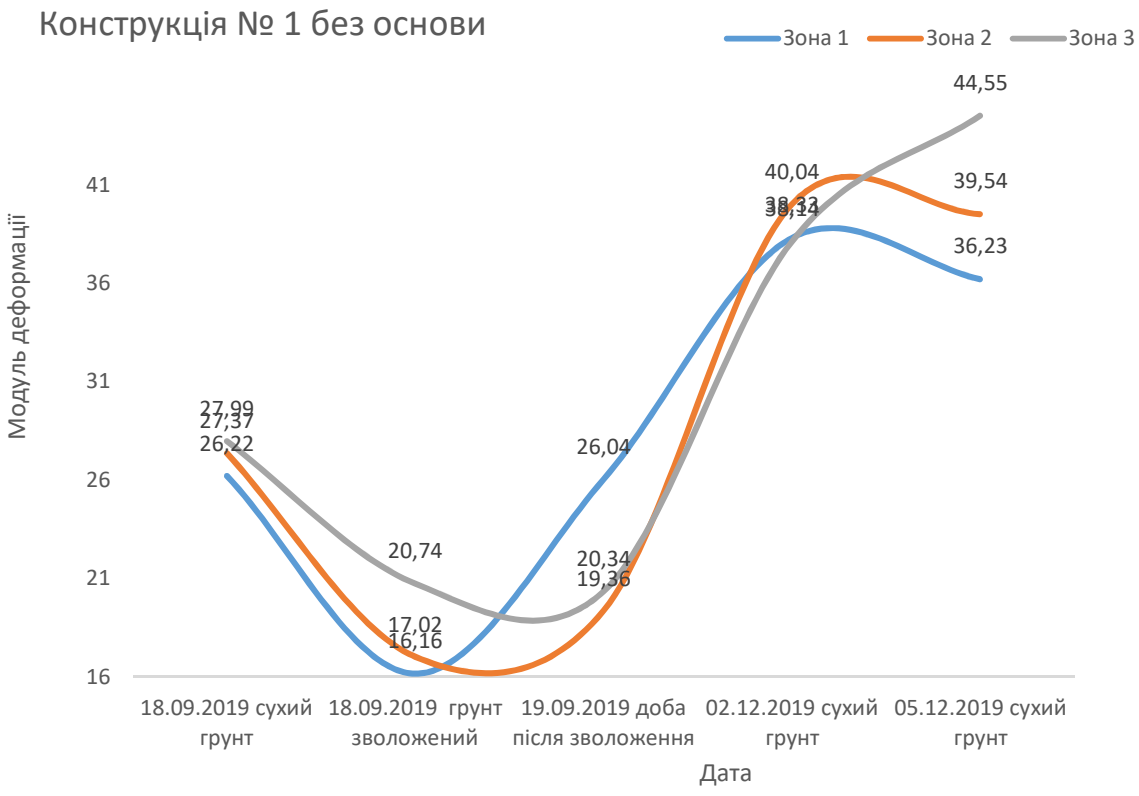
Спостерігається суттєва різниця, майже в 10 разів, між вологістю ґрунту земляного полотна та вологістю щебеневого шару основи (рис. 4.4, в). Перевищення вологості ґрунту спостерігається як до зволоження, так і після, вологість щебню майже не змінюється. Зниження модуля деформації на щебеневій основі свідчить про недостатню щільність основи (рис. 4.4, г), але основна задача дослідження полягає в прискореному процесі фільтрації.

Під час проведення досліджень на дренажній конструкції № 2 залишається тенденція щодо малої зміни вологості шару щебеневої основи, а також збільшення модуля пружності за умови зменшення вологості (рис. 4.4, д, е).

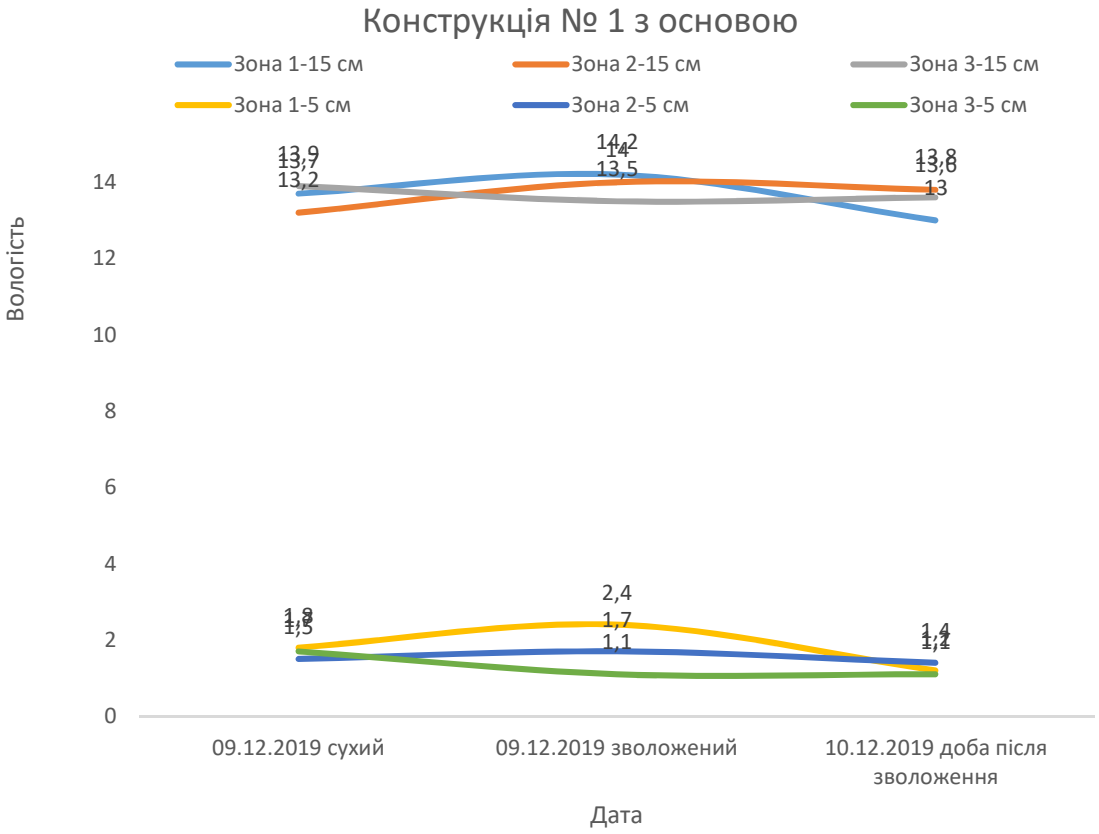
Суттєво відрізняється процес відведення води з дренажної конструкції № 2. Після зволоження (25 л на 4 м^2) було відведено 80 % води за 63 хвилини, що свідчить про високу ефективність роботи дренажної конструкції № 2 [217–219].


Конструкція №1 без основи
Зона 1-15 см
Зона 2-15 см
Зона 3-15 см
Зона 1-5 см
Зона 2-5 см
Зона 3-5 см
Вологість
14
13,5
13
12,5
12
11,5
11
10,5
10
9,5
9
18.09.2019 сухий грунт
18.09.2019 грунт зволожений
19.09.2019 доба після зволоження
02.12.2019 сухий грунт
05.12.2019 сухий грунт
Дата

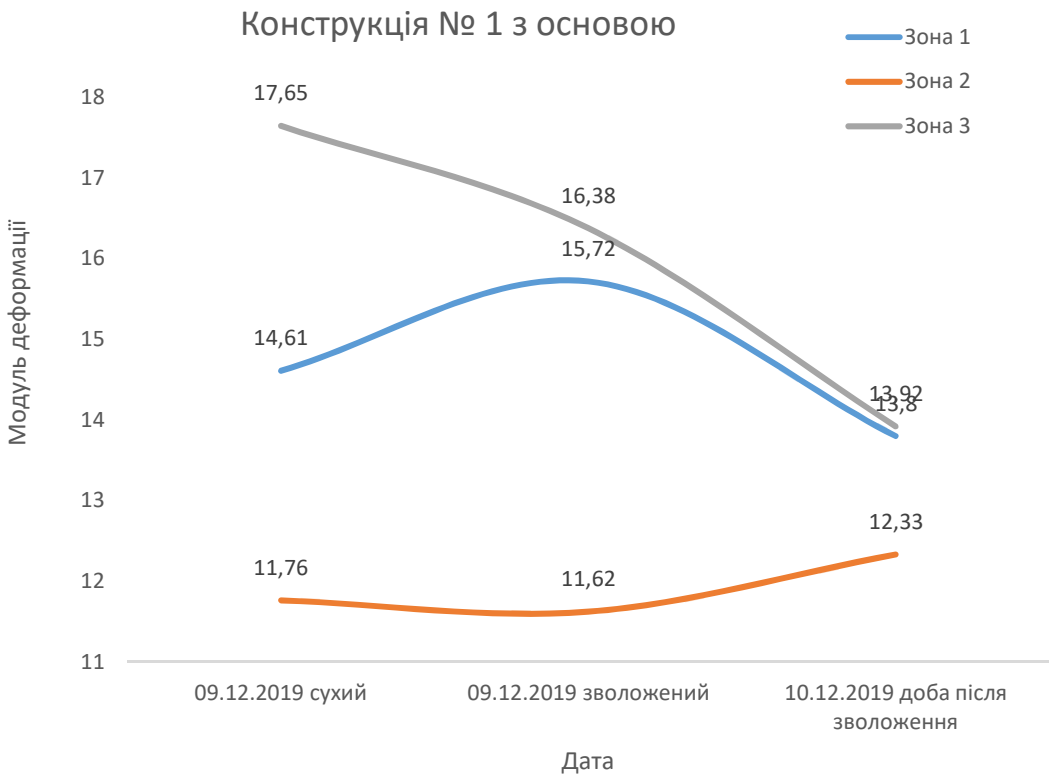
а)


Конструкція № 1 без основи
Зона 1
Зона 2
Зона 3
Модуль деформації
41
36
31
26
21
16
18.09.2019 сухий грунт
18.09.2019 грунт зволожений
19.09.2019 доба після зволоження
02.12.2019 сухий грунт
05.12.2019 сухий грунт
Дата

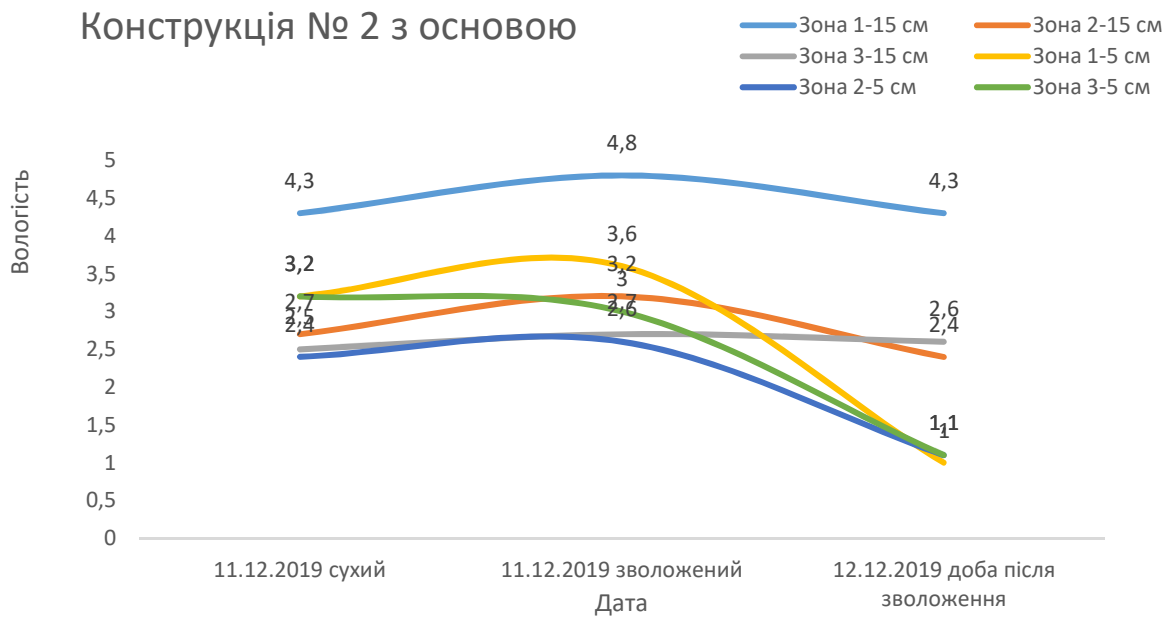
б)


Конструкція № 1 з основою
Зона 1-15 см
Зона 2-15 см
Зона 3-15 см
Зона 1-5 см
Зона 2-5 см
Зона 3-5 см
Вологість
14
12
10
8
6
4
2
0
13,9
13,7
13,2
14,2
14
13,5
13,8
13,6
13
2,4
1,7
1,1
1,4
09.12.2019 сухий
09.12.2019 зволожений
10.12.2019 доба після зволоження
Дата

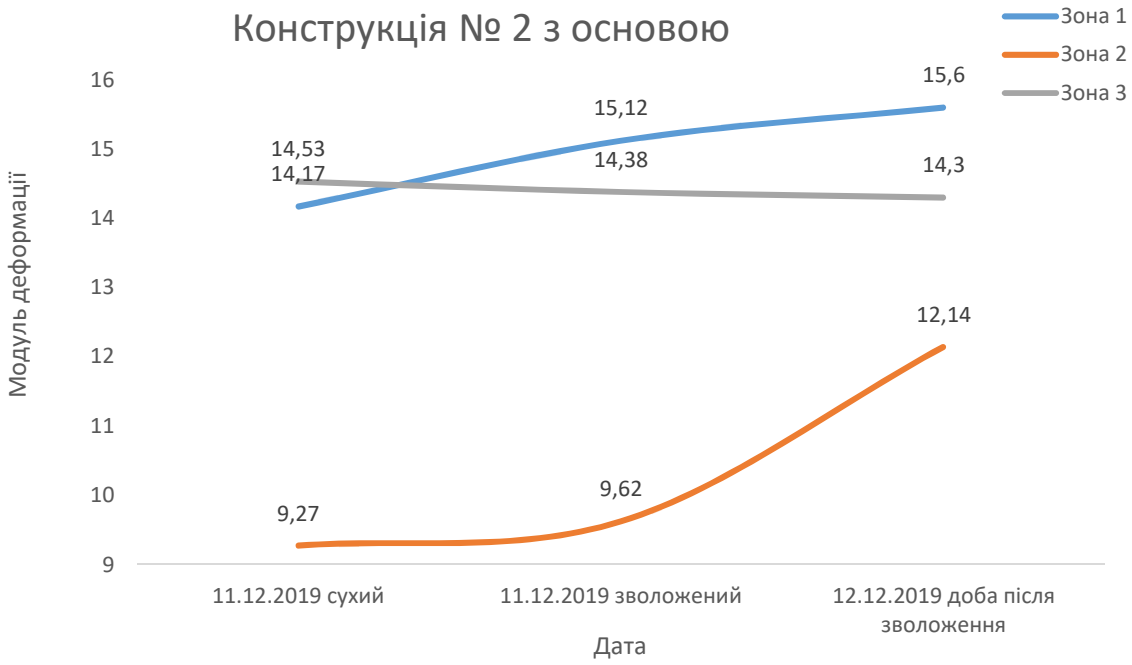
в)


Конструкція № 1 з основою
Зона 1
Зона 2
Зона 3
Модуль деформації
18
17
16
15
14
13
12
11
17,65
16,38
15,72
14,61
13,92
13,8
12,33
11,76
11,62
09.12.2019 сухий
09.12.2019 зволожений
10.12.2019 доба після зволоження
Дата

г)



д)



е)

Рисунок 4.4 – Порівняння результатів вимірювань до зволоження та після того, як дренажна конструкція відвела воду: *а* – вологості в ґрунті земляного полотна, *б* – модуля деформації земляного полотна; в основі дорожнього одягу дренажна конструкція № 1: *в* – вологості в ґрунті земляного полотна, *г* – модуля деформації земляного полотна; в основі дорожнього одягу дренажна конструкція № 2: *д* – вологості в ґрунті земляного полотна, *е* – модуля деформації земляного полотна

За результатами проведених досліджень можна зробити висновок, що швидкість водовідведення дренажної конструкції № 1 вища ніж дренажної конструкції № 2, але водовідведення у кількісному співвідношенні конструкції № 2 суттєво перевищує конструкцію № 1, майже в 3,5 рази. При цьому варто звернути увагу на те, що вологість ґрунту була невеликою і складала до 15 %. Таким чином дренажна конструкція № 2 є ефективнішою в роботі, але залишається відкритим питання щодо тривалості її роботи, оскільки за умови такого суттєвого водовідведення вона може швидше замулюватись. Дренажна конструкція № 1 має меншу здатність віддавати воду, наповнювач дренажної траншеї поглинає велику кількість води і тримає її. Та труба ПВХ перфорована отворами, що відповідають розмірам дренувального наповнювача, не так швидко буде замулюватись і матиме більш тривалий строк служби.

4.2 Отримання кореляційно-регресійний залежностей на основі результатів експериментальних досліджень за двома типами поперечних дренажів мілкого закладання

З метою узагальнення даних експериментальних досліджень та отримання уніфікованих залежностей між досліджуваними величинами необхідно провести їх кореляційно-регресійний аналіз та виконати серію числових експериментів на основі отриманих залежностей.

На сьогоднішній день методи кореляційно-регресійного аналізу є одним із найбільш ефективних інструментаріїв для дослідження складних фізичних процесів, що дає можливість не лише встановлювати залежності між досліджуваними параметрами, а й досліджувати причинно-наслідкові зв'язки між ними.

Відповідно до загальноприйнятих підходів кореляційно-регресійний аналіз реалізується в декілька етапів:

1. Побудова кореляційного поля між досліджуваними параметрами, що дає можливість якісно оцінити форму, спрямованість і тісноту взаємозв'язку між отриманими експериментальними даними;

2. Вибір рівняння регресії;
3. Визначення параметрів рівняння регресії;
4. Оцінка щільності зв'язку між досліджуваними параметрами;
5. Перевірка щільності зв'язку та оцінка адекватності моделі.

Неадекватність чи низька адекватність кореляційно-регресійної моделі може бути обумовлена наступними причинами:

• неправильний вибір структури рівняння регресії;

• неправильний вибір числа рівнів варіювання (їх занадто мало);

• діапазони зміни змінних занадто вузькі;

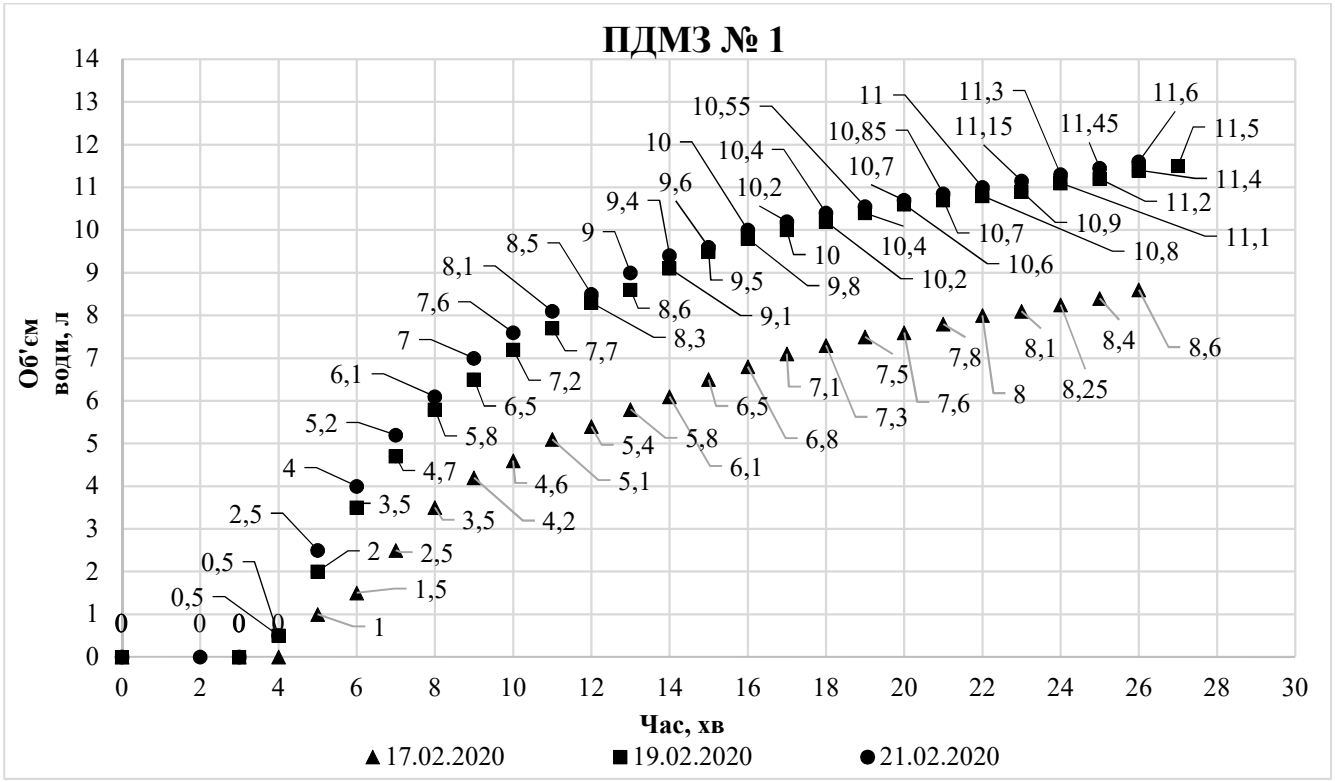
• у план і експеримент включені не всі значимі фактори впливу;

• на аналізований відгук занадто великий вплив роблять “шумові” (некеровані, неконтрольовані) ефекти.

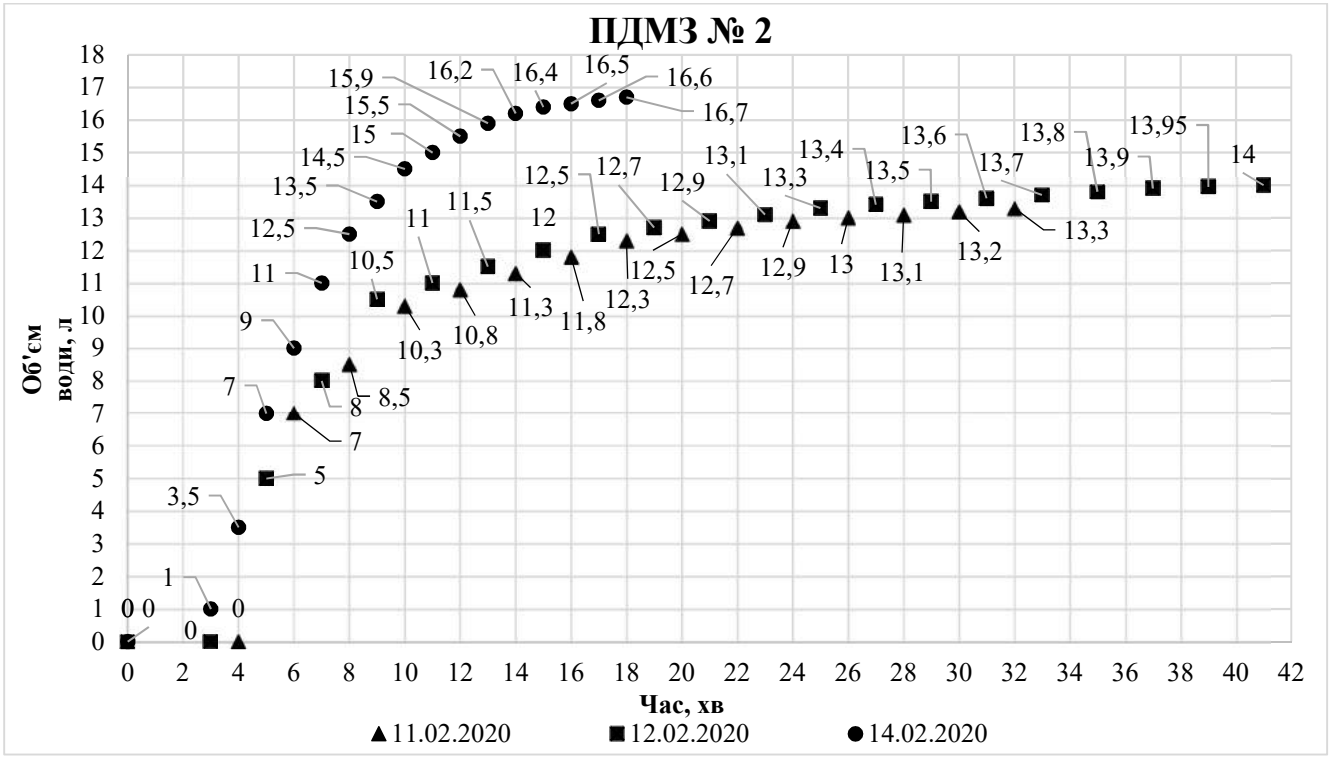
В рамках застосування методів кореляційно-регресійного аналізу для обробки отриманих експериментальних даних на початковому етапі було побудовано кореляційне поле між кількістю відфільтрованої води та часом її фільтрування для кожної із досліджуваних дренувальних установок.

На рис. 4.5 наведено кореляційне поле між кількістю відфільтрованої води та часом її фільтрування для ПДЗМ № 1 з труби ПВХ та для ПДЗМ № 2 з щебеневого ядра. Точки відповідають результатам експериментальних вимірювань.

Під час проведення експерименту для ПДМЗ № 1 було виявлено, що після того, як водний потік сформувався в траншеї й основну частину води було відведено, ПДМЗ № 1 ще протягом 3 год продовжувала відводити воду у формі крапель, тому загальний об’єм відведеної води даною конструкцією збільшився. Що стосується ПДМЗ № 2, то для даної установки водний потік сформувався в траншеї майже одразу після закінчення подачі води. Час сформованого потоку збігається із загальним часом відведення води. Загальний об’єм відведеної води даними конструкціями наведено у табл. 4.5.



а)



б)

Рисунок 4.5 – Кореляційне поле між кількістю відфільтрованої води та часом її фільтрування за даними експериментальних вимірювань: *а* – для ПДМЗ № 1; *б* – для ПДМЗ № 2, де 17.02.2020; 19.02.2020; 21.02.2020;11.02.2020; 12.02.2020; 14.02.2020 – дати проведення досліджень

Таблиця 4.5 – Загальний об’єм відведеної води з конструкцій ПДМЗ

Дата проведення експери-менту	Об’єм води, який надійшов до конструкції $Q_{заг.}$, л.	Об’єм відведеної води під час сформованого потоку $Q_{від}$, л.	Час сформо-ваного потоку $t_{сформ}$, хв	Загальний об’єм відведе-ної води $Q_{заг.від.}$, л.	Загальний час відведен-ня води $t_{заг.від.}$, хв
ПДМЗ № 1					
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
ПДМЗ № 2					
11.02.2020	25	13,3	32	13,3	32
12.02.2020	25	14,0	41	14,0	41
14.02.2020	25	16,7	18	16,7	18

Аналіз кореляційних полів між кількістю відфільтрованої води та часом її фільтрування для досліджуваних конструкцій ПДМЗ, отриманий на основі експериментальних даних (рис. 4.6), дає підстави висунути гіпотезу про наявність кореляційних зв’язків між цими двома величинами.

Одним із найважливіших етапів кореляційно-регресійного аналізу експериментальних даних є вибір виду та структури рівнянь регресії, що залежить в першу чергу від розподілу експериментальних даних та аналізу їх кореляційних полів [91, 101]. Рівняння регресії має бути підібрано таким чином, щоб максимально точно описати розподіл експериментальних даних та мінімізувати квадрати відхилень між експериментальними та розрахунково-регресійними значеннями досліджуваних параметрів (метод найменших квадратів).

Математично задача пошуку невідомих параметрів рівняння регресії за методом найменших квадратів зводиться до розв'язку задачі:

$$S = \sum_i \left(y_i - f\left(x_i\right) \right)^2 \to \min , \tag{4.3}$$

де y_i – дискретні значення даних експериментальних вимірювань;

$y = f(x)$ - шукане рівняння регресії, яке у відповідних точках буде приймати значення, якомога близькі до експериментальних.

Для подальшого розв'язку задачі та знаходження невідомих параметрів регресійного рівняння використовують стандарту схему пошуку екстремуму функції (мінімуму), прирівнюючи частинні похідні функції до нуля та аналізуючи зміну знаку функції при переході через критичні точки.

Аналіз застосування методів кореляційно-регресійного аналізу для дослідження фізичних процесів показує, що при розв'язуванні практичних прикладних задач найчастіше використовують лінійні, поліноміальні, логарифмічні, степеневі, експоненціальні та гіперболічні типи регресій, кожен з яких має свої особливості та області застосування:

1. **Лінійна** регресія є найпростішим видом регресій, що застосовується для моделювання явищ і процесів, значення яких зростають чи спадають рівномірно (з постійною швидкістю):

$$y = ax + b, \tag{4.4}$$

де a – тангенс кута нахилу лінійної регресії до осі абсцис;

b – координата точки перетину лінійної регресії з віссю ординат.

Відповідно до методу найменших квадратів невідомі значення a і b визначають наступним чином:

$$\begin{cases} a = \dfrac{\sum x_i \sum y_i - n\sum x_i y_i}{\left(\sum x_i\right)^2 - n\sum x_i^2}, \\ b = \dfrac{\sum x_i \sum x_i y_i - \sum x_i^2 \sum y_i}{\left(\sum x_i\right)^2 - n\sum x_i^2}. \end{cases} \tag{4.5}$$

2. **Поліноміальна** регресія застосовується для опису процесів, що мають кілька яскраво виражених екстремумів (максимумів і мінімумів). Вибір ступеня поліному визначається кількістю екстремумівдосліджуваної характеристики.

Так, поліном другого ступеня може добре описати процес, що має тільки один максимум чи мінімум; поліном третього ступеня – не більше двох екстремумів; поліном четвертого ступеня – не більше трьох екстремумів і т.д.

У цьому випадку регресія будується відповідно до рівняння:

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + ... + a_n x^n, \tag{4.6}$$

де коефіцієнти $a_0, a_1, a_2, ..., a_n$ – константи, значення яких визначаються за методом найменших квадратів;

n – степінь поліному.

У випадку поліному другого ступеня отримаємо параболічну регресію, що дозволяє описувати процеси, у яких зі зростанням однієї випадкової величини умовні середні другої зростають (спадають), досягають максимуму (мінімуму), а потім спадають (зростають):

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2. \tag{4.7}$$

Невідомі параметри моделі a_0, a_1, a_2 можна визначити відповідно до методу найменших квадратів з системи нелінійних рівнянь:

$$\begin{cases} a_2 \sum x_i^2 + a_1 \sum x_i + n a_0 = \sum y_i, \\ a_2 \sum x_i^3 + a_1 \sum x_i^2 + a_0 \sum x_i = \sum x_i y_i, \\ a_2 \sum x_i^4 + a_1 \sum x_i^3 + a_0 \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i. \end{cases} \tag{4.8}$$

У випадку поліному третього ступеня будемо мати кубічну регресію виду:

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 . \tag{4.9}$$

Система рівнянь для знаходження невідомих параметрів моделі a_0, a_1, a_2, a_3 в рамках методу найменших квадратів набуде вигляду:

$$\begin{cases} a_3 \sum x_i^3 + a_2 \sum x_i^2 + a_1 \sum x_i + n a_0 = \sum y_i , \\ a_3 \sum x_i^4 + a_2 \sum x_i^3 + a_1 \sum x_i^2 + a_0 \sum x_i = \sum x_i y_i , \\ a_3 \sum x_i^5 + a_2 \sum x_i^4 + a_1 \sum x_i^3 + a_0 \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i , \\ a_3 \sum x_i^6 + a_2 \sum x_i^5 + a_1 \sum x_i^4 + a_0 \sum x_i^3 = \sum x_i^3 y_i . \end{cases} \tag{4.10}$$

Розв’язок систем нелінійних рівнянь (4.8), (4.10) можна знайти різними загальновідомими методами (матричним, Крамера, Гаусса, тощо).

3. **Логарифмічна** регресія з успіхом застосовується при моделюванні характеристик, значення яких спочатку швидко зростають (спадають), а потім поступово стабілізуються і виходять на деякий стаціонарний режим. Математична реалізація даного виду регресії здійснюється на основі рівняння:

$$y = a + b \ln x . \tag{4.11}$$

Невідомі коефіцієнти логарифмічної регресії в рамках методу найменших квадратів визначаються наступним чином:

$$\begin{cases} b = \dfrac{n \sum \left(y_i \ln x_i \right) - \sum \ln x_i \sum y_i}{n \sum \ln^2 x_i - \left(\sum \ln x_i \right)^2} , \\ a = \dfrac{1}{n} \sum y_i - \dfrac{b}{n} \ln x_i . \end{cases} \tag{4.12}$$

4. **Степенева** регресія гарно описує фізичні процеси, що характеризуються постійною зміноюшвидкості росту досліджуваного параметру залежно від інших

параметрів моделі і описується рівнянням:

$$y = ax^b, \tag{4.13}$$

де невідомі параметри параметри моделі визначаються за методом найменших квадратів наступним чином:

$$\begin{cases} b = \dfrac{n\sum\left(\ln x_i \ln y_i\right) - \sum \ln x_i \sum y_i}{n\sum \ln^2 x_i - \left(\sum \ln x_i\right)^2}, \\ a = \exp\left(\dfrac{1}{n}\sum \ln y_i - \dfrac{b}{n}\sum \ln x_i\right). \end{cases} \tag{4.14}$$

4. **Експоненціальну** регресію варто використовувати в тому випадку, якщо швидкість зміни даних монотонно зростає. Обмеженням до використання даного виду регресії є вміст даних з нульовими чи негативними значення. Рівняння даного виду регресій має вигляд:

$$y = e^{a+bx}. \tag{4.15}$$

За методом найменших квадратів невідомі параметри експоненціальної регресії визначаються зі співвідношень:

$$\begin{cases} b = \dfrac{n\sum x_i \ln y_i - \sum x_i \sum \ln y_i}{n\sum x_i^2 - \left(\sum x_i\right)^2}, \\ a = \dfrac{1}{n}\sum \ln y_i - \dfrac{b}{n}\sum x_i. \end{cases} \tag{4.16}$$

5. **Показникова** регресія застосовується для дослідження фізичних процесів, у яких зростання незалежної змінної приводить до поступового зростання досліджуваної залежної ознаки і це зростання переходить в пропорційне збільшення:

$$y = a \cdot b^x. \tag{4.17}$$

Невідомі коефіцієнти показникової регресії визначаються із співвідношень:

$$\begin{cases} b = \exp\dfrac{n\sum x_i \ln y_i - \sum x_i \sum \ln y_i}{n\sum x_i^2 - \left(\sum x_i\right)^2}, \\ a = \exp\left(\dfrac{1}{n}\sum \ln y_i - \dfrac{\ln b}{n}\sum x_i\right). \end{cases} \tag{4.18}$$

6. **Гіперболічна** регресія застосовується при дослідженні фізичних процесів, що характеризуються швидким зростанням залежної ознаки на початковому етапі процесу та асиптотичному її наближенні до деякого значення при нескінченному зростанні незалежної змінної. Рівняння гіперболічної регресії шукають у наступному вигляді:

$$y = a + \frac{b}{x}, \tag{4.19}$$

де невідомі параметри регресії за методом найменших квадратів визначають із співвідношень:

$$\begin{cases} b = \dfrac{n\sum \dfrac{y_i}{x_i} - \sum \dfrac{1}{x_i}\sum y_i}{n\sum \dfrac{1}{x_i^2} - \left(\sum \dfrac{1}{x_i}\right)^2}, \\ a = \dfrac{1}{n}\sum y_i - \dfrac{b}{n}\sum \dfrac{1}{x_i}. \end{cases} \tag{4.20}$$

Враховуючи, що характерною особливістю роботи обох досліджуваних дренувальних установок є те, що за умови збільшення часу *t* значення функції, що характеризує кількість відведеної води, починає зростати значно повільніше, ніж

за малих значень часу *t*, і врешті-решт виходить на деякий стаціонарний режим, що відповідає асимптотичному наближенню функції до деякої лінії, то рівняння регресії доцільно шукати у вигляді гіперболічної функції виду:

$$\hat{Q}(t) = a + \frac{b}{t}, \tag{4.21}$$

де $\hat{Q}(t)$ – розрахункова кількість відведеної води (по відношенню до початкового об'єму);

t – час відведення води, хв.;

a, b – безрозмірні параметри регресії.

Коефіцієнти *a* і *b*, що входять до рівняння регресії (4.21) обчислюють на основі методу найменших квадратів за формулами [220]:

$$b = \frac{n\sum\frac{Q_i}{t_i} - \sum\frac{1}{t_i}\cdot\sum Q_i}{n\sum\frac{1}{t_i^2} - \left(\sum\frac{1}{t_i}\right)^2}, \tag{4.22}$$

$$a = \frac{1}{n}\sum Q_i - \frac{b}{n}\cdot\frac{1}{t_i}. \tag{4.23}$$

Для оцінки щільності зв'язку між досліджуваними параметрами обчислюють коефіцієнт парної кореляції за формулою:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum\left(Q_{i.} - \hat{Q}_i\right)^2}{\sum\left(Q_i - \overline{Q}_{i.}\right)^2}}. \tag{4.24}$$

Значення коефіцієнта кореляції *R* повинно знаходитися у межах $-1 \le R \le +1$.

Якщо коефіцієнт кореляції позитивний, то досліджувані ознаки

характеризуються позитивною кореляцією, тобто збільшення однієї ознаки веде до збільшення іншої. Якщо коефіцієнт кореляції від'ємний, то існує обернена залежність між показниками, а досліджувані ознаки характеризуються від'ємною кореляцією, тобто при збільшенні одного показника – інший зменшується.

Чим ближче значення коефіцієнта кореляції до 1, тим тісніший зв'язок між досліджуваними явищами. Коли коефіцієнт кореляції наближається до 0, то кореляція між досліджуваними ознаками дуже мала, або її немає зовсім.

В рамках кореляційно-регресійного аналізу важливим також є аналіз коефіцієнта детермінації R^2, який показує частку коливань результативної ознаки, що зумовлена коливанням факторної ознаки.

Коефіцієнт детермінації приймає значення на відрізку [0;1], тобто $0 \le R^2 \le 1$. Чим ближче R^2 до одиниці, тим краще регресія апроксимує емпіричні дані.

Якщо $R^2=1$, між змінними x та y існує лінійна функціональна залежність.

Якщо $R^2=0$, то варіація залежної змінної повністю обумовлена впливом випадкових та неврахованих у моделі змінних.

На практиці для оцінки ступеня апроксимації рівнянням регресії вихідних даних використовують наступні емпіричні правила:

1) $R^2>0,95$ – висока точність апроксимації;

2) $0,8<R^2<0,95$ – задовільна апроксимація;

3) $R^2<0,6$ – незадовільна апроксимація.

Значимість параметрів регресії оцінюють за F-критерієм Фішера для прийнятого рівня значущості α, порівнюючи його критичне (табличне) значення $F_{\text{табл.}}$ з фактичним значенням $F_{\text{факт.}}$, що визначається за формулою:

$$F_{\text{факт.}} = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{n-m-1}{m}, \qquad (4.25)$$

де m – кількість параметрів при факторній ознаці;

n – кількість спостережень.

Середня похибка апроксимації експериментальних даних кореляційно-регресійної залежності обчислюють за формулою:

$$\overline{A} = \frac{1}{n} \sum \frac{Q_i - \hat{Q}_i}{Q_i} \cdot 100\ \%. \tag{4.26}$$

Після визначення необхідних параметрів регресії проводиться безпосередній підрахунок за кожною дренажною конструкцією, враховуючи специфіку різних матеріалів-наповнювачів.

В якості прикладу нижче наведено процедуру пошуку рівняння регресії для одного із експериментів для ПДЗМ № 2 (11.02.2020).

Таблиця 4.6 – Розрахункова таблиця для знаходження параметрів регресійної моделі

Експериментальні дані			Розрахункові дані					
№ за міру i	Час відведення, t_i	Кількість відведеної води, Q_i	$1/t_i$	$1/t^2_i$	Q_i/t_i	$\hat{Q}_i$	$\left(Q_i-\hat{Q}_i\right)^2$	$\left(Q_i-\overline{Q}\right)^2$
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
1	4	0	0,25	0,0625	0	0,0423	$1{,}8*10^{-3}$	0,1882
2	6	0,28	0,1667	0,0278	0,0467	0,2335	$2{,}2*10^{-3}$	0,0237
3	8	0,34	0,125	0,0156	0,0425	0,3291	$1{,}2*10^{-4}$	0,0088
4	10	0,412	0,1	0,01	0,0412	0,3865	$6{,}5*10^{-4}$	0,0005
5	12	0,432	0,0833	0,0069	0,0360	0,4247	$5{,}3*10^{-5}$	0,000003
6	14	0,452	0,0714	0,0051	0,0323	0,4521	$3{,}5*10^{-9}$	0,0003
7	16	0,4720	0,0625	0,0039	0,0295	0,4725	$3{,}0*10^{-7}$	0,0015
8	18	0,4920	0,0556	0,0031	0,0273	0,4885	$1{,}2*10^{-5}$	0,0034
9	20	0,5	0,05	0,0025	0,0250	0,5012	$1{,}5*10^{-6}$	0,0044
10	22	0,508	0,0455	0,0021	0,0231	0,5117	$1{,}3*10^{-5}$	0,0055
11	24	0,516	0,0417	0,0017	0,0215	0,5203	$1{,}9*10^{-5}$	0,0067
12	26	0,52	0,0385	0,0015	0,0200	0,5277	$5{,}9*10^{-5}$	0,0074
13	28	0,524	0,0357	0,0013	0,0187	0,5340	$1{,}0*10^{-4}$	0,0081

Кінець таблиці 4.6

1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
14	30	0,528	0,0333	0,0011	0,0176	0,5395	$1{,}3*10^{-4}$	0,0089
15	32	0,532	0,0313	0,0010	0,0166	0,5442	$1{,}5*10^{-4}$	0,0096

Сума	270	6,5080	1,1904	0,1461	0,3980	6,5080	$5,26*10^{-3}$	0,2770

Результати розрахунку параметрів кореляційно-регресійної моделі за формулами (4.1)–(4.6)

Рівняння кореляційно-регресійної моделі	Коефіцієнт кореляції	Коефіцієнт детермінації	Середня похибка апроксимації	Значення критерію Фішера при α=0,05	
				Критичне значення	Фактичне значення
$\hat{Q}(t) = 0,6159 - \frac{2,2944}{t}$	0,9325	0,8809	2,72 %	4,3009	162,72

Аналогічним чином було визначено параметри регресійної моделі для решти експериментів для ПДМЗ № 1 та № 2.

Результати кореляційно-регресійного аналізу всіх експериментальних даних наведено у табл. 4.7 та рис. 4.6.

Таблиця 4.7 – Результати кореляційно-регресійного аналізу експериментальних даних

Експеримент №	Рівняння кореляційно-регресійної моделі	Коефіцієнт кореляції	Коефіцієнт детермінації	Середня похибка апроксимації, %	Значення критерію Фішера при α=0,05	
					Критичне значення	Фактичне значення
ПДМЗ № 1						
1	$\hat{Q}(t) = 0,356 - \frac{1,3924}{t}$	0,9325	0,8809	9,3	4,3009	162,72
2	$\hat{Q}(t) = 0,4958 - \frac{1,8178}{t}$	0,9674	0,9358	10,85	4,3009	320,83
3	$\hat{Q}(t) = 0,5064 - \frac{1,82}{t}$	0,9746	0,9498	3,96	4,3009	416,24
ПДМЗ № 2						
1	$Q(t) = 0,6159 - \frac{2,2944}{t}$	0,9905	0,981	2,72	4,6672	671,81
2	$Q(t) = 0,6052 - \frac{1,8677}{t}$	0,9971	0,9942	4,62	4,4139	3111,14
3	$Q(t) = 0,8158 - \frac{2,5108}{t}$	0,9916	0,9832	12,35	4,6001	821,19

Аналіз діапазону значень коефіцієнтів парної кореляції R=0,93–0,99 свідчить про дуже тісний зв'язок між досліджуваними факторами (кількістю відведеної води і часом її відведення). Значення коефіцієнтів детермінації R^2=0,88-0,99 дає підстави

стверджувати, що на 88%-99% кількість відфільтрованої води залежить від часу її фільтрування. Крім того, для всіх кореляційно-регресійних моделей фактичне значення критерію Фішера значно перевищує його критичне значення, що свідчить про статистичну значимість, надійність та адекватність отриманих регресійних моделей. Середня похибка апроксимації для всіх кореляційно-регресійних моделей складає 2,72 %–12,35 %, що дозволяє зробити висновок про високу їх точність.

Таким чином, аналіз показників адекватності отриманих кореляційно-регресійних залежностей дозволяє рекомендувати їх для подальших досліджень та проведення числових експериментів. Побудовані регресійні залежності можна застосовувати для прогнозування кількості відведеної води запропонованими дренажними конструкціями за певний проміжок часу (рис.4.6).

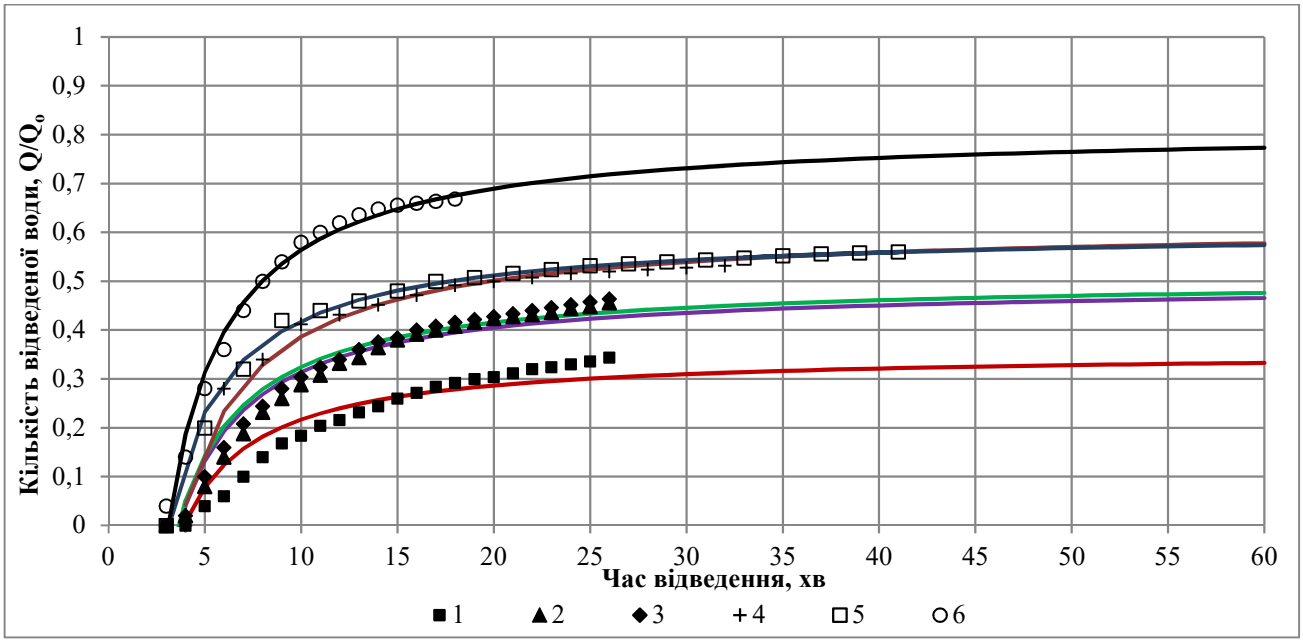


Рисунок 4.6 – Апроксимація експериментальних даних регресійними залежностями (точки – експериментальні дані, суцільні лінії – регресійні криві): 1 – ПДМЗ № 1, $W_{ЗП}$=11,4 %; 2 – ПДМЗ № 1, $W_{ЗП}$=11,3 %; 3 – ПДМЗ № 1, $W_{ЗП}$=11,0 %; 4 – ПДМЗ № 2, $W_{ЗП}$=13,2 %; 5 – ПДМЗ № 2, $W_{ЗП}$=13,1 %; 6 – ПДМЗ № 2, $W_{ЗП}$=13,0 %

З метою уніфікації рівнянь, які наведені у табл. 4.7, визначимо залежності режиму роботи дренувальних конструкцій від початкової вологості $W_{ЗП}$ на підставі аналізу зміни вологості земляного полотна в ході проведення експериментальних

досліджень.

Нижче наведено приклад пошуку однієї із поліноміальних залежностей, зокрема $a(W_{ЗП})$, для ПДМЗ № 1. Вихідними даними є експериментальні заміри вологості $W_{ЗП}$ відповідно до табл. 4.4, a і b – коефіцієнти регресій $Q=Q(t)$ за трьома експериментами, що відповідають даним вологостям.

Залежності $a(W_{ЗП})$ і $b(W_{ЗП})$ будемо шукати у вигляді квадратичних поліномів виду:

$$a\left(W_{ЗП}\right)=a_1\cdot W_{ЗП}^2+b_1\cdot W_{ЗП}+c_1, \tag{4.27}$$

$$b\left(W_{ЗП}\right)=a_2\cdot W_{ЗП}^2+b_2\cdot W_{ЗП}+c_2. \tag{4.28}$$

Знайдемо коефіцієнти a_1, b_1, c_1 за методом найменших квадратів [55] із системи рівнянь:

$$\begin{cases} a_1\sum W_{ЗПi}^2+b_1\sum W_{ЗПi}+n\cdot c_1=\sum a_i, \\ a_1\sum W_{ЗПi}^3+b_1\sum W_{ЗПi}^2+c_1\sum W_{ЗПi}=\sum W_{ЗПi}a_i, \\ a_1\sum W_{ЗПi}^4+b_1\sum W_{ЗПi}^3+c_1\sum W_{ЗПi}^2=\sum W_{ЗПi}^2a_i. \end{cases} \tag{4.29}$$

Підставивши дані, отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} 378,65a_1+33,7b_1+3c_1=1,3582, \\ 4255,441a_1+378,65b_1+33,7c_1=15,2313, \\ 47835,338a_1+4255,441b_1+378,65c_1=170,8489. \end{cases} \tag{4.30}$$

На основі розв’язку системи рівнянь (4.28) за методом Крамера отримаємо шукане рівняння:

$$a\left(W_{ЗП}\right)=-3,4067\cdot W_{ЗП}+75,9333\cdot W_{ЗП}-422,5536 \tag{4.31}$$

Коефіцієнт кореляції R(a, $W_{ЗП}$) ≈1, що говорить про дуже тісний зв’язок між

величинами a і $W_{ЗП}$. Аналогічним чином знаходимо решту залежностей.

Отже, отримаємо для ПДМЗ № 1:

$$a\left(W_{ЗП}\right) = -3,4067 \cdot W_{ЗП}^2 + 75,9333 \cdot W_{ЗП} - 422,5536; \tag{4.32}$$

$$b\left(W_{ЗП}\right) = 10,6166 \cdot W_{ЗП}^2 - 236,7443 \cdot W_{ЗП} + 1317,7511; \tag{4.33}$$

для ПДМЗ № 2:

$$a\left(W_{ЗП}\right) = 11,065 \cdot W_{ЗП}^2 - 290,9027 \cdot W_{ЗП} + 1912,5648; \tag{4.34}$$

$$b\left(W_{ЗП}\right) = -53,49 \cdot W_{ЗП}^2 + 1402,5211 \cdot W_{ЗП} - 9195,4679. \tag{4.35}$$

Якщо замінити в рівняннях кореляційно-регресійної моделі (табл. 4.7) коефіцієнти a та b на відповідні залежності (4.32 – 4.35), то можна отримати уніфіковані рівняння щодо режиму роботи дренувальних конструкцій залежно від початкової вологості $W_{ЗП}$:

- для ПДМЗ №1:

$$Q\left(W_{ЗП};t\right) = \left(\frac{10,6166}{t} - 3,4067\right)W_{ЗП}^2 + \left(75,9333 - \frac{236,7443}{t}\right)W_{ЗП} + \\ + \frac{1317,7511}{t} - 422,5536 \tag{4.36}$$

- для ПДМЗ №2

$$Q\left(W_{ЗП};t\right) = \left(11,065 - \frac{53,49}{t}\right)W_{ЗП}^2 + \left(\frac{1402,5211}{t} - 290,9027\right)W_{ЗП} - \\ - \frac{9195,4679}{t} + 1912,5648 \tag{4.37}$$

Отримані уніфіковані залежності (4.36), (4.37) можна рекомендувати для прогнозування кількості відведеної води залежно від часу її відведення та

початкової вологості земляного полотна, що є важливим для вирішення ряду практичних задач.

За отриманими результатами експериментальних спостережень досліджено процес роботи кожного варіанту конструкції дренажної траншеї та визначено одну з основних властивостей матеріалів-наповнювачів дренувальних траншей – інтенсивність водовідведення. Інтенсивність водовідведення сформованого потоку, коли вода витікала з траншеї струменем, визначалась як $I_{ввсформ.}=Q_{від}/t_{сформ}$. Інтенсивність водовідведення потоку зі змінним напором, коли вода витікала вже краплинами, – $I_{вврозформ.}=Q_{розформ}/(t_{заг.від.}-t_{сформ})$, де $Q_{розформ}=Q_{заг.від}-Q_{від.}$. Загальна інтенсивність водовідведення визначалась, як $I_{ввзаг}=Q_{заг.від.}/t_{заг.від.}$.

Потрібно зазначити, що для ПДМЗ № 2 об'єм відведеної води $Q_{від.}=Q_{заг.від.}$, тобто конструкція працювала в умовах сформованого потоку, вода з траншеї виходила швидко струменем, відповідно до цього інтенсивність водовідведення $I_{ввсформ.}=I_{ввзаг.}$. Інтенсивність водовідведення ПДМЗ № 1 потрібно розділити на два показники за умови водовідведення сформованого $I_{ввсформ.}$ та змінного напору у вигляді крапель $I_{вврозформ}$.

Спостереження за формуванням фільтраційного потоку дали змогу встановити, що процес відведення води за однакових умов є різним для кожної дренажної конструкції. Так, для ПДМЗ № 2 зі щебеневим ядром повний час відведення води становить у середньому 30 хв., а для ПДМЗ № 1 з трубою ПВХ – 206 хв. Це пояснюється тим, що матеріал-наповнювач в ПДМЗ № 1, крупнозернистий пісок фракції від 2 мм до 3 мм, працює як накопичувач та відводить воду перші 26 хв. інтенсивно, потім повільно.

Таблиця 4.8 – Інтенсивність водовідведення ПДМЗ №1 та №2

Наповнювач траншеї	Дата	Потік сформований		Після того, як потік розформувався (в краплинах)			Загальні сумарні показники	
		Інтенсивність водовідведення $I_{ввсформ.}$, л/хв	Відсоток відведеної води від $Q_{заг}$, %	Об'єм відведеної води $Q_{розформ}$, л	Інтенсивність водовідведення $I_{вврозформ.}$, л/хв	Відсоток відведеної води від $Q_{заг.}$, %	Інтенсивність водовідведення $I_{ввзаг}$, л/хв	Відсоток відведеної води від $Q_{заг}$, %
Труба ПВХ, пісок фр. від 2 мм до 3 мм	17.02. 2020	0,3308	34,40	2	0,0111	8,00	0,0515	42,40
	19.02. 2020	0,4259	46,00	2	0,0111	8,00	0,0652	54,00
	21.02. 2020	0,4214	47,20	4	0,0222	16,00	0,0760	63,20
Щебеневе ядро	11.02. 2020	0,4156	53,20				0,4156	53,20
	12.02. 2020	0,3415	56,00				0,3415	56,00
	14.02. 2020	0,9278	66,80				0,9278	66,80
Середнє значення								
Труба ПВХ, пісок фр. від 2 мм до 3 мм	17.02. 2020 – 21.02. 2020	0,4	42,53	2,7	0,0148	10,67	0,0643	53,20
Щебеневе ядро	11.02.– 14.02. 2020	0,6	58,67				0,4835	58,67

Якщо порівнювати інтенсивність водовідведення сформованого потоку $I_{ввсформ}$, то для ПДМЗ № 2 вона вища на понад 30 % від цього показника ПДМЗ № 1. Також на порядок суттєва різниця за загальним середнім показником інтенсивності водовідведення $I_{ввзаг}$ відповідно до табл. 4.8. Та з іншого боку, знижена інтенсивність водовідведення ПДМЗ № 1 спостерігається на кінцевому етапі і кількість відведеної води від $Q_{заг.}$ становить всього 8-10 %, а різниця за кількістю відведеної води від $Q_{заг}$ двома конструкціями становить всього 5,5 %, відповідно до табл. 4.8.

4.3. Результати експериментальних досліджень режимів роботи двох типів поперечних дренажів мілкого закладання під дією вібрації

Вплив води на дорожню конструкцію з погляду проникності шарів дорожнього одягу, роботи дренувальних систем та екологічних питань досліджено в роботі [80]. Поглинання води залежить, як від інтенсивності опадів, так і від експлуатаційного стану дорожнього покриття, узбіч та ДМЗ. Із метою отримання фундаментального розуміння шкідливого впливу води на асфальтобетонне покриття автор [80] розглядає ці процеси в мікромасштабі. Однак, у роботі не враховується вплив інфільтруючої вологи на шари основи дорожнього одягу та інтенсивність виведення її дренажною системою.

Вплив статичної понаднормової ваги ТЗ на НДС ДК та, зокрема, конструктивних елементів трубчастих ПДМЗ розглянуто в роботі [221]. Лишилось відкритим питання вібраційного впливу на роботу дренажної конструкції.

У роботі [222] запропоновано дослідження вібраційних властивостей ґрунтів, на основі яких визначено ефект зниження поглинання хвиль вібрації в ґрунті ЗП зі збільшенням його щільності. Оцінка впливу динамічного навантаження від ТЗ на дорожнє покриття на основі дослідження генерації вібрації, що викликана нерівностями його поверхні наведена в роботі [223]. Також в [223] наведені числові результати показали, що генерація вібрації принципово залежить від поздовжньої нерівності дорожнього покриття і значно меншою мірою від збільшення швидкості руху ТЗ. Однак питання, як впливає вібрація на загальний стан дорожньої конструкції з ДМЗ авторами [222, 223] не розглянуто, тому виникає проблема з визначення ефективності роботи дренувальних конструкцій мілкого закладання, як за інтенсивністю водовідведення, так і під впливом вібраційної дії ТЗ.

Для моделювання впливу вібрації від дії ТЗ на ДК було здійснено заміри в натурних умовах. Проведення вимірювань показників впливу вібрації на ДК проводилося приладом GM-63B з виносним датчиком, який дає змогу проводити вимірювання від впливу всіх видів вібруючих механічних споруд за такими

величинами як прискорення (м/с^2), швидкість (м/с) та переміщення (мм). На рис 4.7 наведена його схема.

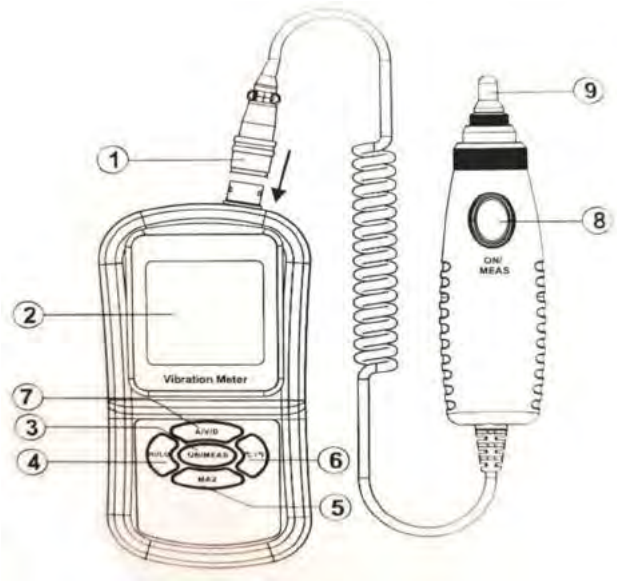


Рисунок 4.7 – Схема приладу GM-63B з виносним датчиком

Умовні познаки на рис. 4.7:

1 – роз’єм ручки (з напрямком);

2 – дисплей;

3, 8 – кнопка ввімкнення;

4 – кнопка вибору частоти;

5 – кнопка фіксації максимального значення;

6 – кнопка вибору одиниці вимірювання температури;

7 – кнопка вибору режиму вимірювання (прискорення / швидкість / переміщення);

9 — наконечник детектора.

Заміри проводилися на відстані 1 м від найближчої колії коліс ТЗ. Для забезпечення найточнішого результату в покритті були зроблені отвори діаметром 6 мм та глибиною 40 мм. В отвори влаштовувався виносний провідний датчик.

У результаті було визначено, що під час руху легкових ТЗ із масою до 2 т зі швидкістю 60 км/год вібропереміщення становило від 0,001 до 0,003 мм; за умови руху вантажних ТЗ із масою більше 20 т та кількістю вісей 6 од. зі швидкістю 60

км/год – від 0,004 мм до 0,018 мм. Погодні умови під час проведення всіх вимірювань були однакові, температура повітря – 3 ºС – 4 ºС.

Відповідно до проведених натурних вимірювань показників вібрації, було спроектовано та побудовано установку імітації вібрації (УІВ) від дії ТЗ.

УІВ складається з гумової платформи товщиною 0,035 м, металевого листа розміром 0,5 м × 0,5 м × 0,003 м, металевого каркасу з піддоном для розміщення додаткового навантаження, електродвигуна потужністю 1,5 кВт, реостату для регулювання обертів двигуна. Вага УІВ становить 53 кг.

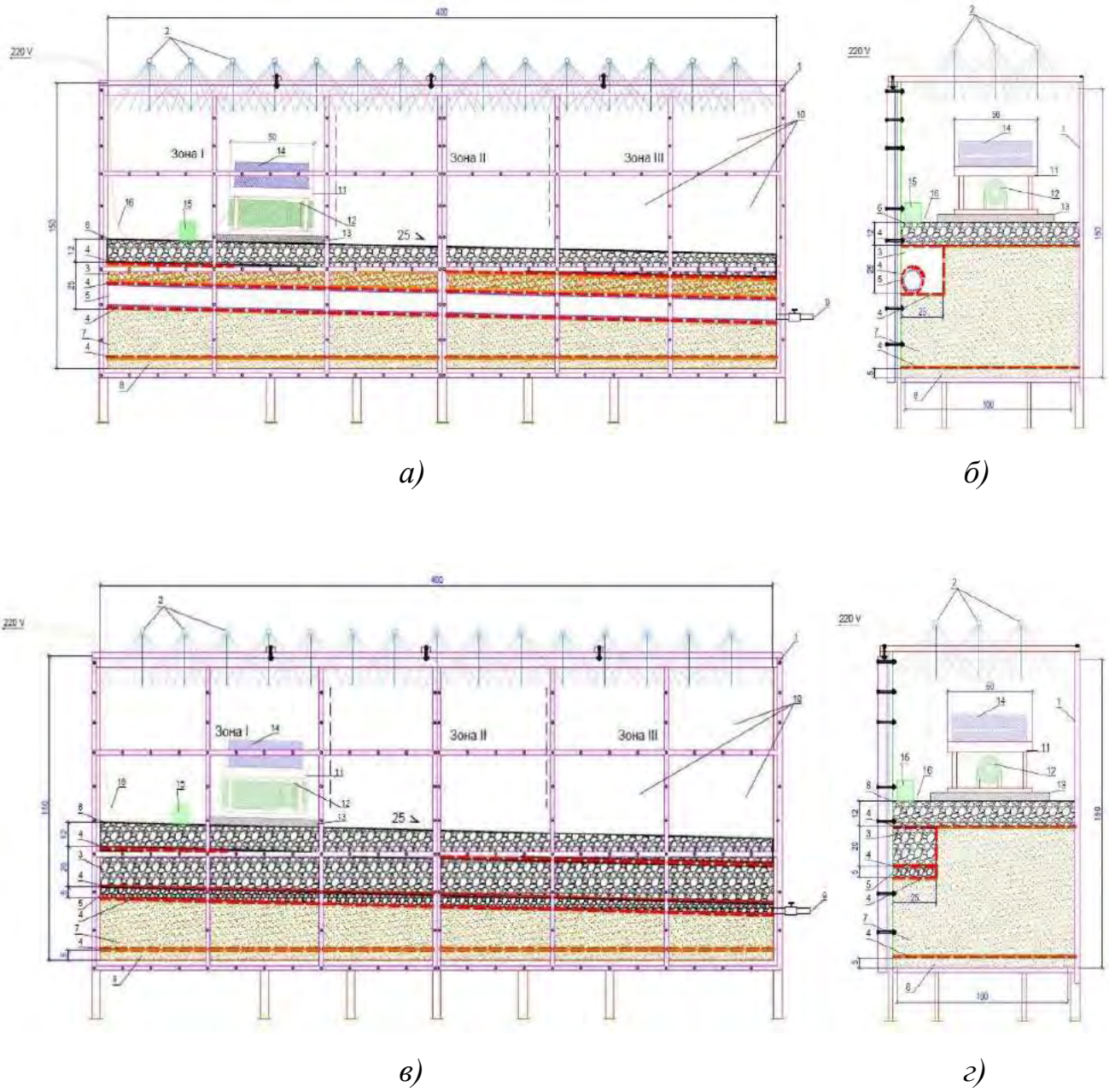
УІВ дає змогу відтворювати ті діапазони параметрів вібрації, які відповідають реальним характеристикам сучасних ТЗ. Для додаткового навантаження використовувалися мішки з піском. Для імітації вібрації від дії легкових ТЗ додаткове навантаження не використовувалося, а для великовагових ТЗ – становило 25 кг. За умови збільшення додаткового навантаження параметри вібропереміщення майже не змінювалися.

Експериментальні дослідження проводилися відповідно до умов, згідно з п.4.2.

Попередньо на дренувальний шар було встановлено УІВ, яка починала працювати відразу після закінчення надходження дощових опадів. У процесі проведення експериментальних досліджень підбиралися параметри вібропереміщення, що відповідають легковому та великоваговому ТЗ. Випробування від дії вібрації для кожного дослідження тривало 10 хв. До складу контрольованих параметрів впливу входили: напруга і сила струму електродвигуна; тривалість випробувань, хв.; амплітуда вібрацій, мм; величина питомого статичного навантаження [224–226].

Для впливу на ґрунт використовували статичний вантаж 14 (рис. 4.8), в поєднанні з віброімпульсами. Енергія від електродвигуна 12 (рис. 4.8) надходила до блоку-перетворювача і далі віброімпульси направлялись через демпферний прошарок з гуми 13 (рис. 4.8) на поверхню дренувального шару. Блок-перетворювач виконував функцію формування зворотно-поступального руху з

заданими параметрами амплітуди і частоти. Для перетворення обертального руху у вібраційний використовувалася схема з ексцентриком.



а) *б)*

в) *г)*

Рисунок 4.8 – Експериментальна установка з УІВ: ПДМЗ № 1 з трубою ПВХ: *а* – бокова площина, *б* – торцева площина; ПДМЗ № 2 зі щебеневого ядра: *в* – бокова площина, *г* – торцева площина

Умовні познаки до рис. 4.8:

1 – корпус експериментальної установки;

2 – система імітації дощових опадів;

3 – заповнювач дренажної траншеї – кварцовий митий пісок фракції від 2 мм до 3 мм (*а, б*);

3 – заповнювач дренажної траншеї – митий щебінь фракції від 20 мм до 40 мм (*в, г*);

4 – прошарок ГСМ;

5 – дренажна труба ПВХ діаметром 100 мм з отворами (*а, б*);

5 – заповнювач дренажної траншеї – митий щебінь фракції від 5 мм до 10 мм (*в, г*);

6 – дренувальний шар – митий щебінь фракції від 20 мм до 40 мм;

7 – ґрунт – супісок пилуватий;

8 – шар дрібнозернистого піску;

9 – відвідний отвір (кран);

10 – передня стінка корпусу експериментальної установки з оргскла.

11 – корпус УІВ від ТЗ;

12 – електродвигун ексцентричний ИВ-01-50Е;

13 – демпферний прошарок з гуми;

14 – навантаження на УІВ;

15 – прилад для регулювання обертів електродвигуна 12;

16 – провід для під’єднання до мережі 220 В.

Під час дослідження проводилися вимірювання інтенсивності водовідведення з дренажної траншеї обох типів конструкцій ПДМЗ. Результати вимірювань наведені в табл. 4.9. Дослідження проводилися як із вібраційним впливом від ТЗ, так і без нього.

Таблиця 4.9 – Загальний об’єм відведеної води з конструкцій ПДМЗ

Ч.ч.	Об’єм води, який надійшов до конструкції, л	Об’єм відведеної води під час сформованого потоку, л	Час сформованого потоку, хв	Загальний об’єм відведеної води, л	Загальний час відведення води t, хв
ПДМЗ № 1					
Без вібрації					
1	25	8,6	26	10,6	206
2	25	11,5	27	13,5	207
3	25	11,8	26	15,8	206
З вібрацією					
4	25	10,5	20	14,3	203
5	25	11,7	28	14,0	205
ПДМЗ № 2					
Без вібрації					
6	25	13,3	32	13,3	32
7	25	14,0	41	14,0	41
8	25	16,7	18	16,7	18
З вібрацією					
9	25	17,0	16	17,0	16
10	25	16,0	22	16,0	22

Інтенсивність водовідведення конструкцією ПДМЗ № 2 перевищувала відповідний показник конструкції ПДМЗ № 1.

Виконавши розрахунки за формулами (4.3) – (4.7) із використанням даних експериментальних досліджень були отримані такі результати кореляційно-регресійного аналізу відповідно до табл. 4.10.

Таблиця 4.10 – Результати кореляційно-регресійного аналізу експериментальних даних

Номер експерименту	Рівняння кореляційно-регресійної моделі	Коефіцієнт кореляції	Коефіцієнт детермінації	Значення критерію Фішера при $\alpha = 0{,}05$	
				Критичне значення	Фактичне значення
Конструкція ПДМЗ № 1 (без впливу вібрації)					
Експеримент 1 ($W_{ЗП}$ =11,4%)	$\hat{Q}(t) = 0{,}356 - \frac{1{,}3924}{t}$	0,9325	0,8809	4,3009	162,72
Експеримент 2 ($W_{ЗП}$ =11,3%)	$\hat{Q}(t) = 0{,}4958 - \frac{1{,}8178}{t}$	0,9674	0,9358	4,3009	320,83
Експеримент 3 ($W_{ЗП}$ =11%)	$\hat{Q}(t) = 0{,}5064 - \frac{1{,}82}{t}$	0,9746	0,9498	4,3009	416,24
Конструкція ПДМЗ № 1 (з вібрацією)					
Експеримент 4 ($W_{ЗП}$ =12%)	$\hat{Q}(t) = 0{,}4766 - \frac{1{,}929}{t}$	0,9876	0,9754	5,5914	277,1
Експеримент 5 ($W_{ЗП}$ =10,9%)	$\hat{Q}(t) = 0{,}4998 - \frac{2{,}0083}{t}$	0,9938	0,9877	5,5914	563,14
Конструкція ПДМЗ № 2 (без впливу вібрації)					
Експеримент 6 ($W_{ЗП}$ =13,6%)	$Q(t) = 0{,}6159 - \frac{2{,}2944}{t}$	0,9905	0,981	4,6672	671,81
Експеримент 7 ($W_{ЗП}$ =13,1%)	$Q(t) = 0{,}6052 - \frac{1{,}8677}{t}$	0,9971	0,9942	4,4139	3111,14
Експеримент 8 ($W_{ЗП}$ =13%)	$Q(t) = 0{,}8158 - \frac{2{,}5108}{t}$	0,9916	0,9832	4,6001	821,19
Конструкція ПДМЗ № 2 (з вібрацією)					
Експеримент 9 ($W_{ЗП}$=13%)	$Q(t) = 0{,}8706 - \frac{2{,}6429}{t}$	0,9984	0,9968	5,98	1894,641
Експеримент 10 ($W_{ЗП}$ =12,5%)	$Q(t) = 0{,}7753 - \frac{2{,}7318}{t}$	0,9902	0,9805	4,4139	904,4564

На основі отриманих рівнянь кореляційно-регресійних моделей, відповідно до табл. 4.10, побудовані апроксимаційні криві експериментальних даних (рис. 4.10).

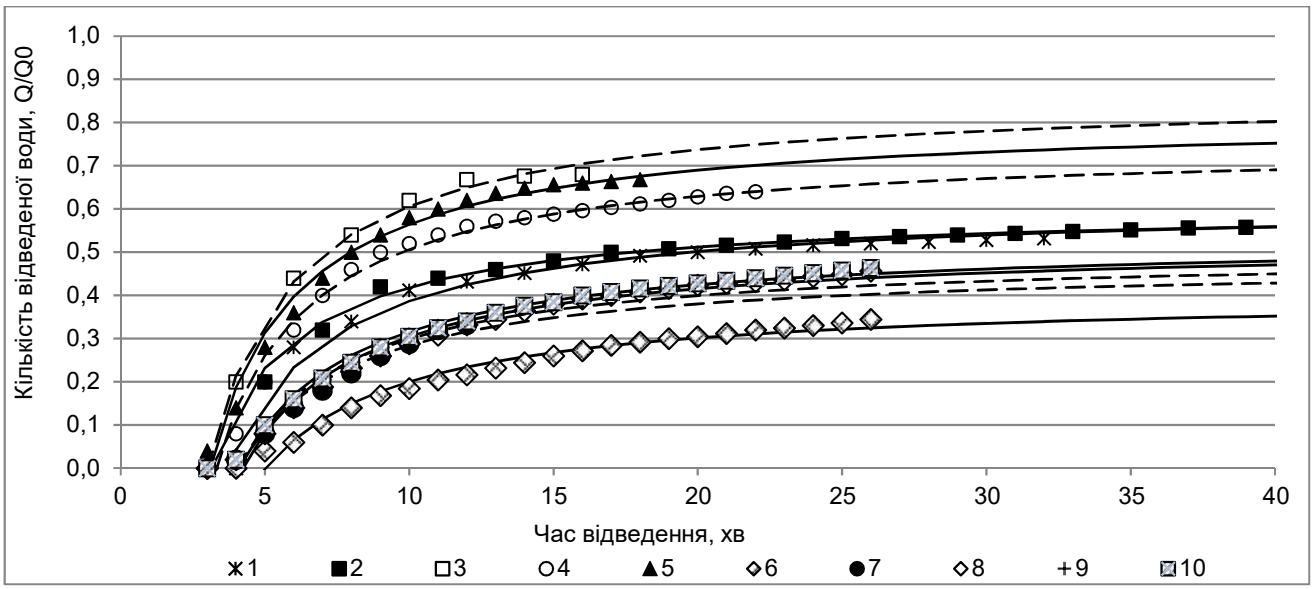


Рисунок 4.9 – Апроксимація експериментальних даних регресійними залежностями: 1, 2, 3, 4, 5 – конструкція ПДМЗ № 2 (вологості ЗП відповідно 13,6%; 13,1%; 13% ,13%, 12,5%); 6, 7, 8, 9, 10 – конструкція ПДМЗ № 1 (вологості ЗП відповідно 11,4%, 12%, 11,3%, 10,9%, 11%). Суцільна лінія –без вібрації, пунктирна лінія – з вібрацією

Виходячи із експериментальних замірів вологості ЗП $W_{ЗП}$ для кожного із експериментів були визначені коефіцієнти a і b для регресійних моделей, наведених у табл. 4.9 у вигляді функціональних залежностей:

$$\begin{cases} a\left(W_{ЗП}\right) = a_1 W_{ЗП} + b_1, \\ b\left(W_{ЗП}\right) = a_2 W_{ЗП} + b_2 \end{cases} \tag{4.38}$$

Підставивши експериментальні та розрахункові дані в формулу (4.38) отримаємо:

для конструкції ПДМЗ № 1, з вібрацією:

$$\begin{cases} 0,4766 = 11,1a_1 + b_1, \\ 0,4998 = 10,4a_1 + b_1 \end{cases} \Rightarrow a_1 = -0,0331; b_1 = 0,8445; \tag{4.39}$$

$$\begin{cases} -1,929 = 11,1a_2 + b_2, \\ -2,0083 = 10,4a_2 + b_2 \end{cases} \Rightarrow a_2 = 0,1133; b_2 = -3,1865; \quad (4.40)$$

$$\begin{cases} a(W_{ЗП}) = -0,0331W_{ЗП} + 0,8445, \\ b(W_{ЗП}) = 0,1133W_{ЗП} - 3,1865 \end{cases} \quad (4.41)$$

для конструкції ПДМЗ № 2, з вібрацією:

$$\begin{cases} 0,8706 = 13a_1 + b_1, \\ 0,7753 = 11,3a_1 + b_1 \end{cases} \Rightarrow a_1 = 0,0561; b_1 = 0,1418; \quad (4.42)$$

$$\begin{cases} -2,6429 = 13a_2 + b_2, \\ -2,7318 = 11,3a_2 + b_2 \end{cases} \Rightarrow a_2 = 0,0523; b_2 = -3,3227; \quad (4.43)$$

$$\begin{cases} a(W_{ЗП}) = 0,0561W_{ЗП} + 0,1418, \\ b(W_{ЗП}) = 0,0523W_{ЗП} - 3,3227 \end{cases}. \quad (4.44)$$

Аналогічним чином були визначені параметри $a(W_{ЗП})$, $b(W_{ЗП})$ для роботи конструкцій ПДМЗ без вібрації.

Таким чином, підставивши отримані вирази для $a(W_{ЗП})$, $b(W_{ЗП})$ у формулу табл. 4.9 отримаємо кореляційно-регресійні залежності для визначення інтенсивності водовідведення для кожної із дренувальних конструкції залежно від початкової вологості ЗП.

Для конструкції ПДМЗ № 1, без вібрації:

$$\hat{Q}(t) = \left(\frac{0,3887}{t} - 0,1367 \right) \cdot W_{ЗП} - \frac{6,0571}{t} + 1,9967; \quad (4.45)$$

з вібрацією:

$$\hat{Q}(t)=\left(\frac{0,1133}{t}-0,0331\right)\cdot W_{ЗП}-\frac{3,1865}{t}+0,8445\ . \qquad (4.46)$$

Для конструкції ПДМЗ № 2, без вібрації:

$$\hat{Q}(t)=\left(\frac{0,2543}{t}-0,0965\right)\cdot W_{ЗП}-\frac{5,3857}{t}+1,9059\,; \qquad (4.47)$$

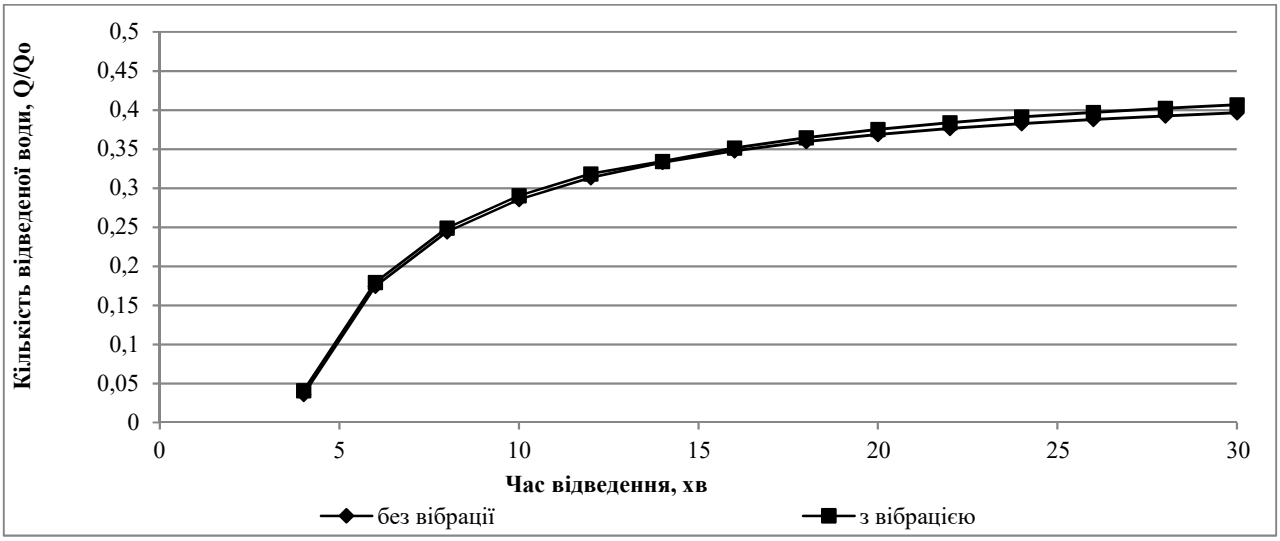
з вібрацією:

$$\hat{Q}(t)=\left(\frac{0,0523}{t}+0,0561\right)\cdot W_{ЗП}-\frac{3,3227}{t}+0,1418\,. \qquad (4.48)$$

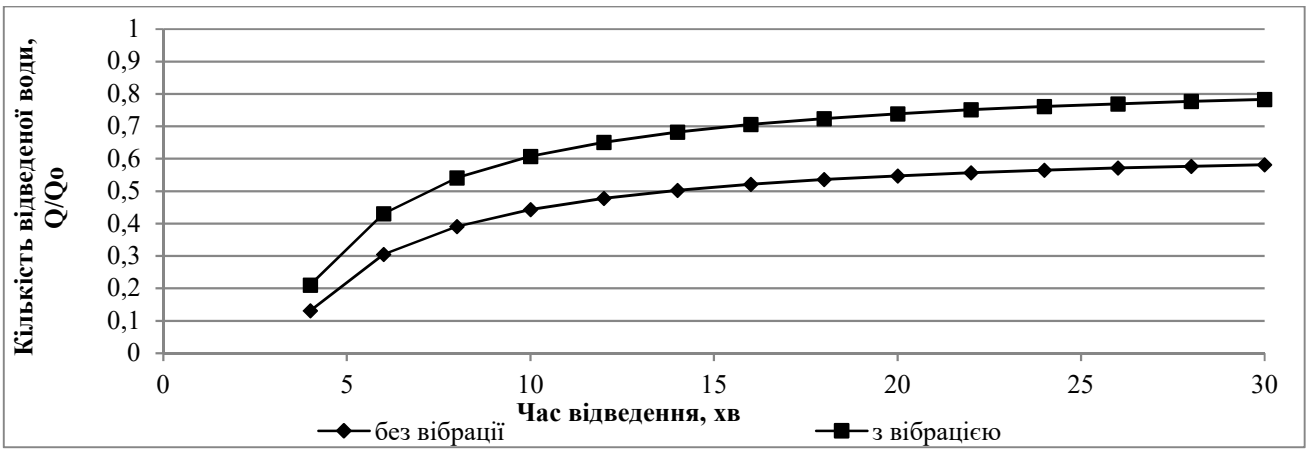
На основі отриманих формул було проведено серію експериментів із дослідження впливу вібрації на інтенсивність водовідведення конструкціями ПДМЗ залежно від вологості ЗП.

Зокрема було досліджено залежність впливу вібрації на інтенсивність водовідведення на початковому етапі експлуатації дренувальних конструкцій (рис. 4.10). Аналіз графіків рис. 4.11 дає змогу зробити висновок, що на початковому етапі впливу вібрації для конструкції ПДМЗ № 1 інтенсивність водовідведення мало змінюється, тоді як для конструкції ПДМЗ № 2 цей вплив є більш суттєвим.

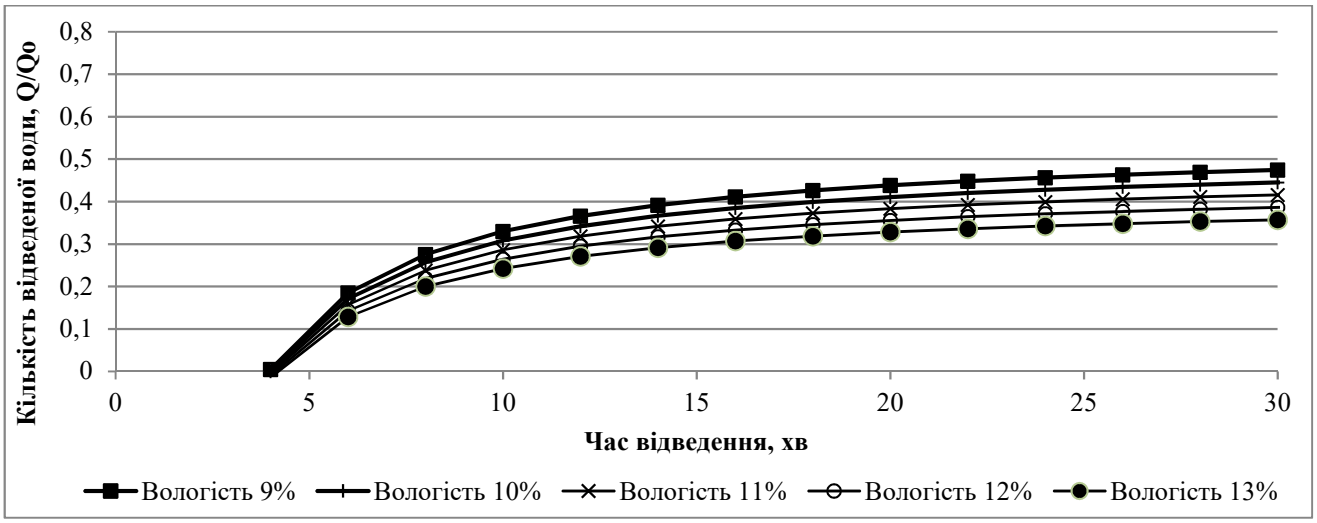
Відповідно до отриманих даних побудовані числові залежності інтенсивності водовідведення за різних значень вологості ЗП.



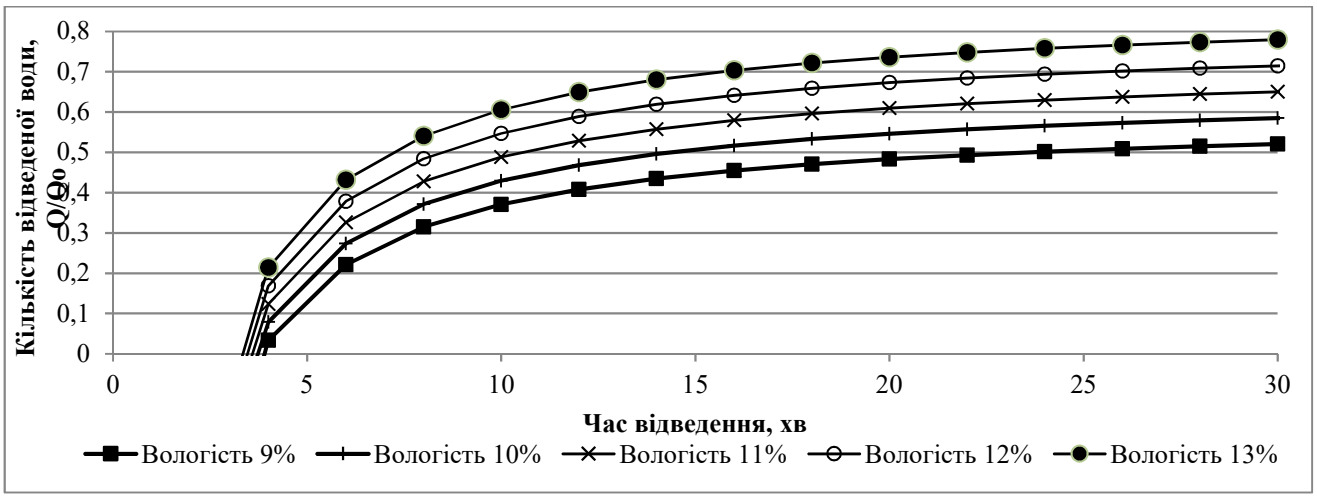
а



б



в



г

Рисунок 4.10 – Залежність впливу вібрації на інтенсивність водовідведення на початковому етапі впливу вібрації та часові залежності інтенсивності водовідведення за різної вологості ЗП під впливом вібрації: *а, в* – конструкція ПДМЗ № 1; *б, г* – конструкція ПДМЗ № 2

Аналіз графіків функцій (рис. 4.10) показав, що за одних і тих же значень аргументу (часу водовідведення) для конструкції ПДМЗ № 1 значення функції (кількість відведеної води) близькі один до одного (в межах 2 % – 3 %), у випадку конструкції ПДМЗ № 2 – їх різниця є більш суттєвою (в межах 25 %). Це можна пояснити тим, що наповнювач траншеї конструкції ПДМЗ № 2 має високопористу контактну структуру.

Аналіз експериментальних досліджень дає змогу зробити висновок про те, що конструкція ПДМЗ № 2 зі щебеневим ядром відводить більшу кількість води в середньому на 10 % без впливу вібрації, та на 14 % більше під впливом вібрації, за часом, відповідно, в 7 та 11 разів швидше, ніж конструкція ПДМЗ № 1 з трубчастою дреною. Це дає підставу стверджувати про її більш високу ефективність роботи. Однак, порівнюючи відповідні типи конструкцій ПДМЗ між собою без дії вібрації та з нею, можна дійти висновку, що на інтенсивність водовідведення конструкції ПДМЗ № 1 вібрація майже не впливає за рахунок того, що труба ПВХ має подвійний захист – наповнювач із крупнозернистого піску та ГСМ, який обгорнутий на тілі труби.

4.4 Дослідження режимів роботи двох типів дренувальних шарів у дорожніх конструкціях

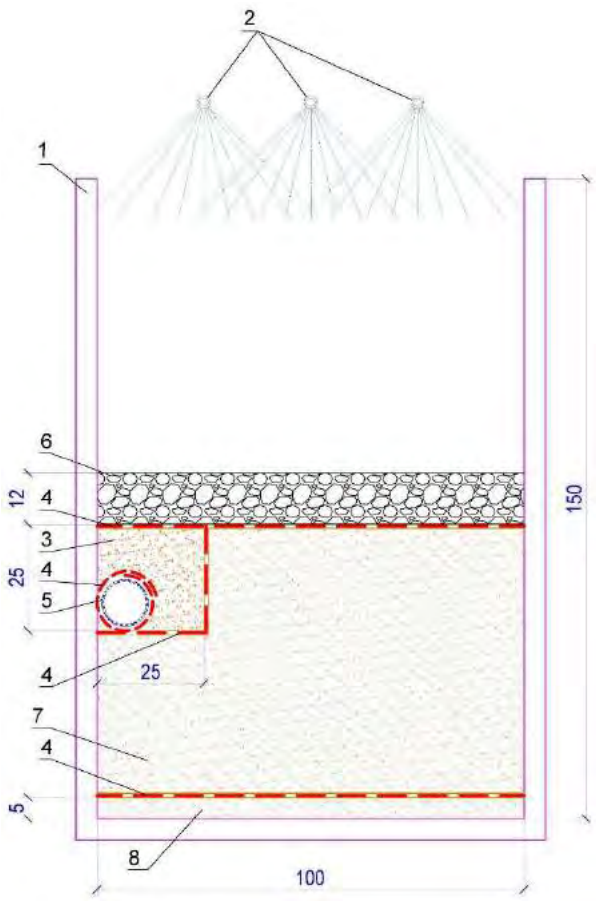
Основною причиною втрати несної здатності автомобільної дороги в багатьох випадках є перезволоження ЗП і, як наслідок, руйнування ДО. Для забезпечення стійкості ЗП та максимального захисту від перезволоження шарів основи ДО поверхневими та підземними водами на автомобільних дорогах влаштовуються дренажні конструкції мілкого закладання (ДКМЗ). Вода під покриття просочується шляхом капілярного підняття та через пори і тріщини покриття, появу яких і розподіл за площею покриття передбачити заздалегідь неможливо. Тому, основним завданням дренажу є забезпечення акумулювання і відведення води з основи покриття в будь-який період річного циклу.

У роботі [227] розглянуто властивості дренувального матеріалу, які впливають на водопропускну здатність дренажу та міцність автомобільної дороги

загалом. Для вивчення властивостей дренажу та підвищення проектної надійності асфальтобетонного покриття в роботі [228] було використано 3D–метод визначення просочення через шари ДО. В результаті було встановлено, що вплив товщини, похилу, коефіцієнта проникності та конструкції дренувального шару впливають на ефективність водовідведення дренажної конструкції. Але питання щодо порівняння режимів та принципів роботи піщаних і щебеневих дренувальних шарів у ДКМЗ авторами [227, 228] не розглянуто.

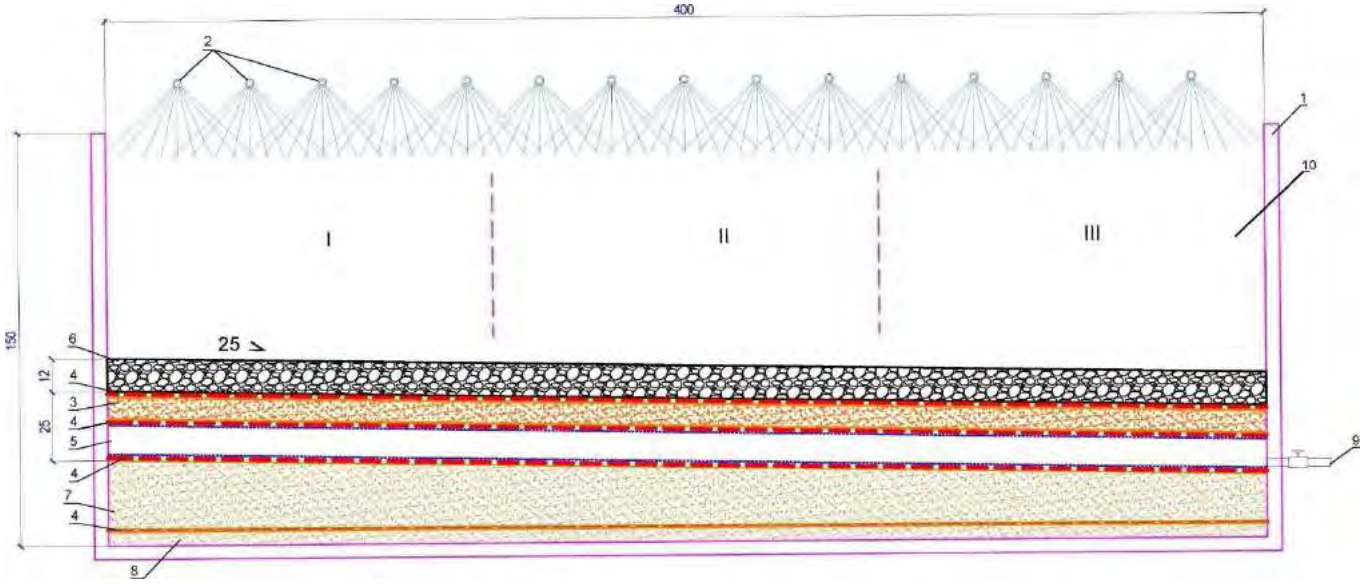
Для встановлення часу, впродовж якого вільна вода перебуває в конструктивних шарах після кожного випадання атмосферних опадів, особливо 5 % забезпечення [80], необхідно знати час відведення води з піщаного дренувального шару, який залежить від конструктивних властивостей і матеріалів ДКМЗ. Дослідження роботи було проведено на експериментальній установці дорожньої конструкції (рис. 4.12).

При влаштуванні в ДКМЗ № 2 дренувального шару товщиною 0,3 м використовувався середньозернистий пісок, коефіцієнт фільтрації якого складає 4,5 м/добу (рис. 4.12 г, д, е). Основною задачею піщаного дренувального шару є недопустити утворення шару води під ДО за рахунок повного потрапляння атмосферних опадів, які надходять через покриття, в пори цього піщаного шару. Відповідно до цього, результати вимірювань об’єму відведеної води обох типів ДКМЗ наведені в табл. 4.5

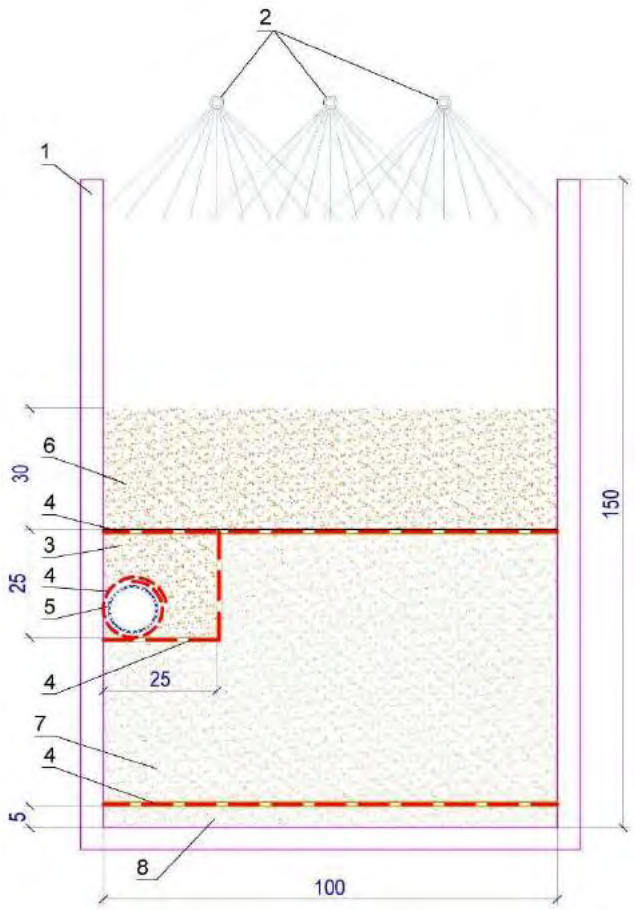

2
1
6
12
4
3
4
5
25
4
25
7
4
5
8
150
100

а)

б)

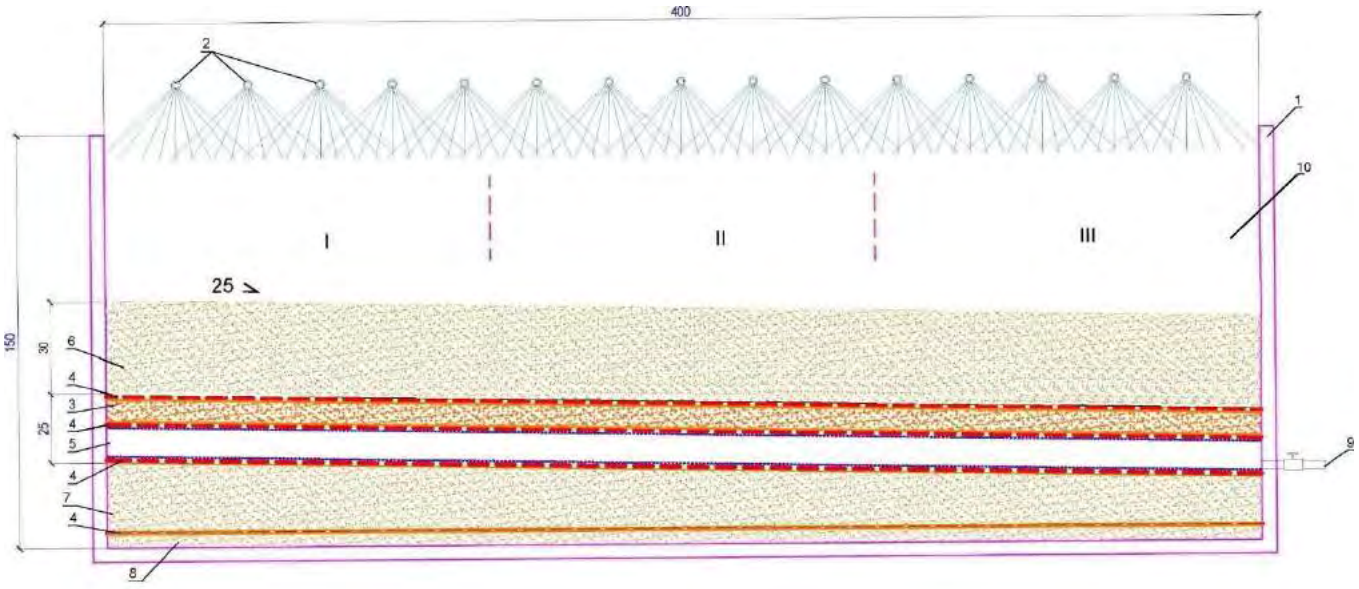

400
2
1
10
I
II
III
150
25
6
12
4
3
4
5
4
7
4
8
9

в)



г)

д)



е)

Рисунок 4.11 – Експериментальна установка з дренувальним шаром з: щебню: *а* – торцева площина, *б* – подача води на дренувальний шар, *в* – бокова площина; середньозернистого піску: *г* – торцева площина, *д* – подача води на дренувальний шар; *е* – бокова площина

Умовні познаки до рис. 4.11:

I, II, III – відповідно зони проведення вимірювань;

1 – корпус експериментальної установки;

2 – система імітації дощових опадів;

3 – заповнювач дренажної траншеї – кварцовий митий пісок фракції від 2 мм до 3 мм;

4 – прошарок ГСМ;

5 – дренажна труба ПВХ діаметром 100 мм з отворами;

6 – дренувальний шар – митий щебінь фракції від 20 мм до 40 мм (*а, б, в*);

6 – дренувальний шар – середньозернистий пісок (*г, д, е*);

7 – ґрунт – супісок пилуватий;

8 – шар дрібнозернистого піску;

9 – відвідний отвір (кран);

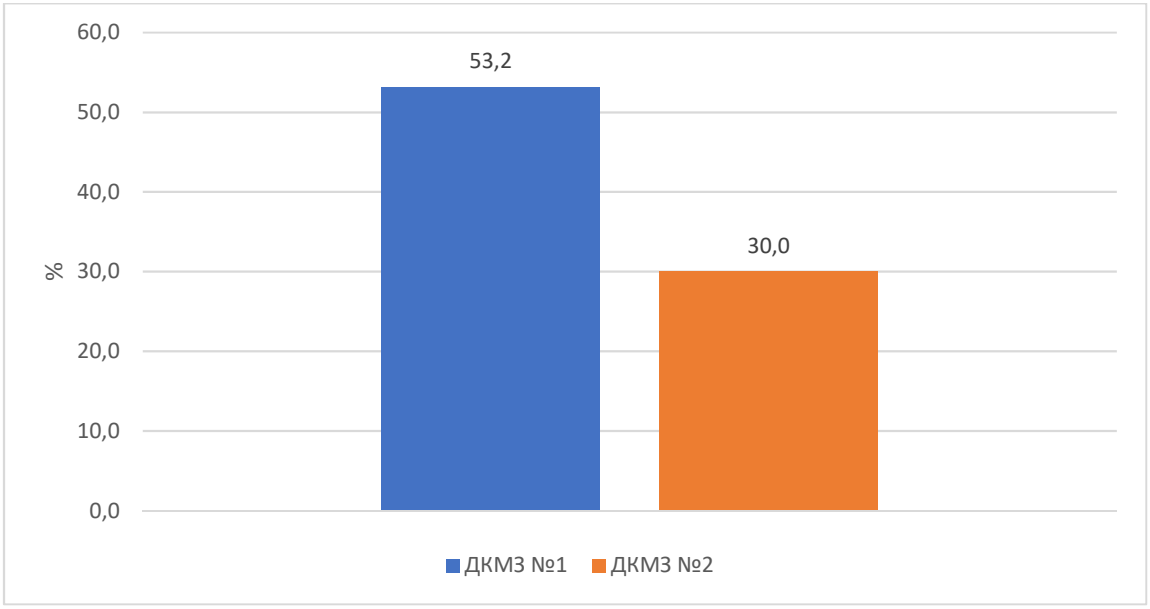
10 – передня стінка корпусу експериментальної установки з оргскла.

Відповідно до табл. 4.5, було встановлено, що дренувальний шар з щебню віддав 53,2 % від загальної кількості води, що надійшла за 206 хвилин. Середня інтенсивність відведення під час сформованого потоку складала 0,4038 л/хв. Протягом наступних 3-х годин вода відводилася у формі крапель з інтенсивністю – 0,0148 л/хв. В результаті, можна зробити наступний висновок, що ДКМЗ №1 працювала за принципом осушення.

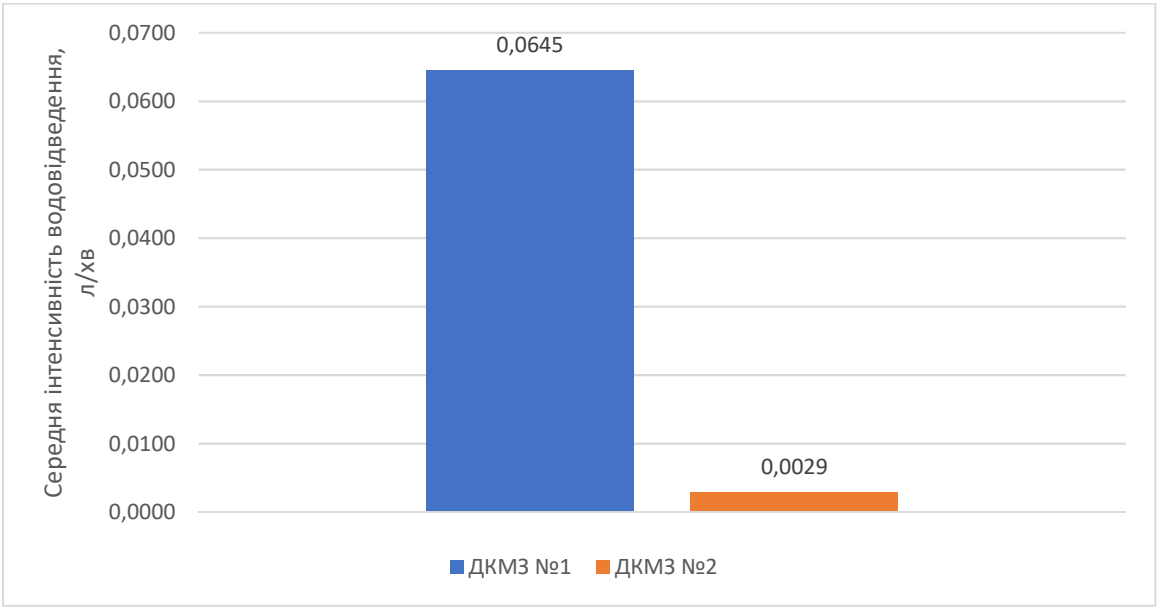
Що стосується роботи ДКМЗ № 2, то було встановлено, що при надходженні води у кількості 25 л, піщаний шар повністю поглинув її, тому було прийнято рішення і надалі забезпечити надходження води до конструкції. При надходженні води в 100 л., ДКМЗ № 2 почала відводити воду, тобто поки не відбулося повного насичення піщаного шару він працював у режимі поглинання. Середня інтенсивність відведення під час сформованого потоку складала 0,7188 л/хв. Відповідно до табл. 4.5, протягом наступних двох діб у ДКМЗ № 2 надійшло ще 65 л води. В результаті, дренувальний шар з піску тримав воду протягом 12 діб та віддав 30 % води у вигляді крапель від загальної кількості, що надійшла до

конструкції. ДКМЗ № 2 повинна працювати за принципом осушення, а працювала за принципом поглинання.

Досліджені режими роботи двох типів ДКМЗ відрізняються між собою, тому що дренувальні шари мають різну середню інтенсивність: з щебню – 0,0645 л/хв, а з середньозернистого піску – 0,0029 л/хв. Порівняння режимів роботи двох ДКМЗ наведено на рис. 4.12.



а



б

Рисунок 4.12 – Порівняння режимів роботи двох ДКМЗ: *а* – загальний об’єм відведеної води; б – середня інтенсивність водовідведення

Методи регулювання водно-теплового режиму ЗП способом дренування (шляхом влаштування дренувальних шарів) можна поділити на:

- дренувальні шари, які працюють за принципом поглинання та накопичування вологи в дорожній конструкції;
- ДКМЗ, які швидко або поступово відводять воду.

Широко відомими, але практично не застосовуваними заходами з регулювання водно-теплового режиму ЗП є шари з фільтруючих зернистих матеріалів – митого щебню або гравію. Товщина цих шарів 10-15 см (залежить від крупності матеріалу) плюс 3-5 см дрібного гравію знизу і зверху шару. Під час укладання прошарків з ГСМ між щебнем та глинистими ґрунтами замулення шару не відбуватиметься і не потрібно додаткового збільшувати товщину дренувального шару. Такі шари завжди працюють за принципом осушення, не накопичують воду та швидко її відводять.

Дренувальні шари з піску, які широко застосовуються для будівництва дорожньої конструкції, не забезпечують швидкий відвід води і за умовами роботи працюють на поглинання. Експериментально було визначено, що доки дренувальний шар з піску не досягне певної вологості, тобто не поглине певну кількість води, працювати на осушення він не буде [229, 230].

Товщина дренувального шару з піску повинна бути досить великою для того, щоб розмістити всю воду, яка надходить, на тривалий час. Дотримуючись умови допустимого рівня вільної гравітаційної води в піску повинна забезпечуватись міцність всієї дорожньої конструкції. Якщо рівень вищий за допустиму позначку, то в такому випадку може мати місце пошкодження ДО. Дренувальний шар з піску, що задовольняє зазначені вимоги, зазвичай, проектують за умовами роботи на поглинання. При можливому взаємопроникненні глинистих і піщаних частинок необхідно передбачати збільшення товщини дренувального шару на товщину, яка дорівнює 0,05 м – 0,15 м, залежно від вологості та щільності глинистих ґрунтів і зернового складу піску. Під час укладання прошарків із ГСМ між піщаними і глинистими ґрунтами замулення пісків не відбувається і також не потрібно додаткового збільшення товщини дренувального шару.

4.5 Порівняння результатів експериментальних досліджень з аналітичним методом визначення інтенсивності водовідведення, отриманим на основі теоретичних розробок О.Я. Тулаєва

З метою обґрунтування та підтвердження адекватності запропонованих методів експериментальних досліджень щодо ефективності роботи ПДМЗ проведемо порівняльний аналіз отриманих результатів за аналітичним методом, отриманим на основі теоретичних розробок О.Я. Тулаєва[52].

За підходом, запропонованим в роботі [56], загальна витрата Q на ділянці $l = l_1 + l_2$ визначається згідно (2.27 – 2.29).

За розрахункову схему в роботі [56] прийнята рівність притоку води в дренувальний шар та її витрати при максимальній глибині фільтраційного потоку, яка справедлива лише при усталеному режимі руху води. Відстань l між дренажними прорізями визначають із врахуванням розрахункового питомого надлишку води Q_p, м^3/ добу з м^2 поверхні та максимальної глибини фільтраційного потоку h_{max}, м, згідно (1.37).

Перетворимо вираз (1.37), з урахуванням γ:

$$l = \frac{2h_{max}\sqrt{2\dfrac{q_p}{K_\phi}}}{2\dfrac{q_p}{K_\phi} - \dfrac{i^2}{4}}. \qquad (4.49)$$

Через відстань між дренажними прорізями можливо визначити інтенсивність відведення води. Вираз (4.49) перетворимо в квадратне рівняння та отримаємо:

$$4l^2\frac{q_p^2}{K_\phi} - q_p\left(l^2i^2 + 8h^2\right) + l^2\frac{K_\phi i^4}{16} = 0. \qquad (4.50)$$

Згідно розв’язку квадратного рівняння, визначаємо кількість надходження води:

$$q_{p_{\max,\min}} = \frac{l^2 i^2 + 8h^2 \pm 4h\sqrt{l^2 i^2 + 4h^2}}{8l^2} K_{\phi}. \quad (4.51)$$

Кількість води, яка витікає з прорізі на одиницю її довжини, можна отримати згідно рекомендацій, наведених в роботі [56], на основі спрощеної залежності:

$$Q_p = q_p lb, \quad (4.52)$$

де b – довжина прорізі, м.

В навчально-науковій лабораторії кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету на лабораторній установці дорожньої конструкції було проведено ряд експериментальних досліджень з визначення параметрів водовідведення поперечних ДМЗ. Було виміряно об’єм відведеної води з траншеї та час її відведення на різних конструкціях ДМЗ за різних умов. Параметри установки, особливість роботи конструкцій та результати вимірювань наведені в [24, 229]. Таким чином, були отримані залежності для інтенсивності водовідведення з різних дренажних конструкцій. Результати досліджень роботи дренажних конструкцій наведені в табл. 4.11, при інтенсивності зливових опадів 5% забезпеченості.

Інтенсивність водовідведення дренажної конструкції з наповнювачем крупнозернистий пісок з трубою ПВХ більш відповідає розрахунковим мінімальним граничним значенням, а дренажної конструкції з щебеневим ядром – розрахунковим максимальним. Відносні відхилення значень середніх інтенсивностей водовідведення поперечних ДМЗ від граничних, отриманих аналітичним методом, наведені в табл. 4.11.

З метою апробації проведених експериментальних досліджень, проведемо порівняння за аналітичним методом, визначимо мінімальне та максимальне значення за формулами (4.51) та (4.52), щодо кількості води, яка витікає з прорізі.

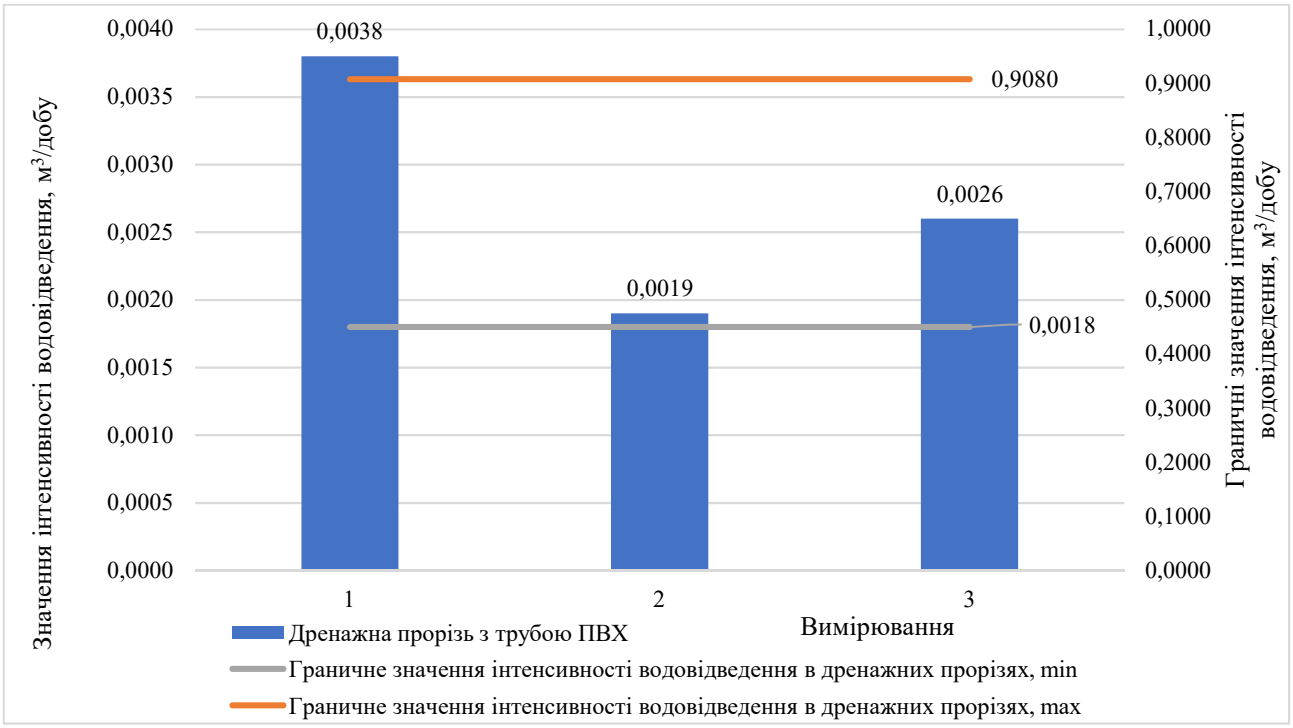
Таблиця 4.11 – Результати досліджень роботи дренувальних шарів з поперечними ДМЗ

Піщаний дренувальний шар (середньозернистий пісок) з поперечними ДМЗ		
Наповнювач траншеї ДМЗ	Після того, як потік розформувався (в краплинах)	Загальний показник інтенсивності водовідведення, $м^3$/добу
	Інтенсивність водовідведення, $м^3$/добу	
Крупнозернистий пісок, труба ПВХ	0,0038	0,0038
	0,0019	0,0019
	0,0026	0,0026

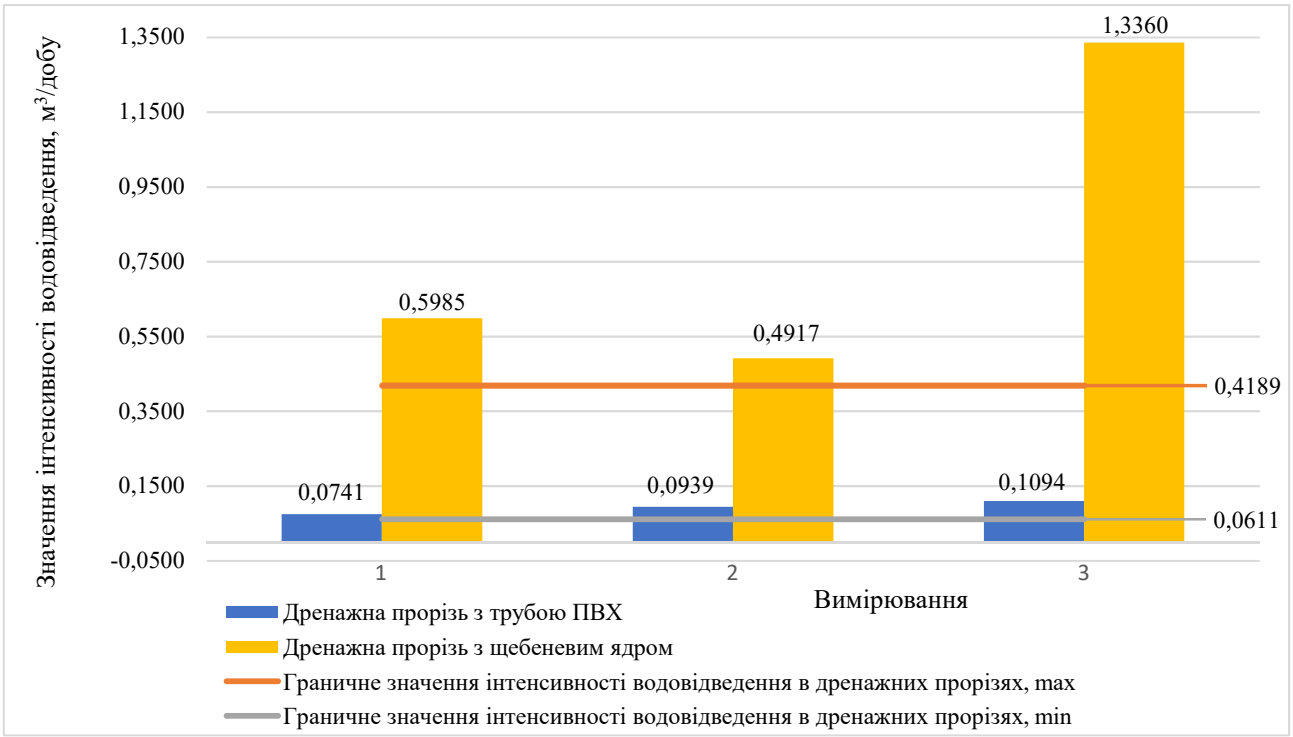
Щебеневий дренувальний шар з поперечними ДМЗ			
Наповнювач траншеї ДМЗ	Потік сформований	Після того, як потік розформувався (в краплинах)	Загальний показник інтенсивності водовідведення, $м^3$/добу
	Інтенсивність водовідведення, $м^3$/добу	Інтенсивність водовідведення, $м^3$/добу	
Крупнозернистий пісок, труба ПВХ	0,4763	0,0160	0,0741
	0,6133	0,0160	0,0939
	0,6069	0,0320	0,1094
Щебеневе ядро (фр. 10–20 та 20–40 мм)	0,5985	-	0,5985
	0,4917	-	0,4917
	1,3360	-	1,3360

Відносні відхилення середніх значень інтенсивності водовідведення поперечних ДМЗ від граничних			
Дренувальний шар	Щебінь фр. 20–40 м		Середньозернистий пісок
Наповнювач траншеї поперечного ДМЗ	Труба ПВХ, обсипана крупнозернистим піском	Щебеневе ядро (фракція 10–20 та 20–40 мм)	Труба ПВХ, обсипана крупнозернистим піском
Відносні відхилення, %	34	40	35

Порівняльний аналіз розрахункових та експериментальних даних наведений на графіках (рис. 4.13) [217].



а)



б)

Рисунок 4.13 – Порівняння значень експериментальних досліджень інтенсивності водовідведення з розрахунковими за аналітичним методом: *а* – піщаний дренувальний шар; *б* – щебеневий дренувальний шар.

Для конструкції поперечного ДМЗ з дренувальним щебеневим шаром були прийняті такі вимоги: коефіцієнт фільтрації $K_ф$ = 150–200 м/добу, максимальна глибина фільтраційного потоку h_{max} = 0,01–0,02 м. Відповідно, для другої конструкції, з піщаним дренувальним шаром: $K_ф$ = 4– 5 м/добу, h_{max} = 0,1–0,15 м.

Розбіжність результатів експериментальних досліджень з граничними значеннями пов’язано з тим, що аналітичний метод не в достатній мірі враховує конструктивні особливості ДМЗ та режими водовідведення з дренажних прорізей.

Висновки по розділу 4

1. Проведення досліджень на спеціальній моделюючій установці дорожньої конструкції з прозорою фронтальною стінкою дозволило дослідити процеси формування фільтраційного потоку в двох типах дренажних конструкцій, розміри яких відповідають проектним, з різними матеріалами-наповнювачами траншей, що неможливо на реальних об’єктах. Досліджено інтенсивність водовідведення двох КДМЗ з різними матеріалами-наповнювачами в траншеї. Експеримент проводився у відповідності до реальних несприятливих метеорологічних умов роботи двох КДМЗ при інтенсивності зливових опадів 5 % забезпеченості $i_{зд5}$. Отримані результати вимірювань вологості ґрунту ЗП $W_{ЗП}$ перед зволоженням, об’єм відведеної води $Q_{від}$ та час сформованого потоку $t_{сформ}$; загальний об’єм відведеної води $Q_{заг.від.}$ та час $t_{заг.від.}$.

2. На основі отриманих результатів експериментальних досліджень отримано рівняння кореляційно-регресійних моделей в комплексі з поліноміальними залежностями для двох типів дренажних конструкцій між наступними факторами: початковою вологістю ґрунту ЗП, часом та об’ємом відведення води КДМЗ. Запропонована структура регресійних рівнянь є гіперболічною, що найбільш точно описує особливості роботи досліджуваних дренажних установок як для малих, так і для великих значень часу *t*. Значення коефіцієнтів парної кореляції 0,93–0,99 свідчить про дуже тісний зв'язок між досліджуваними факторами (кількістю відведеної води і часом її відведення). Для всіх кореляційно-регресійних моделей фактичне значення критерію Фішера значно перевищує його критичне значення,

що свідчить про статистичну значимість, надійність та адекватність отриманих регресійних моделей. Середня похибка апроксимації для всіх кореляційно-регресійних моделей складає 2,72 %–12,35 %, що дозволяє зробити висновок про високу їх точність.

3. КДМЗ № 2 з середньою інтенсивністю водовідведення 0,6 л/хв за один і той же проміжок часу відводить більшу кількість води, ніж КДМЗ № 1, що дає підставу стверджувати про її більш високу ефективність роботи при 58,67 % від загального об'єму води, що надійшла в конструкцію. КДМЗ № 2 працює в одному режимі сформованого потоку на відміну від КДМЗ № 1, робота якої за інтенсивністю водовідведення поділяється на короткочасний та тривалий режим при відповідних показниках 0,4 л/хв та 0,0148 л/хв. КДМЗ № 1 має меншу водовіддачу, оскільки наповнювач дренажної траншеї, крупнозернистий пісок фракції 2–3 мм, поглинає певну кількість води і тримає її. Але труба ПВХ перфорована отворами, що відповідають розмірам дренажного наповнювача, відповідно не так швидко буде замулюватись і матиме більш тривалий строк експлуатації, а середня кількість відведеної води складає 53,20 % від загальної. З урахуванням цього вибір типу конструкції поперечних ДМЗ буде залежати від ґрунтово-гідрологічних, кліматичних умов, рельєфу місцевості та від кошторисної вартості комплексної дорожньої конструкції.

4. Проведено моделювання впливу вібрації на дорожню конструкцію на основі параметру вібропереміщення, який відповідає дії від транспортних засобів. В результаті було визначено, що при русі легкових ТЗ з масою до 2 тон зі швидкістю 60 км/год вібропереміщення складало до 0,003 мм; при русі вантажних ТЗ з масою більше 20 тон та кількістю вісей 6 од. зі швидкістю 60 км/год – до 0,018 мм. Відповідно до проведених натурних вимірювань показників вібрації, було спроектовано та побудовано установку імітації вібрації (УІВ) від дії ТЗ. В процесі проведення експериментальних досліджень підбиралися параметри вібропереміщення, що відповідають легковому та великоваговому ТЗ.

5. Аналіз експериментальних досліджень дозволяє зробити висновок про те, що конструкція ПДМЗ № 2 з щебеневим ядром відводить більшу кількість води в

середньому на 10% без впливу вібрації, та на 14% більше під впливом вібрації, за часом, відповідно, в 7 та 11 разів швидше, ніж конструкція ПДМЗ № 1 з трубчастою дреною. Це дає підставу стверджувати про її більш високу ефективність роботи. Але порівнюючи відповідні типи конструкцій ПДМЗ між собою без дії вібрації та з нею, можна дійти висновку, що на інтенсивність водовідведення конструкції ПДМЗ № 1 вібрація майже не впливає за рахунок того, що труба ПВХ має подвійний захист – наповнювач з крупнозернистого піску та ГСМ, який обгорнутий на тілі труби. Що стосується інтенсивності водовідведення конструкції ПДМЗ № 2, то дія вібрації її посилює за рахунок більшого коефіцієнта фільтрації наповнювача траншеї, але такий процес суттєво впливає на замулювання шару ГСМ в конструкції і відповідно на довговічність її роботи. На другому етапі проводились дослідження з визначення режимів роботи дренувальних шарів з матеріалів двох типів (щебінь фр. 20 – 40 мм та середньозернистий пісок). Дренувальний шар з щебню працював за принципом осушення з середньою інтенсивністю водовідведення 0,0645 л/хв. Піщаний дренувальний шар працював за принципом поглинання (розглядався як конструкція, що працює за принципом осушення) з середньою інтенсивністю водовідведення 0,0029 л/хв. Дренувальні шари з піску, які широко застосовуються для будівництва дорожньої конструкції, не забезпечують швидкий відвід води і за умовами роботи працюють на поглинання. Експериментально було визначено, що доки дренувальний шар з піску не досягне певної вологості, тобто не поглине певну кількість води, працювати на осушення він не буде. Товщина дренувального 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 повинна забезпечуватись міцність всієї дорожньої конструкції. Якщо рівень вищий за допустиму позначку то в такому випадку може мати місце пошкодження ДО. Дренувальний шар з піску, що задовольняє зазначеним вимогам, як правило, проектують за умовами роботи на поглинання.

6. Результати досліджень четвертого розділу викладено у наступних публікаціях [212–219, 224–226, 229, 230,].

РОЗДІЛ 5
ПРОЕКТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ДОРОЖНІХ КОНСТРУКЦІЙ З ПОПЕРЕЧНИМИ ДРЕНАЖАМИ МІЛКОГО ЗАКЛАДАННЯ

5.1. Основні принципи проектування оптимальних дорожніх конструкцій з дренажами мілкого закладання

Проектування оптимальних ДК із ПДМЗ базується на трьох основних принципах. Це забезпечення міцності, морозостійкості та зсувостійкості дорожнього одягу [173, 231] за умови мінімальних зведених витрат на будівництво дорожнього одягу на ділянці дороги та щорічних витрат на її експлуатаційне утримання, які складаються із суми наведених капітальних вкладень у дорожнє будівництво і витрат на експлуатаційне утримання дороги.

Виходячи з типу зволоження робочого шару ЗП, ґрунтово-гідрологічних і кліматичних умов, рельєфу місцевості, наявності дорожньо-будівельних матеріалів призначають варіанти дренувальних конструкцій.

Перед призначенням типу ПДМЗ у ДК попередньо розраховують дорожній одяг за умовами міцності. У цьому випадку в розрахунок дорожнього одягу потрібно включати значення модуля пружності, кута внутрішнього тертя і зчеплення ґрунту, вологість якого дорівнює капілярній вологоємності, відповідної необхідної щільності цього ґрунту. За цими даними повторюють розрахунок як на міцність, так і на морозостійкість дорожнього одягу. Призначення варіанту ПДМЗ закінчується за необхідної товщини дорожнього одягу, отриманої розрахунком на міцність та морозостійкість.

ДК з однаковими коефіцієнтами запасу міцності можуть мати різні дренувальні властивості. Це, в свою чергу, обумовлює відмінність в зведених витратах. Суму зведених витрат по кожному варіанту обчислюють за формулою:

$$C = C_{пдмз} + C_{до}, \tag{5.1}$$

де C – зведені витрати на будівництво дорожнього одягу з дренажем, грн;

$C_{пдмз}$ – розраховані за кошторисом витрати на влаштування відповідної конструкції ПДМЗ, грн;

$C_{до}$ – розраховані за кошторисом витрати на влаштування дорожнього одягу, грн.

Пошук оптимальної конструкції ПДМЗ зводиться до мінімізації наступної цільової функції:

$$F\left(C_i, Z_1, Z_2, \ldots, Z_n\right) = \frac{C_i}{\sum_{i=1}^{n} P_{ij}}, \tag{5.2}$$

де n – кількість конструкцій ПДМЗ, прийнятих до порівняння;

C_i – кошторисна вартість i-ї конструкції ПДМЗ,

P_{ij} – значення j-го техніко-технологічного параметра для i-ї конструкції ПДМЗ.

Оцінку сукупності техніко-технологічних параметрів, що визначають роботу конструкцій ПДМЗ проводять методом колективної експертної оцінки [20]. У рамках даного підходу до анкетування залучають провідних експертів у галузі дорожнього будівництва.

Експертам пропонується здійснювати оцінку відносної важливості чинників, що визначають роботу конструкцій ПДМЗ, шляхом присвоєння їм деякої кількості балів Cij в межах від 0 до 100. Нуль балів присвоюється у тому випадку, якщо чинник, на думку експерта, не має суттєвого значення; 100 балів присвоюється тому чиннику, який має найважливіше, вирішальне значення. Експерт може надати однакову кількість балів декільком чинникам, якщо, на його думку, вони рівнозначні, однаково суттєві. Експерт може додатково включити до переліку нові чинники, якщо він вважає, що вони суттєво впливають на важливість досліджуваного показника. На основі отриманих від експертів бальних оцінок формується матриця відповідно до табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Матриця балів та рангів експертної оцінки

Матриця балів експертної оцінки					
Чинники	Експерти				
	1	2	3	…	*m*
1	C_{11}	C_{12}	C_{13}	…	C_{1m}
2	C_{21}	C_{22}	C_{23}	…	C_{2m}
3	C_{31}	C_{32}	C_{33}	…	C_{3m}
…	…	…	…	…	…
n	C_{n1}	C_{n2}	C_{n3}	…	C_{nm}
Матриця рангів експертної оцінки					
Чинники	Експерти				
	1	2	3	…	m
1	$R11$	$R12$	$R13$	…	$R1m$
2	$R21$	$R22$	$R23$	…	$R2m$
3	$R31$	$R32$	$R33$	…	$R3m$
…	…	…	…	…	…
n	$Rn1$	$Rn2$	$Rn3$	…	Rnm

Таблицю (матрицю) балів перетворюють у таблицю (матрицю) рангів R_{ij} відповідно до табл. 5.1. Ранжування проводять наступним чином: ранг, рівний одиниці, присвоюється найбільш важливому чиннику; ранг з числом *n* – найменш важливому чиннику. Якщо експерт надає однакову кількість балів декільком чинникам, то їм присвоюються стандартизовані ранги за методом середнього.

Сума рангів, призначених експертами *j*-му чиннику, обчислюють за формулою (2.19). Чим менша сума рангів, тим важливішим є певний чинник і навпаки. Середній ранг для кожного чинника дослідження обчислюють за формулою:

$$\overline{S}_j = \frac{1}{m_j}\sum_{i=1}^{m} R_{ij}\,. \qquad (5.3)$$

За середніми рангами для кожного досліджуваного чинника середню величину в балах, обчислюють за формулою:

$$M_j = \frac{1}{m_j} \sum_{i=1}^{m_j} C_{ij}. \quad (5.4)$$

Для оцінювання важливості окремих чинників визначають показник частоти максимально можливих оцінок (100 балів), отриманих за кожним чинником, який обчислюють за формулою:

$$k_{100\,j} = \frac{m_{100\,j}}{m_j} \quad (5.5)$$

де m_{100j} – кількість максимально можливих оцінок (100 балів), отриманих за j-м чинником;

m_j – кількість експертів, що оцінили j-й чинник.

Показник k_{100j} може приймати значення від 0 до 1. Важливість j-го чиннику збільшується за умови зростання k_{100j} від 0 до 1.

Оцінки, поставлені кожним експертом, окремим чинникам, зазвичай, різняться, тому обчислюють розмах оцінок за формулою:

$$L_j = C_{jmax} - C_{jmin}, \quad (5.6)$$

де L_j – розмах оцінок у балах, поставлених експертами j-му чиннику;

C_{jmax}, C_{jmin} – відповідно максимальна і мінімальна оцінки, поставлені експертами j-му чиннику.

Середню вагомість кожного чинника (нормовану оцінку) обчислюють за формулами:

$$W_j = \frac{\sum_{i=1}^{m} W_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} W_{ij}}, \quad W_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sum_{j=1}^{m} C_{ij}}, \quad (5.7)$$

де C_{ij} – оцінка, яка дана j-му чиннику i-м експертом;

W_{ij} – вагомість j -го чинника за даними i-го експерта.

За відсутності даних про деякі чинники коефіцієнтів вагомості решти розрахованих чинників збільшують так, за формулою:

$$W_{ijнове} = W_{ij} + \frac{\sum_{i=1}^{q} W_{ij}'}{n-q}, \tag{5.8}$$

де $W_{ijнове}$ – нове значення коефіцієнта вагомості;

q – число відсутніх чинників із коефіцієнтами вагомості W_{ij}.

Кінцевий висновок для прийняття рішення щодо вибору найприйнятніших чинників можливий лише за умови певного рівня узгодженості думок експертів.

Оцінка ступеня узгодженості думок експертів оцінюється коефіцієнтом конкордації, який обчислюють за формулою:

$$k_{кон.} = \frac{12\sum_{j=1}^{n} d_j}{m_1^2\left(n^3 - n\right) - m\sum_{i=1}^{m} T_i}, \tag{5.9}$$

Відхилення d_j обчислюють за формулою:

$$d_j = \sum_{i=1}^{m} R_{ij} - \frac{\sum_{j=1}^{n} S_j}{n}, \qquad T_i = \sum_{l=1}^{L}\left(t_l^3 - t_l\right), \tag{5.10}$$

де L – кількість груп зв’язаних рангів;

t_l – кількість зв’язаних рангів в l-й групі.

Коефіцієнт конкордації може набувати значень від 0 до 1. У випадку повної узгодженості думок експертів $k_{кон.}$=1. Чим менше значення коефіцієнта конкордації $k_{кон.}$, тим слабша узгодженість думок експертів.

Статистична істотність коефіцієнта конкордації перевіряється за критерієм Пірсона за формулою:

$$\chi_p^2 = \frac{12 \cdot \sum_{j=1}^{n} d^2}{\left[mn(n+1) - \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{m} T_i \right]}, \qquad (5.11)$$

де χ_P^2 – розрахункове значення Пірсона.

Розрахункове значення критерію Пірсона χ_p^2 зіставляють з його табличним значенням χ_T^2 для n–1 ступенів свободи та довірчої ймовірності (не менше ніж P=0,95). Якщо $\chi_P^2 > \chi_T^2$, то коефіцієнт конкордації істотний, якщо ж $\chi_P^2 \le \chi_T^2$, то необхідно збільшити кількість експертів.

Чим нижчий рівень статистичної істотності коефіцієнта конкордації, тим більша ймовірність того, що має місце невипадкова узгодженість думок експертів.

Крім коефіцієнта конкордації, розкид думок експертів оцінюється також такими статистичними показниками, як:

- дисперсія оцінок, поставлених j-му чиннику обчислюють за формулою:

$$Д_j = \sigma_j^2 = \frac{1}{m_j - 1} \sum_{i=1}^{m_j} \left(C_{ij} - M_j \right)^2, \qquad (5.12)$$

де M_j обчислюють за формулою (5.4);

- середньоквадратичне відхилення оцінок, поставлених j-му чиннику обчислюють за формулою:

$$\sigma_j = \sqrt{Д_j}; \qquad (5.13)$$

- загальну дисперсію оцінок обчислюють за формулою:

$$\sigma_o^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n} \left(M_j - M \right)^2, \qquad M = \frac{\sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} C_{ij}}{\sum_{j=1}^{n} m_j}; \qquad (5.14)$$

– загальну дисперсію рангів обчислюють за формулою:

$$\sigma_p^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}\left(\overline{S_j} - \overline{S}\right)^2,\ \overline{S} = \frac{\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m} R_{ij}}{\sum_{j=1}^{n} m_j}; \quad (5.15)$$

– коефіцієнт варіації оцінок, даних *j*-му напрямку обчислюють за формулою:

$$V_j = \frac{\sigma_j}{M_j} \cdot 100\ \%. \quad (5.16)$$

Допустимі значення статистичних показників, формули (5.12 – 5.13), визначаються на основі загально прийнятих підходів [122, 220].

5.2 Визначення оптимальної дорожньої конструкції з поперечними дренажами мілкого закладання

Для визначення оптимальної конструкції ПДМЗ у комплексі з дорожнім одягом розглянемо *n* конструкцій, що характеризуються певним набором критеріїв, за якими необхідно їх оцінити та обрати оптимальну. Ці критерії умовно можна поділити на дві групи: кошторисну вартість конструкції ПДМЗ та техніко-технологічні параметри, що характеризують ефективність її роботи [232, 233].

Оптимальною будемо вважати таку конструкцію ПДМЗ, що матиме найкращі техніко-технологічні характеристики за мінімально можливої кошторисної вартості. Тобто, сума критеріїв другої групи (техніко-технологічні) повинна бути максимальною, а кошторисна вартість – мінімальною.

Таблиця 5.2 – Типи дорожнього одягу для варіантів ДК

Ч.ч.	Найменування матеріалу	Товщина шару, м	Площа шару, $м^2$	Об'єм, $м^3$
ДК №1 та №2				
Дорожній одяг, тип I				
1	Асфальтобетон щільний на бітумі БНД 70/100, Тип А, Марка I	0,10	1,00	0,10
2	Щебенево-піщані суміші ЩПС -40, укріплені цементом М20	0,12	1,36	0,16
3	Щебенево-піщана суміш С5	0,40	1,63	0,65
4	Розділяючий ГСМ	-	1,82	-
5	Щебінь М1000–1400, влаштований за способом заклинки з магматичних порід	0,12	1,89	0,23
6	Розділяючий ГСМ	-	1,95	-
7	Присипні узбіччя (супісок пилуватий)	-	0,96	0,96
ДК №3 та №4				
Дорожній одяг, тип II				
1	Асфальтобетон щільний на бітумі БНД 70/100, Тип А, Марка I	0,10	1,00	0,10
2	Щебенево-піщані суміші ЩПС -40, укріплені цементом М20	0,12	1,36	0,16
3	Щебенево-піщана суміш С5	0,35	1,60	0,55
4	Розділяючий ГСМ	-	1,78	-
5	Щебінь М1000–1400, влаштований за способом заклинки з магматичних порід	0,12	1,84	0,22
6	Розділяючий ГСМ	-	1,90	-
7	Присипні узбіччя (супісок пилуватий)	-	0,87	0,87
ДК №5 та №6				
Дорожній одяг, тип III				
1	Асфальтобетон щільний на бітумі БНД 70/100, Тип А, Марка I	0,10	1,00	0,10
2	Щебенево-піщані суміші ЩПС -40, укріплені цементом М20	0,12	1,36	0,16
3	Щебенево-піщана суміш С5	0,25	1,55	0,39
4	Пісок середньої крупності	0,30	1,83	0,55
5	Присипні узбіччя (супісок пилуватий)	-	-	1,02
ДК №7 та №8				
Дорожній одяг, тип IV				
1	Асфальтобетон щільний на бітумі БНД 70/100, Тип А, Марка I	0,10	1,00	0,10
2	Щебенево-піщані суміші ЩПС-40, укріплені М20	0,12	1,36	0,16
3	Щебенево-піщана суміш С5	0,21	1,53	0,32
4	Пісок середньої крупності	0,30	1,79	0,53
5	Дренувальний ГСМ	-	1,94	-
6	Присипні узбіччя (супісок пилуватий)	-	0,95	0,95
Земляне полотно всіх типів ДК (1–8)				
1	Супісок пилуватий	0,5	-	1,62
2	Розділяючий ГСМ	-	4,00	-
3	Пісок середньозернистий	0,05	4,00	0,20

Для порівняльної оцінки та пошуку оптимуму було прийнято вісім ДК, що характеризувалися різними техніко-технологічними параметрами та мали різну кошторисну вартість. ДК складалися з чотирьох типів дорожнього одягу та двох конструкцій ПДМЗ. Модифікації ДК наведені в табл. 5.2 та 5.3. Об'єм матеріалів для їх влаштування відповідає параметрам лабораторної установки (рис. 4.9). Відповідно до визначених об'ємів було розраховано кошторисну вартість станом на 05.2020, відповідно до табл. 5.4. Модуль пружності кожного типу дорожнього одягу було визначено за програмою «CredoRadon».

Для шарів основи дорожнього одягу було визначено середньозважений коефіцієнт фільтрації з урахуванням їх товщини та коефіцієнту фільтрації матеріалів. Середню інтенсивність водовідведення було отримано на основі експериментальних досліджень, наведених у п.4.2.

Таблиця 5.3 – Типи ПДМЗ для варіантів ДК

Ч.ч.	Найменування матеріалу	Товщина шару, м	Площа шару, $м^2$	Об'єм, $м^3$
ПДМЗ № 1 для ДК №1,3,5,7				
1	Розділяючий ГСМ по периметру дренувального ровика	-	3,00	-
2	Крупнозернистий пісок фракції від 2 мм до 3 мм	-	-	0,22
3	Дренажна труба з перфорацією діаметром 0,10 м	-	-	-
4	Обгортка труби з ГСМ	-	2,06	-
ПДМЗ №2 для ДК №2,4,6,8				
1	Розділяючий ГСМ по периметру дренувального ровика	-	3,00	-
2	Щебінь фракції від 10 мм до 20 мм	-	-	0,05
3	Розділяючий ГСМ по периметру дренувального ровика	-	1,00	-
4	Щебінь фракції від 10мм до 40 мм	-	-	0,20
Для ПДМЗ №1 та №2				
5	Дренажна траншея	0,25	1	0,25

Значення різних критеріїв (табл. 5.4) мали різний порядок, тому їх було пронормовано, поділивши кожен критерій на його максимальне значення

Таблиця 5.4 – Техніко-технологічні параметри ДК

Номер конструкції	Вартість, грн	Середньозважений коефіцієнт фільтрації, м/добу	Середня інтенсивність водовідведення, л/хв.	Модуль пружності, МПа
ДК № 1	**3850**	63,1	0,42	399
ДК № 2	**3023**	63,1	0,77	399
ДК № 3	**3753**	71,9	0,42	399
ДК № 4	**2926**	71,9	0,77	399
ДК № 5	**3558**	7,0	0,42	347
ДК № 6	**2731**	7,0	0,77	347
ДК № 7	**3745**	31,0	0,42	344
ДК № 8	**2918**	31,0	0,77	344

Вихідні дані для розрахунку оптимальної конструкції

У відносних одиницях

Номер конструкції	Відносна вартість	Коефіцієнт фільтрації	Відносний коефіцієнт інтенсивності водовідведення	Модуль пружності
ДК № 1	1	0,877	0,545	1
ДК № 2	0,785	0,877	1	1
ДК № 3	0,975	1	0,545	1
ДК № 4	0,760	1	1	1
ДК № 5	0,924	0,097	0,545	0,870
ДК № 6	0,709	0,097	1	0,870
ДК № 7	0,973	0,431	0,545	0,862
ДК № 8	0,758	0,431	1	0,862

Оцінка сукупності техніко-технологічних параметрів, що визначають роботу конструкцій ПДМЗ проводилася за методом колективної експертної оцінки. За цим підходом до анкетування були залучені вісім провідних експертів у галузі дорожнього будівництва.

Експертами було визначено п’ять основних техніко-технологічних параметрів, що, на їх думку, впливають на роботу конструкцій ПДМЗ:

1) усереднений коефіцієнт фільтрації шарів основи;
2) інтенсивність водовідведення дренажної траншеї;
3) модуль пружності дорожнього одягу;
4) стійкість до деформації дренажної конструкції від впливу великовагових ТЗ під час експлуатації або від впливу дорожніх машин при влаштуванні;

5) замулювання дренажної траншеї.

Узагальнення та ранжування отриманих даних анкетного опитування експертів наведено в табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Дані анкетування про відносну важливість техніко-технологічних параметрів конструкцій ПДМЗ

Ч.ч.	Показник		Експерти								
			1	2	3	4	5	6	7	8	**Сума**
1	Усереднений коефіцієнт фільтрації шарів основи	бал	70	40	40	30	40	70	70	50	**410**
		ранг	3,5	3,5	5	4,5	3,5	4	3	4,5	**31**
2	Інтенсивність водовідведення дренажної траншеї	бал	70	40	80	50	40	80	60	60	**480**
		ранг	3,5	3,5	3	3	3,5	2,5	4	3	**25,5**
3	Модуль пружності дорожнього одягу	бал	100	60	80	100	70	90	80	95	**675**
		ранг	1	1,5	3	1	2	1	2	1	**12**
4	Стійкість до деформації дренажної конструкції від впливу великовагових ТЗ під час експлуатації або від впливу дорожніх машин під час влаштування	бал	80	60	90	80	100	80	100	80	**670**
		ранг	2	1,5	1	2	1	2,5	1	2	**12,5**
5	Замулювання дренажної траншеї	бал	40	20	40	30	30	50	50	50	**310**
		ранг	5	5	5	4,5	5	5	5	4,5	**38,5**

На основі даних табл. 5.4 були розраховані показники для порівняльної оцінки відносної важливості розглянутих чинників за формулами (5.3) – (5.8).

Отже, пріоритетність чинників, що визначають техніко-технологічні показники конструкцій ПДМЗ та відповідні їм коефіцієнти вагомості, визначаються у порядку зниження пріоритетності відповідно до табл. 5.6.

Таблиця 5.6 – Показники порівняльної важливості техніко-технологічних параметрів конструкцій ПДМЗ

Показник	Техніко-технологічні параметри ПДМЗ				
	1	2	3	4	5
Сума рангів	31,00	25,50	12,00	12,50	38,50
Середній ранг	3,875	3,1875	1,5	1,5625	4,8125
Середнє значення в балах	51,25	60	84,375	83,75	38,75
Частота максимально можливих оцінок	0	0	0,25	0,25	0
Середня вага (нормована оцінка)	0,160	0,187	0,267	0,267	0,120
Коефіцієнт активності експертів	1	1	1	1	1
Розмах	40	40	40	40	30

Рейтингування техніко-технологічних показників роботи конструкцій ПДМЗ за даними колективної експертної оцінки		
Рейтинг	Техніко-технологічний показник	Коефіцієнт вагомості
1	Модуль пружності дорожнього одягу	0,2671
2	Стійкість до деформації дренажної конструкції від впливу великовагових транспортних засобів під час експлуатації або від впливу дорожніх машин під час влаштування	0,2667
3	Інтенсивність водовідведення з дренажної траншеї	0,187
4	Усереднений коефіцієнт фільтрації шарів основи	0,1596
5	Замулювання дренажної траншеї	0,1196

Із метою оцінки ступеня узгодженості думок експертів було визначено низку статистичних числових характеристик за формулами (5.10) – (5.17) та розраховано коефіцієнт конкордації відповідно до табл. 5.7.

Таблиця 5.7 – Статистичні характеристики для оцінки ступеня узгодженості колективної думки експертної групи

Показник	Техніко-технологічні параметри конструкцій ПДМЗ				
	1	2	3	4	5
Дисперсія оцінок	269,64	257,14	210,27	169,64	126,79
Середньоквадратичне відхилення оцінок	16,42	16,04	14,50	13,02	11,26
Коефіцієнт варіації оцінок	32,04	26,73	17,19	15,55	29,06
Загальна дисперсія оцінок	258,37				
Коефіцієнт конкордації	0,89				
Розрахункове значення критерію Пірсона	28,49				
Табличне значення критерію Пірсона	довірча ймовірність P=0,95		9,49		
	довірча ймовірність P=0,99		13,28		

Значення коефіцієнта конкордації $k_{кон.} = 0,89$ свідчить про високий рівень узгодженості думок експертів щодо важливості та пріоритетності чинників, що визначають техніко-технологічні показники конструкцій ПДМЗ.

Оскільки розрахункове значення критерію Пірсона $\chi_p^2 = 28,49$ перевищує його табличне значення, причому як для довірчої ймовірності P=0,95 ($\chi_p^2 = 9,49$) так і для довірчої ймовірності P=0,99 ($\chi_p^2 = 13,28$), то можна зробити висновок про статистичну значимість коефіцієнта конкордації і високий рівень довіри до колективної думки експертної групи.

Варто відзначити, що для досліджуваних конструкцій ПДМЗ наразі технологічні параметри 4 та 5 вимагають накопичення необхідної емпіричної інформації. Тому, значення коефіцієнтів вагомості необхідно уточнити на основі формули (5.8) і табл. 5.8.

Таблиця 5.8 – Уточнення коефіцієнтів вагомості техніко-технологічних параметрів конструкцій ПДМЗ

Показники	1	2	3	4	5	Сума
З урахуванням п’яти показників	0,160	0,187	0,267	0,267	0,120	1
З виключенням показників 4 і 5	0,288	0,316	0,396	---	---	1

Отже, для досліджуваних восьми конструкцій ПДМЗ отримаємо такі результати відповідно до табл. 5.9.

Таблиця 5.9 – Визначення критеріїв та значень цільової функції для конструкцій ПДМЗ

Конструкція	Вартість	Коефіцієнт Фільтрації	Коефіцієнт інтенсивності водовідведення	Модуль пружності	Сума техніко-технологічних показників	Значення цільової функції
		Коефіцієнти вагомості				
		0,288	0,316	0,396		
ДК № 1	1,000	0,253	0,172	0,396	0,821	1,218
ДК № 2	0,785	0,253	0,316	0,396	0,964	0,814
ДК № 3	0,975	0,288	0,172	0,396	0,856	1,138
ДК № 4	0,760	0,288	0,316	0,396	1,000	0,760
ДК № 5	0,924	0,028	0,172	0,344	0,545	1,697
ДК № 6	0,709	0,028	0,316	0,344	0,688	1,031
ДК № 7	0,973	0,124	0,172	0,341	0,638	1,525
ДК № 8	0,758	0,124	0,316	0,341	0,781	0,970

Аналіз табл. 5.9 показує, що цільова функція, визначена за формулою (5.2) набуває свого мінімального значення для ДК № 4 із розглянутих восьми конструкцій. Отже, саме цю конструкцію можна рекомендувати проектувальникам

в якості оптимальної, що має найкращі техніко-технологічні показники у співвідношенні до її кошторисної вартості.

5.3 Методи регулювання водно-теплового режиму дорожньої конструкції способом дренування

Методи регулювання водно-теплового режиму ДК способом дренування (шляхом влаштування дренувальних шарів і ПДМЗ) діляться на три основні групи:

– дренувальні шари, які працюють за принципом поглинання та накопичування вологи в ДК;

– дренажні конструкції мілкого закладання, які поступово відводять воду;

– дренажні конструкції мілкого закладання, які швидко відводять воду.

Для відведення води з ДК за принципом швидкості та кількості використовують дренажні конструкції двох типів: із дренажною трубою та з дренажним ядром. Конструкції ПДМЗ наведено в [174].

Конструкції ПДМЗ з дренажним ядром належать до конструкцій, які швидко відводять воду. Конструкції ПДМЗ із дренажною трубою належать до конструкцій, які поступово відводять воду. З урахуванням цього вибір типу конструкції ПДМЗ залежить від ґрунтово-гідрологічних, кліматичних умов, рельєфу місцевості та від кошторисної вартості ДК. Результати експериментальних досліджень двох типів ПДМЗ із різних матеріалів наведено у 4.2.

На інтенсивність водовідведення конструкції ПДМЗ із дренажною трубою вібрація від ТЗ не впливає завдяки тому, що дренажна труба має подвійний захист – наповнювач із крупнозернистого піску та ГСМ, який обгорнутий на тілі труби.

Інтенсивність водовідведення конструкції ПДМЗ із дренажним ядром посилюється під дією вібрації завдяки тому, що наповнювач траншеї має високопористу контактну структуру. Такий процес може суттєво впливати на водопроникність шару ГСМ у конструкції і відповідно на довговічність її роботи. Результати експериментальних досліджень двох типів ПДМЗ під дією вібрації наведено у п.4.3.

Згідно з [83] поперечний перетин траншеї дренувальних прорізей призначають глибиною від 0,15 м до 0,20 м із шириною по дну не менше ніж 0,25 м. Глибина траншеї, більша ніж 0,25 м, не рекомендується, з метою запобігання нерівномірного морозного здимання. Трубу в траншеї обсипають кам'яним матеріалом – щебнем фракції від 5 мм до 10 мм або від 10 мм до 20 мм, згідно з [235], товщиною шару над трубою не менше ніж 0,05 м або обертають ГСМ. ПДМЗ із дренажним ядром влаштовують із крупного пористого кам'яного матеріалу (щебню, гравію), що відсипають на листи руберойду, толю або гідроізолу і прикривають зверху ГСМ. За відсутності ізоляційних матеріалів може бути влаштована фільтрова обсипка зі щебню фракції від 5 мм до 10 мм. Ядро прорізі повинно бути влаштоване з митого морозостійкого щебню або гравію із фракції від 20 мм до 40 мм згідно з [235]. У плані прорізі влаштовують наскрізними. На ділянках доріг із поздовжнім похилом більше 20‰ з південного боку прорізі допускається влаштовувати скороченими. Довжина прорізі відповідає ширині площинного дренажу. У випадку влаштування прорізі на ширину дорожнього одягу влаштовують випуски на укоси.

Для унеможливлення повного заповнення дренувального шару водою в результаті атмосферних опадів і надходження вологи з нижче розташованого ґрунту ЗП влаштовують ПДМЗ та/або дренажний прошарок із ГСМ. Для влаштування дренувальних прошарків використовують ГСМ, мінімально допустиму водопроникність якого встановлюють згідно з [236]. Такий прошарок укладають під дренувальний шар на всю ширину ЗП із випуском полотнищ на укоси насипу.

Дренувальний шар влаштовують між основою дорожнього одягу із зернистих (пористих) матеріалів і робочим шаром ЗП з ґрунту з коефіцієнтом фільтрації менше ніж 0,5 м/добу, згідно з [237], у наступних випадках:

– у I, II та IV дорожньо-кліматичних зонах у разі 2 та 3 типів зволоження робочого шару ЗП, згідно з [74].

– у III дорожньо-кліматичній зоні у разі 3 типу зволоження робочого шару ЗП.

У дорожньо-кліматичних зонах I та IV необхідно передбачати влаштування дренувальних шарів для відводу води з шарів дорожнього одягу з зернистих матеріалів (щебню, гравію) крім піску. Для влаштування дренувальних шарів без виходу на укоси з ПДМЗ використовують митий щебінь (гравій) або крупнозернистий пісок із масою пилуватих частинок менше ніж 3 % або інші зернисті матеріали з коефіцієнтом фільтрації не менше ніж 10 м/добу.

Допускається влаштовувати дренувальний шар із зернистих матеріалів із коефіцієнтом фільтрації 5 м/добу і більше за умови розташування цього шару на всю ширину ЗП із виходом на укоси насипу, з обов'язковим проведенням розрахунку на міцність дорожнього одягу з урахуванням тривалого утримання води в дренувальному шарі, згідно з [173, 231].

У виїмках дренувальний шар влаштовують на ширину проїзної частини за умови виходу шару на укіс вище 0,25 м – 0,3 м від дна кювету для всіх типів зволоження ЗП у всіх дорожньо-кліматичних зонах України. За відсутності можливості влаштування кювету, на основі техніко-економічного обґрунтування дренувальний шар влаштовують суміщеним із поздовжнім дренажем мілкого закладання.

Дренувальний шар з піску без випуску на укоси виконує екологічну функцію та функцію вологонакопичувача [238]. У разі 1 та 2 типів зволоження робочого шару ЗП допускається не влаштовувати дренувальний шар на ділянках доріг із морозозахисним шаром із піщаних ґрунтів з коефіцієнтом фільтрації не менше ніж 1 м/добу. Те ж саме допускається у разі 3 типу зволоження, якщо розташування морозозахисного шару вище капілярного рівня над рівнем ґрунтових вод у літній період. Морозозахисний шар працює за функцією поглинання згідно з [79]. Товщину морозозахисного шару без спеціальних дренувальних конструкцій призначають з метою забезпечення розміщення в ньому на тривалий час всієї води, що надходить. Необхідно, щоб рівень вільної гравітаційної води в морозозахисному шарі не піднімався на повну його товщину та не впливав на міцність дорожнього одягу.

Під час виконання розрахунків товщини морозозахисного шару необхідно перевірити, чи відповідає об'єм незаповнених пор в ньому для розміщення води, що надходить в конструкцію. Ця умова, згідно з [55], забезпечується за умови дотримання нерівності:

$$H_{мш} \geq H_{нас} + H_{зс}, \tag{5.17}$$

де $H_{нас}$ – товщина шару, повністю насиченого водою, м;

$H_{зс}$ – додаткова товщина шару, але не менше ніж 0,10 м – 0,12 м для крупнозернистих пісків, 0,14 м – 0,15 м для пісків середньої крупності та 0,18 м – 0,20 м для дрібнозернистих пісків (піщаних ґрунтів).

Для влаштування дренувального шару можна застосовувати піски, які задовольняють дві основні вимоги. Розрахункові значення кута внутрішнього тертя і питомого зчеплення в піску повинні бути такими, щоб не відбувалося зсуву в цьому піску під дією навантаження від транспортних засобів. Коефіцієнт фільтрації піску повинен бути таким, щоб не відбувалося утворення шару води під дорожнім одягом і атмосферні опади, що надходять через покриття проїзної частини в дренувальний шар, повністю поступали в пори піску цього шару. Виходячи з цієї вимоги, коефіцієнт фільтрації піску повинен бути не менше ніж 5 м/добу. Задля влаштування дренувальних шарів із піску з коефіцієнтом фільтрації менше ніж 5 м/добу в дорожньо-кліматичних зонах II та III потрібно передбачати влаштування додаткового прошарку з ГСМ для зменшення капілярного підняття та забезпечення відведення води. Такий прошарок влаштовують над дренувальним шаром на всю ширину ЗП.

У разі взаємопроникнення глинистих і піщаних частинок необхідно передбачати збільшення товщини дренувального шару на товщину, яка дорівнює 0,05 м – 0,15 м, залежно від вологості та щільності глинистих ґрунтів та зернового складу піску. Зазвичай, чим дрібніший фільтруючий матеріал, тим менша товщина цього додаткового шару піску. Під час укладання прошарків із ГСМ між піщаними

і глинистими ґрунтами замулення пісків не відбувається і не потрібно додаткового збільшення товщини дренувального шару.

Допускається застосовувати для влаштування морозозахисного шару піщані ґрунти з коефіцієнтом фільтрації менше ніж 5 м/добу. В цьому випадку для забезпечення виведення води потрібно влаштовувати під морозозахисним шаром дренувальний. Матеріали дренувального шару повинні задовольняти вимогам, яким відповідають морозозахисні шари. Замість дренувального шару можна влаштовувати дренажний прошарок із ГСМ. Під час влаштування ДО дренувальний шар влаштовують на всю ширину ЗП, для того щоб забезпечити умови для виведення води через укоси.

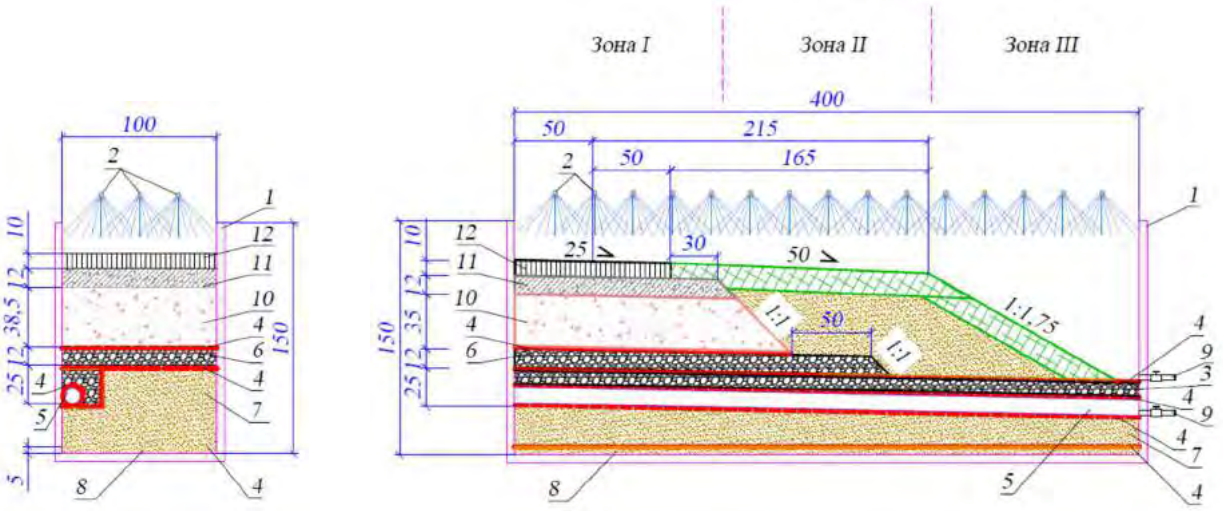
Для капіляропереривающих шарів використовують фільтрувальні зернисті матеріали – митий щебінь або гравій. Товщина цих шарів залежить від крупності матеріалу і повинна становити не менше трьох діаметрів більшої фракції. Знизу та згори додатково влаштовують захисні шари щебню або гравію меншої фракції. Капіляропереривающий шар можна влаштовувати з одного або двох шарів ГСМ загальною товщиною не менше ніж 4 мм згідно з [174].

5.4 Проведення експериментальних досліджень щодо режиму водовідведення з дорожньої конструкції

На моделюючій установці дорожньої конструкції (ДК), в навчально-науковій лабораторії кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету проводився експеримент з визначення режиму водовідведення з ДК під впливом обложного критичного дощу.

Дорожня конструкція з поперечним ДМЗ представлена на рис. 5.1.

ЗП влаштовано із супіщаного ґрунту, загальною товщиною 0,65 м. Верхній шар ґрунту ЗП відповідає похилу проїзної частини – 25 ‰. У верхньому шарі ґрунту ЗП було влаштовано прямокутну дренажну траншею глибиною 0,20 м та шириною 0,25 м, обкладену по периметру ГСМ. Похил дна траншеї приймають рівним похилу верхнього шару ґрунту.



а *б*

Рисунок 5.1 – Експериментальна установка: *а* – торцева площина, *б* – бокова площина

Умовні познаки до рис. 5.1:

I, II, III –зони проведення вимірювань;

1 – корпус експериментальної установки;

2 – система імітації дощових опадів;

3 – заповнювач дренажної траншеї – митий щебінь фракції 20–40 мм;

4 – прошарок ГСМ;

5 – дренажна труба ПВХ діаметром 100 мм з отворами;

6 – щебінь фракції 20–40 мм;

7 – ґрунт – супісок пилуватий;

8 – шар дрібнозернистого піску;

9 – відвідний отвір (кран);

10 – щебенево-піщана суміш С-5;

11 – щебенево-піщана суміш ЩПС-40, укріплена ценентом до міцності М 20;

12 – асфальтобетон.

ДО було влаштовано з шарів: щебню фракції 20–40 мм товщиною 0,12 м, розділяючим шаром ГСМ, щебенево-піщаної суміші С-5 товщиною 0,35 м,

щебенево-піщаної суміші ЩПС-40, яка укріплена цементом М 20, товщиною 0,12 м, шаром асфальтобетону товщиною 0,1 м. Присипні узбіччя було влаштовано з супіщаного ґрунту з похилом 50 ‰.

а *б*

Рисунок 5.2 – Натурний вигляд експериментальної установки зі спорудженою дорожньою конструкцією (без системи імітації дощу): *а* – фронтальний вигляд, *б* – вигляд зверху.

З метою визначення тривалості та кількості відведення води з ДК було визначено кількість води, що випаде на 4 м^2 поверхні лабораторної установки дорожньої конструкції. Кількість води відповідала кількості зливових опадів 5 % забезпеченості. Для розрахунку використовувались метеорологічні дані: інтенсивність зливових опадів 5 % забезпеченості та тривалість злив 5 % забезпеченості згідно [80]. З метою імітації зливи І-го рівня небезпеки, тривалого обложного дощу, воду по 25 л пускали 5 разів з інтервалом в одну годину (табл. 5.10). Ця визначена кількість опадів надходила на поверхню ДК за допомогою системи імітації дощових опадів, яка забезпечувала рівномірний розподіл вологи за площиною лабораторної установки.

Таблиця 5.10 – Експериментальні вимірювання об'єму дощової води, який поглинула ДК та вологості ґрунту ЗП

Час	Проміжок часу, хв	Об'єм води, який надійшов, дощ, л	Об'єм води, який відведено канавою, л	Поглинання ДК, л
12:30	0	25	-	-
12:31	1	-	-	-
12:32	2	-	-	-
12:33	**3**	**закінчилася подача води**	-	-
12:34	4		-	-
12:35	**5**	**закінчилося відведення води**	**3,5**	**21,5**
13:30	0	25	-	-
13:31	1	-	-	-
13:32	2	-	-	-
13:33	3	**закінчилася подача води**	-	-
13:34	4	-	-	-
13:35	**5**	**закінчилося відведення води**	**13,5**	**11,5**
14:30	0	25	-	-
14:31	1	-	-	-
14:32	2	-	-	-
14:33	**3**	**закінчилася подача води**	-	-
14:34	4	-	-	-
14:35	**5**	**закінчилося відведення води**	**16,5**	**8,5**
15:30	0	25	-	-
15:31	1	-	-	-
15:32	2	-	-	-
15:33	**3**	**закінчилася подача води**	-	-
15:34	4	-	-	-
15:35	**5**	**закінчилося відведення води**	**16,5**	**8,5**
16:30	0	25	-	-
16:31	1	-	-	-
16:32	2	-	-	-
16:33	**3**	**закінчилася подача води**	-	-
16:34	4	-	-	-
16:35	**5**	**закінчилося відведення води**	**16,5**	**8,5**
Всього	**0**	**125**	**66,5**	**58,5**

Кінець табл. 5.10

Експериментальні вимірювання вологості ґрунту ЗП перед зволоженням (I, II, III – відповідні зони вимірювань на експериментальній установці)			
Зони проведення випробувань	Вологість ґрунту W, %	Абсолютна вологість в ґрунті W, %	Час проведення, год
	на глибині 15 см		
Зона 1	8,1	55,7	12:30
Зона 2	8,4	56,1	
Зона 3	9,9	66	
Середнє значення	**8,8**	**59,3**	
Зона 1	10,7	71	13:30
Зона 2	10,3	70	
Зона 3	10	67	
Середнє значення	**10,3**	**69,3**	
Зона 1	11,6	79,1	14:30
Зона 2	11,9	81,5	
Зона 3	10,8	71,5	
Середнє значення	**11,4**	**77,4**	
Зона 1	12,5	82,5	15:30
Зона 2	11,5	78	
Зона 3	11	72	
Середнє значення	**11,7**	**77,5**	
Зона 1	12	81,7	16:30
Зона 2	12,1	80	
Зона 3	11,1	75,5	
Середнє значення	**11,7**	**79,1**	

В ході проведення експерименту для ДК було виявлено, що після того, як через дві години від початку експерименту поглинання води ґрунтом ЗП стабілізувалося, об'єм води, який відводився канавою, та який поглинався ДК, став стабільним. Тому загальний об’єм води, який відводився канавою став більшим, а що поглинався ДК зменшився, відповідно до табл. 5.10. При проведенні кожного дослідження, перед зволоженням, проводилося вимірювання вологості ґрунту ЗП (табл. 5.10).

На рис. 5.3 наведено кореляційне поле між відведеною водою та часом її відведення за даними експериментальних вимірювань. Точки відповідають результатам експериментальних вимірювань.

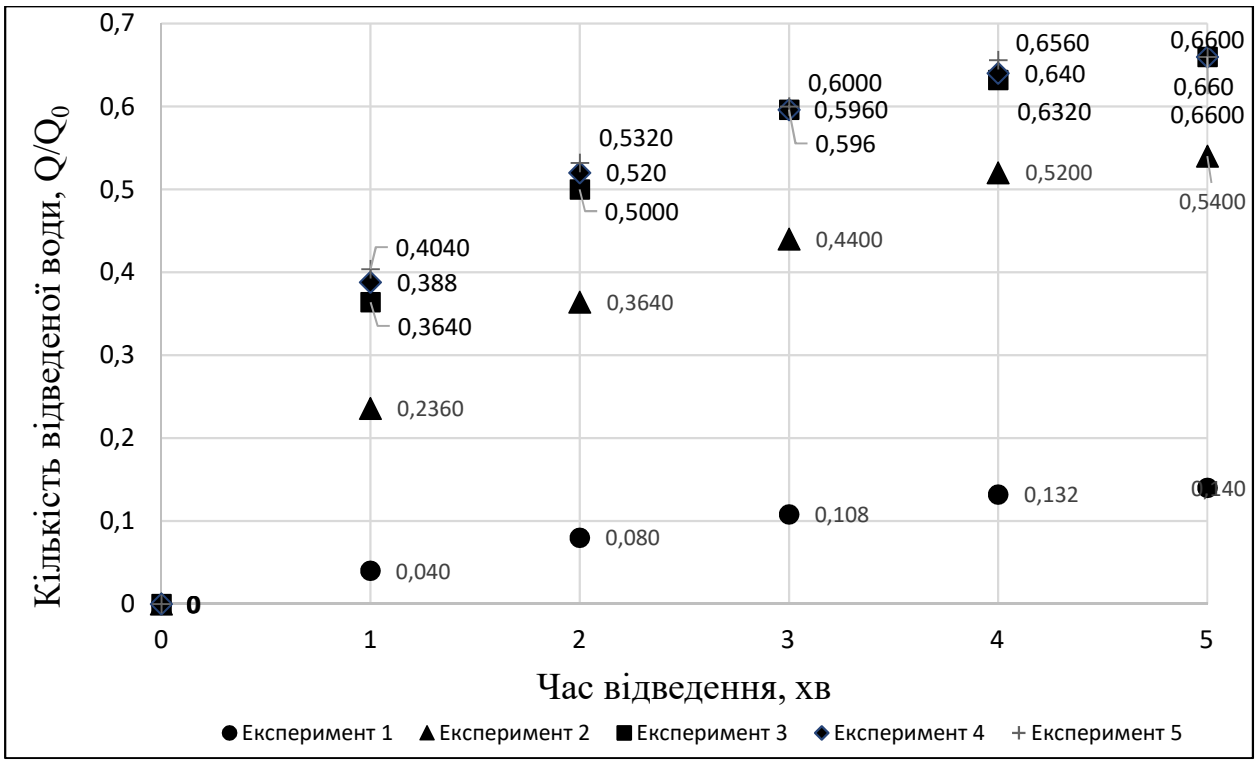


Рисунок 5.3 – Кореляційне поле між кількістю відведеної води та часом її відведення за даними експериментальних вимірювань

На наступному етапі роботи необхідно виконати математичну обробку результатів експериментальних даних з метою їх уніфікації та встановлення закономірностей між основними параметрами досліджуваної ДК, що дасть можливість спрогнозувати її експлуатаційні показники в часовому та просторовому вимірі під впливом різних факторів.

Одним із найважливіших моментів для кореляційно-регресійного аналізу експериментальних даних є вибір структури рівнянь регресії, що залежить в першу чергу від розподілу експериментальних даних та аналізу їх кореляційних полів [220, 221]. Рівняння регресії має бути підібрано таким чином, щоб максимально точно описати розподіл експериментальних даних та мінімізувати квадрати відхилень між експериментальними та розрахунково-регресійними значеннями досліджуваних параметрів.

Аналіз експериментальних кореляційних полів між кількістю води, що потрапляє у водовідвідну канаву та часом її відведення показав, що характерною

особливістю відведення води водовідвідною канавою є уповільнення даного процесу з плином часу *t* і вихід його на деякий стаціонарний режим, що відповідає асимптотичному наближенню функції до деякої лінії. Це дозволяє висунути гіпотезу про те, що рівняння регресії необхідно шукати у вигляді гіперболічної функції виду, відповдно до (4.21). Коефіцієнти *a* і *b*, що входять до рівнянні регресії (4.21) визначаються на основі методу найменших квадратів за формулами (4.22 – 4.23). Для оцінки щільності зв'язку між досліджуваними параметрами обчислюють коефіцієнт парної кореляції за формулою (4.24).

Таблиця 5.11 – Розрахункова таблиця для знаходження параметрів регресійної моделі

Експериментальні дані			Розрахункові дані					
№ заміру i	Час відведення, t_i, хв	Кількість відведеної води, Q_i	$1/t_i$	$1/t^2_i$	Q_i/t_i	$\hat{Q}_i$	$\left(Q_i-\hat{Q}_i\right)^2$	$\left(Q_i-\hat{Q}\right)^2$
1	1	0,0400	1,0000	1,0000	0,0400	0,0337	0,000039	0,0036
2	2	0,0800	0,5000	0,2500	0,0400	0,0947	0,000217	0,0004
3	3	0,1080	0,3333	0,1111	0,0360	0,1150	0,000050	0,0001
4	4	0,1320	0,2500	0,0625	0,0330	0,1252	0,000046	0,0010
5	5	0,1400	0,2000	0,0400	0,0280	0,1313	0,000076	0,0016
Сума	15	0,5000	2,2833	1,4636	0,1770	0,4999	0,000427	0,0067

Результати розрахунку параметрів кореляційно-регресійної моделі за формулами (1)–(6)					
Рівняння кореляційно-регресійної моделі	Коефіцієнт кореляції	Коефіцієнт детермінації	Середня похибка апроксимації	Значення критерію Фішера при α=0,05	
				Критичне значення	Фактичне значення
$\hat{Q}(t)=0{,}1557-\frac{0{,}122}{t}$	0,9675	0,9361	10,38 %	10,128	43,97

Значимість параметрів регресії оцінюють за F-критерієм Фішера для

прийнятого рівня значущості α=0,05, порівнюючи його критичне (табличне) значення $F_{\text{табл.}}$ з фактичним значенням $F_{\text{факт.}}$, що визначається за формулою (4.25). Середня похибка апроксимації експериментальних даних кореляційно-регресійною залежністю визначається за формулою (4.26):

Аналіз розрахункових параметрів кореляційно-регресійної моделі (табл. 5.11) дозволяє зробити ряд висновків щодо її надійності та точності.

1. Фактичне значення критерію Фішера перевищує його табличне значення ($43,97 = F_{факт.} > F_{табл.} = 10,128$), можна зробити висновок про статистичну значимість та надійність отриманої регресійної моделі.

2. Значення коефіцієнта парної кореляції R=0,9675 свідчить про дуже тісний зв'язок між досліджуваними факторами (кількістю відведеної води і часом її відведення).

3.Середня похибка апроксимації для кореляційно-регресійної моделі складає A=10,38 %, що дозволяє зробити висновок про досить високу її точність.

Аналогічним чином були визначені параметри регресійних моделей для решти експериментальних даних. Результати кореляційно-регресійного аналізу всіх експериментальних даних представлено у вигляді табл. 5.12. та рис. 5.4.

Таблиця 5.12 – Результати кореляційно-регресійного аналізу експериментальних даних

Експеримент №	Рівняння кореляційно-регресійної моделі	Коефіцієнт кореляції	Коефіцієнт детермінації	Середня похибка апроксимації, %	Значення критерію Фішера при α=0,05	
					Критичне значення	Фактичне значення
Експеримент 1	$\hat{Q}(t) = 0,1557 - \frac{0,122}{t}$	0,9675	0,9361	10,128	10,128	43,97
Експеримент 2	$\hat{Q}(t) = 0,5896 - \frac{0,3714}{t}$	0,9694	0,9397	6,68	10,128	46,77
Експеримент 3	$\hat{Q}(t) = 0,7176 - \frac{0,3661}{t}$	0,9859	0,9719	2,75	10,128	103,86
Експеримент 4	$\hat{Q}(t) = 0,7147 - \frac{0,337}{t}$	0,9888	0,9778	2,43	10,128	132,07
Експеримент 5	$\hat{Q}(t) = 0,7184 - \frac{0,3241}{t}$	0,9869	0,9739	2,5	10,128	112,16

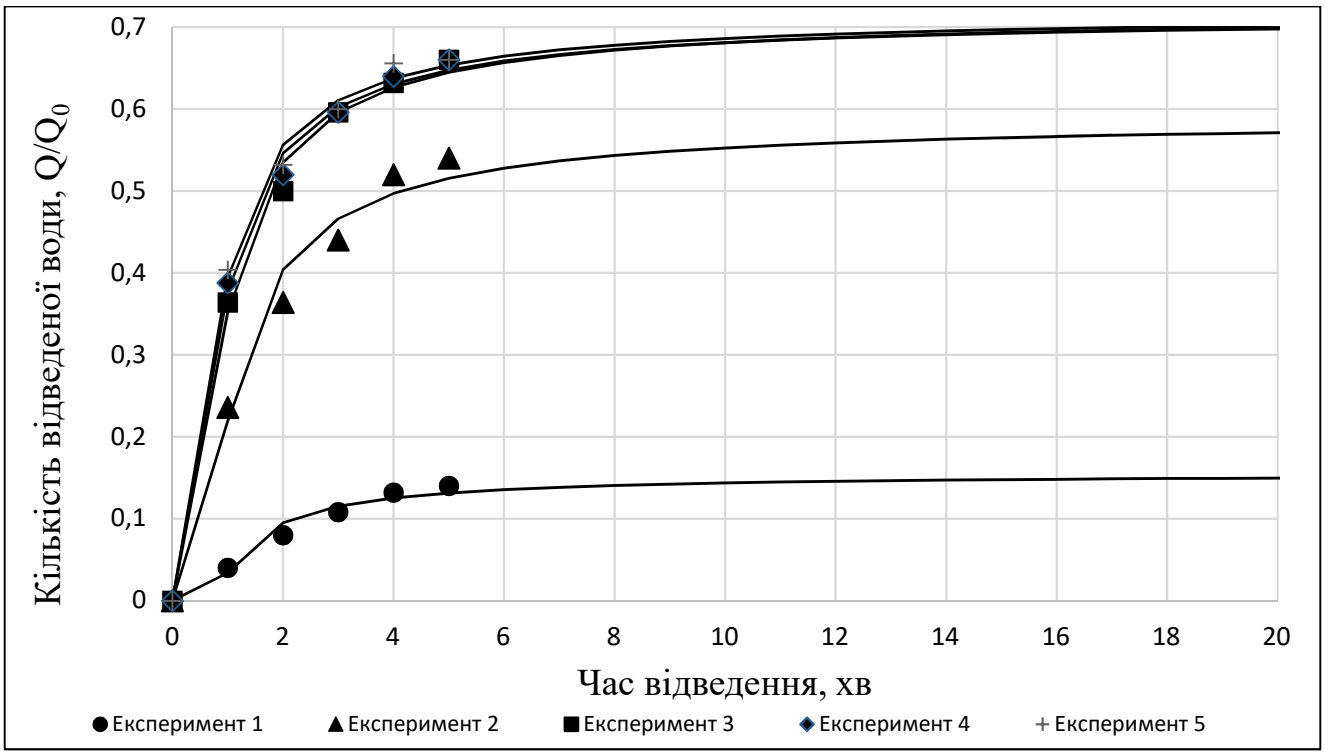


Рисунок 5.4 – Апроксимація експериментальних даних регресійними залежностями (точки – експериментальні дані, суцільні лінії – регресійні криві): 1 –$W_{ЗП}$=8,8 %; 2 –$W_{ЗП}$=10,3 %; 3 –$W_{ЗП}$=11,4 %; 4 –$W_{ЗП}$=11,7 %; 5 –$W_{ЗП}$=11,7 %

На наступному етапі роботи з метою уніфікації рівнянь, наведених у табл. 5.12, необхідно визначити залежність режиму водовідведення канави від вологості грунту ЗП $W_{ЗП}$. Для цього використаємо експериментальні заміри вологостей ґрунту земляного полотна $W_{ЗП}$ та відповідні їм розрахункові значення коефіцієнтів *a* і *b* регресійних моделей (табл. 5.12). На основі аналізу кореляційних полів a($W_{ЗП}$) та b($W_{ЗП}$) відповідні їм рівняння регресій будемо шукати на основі методу найменших квадратів у вигляді лінійних функцій:

$$\begin{cases} a\left(W_{ЗП}\right) = a_1 W_{ЗП} + b_1, \\ b\left(W_{ЗП}\right) = a_2 W_{ЗП} + b_2 \end{cases} \tag{5.18}$$

Коефіцієнти a_1, a_2, b_1, b_2 відповідно до методу найменших квадратів будемо шукати у вигляді:

$$a_{1,2} = \frac{\sum W_{i\,ЗП} \sum a_i - n \sum a_i W_{i\,ЗП}}{\left(\sum W_{i\,ЗП}\right)^2 - n \sum W_{i\,ЗП}{}^2} \tag{5.19}$$

$$b_{1,2} = \frac{\sum W_{i\,ЗП} \sum b_i W_{i\,ЗП} - \sum W_{i\,ЗП}{}^2 \sum b_i}{\left(\sum W_{i\,ЗП}\right)^2 - n \sum W_{i\,ЗП}{}^2} \tag{5.20}$$

Коефіцієнти лінійної парної кореляції визначаємо за формулами:

$$R\left(W_{i\,ЗП}; a\right) = \frac{\sum W_{i\,ЗП} \sum a_i - n \sum a_i W_{i\,ЗП}}{\sqrt{\left(n \sum a_i{}^2 - \left(\sum a_i\right)^2\right)\left(n \sum W_{i\,ЗП}{}^2 - \left(\sum W_{i\,ЗП}\right)^2\right)}}, \tag{5.21}$$

$$R\left(W_{i\,ЗП}; b\right) = \frac{\sum W_{i\,ЗП} \sum b_i - n \sum b_i W_{i\,ЗП}}{\sqrt{\left(n \sum b_i{}^2 - \left(\sum b_i\right)^2\right)\left(n \sum W_{i\,ЗП}{}^2 - \left(\sum W_{i\,ЗП}\right)^2\right)}}. \tag{5.22}$$

Підставивши експериментальні дані вологостей грунту ЗП в (5.19 – 5.20), на основі методу найменших квадратів отримаємо:

$$\begin{cases} a\left(W_{ЗП}\right) = 0{,}1882 W_{ЗП} - 1{,}4495, \\ b\left(W_{ЗП}\right) = -0{,}667 W_{ЗП} + 0{,}4148 \end{cases}; \tag{5.23}$$

Значення коефіцієнтів лінійних парних кореляцій становлять $R\left(W_{i\,ЗП}; a\right) = 0{,}9549$, $R\left(W_{i\,ЗП}; b\right) = 0{,}8086$, що свідчить про досить щільний зв'язок між регресійними коефіцієнтами a, b та значеннями початкової вологості ґрунту ЗП $W_{ЗП.}$

Підставивши отримані вирази для $a(W_{ЗП})$, $b(W_{ЗП})$ у рівняння (4.19), отримаємо уніфіковану кореляційно-регресійну модель для прогнозування інтенсивності водовідведення з ДК під впливом обложного критичного дощу залежно від часу та від початкової вологості ґрунту ЗП:

$$\hat{Q}(t)=\left(0{,}1882-\frac{0{,}0667}{t}\right)\cdot W_{ЗП}+\frac{0{,}4148}{t}-1{,}4495\,. \qquad (5.24)$$

Проведення досліджень на спеціальній моделюючій установці дорожньої конструкції з прозорою фронтальною стінкою дозволило дослідити процеси водовідведення з ДК, що неможливо на реальних об’єктах. Важливим також є те, що експерименти проводилися для несприятливих критичних умов, які виникають під час злив або в період обложних дощів.

На основі побудованих за експериментальними результатами рівнянь кореляційно-регресійної моделі для $\hat{Q}(t)$ та поліноміальних залежностей для коефіцієнтів $a(W_{\text{ЗП}})$, $b(W_{\text{ЗП}})$ можна спрогнозувати кількість відведеної води з ДК за певний проміжок часу в залежності від початкової вологості $W_{\text{ЗП}}$ ґрунту ЗП.

Спостереження дозволили встановити, що процес поглинання та відведення води при однакових умовах є різним.

Протягом перших трьох експериментів вологість ґрунту ЗП зростає на 2,6 %, між третім і четвертим сповільнюється та збільшується на 0,3 % та після четвертого та п’ятого експериментів стабілізується та стає сталою.

Якщо порівнювати об'єм води, який відводиться канавою та об'єм води, який поглинається ДК, то після першого експерименту було відведено канавою 14%, а поглинуто ДК – 86%. Після третього експерименту процеси стабілізувалися і на далі, до кінця п’ятого експерименту, відводилось канавою 66%, а поглиналось ДК – 36%. Це свідчить про настання деякого стаціонарного режиму водовідведенням та поглинанням ДК води.

Висновки по розділу 5

1. Визначено цільову функцію для пошуку найбільш оптимальної дорожньої конструкції з ДМЗ за 2 групами критеріїв: кошторисною вартістю та сукупністю техніко-технологічних показників, що характеризують ефективність їх роботи. За методом колективної експертної оцінки проведено математичну обробку даних анкетного опитування експертів у галузі дорожнього будівництва для виявлення та ранжування сукупності техніко-технологічних параметрів, що визначають роботу конструкцій ДМЗ. Виділено 5 основних показників, що є суттєвими та впливають на роботу ДК з ДМЗ: усереднений коефіцієнт фільтрації шарів основи; інтенсивність водовідведення дренажної траншеї; модуль пружності дорожнього одягу; стійкість до деформації дренажної конструкції від впливу великовагових транспортних засобів під час експлуатації або від впливу дорожніх машин при влаштуванні; замулювання дренажної траншеї.

2. На основі експертного методу визначено, що найбільш суттєвими у роботі конструкцій ДМЗ модуль пружності дорожнього одягу та стійкість до деформації дренажної конструкції від впливу великовагових транспортних засобів під час експлуатації або від впливу дорожніх машин при влаштуванні. Меншого значення експерти надали таким показникам як: інтенсивність водовідведення дренажної траншеї, усередненому коефіцієнту фільтрації шарів основи та замулюванню дренажної траншеї.

Розрахункове значення критерію Пірсона . $\chi_p^2 = 28{,}49$ перевищує його табличне значення як для довірчої імовірності P=0,95 ($\chi_p^2 = 9{,}49$) так і для довірчої імовірності P=0,99 ($\chi_p^2 = 13{,}28$), що дозволяє зробити висновок про статистичну значимість коефіцієнта конкордації і високий рівень довіри до колективної думки даної експертної групи. Із восьми запропонованих конструкцій ДМЗ було обґрунтовано та рекомендовано до проектування найбільш оптимальну з найкращими техніко-технологічними характеристиками при її мінімальній кошторисній вартості (значення цільової функції 0,76).

3. Досліджено режими водовідведення з ДК під впливом поверхневих опадів.

Експерименти проводилися у відповідності до реальних несприятливих метеорологічних умов роботи ДК при зливовому дощі І-го рівня небезпеки. Отримані результати вимірювань вологості ґрунту ЗП $W_{ЗП}$, об’єм води, який відведено канавою та об’єм води, який поглинуто ДК. На основі результатів експериментальних досліджень отримано рівняння кореляційно-регресійної моделі для прогнозування режиму відведення води залежно від початкового об’єму води та початкової вологості ґрунту ЗП. Значення коефіцієнтів парної кореляції 0,9675–0,9888 свідчать про дуже тісний зв'язок між досліджуваними факторами (кількістю відведеної води і часом її відведення). Для всіх кореляційно-регресійних моделей фактичне значення критерію Фішера значно перевищує його критичне значення, що свідчить про статистичну значимість, надійність та адекватність отриманих регресійних моделей. Середня похибка апроксимації для всіх кореляційно-регресійних моделей складає 2,43 %–10,128 %, що дозволяє зробити висновок про високу їх точність.

4. Визначено режими зміни вологості ґрунту ЗП $W_{ЗП}$, які поділяються на 3 етапи: поглинання, не поглинання та стабілізація. Встановлено, що протягом перших трьох експериментів $W_{ЗП}$ зростає на 2,6 %, між третім і четвертим сповільнюється та збільшується на 0,3 % та після четвертого та п’ятого експериментів стабілізується та стає сталою. Тобто, об'єм води, який відводиться канавою, в 6 разів менший ніж який поглинається ДК, та надалі, у режимі стабілізації, відводилося в 2 рази більше ніж поглиналося.

5. Результати досліджень п’ятого розділу викладено у наступних публікаціях [232 – 234].

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-практичної проблеми, що полягає в розробленні методології проектування дренажних конструкцій мілкого закладання, яка ґрунтується на удосконаленні методу визначення комплексного показника фізичного та функціонального стану перезволоженої ділянки автомобільної дороги; удосконаленні методу проектування параметрів поперечних дренажів мілкого закладання; удосконаленні методу з визначення технологічних режимів влаштування дренувальних шарів з трубчастими дренами на основі аналізу напружено-деформованого стану дорожньої конструкції; результатах числового експерименту з дослідження напружено-деформованого стану дорожньої конструкції з трубчастими дренами; результатах експериментальних досліджень щодо формування фільтраційного потоку та визначення інтенсивності водовідведення поперечними дренажами мілкого закладання.

1. На основі аналізу існуючих теоретичних, експериментальних методів проектування дренажних конструкцій мілкого закладання та їх роботи встановлено, що дослідити процеси формування фільтраційного потоку та інтенсивність водовідведення на реальних об’єктах неможливо. Це обумовлює необхідність проведення лабораторних досліджень на повномасштабних експериментальних моделях з можливістю візуалізації. Відповідно виникає необхідність удосконалення існуючих методів розрахунку параметрів дренажних конструкцій, які суттєво схематизують всі явища та процеси, що відбуваються в підземних фільтраційних потоках. Відсутність досліджень щодо напружено-деформованого стану дорожньої конструкції, з трубчастими дренами в основі, висуває необхідність розв’язування нового класу задач, як на стадії будівництва, так і на стадії експлуатації таких споруд.

2. Розроблено кваліметричну модель якісного стану перезволоженої ділянки автомобільної дороги, яка ґрунтується на її показниках фізичного та функціонального зносу і дає можливість обґрунтувати вагомість впливу дренажних

конструкцій на транспортно-експлуатаційні показники дороги. Вагомість дренажних конструкцій складає 20 % для фізичного зносу та 15 % для комплексного показника якісного стану дороги.

3. На основі загального рівняння усталеного нерівномірного плавнозмінного руху рідини модифіковано диференціальне рівняння змінної глибини фільтраційного потоку для призматичних русел, що дозволило отримати залежності для визначення відстані між дренажними прорізями для ділянок з прямим та зворотнім похилом, зокрема для дороги ІІІ-ї категорії, в умовах І-ї дорожньо-кліматичної зони України визначено відстань між дренажними прорізями для піщаного дренувального шару: піщаного – 40 м.

Отримано залежність для визначення часу водовідведення, яке враховує приріст втрат фільтраційного потоку з дотриманням умов нерозривності. Час водовідведення при загальному питомому надлишку 25 л/добу на 1 м^2 для піщаного дренувального шару складає 1,5 доби

4. За результатами числового моделювання, з урахуванням технологічних особливостей влаштування дренувальних шарів (піщаного та щебеневого) отримано розподіл нормальних напружень та деформацій в дорожній конструкції і безпосередньо у тілі дренажних труб двох типів. Це дозволило встановити технологічні режими ущільнення дренувальних шарів з наявністю трубчастих дрен в робочій зоні земляного полотна, з урахуванням модуля пружності шару та типу дорожнього котка, зовнішній діаметр труб 120 мм: щебеневий шар (190 – 220 МПа) – прослідковується лінійна залежність зменшення деформацій труб від модуля пружності шару (для труби ПВХ SN 8 змінюється від 1,91 до 1,34 мм, для бетонної труби –від 1,98 до 1,32 мм); піщаний шар (40 – 120 МПа) – прослідковується нелінійна залежність зміни деформацій в трубі від модуля пружності шару (для труби ПВХ SN 8 змінюється від 1,88 до 2,87 мм, для бетонної труби –від 1,85 до 2,77 мм). Отримані деформації у бетонних трубах призводять до їх руйнування, а в трубах ПВХ такі деформації є допустимими, що підтверджує доцільність їх влаштування.

5. Проведено числове моделювання напружено-деформованого стану двох

типів дорожньої конструкції (з дренувальним шаром та з наявністю трубчастих дрен під ним). Моделювання проводилося для двох класів труб SN 2 та SN 8. Отримані результати за тривимірними числовими моделями дозволяють обґрунтувати вибір міцнісних характеристик трубчастих дрен, які забезпечують безвідмовну роботу поперечних дренажів мілкого закладання на стадії експлуатації, наприклад в дорожній конструкції без труби деформація під дренувальним шаром складає 1,74 мм, з трубою SN 2 – 1,8 мм, з трубою SN 8 – 1,76 мм. Оскільки деформація труби SN 2 перевищує 3 % від її зовнішнього діаметру, то можливе порушення умов роботи дренажної конструкції в цілому.

6. Проведення експериментальних досліджень було поділено на два етапи. На 1-му етапі було досліджено особливості роботи дренажної траншеї з різними матеріалами-наповнювачами. При використанні щебеневого ядра конструкція працювала в режимі сформованого потоку з середньою інтенсивністю 0,6 л/хв, а траншея з крупнозернистим піском фр. 2 – 3 мм та трубою ПВХ поділяється на короткочасний та тривалий режими інтенсивності водовідведення при відповідних середніх показниках 0,4 л/хв та 0,0148 л/хв. За результатами досліджень отримано рівняння кореляційно-регресійних моделей в комплексі з поліноміальними залежностями для двох типів дренажних конструкцій. Середня похибка апроксимації для цих моделей складає 2,72 % – 12,35 %, що дозволяє зробити висновок про високу їх точність.

На другому етапі проводились дослідження з визначення режимів роботи дренувальних шарів з матеріалів двох типів (щебінь фр. 20 – 40 мм та середньозернистий пісок). Дренувальний шар з щебеню працював за принципом осушення з середньою інтенсивністю водовідведення 0,0645 л/хв. Піщаний дренувальний шар працював за принципом поглинання (розглядався як конструкція, що працює за принципом осушення) з середньою інтенсивністю водовідведення 0,0029 л/хв.

Встановлені режими формування фільтраційного потоку в дренажній траншеї та принципи роботи дренувальних шарів дозволяють зробити висновок щодо використання дренажних конструкцій мілкого закладання в залежності від

величини надходження питомого надлишку води в дренувальний шар та глибини промерзання, які обумовлюють прийняття проектних рішень з регулювання водно-теплового режиму дорожньої конструкції.

7. Моделювання впливу вібрації від дії транспортних засобів на дорожню конструкцію було здійснено в натурних умовах на основі вібропереміщення, оскільки розглядається лінійно-протяжна система, для якої величини прискорення та швидкості визначити неможливо. Відповідно до проведених вимірювань вібрації було створено установку імітації вібрації від дії транспортних засобів. Вплив вібрації дозволяє розглядати роботу дорожньої конструкції в реальних умовах. Для траншеї з наповнювачем труба ПВХ, обгорнута геосинтетичним матеріалом, з крупнозернистим піском, вібрація не впливає на інтенсивність водовідведення, а з наповнювачем щебеневе ядро з геосинтетичним матеріалом – інтенсивність водовідведення підвищується на 14 %. Такий процес суттєво впливає на замулювання шару геосинтетичного матеріалу в конструкції траншеї і, відповідно, на довговічність її роботи, що обумовлює дотримання нормативних вимог щодо використання матеріалів-наповнювачів з мінімальною кількістю пилуватих частинок.

8. Обґрунтовано вибір найбільш оптимальних дорожніх конструкцій з поперечним дренажем мілкого закладання за двома групами критеріїв: кошторисною вартістю та сукупністю техніко-технологічних показників. За експертним методом встановлено сукупність техніко-технологічних параметрів, що визначають роботу дорожньої конструкції з поперечним дренажем мілкого закладання. Розглянуто вісім дорожніх конструкцій з поперечним дренажем мілкого закладання і визначено найбільш оптимальну, згідно обраних критеріїв: кошторисна вартість, грн; середньозважений коефіцієнт фільтрації, м/добу; середня інтенсивність водовідведення, л/хв; модуль пружності, МПа.

9. Результати дисертаційних досліджень впроваджені на галузевому рівні в організаціях, які входять у сферу управління Державного агентства автомобільних доріг України (Укравтодор) у вигляді: МР Д 1.2-37641918-884:2017 «Методичні рекомендації з проведення вартісної оцінки автомобільних доріг і споруд на них»,

та пропозицій щодо удосконалення методу визначення загального максимального питомого надлишку води, що надходить в дренажну конструкцію, АД А.2.4-37641918-006:2018 «Альбом типових проектних рішень конструкцій земляного полотна на автомобільних дорогах загального користування», МР В.2.3-37641918-913:2020 «Методичні рекомендації з вибору оптимальних конструкцій дренажів мілкого закладання з урахуванням дорожньо-кліматичних зон України», А В.2.4-37641918-011:2020 «Альбом типових проєктних рішень споруд поверхневого водовідведення на автомобільних дорогах загального користування», ДСТУ 9057:2020 «Настанова з проектування та влаштування споруд поверхневого водовідведення на автомобільних дорогах загального користування», Посібник до ДСТУ 9057:2020 «Настанова з проектування та влаштування споруд поверхневого водовідведення на автомобільних дорогах загального користування» та пропозицій щодо удосконалення методу розрахунку параметрів поперечних дренажів мілкого закладання, встановлення технологічних режимів влаштування дренажних конструкцій, методів з регулювання заходів з регулювання водно-теплового режиму дорожньої конструкції.

Матеріали роботи впроваджено в навчальний процес Національного транспортного університету при підготовці фахівців зі спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» за освітньо-професійною програмою «Автомобільні дороги, вулиці та дороги населених пунктів». В лекційних курсах з дисциплін «Будівництво та експлуатація інженерних мереж» та «Механіка земляного полотна», запропоновано методи та методики з визначення основних характеристик дорожньої конструкції для проведення лабораторних занять, курсового і дипломного проектування, виконання магістерських науково-дослідних робіт.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Сиденко В.М., Рокас С.Ю. Управление качеством в дорожном строительстве. М.:Транспорт, 1981. 252 с.

2. Смірнова Н.В., Арінушкіна Н.С., Грищенко Т.М. Нові вимоги до визначення рівності та зчіпних якостей покриттів в сцчасних умовах руху автомобілів *Науковий вісник будівництва*. 2019. Т.2, № 2(96). С. 369– 373. URL: https://vestnik-construction.com.ua/images/pdf/2_96_2019_t1/34.pdf

3. Смірнова Н.В. Обгрунтування мінімально безпечної дистанції від швидкості руху та дорожніх умов для вирішення завдань пропускної спроможності. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2017. Вип. 102. С. 232-239.

URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/102/232-239.pdf

4. Erna Ismiyani, Dewi Handayani, RR. Rintis Hadiani. The impact of drainage towards roads in maintenance cost. *The 4th International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering.* 2018. Volume 195. URL: https://doi.org/10.1051/matecconf/201819505012.

5. Tiza Michael Toryila, Iorver Vitalis Terpase, Iortyom Enoch Terlumun. The effects of poor drainage system on road pavement: a review.*International journal for innovative research in multidisciplinary field*. 2016. Volume 2, Issue 8. P. 216–223. URL: https://www.researchgate.net/publication/307167618_THE_EFFECTS_OF_POOR_DRAINAGE_SYSTEM_ON_ROAD_PAVEMENT_A_REVIEW

6. Dipanjan Mukherjee. Highway Surface Drainage System & Problems of Water Logging In Road Section. *The International Journal Of Engineering And Science*. 2014. Volume 3, Issue 11. P. 44–51. URL: http://www.theijes.com/papers/v3-i11/Version-1/G031101044051.pdf

7. Aydin M. M., Topal A. Effect of road surface deformations on lateral lane utilization and longitudinal driving behaviours. *Transport.* 2016. Volume 31(2). P. 192–201. URL: https://doi.org/10.3846/16484142.2016.1193049

8. Khalymendyk I., Baryshnikov A. The mechanism of roadway deformation in conditions of laminated rocks. *Journal of Sustainable Mining*. 2018. Volume 17, Issue 2. P. 41–47. URL: https://doi.org/10.1016/j.jsm.2018.03.004

9. Grygierek M., Kalisz P. Influence of mining operations on road pavement and sewer system – selected case studies. *Journal of Sustainable Mining*. 2018. Volume 17, Issue 2. P. 56–67. URL: https://doi.org/10.1016/j.jsm.2018.04.001

10. Савенко В.Я., Губа В.В. Транспортно-експлуатаційні властивості автомобільних доріг : навчальний посібник. Донецьк : ДВНЗ «ДонНТУ». 2011. 229 с.

11. Бубела А.В. Вплив дорожніх умов на транспортно-експлуатаційний стан автомобільної дороги. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2018. Вип. 103. С. 61-65.

URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/103/61.pdf

12. Славінська О.С., Бубела А.В. Проектування оптимальних конструкцій поперечних дренажів мілкого закладання та оцінка їх впливу на транспортно-експлуатаційний стан автомобільної дороги : монографія. К. : НТУ, 2020. 268 с.

13. Смірнова Н.В., Павленко Н.В. Визначення перспективної інтенсивності руху та розрахункового навантаження в задачах обгрунтування капітального ремонту. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2017. Вип. 100. С. 21-27.

URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/100/021-027.pdf

14. Сильянова В.В., Домке Э.Р. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц : учебник для студ. высш. учеб. заведений 3-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2009. 352 с.

15. Солодкий С.Й., Сідун Ю.В., Волліс О.Є. Вплив температурного режиму на процес твердіння литої емульсійно-мінеральної суміші. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2017. Вип. 100. С. 85-90. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/100/085-090.pdf

16. Dawson Andrew. Water in Road Structures. Transportation Engineering Centre University of Nottingham. UK. 2009. P.438.

17. Солодкий С.Й., Смолянець В.В. Повышение долговечности асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2017. Вип. 101. С. 22-32. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/101/022-032.pdf

18. Кузло М.Т., Бондар В.М. Підвищення стійкості щебенево-мастикового асфальтобетонного покриття до дії транспортних засобів на ухилах доріг і вулиць. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2018. Вип. 103. С. 22-31.

URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/103/22.pdf

19. Onyshchenko A.M., Usychenko O.Y., Bubela A.V. Research of transport and operation condition taken into account of different types and types of asphalt concrete with bonding polygum. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 107. С. 71-77.

URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/107/71.pdf

20. Slavinska O.S., Onyshchenko A.M., Bubela A.V. Increasing the operational reliability of asphalt concrete coating for the use of modification addition butonal ns 198. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 108. С. 74-83.

URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/108/74.pdf

21. Кияшко И.В., Белик В.В.Причины образования и негативного влияния трещин в асфальтобетонных покрытиях. Харьков : ХНАДУ. 2001.

22. Леонович И.И., Мельникова И.С. Трещины в дорожных покрытиях: способы повышения трещиностойкости. Вестник БНТУ, Транспорт № 6. 2011. с. 49–53. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/treschiny-v-dorozhnyh-pokrytiyah-sposoby-povysheniya-treschinostoykosti

23. Бубела А.В. Дослідження зміни транспортно-експлуатаційного стану покриттів в умовах перезволоження. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2019. Вип. 106. С. 6-12.

24. 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. 7 (92). URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126512 (SCOPUS)

25. Крицкий М.Я., Шестаков В.Н. Земляное полотно автомобильных дорог: дефекты, повреждения и разрушения, их причины, методы профилактики и восстановления: Учебное пособие. 2008. Изд-во СибАДИ. 56 с. URL: http://bek.sibadi.org/fulltext/ED1621.pdf

26. Пивовар Н.Г., Бугай Н.Г., Рычко В.А. Дренаж с волокнистыми фильтрами. К.: Наук. Думка. 1980.214 с.

27. Пивовар Н.Г., Бугай Н.Г., Фридрихсон В.Л., Кривоног А.И., Кривоног В.В. Дренаж с волокнистыми фильтрами для защиты территорий от подтопления. К.: Ин-т гидромеханики НАН Украины. 2000. 332 с.

28. Бугай Н.Г., Кривоног А.И., Кривоног В.В. Безреагентная очистка воды фильтрами из волокнисто-пористого полиэтилена. *Прикладна гідромеханіка*. 2004. 6(78), N 2. С. 27-43.

29. Бугай Н.Г., Кривоног А.И., Кривоног В.В., Пивовар Н.Г., Фридрихсон В.Л. Гидродинамические, физико-механические характеристики и структурные параметры волокнистых дренажных фильтров. *Прикладна гідромеханіка*. 2001. 3(75), N 3. С. 5-19.

30. Бугай Н.Г., Кривоног А.И., Кривоног В.В., Фридрихсон В.Л. Гибкие крепления откосов земляных плотин гидротехнических сооружений с использованием геотекстиля. *Прикладна гідромеханіка*. 2006. 8(80), N 1. С. 3-22.

31. Бугай Н.Г., Канарский В.Ф., Пивовар Н.Г., Осадчук В.А. Устройство обратных фильтров гидротехнических сооружений из минеральных волокнистых материалов. *Гидротехническое строительство*. 1971. N 12. С. 17-20.

32. Ставрова Т.В., Шустов В.П., Шалобалов О.М., Сапожников Е.Г. Получение полимерных защитно-фильтрующих материалов и покрытия. В кн: *Полимерные материалы и научный прогресс в мелиорации*: М. 1980.С. 121-124.

33. Пивовар Н.Г., Шустов В.П., Бугай Н.Г., Ставрова Т.В., Фридрихсон В.Л. и др. Способ изготовления дренажной трубы. Авт. свид. N 1066120 (СССР). 1983. Опубл. 8.09.1983. С. 5.

34. Пивовар Н.Г., Бугай Н.Г., Фридрихсон В.Л. Трубчатый дренаж из полимерных материалов. *Гидротехника и мелиорация*. 1982. N 4. С. 48- 50.

35. Абрамов С.К., Алексеев В.С. Забор воды из подземного источника . М.: Колос. 1980. 239 с.

36. Бугай Н.Г., Кривоног А.И., Пивовар Н.Г., Фридрихсон В.Л. Скважинный фильтр. Авт. свид. N 1530702 (СССР). 1989. Опубл. 22.08.1989. С. 7.

37. Ведерников В.В. Теория фильтрации и ее применение в области ирригации и дренажа. М.-Л.: Госстройиздат. 1939. 248 с.

38. Кривоног А.И. Экспериментальные исследования защитных свойств фильтров из волокнистопористого полиэтилена. *Мелиорация и водное хозяйство*. 1992. Вып. 77. С. 54-57.

39. Кривоног (Ткач) В В. Влияние экранирующего эффекта грунта обратной засыпки дренажных траншей на работу подрусловой дрены. *Гидромеханика*. 1983. Вып. 48. С. 91-94.

40. Бугай Н.Г., Кривоног (Ткач) В.В. Распределение пор в фильтре, образованном произвольным наложением сеток в два и три слоя. *Гидравлика и гидротехника*. 1984. Вып. 38. С. 55-59.

41. Мацелюх П.М., Фридрихсон В.Л., Череповский Ю.Т. Осушение земель в условиях западинного рельефа. *Мелиорация и водное хозяйство*. 1990. Вып. 73. С. 22-24.

42. Бугай Н.Г., Пивовар Н.Г., Дадиани М.К. и др. Опыт строительства бестраншейного дренажа в Киевской области. *Мелиорация и водное хозяйство*. 1990. Вып. 73. С. 66-70.

43. Кубишкін В.П., Мацелюх П М., Фрідріхсон В.Л. Застосування безтраншейного способу будівництва дренажу в гумідній зоні України. *Меліорація і водне господарство*. 1997. Вип. 84. С. 60-67.

44. Мельцер В.З. Изменение геометрических и гидравлических характеристик зернистой пористой среды при ее заилении. *Научн. труды АКХ*. М.: ОНТИ АКХ. 1970. Вып. 76, N 7. С. 23-25.

45. Мельцер В.З. Исследование пористости зернистых фильтрующих материалов. *Научн. труды АКХ*. М.: Водоснабжение. 1973. Вып. 98. С. 97-99.

46. Бугай Н.Г., Кривоног А.И., Кривоног В.В. Контактная реагентная очистка воды фильтрами из волокнисто-пористого полиэтилена. *Прикладна гідромеханіка*. 2007. 9(81), N 1. С. 3-17.

47. Кузло М.Т. Про деякі аналітичні рішення диференціальних рівнянь нестаціонарної фільтрації при осушенні грунтового масиву. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2015. Вип. 94. С. 159-167. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/94/159-167.pdf

48. Binh Vuong. Measuring, Predicting and Specifying Moisture in Granular Pavements with Thin Bituminous Surfacings. *Road Materials and Pavement Design*. 2007. P. 695-718, DOI: 10.1080/14680629.2007.9690095

49. Han-Cheng Dan, Jia-Wei Tan, Zhi Zhang & Lin-Hua He.Modelling and estimation of water infiltration into cracked asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*. 2017. P.590-611, DOI: 10.1080/14680629.2016.1182057

50. Tejas D. Khediya. Study of Surface and Sub Surface Highway Drainage System. *International Journal of Engineering Development and Research*. 2016. Volume 4, Issue 3. P. 945–949.

51. Zhijun Liu . Influence of rainfall characteristics on the infiltration moisture field of highway subgrades. *Road Materials and Pavement Design*. 2015. P.635-652, DOI: 10.1080/14680629.2015.1021370

52. Тулаев А.Я. Конструкция и расчет дренажных устройств. М. Транспорт. 1980. 191 с.

53. Сиденко В.М., Расчет и регулирование водно-теплового режима дорожных одежд и земляного полотна, М: Н-Т изд. Минавтотранса и шос. дорог РСФСР, 1962, 116 с.

54. Сіденко В.М., Фомін В.О. Водно-тепловий режим міських доріг. Харків: Видавництво Харківського університету, 1971. 180 с.

55. Рувинский В.И. Оптимальные конструкции земляного полотна на основе регулирования водно-теплового режима. 1982. Транспорт. Москва. 166 с.

56. Пузаков Н.А., Золотарь И.А., Сиденко В.М., Тулаев А.Я. и др. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд. М., Транспорт, 1971. 413 с.

57. Рувинский В.И. Учет впитывания жидких атмосферных осадков в грунты земляного полотна при проектировании автомобильных дорог. Труды СоюзДорНИИ. Вып. 1. М. 1964.

58. Сиденко В. М. Сезонное изменение прочности грунтов земляного полотна в степных районах УССР. Автореферат канд. дисс. М., 1956.

59. Сиденко В.М. Теоретические основы водно-теплового режима дорожных одежд и грунтовых оснований в условиях недостаточного увлажнения. «Труды ХАДИ», вып. 28., изд ХГУ, 1962.

60. Корсунский М.Б., Гайваронский В.Н., Россовский П.Д. Прогнозирование расчётной влажности грунтов земляного полотна. М.:, "Труды Союздорнии". 1975. Вып. 76. С. 5-29.

61. Преферансова Л.А. Водный режим дорожного полотна. *Регулирование водного режима дорожных оснований*. М. 1946. С. 6-36.

62. Преферансова Л.А. Расчётная влажность грунтов земляного полотна и методы её определения. *Автомобильные дороги*. 1966. № 1. С. 17-18.

63. Рувинский В.И. Определение количества воды, поступающей в основание проезжей части через покрытия капитальных типов. *Труды Союздорнии*. 1970. Вып. 37. С. 121-146.

64. Рувинский В.И. Как оценить морозоустойчивость дорожной одежды. М.: Наука и техника. 2002 г.. №2.

65. Рувинский В.И., Чуев В.И. Технико-экономическая эффективность применения тепло- и водоизолирующих слоёв для обеспечения прочности и устойчивости земляного полотна и дорожных одежд. М.: Труды СоюздорНИИ. 1975. Вып. 76. С. 59-81.

66. Рувинский В.И. и др. Гидроизолирующие прослойки для улучшения водно-теплового режима земляного полотна. *Автомобильные дороги*. 1985 г. №12. С. 23-24.

67. Сиденко В.М. Основные проблемы исследований теплообмена в дорожном строительстве. М.: Труды Союздорнии. 1975. Вып. 76. С. 83-93.

68. Сиденко В.М., Батраков О.Т. и др. Автомобильные дороги (совершенствование методов проектирования и строительства). Киев: Будивельник. 1973. 278 с.

69. Сиденко В.М., Батраков В.Т., Леушин А.И. Технология строительства автомобильных дорог. Часть 1. Киев: Вища школа. 1970. 235 с.

70. Тулаев А.Я. Круглогодичный цикл пучинообразования. М.: Труды Дорнии. 1941. Вып. 2. С. 172-245.

71. Тулаев А.Я. Регулирование водного режима земляного полотна на автомобильных дорогах. В кн.: "Проектирование и возведение земляного полотна железных и автомобильных дорог. М.: Изд-во АН СССР. 1950. С. 89-163.

72. Тулаев А.Я., Мотылев Ю.Л., Казарновский В.Д. Отечественная наука о земляном полотне. М.: Автомобильные дороги. 1977. №7. С. 21-23.

73. Тулаев А.Я., Пузаков Н.А., Богатырёва Е.И. Регулирование водно-теплового режима земляного полотна в городских условиях. М.: Высшая школа. 1972. 121 с.

74. ДБН В.2.3-4:2015. "Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво". Введ. 2016-04-01. К. : ДП «Укрархбудінформ», 2015. 104 с. Зміна №1 до ДБН В.2.3-4:2015. "Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво". Введ. 2019-09-01. –К. : ДП «ДержДорНДІ», 2019. 30 с.

75. Бубела А.В. Дослідження закономірностей зволоження дорожньої конструкції та методи його регулювання. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2019. Вип. 105. С. 44-48. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/105/44.pdf

76. Ведерников В.В. Влияние капиллярного поднятия на фильрацию из каналов. Гидротехническое строительство. 1935. №5.

77. Будаговский А.И. Впитывание воды в почву. М., 1955

78. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М.: Гостехиздат. 1947.

79. МР В 2.3-02070915-849:2014 Методичні рекомендації щодо регулювання водно-теплового режиму у межах робочого шару земляного полотна автомобільних доріг. УКРАВТОДОР : НТУ. 2014. 61 с.

80. Довідник № 4. Кліматичні характеристики та кліматичне районування території України для регулювання водно-теплового режиму в дорожньому будівництві. УКРАВТОДОР : НТУ, 2018. 98 с.

81. Cedergren Harry R., O'Brien Kenneth H. Development of guidelines for the design of subsurface drainage systems for highway pavement structural sections. 1972. 193p.

82. Седергрен Г.Р. Дренаж дорожных одежд и аэродромных покрытий: Пер. с англ. М.: Транспорт. 1981. 280 с.

83. ДСТУ-Н Б В.2.3-41:2016. Настанова з проектування дренувальних конструкцій мілкого закладання на автомобільних дорогах. Національний стандарт України. Київ. ДП "УкрНДНЦ". URL: http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page.html?id_doc=65399

84. Ципріанович І.В. Водовідвідні і дренажні системи аеродромів: Підручник. К.: НАУ. 2002. 142с.

85. Бируля А.К., Бируля В.И., Носич И.А. Устойчивость грунтов дорожного полотна в степных районах. М., Дориздат, 1951.

86. Бируля А.К., Сиденко В.М. Определение расчетных влажностей автомобильных дорог на основе теории вероятности. Научное сообщение №6. Изд. ГХУ, 1958.

87. Бируля А.К., Сиденко В.М. Расчет и конструирование нежестких многослойных дорожных одежд. Научное сообщение №14. Изд. ХАДИ, 1961.

88. Баришпол А.І. Методи проектування водовідводу і дренажу аеродромних покриттів з підвищеною ефективністю дренування: дис... канд. техн. наук: 05.22.11. Національний авіаційний ун-т. К. 2001. 185 арк.

89. Литвиненко А.С. Про вплив стану ґрунтових основ на стан дорожніх одягів на ділянках автомобільних доріг у нульових відмітках і невисоких насипах. *Автомобільні дороги* : науково-виробничий журнал. 2014. Вип. 6 (242). С. 35-39.

90. Литвиненко А.С. Щодо питання відмови від влаштування “дренуючих” піщаних шарів в основі дорожніх одягів автомобільних доріг. *Автомобільні дороги* : науково-виробничий журнал. 2012. Вип. 6 (230). С. 43-46.

91. Slavinska, O., Stozhka, V., Kharchenko, A., Bubela, A., Kvatadze, A. (2019). 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. Volume 1, Issue 3-97. 46–59. URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156519.

92. 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.

93. Mozamil Ali Mohammed Osman. Impact of the Dimensions of Strategic Information Quality as Mediator Variable in the Relationship between Effectiveness of Strategic Decisions and Achieving Strategic Objectives : Case Study Cement Factory, Bisha, Saudi Arabia Singaporean Journal of Business, Economics and Management Studies 2017. Vol.5 Issue 10. pp.16-27. URL: https://doi.org/10.12816/0037570

94. Макаров В.М., Семейкина Н.М., Филимоненко А.А. Квалиметрическое моделирование в оценке земельных участков. *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. Том 7, № 4. 2017 URL: http://dx.doi.org/10.21285/2227-2917-2017-4-108-125

95. Azgaldov G.G., Kostin A.V. The ABC of Qualimetry: The Toolkit for measuring immeasurable. *Ridero*. 2015. 167 p. ISBN 978-5-4474-2248-6.

96. Леонова Т.И., Калажокова Ю.А. Квалиметрическая модель оценки качества научно-технических работ. *Фундаментальные исследования*. 2015. № 6-1. С. 143-147. URL: http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=38410

97. Баринов Н.П., Аббасов М.Э. О корректном использовании квалиметрических процедур при оценке недвижимости. URL: http://www.labrate.ru/articles/2016-barinov-abbasov.pdf

98. Олейников Б.В., Бескорсый Н.С. О влиянии шкалы на результаты многокритериального выбора в методологии AHP Т. Саати. *Образовательные ресурсы и технологии*. 2014. № 1 (4). С. 331-337. URL: https://www.muiv.ru/vestnik/pdf/pp/ot_2014_1_331-337.pdf

99. Тихомирова А.Н., Сидоренко Е.В. Модификация метода анализа иерархий Т. Саати для расчета весов критериев при оценке инновационных проектов. *Современные проблемы науки и образования*. 2012. № 2. URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=6009

100. Кавешников Н.Т. Управление качеством продукции (на примере выполнения дорожно-строительных работ): Учебное пособие М.: Московский государственный университет природообустройства. 2000.

101. Slavinska O., Savenko V., Kharchenko A., Bubela A. Development of a mathematical model of evaluation of road-and transport assets as a component of information-and-management system. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol 6. 4 (90). URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118798 (SCOPUS).

102. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 76682 Україна. Літературний письмовий твір наукового характеру «Розробка математичної моделі вартісної оцінки дорожньо-транспортних активів як складової інформаційно-управлінської системи» Славінська О.С., Савенко В.Я., Харченко А.М., Бубела А.В. Дата реєстрації 06.02.2018 р.

103. Методичні рекомендації з проведення вартісної оцінки автомобільних доріг і споруд на них (МР Д 1.2-37641918-884:2017).

104. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 76497 Україна. Літературний письмовий твір науково-практичного характеру «Методичні рекомендації з проведення вартісної оцінки автомобільних доріг і споруд на них» Славінська О.С., Харченко А.М., Бубела А.В., Чесноков С.В. Дата реєстрації 01.02.2018 р.

105. Lapidus A., Makarov A. Fuzzy sets on step of planning of experiment for organization and management of construction processes. *MATEC Web of Conferences*. 2016. Volume 86. URL: https://doi.org/10.1051/matecconf/20168605003.

106. Должанский А.М., Бондаренко О.А., Петлёваный Е.А. Влияние вида средней взвешенной оценки на зависимость комплексного показателя качества от параметров объекта. *Приборы и методы измерений*. 2017. 8(4). 398-407. URL: https://doi.org/10.21122/2220-9506-2017-8-4-63-67

107. Bubela A. Comprehensive assessment of the quality condition of the road with drainage system. *Technology audit and production reserves*, 2020, 4/2(54), P. 20-26. URL: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.210556

108. Славінська О.С. Методологія майнової оцінки автомобільної дороги, як об'єкта державної власності. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*: науково-технічний збірник. К.: НТУ. 2016. Вип. 97. С. 70 – 77.

109. Бубела А.В. Використання диференційного методу в проектах будівництва автомобільної дороги для обліку та оцінки активів дорожнього господарства. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*: науково-технічний збірник. К.: НТУ. 2016. Вип. 98. С. 22-29.

110. Славінська О.С., Харченко А.М. Застосування кваліметричної моделі до оцінки транспортно-експлуатаційного стану автомобільної дороги. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*: науково-технічний збірник. К.: НТУ, 2016. Вип. 95. С. 111 – 120.

111. Безуглий А., Бібік Ю., Бубела А., Гресько І., Славінська О., Харченко А. Особливості проведення вартісної оцінки автомобільних доріг загального користування. *Дороги і мости* : збірник наукових праць. 2019. Вип. 19-20. С. 5-15. URL: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2019.19.005

112. Slavinska O., Savenko V., Bondarenko L., Bubela A. Improvement of methods of the property valuation based on mathematical and numerical modeling. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2017. 6. С. 3-14. URL: http://eu-jr.eu/engineering/article/view/496/476.

113. Slavinska O., Kharchenko A., Bubela A., Chechuha O. Development of road sector's lend valuation method for aims of asset management. *Technology audit and production reserves*. 2020. 2/2(52). P. 43-46. URL: https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.200743

114. Бубела А.В. Особливості здійснення грошової оцінки ділянки автомобільної дороги з урахуванням техніко-функціональних характеристик. *Європейські стандарти оцінки, землеустрою і кадастру : Проблеми впровадження та шляхи їх реалізації в Україні.* Міжнародна науково-практична конференція. 28 квітня 2016 р. Харків. ХНУМГ ім.О.М.Бекетова. С. 78-83.

115. Бубела А.В. Принципи побудови моделі вартісної оцінки майна дорожньої галузі. *Современные геоинформационные и компьютерно-инновационные технологии дорожной отрасли, аэродромного строительства и землеустройства.* Международная научно-практическая конференция. 26-27 мая 2016. Харьков. С. 58-59.

116. Бубела А.В. Побудова моделі якісного стану автомобільної дороги для проведення майнової оцінки. *Міжнародна науково-практична конференція присвячена п'ятидесятиріччю кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем*. 03 листопада 2016 р. Харків. ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. С. 86.

117. ДСТУ 3587-97. Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги, вулиці та залізничні переїзди. Вимоги до експлуатаційного стану. Введ. 1997-01-01. К. : ДЕРЖСТАНДАРТ України. 1997. 24 с.

118. Bubela A. The methodological basis of determining the operation condition of a road for its technical expertise. *World Science.* 2020. Vol 3 (55). C.4-7. URL: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/31032020/6965

119. СОУ 45.2-00018112-042. Автомобільні дороги. Визначення транспортно-експлуатаційних показників дорожніх одягів. К.: Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), 2009. 45 с.

120. Bubela A.V. Project management of estimates of the roads based on considerstion of the technical state. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* :

науково-технічний збірник. 2016. Вип. 97. С. 50-54. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/97/050-054.pdf

121. Бубела А.В. Багаторівнева модель технічного стану об'єктів транспортного будівництва. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2018. Вип. 104. С. 44-48. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/104/44.pdf

122. Грабовецький, Б.Є. Методи експертних оцінок: теорія, методологія, напрямки використання : монографія. Вінниця: ВНТУ, 2010. 171 с. URL: http://hrabovecky.vk.vntu.edu.ua/file/a0a40b7bd74c5d39fe693b7b2c99f38f.pdf

123. Большаков В.А. Справочник по гидравлике. К.: Вища школа. 1977. 278 с.

124. Большаков В.А., Курганович А.А. Гидрологические и гидравлические расчеты малых дорожных сооружени. К.: Вища школа, Головное изд-во. 1983. 280 с.

125. Калёнова Е.В. Совершенствование методики расчёта при проектировании нежёстких дорожных одежд с асфальтобетонными покрытиями: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.23.11. Москва. 2009. 276 с.

126. Иванов Н.Н. Конструирование и расчёт нежёстких дорожных одежд. Москва: Транспорт. 1973. 328 с.

127. Волокитин В.П. Определение деформационно-прочностных характеристик асфальтобетонных слоев нежёстких дорожных одежд: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.23.11. Воронеж. 2004. 95 с.

128. Матуа В.П. Исследование напряженно-деформированного состояния дорожных конструкций с учетом их неупругих свойств и пространственного нагружения: диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук: 05.23.11. Ростов-на-Дону. 2002. 484 с.

129. Васильев А.П. Причины образования колей и пути их устранения. *Наука и техника в дорожной отрасли*. Москва: Изд-во «Дороги», 1999. №2. С. 6 – 9.

130. Супрун А.С. Расчёт напряжений, перемещений и деформаций нежёстких дорожных одежд при движении многоосных многоколёсных транспортных средств: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.22.03. Киев. 1983. 314 с.

131. Конорев А.С. Учет динамического воздействия многоосных транспортных средств при расчете дорожных конструкций: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей». Волгоград. 2012. 23 с.

132. Смирнов А.В. Теоретические и экспериментальные работоспособности нежёстких дорожных одежд: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 05.23.11. Омск. 1989. 376 с.

133. Steit D.A, Kulakowski A., Wollyung R.J. Dynamic Vehicle Forces on Pavements: Draft Report. The Pensilvania Transportation Institute, Federal Highway Administration, 1995. DTFH 61.

134. Heath A., Good M. Heavy Vehicle Design Parameters and Dynamic Pavement Loading. *Australian Road Research*. 1985. Vol.15, No. 4. P. 249 – 263.

135. Амиров А.Т. Совершенствование метода проектирования усиления нежестких дорожных одежд капитального типа с учетом перспективних нагрузок (на примере автомобильной дороги «Астрахань-Махачкала»): автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей». Москва. 2012. 19 с.

136. Цыхановский В.К., Козловец С.М., Коряк А.С. Расчет тонких плит на упругом основании методом конечных элементов. Київ: Сталь. 2008. 234 с.

137. Кузло М.Т. Моделювання деформацій ґрунтових масивів при зміні гідрогеологічних умов та дії техногенних факторів: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.02 «Основи і фундаменти». Київ. 2014. 34 с.

138. Кузло М.Т. Напружено-деформований стан ґрунтових масивів в умовах фільтраційної консолідації сольових розчинів. *Вісник ОДАБА*. Вип. 48, Ч.1. Одеса. 2012. С. 270 – 279.

139. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. К.: Факт. 2007. 384 с.

140. Хвоинский Л.А. Исследование и разработка обеспечения устойчивости дорожных конструкций автомобильных дорог: автореферат диссертации кандидата технических наук: спец. 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей». СибАДИ. 2001. 17 с.

141. Каныгина С.Ю. Прогнозирование остаточных деформаций дорожных одежд нежесткого типа на земляном полотне из глинистых грунтов: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей». Москва. 1999. 20 с.

142. Арсеньєва Н.О. Удосконалення методу розрахунку нежорстких дорожніх одягів з урахуванням критерію міцності асфальтобетонних шарів на зсув: дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.22.11. Харків. 2014. 212 с.

143. Угрімов С.В. Однобічний контакт багатошарових конструкцій з пружною основою. *Комунальне господарство міст*. Київ: Техніка, 2007. С. 173 – 177.

144. Шупиков А.Н., Бузько Я.П., Сметанкина Н.В., Угримов С.В. Нестационарные колебания многослойных пластин и оболочек и их оптимизация. Харьков: Изд-во «ИНЖЭК». 2004. 252 с.

145. Иллиополов С.К., Селезнев М.Г. Уточненный метод расчета напряженно-деформированного состояния системы «дорожная одежда-грунт». Ростов-на-Дону: МП «Новая книга». 1997. 142 с.

146. Павленко Н.В. Удосконалення методу розрахунку дорожніх одягів перехідного типу із дискретних та малозв'язних матеріалів: авторефер. дис. на здобуття наук. ступеня канд.. техн.. наук: спец. 05.22.11 «Автомобільні шляхи та аеродроми». Київ. 2013. 21 с.

147. Ряпухін В.М., Нечитайло Н.О. Вибір оптимальної теорії міцності асфальтобетону як термопластичного матеріалу. *Сборник научных трудов Донбасского гос. Университета*. Алчевск: ДонГТУ. 2010. Вып. 33. С. 284 – 290.

148. Гамеляк І.П. Основи забезпечення надійності конструкцій дорожнього одягу: дис. доктора техн. наук. К: Національний транспортний університет. 2005. 525 с.

149. Гамеляк І.П. Основи забезпечення надійності конструкцій дорожнього одягу: автореф. дис.. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук: спец. 05.22.11 «Автомобільні шляхи та аеродроми». К.: Національний транспортний університет. 2005. 34 с.

150. Ряпухін В.М., Нечитайло Н.О. Використання критерію міцності Писаренко-Лебедєва для оцінки міцності асфальтобетонних шарів нежорстких дорожніх одягів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*: наук.-техн. збірник. Київ: НТУ. 2012. Вип. 85. С. 9-19.

151. Угримов С.В., Шупиков А.Н., Бузько Я.П. Односторонний контакт многослойной полосы и упругого основания при импульсном нагружении. *Науковий вісник будівництва*. Харків: ХТУБА. 2005. Вип. 34. С. 285 – 291.

152. Угрімов С.В., Шупіков О.М. Динамічна контактна задача для двох смуг. *Машинознавство*. Харків. 2003. №4 (70). С. 13 – 17.

153. Довгополова Н.В., Сметанкіна Н.В., Угрімов С.В., Шупіков О.М., Долгополов С.В., Голендер В.А. Розрахунок на міцність багатошарового дорожнього покриття нежорсткого типу на основі уточненої теорії. Харків: ХДТУБА. 2006. Вип. 39. С. 177 – 183.

154. Дорожко Є.В. Удосконалення методу розрахунку тонких асфальтобетонних шарів на жорсткій основі: автореф. дис.. на здобуття наук. ступеня канд.. техн.. наук: спец. 05.22.11 «Автомобільні шляхи та аеродроми». Харків: ХНАДУ. 2016. 20 с.

155. Матуа В.П. Проектирование дорожных конструкций с учетом накопления их элементов остаточных деформаций: материалы Международной научно-практической конференции. Москва. МАДИ (ТУ). 2000. С. 166– 169.

156. Матуа В.П. Прогнозирование и учет накопления остаточных деформаций в элементах дорожных конструкций: материалы Международной научно-технической конференции. Омск. СибАДИ. 2000. С. 107 – 108.

157. Плевако В.П. Совершенствование метода расчета нежёстких дорожных одежд. *Вестник Харьковского государственного автомобильно-дорожного университета*. Харьковский государственный автомобильно-дорожный університет. Харьков 1999. Вып. 9. С. 51 – 56.

158. Гладкий А.В. Особенности расчётов на прочность многослойных покритий и усиления нежёстких дорожных одежд. Сборник научных ст. ДерждорНДІ. Киев. 2006. Вып. 4. С. 232 – 247.

159. Онищенко А.М. Заходи з підвищення коліє стійкості асфальтобетонного покриття автомобільних доріг з інтенсивним рухом великовантажних транспортних засобів. *Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури*. Донецьк. 2013. Вип. 1 (99). С. 58 – 63.

160. Лугов С.В. Основные положення методики расчёта глубины колеи на дорожных одеждах с асфальтобетонным покрытием: автореф. дисс. на соискание уч. степени кандидата техн. наук : спец. 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей». Москва. 2004. 25 с.

161. Чирва Д.В. Влияние упруго-вязко-пластических свойств асфальтобетона на накопление остаточных деформаций при пространственном динамическом нагружении дорожных конструкций: автореф. дисс. на соискание уч. степени кандидата техн. наук : спец. 05.23.11 «Проектирование и строительство

дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей». Волгоград. 2010. 22 с.

162. Finn F. The Use of Distress of Pavement Structures: Proceedings Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements University of Michigan. 1977. Vol. 1. P. 3 – 38.

163. Дубик О.М. Аналіз методів розрахунку на міцність дорожніх одягів нежорсткого типу при застосуванні технології холодного ресайклінгу. *Проблеми розвитку міського середовища*. Київ: Національний авіаційний університет. 2014. Вип. 1 (11). С. 465 – 474.

164. Дубик О.М. Аналіз методів розрахунку на міцність дорожніх одягів нежорсткого типу при застосуванні технології холодного ресайклінгу. *Міське середовище XXI ст. Архітектура. Будівництво. Дизайн*: Міжнародний науково-практичний конгрес. 10 – 14 лютого 2014 р.: тези доповіді. Київ. 2014. С. 319 – 320.

165. 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.

166. Евзеров И.Д. Оценки погрешности несовместных конечных элементов плиты. Деп. в УкрНИИНТИ, №1467. Киев. 1979. 9 с.

167. Карпиловский В.С. Методы конструирования конечных элементов. Деп. в УкрНИИНТИ, №3153. Киев. 1980. 20 с.

168. Розин Л.А. Стержневые системы как системы конечных элементов — Л.: Изд-во Ленинградского ун-та. 1975. 237 с.

169. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. М.: Мир. 1977. 349 с.

170. Феодосьев В.И. Десять лекций-бесед по сопротивлению материалов. М.: Наука. 1975. 174 с.

171. 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.

172. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности: Учеб. для строит. спец. вузов. М.: Высш. шк. 1990. 400 с.

173. ГБН В.2.3-37641918-559:2019 Автомобільні дороги. Дорожній одяг нежорсткий. Проектування. – Введ. 2019-06-01. К.: ДП «ДержДор НДІ». 2019. 63 с.

174. АД А.2.4-37641918-002:2015 Дренажні конструкції земляного полотна на автомобільних дорогах загального користування. Архітектурно-будівельні креслення. Введ. 2016-01-01. К.: НТУ. 2016.

175. Шмиг Р.А., Добрянський І.М. Розрахунок будівельних конструкцій в обчислювальному комплексі SCAD: навч. посіб. Львів: Ліга Прес. 2015. 79 с. URL:http://shron1.chtyvo.org.ua/Shmyh_Roman/Rozrakhunok_budivelnykh_konstruktsii_v_obchysliuvalnomu_kompleksi_SCAD.pdf

176. 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.

177. 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.

178. Oden J.T. Finite Elements of Nonlinear Continua. New York: McGraw Hill Book Company. 1972.

179. Sabahi D., Rose T. Special Applications of Global-Local Analysis, MSC/NASTRAN. World Users` Conference Proceedings. 1992.

180. 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 World Users` Conference Proceedings 1996.

181. 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

182. Nosov V.P., Dobrov E.M., Chistyakov I.V., Borisiuk N.V. and Fotiadi A.A. *International Journal of Applied Engineering Research*. Volume 12, Number 23. 2017 pp. 13158-13164. URL: http://www.ripublication.com/ijaer17/ijaerv12n23_20.pdf

183. 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. pp. 5-18. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.01.

184. Медведева Н.М., Микитаренко М.А., Перельмутер А.В. Статический и динамический расчет мачт на ЭВМ. *Сопротивление материалов и теория сооружений*. Вып.48. Киев: Будівельник. 1986. С.79–82.

185. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможности их анализа. М. Изд-во ДМК-Пресс. 2007. 600 с.

186. Смирнов А.Ф. Статическая и динамическая устойчивость сооружений. М.: Трансжелдориздат. 1947.

187. Вовкушевский А.В., Шойхет Б.А. Расчет массивных гидротехнических сооружений с учетом раскрытия швов. М.: Энергия. 1981. 136 с.

188. Амбарцумян С.А. Теория анизотропных пластин (прочность, устойчивость и колебания). М.: Наука. 1987. 360 с.

189. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. М.: Мир.т1987. 544 с.

190.

191. Власов В.З., Леонтьев Н.Н. Балки, плиты и оболочки на упругом основании. М.: Гос. изд-во ф.-м литературы. 1960. 492 с.

192. Кватадзе А.І. Метод визначення розрахункових періодів водно-теплового режиму для розрахунку дренажних пристроїв. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Issue 98. 2016. P. 79-84. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/98/079-084.pdf.

193. Заворицкий, В.И. Справочник по проектированию дорожных одежд. Киев: Будівельник. 1983. 104 с.

194. Блехман И.И., Мышкис А.Д., Пановко Я.Г. Механика и прикладная математика: Логика и особенности приложения математики. М.:Наука. 1983. 328 с.

195. 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*. Volume 4, Issue 7 (106). 2020. P. 62-75. URL: doi.org/ 10.15587/1729-4061.2020.209421.

196. Elshaer M., Ghayoomi M., Daniel Jo Sias. Methodology to evaluate performance of pavement structure using soil moisture profile. *Road Materials and Pavement Design*. Volume 19, Issue 4. 2018. Pages 952-971.

URL: doi.org/10.1080/14680629.2017.1283356

197. Das A. Structural Design of Asphalt Pavements: Principles and Practices in Various Design Guidelines. *Transportation in Developing Economies*. 2015. pp. 25-32. DOI: 10.1007/s40890-015-0004-3.

198. Pirmohammad Sadjad, Majd-Shokorlou Yousef. Finite element analysis of road structure containing top-down crack within asphalt concrete layer. *Journal of Central South University*. Volume 27. 2020. pp. 242–255. DOI:doi.org/10.1007/s11771-020-4292-3

199. 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. pp.111-130 URL: https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/article/view/204/119

200. Талах С.М., Дубик О.М., Лисницька К. М. Чисельний розрахунок напружено-деформованого стану нежорстких дорожніх одягів, відновлених за технологією холодного ресайклінгу. *Scientific Journal «ScienceRise».* №1/2(30). 2017. С. 31–38. URL: http://journals.uran.ua/sciencerise/article/view/91111/87379

201. Павленко Н.В. Особливості розрахунку нежорстких дорожніх одягів за критеріями міцності. *Міжвузівський збірник "НАУКОВІ НОТАТКИ"*. Випуск №45. 2014. Луцьк. С. 412–416.

202. Kazantsev A. Search of mechanical properties of the road bed layers with a vibrating response of a road bed pavement. 2018. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27747.60968.

203. Хархута Н.Я., Капустин М.И., Семенов В.П., Эвентов И.М. Учебник для вузов. Изд. 2-е, доп. и переработ. Л.: «Машиностроение» (Ленингр. отд-ние), 1976. 472 с.

204. Бабков В. Ф. Устойчивость земляного полотна автомобильных дорог. М.: Высшая школа. 1966. 108 с.

205. Богомолов, В.А. Расчетное распределение давлений в пятне контакта шины с поверхностью дорожной одежды. *Вестник ХНАДУ*. 2016. Випуск №72. Харків. С. 143–150.

206. Slavinska O., Bubela A., Davydenko O. Prediction of the stress-strain state of a road structure with shallow transverse tubular drainage. *ScienceRise.* 2020. (4). С. 24-32. URL: https://doi.org/10.21303/2313-8416.2020.001396

207. Abbas O., Sadek M., Shahrour I., Hage ChehadeY F. Flood forecasting within urban drainage systems using NARX neural network. *Water science and technology*. 7. 2017.

URL: http://wst.iwaponline.com/content/early/2017/07/10/wst.2017.409

208. Славінська О.С., Бубела А.В., Бондаренко Л.П., Чечуга О.С. Дослідження роботи дренажів мілкого закладання за інтенсивністю водовідведення з урахуванням впливу вібрації. *Дороги і мости* : збірник наукових праць. 2020. Вип. 21. С. 201-216. URL: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.201

209. Гайдайчук В.В., Мозговий В.В., Заєць Ю.О., Шевчук Л.В. Моделювання напружено-деформованого стану конструкції дорожнього одягу під дією транспортних навантажень. *Опір матеріалів і теорія споруд.* 2017. *99*. с.45–57. http://opir.knuba.edu.ua/zbirnyk-99/article-818

210. Довідник № 1. Розрахункових характеристик ґрунтів, матеріалів покриття і основи дорожнього одягу та навантажень від транспортних засобів. *UKRAVTODOR: HNADU*. 2017. 39. http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=73497.

211. Роде А.А. Почвенная влага. М. 1952.

212. Slavinska O., Bubela A., Chechuha O., Bondarenko L. The intensity of water removal from shallow drainage systems considering the properties of filler materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol 3. 1 (105). URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203551 (SCOPUS).

213. Бубела А.В. Підходи щодо регулювання водно-теплового режиму земляного полотна шляхом влаштування дренажних конструкцій мілкого закладання. *Actual aspects of development in the context of globalization.* IX Міжнародна науково-практична конференція. 23-24 березня 2020 р., Флоренція, Італія. С. 250-251.

214. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 83580 Україна. Літературний письмовий твір наукового характеру «Дослідження роботи дорожньої конструкції на ділянках з трубчастими дренами з матеріалів різного походження» Славінська О.С., Савенко В.Я., Бубела А.В., Яремов А.П. Дата реєстрації 11.12.2018 р.

215. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 93710 Україна. Літературний письмовий твір «Альбом типових проектних рішень конструкцій земляного полотна автомобільних доріг загального користування» Славінська О.С., Чечуга О.С., Савенко В.Я., Бубела А.В. Дата реєстрації 05.11.2019 р.

216. Бубела А.В. Дослідження роботи дренажних шарів з поперечними дренажами мілкого закладання. *Current trends in the development of science and practice.* XXI Міжнародна науково-практична конференція. 15-16 червня 2020 р., Хайфа, Ізраїль. С. 89-91.

217. Бубела А.В. Визначення залежності інтенсивності водовідведення від конструктивних характеристик поперечних дренажів мілкого закладання. *Дороги і мости* : збірник наукових праць. 2020. Вип. 22. С. 53-62. URL: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.053

218. Бубела А.В. Вплив тривалості водовідведення в дренажних конструкціях на транспортно-експлуатаційний стан автомобільної дороги. *Modern science, practice, society.* XVIII Міжнародна науково-практична конференція. 25-26 травня 2020 р., Бостон, США. С. 242-243.

219. Бубела А.В. Дослідження ефективності функціонування дренажів мілкого закладання в дорожніх конструкціях. *Вісник Національного транспортного університету.* Серія «Технічні науки» : науково-технічний

збірник. 2020. Вип. 1 (46). С 45-54. DOI: 10.33744/2308-6645-2020-1-46-045-054. URL: http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/46/045.pdf

220. Огірко О.І, Галайко Н.В. Теорія ймовірностей та математична статистика: навчальний посібник. 2017. Львів: ЛьвДУВС. 292 с. URL: http://dspace.lvduvs.edu.ua/bitstream/1234567890/629/1/теорія%20ймовірностей%20підручник.pdf

221. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб пособие для вузов. 2003. 9-е изд.: М.: Высш.шк. 479с. URL:http://lib.maupfib.kg/wp-content/uploads/2015/12/Teoria_veroatnosty_mat_stat.pdf

222. Agostinacchio M., Ciampa D., Olita S. (2014). The vibrations induced by surface irregularities in road pavements – a Matlab®approach. *European Transport Research Review*. 6. P. 267–275. [in English] https://doi.org/10.1007/s12544-013-0127-8.

223. Dolgov D.V. Vliyaniye chastoty i amplitudy vibratsionnogo vozdeystviya na kharakter deformatsionnogo povedeniya svyazannykh gruntov. *Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny*. 2013. 6. P.45–47. [in Russian].

224. Бубела А.В. Дослідження роботи дренажів мілкого закладання за інтенсивністю водовідведення. *Theoretical foundations of modern science and practice.* XI Міжнародна науково-практична конференція. 06-07 квітня 2020 р., Мельбурн, Австралія. С. 172-173.

225. Бубела А.В. Дослідження впливу вібрації на дренажну здатність дорожньої конструкції. *Science, trends and perspectives.* XVII Міжнародна науково-практична конференція. 18-19 травня 2020 р., Токіо, Японія. С. 150-151.

226. Славінська О.С., Бубела А.В. Дослідження впливу вібрації на інтенсивність водовідведення з дренажної конструкції. *Гідротехнічне і транспортне будівництво*. Міжнародна науково-технічна конференція. 28-29 травня 2020 р., Одеса, Україна. С. 108-110.

227. Han-Cheng Dan, Zhi Zhang, Xiang Liu, Jia-Qi Chen (2019) Transient unsaturated flow in the drainage layer of a highway: solution and drainage performance.,

Road Materials and Pavement Design. Vol. 20, Is. 3, P. 528-553. DOI: https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1397049

228. Yangyang Ji, Jianguang Xie, and Mingxi Liu (2018) Double layer drainage performance of porous asphalt pavement. AIP Conference Proceedings 1973, 020031 DOI: https://doi.org/10.1063/1.5041415;

229. Бубела А.В., Кватадзе А.І. Дослідження режимів роботи дренувальних шарів в дорожніх конструкціях. *Science Review.* 2020. 5(32). С. 24-29. URL: https://doi.org/10.31435/rsglobal_sr/30062020/7140

230. Бубела А.В. Дослідження роботи піщаних дренажних шарів в дорожніх конструкціях. *Modern approaches to the introduction of science into practice.* X Міжнародна науково-практична конференція. 30-31 березня 2020 р., Сан-Франциско, США. С. 376-377.

231. ГБН В.2.3-37641918-557:2016 Автомобільні дороги. Жорсткий дорожній одяг. Проектування. Введ. 2017-04-01. Х. : ХНАДУ. 2017. 63 с.

232. Славінська О.С., Бубела А.В., Бондаренко Л.П., Чечуга О.С. Визначення оптимальної дорожньої конструкції з поперечними дренажами мілкого закладання. *International Academy Journal Web of Scholar.* 2020. Vol 5 (47), С. 3-11. URL: https://doi.org/10.31435/rsglobal_wos/31052020/7088

233. Славінська О.С., Бубела А.В., Бондаренко Л.П., Чечуга О.С. Прогнозування режиму водовідведення з дорожньої конструкції. *Автошляховик України* : науково-виробничий журнал. 2020. Вип. 3. С. 28-36. URL: 10.33868/0365-8392-2020-3-263-28-36

234. Славінська О.С., Бубела А.В., Бондаренко Л.П. Метод визначення оптимальної дорожньої конструкції з поперечними дренажами мілкого закладання. *Perspective directions for the development of science and practice.* XX Міжнародна науково-практична конференція. 08-09 червня 2020 р., Афіни, Греція. С. 274-276.

235. ДСТУ Б В.2.7-75-98 Щебень и гравий плотные природные для строительных материалов, изделий, конструкций и работ. Технические условия

Введ. 1999-01-01. Технический комитет по стандартизации "Строительные материалы". 1998. 36 с.

236. ГБН В.2.3-37641918-544:2014 Автомобільні дороги. Застосування геосинтетичних матеріалів у дорожніх конструкціях. Основні вимоги. Введ. 2015-01-01. К. : ТОВ «Гідрозахист». 147 с. Зміна №1 до ГБН В.2.3-37641918-544:2014 Автомобільні дороги. Застосування геосинтетичних матеріалів у дорожніх конструкціях. Основні вимоги. Введ. 2018-09-01. К. : ТОВ «Гідрозахист». 18 с.

237. ДСТУ Б В.2.1-23:2009 Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи лабораторного визначення коефіцієнта фільтрації. Введ. 2010-10-01. Український державний головной науково-дослідний і виробничий інститут інженерно-технічних і екологічних вишукувань «УкрНДІІНТВ». 2009. 21 с.

238. ГБН В.2.3-218-540:2012 Споруди транспорту. Охорона довкілля при будівництві, ремонті та експлуатаційному утриманні автомобільних доріг. – Введ. 2012-10-01. К. : ДП «ДержДорНДІ». 35 с.

ДОДАТОК А

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ДМЗ. ДОСЛІДЖЕННЯ НДС ДОРОЖНЬОЇ КОНСТРУКЦІЇ НА ЕТАПІ ВЛАШТУВАННЯ ДРЕНУВАЛЬНОГО ШАРУ

А.1 Результати розрахунку відстані між дренажними прорізями та часу водовідведення для поперечних ДМЗ

Таблиця А.1 – Вихідні данні для розрахунку відстані між дренажними прорізями та часу водовідведеня для поперечних ДМЗ

№	Назва параметра	Познака	Од. вим.	Примітка (у якому вигляді задається)
1	**2**	**3**	**4**	**5**
1	Поздовжній похил ділянки дороги	i_0	-	задається діапазон значень
2	Товщина дренувального шару	$h_{дш}$	м	0,3
3	Коефіцієнт кількості руху потоку	α	-	1
4	Коефіцієнт, який враховує утворення в порах дренувального шару застійних областей водного потоку	ε	-	0,9
5	Пористість дренувального шару	p	% або у долях одиниці	0,4
6	Розрахунковий питомий надлишок води, що надходить в дренувальний шар	q_p	м^3/с на м	2,8935E-07
7	Коефіцієнт фільтрації дренувального шару	$K_ф$	м/с	задається діапазон значень
8	Середній похил кривої депресії, залежить від різних типів ґрунту	$I_{сер}$	-	0,003
9	Повна вологоємність ґрунту	$W_{ПВ}$	в долях одиниці	0,151
10	Оптимальна вологість ґрунту	W_{opt}	в долях одиниці	0,06
11	Еквівалентний діаметр зерен дренувального матеріалу	d_e	м	0,0005
12	Коефіцієнт, який враховує відмінність форми зерен фільтруючого матеріалу від шароподібної	$\gamma_ф$	-	1,17
13	Кінематична в’язкість води (в залежності від температури води)	v	м^2/с	0,00000152
14	Максимальна глибина фільтраційного потоку вільної води в дренувальному шарі	$h_{нас}$	м	0,16
15	Максимальна щільність скелету ґрунту за методом стандартного ущільнення, дренувального шару	$\rho_{cr\,max\,дш}$	кг/м^3	2000

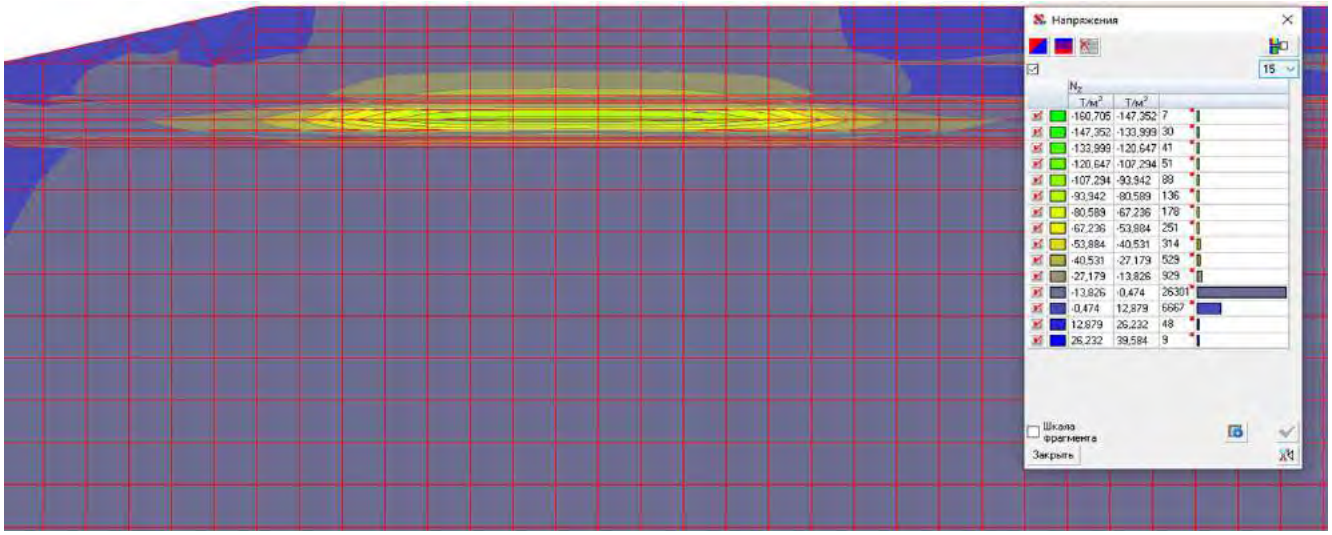
Кінець таблиці А.1

1	2	3	4	5
16	Довжина дренажної траншеї, відповідно до проекту та категорії дороги	$l_{тр}$	м	7,5
17	Коефіцієнт фільтрації матеріалу - наповнювача дренажної траншеї	$K_{ф\ тр}$	м/добу	10
18	Похил дренажної траншеї	$i_{тр}$		0,025
19	Прискорення вільного падіння	g	м/с^2	9,81
20	Густина води фільтраційного потоку	$\rho_в$	кг/м^3	998
21	Щільність частинок ґрунту	$\rho_{гр}$	кг/м^3	2650
22	Коефіцієнт водонасичення	k_1	м^2/год	0,0000153

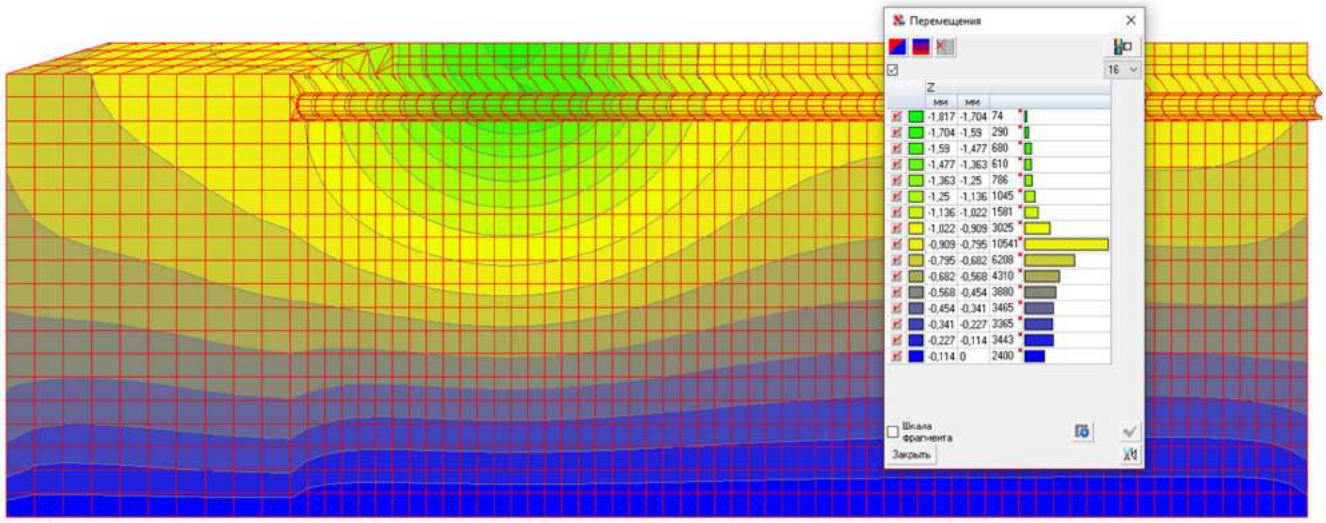
Таблиця А.2 – Результати розрахунку відстані між дренажними прорізями та часу водовідведеня для поперечних ДМЗ для ділянок доріг з різними поздовжніми похилами

Похил ділянки	Мінімальна відстань між дренажними прорізями, м L_{min}	Максимальна відстань між дренажними прорізями, м L_{max}	Час водовідведення, діб T	Відстань між дренажними прорізями для ділянки зі змінним похилом, м $L_{змін\ пох}$	Відстань між дренажними прорізями за методом О.Я. Тулаєва, м L_m
Коефіцієнт фільтрації, Кф=4,5 м/добу					
0,025	5,58	37,68	1,48	13,45	2,89
0,03	5,2	26,7	1,92	12,56	3
Коефіцієнт фільтрації, Кф=6 м/добу					
0,025	5,58	29,64	1,62	13,48	3,34
0,03	5,2	21,03	2,13	12,57	3,38

А.2 Розподіл ізополів та ізоліній нормальних напружень *Nz* та деформацій *Z* в ДК з поперечним дренажем мілкого закладання з щебеневим дренувальним шаром та бетонною трубою

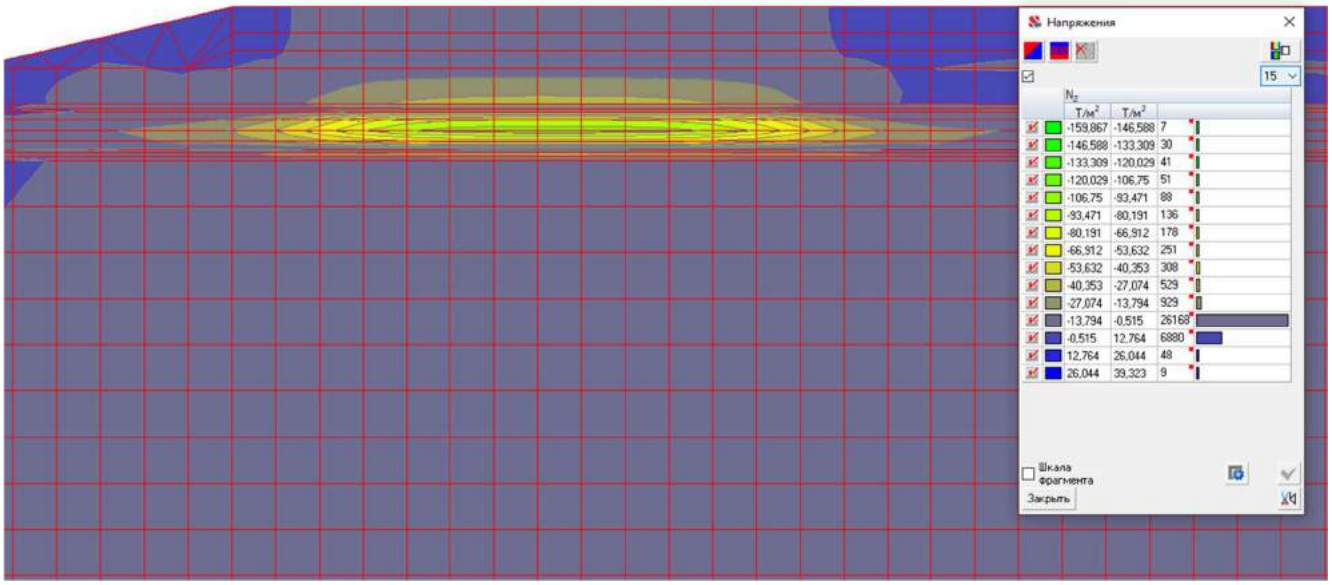


а)

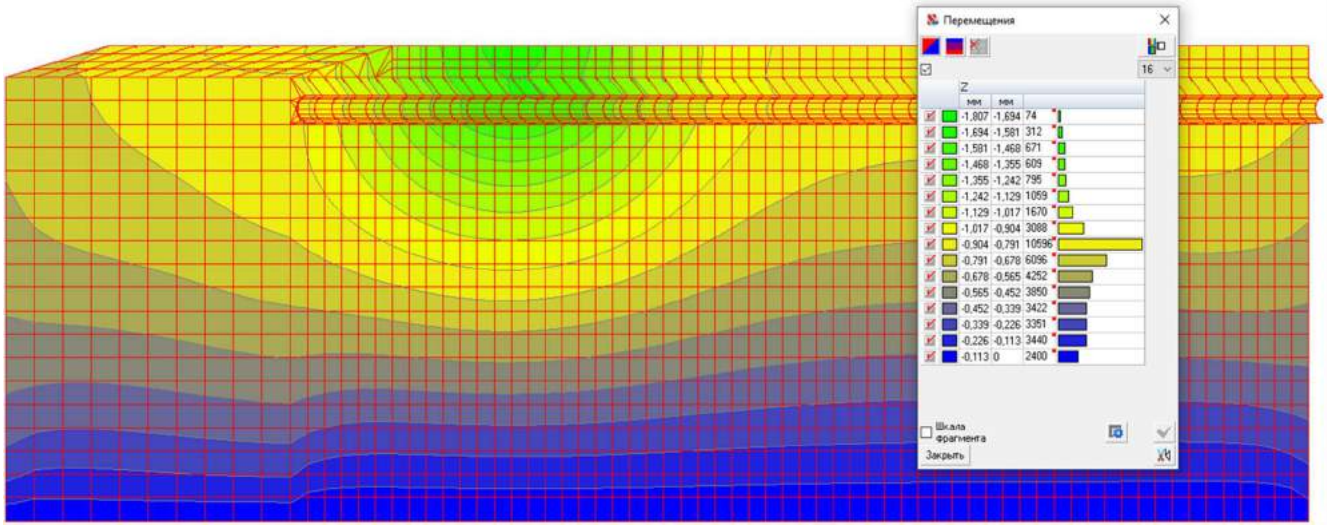


б)

Рисунок А.1 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від легкого катка, 8 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 181,8 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

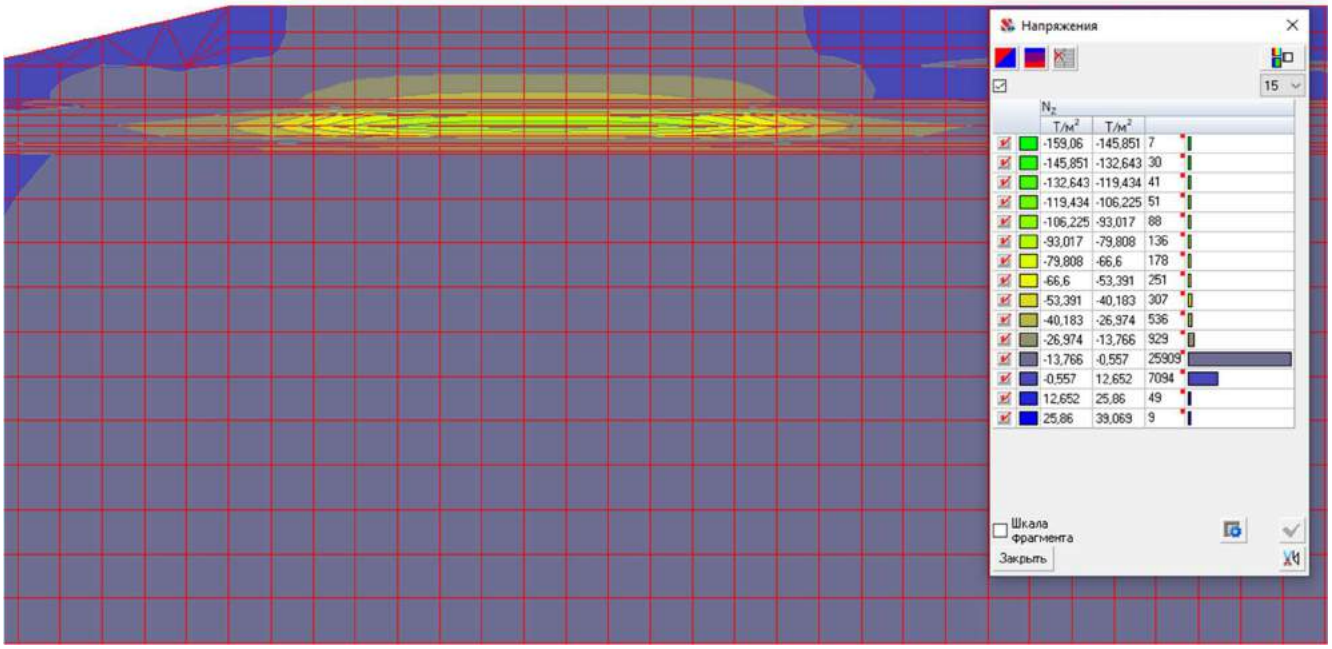


а)

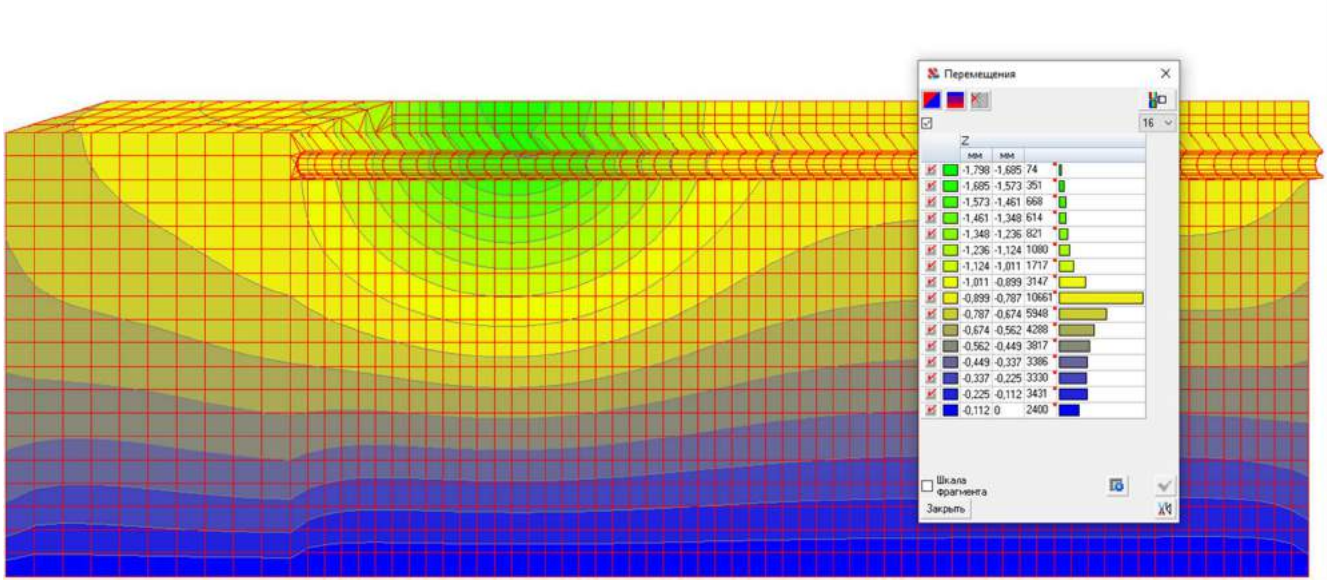


б)

Рисунок А.2 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від легкого катка, 8 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 193,18 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

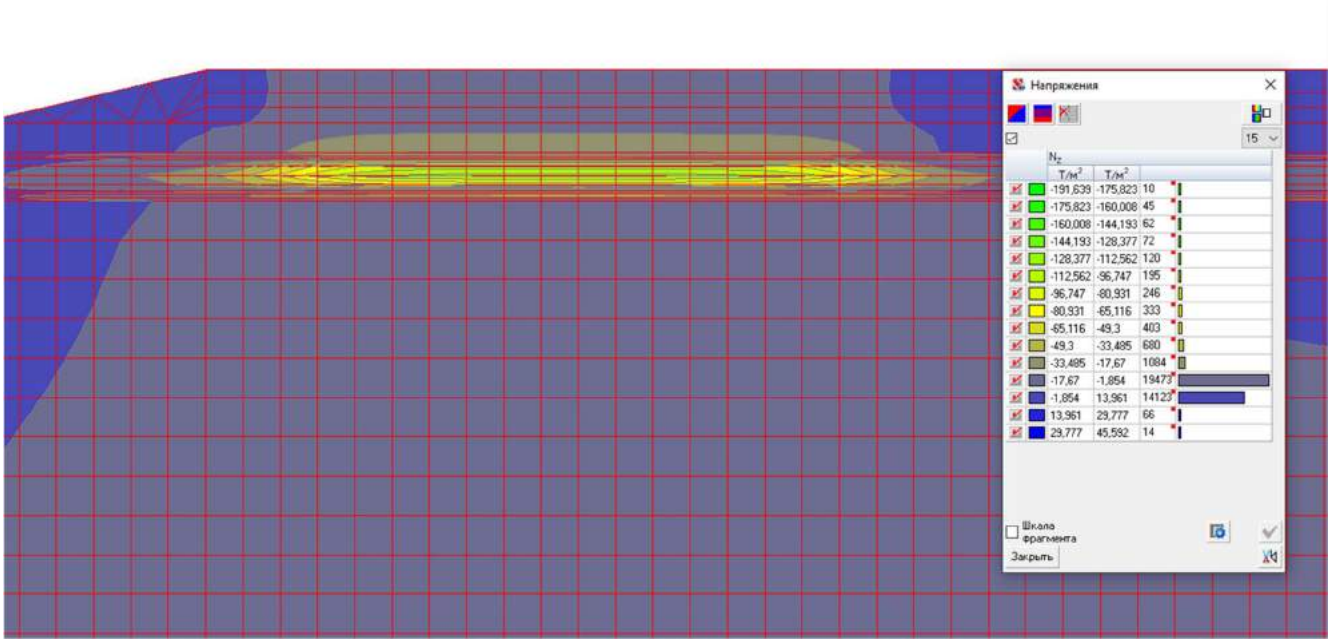


а)

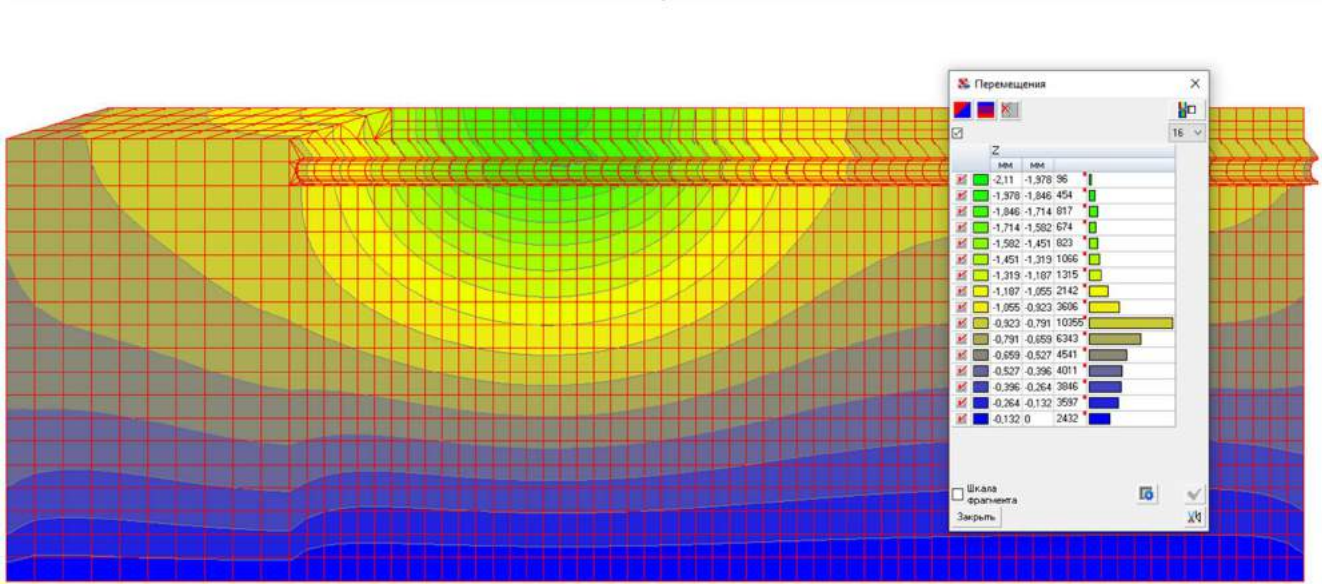


б)

Рисунок А.3 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від легкого катка, 8 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 204,5 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

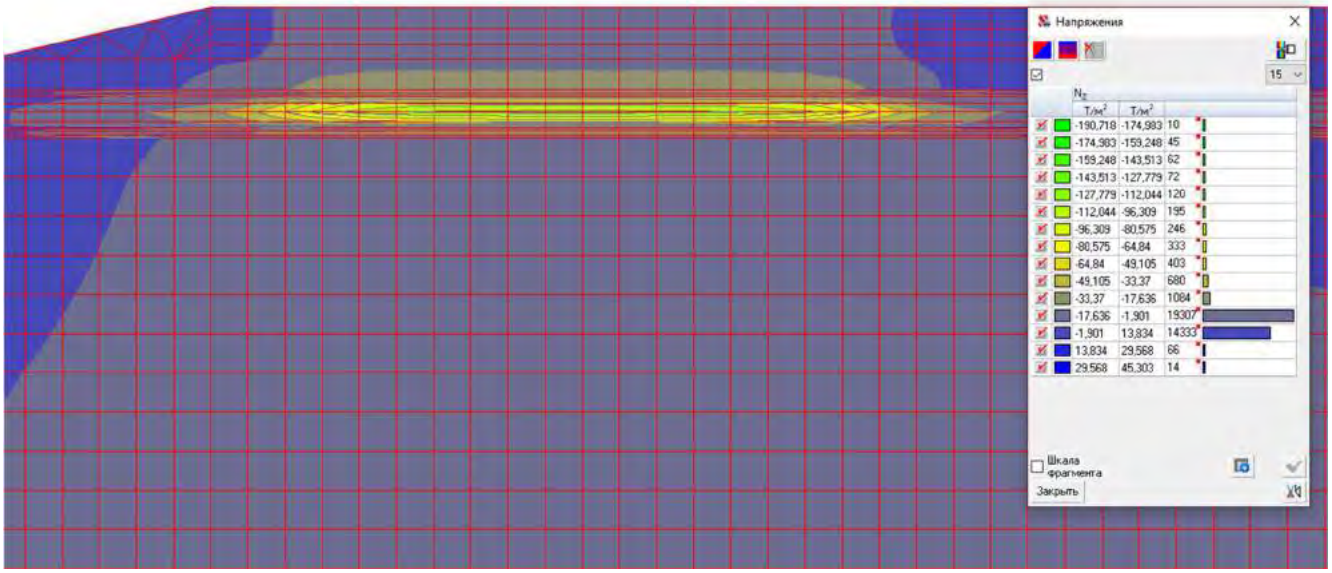


а)

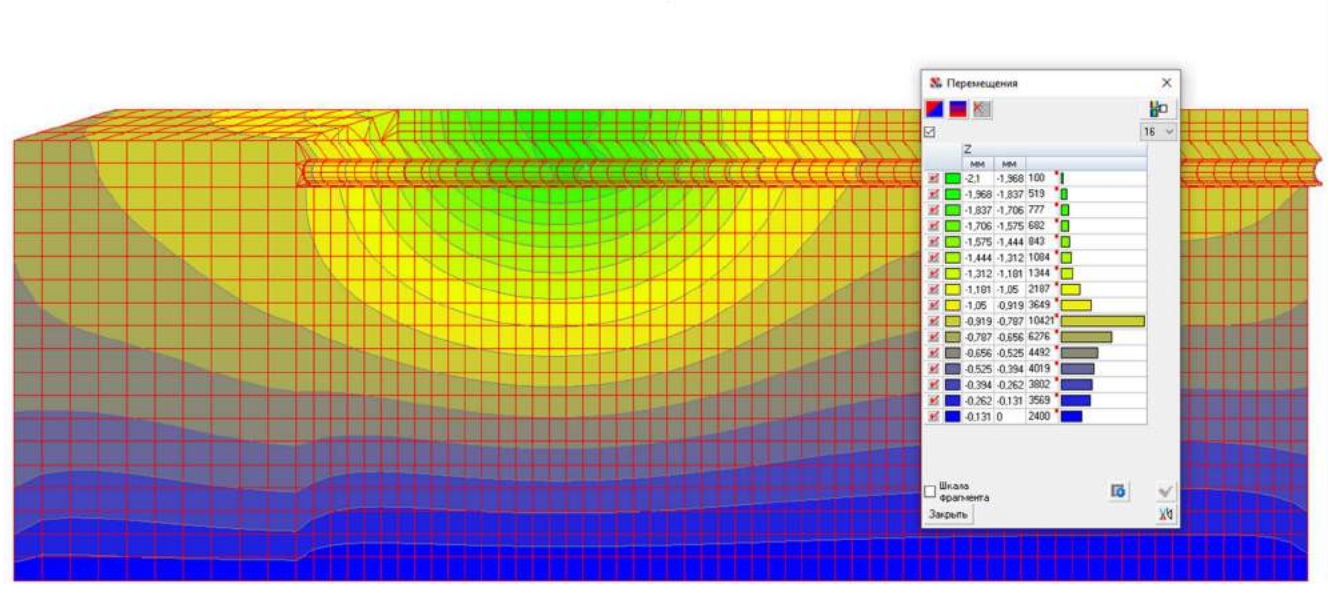


б)

Рисунок А.4 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 13 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 204,5 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

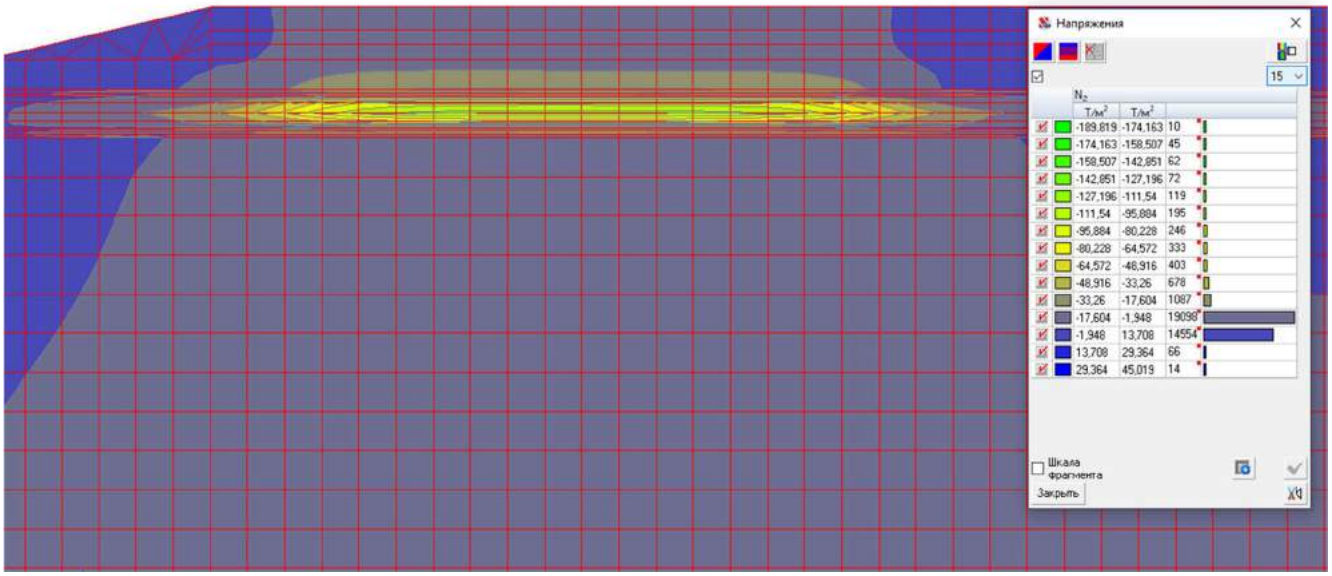


а)

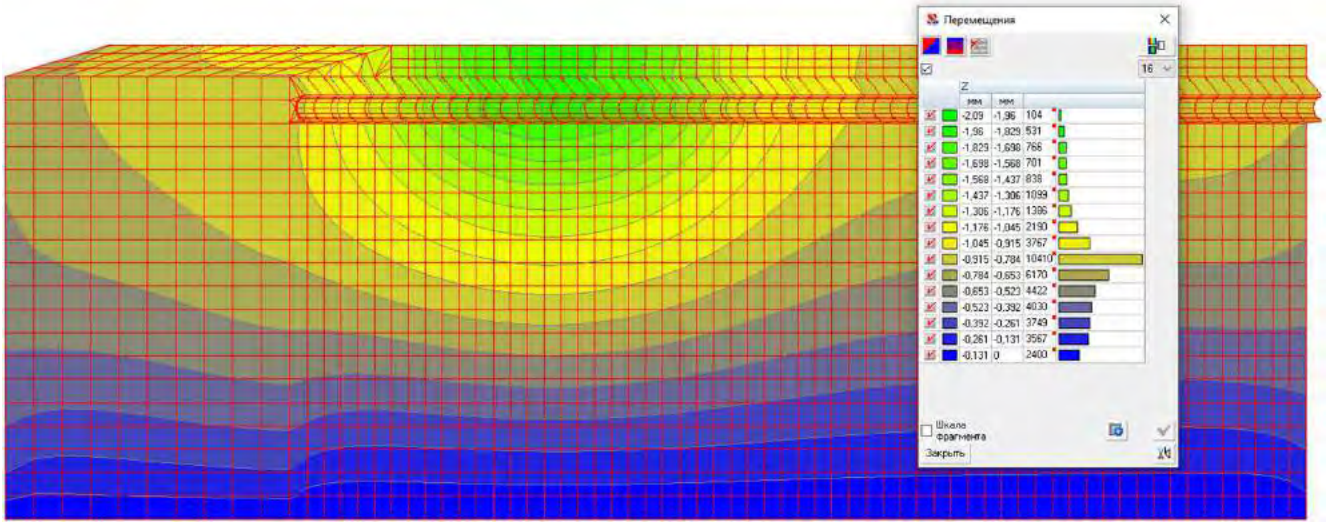


б)

Рисунок А.5 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 13 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 215,9 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

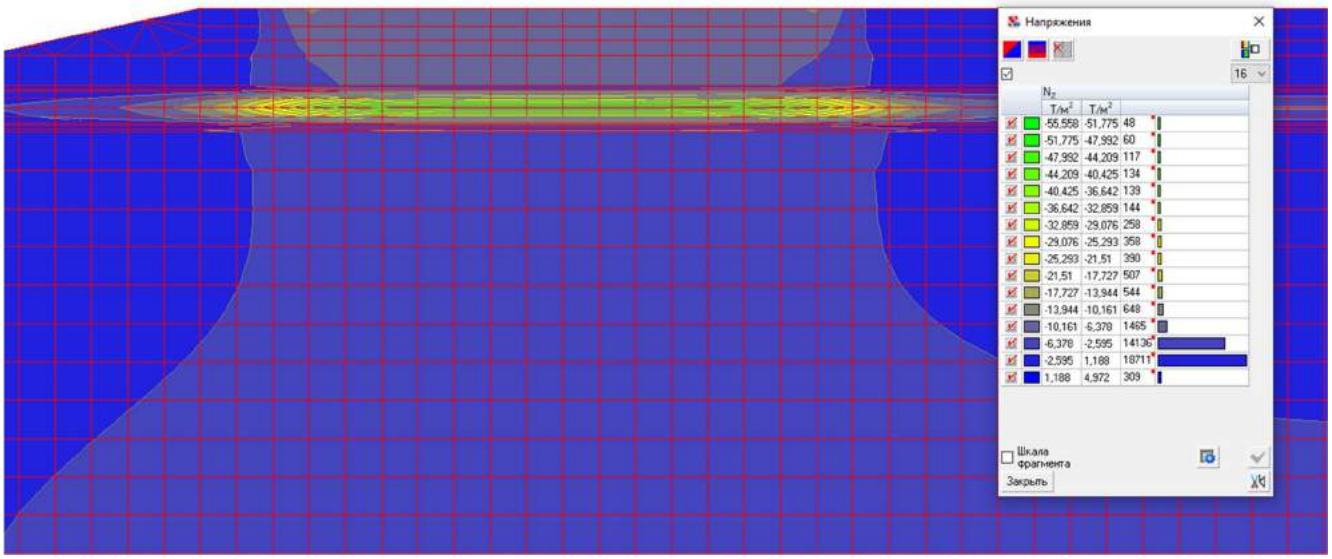


а)

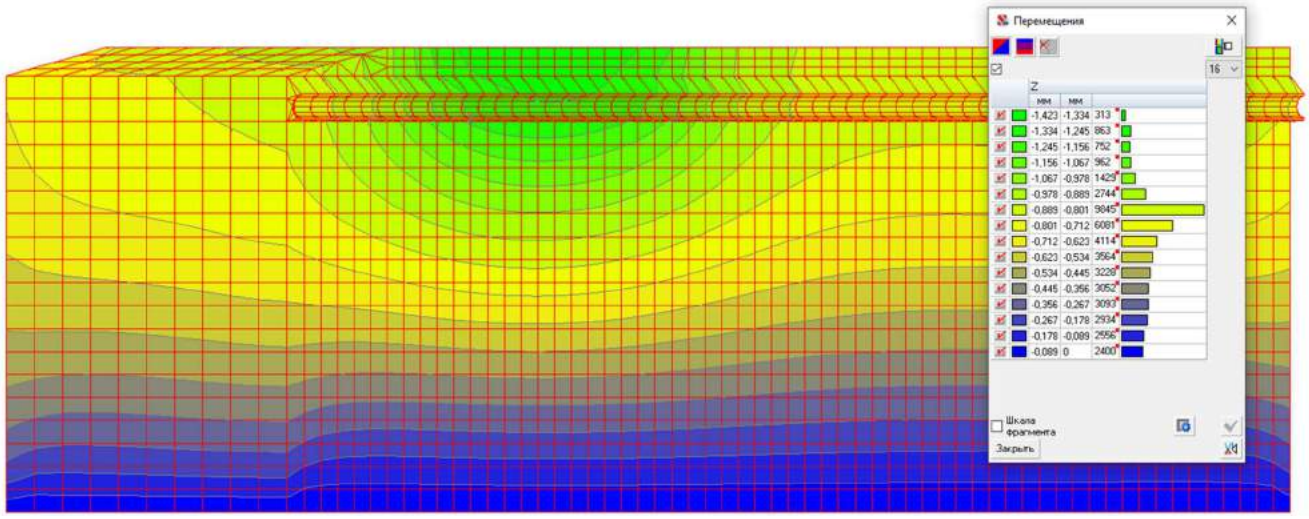


б)

Рисунок А.6 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 13 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 227,3 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

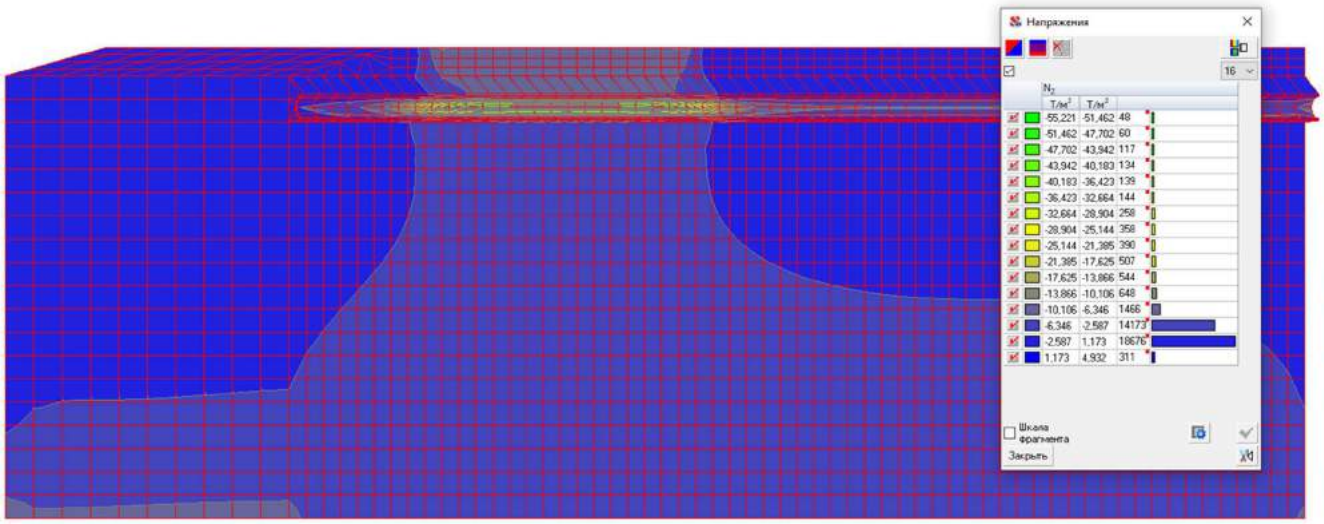


а)

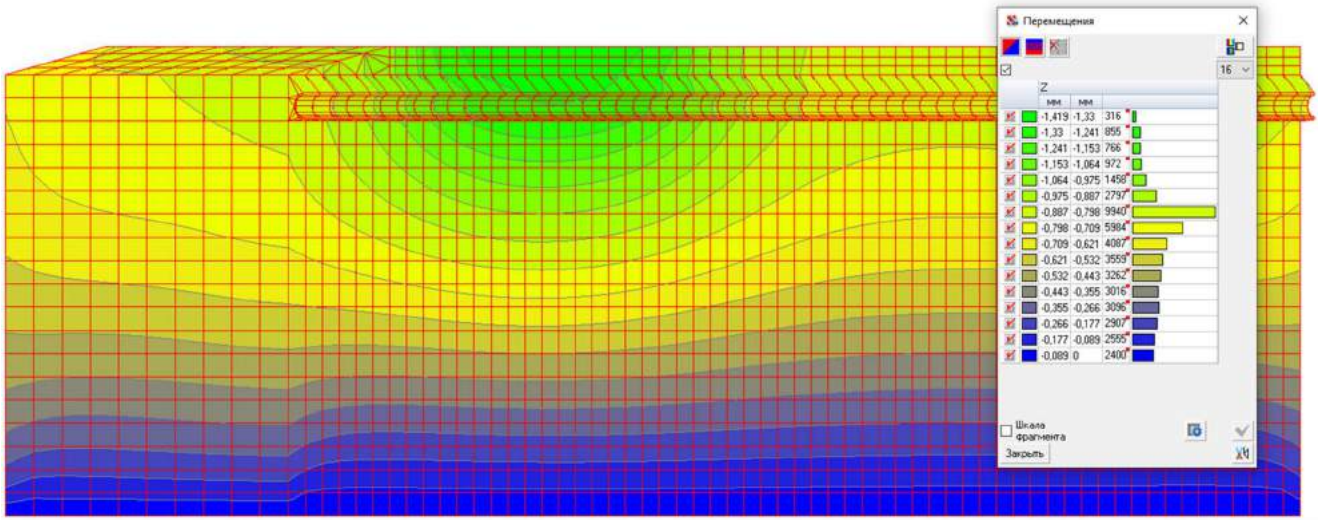


б)

Рисунок А.7 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від легкого катка, 8 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 193,18 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

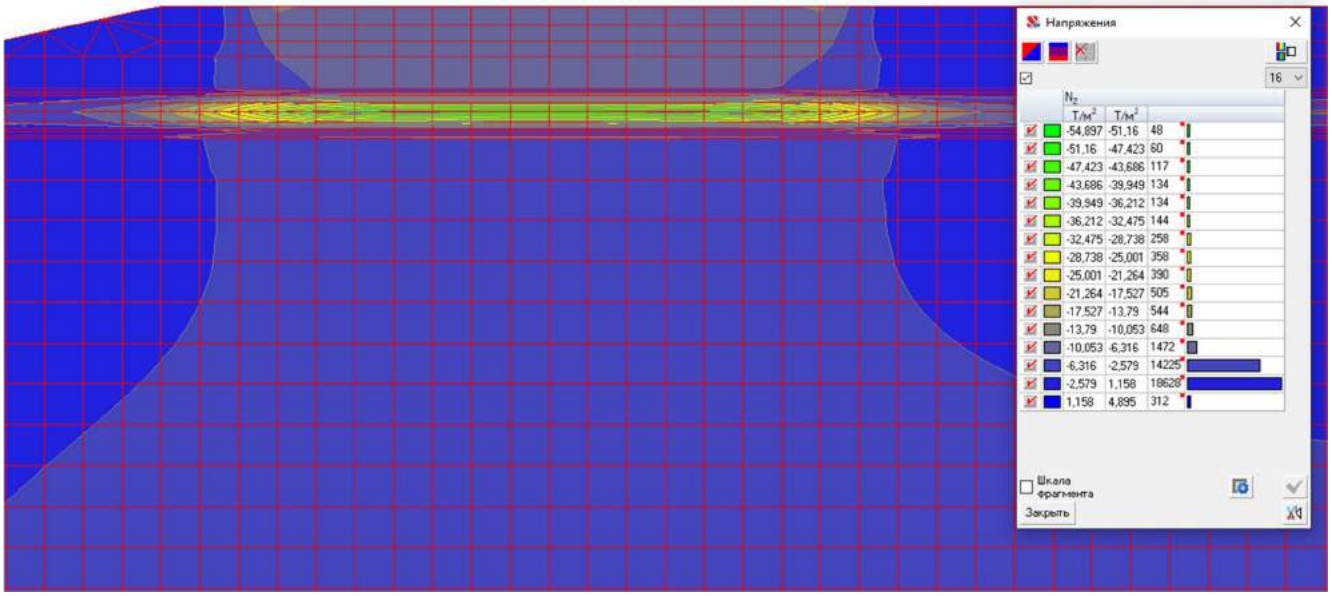


а)

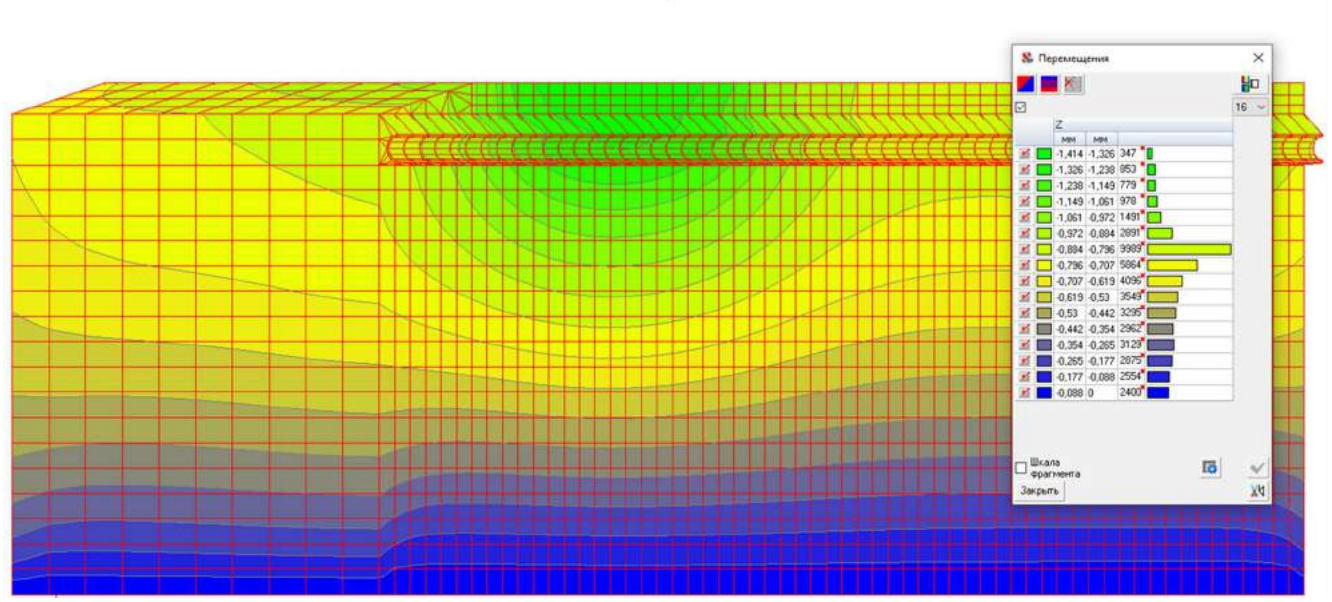


б)

Рисунок А.8 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від легкого катка, 8 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 204,5 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

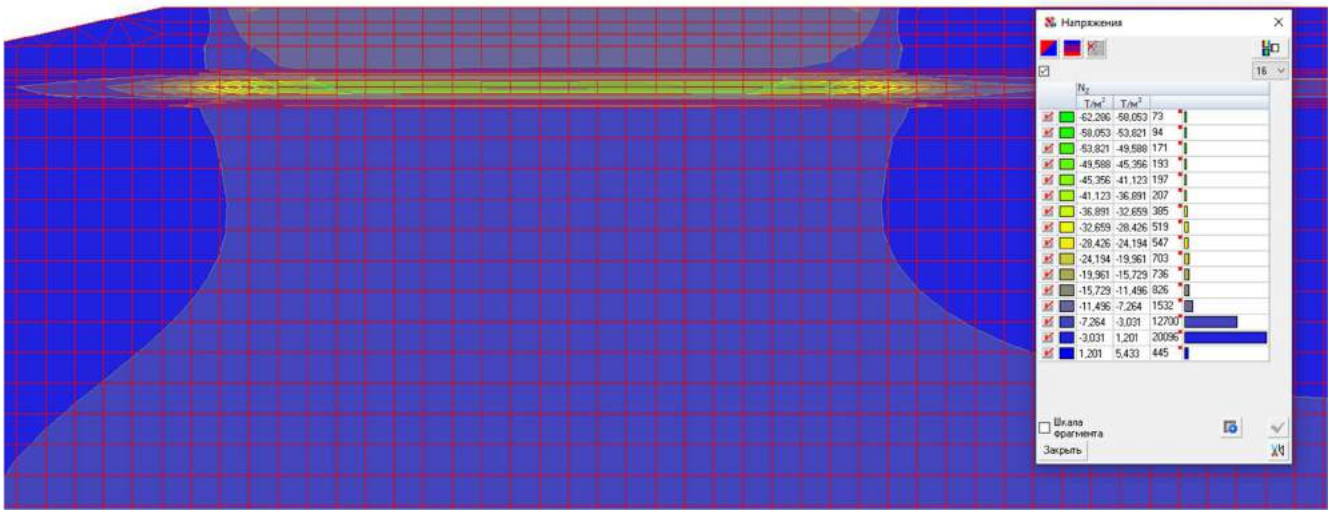


а)

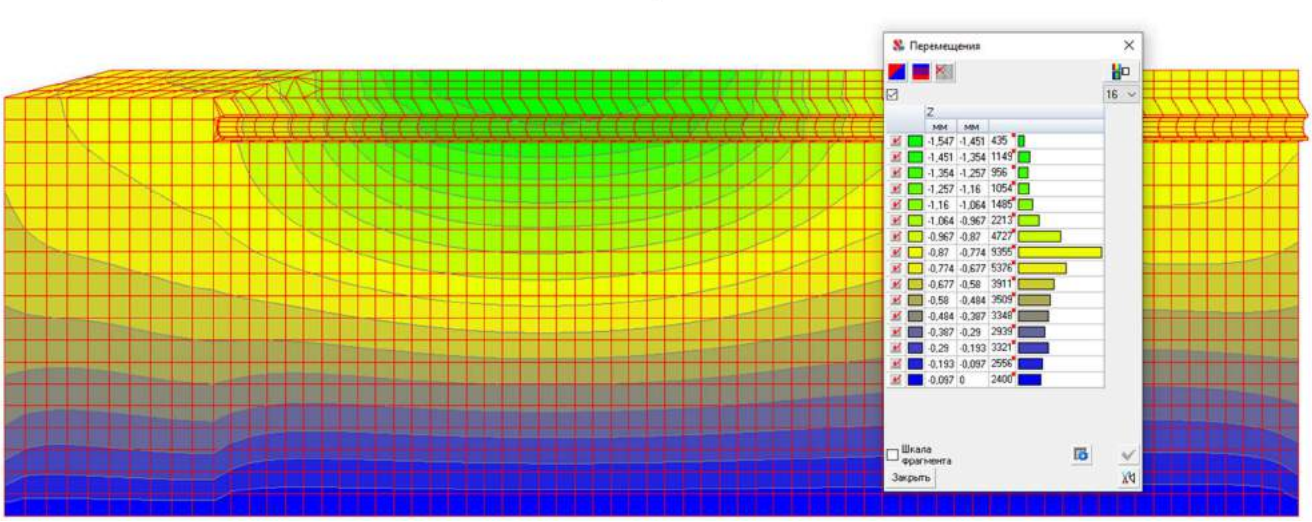


б)

Рисунок А.9 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від легкого катка, 8 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 215,9 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

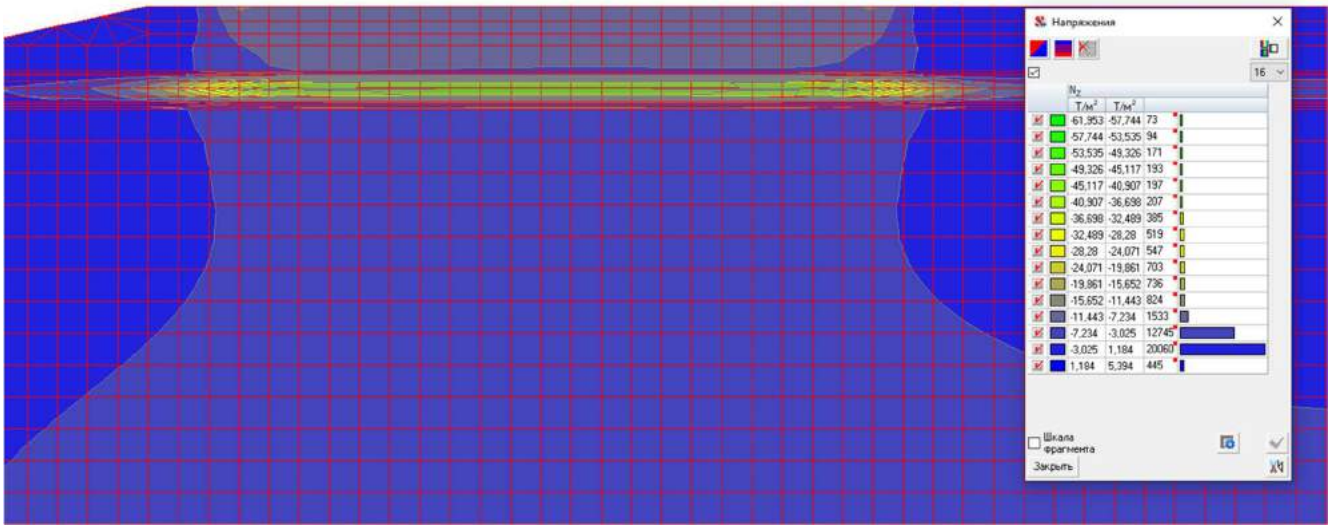


а)

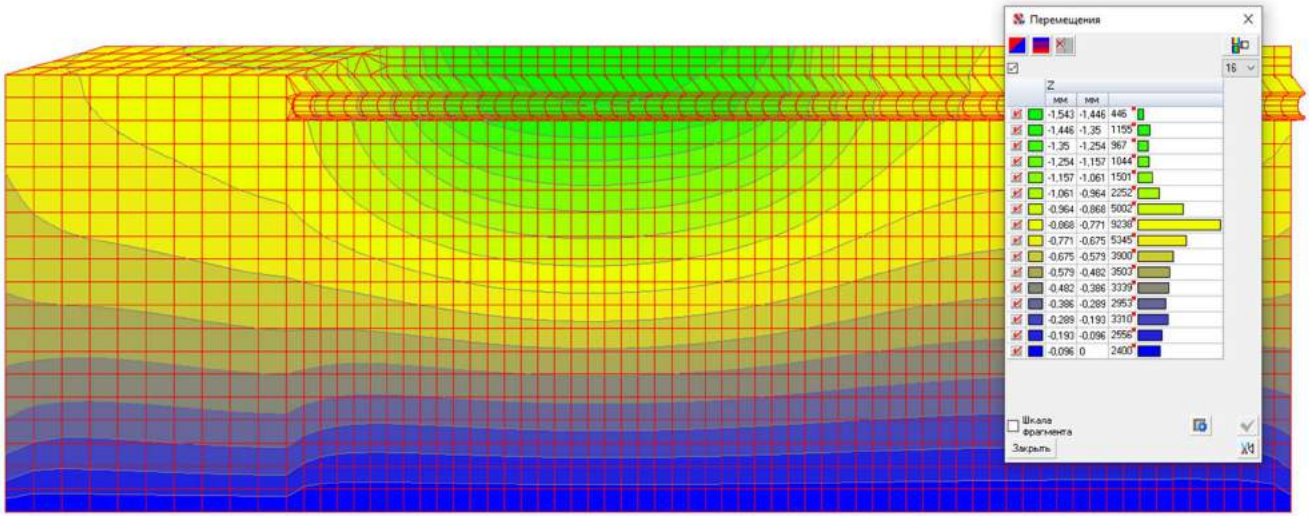


б)

Рисунок А.10 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 13 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 215,9 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

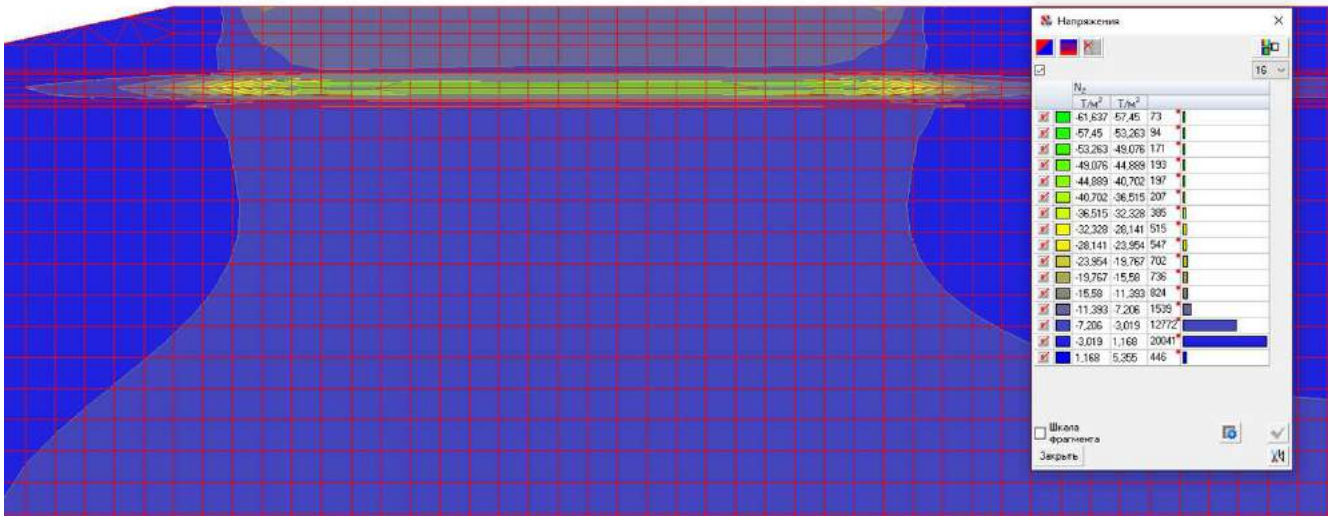


а)

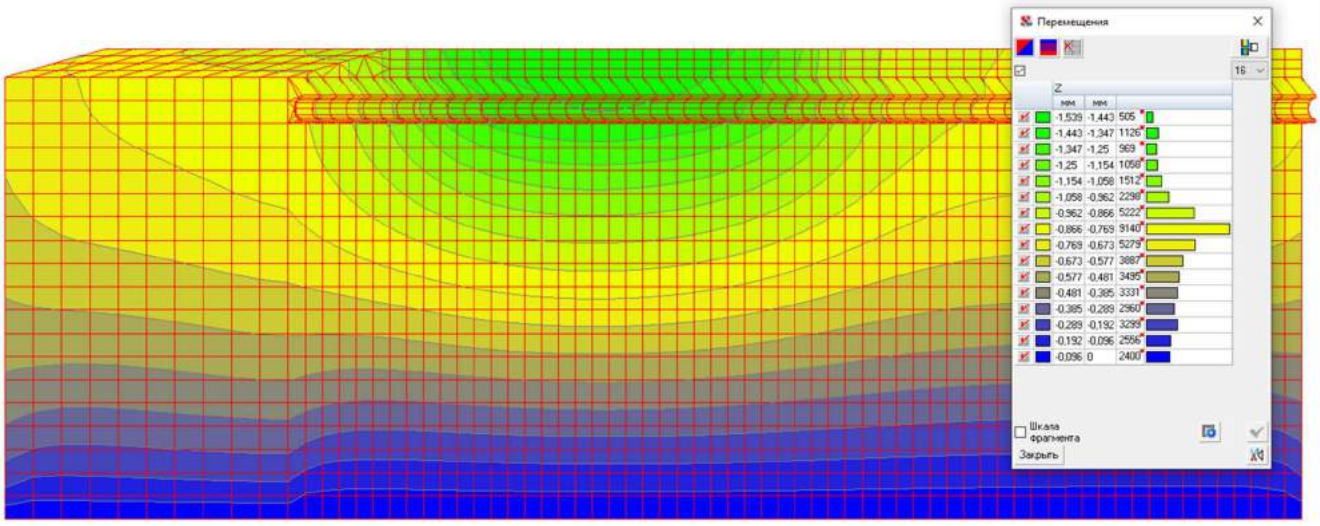


б)

Рисунок А.11 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 13 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 227,3 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

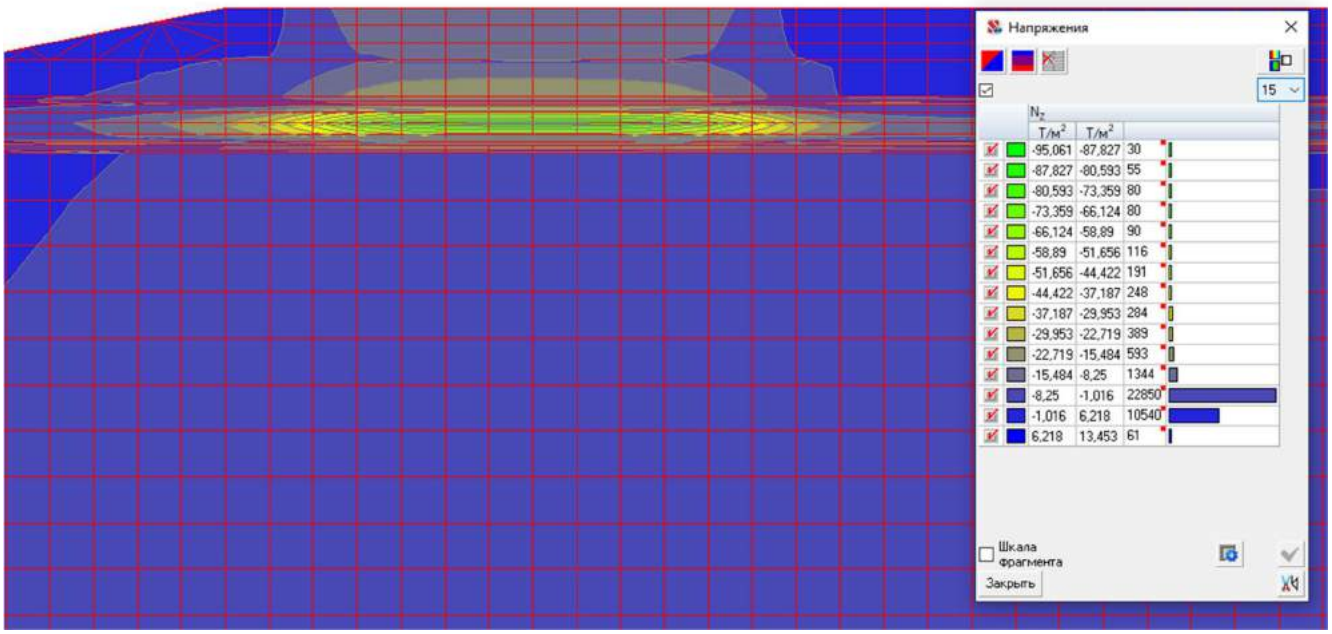


а)

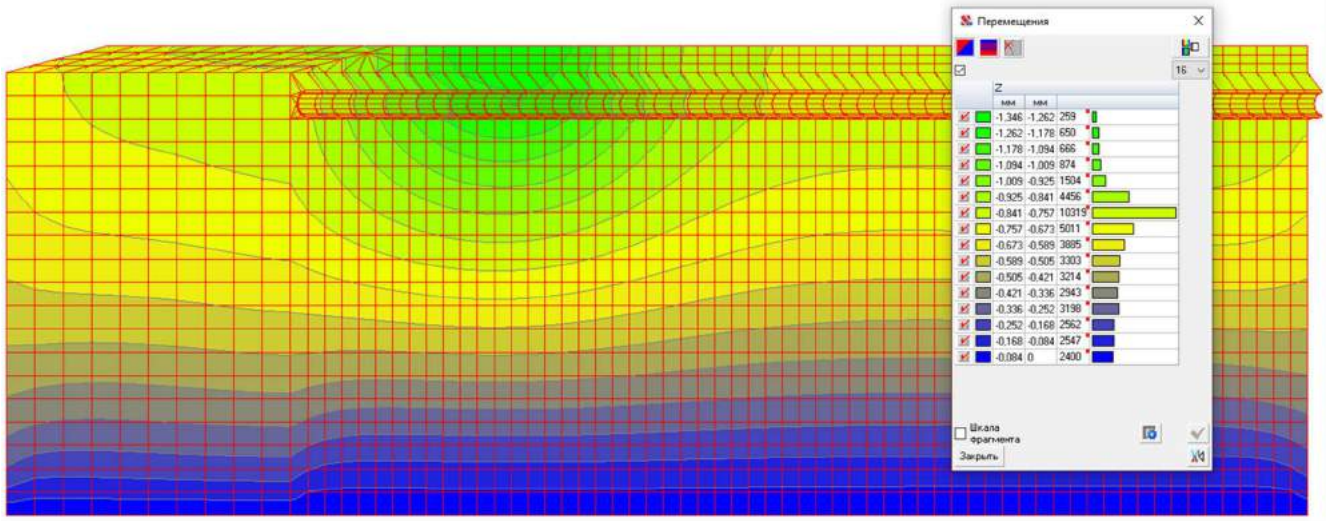


б)

Рисунок А.12 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 13 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 238,6 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

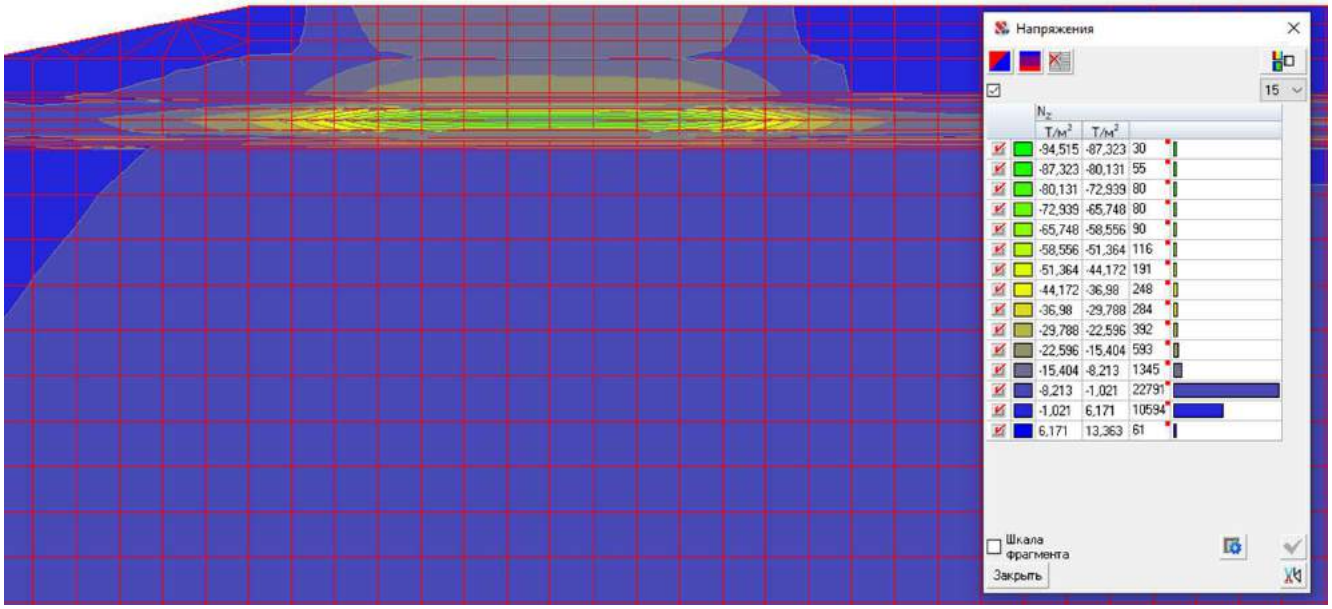


а)

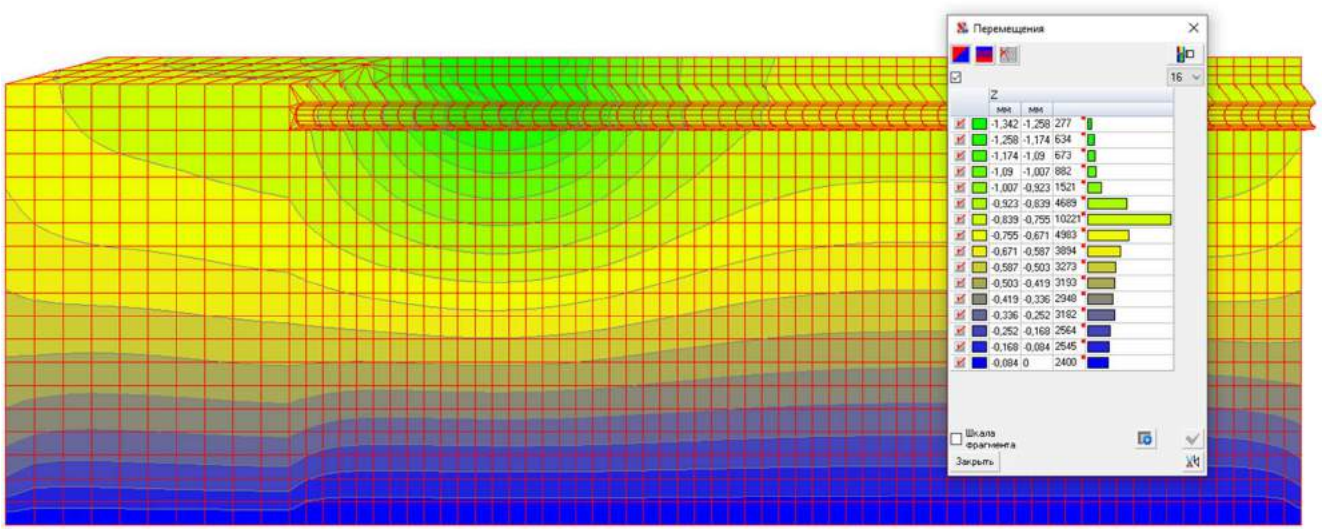


б)

Рисунок А.13 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 13 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 227,3 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

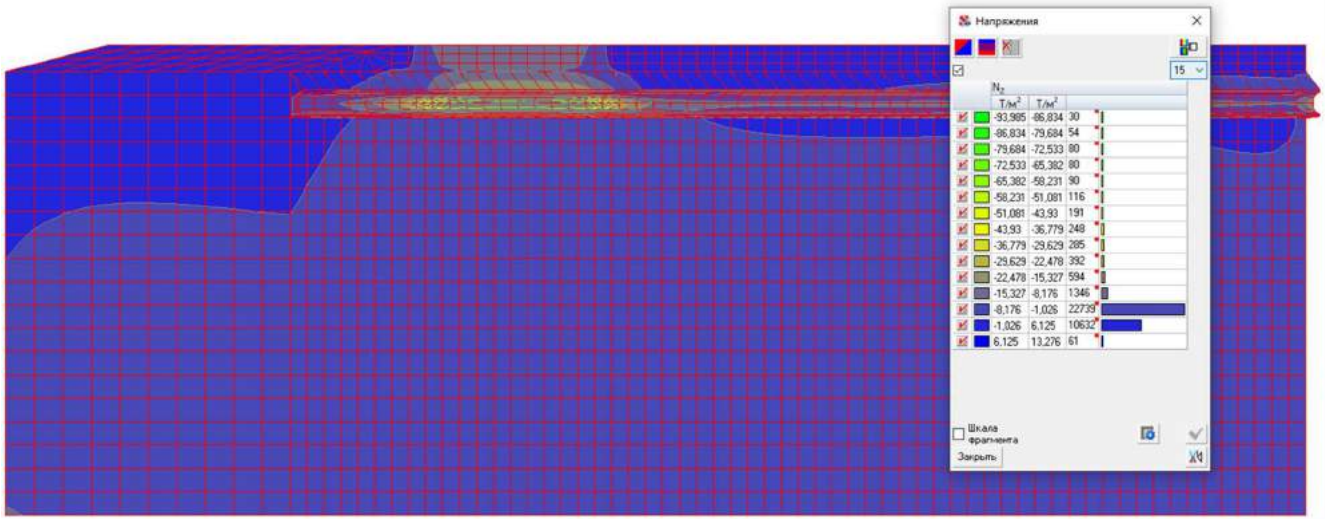


а)

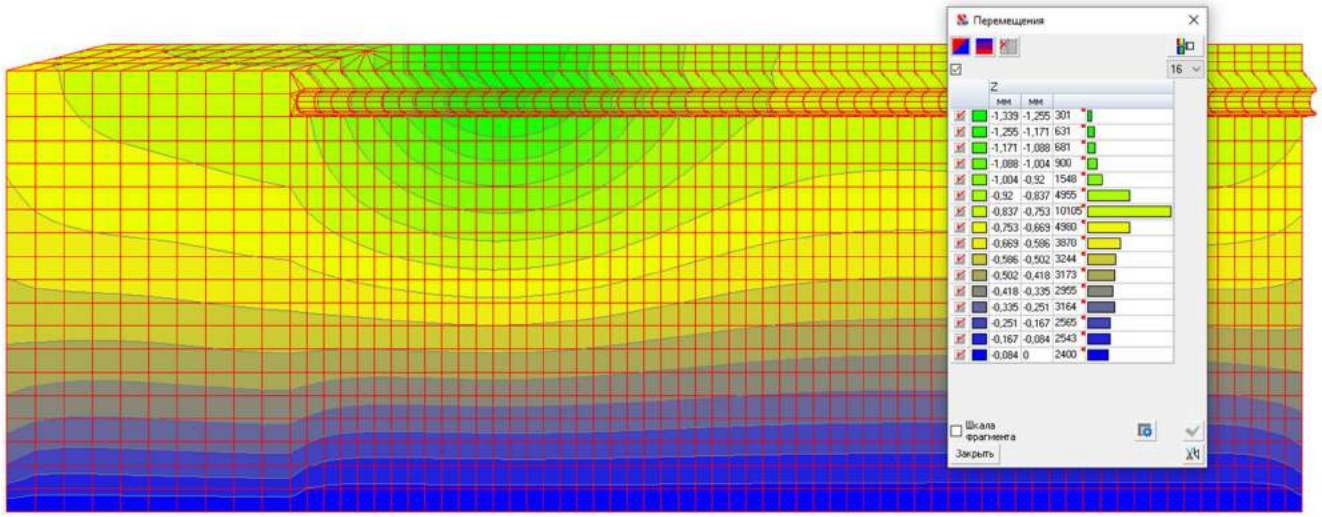


б)

Рисунок А.14 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 13 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 238,6 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні



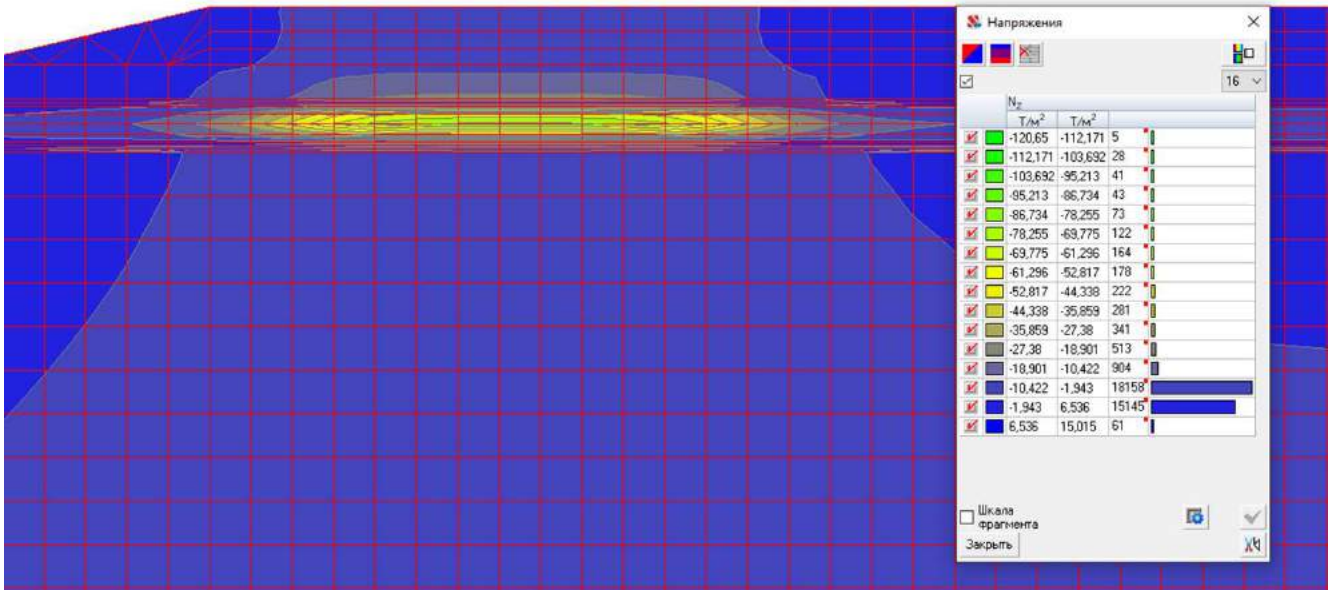
а)



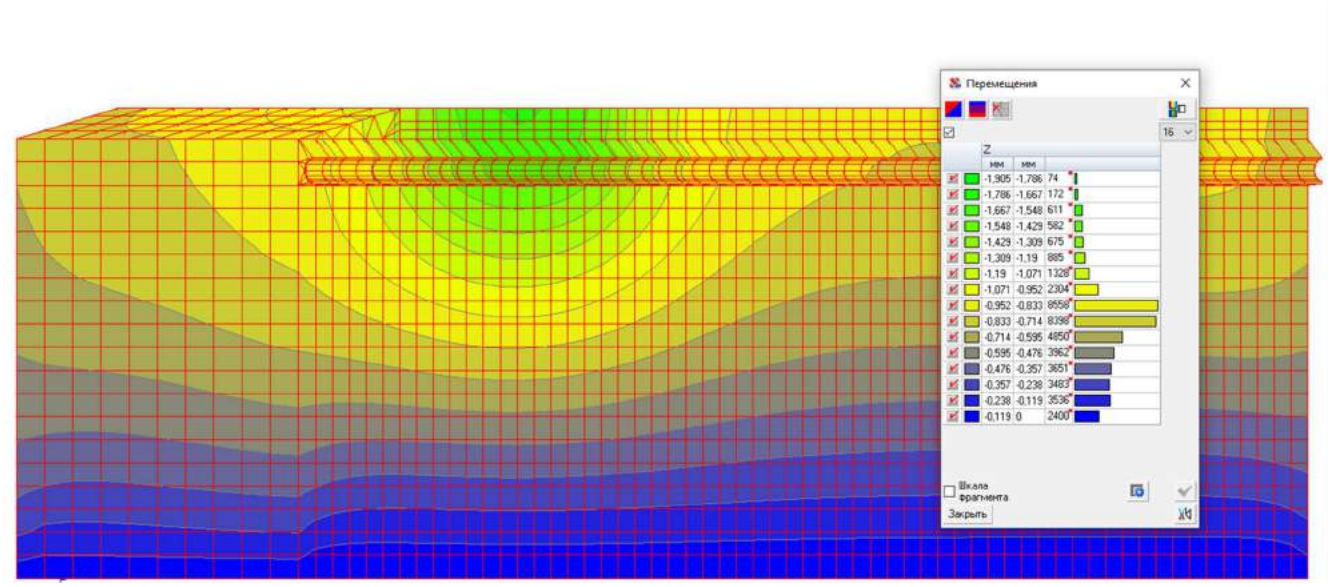
б)

Рисунок А.15 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 13 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 250 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

А.3 Розподіл ізополів та ізоліній нормальних напружень *Nz* та деформацій *Z* в ДК з поперечним дренажем мілкого закладання з щебеневим дренувальним шаром та трубою ПВХ

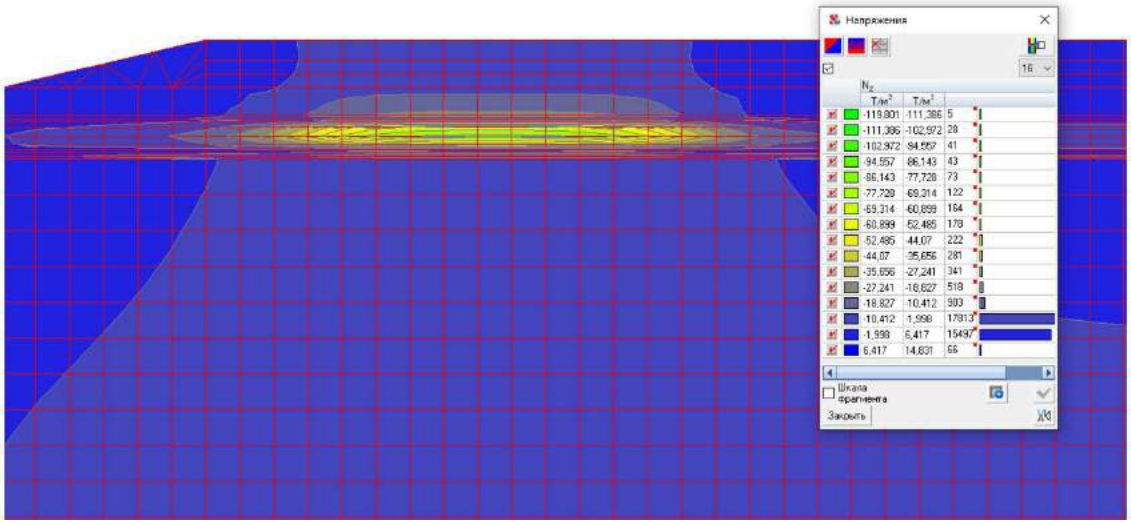


а)

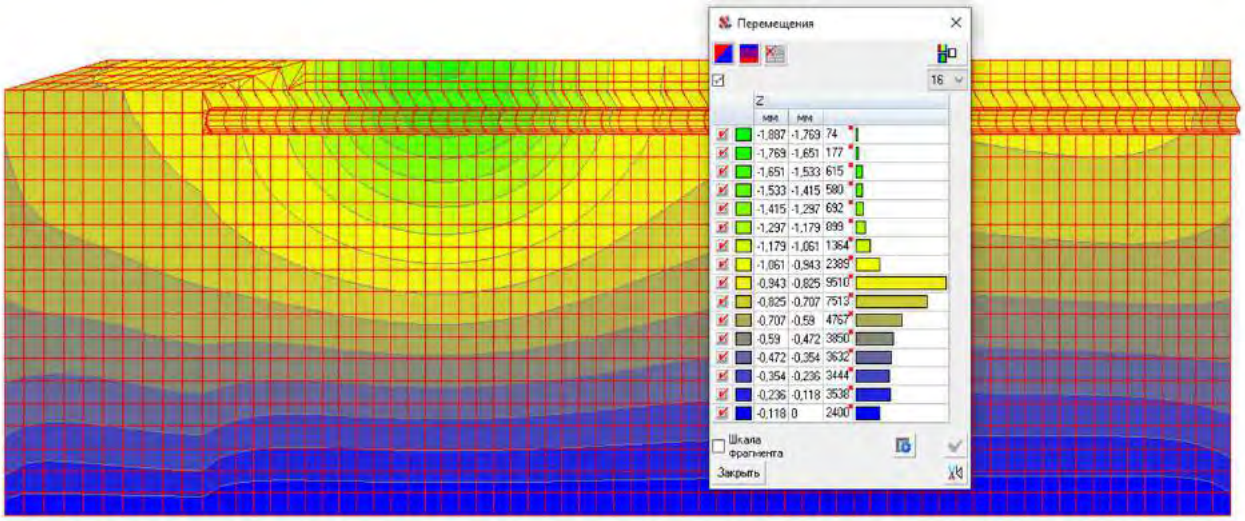


б)

Рисунок А.16 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від легкого катка, 8 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 181,8 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

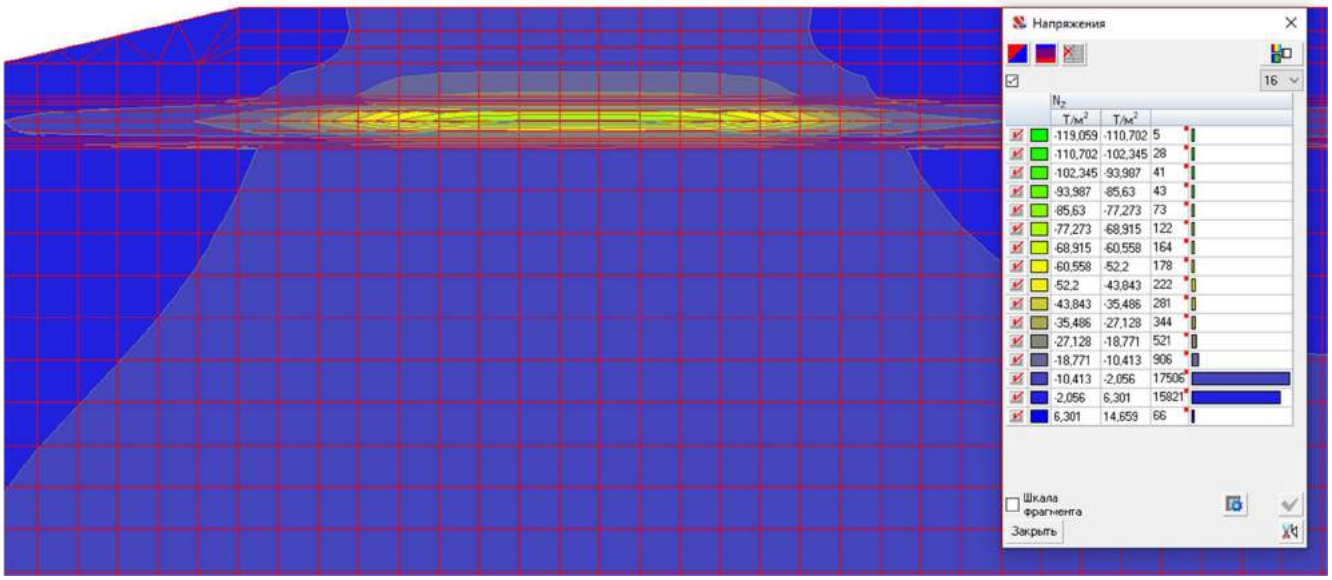


а)

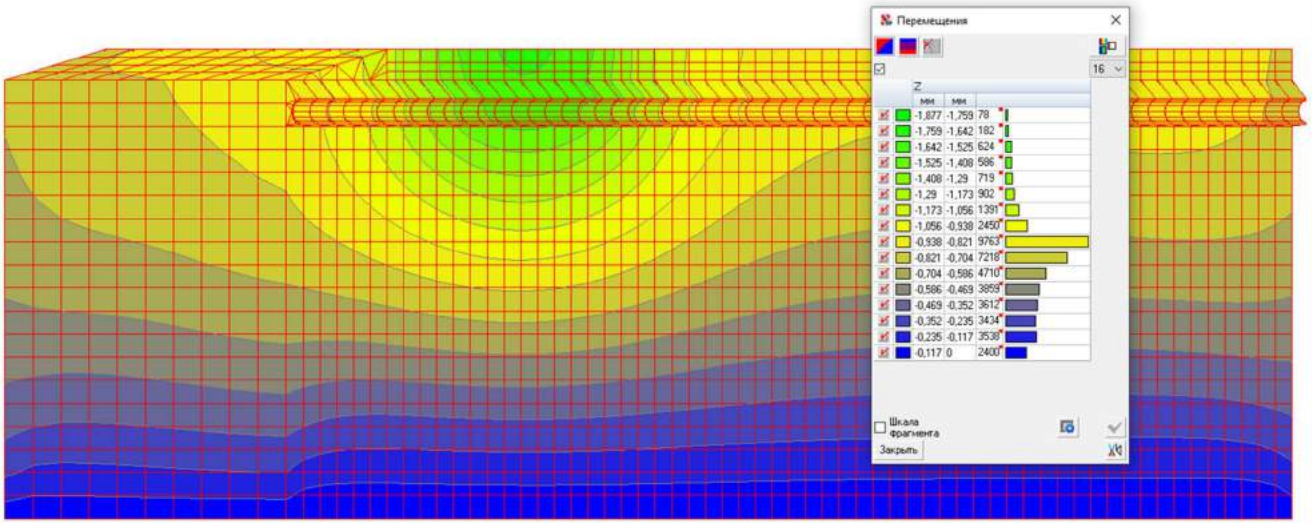


б)

Рисунок А.17 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від легкого катка, 8 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 193,18 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

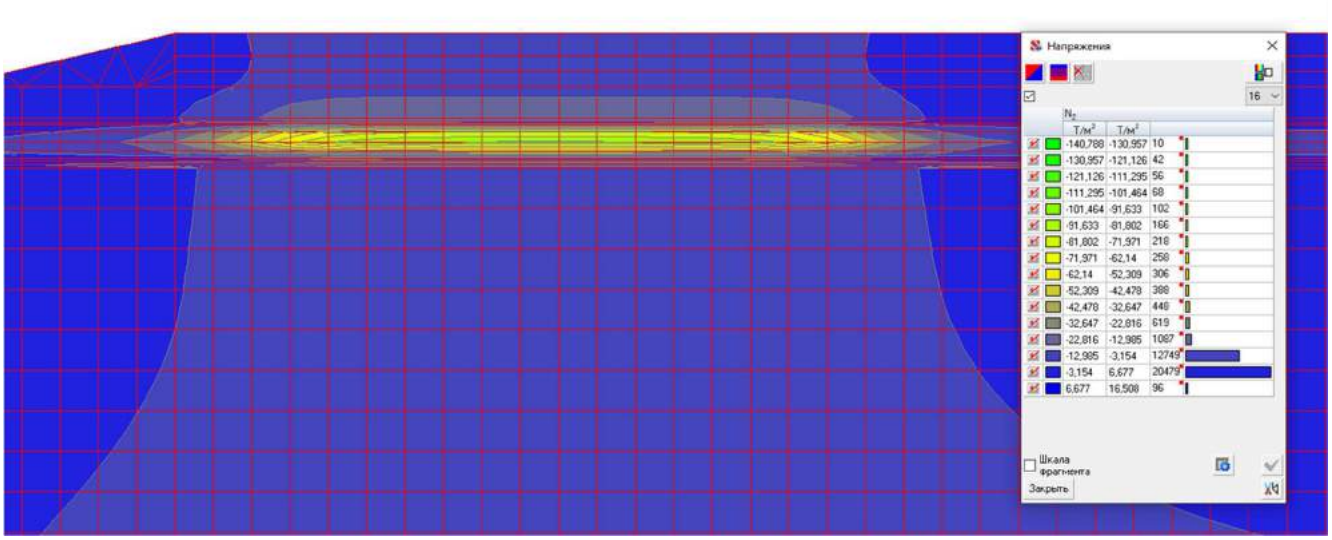


а)

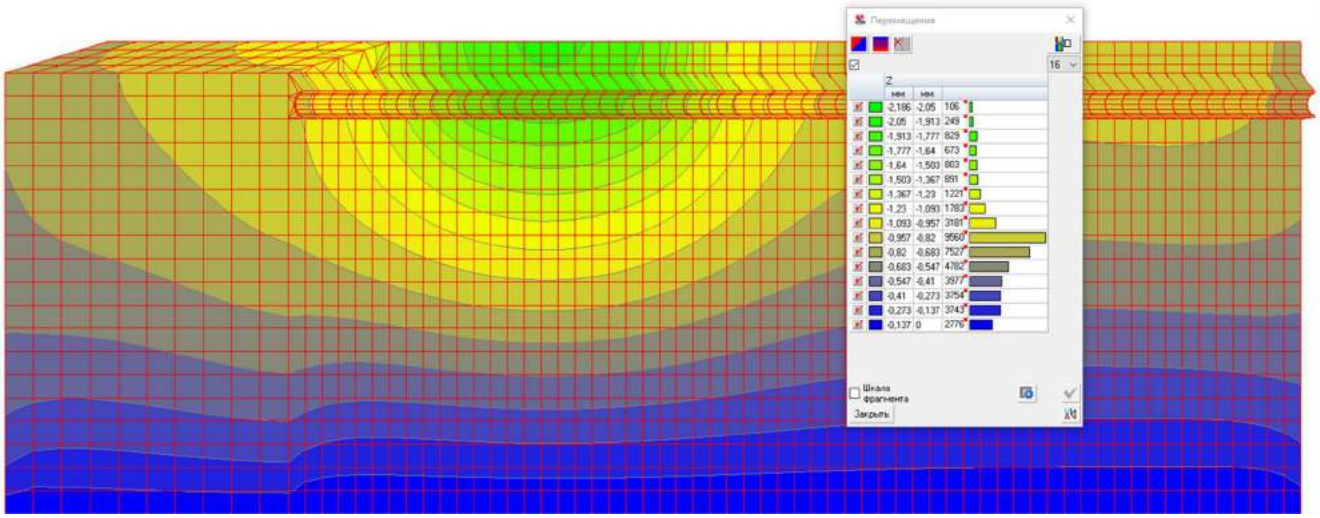


б)

Рисунок А.18 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від легкого катка, 8 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 204,5 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

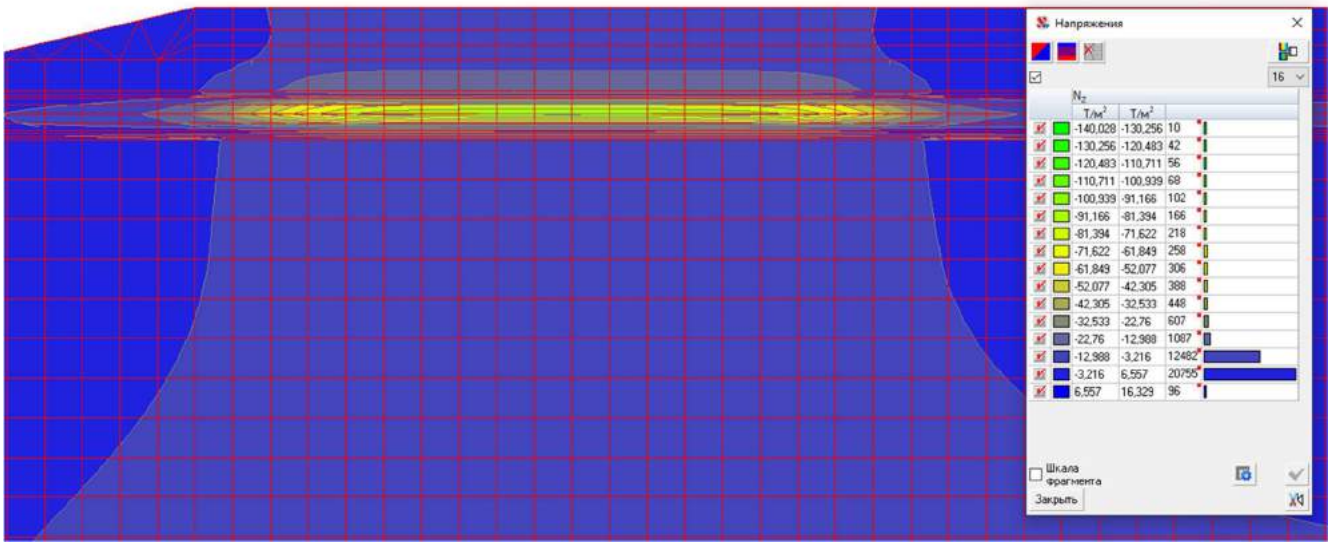


а)

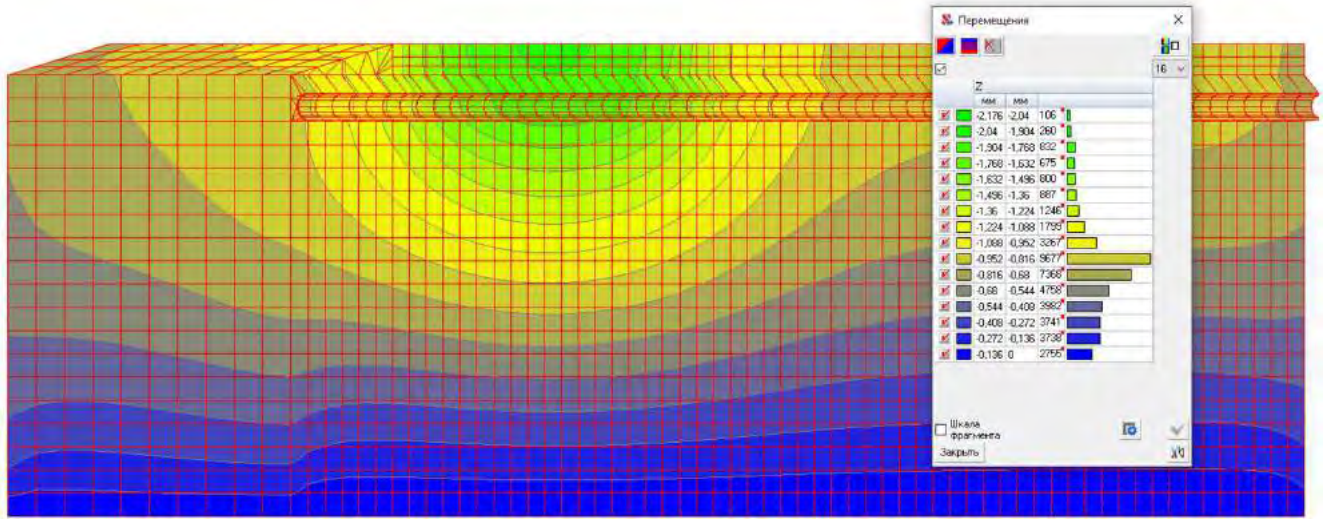


б)

Рисунок А.19 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 13 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 204,5 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

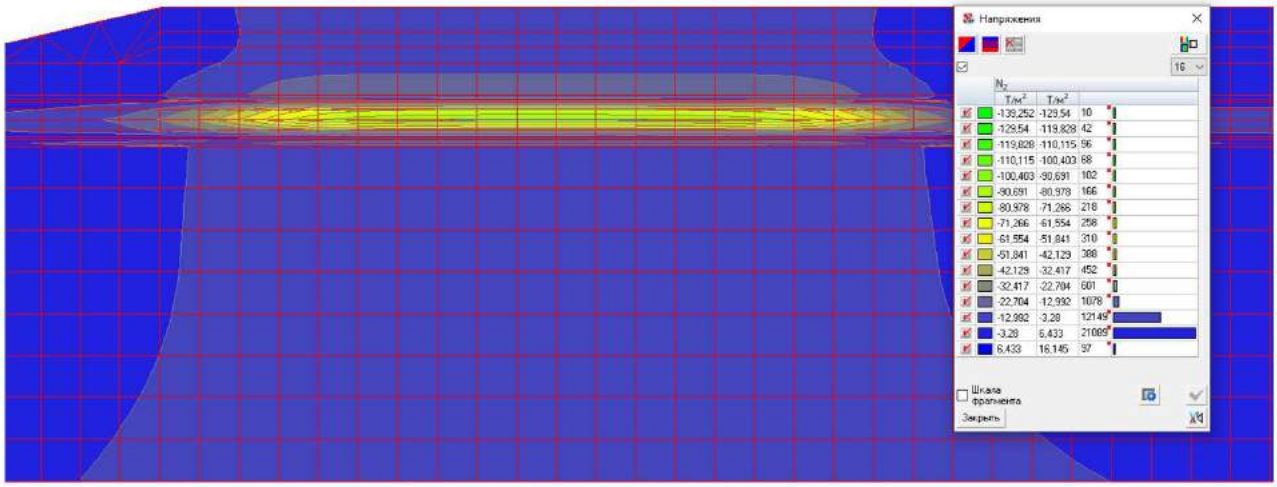


а)

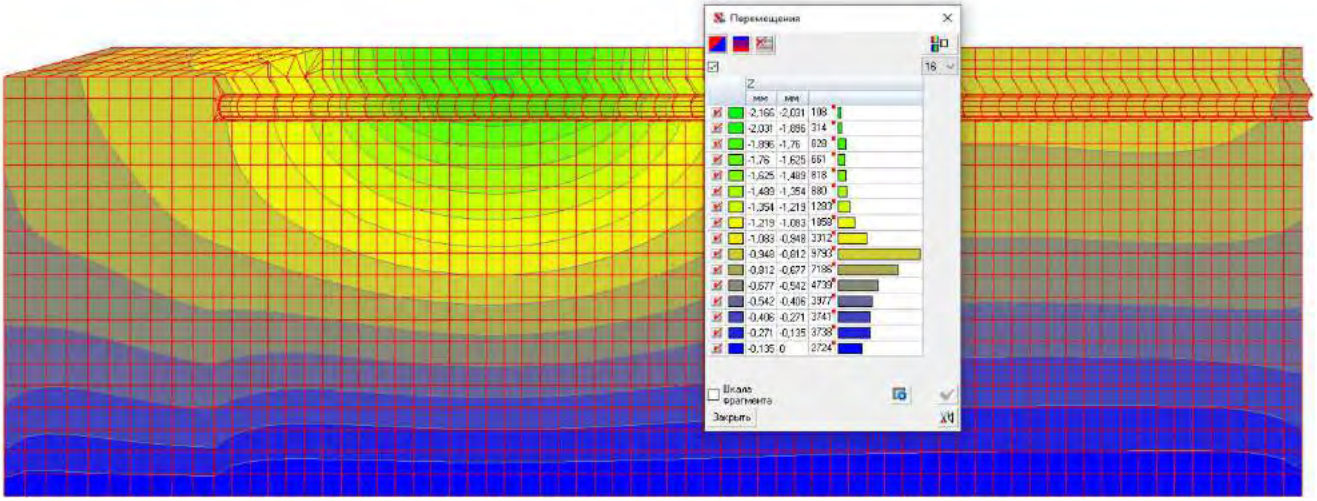


б)

Рисунок А.20 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 13 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 215,9 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

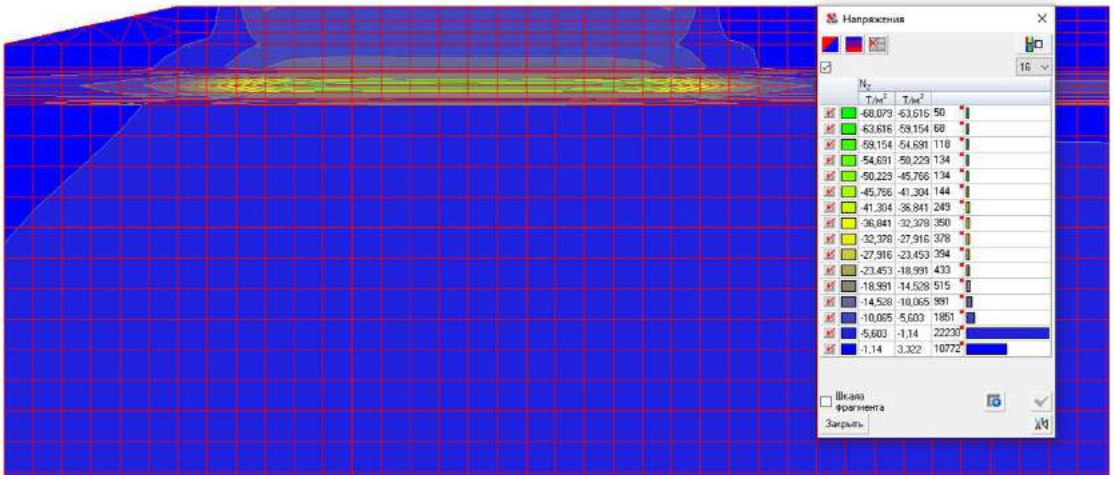


а)

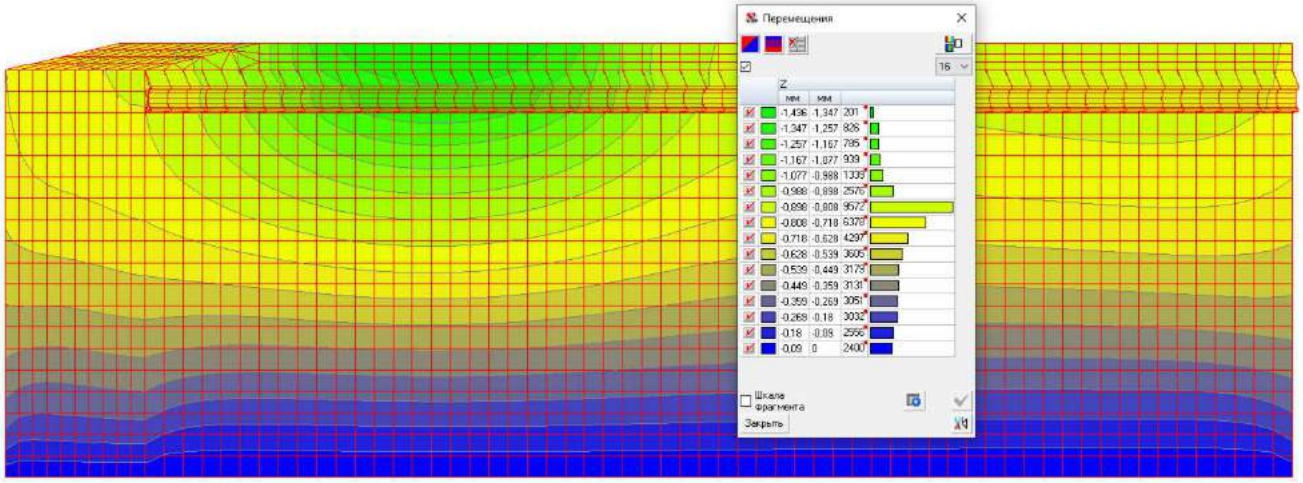


б)

Рисунок А.21 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 13 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 227,3 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

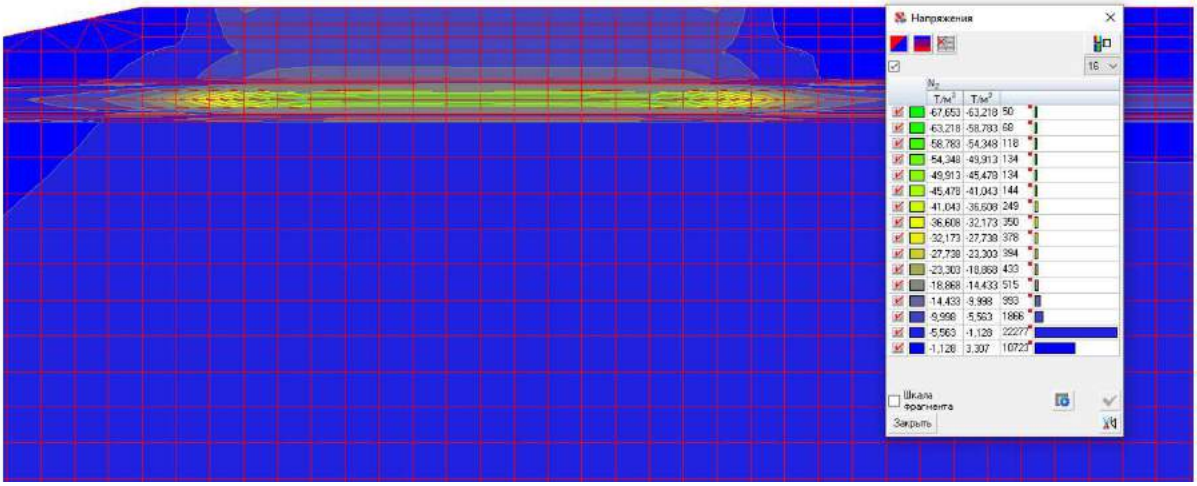


а)

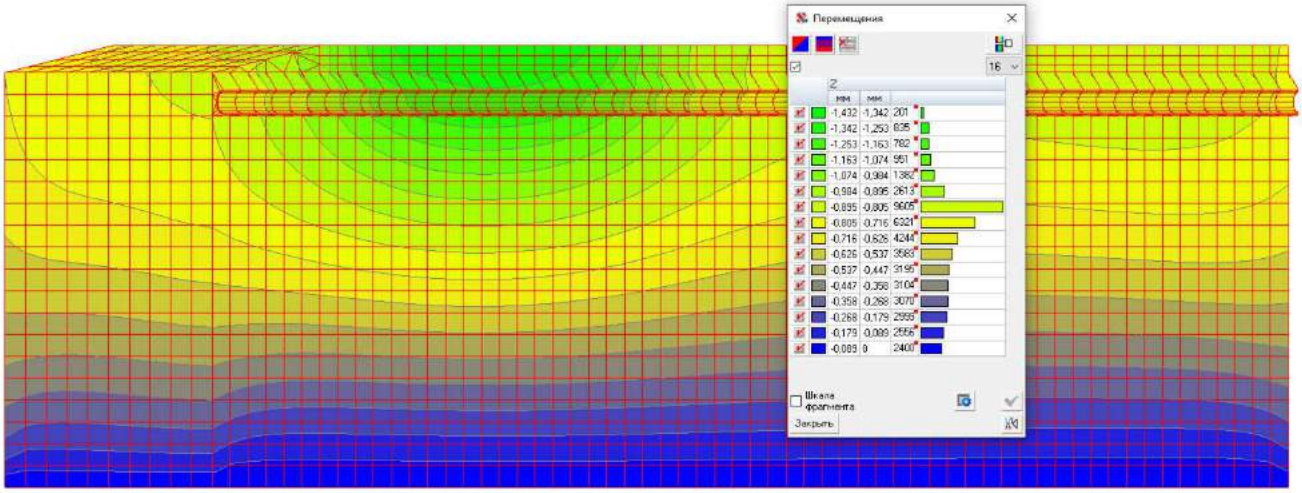


б)

Рисунок А.22 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від легкого катка, 8 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 193,18 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

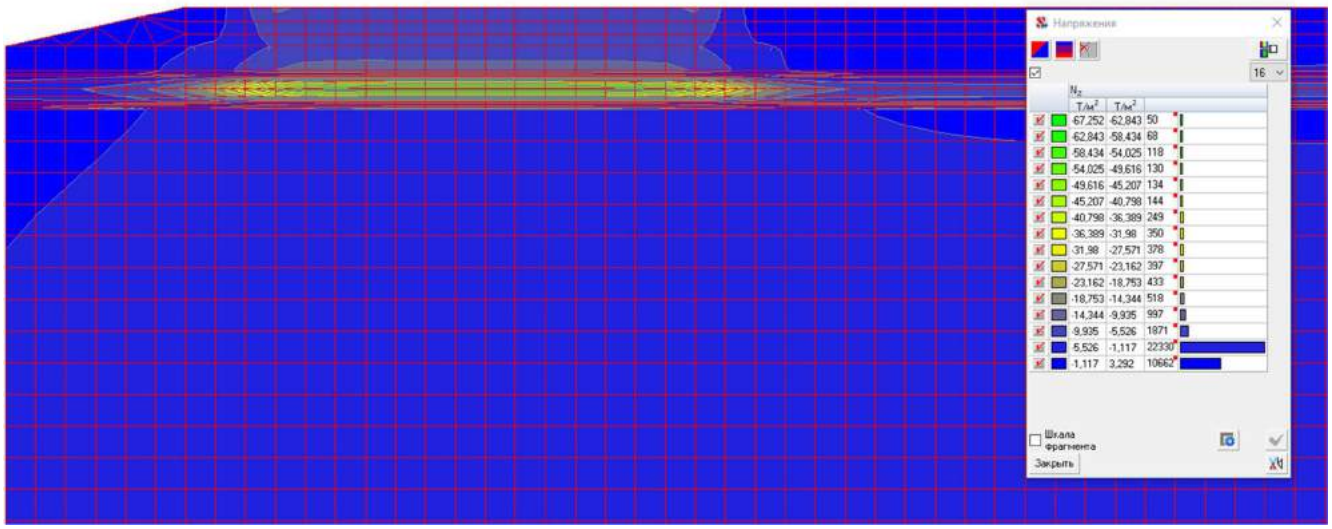


а)

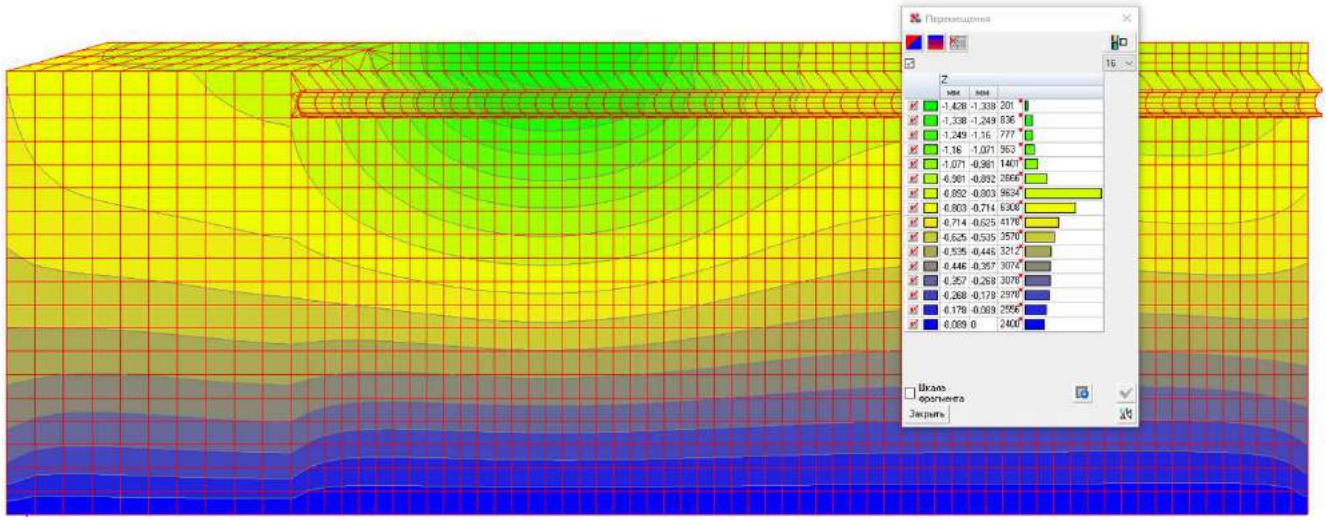


б)

Рисунок А.23 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від легкого катка, 8 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 204,5 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

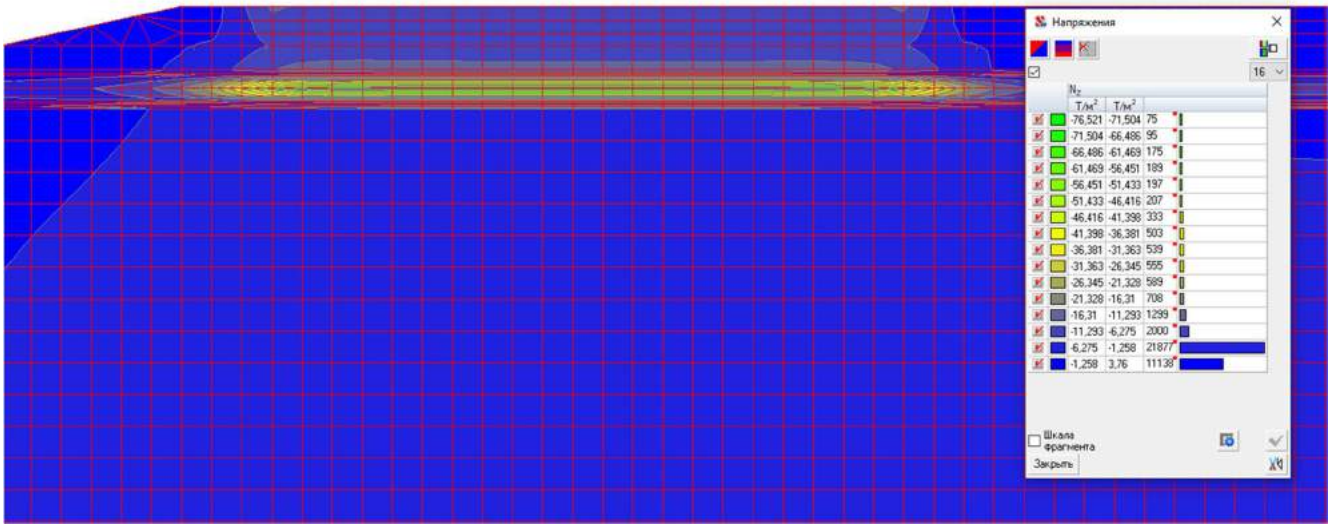


а)

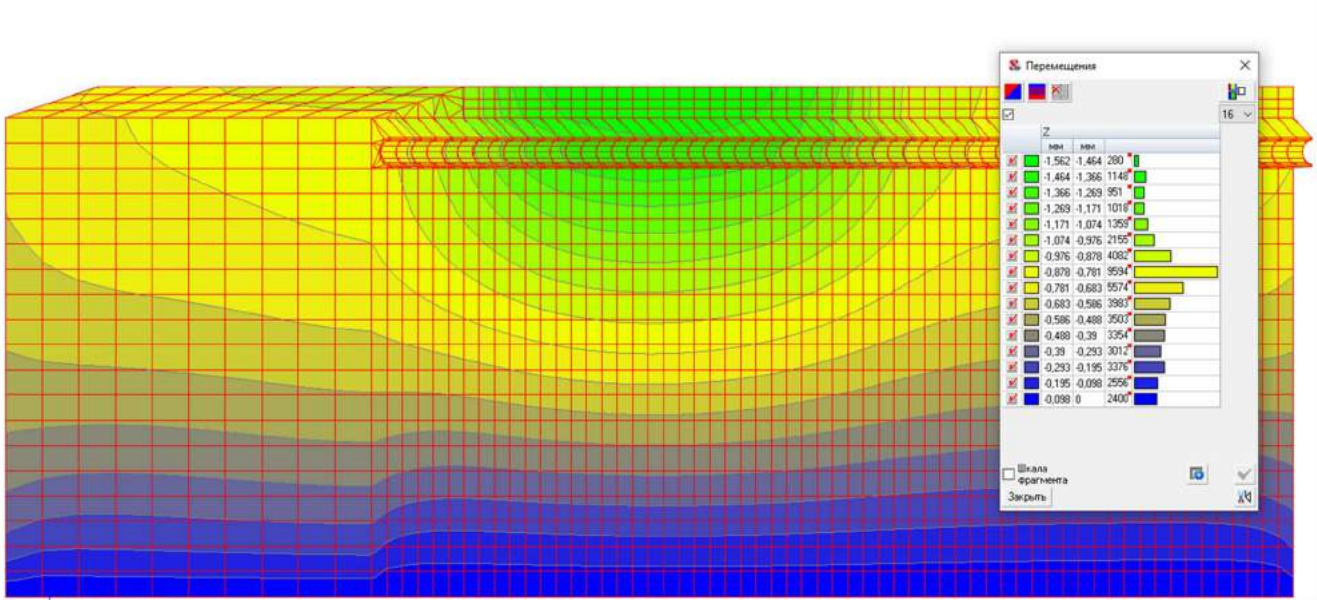


б)

Рисунок А.24 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від легкого катка, 8 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 215,9 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

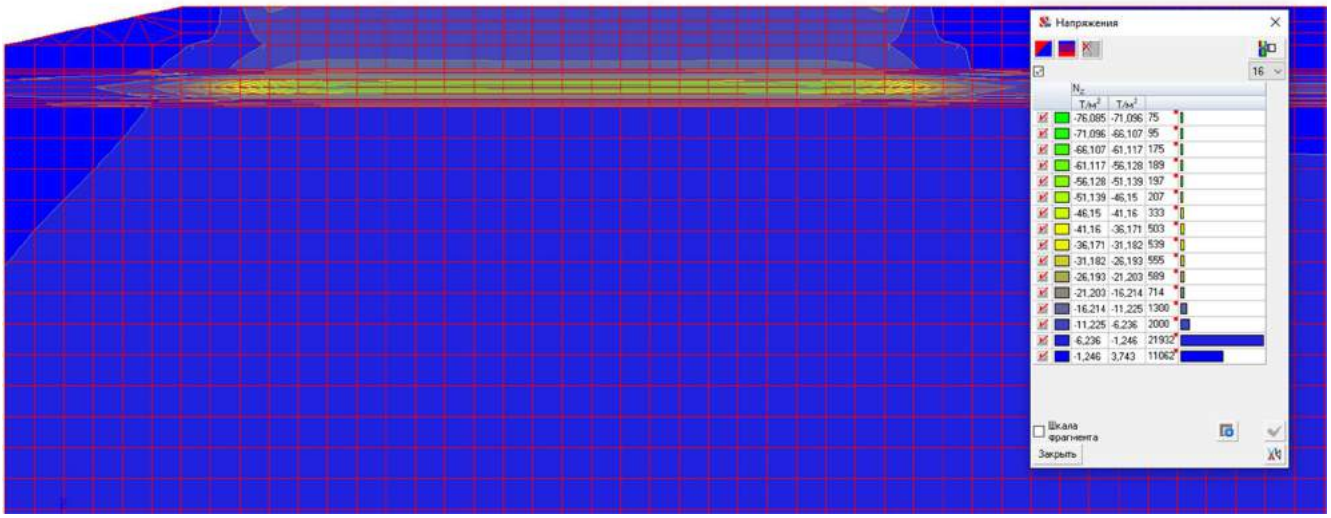


а)

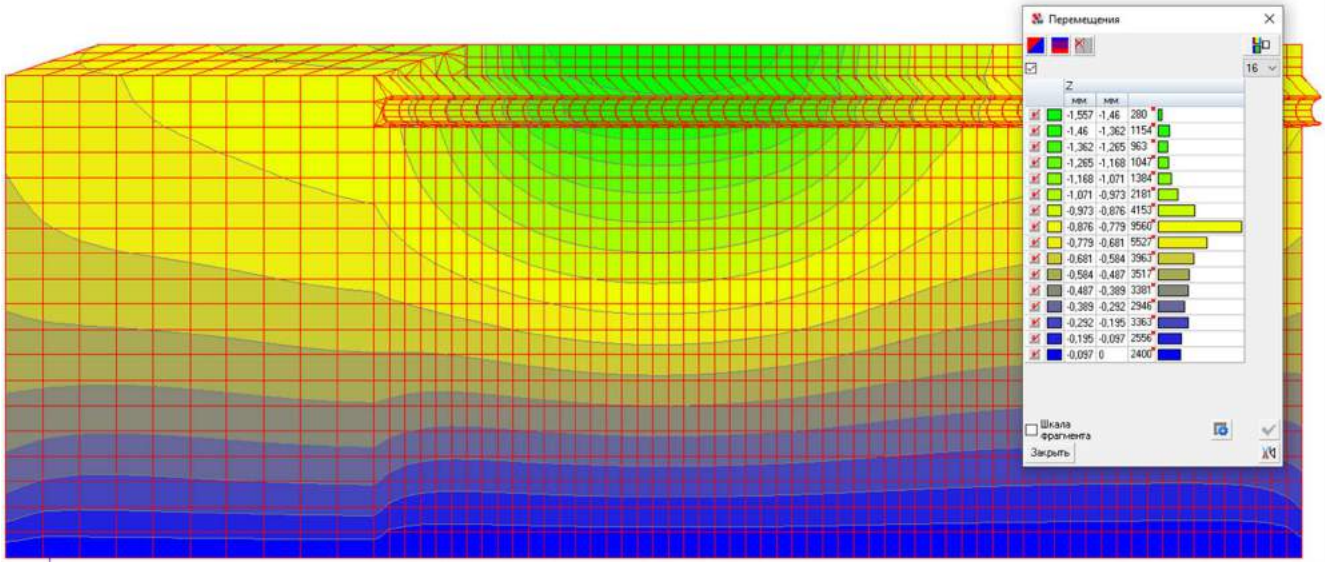


б)

Рисунок А.25 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 13 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 215,9 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

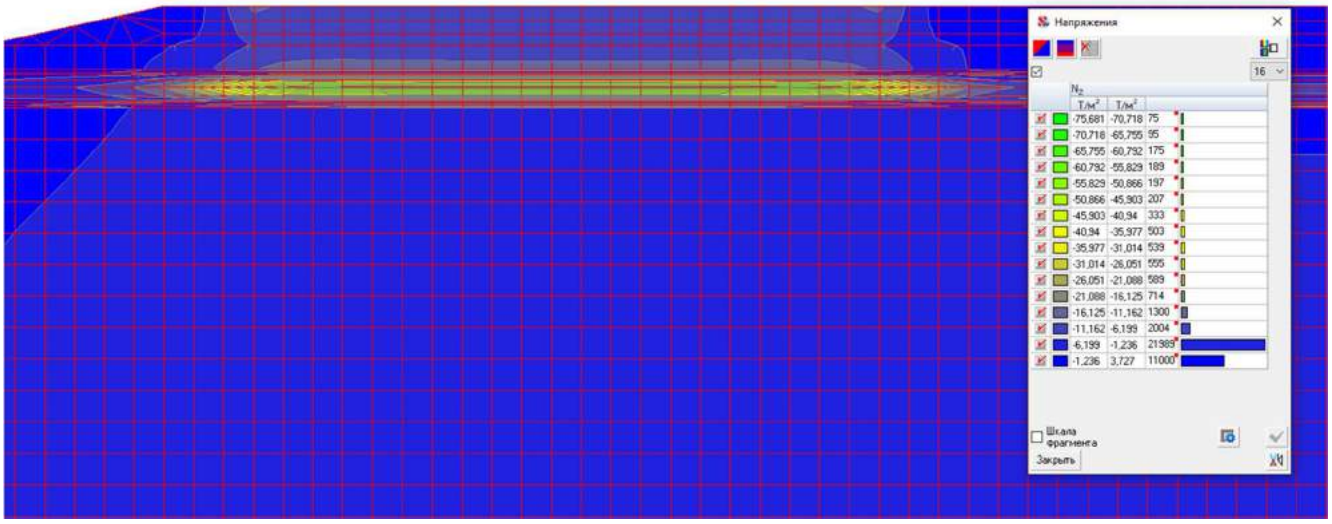


а)

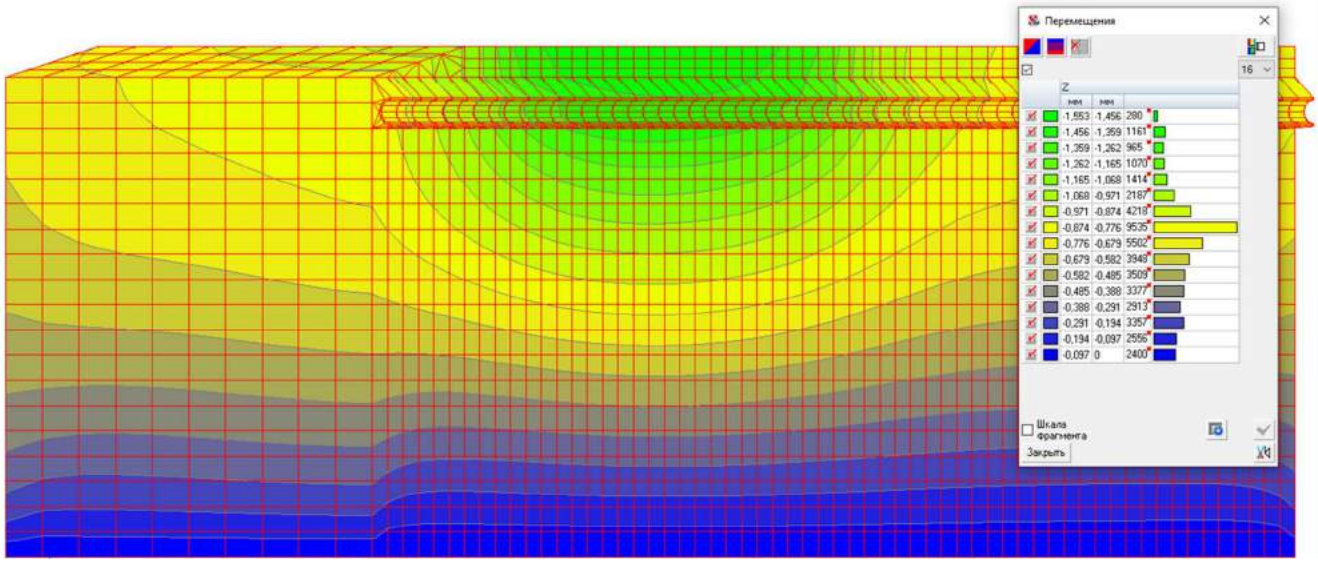


б)

Рисунок А.26 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 13 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 227,3 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

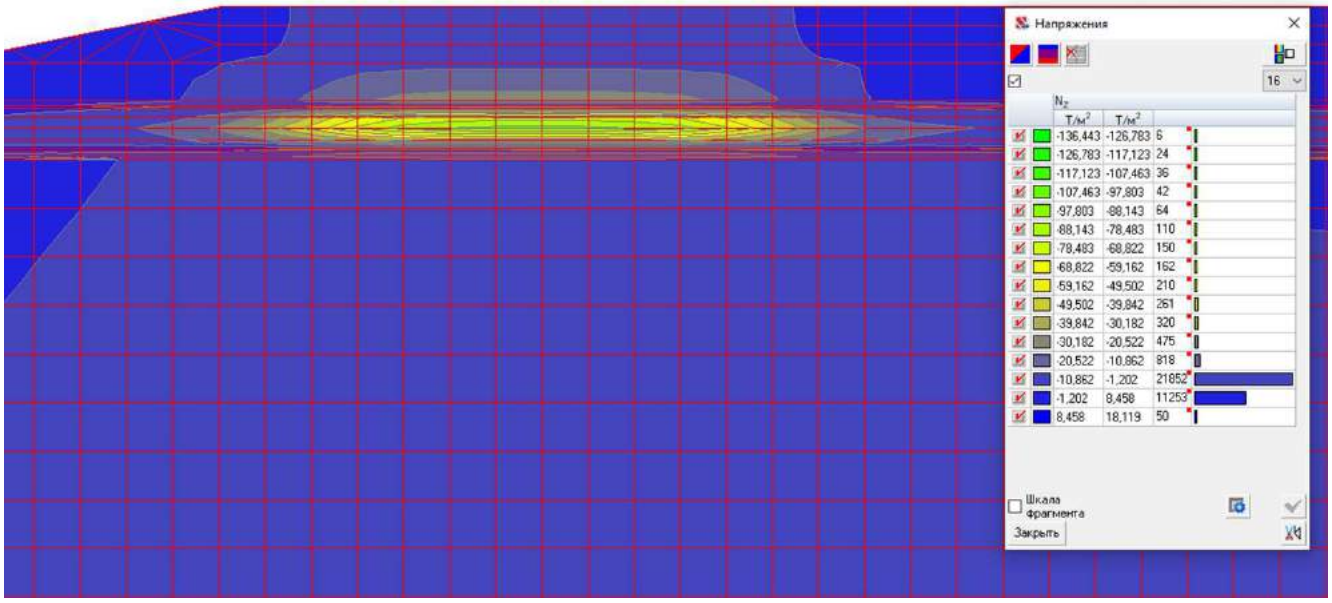


а)

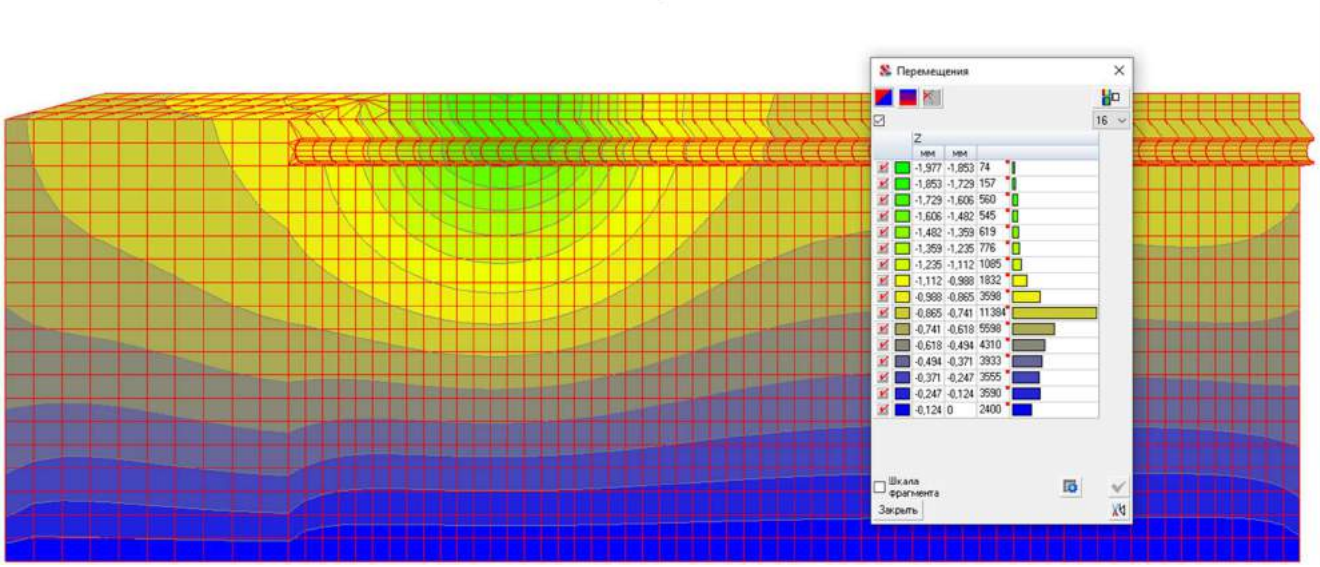


б)

Рисунок А.27 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 13 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 238,6 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

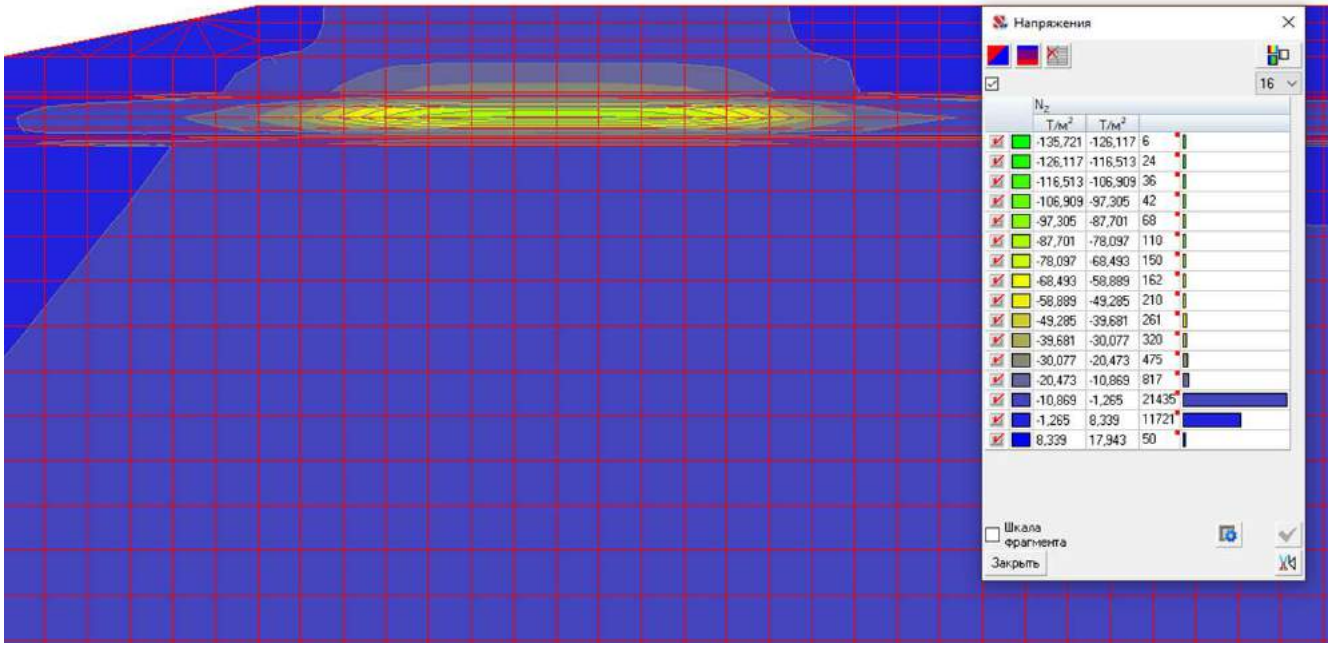


а)

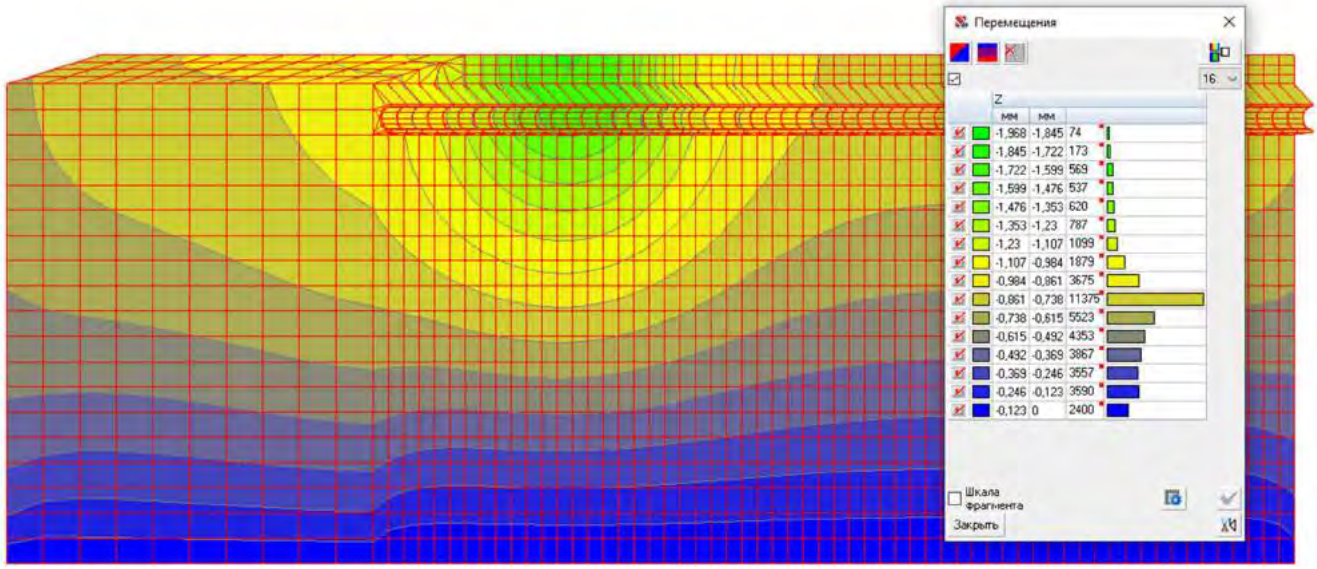


б)

Рисунок А.28 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 13 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 227,3 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

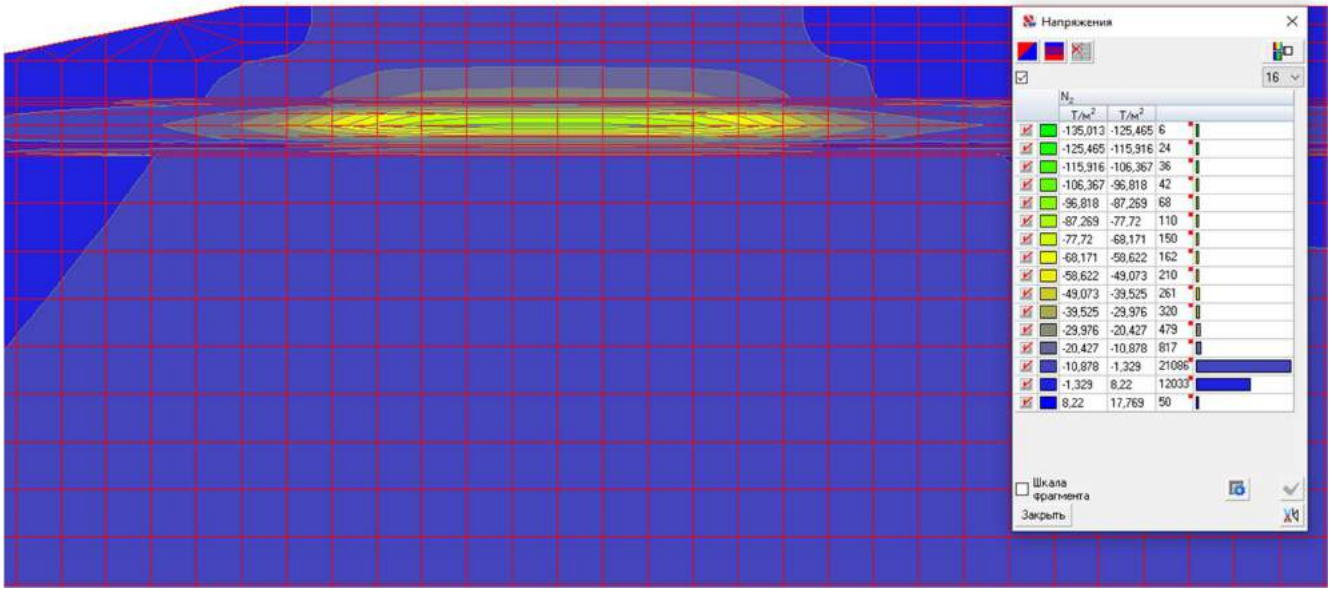


а)

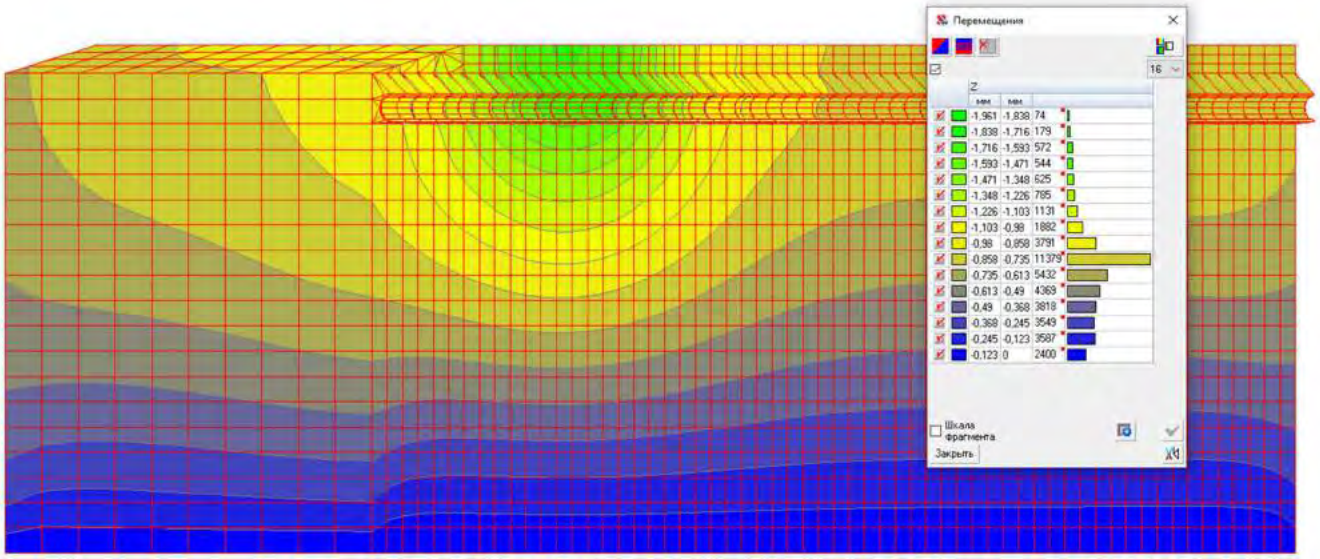


б)

Рисунок А.29 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 13 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 238,6 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні



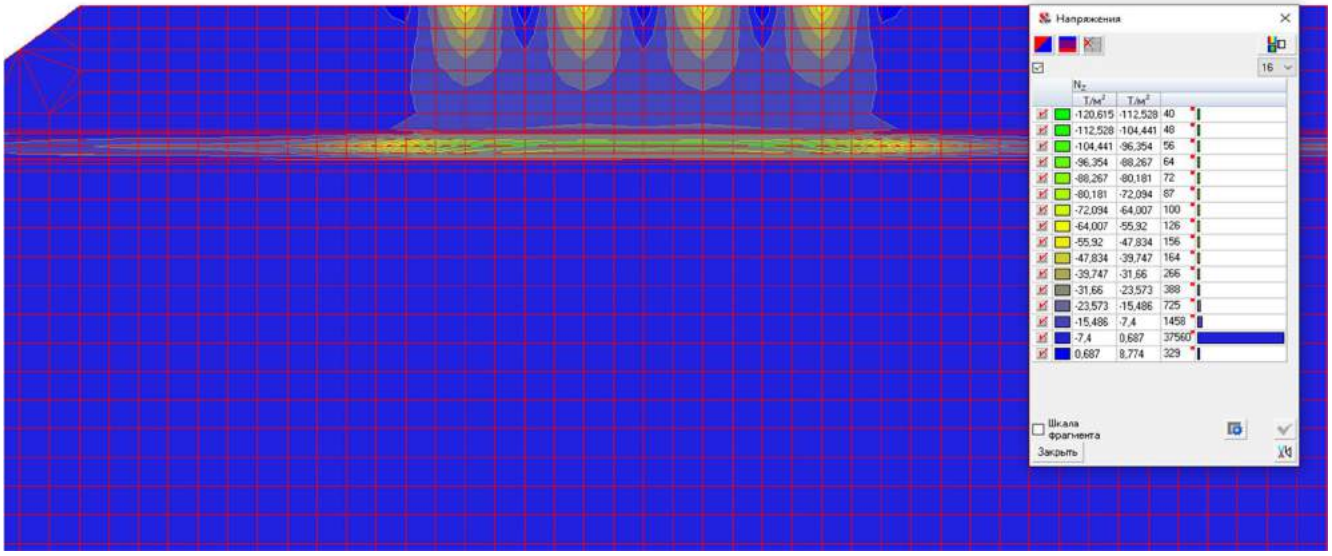
а)



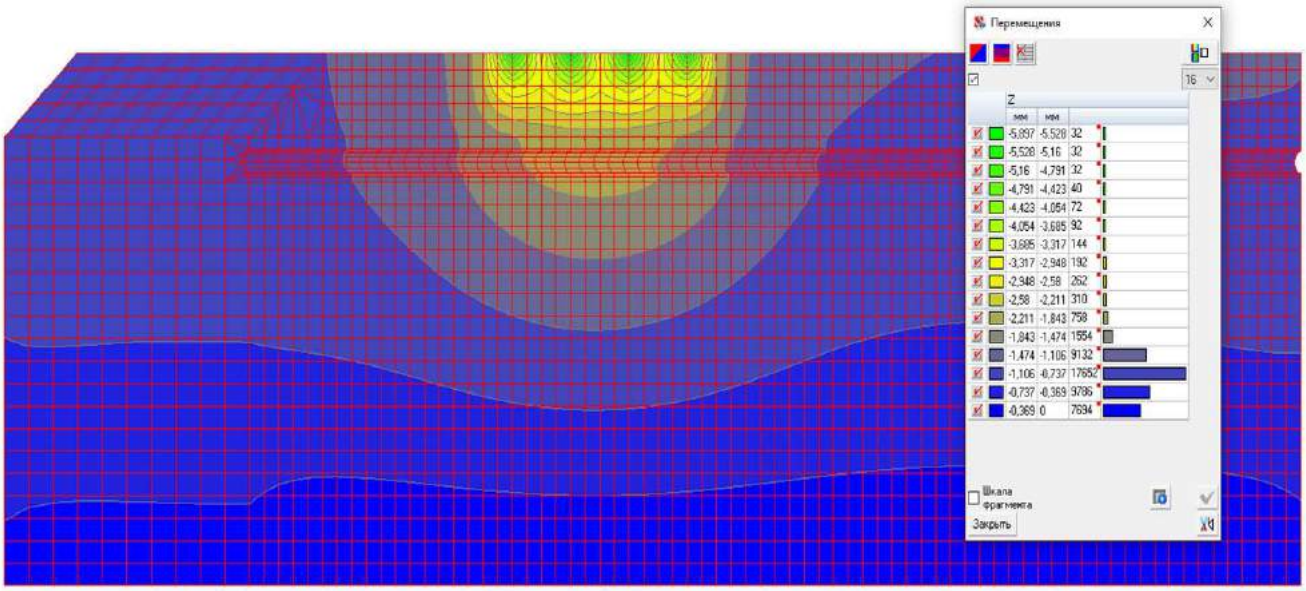
б)

Рисунок А.30 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 13 т., при ущільненні дренувального шару з щебеню з модулем пружності 250 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

А.4 Розподіл ізополів та ізоліній нормальних напружень *Nz* та деформацій *Z* в дорожній конструкції з поперечним дренажем мілкого закладання з піщаним дренувальним шаром та бетонною трубою

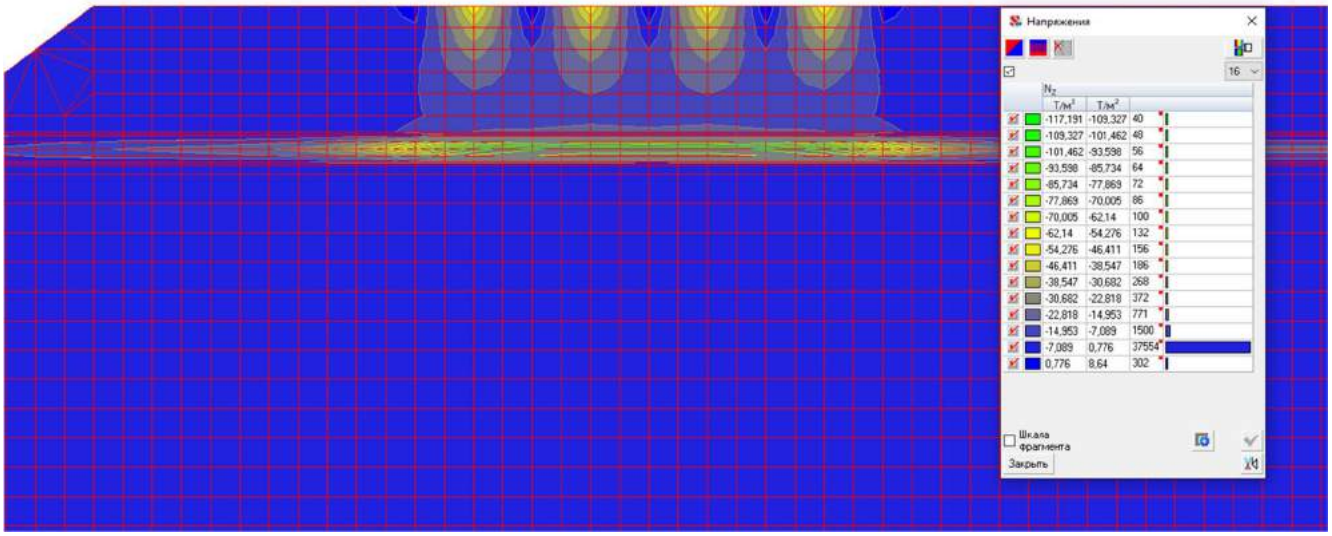


а)

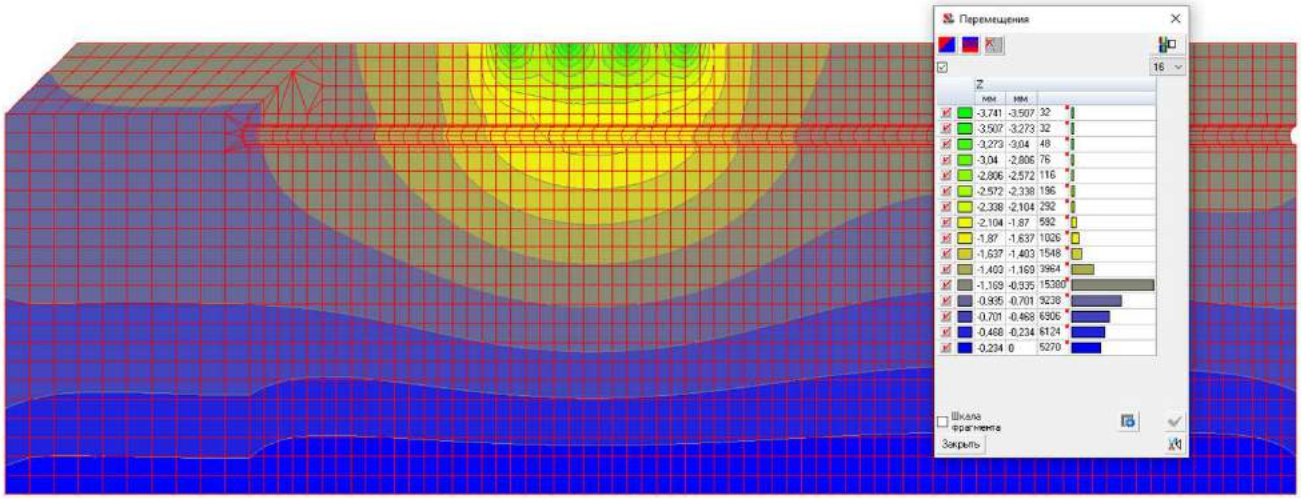


б)

Рисунок А.31 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 16 т., при ущільненні піщаного дренувального шару з модулем пружності 20,45 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

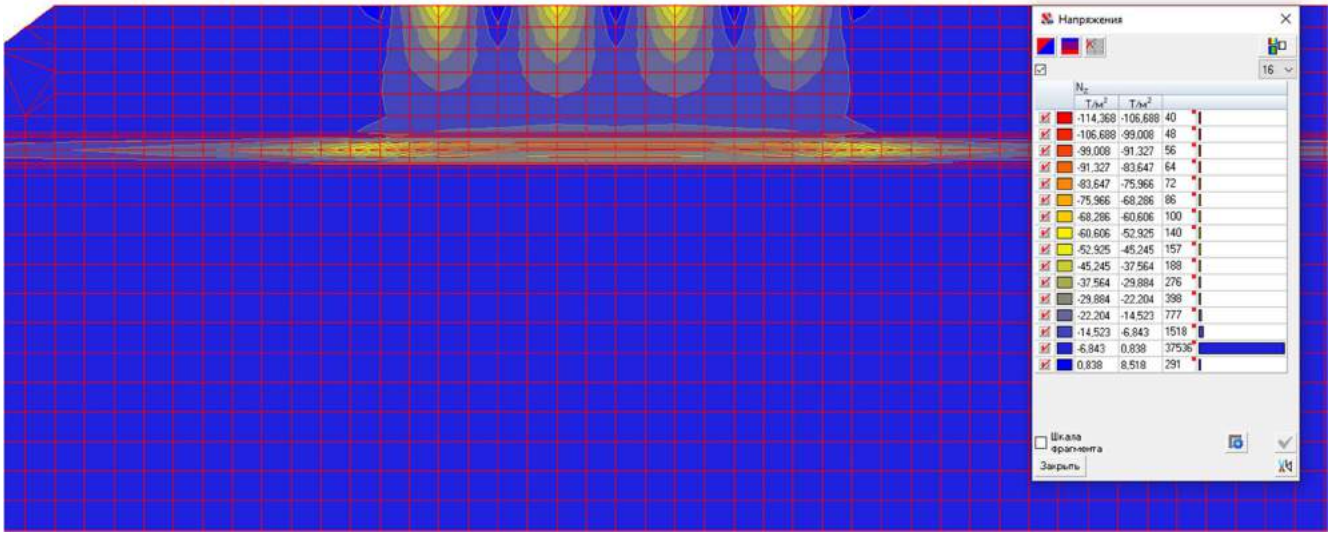


а)

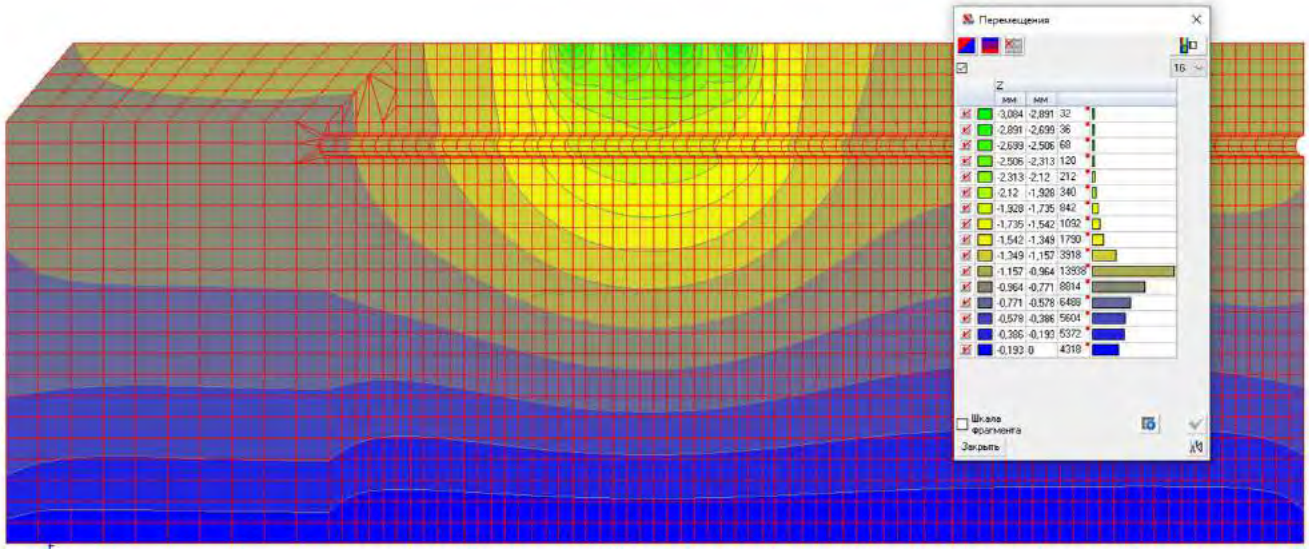


б)

Рисунок А.32 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від важкого катка, 30 т., при ущільненні піщаного дренувального шару з модулем пружності 44,5 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

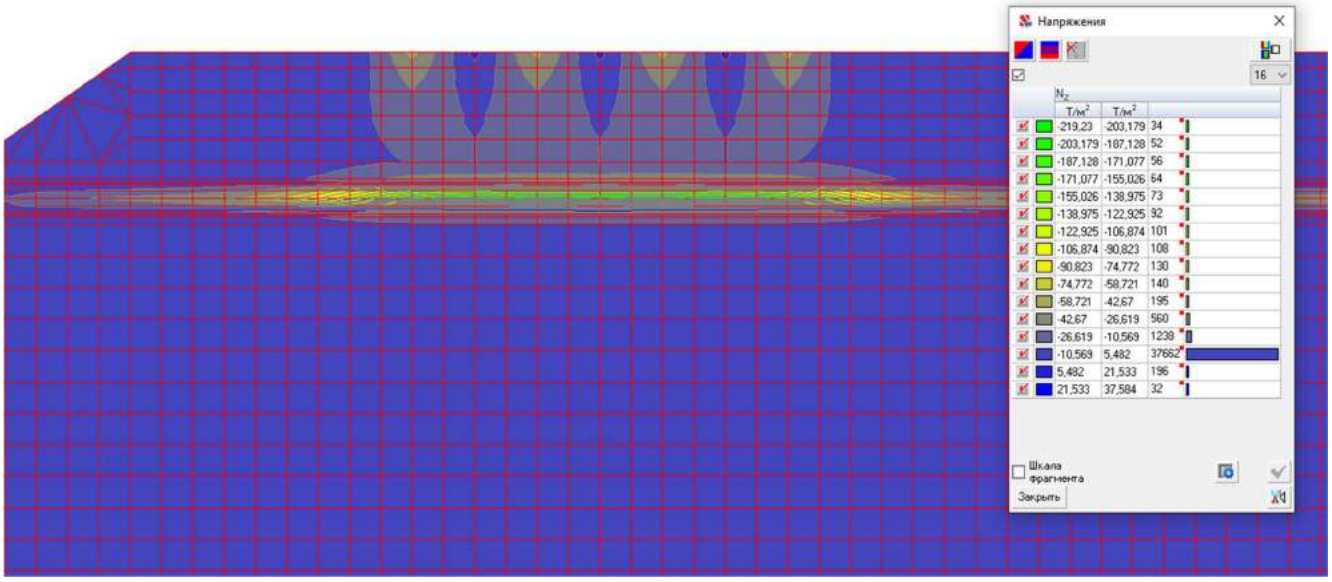


а)

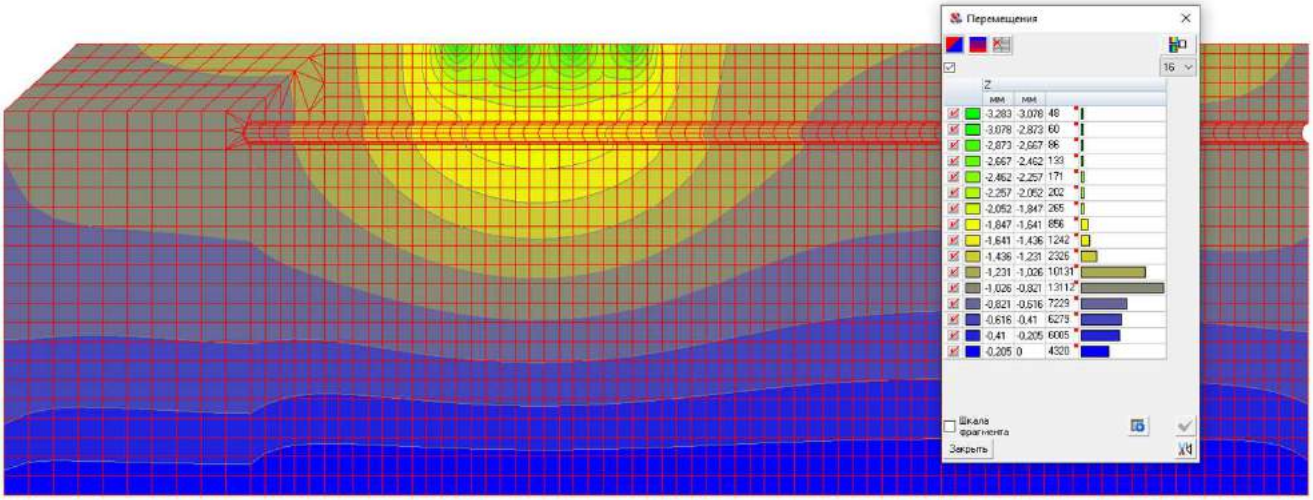


б)

Рисунок А.33 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від важкого катка, 30 т., при ущільненні піщаного дренувального шару з модулем пружності 68,5 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

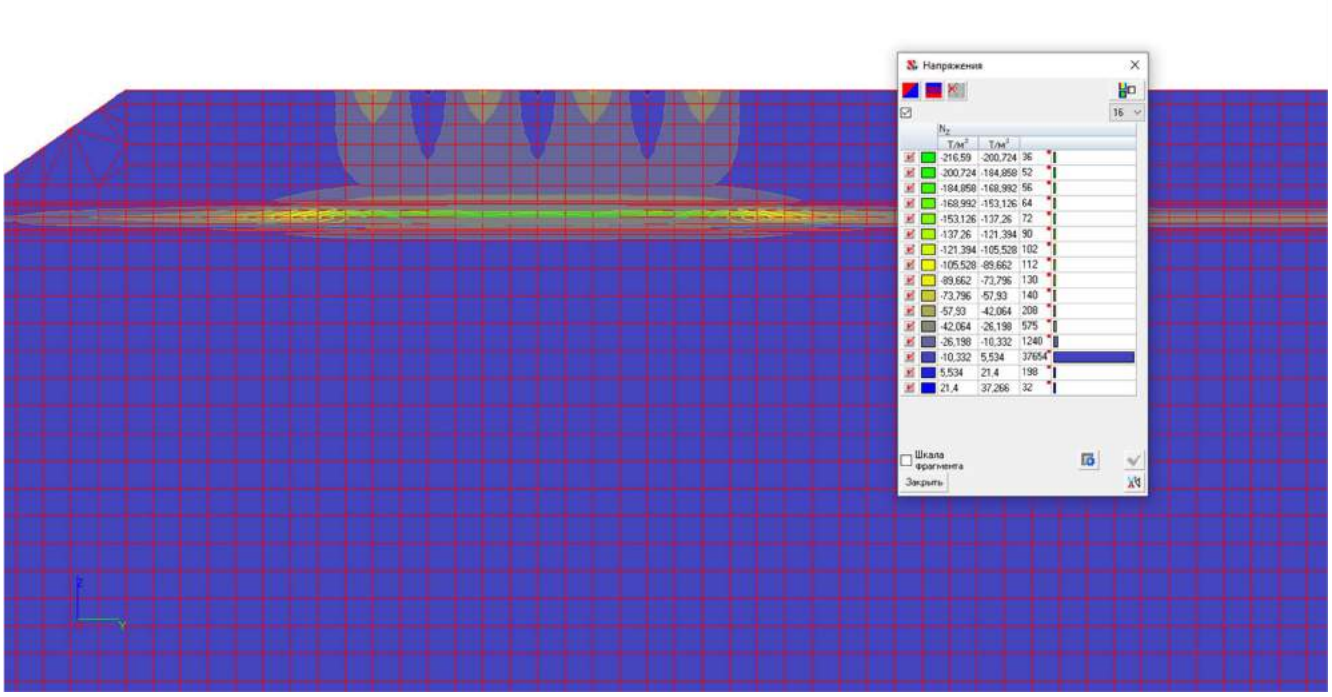


а)

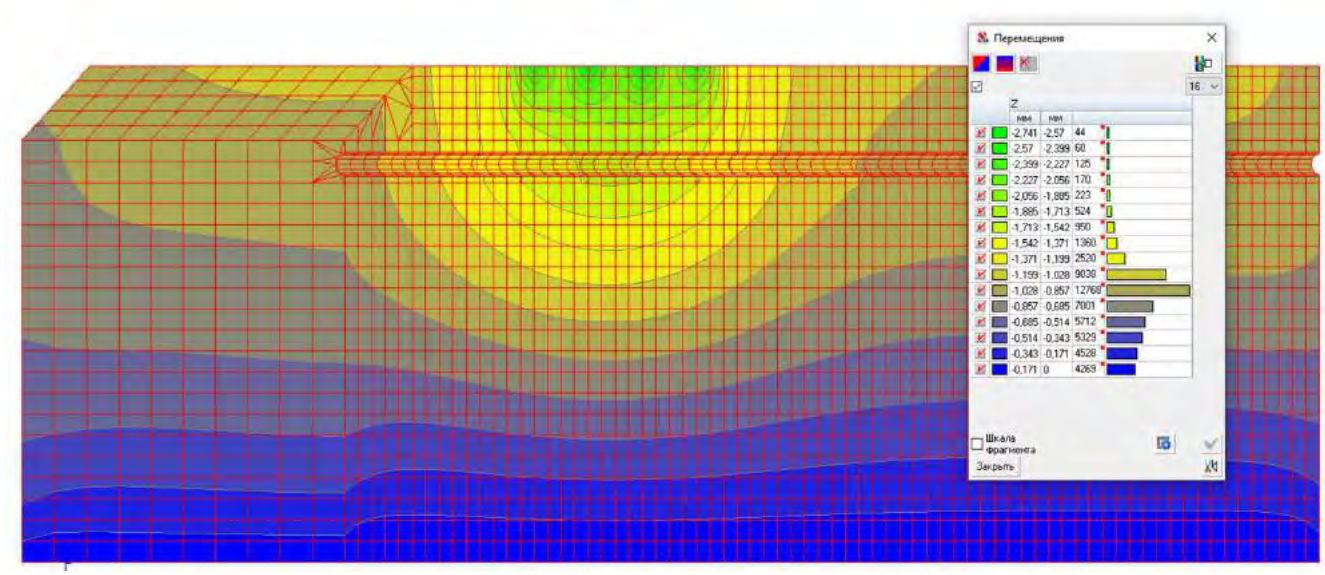


б)

Рисунок А.34 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 16 т., при ущільненні піщаного дренувального шару з модулем пружності 44,5 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

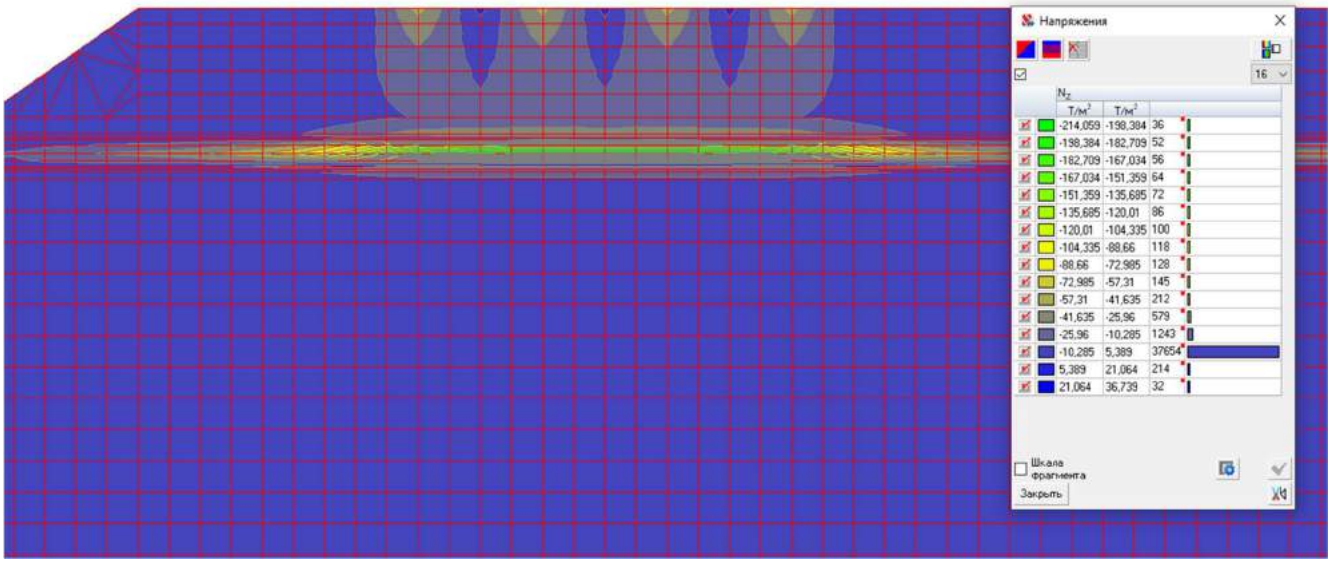


а)

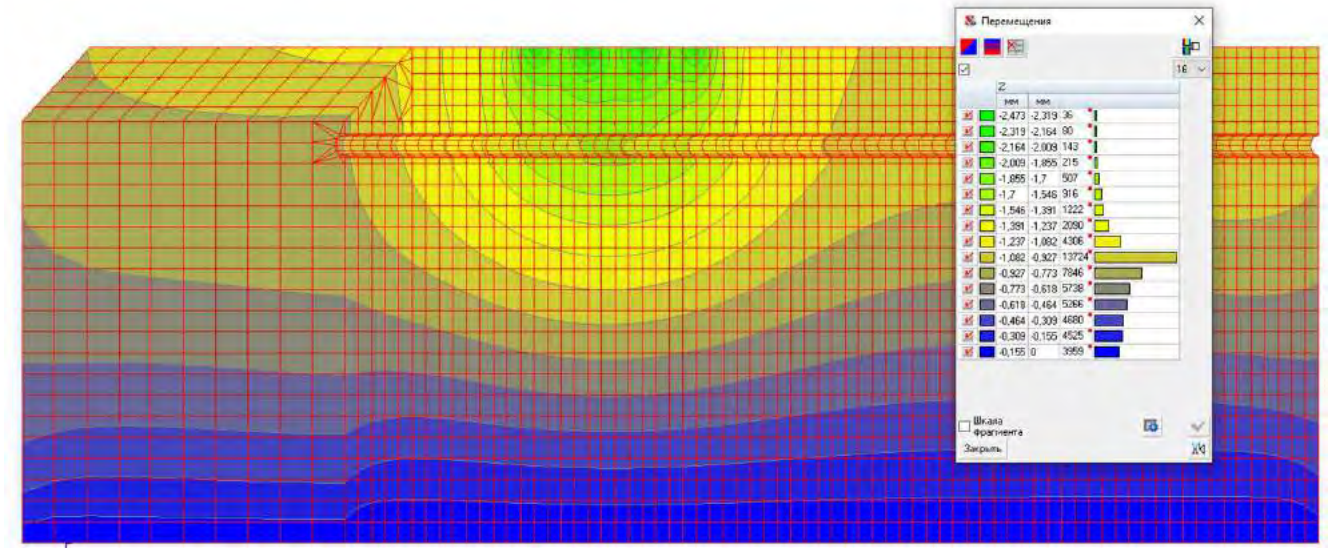


б)

Рисунок А.35 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від важкого катка, 30 т., при ущільненні піщаного дренувального шару з модулем пружності 68,5 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

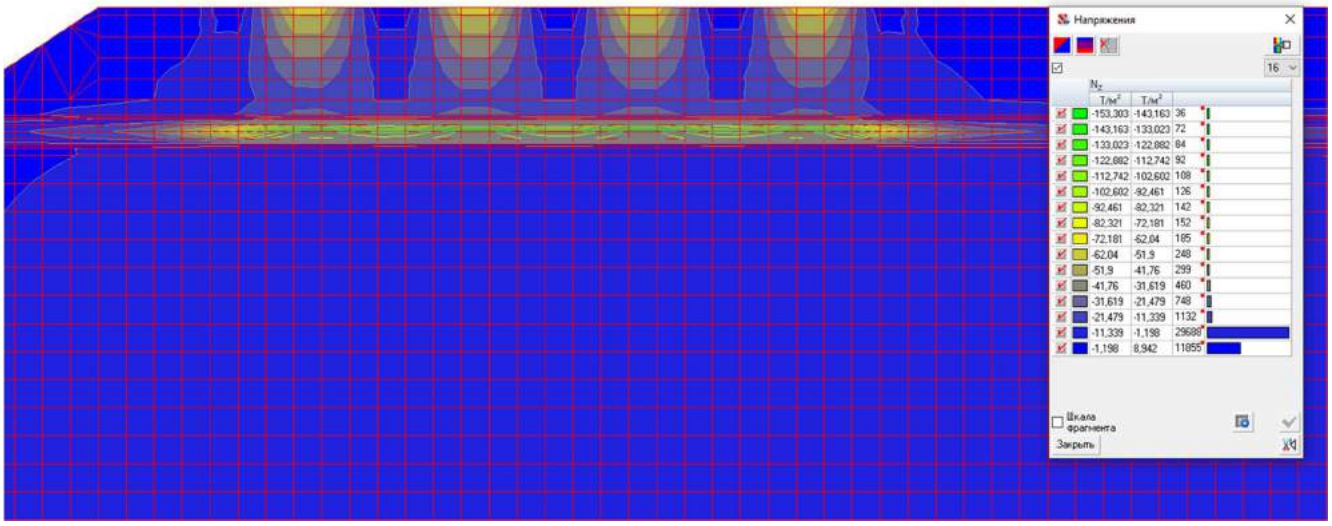


а)

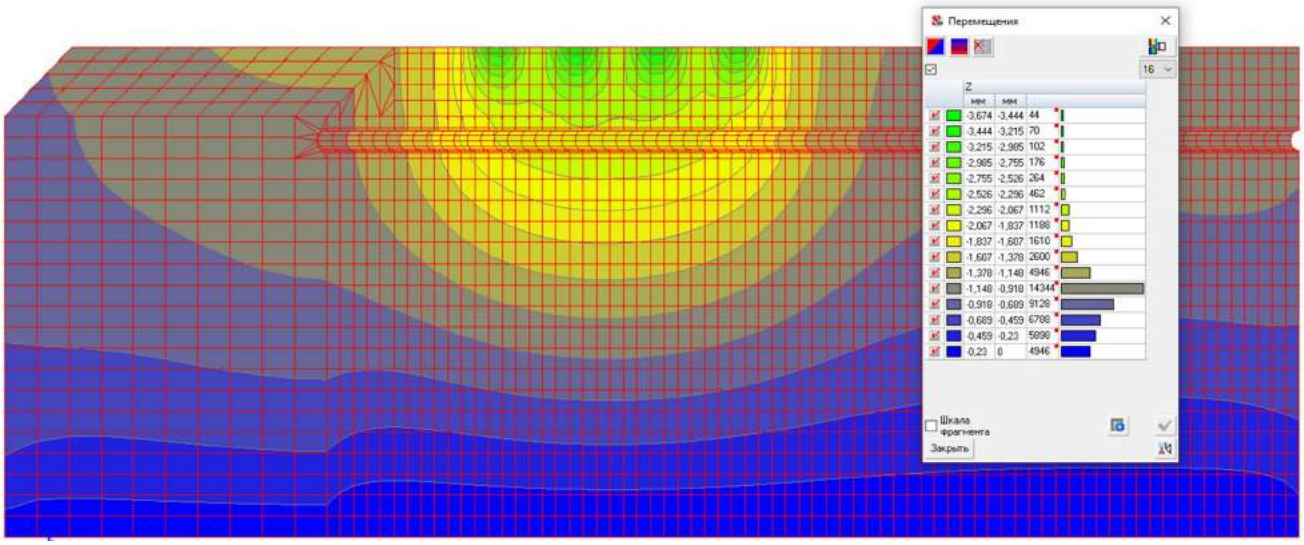


б)

Рисунок А.36 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від важкого катка, 30 т., при ущільненні піщаного дренувального шару з модулем пружності 92,5 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

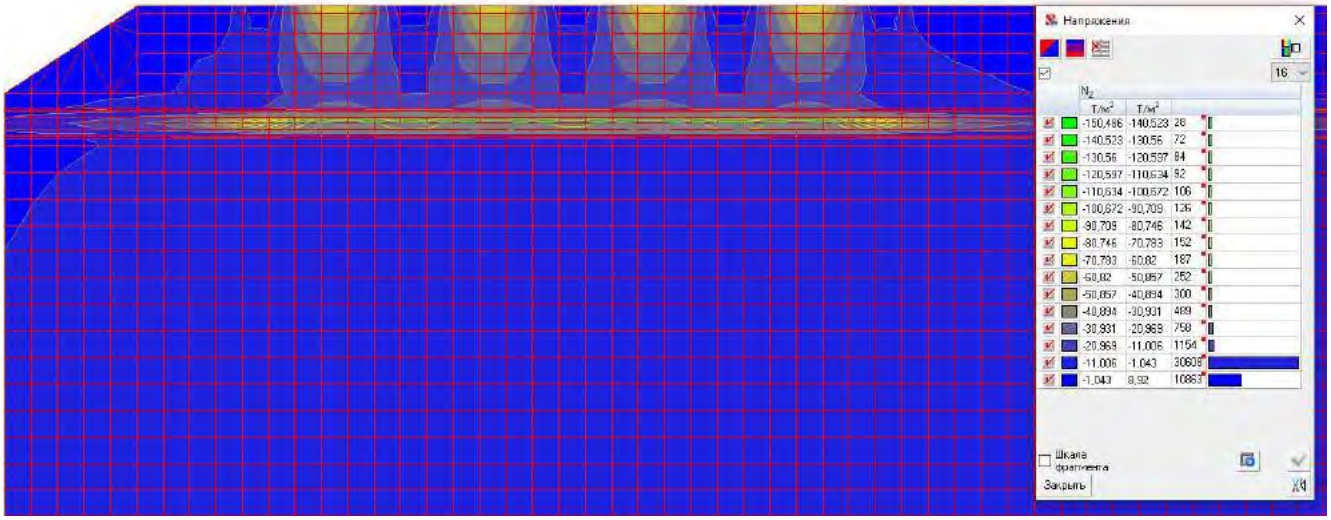


а)

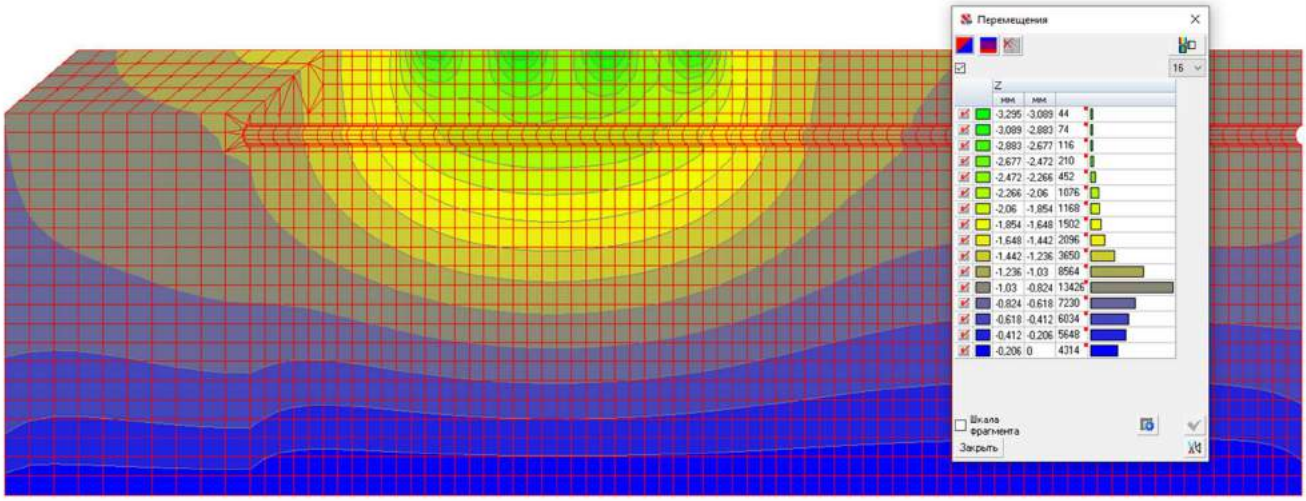


б)

Рисунок А.37 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 16 т., при ущільненні піщаного дренувального шару з модулем пружності 68,5 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

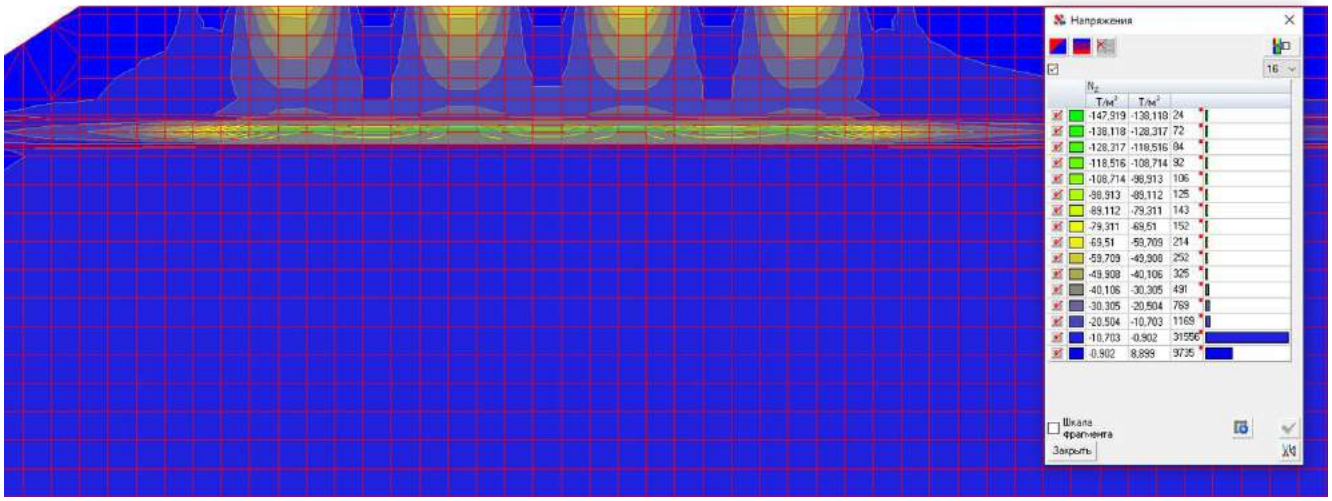


а)

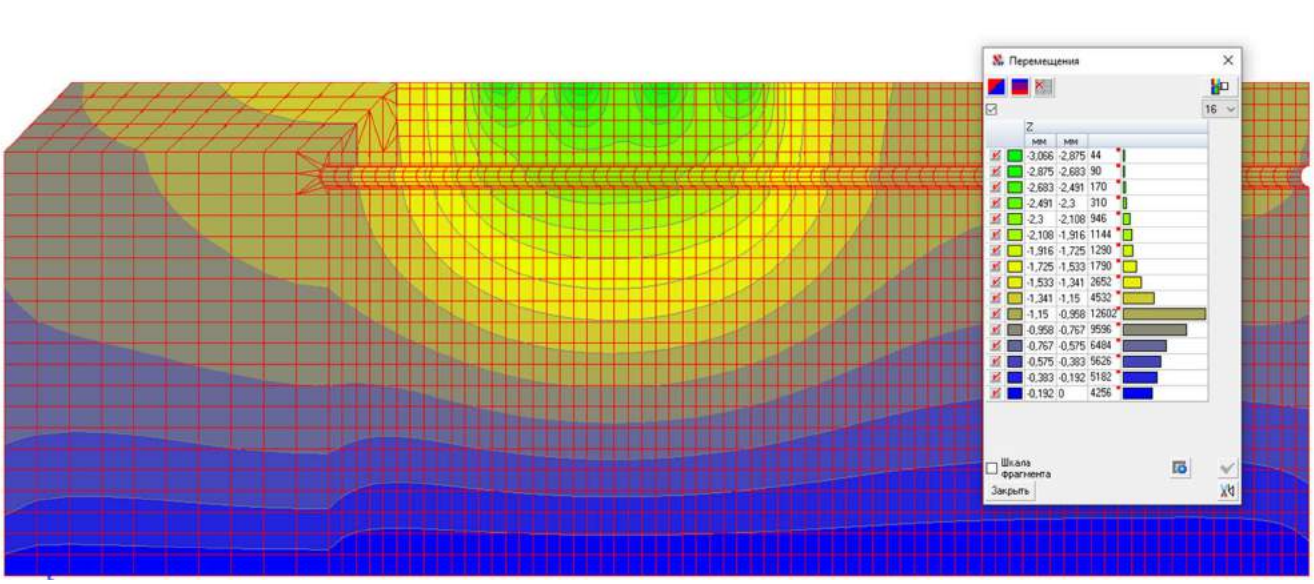


б)

Рисунок А.38 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від важкого катка, 30 т., при ущільненні піщаного дренувального шару з модулем пружності 92,5 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

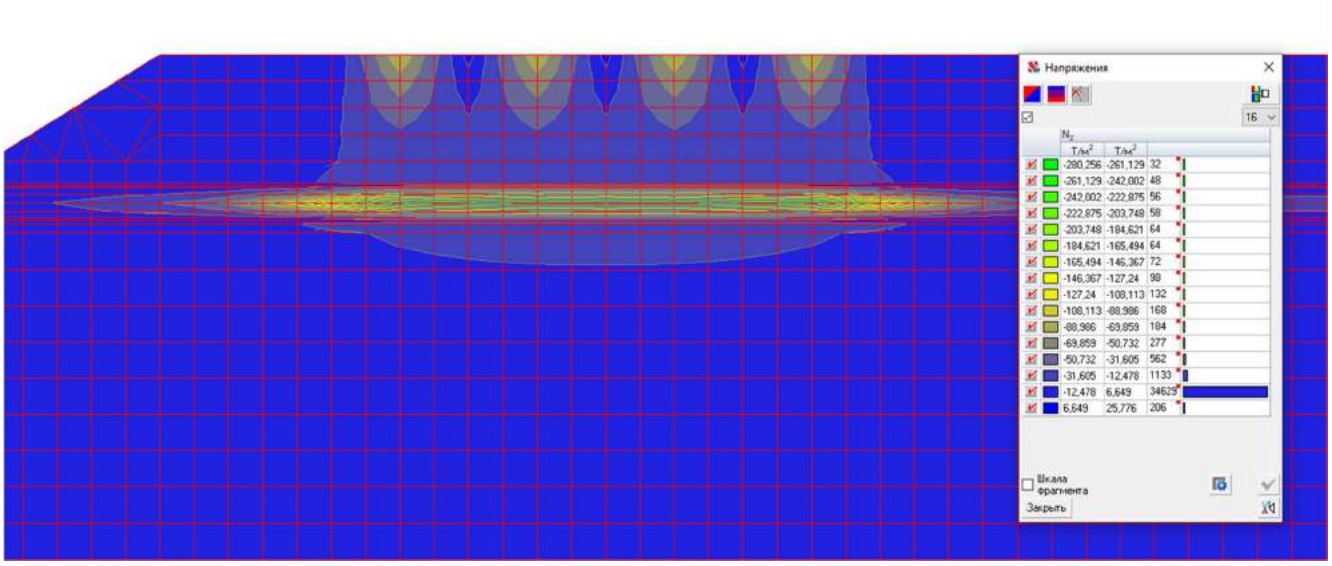


а)

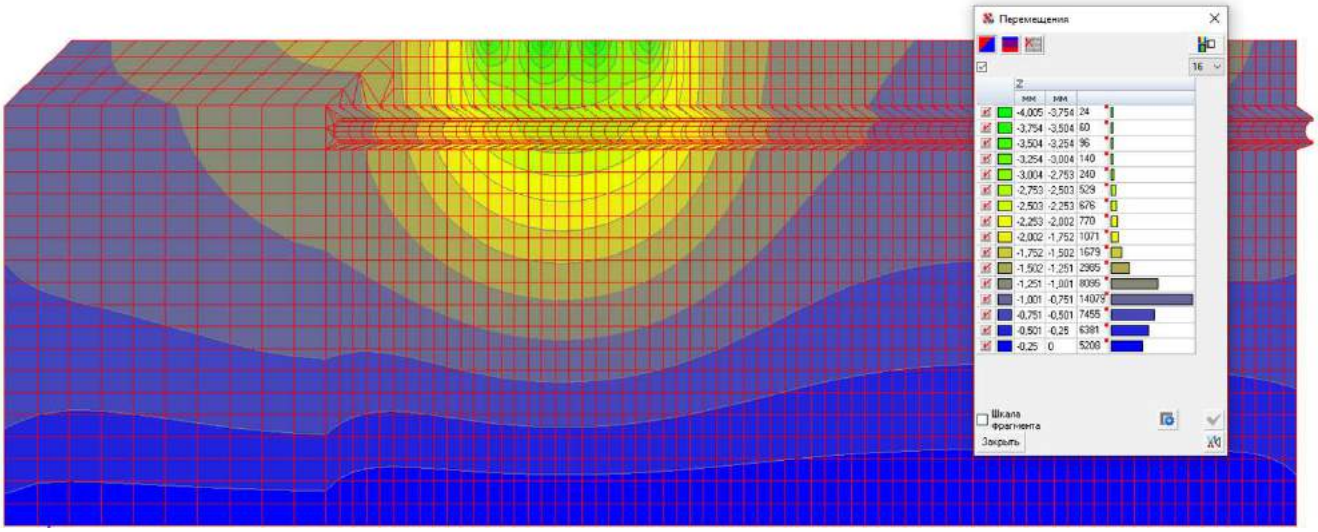


б)

Рисунок А.39 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від важкого катка, 30 т., при ущільненні піщаного дренувального шару з модулем пружності 116,6 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

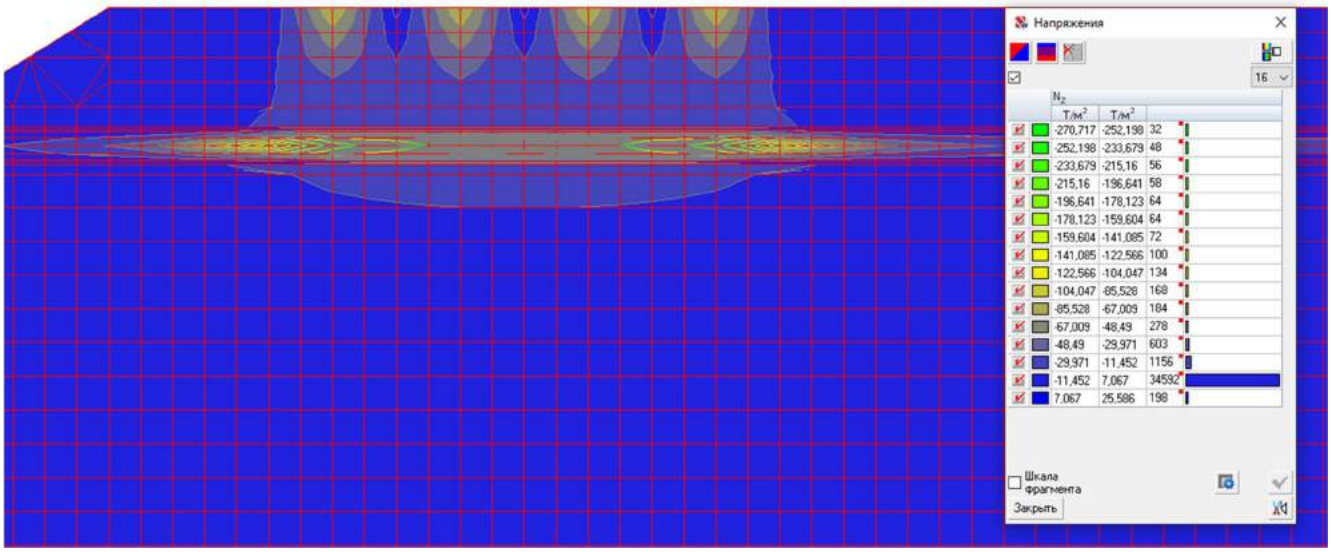


а)

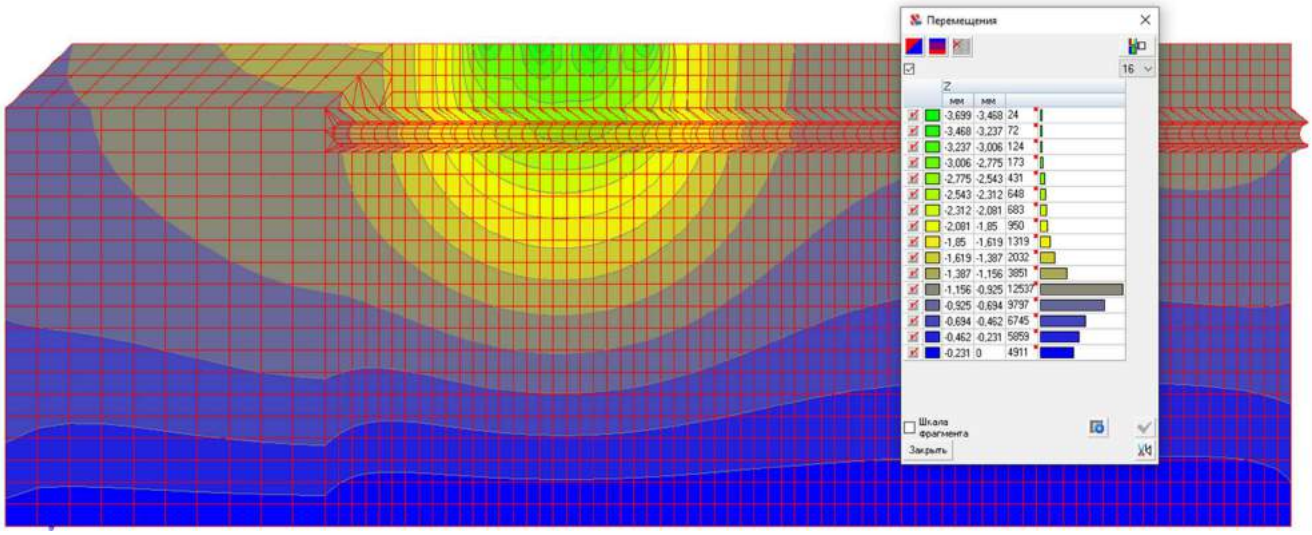


б)

Рисунок А.40 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 16 т., при ущільненні піщаного дренувального шару з модулем пружності 92,5 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

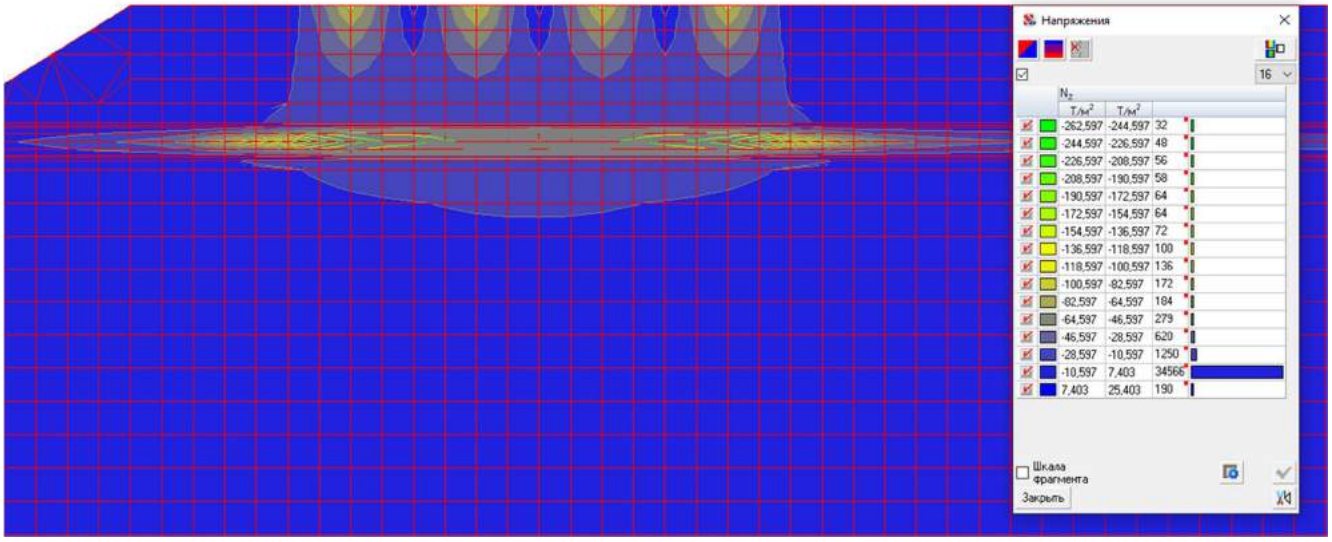


а)

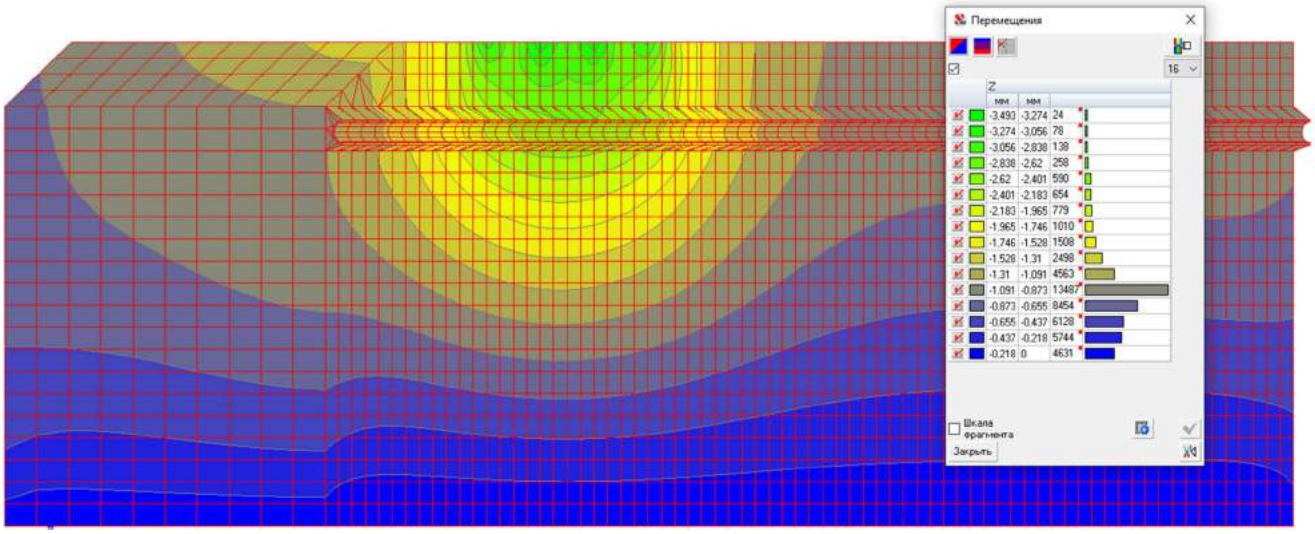


б)

Рисунок А.41 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від важкого катка, 30 т., при ущільненні піщаного дренувального шару з модулем пружності 116,6 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні



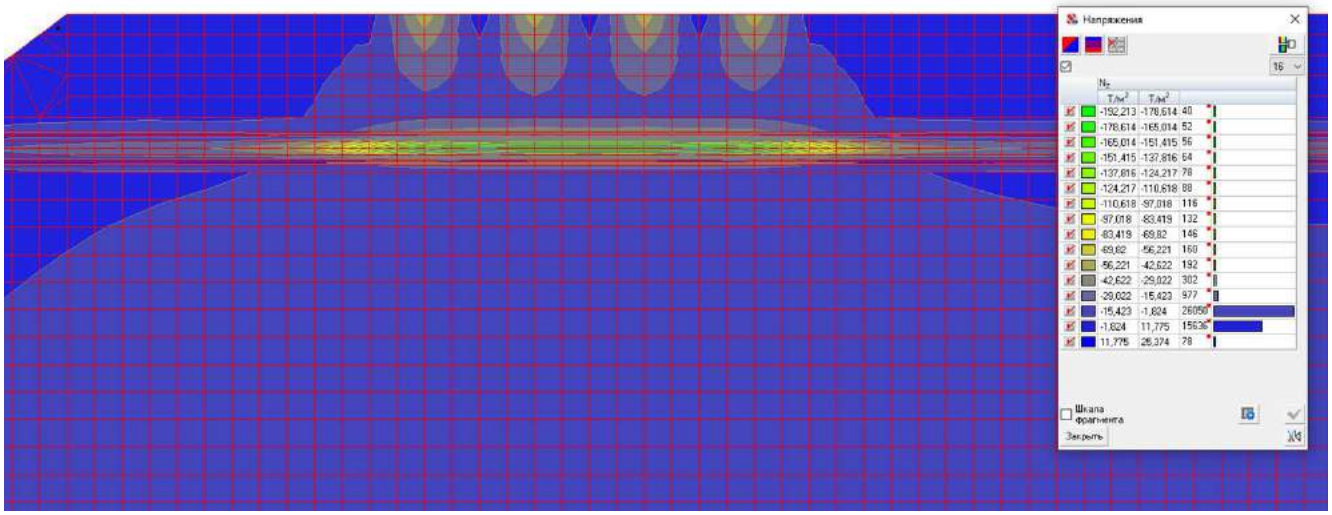
а)



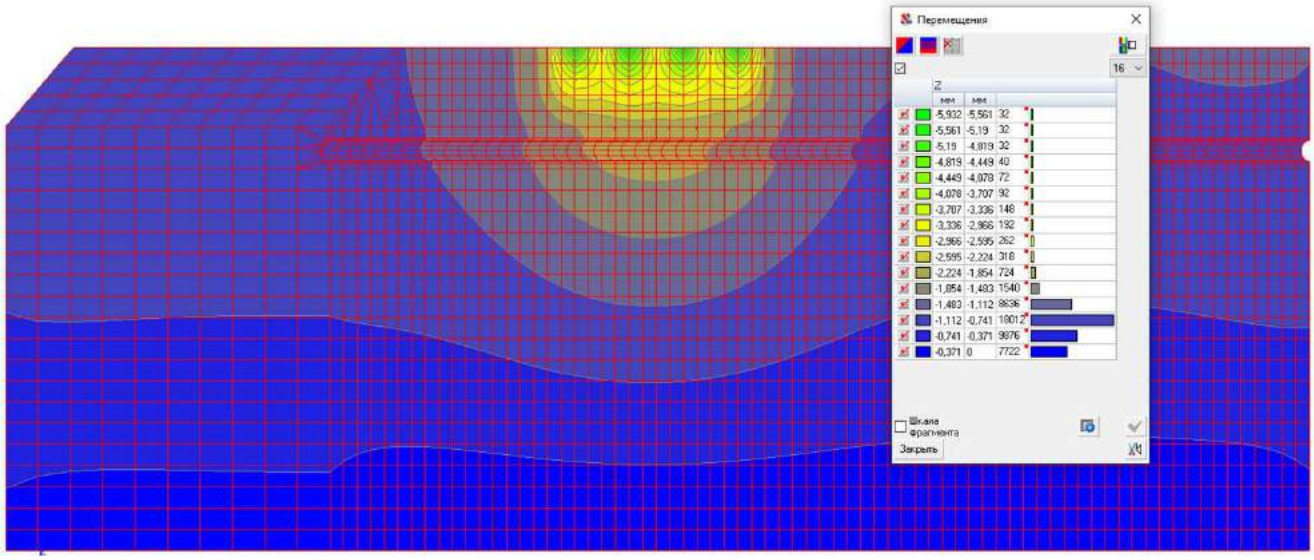
б)

Рисунок А.42 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від важкого катка, 30 т., при ущільненні піщаного дренувального шару з модулем пружності її 140,6 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі бетонної труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

А.5 Розподіл ізополів та ізоліній нормальних напружень *Nz* та деформацій *Z* в дорожній конструкції з поперечним дренажем мілкого закладання з піщаним дренувальним шаром та трубою ПВХ

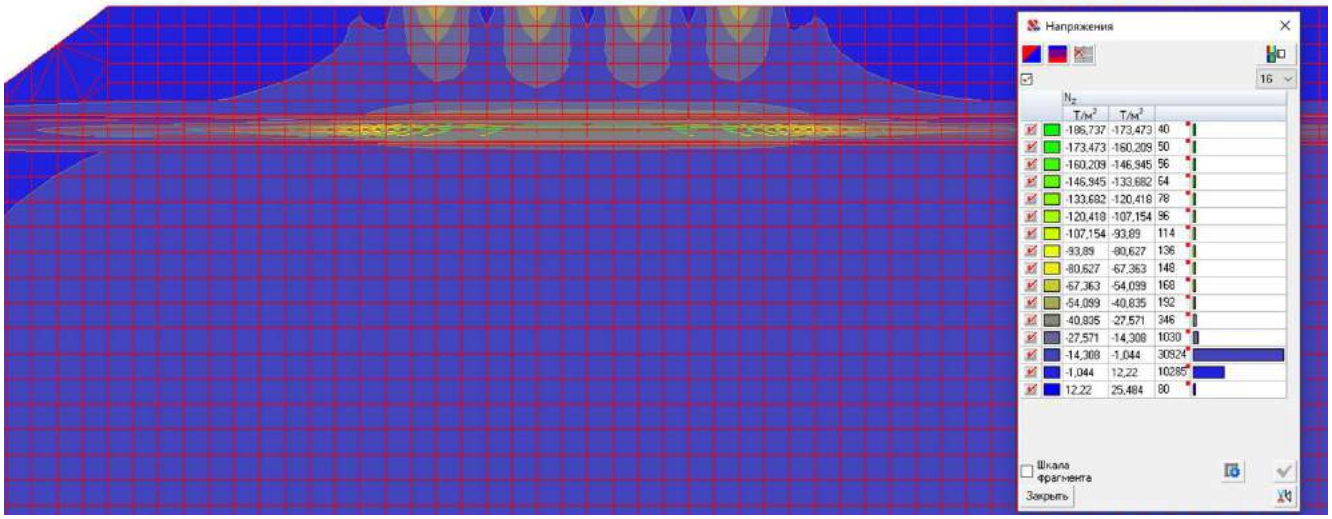


а)

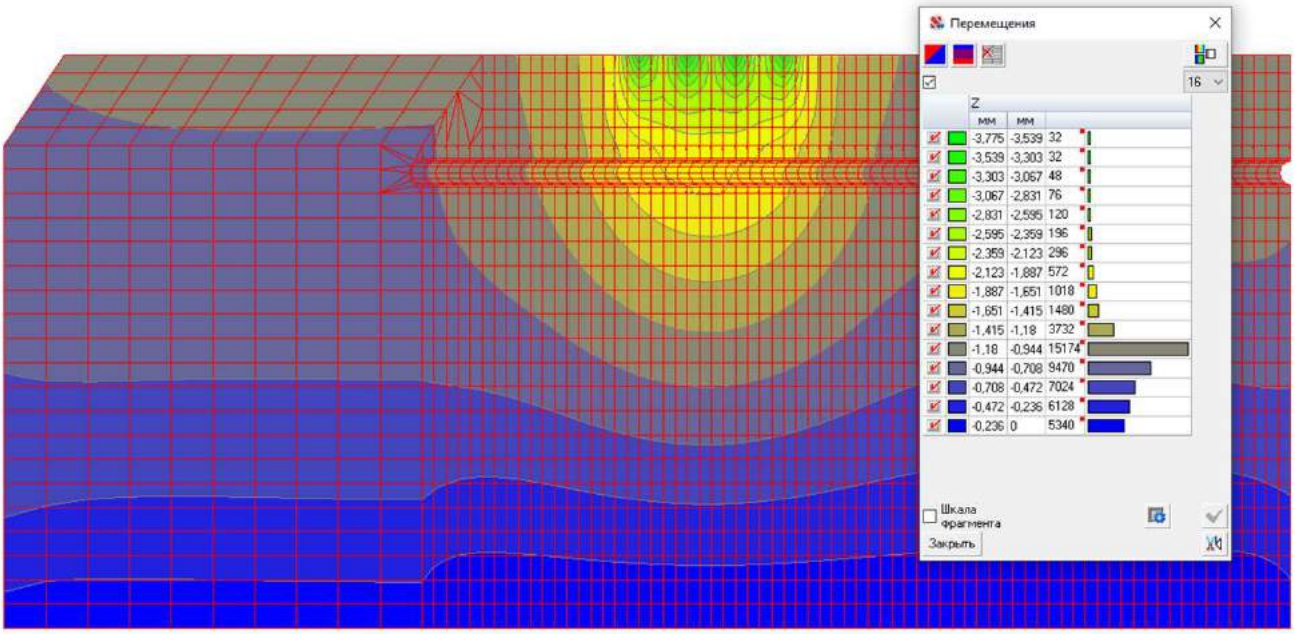


б)

Рисунок А.43 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 16 т., при ущільненні піщаного дренувального шару з модулем пружності 20,45 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

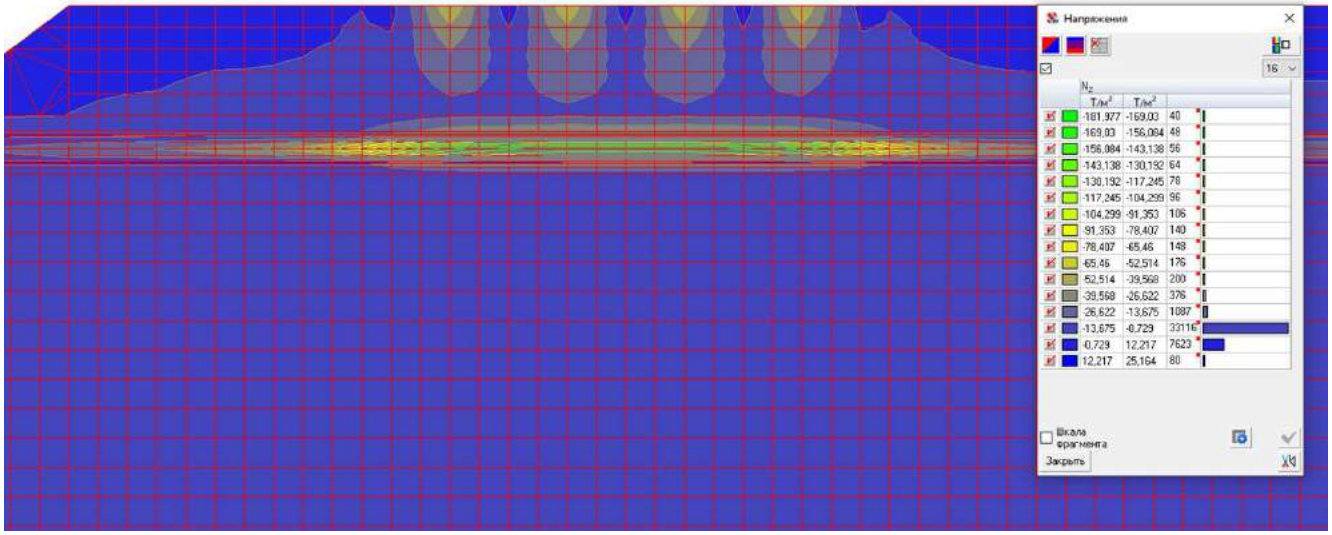


а)

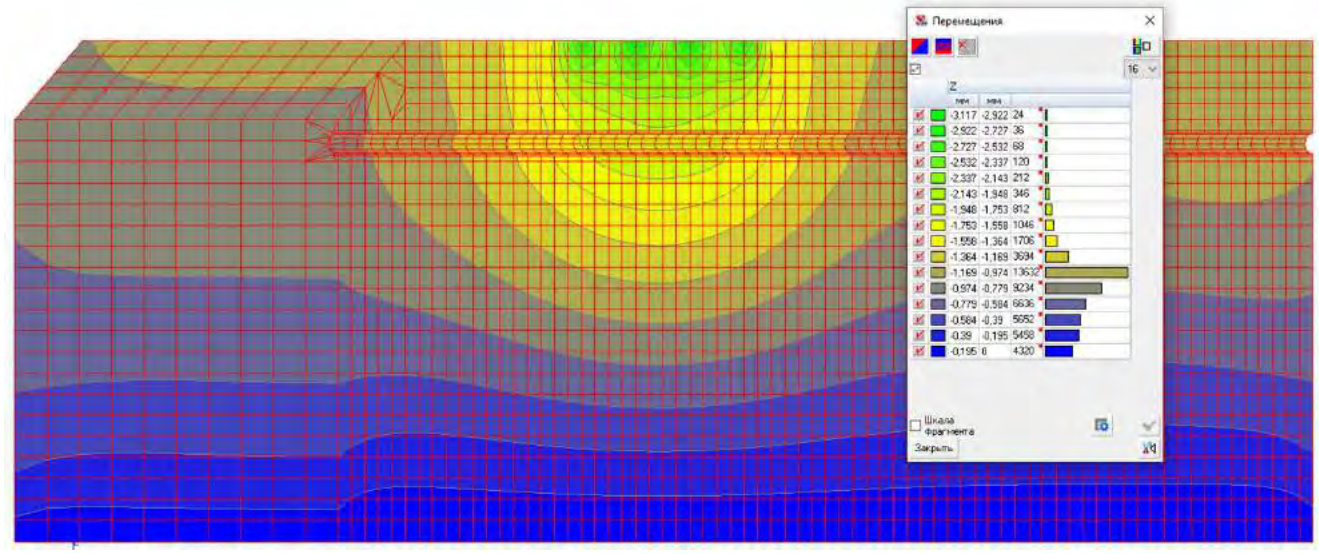


б)

Рисунок А.44 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від важкого катка, 30 т., при ущільненні піщаного дренувального шару з модулем пружності 44,5 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

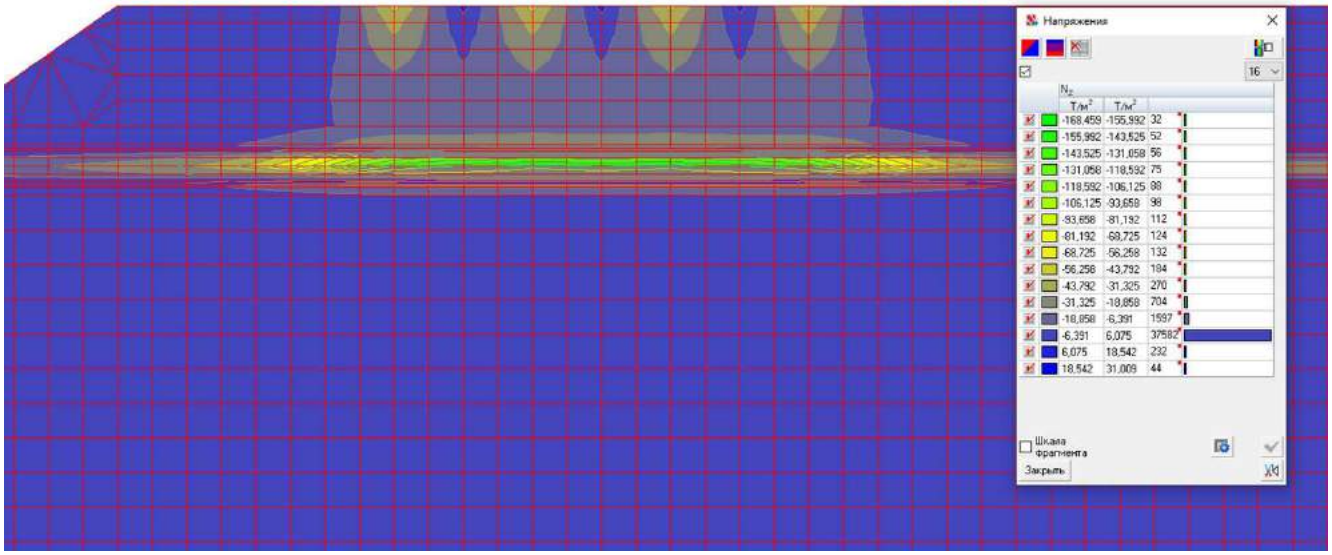


а)

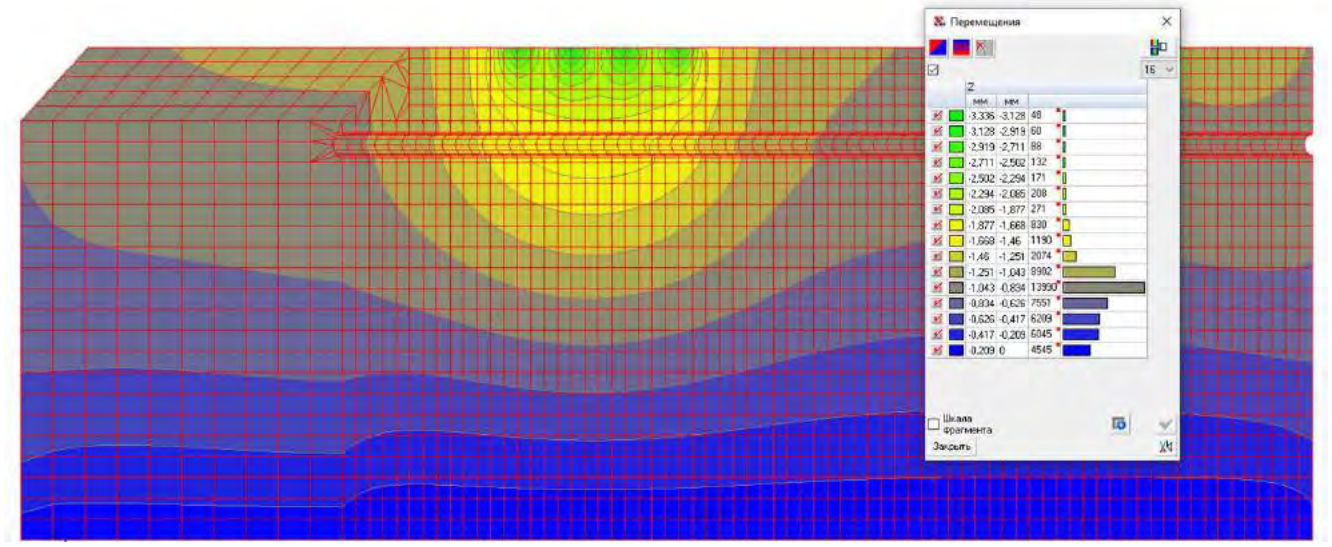


б)

Рисунок А.45 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від важкого катка, 30 т., при ущільненні піщаного дренувального шару з модулем пружності 68,5 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

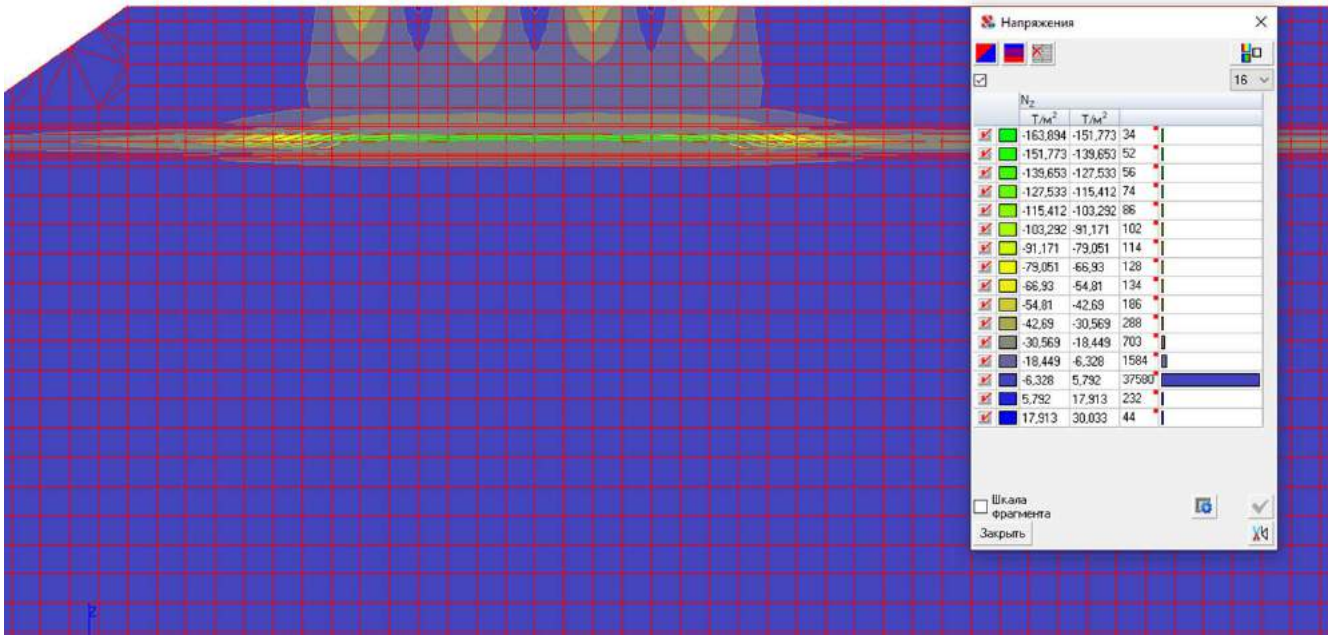


а)

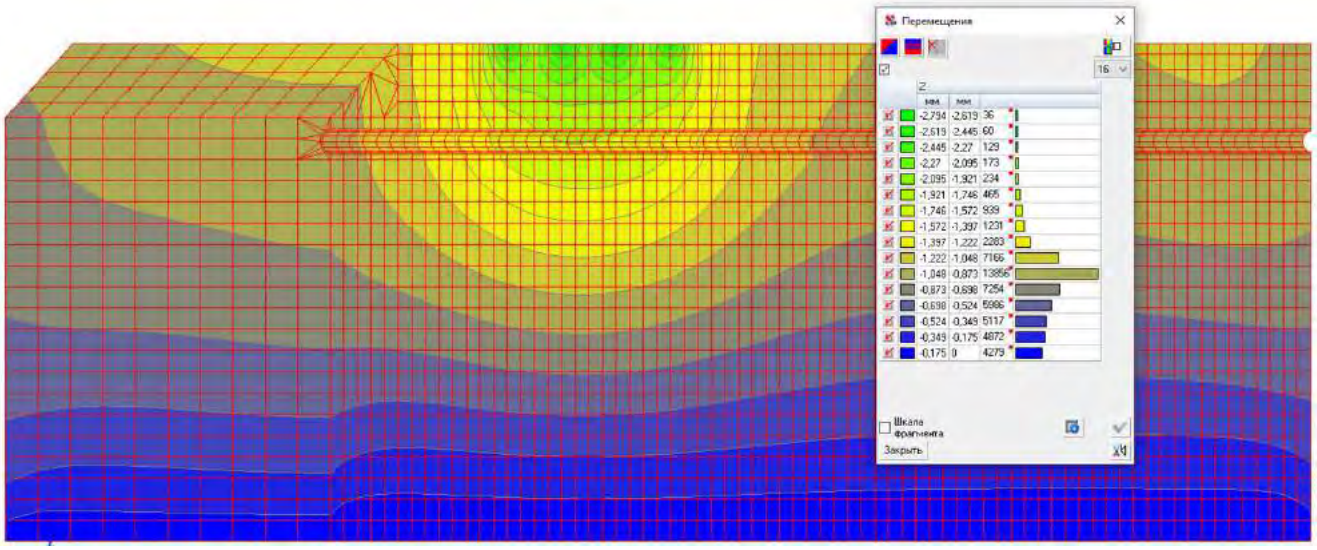


б)

Рисунок А.46 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 16 т., при ущільненні піщаного дренувального шару з модулем пружності 44,5 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

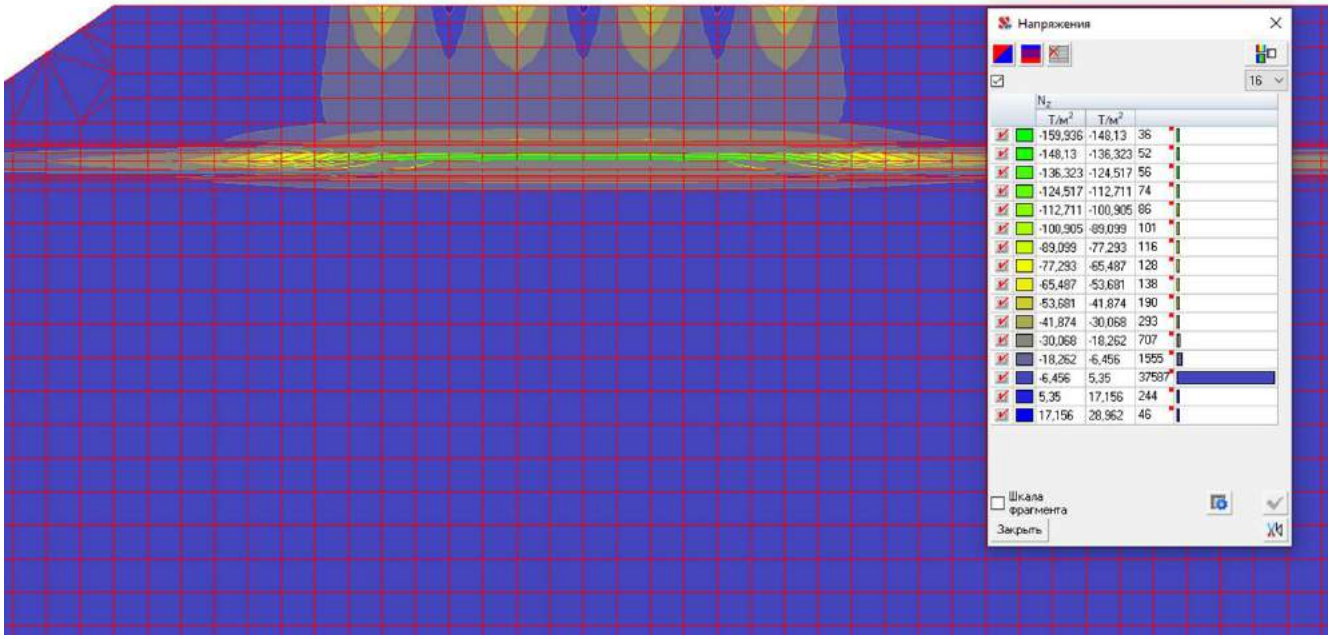


а)

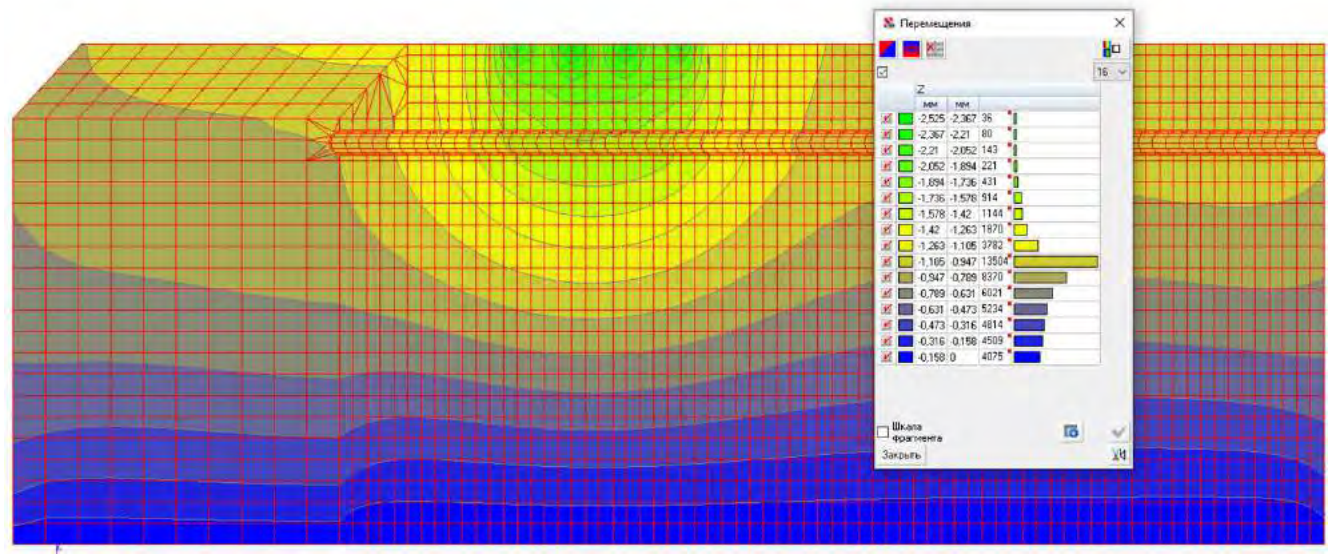


б)

Рисунок А.47 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від важкого катка, 30 т., при ущільненні піщаного дренувального шару з модулем пружності 68,5 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

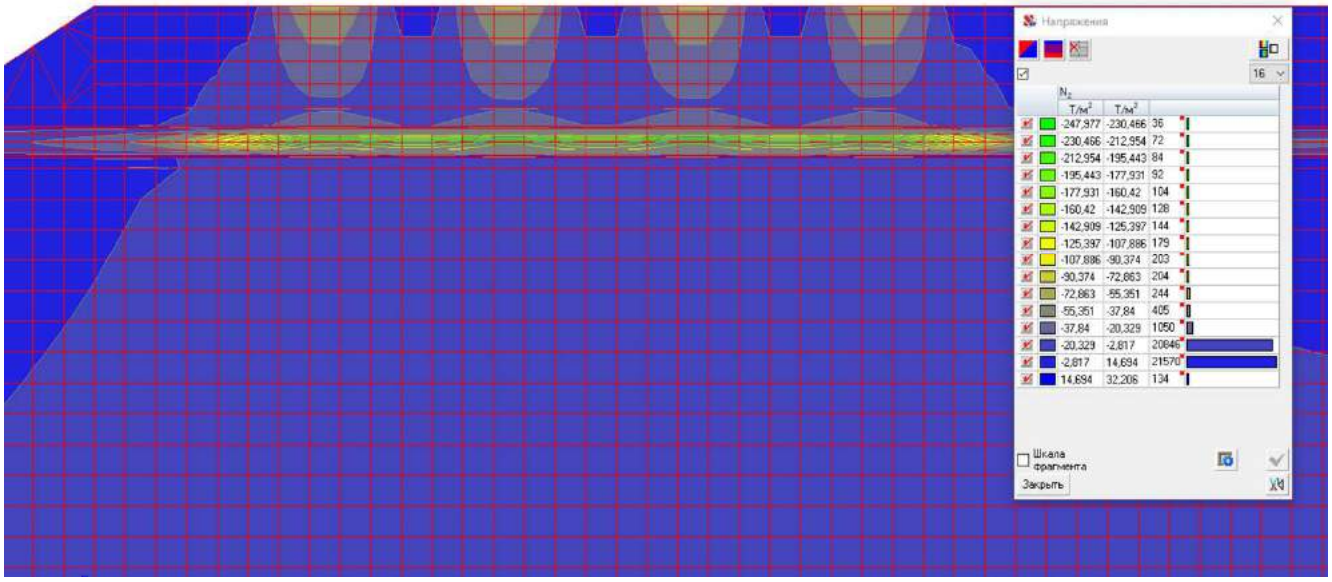


а)

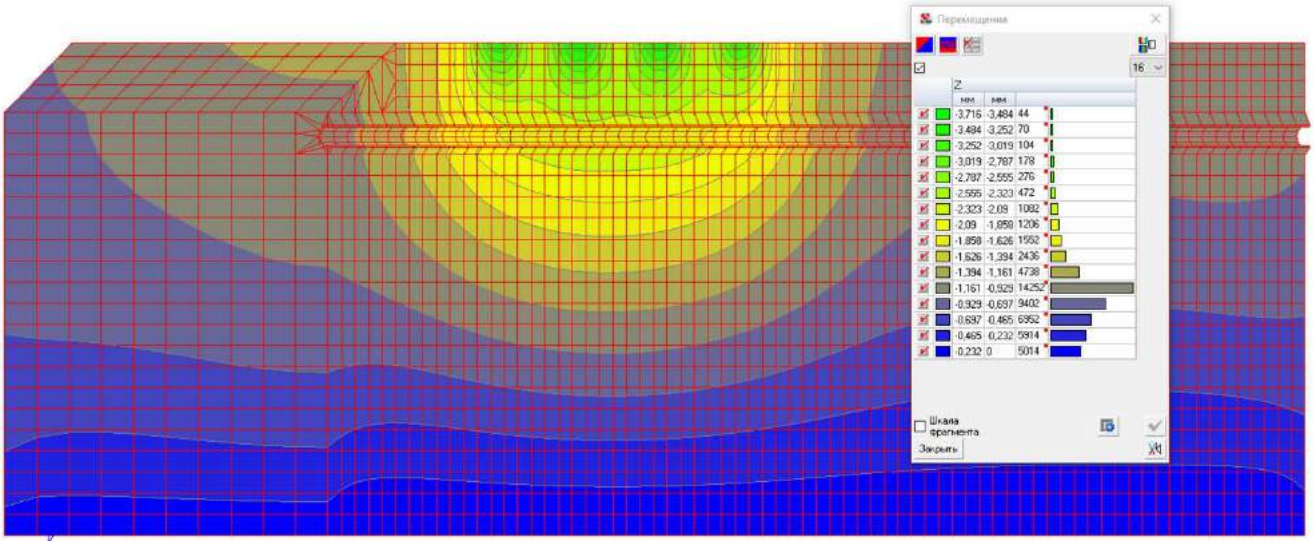


б)

Рисунок А.48 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від важкого катка, 30 т., при ущільненні піщаного дренувального шару з модулем пружності 92,5 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

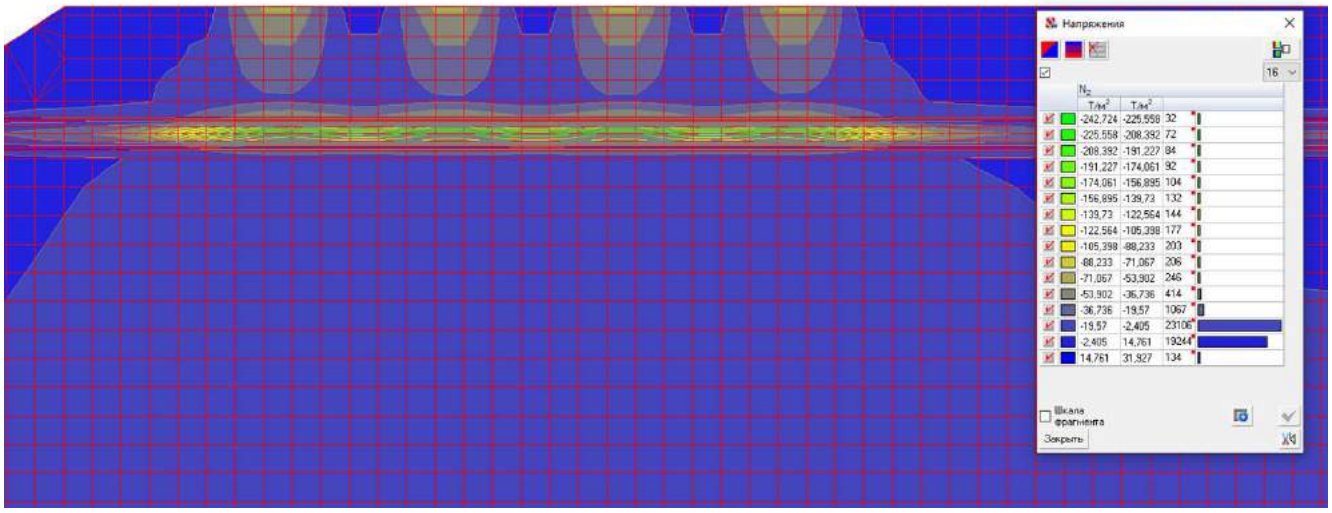


а)

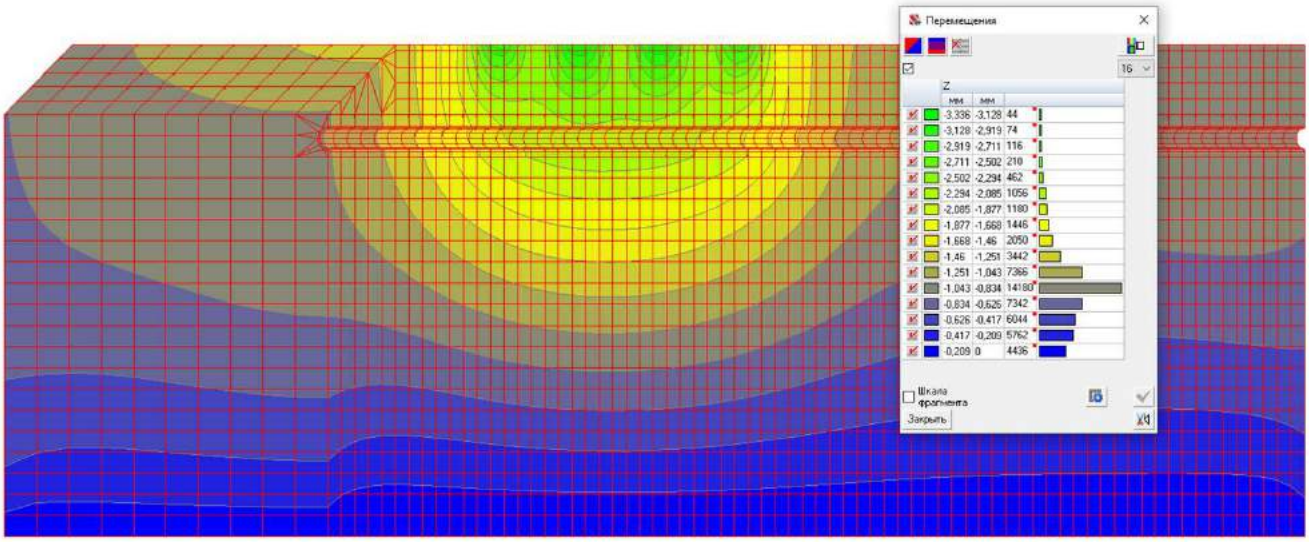


б)

Рисунок А.49 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 16 т., при ущільненні піщаного дренувального шару з модулем пружності 68,5 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

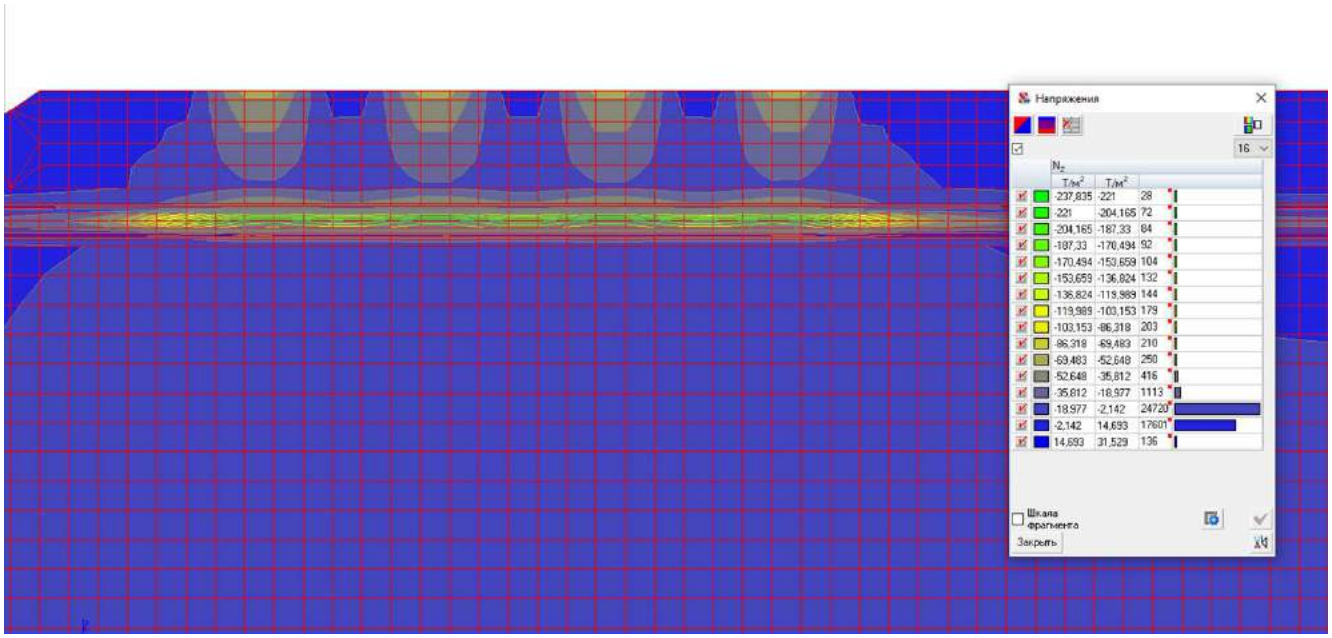


а)

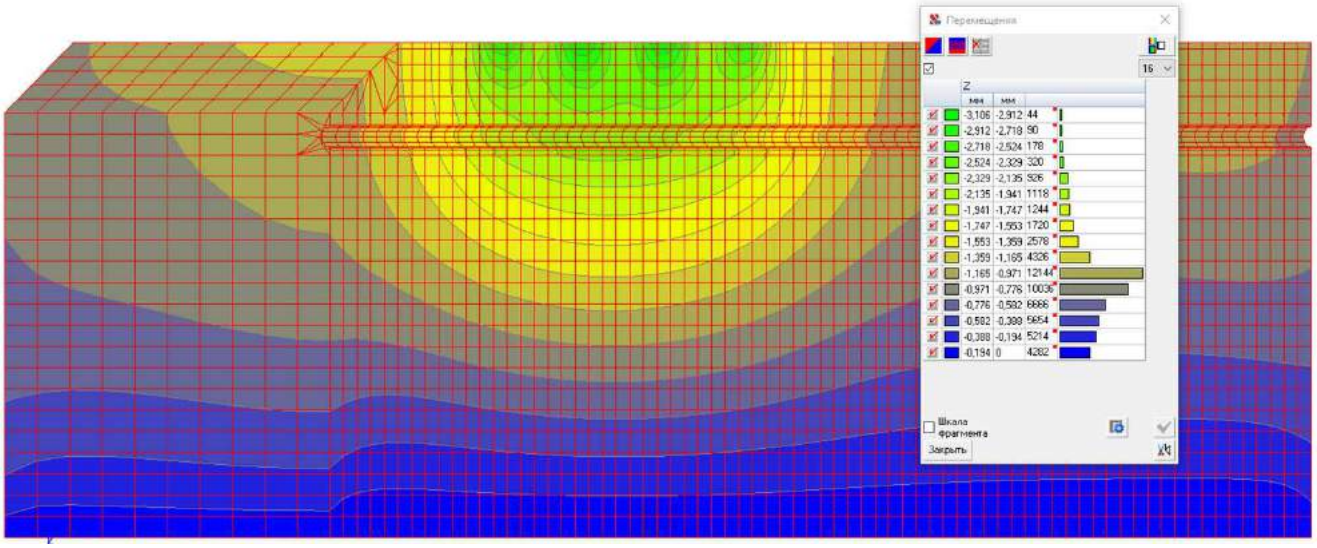


б)

Рисунок А.50 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від важкого катка, 30 т., при ущільненні піщаного дренувального шару з модулем пружності 92,5 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

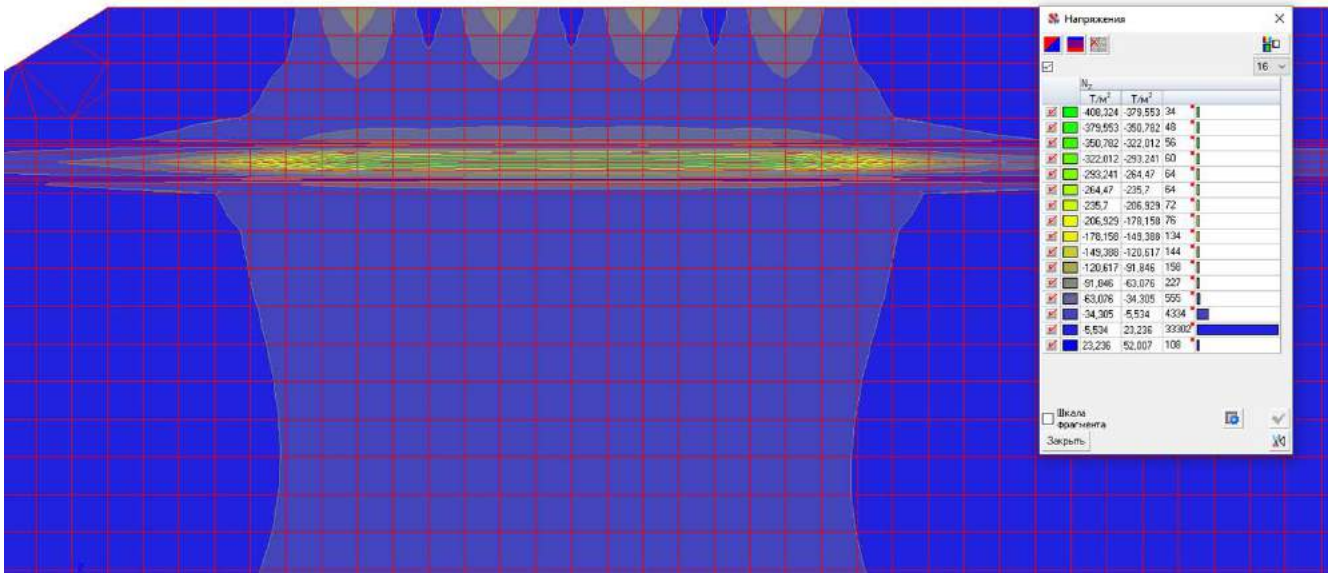


а)

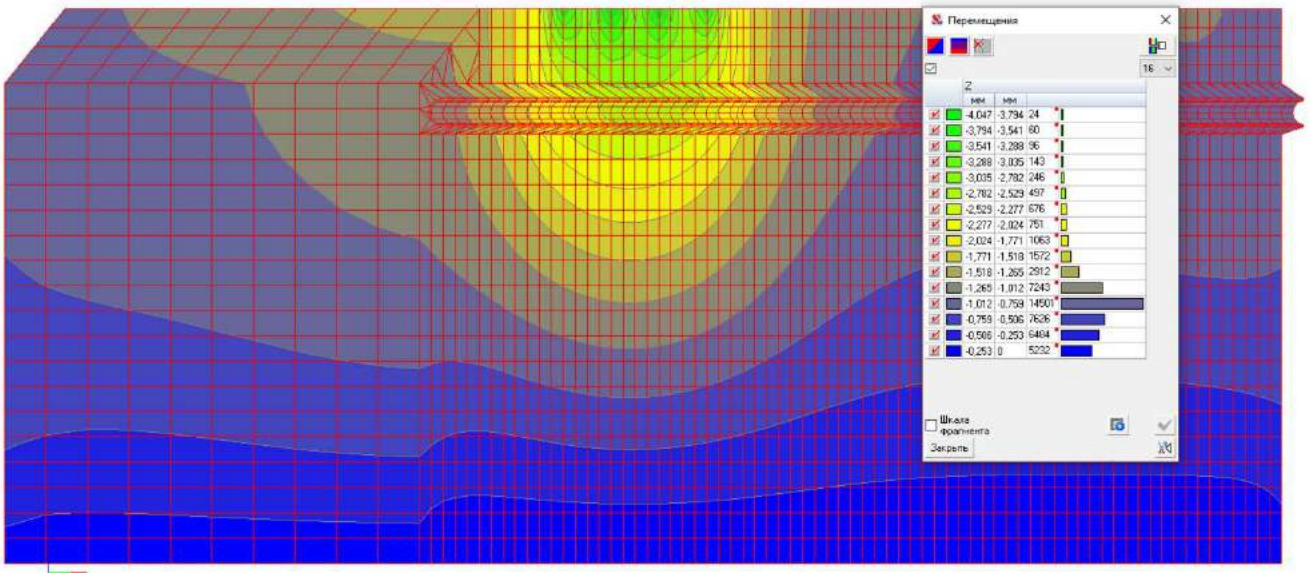


б)

Рисунок А.51 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від важкого катка, 30 т., при ущільненні піщаного дренувального шару з модулем пружності 116,6 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

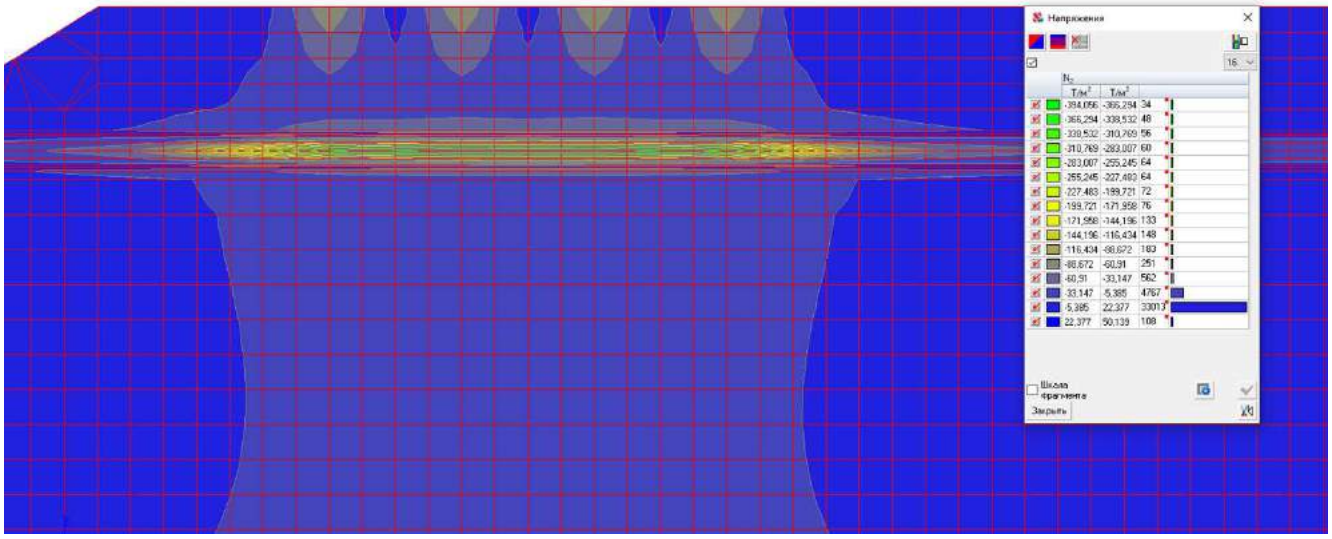


а)

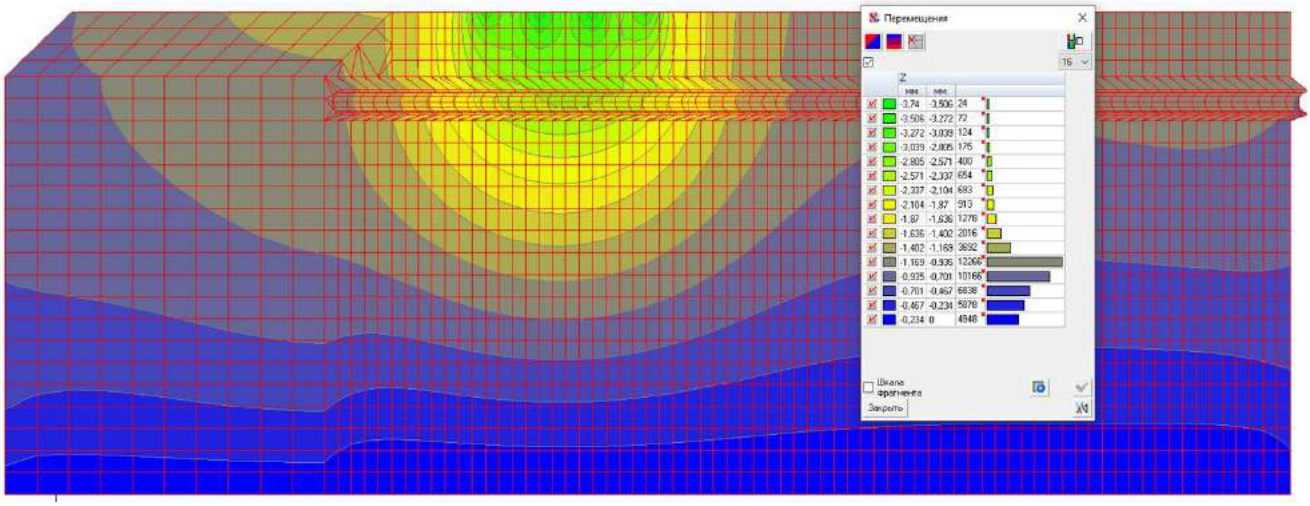


б)

Рисунок А.52 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від середнього катка, 16 т., при ущільненні піщаного дренувального шару з модулем пружності 92,5 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

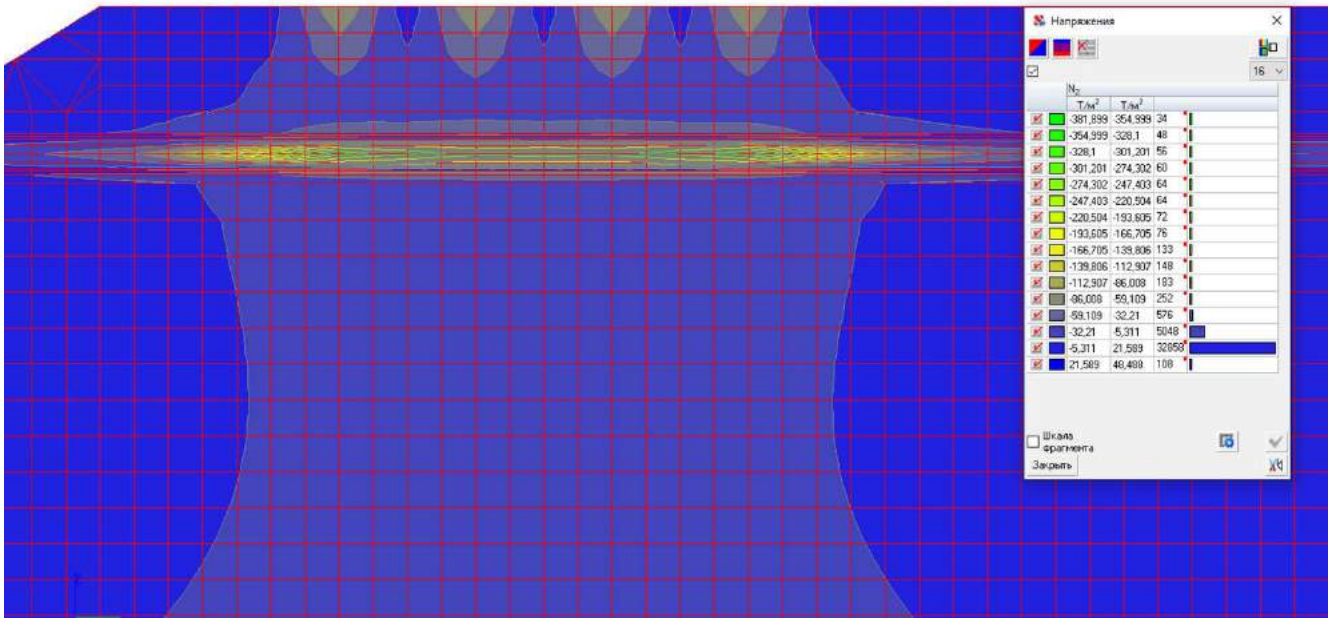


а)

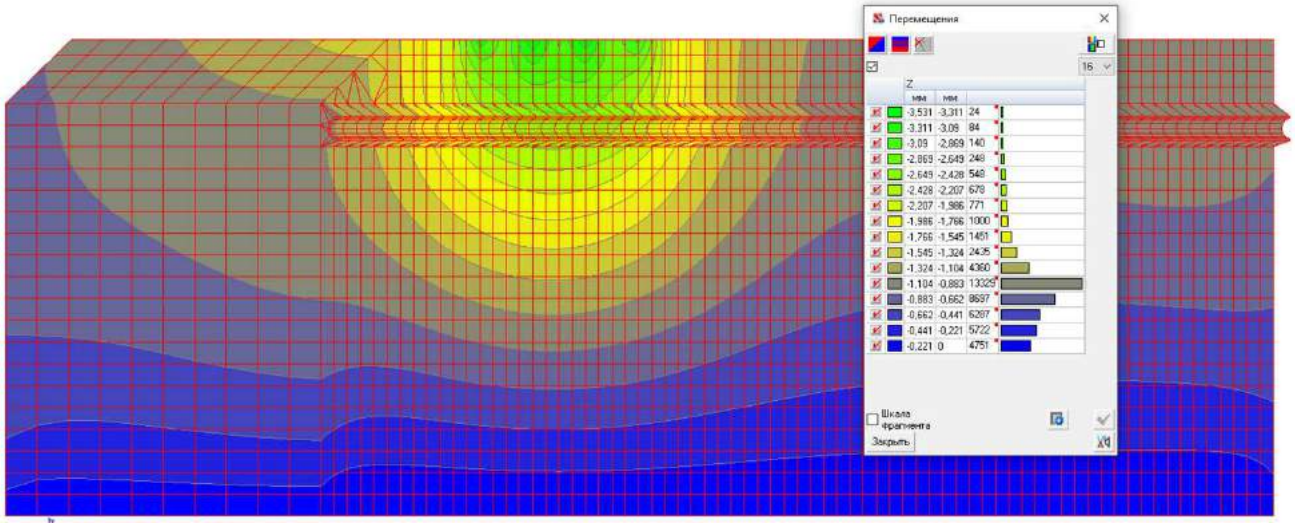


б)

Рисунок А.53 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від важкого катка, 30 т., при ущільненні піщаного дренувального шару з модулем пружності 116,6 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ труби; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні



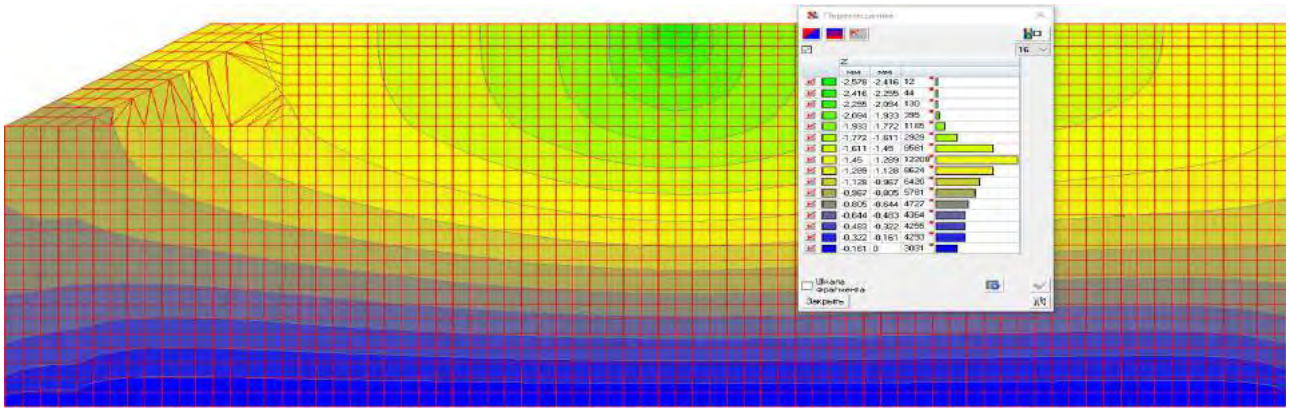
а)



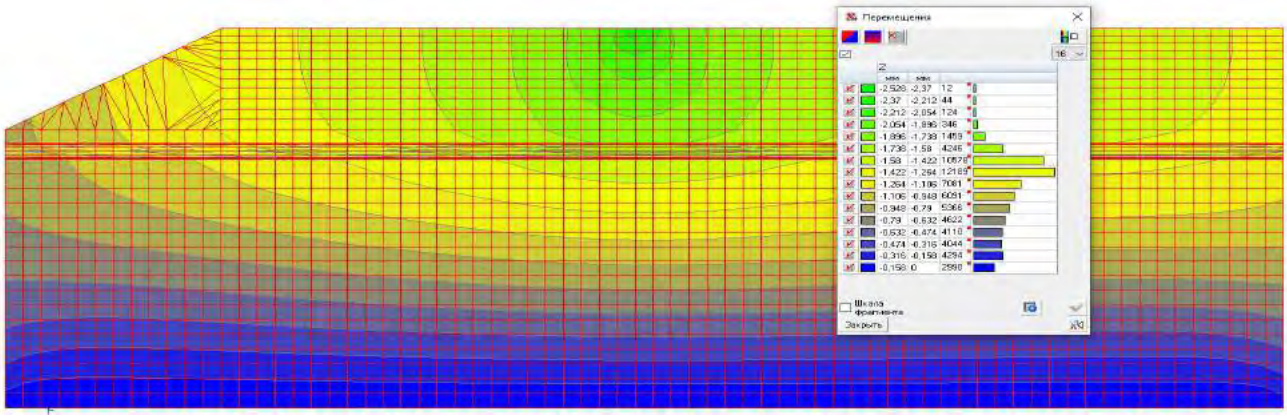
б)

Рисунок А.54 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від важкого катка, 30 т., при ущільненні піщаного дренувального шару з модулем пружності 140,6 МПа: *а* – розподіл нормальних напружень *Nz* в тілі труби ПВХ; *б* – розподіл деформацій *Z* в земляному полотні

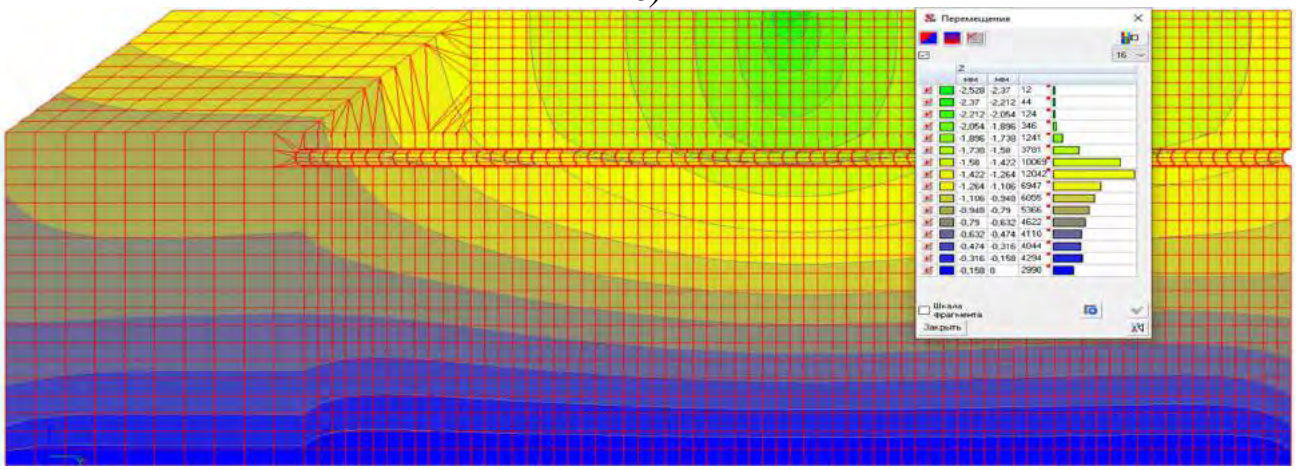
ДОДАТОК Б
ДОСЛІДЖЕННЯ НДС ДОРОЖНЬОЇ КОНСТРУКЦІЇ ПІД ВПЛИВОМ ВЕЛИКОВАГОВИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ



а)

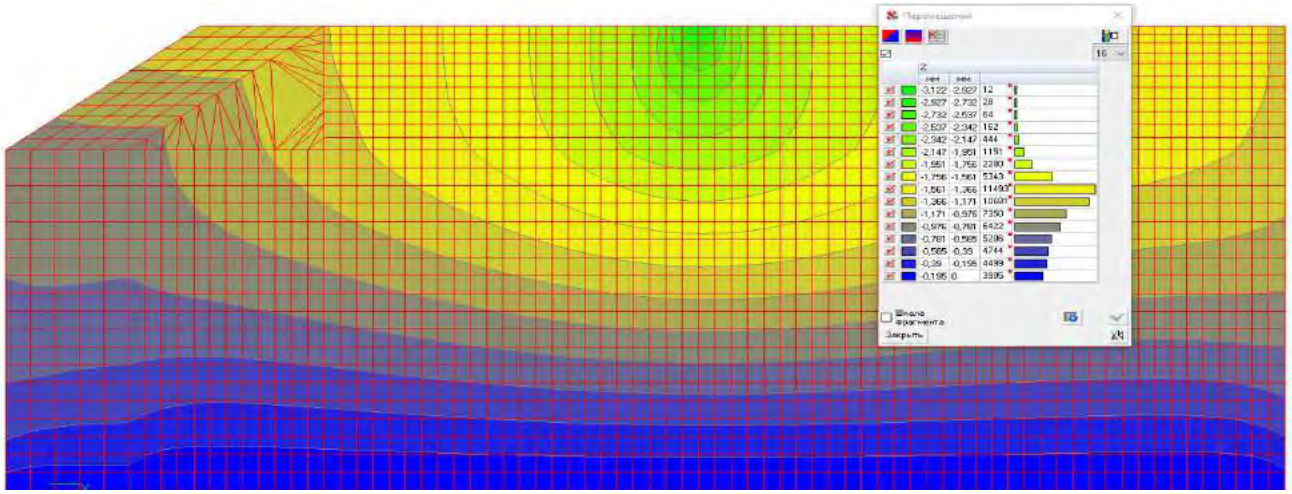


б)

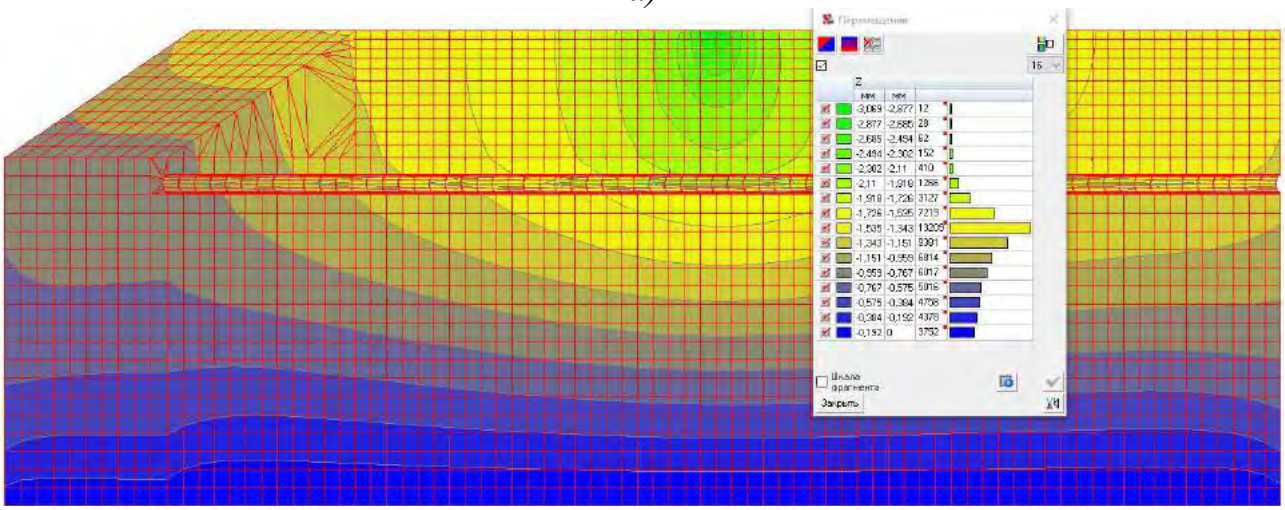


в)

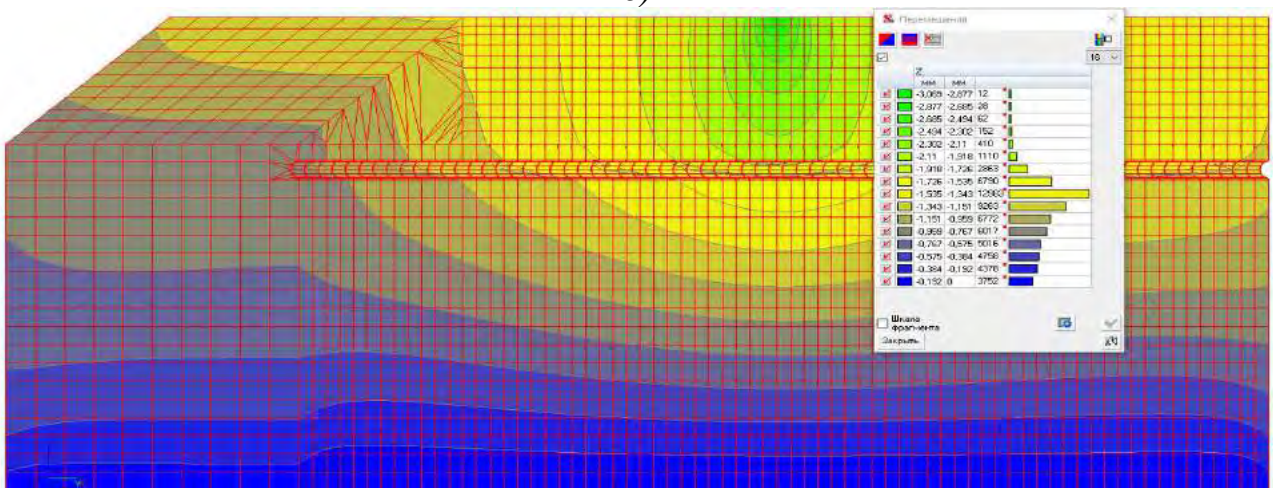
Рисунок Б.1 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від великовагового транспорту 57,5 кН: *а* – розподіл деформацій Z в ДК без труби; *б* – розподіл деформацій Z з трубою ПВХ класу SN2; *в* – розподіл деформацій Z з трубою ПВХ класу SN8.



а)

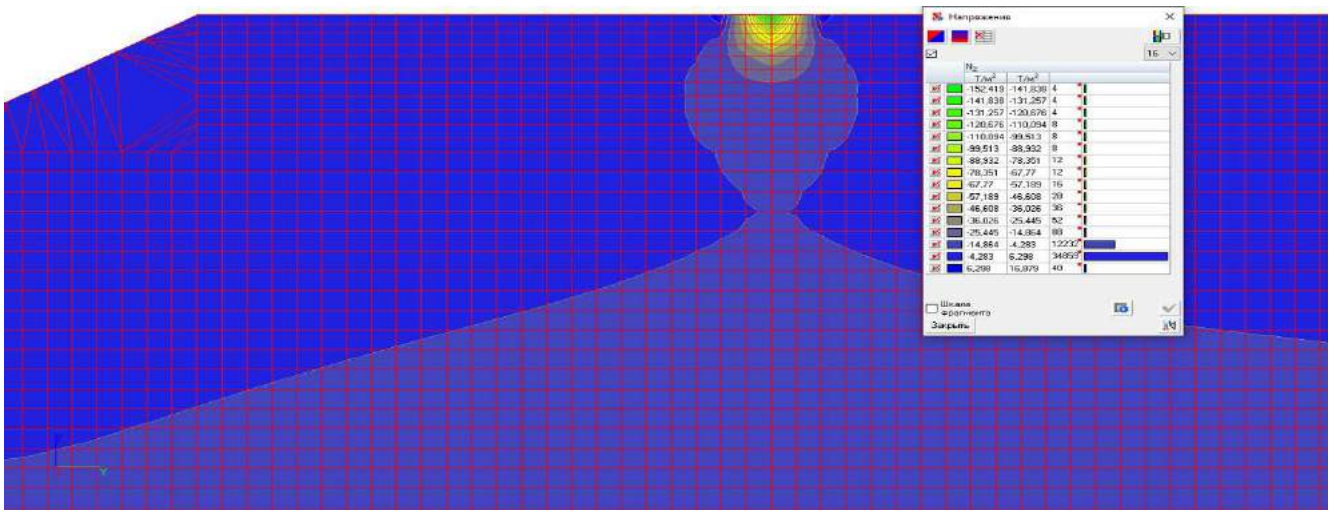


б)

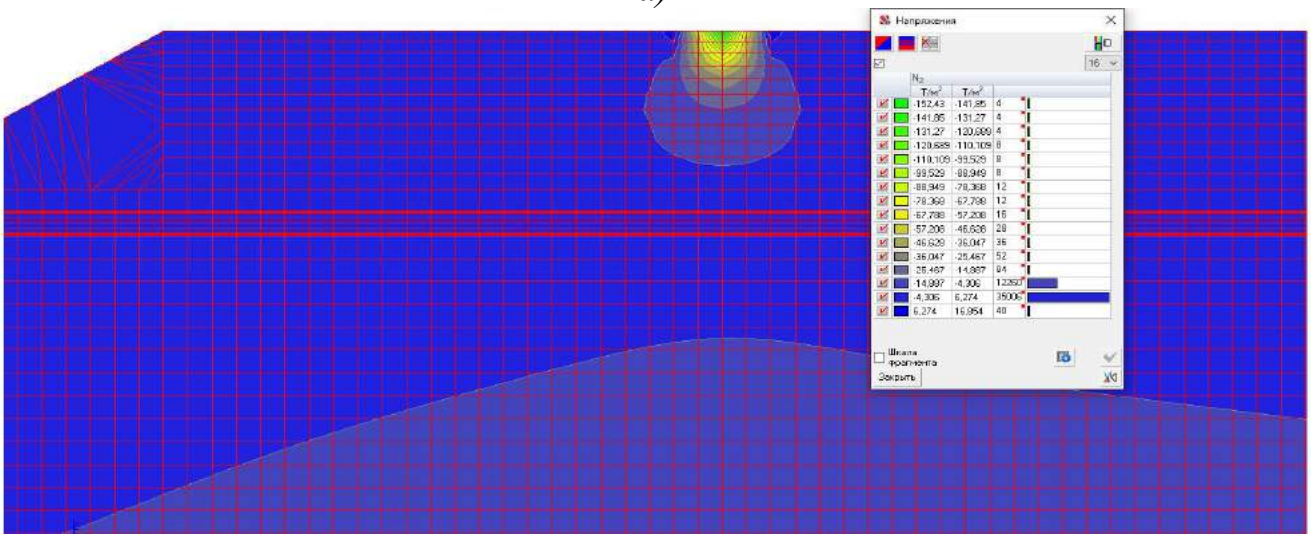


в)

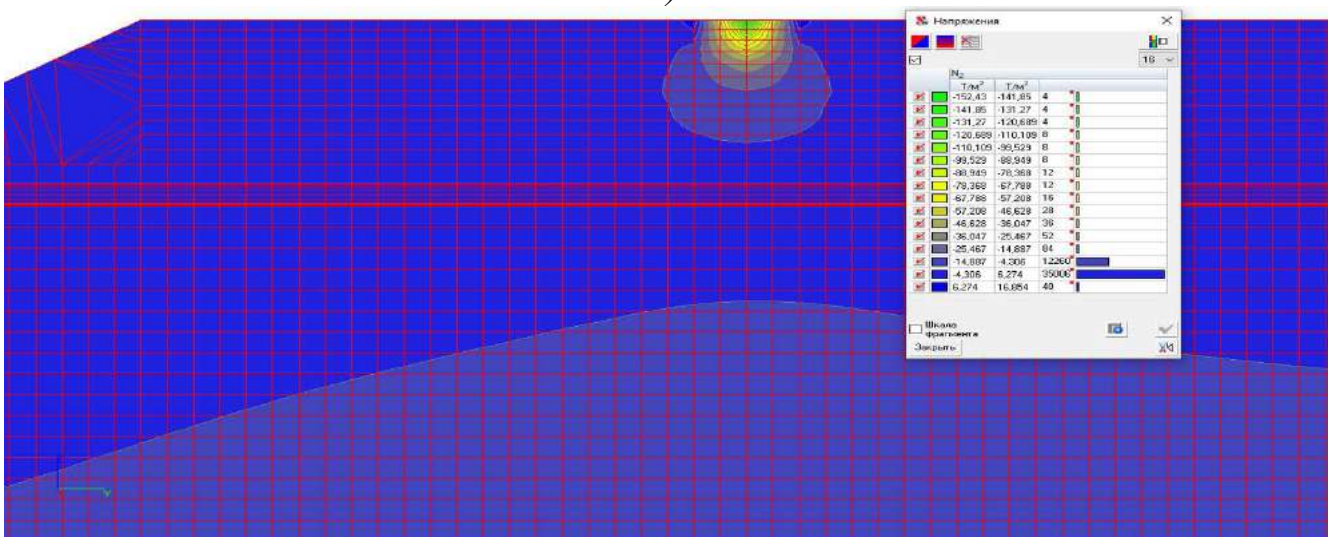
Рисунок Б.2 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від великовагового транспорту 86,25 кН: *а* – розподіл деформацій Z в ДК без труби; *б* – розподіл деформацій Z з трубою ПВХ класу SN2; *в* – розподіл деформацій Z з трубою ПВХ класу SN8.



а)

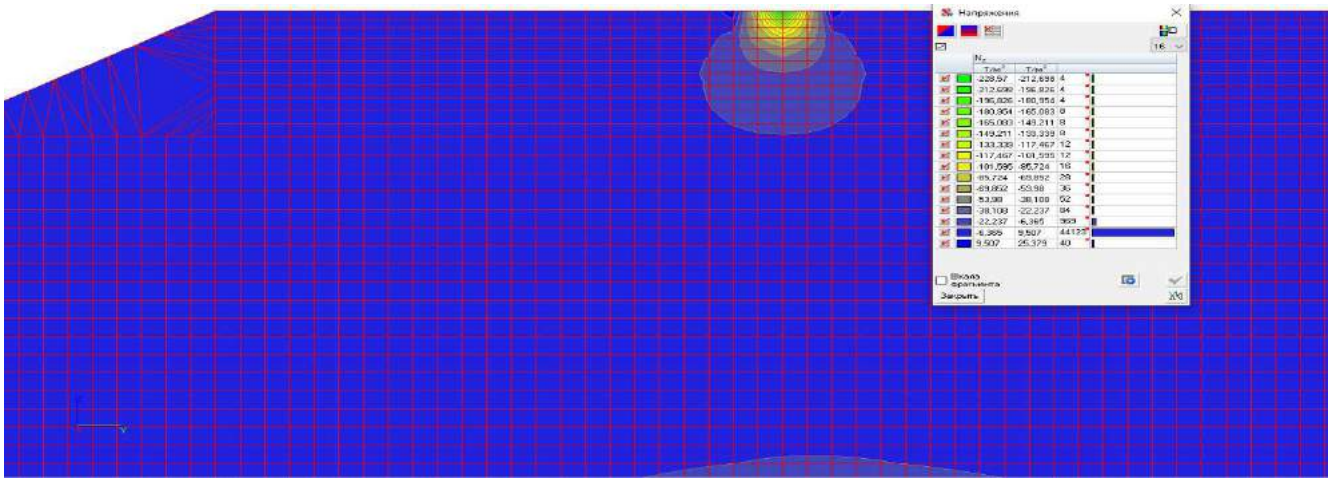


б)

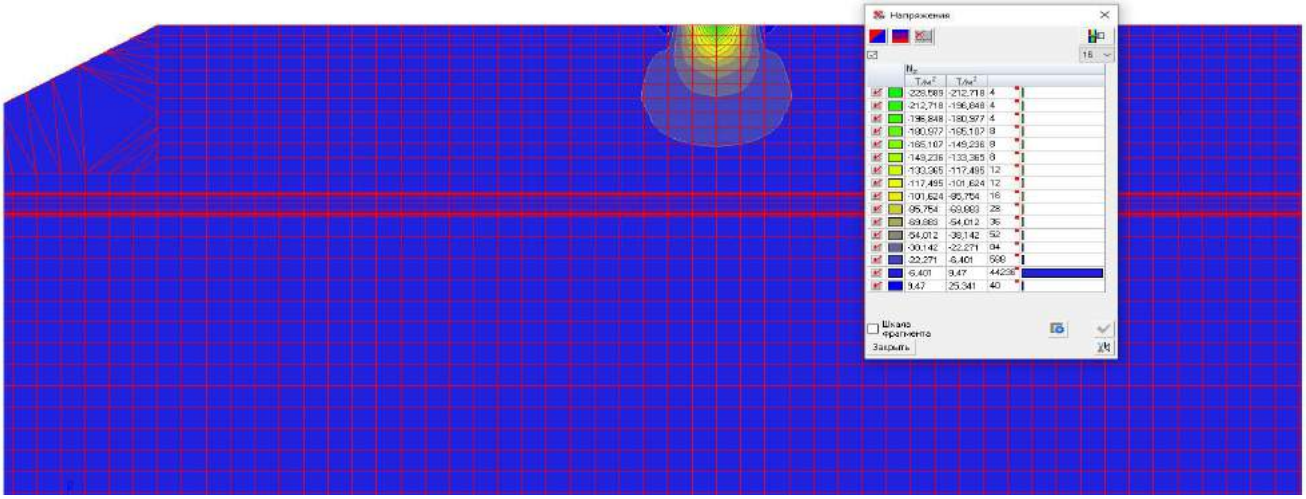


в)

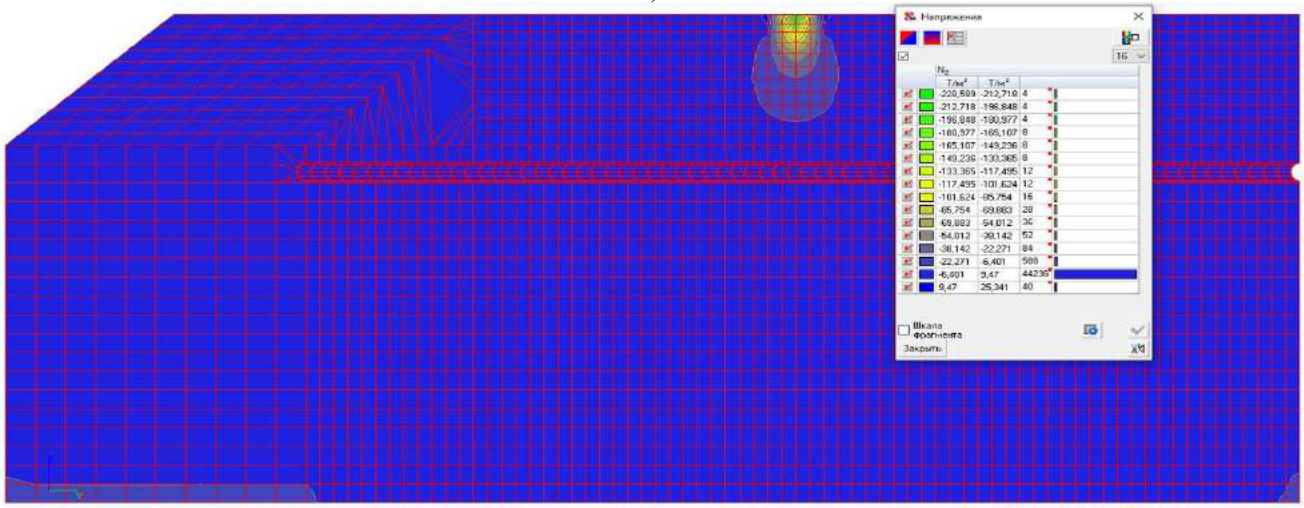
Рисунок Б.3 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від великовагового транспорту 57,5 кН: *а* – розподіл напружень N_z в ДК без труби; *б* – розподіл напружень N_z з трубою ПВХ класу SN2; *в* – розподіл напружень N_z з трубою ПВХ класу SN8.



а)

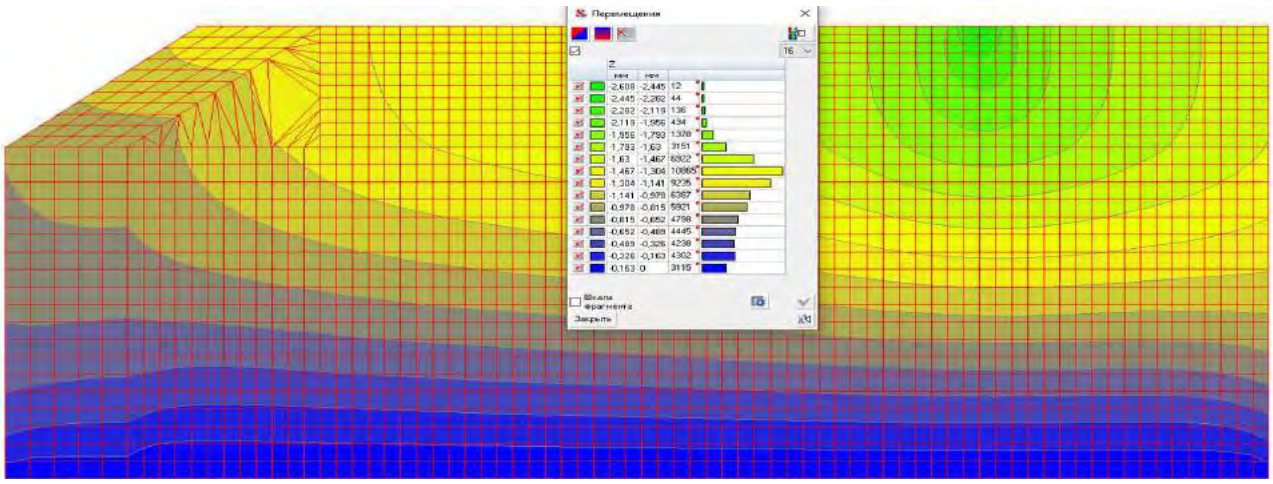


б)

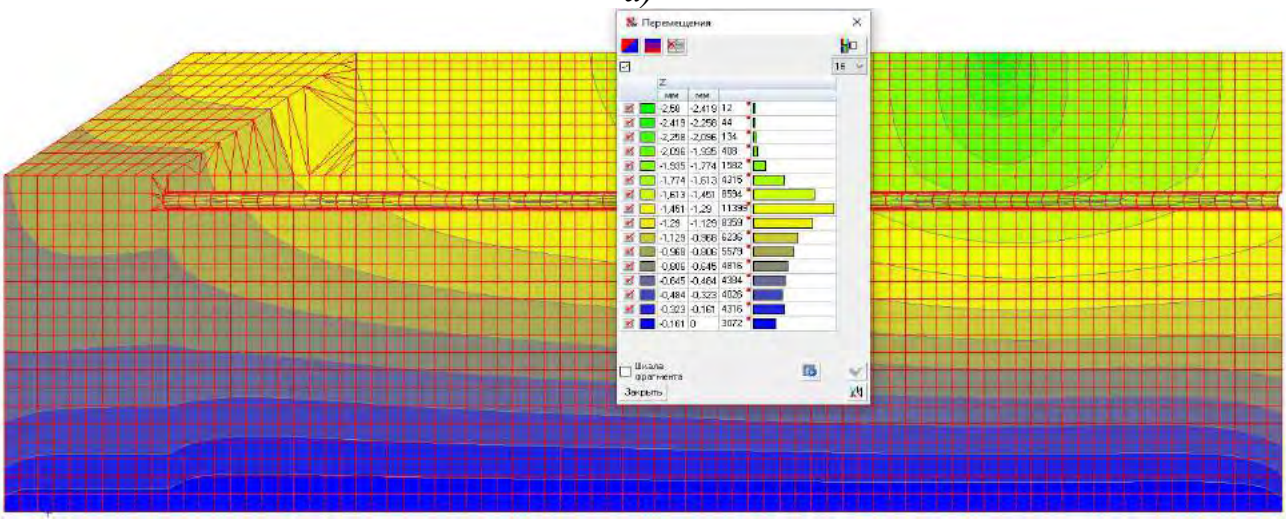


в)

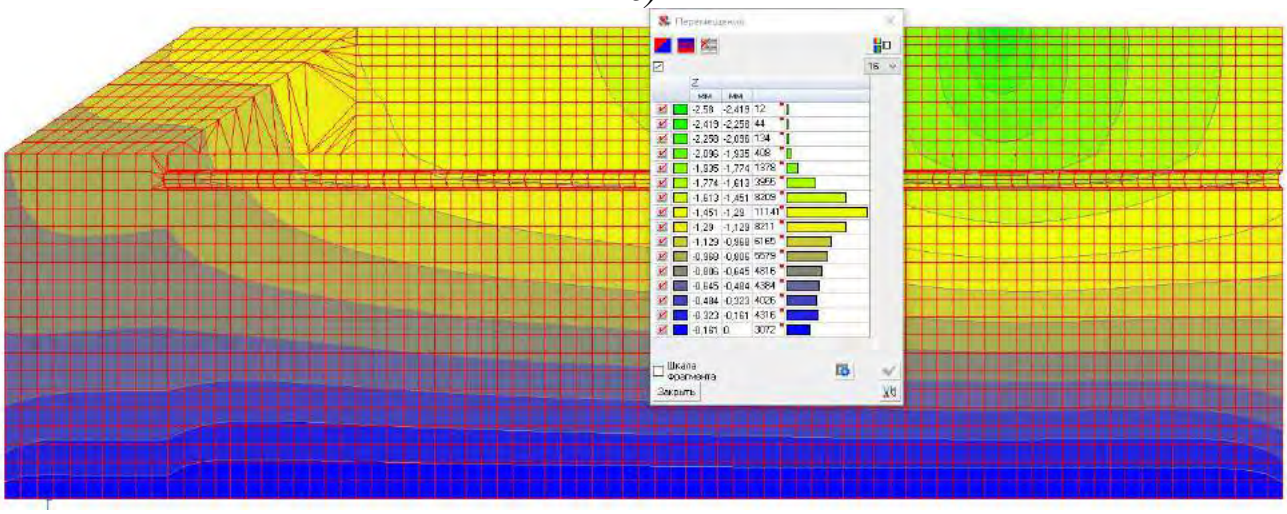
Рисунок Б.4 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від великовагового транспорту 86,25 кН: *а* – розподіл напружень N_z в ДК без труби; *б* – розподіл напружень N_z з трубою ПВХ класу SN2; *в* – розподіл напружень N_z з трубою ПВХ класу SN8.



а)

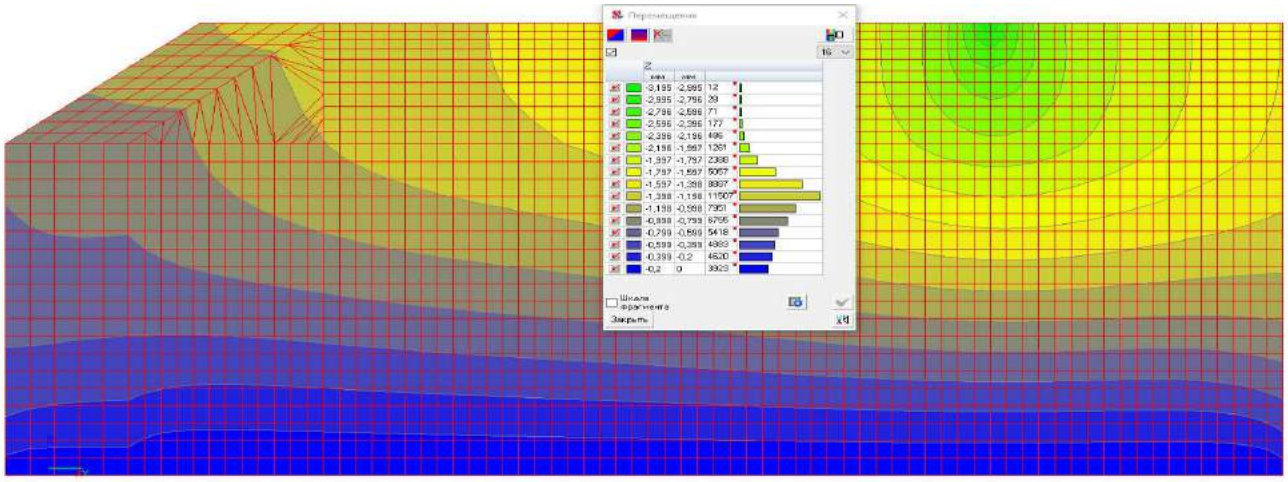


б)

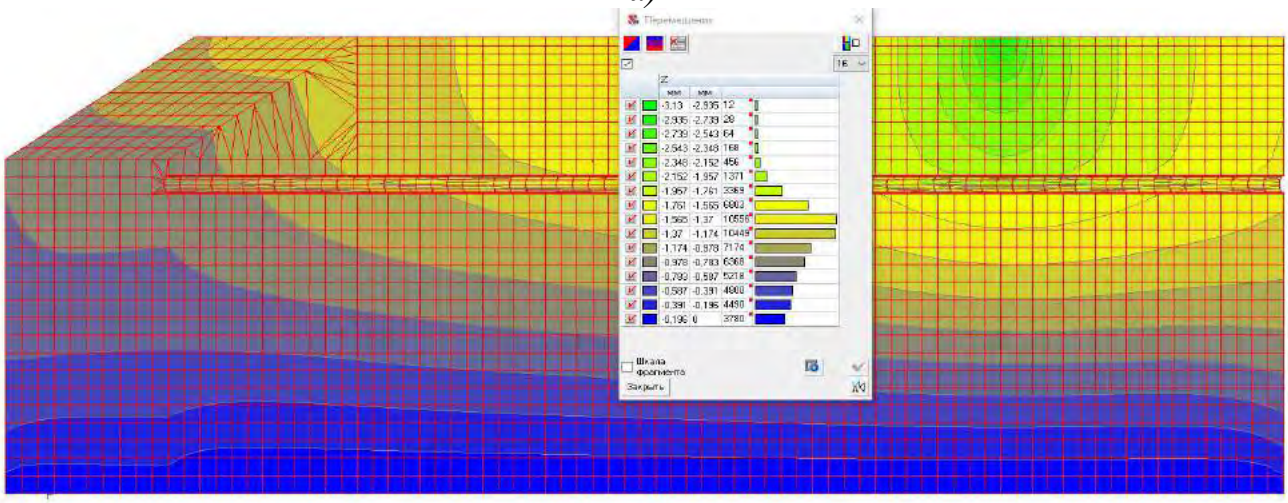


в)

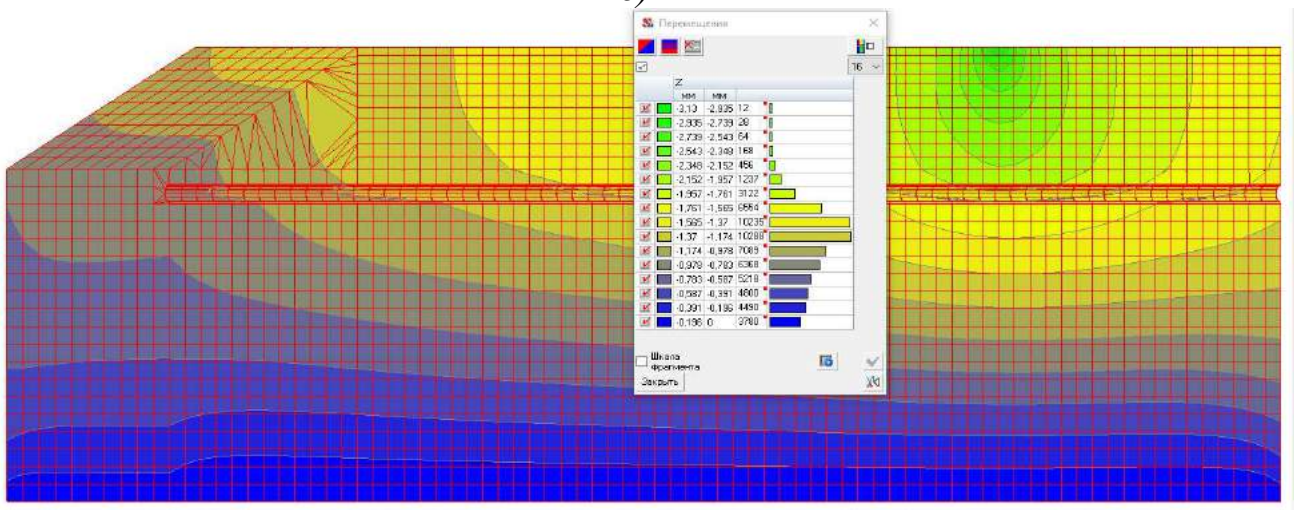
Рисунок Б.5 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від великовагового транспорту 57,5 кН на відстані 1,65 м від осі: *а* – розподіл деформацій Z в ДК без труби; *б* – розподіл деформацій Z з трубою ПВХ класу SN2; *в* – розподіл деформацій Z з трубою ПВХ класу SN8.



а)

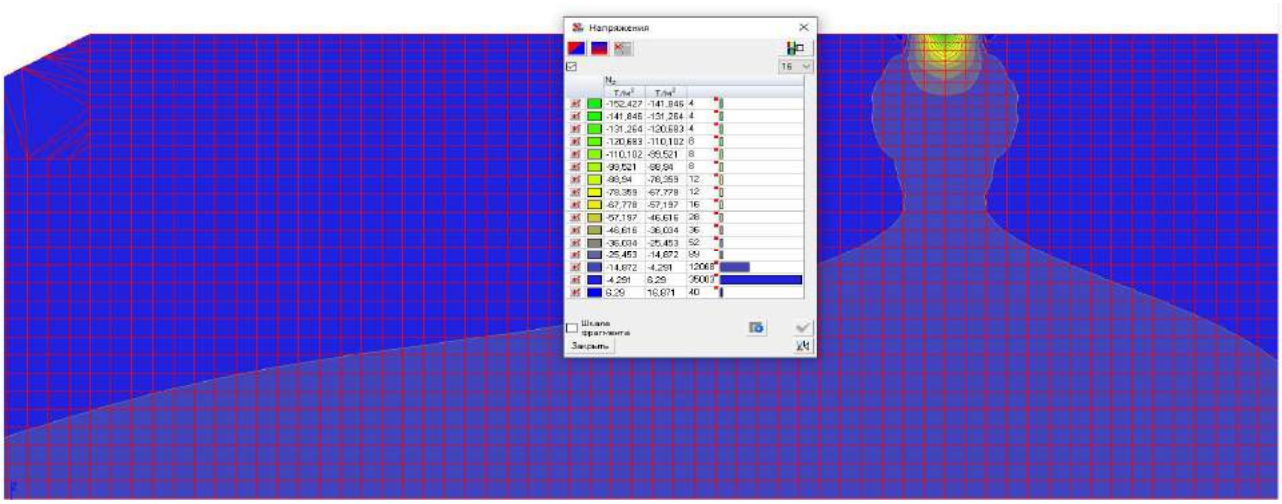


б)

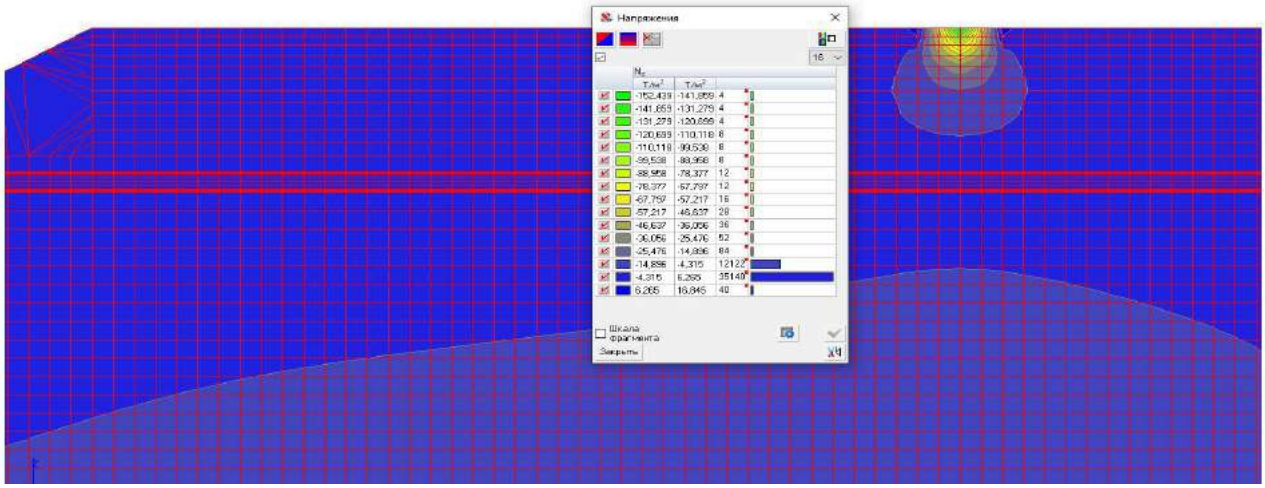


в)

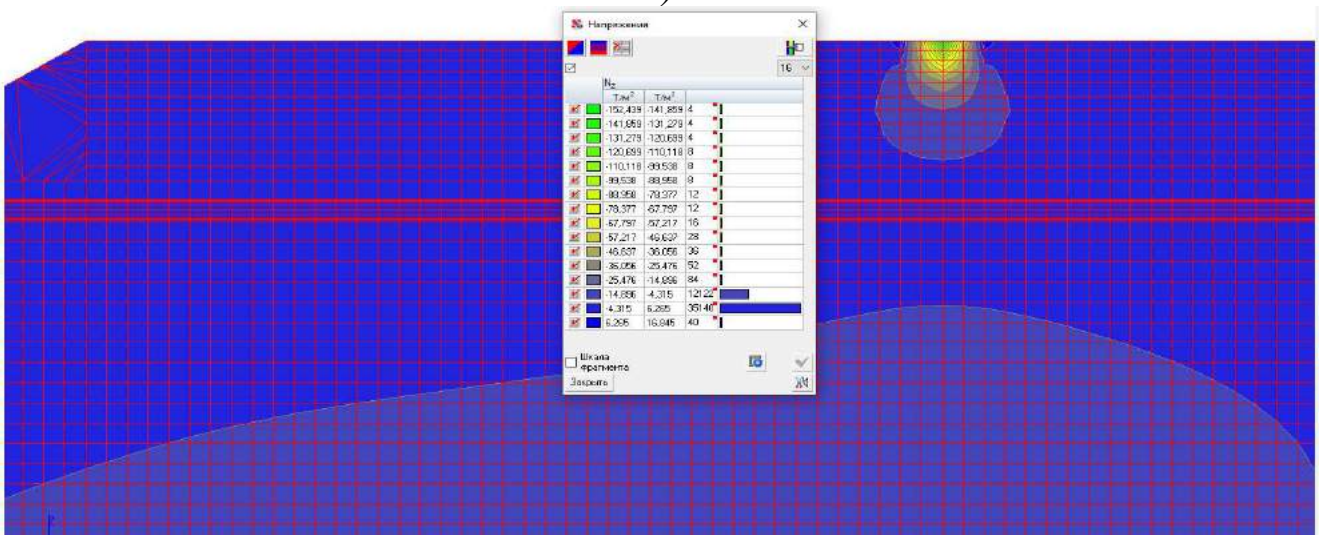
Рисунок Б.6 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від великовагового транспорту 86,25 кН на відстані 1,65 м від осі: *а* – розподіл деформацій Z в ДК без труби; *б* – розподіл деформацій Z з трубою ПВХ класу SN2; *в* – розподіл деформацій Z з трубою ПВХ класу SN8.



а)

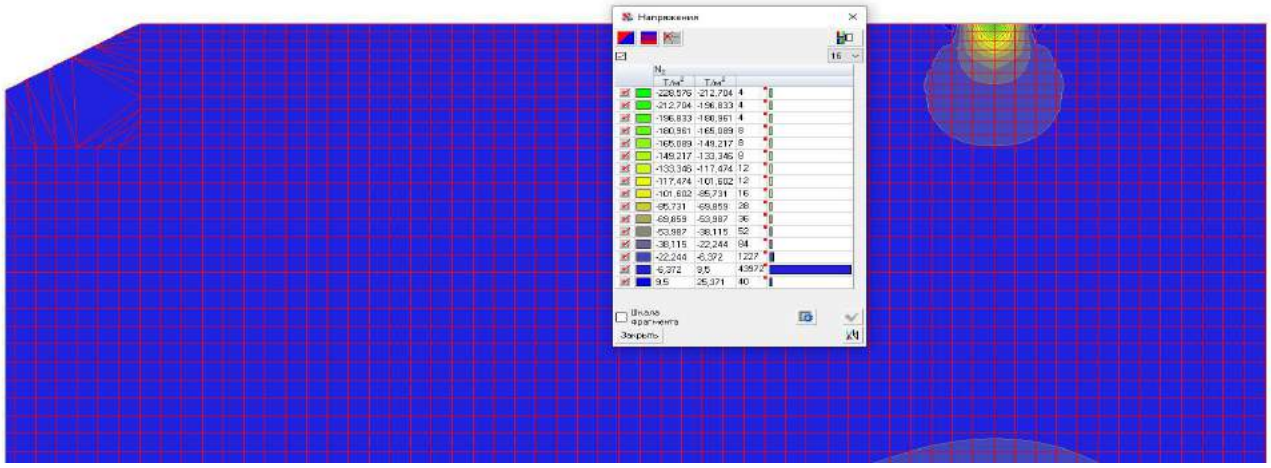


б)

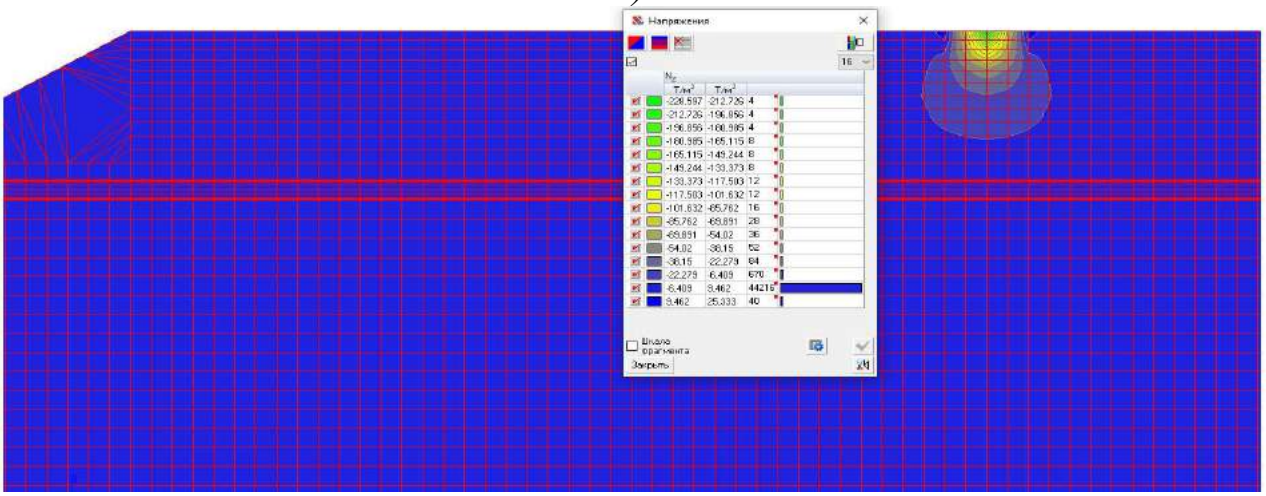


в)

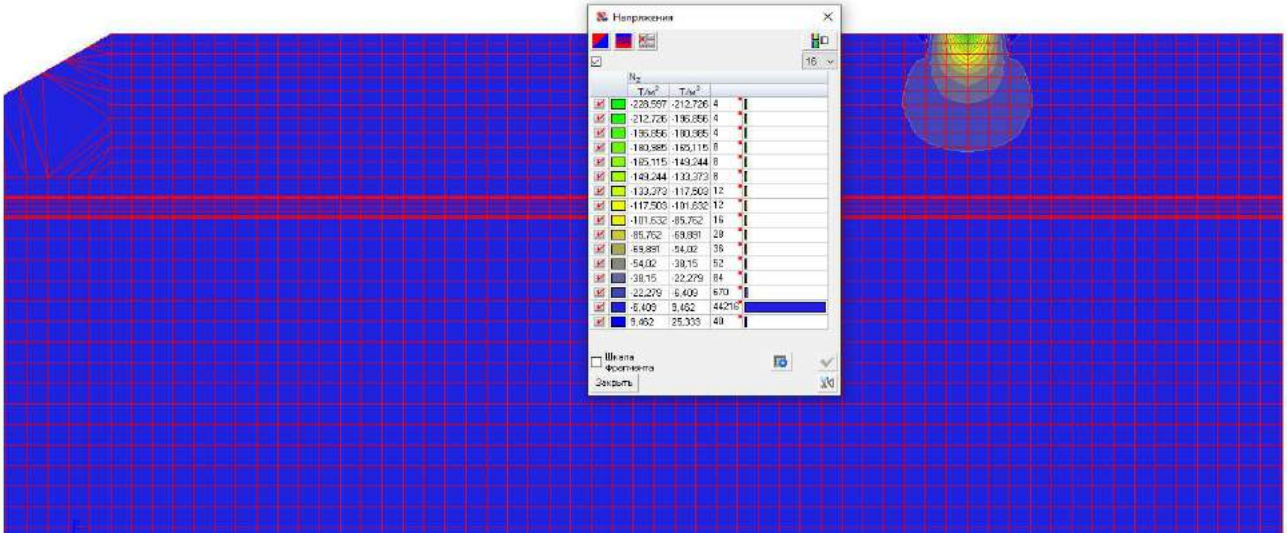
Рисунок Б.7 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від великовагового транспорту 57,5 кН на відстані 1,65 м від осі: *а* – розподіл напружень N_z в ДК без труби; *б* – розподіл напружень N_z з трубою ПВХ класу SN2; *в* – розподіл напружень N_z з трубою ПВХ класу SN8.



а)

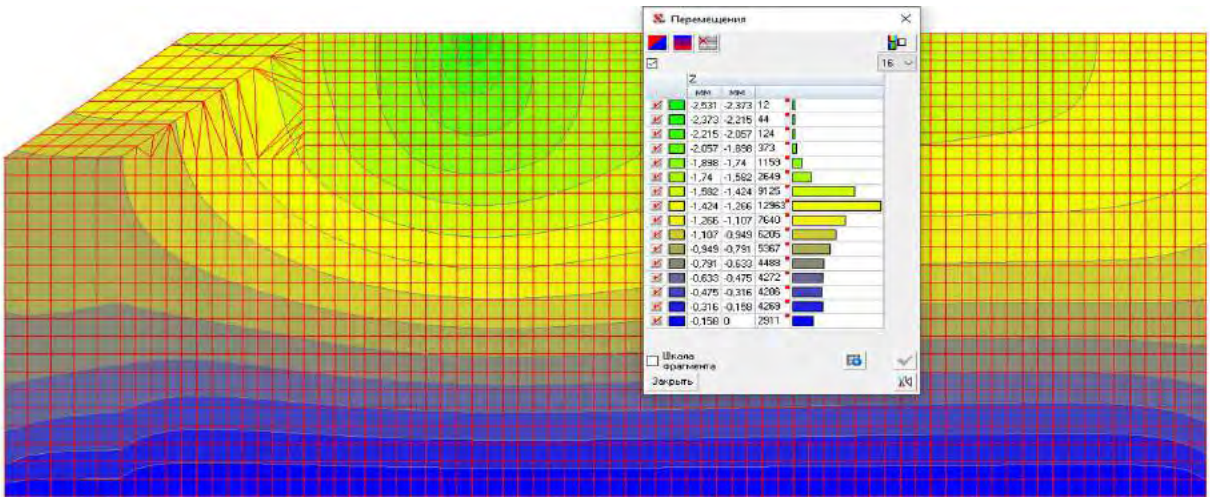


б)

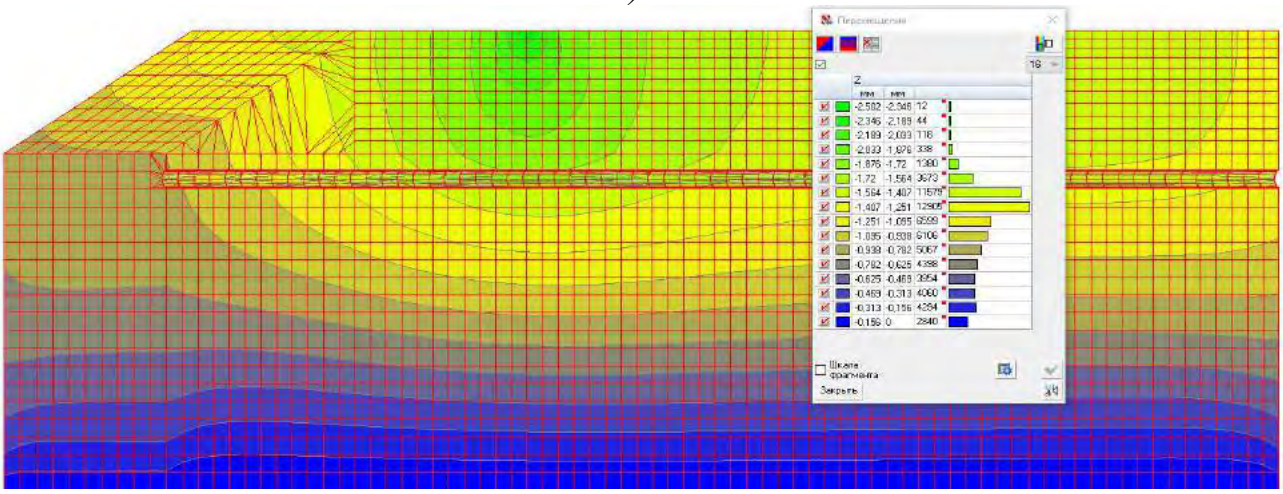


в)

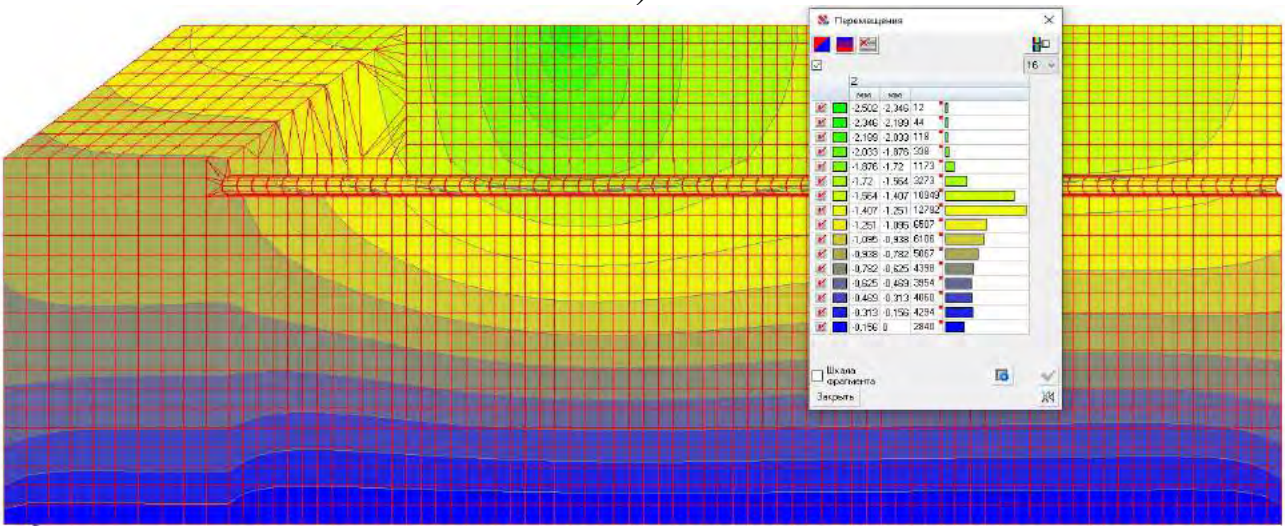
Рисунок Б.8 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від великовагового транспорту 86,25 кН на відстані 1,65 м від осі: *а* – розподіл напружень N_z в ДК без труби; *б* – розподіл напружень N_z з трубою ПВХ класу SN2; *в* – розподіл напружень N_z з трубою ПВХ класу SN8.



а)

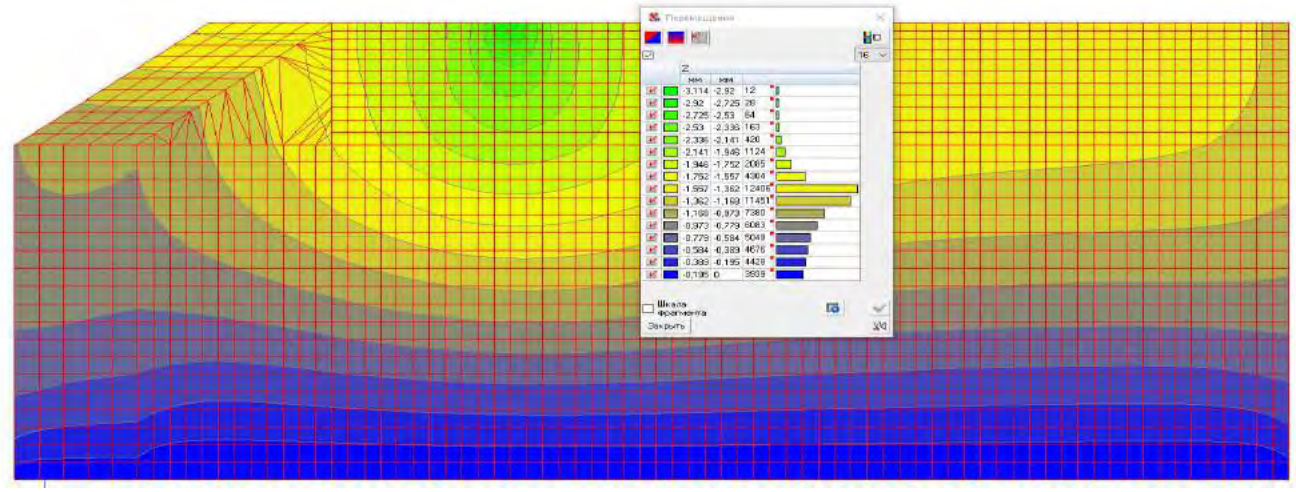


б)

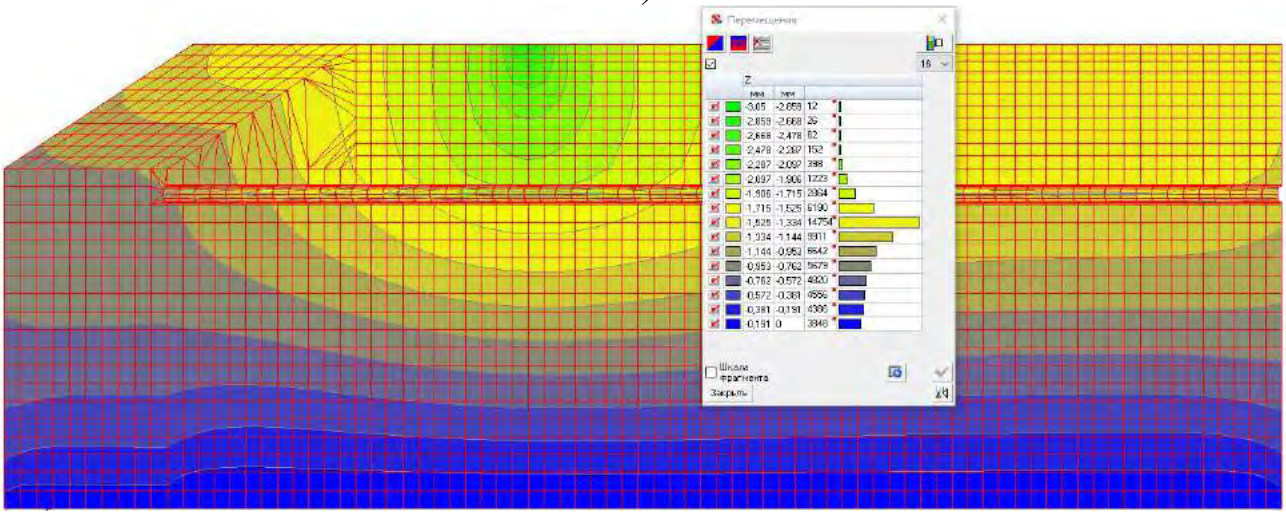


в)

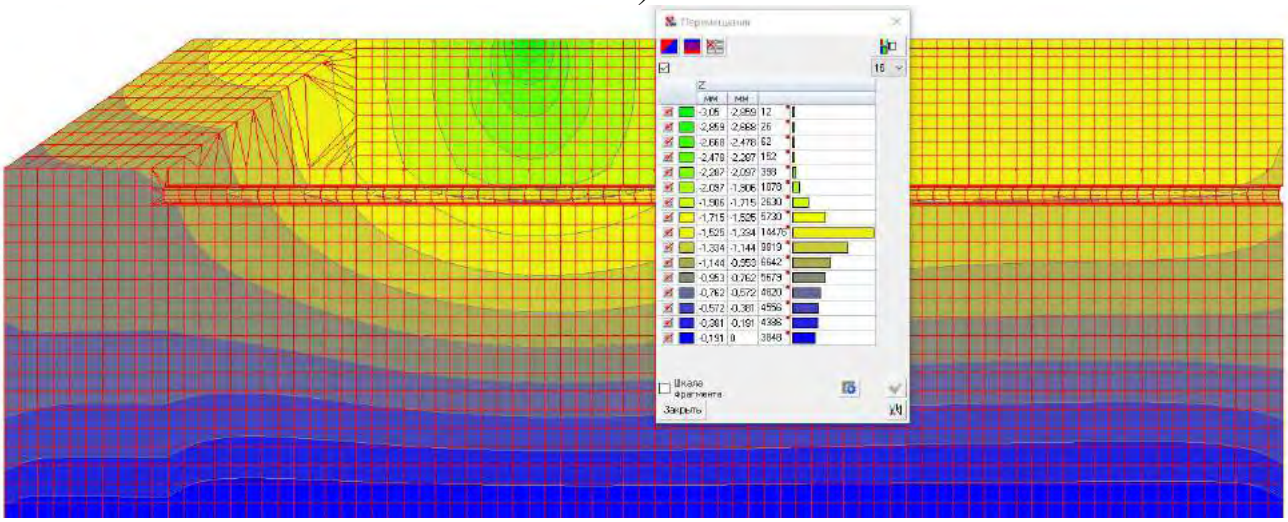
Рисунок Б.9 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від великовагового транспорту 57,5 кН на відстані 1 м від узбіччя: *а* – розподіл деформацій Z в ДК без труби; *б* – розподіл деформацій Z з трубою ПВХ класу SN2; *в* – розподіл деформацій Z з трубою ПВХ класу SN8.



а)

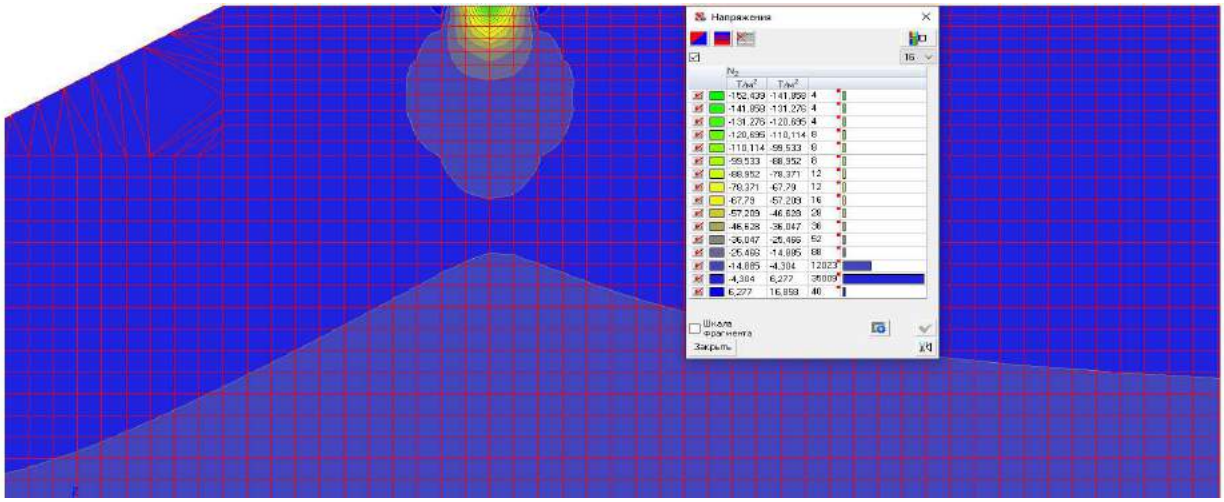


б)

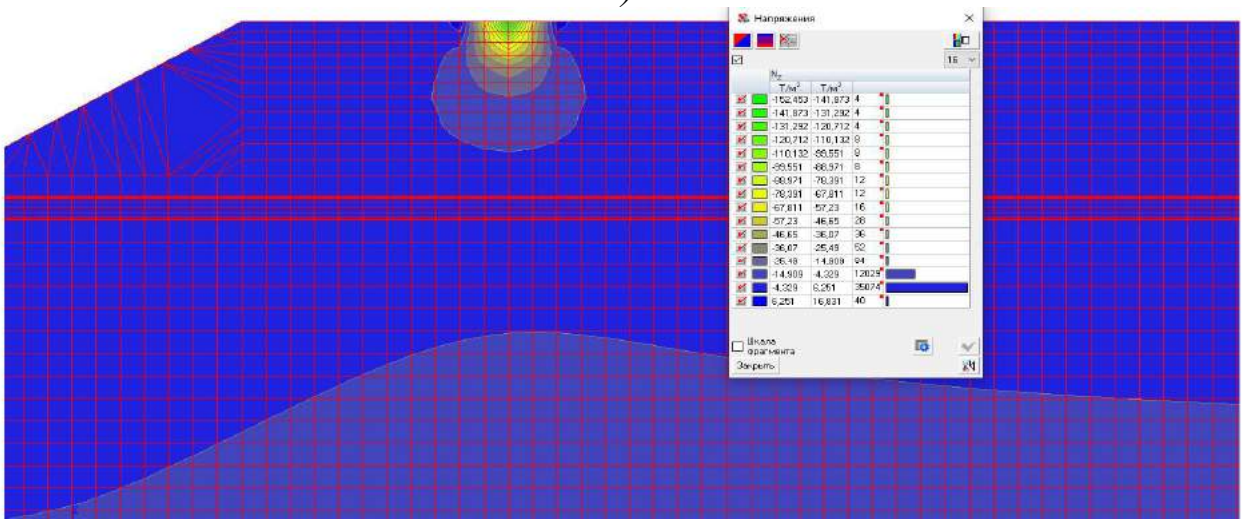


в)

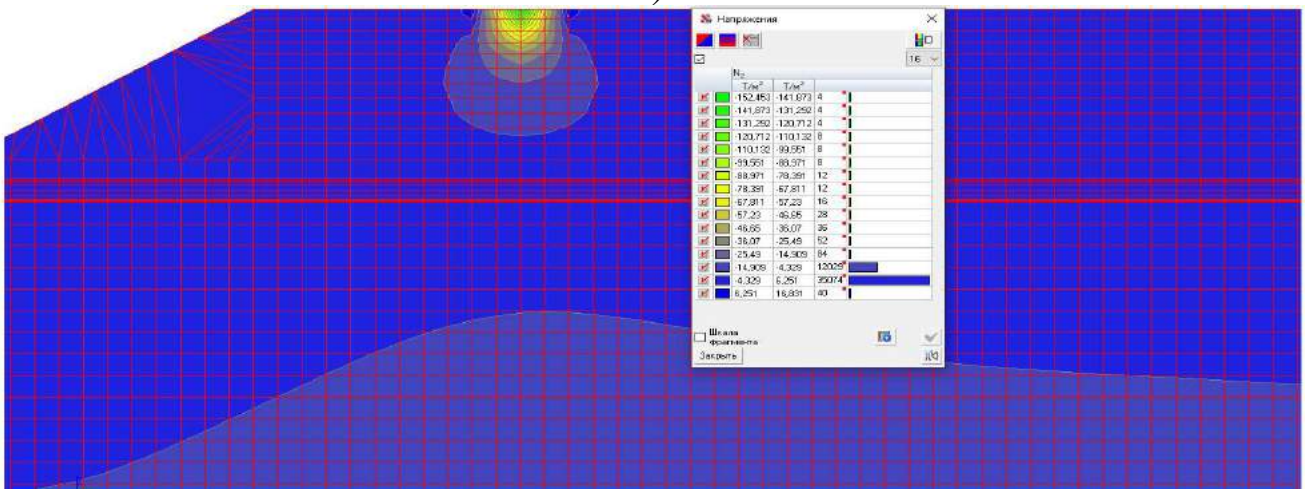
Рисунок Б.10 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від великовагового транспорту 86,25 кН на відстані 1 м від узбіччя: *а* – розподіл деформацій Z в ДК без труби; *б* – розподіл деформацій Z з трубою ПВХ класу SN2; *в* – розподіл деформацій Z з трубою ПВХ класу SN8.



а)

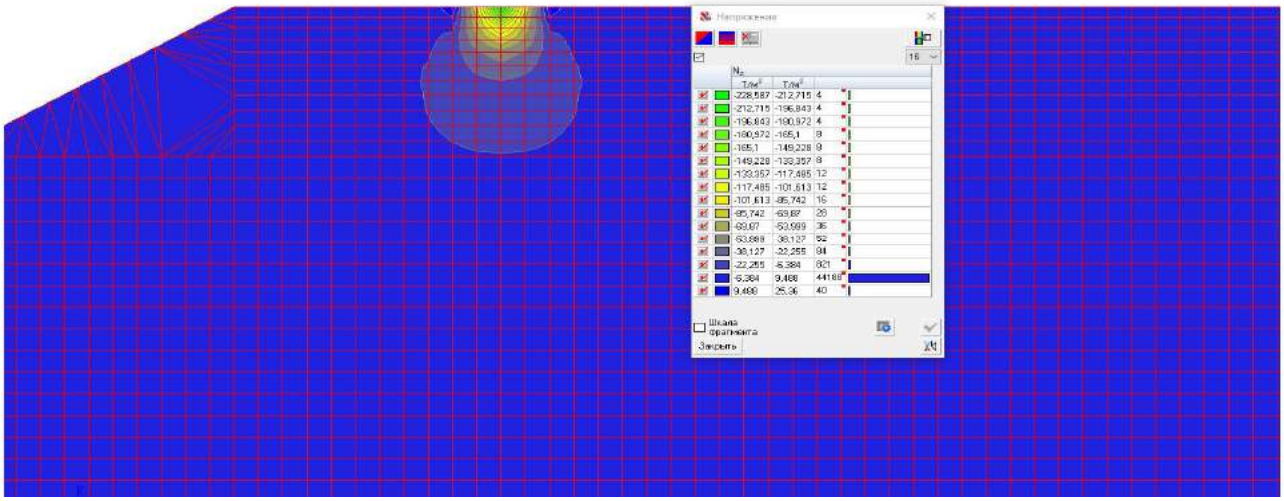


б)

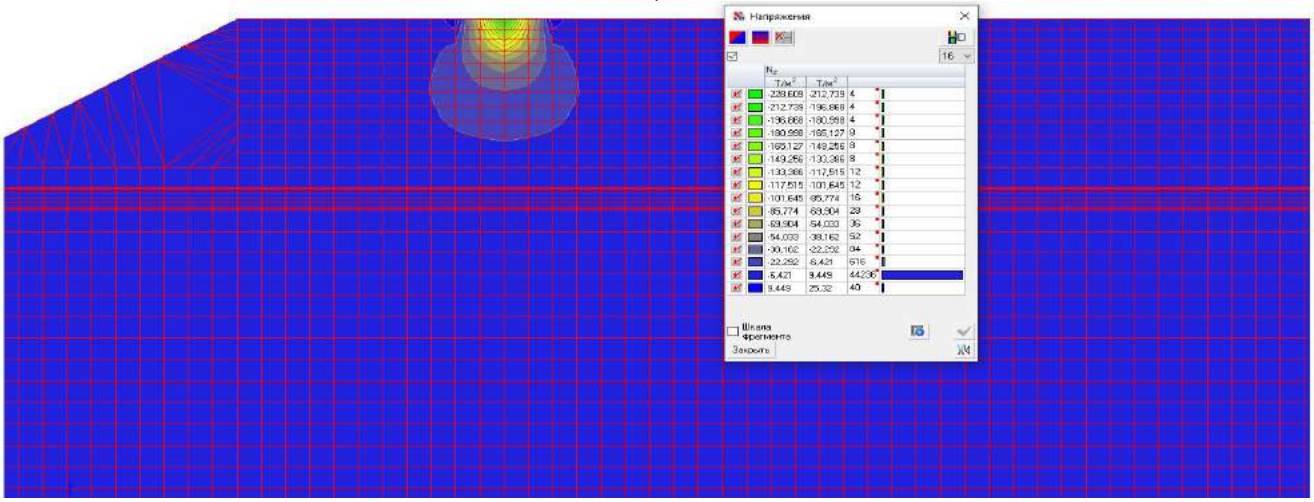


в)

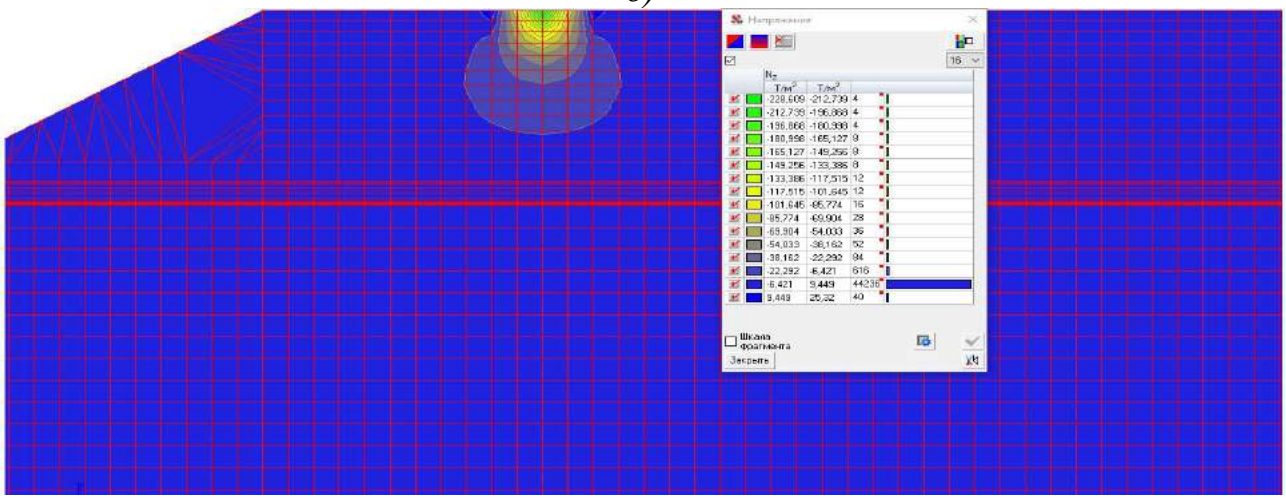
Рисунок Б.11 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від великовагового транспорту 57,5 кН на відстані 1 м від узбіччя: *а* – розподіл напружень N_z в ДК без труби; *б* – розподіл напружень N_z з трубою ПВХ класу SN2; *в* – розподіл напружень N_z з трубою ПВХ класу SN8.



а)



б)



в)

Рисунок Б.12 – Розподіл ізополів та ізоліній в об’ємних елементах під впливом навантаження від великовагового транспорту 86,25 кН на відстані 1 м від узбіччя: *а* – розподіл напружень N_z в ДК без труби; *б* – розподіл напружень N_z з трубою ПВХ класу SN2; *в* – розподіл напружень N_z з трубою ПВХ класу SN8.

Таблиця Б.1 – Результати числового експерименту щодо визначення деформацій *Z* під дренувальним шаром ДК (для ДК з трубою – в верхній частині тіла труби)

Відстань прикладання навантаження, м	Деформація, мм	Розповсюдження по довжині, м
Навантаження 57,5 кН		
Дорожня конструкція без труби		
1,68 від осі дороги	1,74	0,7
3,65 від осі дороги	1,75	0,2
1 від кромки узбіччя	1,79	0,3
Дорожня конструкція з трубою SN2		
1,68 від осі дороги	1,87	1,4
3,65 від осі дороги	1,8	1,5
1 від кромки узбіччя	1,77	1,55
Дорожня конструкція з трубою SN8		
1,68 від осі дороги	1,72	0,5
3,65 від осі дороги	1,73	0,67
1 від кромки узбіччя	1,8	0,7
Навантаження 86,25 кН		
Дорожня конструкція без труби		
1,68 від осі дороги	1,94	0,22
3,65 від осі дороги	1,95	0,25
1 від кромки узбіччя	1,99	0,5
Дорожня конструкція з трубою SN2		
1,68 від осі дороги	2	0,9
3,65 від осі дороги	1,96	1,1
1 від кромки узбіччя	1,95	1
Дорожня конструкція з трубою SN8		
1,68 від осі дороги	1,9	0,55
3,65 від осі дороги	1,91	0,6
1 від кромки узбіччя	1,95	0,65

ДОДАТОК В
МОДЕЛЮВАННЯ УСТАНОВКИ ДОРОЖНЬОЇ КОНСТРУКЦІЇ З ПОПЕРЕЧНИМ ДРЕНАЖЕМ МІЛКОГО ЗАКЛАДАННЯ

1. На дно дренажної установки вкладається система імітації притоку ґрунтових вод. На трубки з отворами системи імітації притоку ґрунтових вод надягають захисні чохли з нетканого синтетичного матеріалу, для запобігання закупорки отворів.

2. Трубки з отворами системи імітації притоку ґрунтових вод засипають шаром піску товщиною 5 см із середнім модулем крупності та коефіцієнтом фільтрації більше 3 м/добу. Шар піску не ущільнюють, щоб запобігти роздавленню трубок під час ущільнення (рис. В.1).

3. Шар піску зверху накривають шаром геосинтетичного матеріалу. У разі влаштування шару геосинтетичного матеріалу з декількох частин, їх вкладають із перекриттям не менше 30 см і скріплюють Т-подібними чи П-подібними металевими анкерами з кроком 25-50 см (рис. В.2).

4. Відсипають перший шар супіщаного ґрунту товщиною 25 см (із урахуванням коефіцієнта розпушення ґрунту на ущільнення складе 30 см). Максимальна товщина шару повинна відповідати можливостям техніки, яка використовується (рис. В.3).

5. За необхідності змочують всю площу шару, що утрамбовують, рівномірно водою, до досягнення оптимальної вологості.

Рисунок В.1 – Улаштування шару піску в установці

Рисунок В.2 – Улаштування шаром нетканого синтетичного матеріалу

Рисунок В.3 – Улаштування першого шару супіщаного ґрунту товщиною 25 см

Рисунок В.4 – Улаштування першого шару супіщаного ґрунту товщиною 25 см

Рисунок В.5 – Улаштування наступного шару супіщаного ґрунту товщиною 30 см

6. Проходять віброплитою всю ділянку від 4 до 6 разів. Необхідно враховувати характеристики поверхонь, які утрамбовують, пропускати окремі ділянки не можна. Поверхня підготовленого шару не повинна мати перепадів, що перевищують 2 см (рис. В.4).

7. Визначають коефіцієнт ущільнення ґрунту.

8. Якщо досягнуто необхідний ступінь ущільнення, то насипають за необхідності наступний шар супіщаного ґрунту товщиною 30 см (із урахуванням коефіцієнта розпушення ґрунту на ущільнення складе 36 см) (рис. В.5).

Рисунок В.6 – Ущільнення шару з відповідним похилом дорожнього одягу

Рисунок В.7 – Улаштування дренажної траншеї

9. Кожен шар ущільнюють окремо (рис. В.6). Верхній шар ґрунту повинен мати похил паралельний похилу дорожнього одягу 25-40 ‰.

10. У верхньому шарі ґрунту влаштовують дренажну траншею глибиною рівною двом діаметрам дренажної труби та шириною рівною ширині робочого органу землерийного обладнання. Похил дна канави приймають рівним похилу верхнього шару ґрунту (рис. В.7).

Рисунок В.8 – Улаштування шару нетканого синтетичного матеріалу на дно канави

Рисунок В.9 – Улаштування шару нетканого синтетичного матеріалу з елементами закріплення

Рисунок В.10 – Улаштування нетканого синтетичного матеріалу з елементами закріплення на дренажну трубу

11. На дно канави вкладають шар нетканого синтетичного матеріалу шириною рівною периметру фільтруючої обсипки з урахуванням перекриття не менше 30 см. Один край нетканого синтетичного матеріалу закріплюють Т-подібними чи П-подібними металевими анкерами на стінках і дні канави, а інший розгортають за межами канави. У разі влаштування шару нетканого синтетичного матеріалу з декількох частин, їх вкладають із перекриттям не менше 30 см і скріплюють Т-подібними чи П-подібними металевими анкерами з кроком 25-50 см (рис. В.8-Г.9).

12. Перфоровану дренажну трубу обгортають нетканим синтетичним матеріалом із перекриттям не менше 10 см. Синтетичний матеріал зшивають або обмотують синтетичною ниткою (рис. В.10).

Рисунок В.11 – Улаштування перфорованої дренажної труби, що обгорнута нетканим синтетичним матеріалом на дно канави

Рисунок В.12 – Засипка перфорованої дренажної труби

Рисунок В.13 – Закриття фільтруючої обсипки краями нетканого синтетичного матеріалу

13. На дно канави, зверху нетканого синтетичного матеріалу, вкладають перфоровану дренажну трубу, що обгорнута нетканим синтетичним матеріалом (рис. В.11).

14. Дренажну трубу засипають зернистим матеріалом фільтруючої обсипки до верху канави. Ущільнення фільтруючої обсипки не проводять, для запобігання руйнування дренажної труби (рис. В.12).

15. Фільтруючу обсипку закривають краями нетканого синтетичного матеріалу з перекриттям не менше 30 см та скріплюють Т-подібними чи П-подібними металевими анкерами з кроком 25-50 см (рис. В.13).

ДОДАТОК Г

ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

Міністерство освіти і науки України
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Ідентифікаційний код 02070915
№ 823/01
20 05 2020 р.
01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1
тел.: 280-82-03

ДОВІДКА

про впровадження результатів науково-дослідної роботи

Результати дисертаційної роботи Бубели А.В. за темою «Методологія проектування поперечних дренажів мілкого закладання з оцінкою якісного стану автомобільної дороги» впроваджено у навчальний процес, а саме при викладанні дисциплін „Будівництво та експлуатація інженерних мереж", „Механіка земляного полотна", 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. Грищук

Завідувач кафедри
транспортного будівництва
та управління майном НТУ, професор В.Я. Савенко

ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО
АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ
(УКРАВТОДОР)
«21» 10 2020 р.
№ 13-8-50
03680, МСП м. Київ, вул. Фізкультури, 9

ДОВІДКА

про використання результатів науково-дослідної роботи

Результати науково-дослідної роботи кандидата технічних наук, доцента, доцента кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету Бубели А.В. у вигляді «Методичних рекомендацій з проведення вартісної оцінки автомобільних доріг і споруд на них (МР Д 1.2-37641918-884:2017)», «Альбом типових проектних рішень конструкцій земляного полотна автомобільних доріг загального користування (АД А.2.4-37641918-006:2018)», «Методичних рекомендацій з вибору оптимальних конструкцій дренажів мілкого закладання з урахуванням дорожньо-кліматичних зон України (МР В.2.3-37641918-913:2020)», «Альбом типових проектних рішень споруд поверхневого водовідведення на автомобільних дорогах загального користування (АВ.2.4-37641918-011:2020)», «Настанова з проектування та влаштування споруд поверхневого водовідведення на автомобільних дорогах загального користування (ДСТУ 9057:2020)» використовуються у практиці при проектуванні автомобільних доріг загального користування проектними організаціями, які підпорядковані Державному агентству автомобільних доріг України (Укравтодор).

Перший заступник Голови
Державного агентства
автомобільних доріг України,
д-р. екон. наук

Євген КУЗЬКІН

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: dornauka@dorndi.org.ua
www.dorndi.org.ua
www.facebook.com/dorndi/

23.07.2020 № 19.1-5-1571

на №_____ від_____

ДОВІДКА

про використання результатів науково-дослідної роботи

Результати науково-дослідної роботи кандидата технічних наук, доцента, доцента кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету Бубели А.В. у вигляді «Методичних рекомендацій з проведення вартісної оцінки автомобільних доріг і споруд на них (МР Д 1.2-37641918-884:2017)», «Альбом типових проектних рішень конструкцій земляного полотна автомобільних доріг загального користування (АД А.2.4-37641918-006:2018)», «Методичних рекомендацій з вибору оптимальних конструкцій дренажів мілкого закладання з урахуванням дорожньо-кліматичних зон України (МР В.2.3-37641918-913:2020)», «Альбом типових проектних рішень споруд поверхневого водовідведення на автомобільних дорогах загального користування (АВ.2.4-37641918-011:2020)», «Настанова з проектування та влаштування споруд поверхневого водовідведення на автомобільних дорогах загального користування (ДСТУ 9057:2020)», які були розроблені на замовлення Державного агентства автомобільних доріг України (Укравтодор), наразі використовуються у практиці проектування поперечних дренажів мілкого закладання на автомобільних дорогах загального користування.

018002

Директор ДП "ДерждорНДІ",
канд.екон. наук А.О. Безуглий

Гнєвська Н.
0672310757

ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО –
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ІНСТИТУТ
З ПРОЕКТУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ
ДОРОЖНЬОГО ГОСПОДАРСТВА
УКРДІПРОДОР

Management Service

03037, м. Київ, Повітрофлотський пр-кт, 39/1
тел./факс: (044) 206-64-30
e-mail: okt@diprodor.com

"24" 06 2020 р. № 804-01

на № _____ від _____

ДОВІДКА
про використання результатів науково-дослідної роботи

Результати досліджень, які відображені в науково-дослідній роботі здобувача кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету, кандидата технічних наук, доцента **Бубели Андрія Володимировича** «Методологія проектування поперечних дренажів мілкого закладання з оцінкою якісного стану автомобільної дороги» використані при виконанні розрахунків поперечних дренажів мілкого закладання у проектах «Коригування робочого проекту капітального ремонту автомобільної дороги державного значення М-05 Київ-Одеса на ділянці км 402+500 - км 405+000, Одеська область», «Коригування проектно-кошторисної документації будівництва обходу с. Красногорівка км 275+000 - км 282+000 при реконструкції автомобільної дороги державного значення М-03 Київ-Харків-Довжанський на ділянці Лубни-Полтава км 210+000 - км 300+550, км 323+000 - км 329+050, Полтавська область».

Проведені розрахунки згідно «Методичних рекомендацій з вибору оптимальних конструкцій дренажів мілкого закладання з урахуванням дорожньо-кліматичних зон України (МР В.2.3-37641918-913:2020)» дали можливість визначити параметри поперечних дренажів мілкого закладання, як на стадії влаштування, так і на стадії експлуатації ділянок автомобільних доріг, що сприятиме підвищенню надійності та довговічності дорожніх конструкцій.

Застосування проєктних рішень щодо влаштування поперечних дренажів мілкого закладання за параметрами, отриманими у результаті застосування Методичних рекомендацій МР В.2.3-37641918-913:2020, від збільшення строку експлуатації дорожнього одягу та зменшення товщин дренувальних шарів на зазначених ділянках автомобільних доріг дозволило отримати економічний ефект у сумі 610,0 (шістсот десять) тис. грн.

Заступник головного інженера
ДП «Укрдіпродор», канд. техн. наук Федір ГОНЧАРЕНКО

УКРАВТОДОР

СЛУЖБА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ У ЗАПОРІЗЬКІЙ ОБЛАСТІ

вул. Українська, 50, м. Запоріжжя, 69095,
тел. (061)787-63-11, факс (061)787-64-30
E-mail: sad@sad-zp.com.ua, Код ЄДРПОУ 25891336

21.08.2020 № 82/17-871

ДОВІДКА

про використання результатів науково-дослідної роботи

Результати досліджень, які відображені в науково-дослідній роботі здобувача кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету, кандидата технічних наук, доцента Бубели А.В. «Методологія проектування поперечних дренажів мілкого закладання з оцінкою якісного стану автомобільної дороги» використані при виконанні проектів «Капітальний ремонт автомобільної дороги державного значення М-18 Харків – Сімферополь – Алушта - Ялта на ділянці км 266+300 – км 276+600» та «Капітальний ремонт автомобільної дороги державного значення М-18 Харків – Сімферополь – Алушта - Ялта на ділянці км 276+600 – км 283+861».

Виконані розрахунки дали можливість на стадії проектування системи осушення земляного полотна та дорожнього одягу обґрунтувати параметри поперечних дренажів мілкого закладання на основі визначеного загального притоку вологи у розрахунковий період, що сприятиме підвищенню надійності дорожньої конструкції.

Начальник
Служби автомобільних доріг, к.т.н. А.В. Івко

Сучасна транспортна інфраструктура
ТОВ "СУЧАСНА ТРАНСПОРТНА ІНФРАСТРУКТУРА"
+38 (044) 299-0661
cti.kyiv@gmail.com
ТОВ "СТІ", код ЄДРПОУ 42229523, Юр. адреса: 03194, м. Київ, б-р Кольцова, буд. 14Л групи 301-302, приміщення 1

ДОВІДКА

про використання результатів науково-дослідної роботи

Результати досліджень, які відображені в науково-дослідній роботі здобувача кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету, кандидата технічних наук, доцента Бубели А.В. «Методологія проектування поперечних дренажів мілкого закладання з оцінкою якісного стану автомобільної дороги» використані при виконанні проекту «Капітальний ремонт автомобільної дороги загального користування місцевого значення С 100706 /Васильків – Глеваха/ - Крушинка км 0+000 – 3+600, Київська область».

Проведені розрахунки дозволили спроектувати оптимальну конструкцію з поперечними дренажами мілкого закладання, призначену для осушення дорожнього одягу та робочої зони земляного полотна, на основі визначеного загального питомого надлишку вологи у розрахунковий період, і тим самим зменшити витрати на ремонт та експлуатаційне утримання ділянки дороги в подальшому.

Директор ТОВ
«Сучасна транспортна інфраструктура», к.т.н _____ В.В. Гончаренко

Державне агентство автомобільних доріг України (Укравтодор)

Національний транспортний університет (НТУ)

РЕКОМЕНДОВАНО
Науковою радою Державного агентства автомобільних доріг України
протокол № ___ від ___ _____ 20___р.

РЕКОМЕНДОВАНО
Науково-технічною радою ДП «ДерждорНДІ»
протокол № 4 від 10 06 2020р.

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ З ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ДРЕНАЖІВ МІЛКОГО ЗАКЛАДАННЯ З УРАХУВАННЯМ ДОРОЖНЬО-КЛІМАТИЧНИХ ЗОН УКРАЇНИ

МР В.2.3-37641918-913:2020

ПОГОДЖЕНО
Начальник Відділу інноваційного розвитку Укравтодору
_____ О. Ю. Тимощук
«___» _____ 2020 р.

РОЗРОБЛЕНО
Перший проректор-проректор з наукової роботи НТУ
_____ М. М. Дмитрієв
«___» _____ 2020 р.

Науковий керівник НДР, декан факультету транспортного будівництва НТУ, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном
_____ О. С. Славінська
«___» _____ 2020 р.

ПОГОДЖЕНО
Начальник відділу нормоконтролю Центру нормоконтролю, оцінки відповідності та міжнародного співробітництва ДП «ДерждорНДІ»
_____ М. М. Стулій
«___» _____ 2020 р.

Відповідальний виконавець, доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном НТУ
_____ А. В. Бубела
«___» _____ 2020 р.

Зав. кафедри транспортного будівництва та управління майном НТУ, професор
_____ В. Я. Савенко
«___» _____ 2020 р.

Київ
2020

Державне агентство автомобільних доріг України
(Укравтодор)
Національний транспортний університет (НТУ)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Голова Державного агентства
автомобільних доріг України
_____ О.М. Кубраков
«___» _____ 2020 р.

ПОСІБНИК
до ДСТУ _____:202__
настанова з проектування та влаштування споруд поверхневого водовідведення на автомобільних дорогах загального користування

ПОГОДЖЕНО
Начальник Відділу інноваційного розвитку Укравтодору
_____ О.Ю. Тимощук
«___» _____ 2020 р.

ПОГОДЖЕНО
Начальник відділу нормоконтролю
Центру нормоконтролю оцінки відповідності та міжнародного співробітництва ДП «ДерждорНДІ»
_____ М.М. Стулій
«___» _____ 2020 р.

РОЗРОБЛЕНО
Перший проректор-проректор з наукової роботи НТУ
_____ М. М. Дмитрієв
«___» _____ 2020 р.
Науковий керівник НДР,
декан факультету транспортного будівництва НТУ, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном
_____ О. С. Славінська
«___» _____ 2020 р.

Відповідальний виконавець, доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном НТУ
_____ О. С. Чечуга
«___» _____ 2020 р.
Зав. кафедри транспортного будівництва та управління майном НТУ, професор
_____ В. Я. Савенко
«___» _____ 2020 р.
Професор кафедри транспортного будівництва та управління майном НТУ
_____ О. Ю. Усиченко
«___» _____ 2020 р.

Київ
2020

АВТОРСЬКИЙ ПРИМІРНИК
ДП "УкрНДНЦ"

НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

ДСТУ 9057:2020

НАСТАНОВА З ПРОЕКТУВАННЯ ТА ВЛАШТУВАННЯ СПОРУД ПОВЕРХНЕВОГО ВОДОВІДВЕДЕННЯ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ ЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ

Видання офіційне

Київ
ДП «УкрНДНЦ»
2021

ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ (УКРАВТОДОР)
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ (НТУ)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Голова Державного агентства автомобільних доріг України
О.М. Кубраков
_____ 2020 р.

АЛЬБОМ
ТИПОВИХ ПРОЄКТНИХ РІШЕНЬ СПОРУД ПОВЕРХНЕВОГО ВОДОВІДВЕДЕННЯ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ ЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ
А В.2.4-37641918-011:2020

ПОГОДЖЕНО
Начальник Відділу інноваційного розвитку Укравтодору
О.Ю. Тимощук
_____ 2020 р.

ПОГОДЖЕНО
Начальник відділу нормоконтролю Центру нормоконтролю оцінки відповідності та міжнародного співробітництва ДП «ДерждорНДІ»
М.М. Стулій
_____ 2020 р.

РОЗРОБЛЕНО
Перший проректор - проректор з наукової роботи Національного транспортного університету
М.М. Дмитрієв
_____ 2020 р.

Декан факультету транспортного будівництва, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном, науковий керівник
О.С. Славінська
_____ 2020 р.

Завідувач кафедри транспортного будівництва та управління майном, професор
В.Я. Савенко
_____ 2020 р.

Доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном, відповідальний виконавець
О.С. Чечуга
_____ 2020 р.

Доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном, виконавець
А.В. Бубела
_____ 2020 р.

Київ
2020

ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЗАТВЕРДЖУЮ
В. о. заступника Голови Державного агентства автомобільних доріг України
О.І. Харченко
_____ 2018 р.

АЛЬБОМ
ТИПОВИХ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ КОНСТРУКЦІЙ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ ЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ
АД А.2.4-37641918-006:2018

ПОГОДЖЕНО
Завідувач Сектору інноваційного розвитку Укравтодору
Директор Департаменту розвитку мережі доріг Укравтодору
А.О. Цинка
_____ 2018 р.
С.Ю. Цепелев
_____ 2018 р.

ПОГОДЖЕНО
Начальник відділу стандартизації та метрології ДП «ДерждорНДІ»
М.М. Стулій
_____ 2018 р.

РОЗРОБЛЕНО
Перший проректор - проректор з наукової роботи Національного транспортного університету
М.М. Дмитрієв
_____ 2018 р.

Декан факультету транспортного будівництва, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном, науковий керівник
О.С. Славінська

Завідувач кафедри транспортного будівництва та управління майном, професор
В.Я. Савенко

Доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном, відповідальний виконавець
О.С. Чечуга

Доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном, виконавець
А.В. Бубела

Київ
2018

ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ
(УКРАВТОДОР)

Державне підприємство
«Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна»
(ДП «ДерждорНДІ»)

РЕКОМЕНДОВАНО
Науковою радою Державного агентства автомобільних доріг України
Протокол від "__"_____ 2017 р. № _

РЕКОМЕНДОВАНО
Науково-технічною радою ДП «ДерждорНДІ»
Протокол від "__"_____ 2017 р. № _

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

з проведення вартісної оцінки автомобільних доріг і споруд на них

(проект, перша редакція)
МР Д 1.2-37641918-884:2017

ПОГОДЖЕНО
Начальник Відділу інноваційного розвитку Укравтодору

_____ А.О. Цинка
«__»_____2017 р.

РОЗРОБЛЕНО
Заступник директора з розвитку наукової роботи ДП «ДерждорНДІ»

_____А.О. Безуглий
«__»_____2017 р.

ПОГОДЖЕНО
Начальник Управління експлуатації доріг Укравтодору

_____ О.В. Федоренко
«__»_____2017 р.

Науковий керівник, завідувач відділу економічних досліджень та визначення вартості дорожніх робіт ДП «ДерждорНДІ»

_____ Ю.М. Бібик
«__»_____2017 р.

Продовження титульного аркуша на наступній сторінці

Продовження титульного аркуша

ПОГОДЖЕНО
Заступник директора Департаменту планово-фінансової діяльності, бухгалтерського обліку та звітності – начальник відділу управління фінансами Укравтодору
_____В.М. Бакуліч
«__»_____2017 р.

Відповідальний виконавець, молодший науковий співробітник відділу економічних досліджень та визначення вартості дорожніх робіт ДП «ДерждорНДІ»

_____І.Л. Гресько
«__»_____2017 р.

Перший проректор - проректор з наукової роботи Національного транспортного Університету (НТУ)
_____М.М. Дмитрієв
«__»_____2017 р.

Декан факультету транспортного будівництва НТУ, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету (НТУ)
_____О.С. Славінська
«__»_____2017 р.

Доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету (НТУ)
_____А.М. Харченко
«__»_____2017 р.

Доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету (НТУ)
_____А.В. Бубела
«__»_____2017 р.

Київ
2017

УКРАЇНА

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 76497

Літературний письмовий твір науково-практичного характеру "Методичні рекомендації з проведення вартісної оцінки автомобільних доріг і споруд на них"

(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Славінська Олена Сергіївна, Харченко Анна Миколаївна, Бубела Андрій Володимирович , Чесноков Сергій Володимирович**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010**

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації 01.02.2018

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ ІДЕНТИФІКАЦІЙНИЙ КОД 37508596

М. П.

Державний секретар Міністерства економічного розвитку і торгівлі України О. Ю. Перевезенцев

ПК «Україна». Зам. 17-2020. 2017 р. IV кв.

УКРАЇНА

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 76682

Літературний письмовий твір наукового характеру "Розробка математичної моделі вартісної оцінки дорожньо-транспортних активів як складової інформаційно-управлінської системи"

(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Славінська Олена Сергіївна, Савенко Вячеслав Якович, Харченко Анна Миколаївна, Бубела Андрій Володимирович**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010**

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації 06.02.2018

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ ІДЕНТИФІКАЦІЙНИЙ КОД 37508596

М.П.

Державний секретар Міністерства економічного розвитку і торгівлі України О. Ю. Перевезенцев

ПК «Україна». Зам. 17-2020. 2017 р. IV кв.

УКРАЇНА

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 83580

Літературний письмовий твір наукового характеру "Дослідження роботи дорожньої конструкції на ділянках з трубчастими дренами з матеріалів різного походження"

(вид, назва твору)

Автор(и) **Славінська Олена Сергіївна, Савенко Вячеслав Якович, Бубела Андрій Володимирович, Яремов Андрій Петрович**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 11.12.2018

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ ІДЕНТИФІКАЦІЙНИЙ КОД 37508596

М.П.

Державний секретар Міністерства економічного розвитку і торгівлі України О. Ю. Перевезенцев

ПК «Україна». Зам. 18-2001. 2018 р. 1 кв.

УКРАЇНА

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 86516

Літературний письмовий твір наукового характеру "Розробка моделі вагомостей параметрів автомобільних доріг у складі інформаційно-управлінської системи грошової оцінки"

(вид, назва твору)

Автор(и) **Славінська Олена Сергіївна, Стьожка Віталій Володимирович, Харченко Анна Миколаївна, Бубела Андрій Володимирович, Кватадзе Аліна Іродіонівна**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 01.03.2019

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ ІДЕНТИФІКАЦІЙНИЙ КОД 37508596

М.П.

Державний секретар Міністерства економічного розвитку і торгівлі України О. Ю. Перевезенцев

ПК «Україна». Зам. 19-2001. 2019 р. І кв.

УКРАЇНА

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 93710

Літературний письмовий твір "Альбом типових проектних рішень конструкцій земляного полотна автомобільних доріг загального користування"

(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Славінська Олена Сергіївна, Чечуга Олександр Сергійович, Савенко Вячеслав Якович, Бубела Андрій Володимирович**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010**

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації 05.11.2019

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ ЕКОНОМІКИ, ТОРГІВЛІ ТА СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ
Ідентифікаційний код 37508596

М.П.

Заступник Міністра розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України Д. О. Романович

УКРАЇНА • UKRAINE • УКРАЇНА • UKRAINE • УКРАЇНА • UKRAINE • УКРАЇНА • UKRAINE • УКРАЇНА • UKRAINE • УКРАЇНА

ДОДАТОК Д
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографії:

1. Славінська О.С., Бубела А.В. Проектування оптимальних конструкцій поперечних дренажів мілкого закладання та оцінка їх впливу на транспортно-експлуатаційний стан автомобільної дороги : монографія. К. : НТУ. 2020. 268 с.

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

2. *Slavinska O., Savenko V., Kharchenko A., Bubela A.* Development of a mathematical model of evaluation of road-and transport assets as a component of information-and-management system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2017. Vol 6. 4 (90). URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118798 (SCOPUS).

3. 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. 7 (92). URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126512 (SCOPUS).

4. 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. 3 (97). URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156519. (SCOPUS).

5. Slavinska O., Bubela A., Chechuha O., Bondarenko L. The intensity of water removal from shallow drainage systems considering the properties of filler materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol 3. 1 (105). URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203551 (SCOPUS).

6. Bubela A. The methodological basis of determining the operation condition of a road for its technical expertise. *World Science.* 2020. Vol 3 (55). C.4-7. URL: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/31032020/6965

7. Славінська О.С., Бубела А.В., Бондаренко Л.П., Чечуга О.С. Визначення оптимальної дорожньої конструкції з поперечними дренажами мілкого закладання. *International Academy Journal Web of Scholar.* 2020. Vol 5 (47), С. 3-11. URL: https://doi.org/10.31435/rsglobal_wos/31052020/7088

8. *Бубела А.В., Кватадзе А.І. Дослідження режимів роботи дренувальних шарів в дорожніх конструкціях. Science Review. 2020. 5(32).* С. 24-29. URL: https://doi.org/10.31435/rsglobal_sr/30062020/7140

9. Slavinska, O., Bubela, A., Davydenko, O. Prediction of the stress-strain state of a road structure with shallow transverse tubular drainage. *ScienceRise.* 2020. (4). С. 24-32. URL: https://doi.org/10.21303/2313-8416.2020.001396

Статті у фахових виданнях:

10. Bubela A.V. Project management of estimates of the roads based on considerstion of the technical state. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2016. Вип. 97, С. 50-54. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/97/050-054.pdf

11. Bubela A.V. Using differential method in the construction of the highway to the accounting and valuation of assets road sector. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2016. Вип. 98. С. 22-28. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/98/022-028.pdf

12. Бубела А.В. Вплив дорожніх умов на транспортно-експлуатаційний стан автомобільної дороги. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2018. Вип. 103. С. 61-65. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/103/61.pdf

13. Бубела А.В. Багаторівнева модель технічного стану об'єктів транспортного будівництва. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2018. Вип. 104. С. 44-48. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/104/44.pdf

14. Бубела А.В. Дослідження закономірностей зволоження дорожньої конструкції та методи його регулювання. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2019. Вип. 105. С. 44-48. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/105/44.pdf

15. Бубела А.В. Дослідження зміни транспортно-експлуатаційного стану покриттів в умовах перезволоження. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2019. Вип. 106. С. 6-12.

16. Безуглий А., Бібік Ю., Бубела А., Гресько І., Славінська О., Харченко А. Особливості проведення вартісної оцінки автомобільних доріг загального користування. *Дороги і мости* : збірник наукових праць. 2019. Вип. 19-20. С. 5-15. URL: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2019.19.005

17. Onyshchenko A.M., Usychenko O.Y., Bubela A.V. Research of transport and operation condition taken into account of different types and types of asphalt concrete with bonding polygum. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 107. С. 71-77. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/107/71.pdf

18. Slavinska O.S., Onyshchenko A.M., Bubela A.V. Increasing the operational reliability of asphalt concrete coating for the use of modification addition butonal ns 198. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 108. С. 74-83. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/108/74.pdf

19. Бубела А.В. Дослідження ефективності функціонування дренажів мілкого закладання в дорожніх конструкціях. *Вісник Національного транспортного університету.* Серія «Технічні науки» : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 1 (46). С 45-54. DOI: 10.33744/2308-6645-2020-1-46-045-054. URL: http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/46/045.pdf

20. Славінська О.С., Бубела А.В., Бондаренко Л.П., Чечуга О.С. Дослідження роботи дренажів мілкого закладання за інтенсивністю водовідведення з урахуванням впливу вібрації. *Дороги і мости* : збірник наукових праць. 2020. Вип. 21. С. 201-216. URL: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.201

21. Бубела А.В. Визначення залежності інтенсивності водовідведення від конструктивних характеристик поперечних дренажів мілкого закладання. *Дороги і мости* : збірник наукових праць. 2020. Вип. 22. С. 53-62. URL: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.053

22. Славінська О.С., Бубела А.В., Бондаренко Л.П., Чечуга О.С. Прогнозування режиму водовідведення з дорожньої конструкції. *Автошляховик України* : науково-виробничий журнал. 2020. Вип. 3. С. 28-36. URL: 10.33868/0365-8392-2020-3-263-28-36

23. Bubela A. Comprehensive assessment of the quality condition of the road with drainage system. *Technology audit and production reserves*, 2020, 4/2(54), P. 20-26. URL: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.210556

Опубліковані праці апробаційного характеру:

24. Бубела А.В. Особливості здійснення грошової оцінки ділянки автомобільної дороги з урахуванням техніко-функціональних характеристик. *Європейські стандарти оцінки, землеустрою і кадастру : Проблеми впровадження та шляхи їх реалізації в Україні.* Міжнародна науково-практична конференція. 28 квітня 2016 р., Харків, ХНУМГ ім.О.М.Бекетова. С. 78-83.

25. Бубела А.В. Принципи побудови моделі вартісної оцінки майна дорожньої галузі. *Современные геоинформационные и компьютерно-инновационные технологии дорожной отрасли, аэродромного строительства и землеустройства.* Международная научно-практическая конференция. 26-27 мая 2016, Харьков. С. 58-59.

26. Бубела А.В. Побудова моделі якісного стану автомобільної дороги для проведення майнової оцінки. *Міжнародна науково-практична конференція присвячена п'ятидесятиріччю кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем*. 03 листопада 2016 р., Харків, ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. С. 86.

27. Бубела А.В. Підходи щодо регулювання водно-теплового режиму земляного полотна шляхом влаштування дренажних конструкцій мілкого закладання. *Actual aspects of development in the context of globalization.* IX

Міжнародна науково-практична конференція. 23-24 березня 2020 р., Флоренція, Італія. С. 250-251.

28. Бубела А.В. Дослідження роботи піщаних дренажних шарів в дорожніх конструкціях. *Modern approaches to the introduction of science into practice.* X Міжнародна науково-практична конференція. 30-31 березня 2020 р., Сан-Франциско, США. С. 376-377.

29. Бубела А.В. Дослідження роботи дренажів мілкого закладання за інтенсивністю водовідведення. *Theoretical foundations of modern science and practice.* XI Міжнародна науково-практична конференція. 06-07 квітня 2020 р., Мельбурн, Австралія. С. 172-173.

30. Бубела А.В. Дослідження впливу вібрації на дренажну здатність дорожньої конструкції. *Science, trends and perspectives.* XVII Міжнародна науково-практична конференція. 18-19 травня 2020 р., Токіо, Японія. С. 150-151.

31. Бубела А.В. Вплив тривалості водовідведення в дренажних конструкціях на транспортно-експлуатаційний стан автомобільної дороги. *Modern science, practice, society.* XVIII Міжнародна науково-практична конференція. 25-26 травня 2020 р., Бостон, США. С. 242-243.

32. Славінська О.С., Бубела А.В. Дослідження впливу вібрації на інтенсивність водовідведення з дренажної конструкції. *Гідротехнічне і транспортне будівництво*. Міжнародна науково-технічна конференція. 28-29 травня 2020 р., Одеса, Україна. С. 108-110.

33. Славінська О.С., Бубела А.В., Бондаренко Л.П. Метод визначення оптимальної дорожньої конструкції з поперечними дренажами мілкого закладання. *Perspective directions for the development of science and practice.* XX Міжнародна науково-практична конференція. 08-09 червня 2020 р., Афіни, Греція. С. 274-276.

34. Бубела А.В. Дослідження роботи дренажних шарів з поперечними дренажами мілкого закладання. *Current trends in the development of science and practice.* XXI Міжнародна науково-практична конференція. 15-16 червня 2020 р., Хайфа, Ізраїль. С. 89-91.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

35. *Slavinska O., Savenko V., Bondarenko L., Bubela A.* Improvement of methods of the property valuation based on mathematical and numerical modeling. *EUREKA: Physics and Engineering.* 2017. 6. С. 3-14. URL: http://eu-jr.eu/engineering/article/view/496/476.

36. *Slavinska O., Kharchenko A., Bubela A., Chechuha O.* Development of road sector's lend valuation method for aims of asset management. *Technology audit and production reserves*. 2020. 2/2(52). P. 43-46. URL: https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.200743

Свідоцтва та патенти:

37. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 76497 Україна. Літературний письмовий твір науково-практичного характеру «Методичні рекомендації з проведення вартісної оцінки автомобільних доріг і споруд на них» Славінська О.С., Харченко А.М., Бубела А.В., Чесноков С.В. Дата реєстрації 01.02.2018 р.

38. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 76682 Україна. Літературний письмовий твір наукового характеру «Розробка математичної моделі вартісної оцінки дорожньо-транспортних активів як складової інформаційно-управлінської системи» Славінська О.С., Савенко В.Я., Харченко А.М., Бубела А.В. Дата реєстрації 06.02.2018 р.

39. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 83580 Україна. Літературний письмовий твір наукового характеру «Дослідження роботи дорожньої конструкції на ділянках з трубчастими дренами з матеріалів різного походження» Славінська О.С., Савенко В.Я., Бубела А.В., Яремов А.П. Дата реєстрації 11.12.2018 р.

40. 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.

41. Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір № 93710 Україна. Літературний письмовий твір «Альбом типових проектних рішень конструкцій земляного полотна автомобільних доріг загального користування» Славінська О.С., Чечуга О.С., Савенко В.Я., Бубела А.В. Дата реєстрації 05.11.2019 р.