

## Прогнозування вологісного режиму дренажного шару дорожньої конструкції під дією навантаження

В. Я. Савенко, А. І. Кватадзе, О. О. Давиденко, В. В. Стьожка, Л. Л. Янчук

*Досліджено процеси формування вологісного режиму дренажного шару дорожньої конструкції під дією понаднормативного навантаження. Визначення напружено-деформованого стану проводилося за числовим експериментом в програмно-розрахунковому комплексі SCAD Office. При числовому моделюванні розглядуваної конструкції використовувалось статичне навантаження групи А<sub>2</sub> для автомобільної дороги II-ої категорії. Було проведено серію числових експериментів, які включали збільшення нормативного навантаження на 10–50 % при перезволоженні дренажного шару і ґрунту земляного полотна. Отримано розподіл ізополів та ізоліній нормальних напружень та деформацій в об'ємних елементах, що дозволило визначити товщину шару ґрунту земляного полотна – 0,67 м, з якого відбувається віджимання води під дією понаднормативного навантаження.*

*Ґрунтуючись на підході щодо визначення параметрів осідання ґрунту, при його висиханні або розмерзанні, отримано залежності для відносного осідання ґрунту, коефіцієнтів лінійного осідання та ущільнення ґрунту під дією понаднормативного навантаження. Запропоновані залежності поєднують такі показники, як деформація під дренажним шаром, глибина поширення напружень, при яких не віджимасться вода з ґрунту, оптимальна вологість та повна вологоємність ґрунту.*

*На основі результатів числових експериментів та параметрів осідання ґрунту визначено величину віджимання води з шару ґрунту під впливом понаднормативного навантаження, яка складає 5,4 л на м<sup>2</sup>. Отримані результати дозволяють скоригувати величину загального питомого надлишку води, що надходить в дренажну конструкцію. З урахуванням віджимання з шару ґрунту земляного полотна під впливом понаднормативного навантаження від колеса 86,25 кН загальний питомий надлишок може бути в межах від 35,4 до 22,4 л на 1 м<sup>2</sup>. Його збільшення на 18–32 % змінить вологісний режим основи дорожнього одягу та зменшить загальний модуль пружності*

*Ключові слова: напружено-деформований стан, дорожня конструкція, дренажний шар, віджимання води, понаднормативне навантаження*

### 1. Вступ

Збільшення інтенсивності великовагових автомобілів обумовлює безперервне зростання навантажень, швидкостей руху та, відповідно, підвищення вимог до міцності і стійкості дорожньої конструкції. Причому несприятлива ситуація виникає, коли велика вага вантажу призводить до необоротних деформацій як асфальтобетонного покриття, так і шарів основи дорожнього одягу. Суттєві зміни вологісного режиму навесні, особливо протягом першого місяця, спостерігаються в дре-

нуючих або морозозахисних шарах основи дорожнього одягу та в робочому шарі (у верхній частині під дорожнім одягом) земляного полотна (ЗП).

Найбільше значення вологості виникає за рахунок надходження атмосферних опадів, що просочуються через тріщини покриття, узбіччя, укоси ЗП, та віджиманням води в дренажний шар при осіданні нижніх шарів ґрунтів, що відтанули.

Дренажні шари за традиційним рішенням влаштовують з нездимальних пісків на всю ширину ЗП і проектують за умовами роботи на поглинання або осушування. Товщина такого шару без спеціальних додаткових дренажних конструкцій повинна бути досить великою, щоб забезпечити розміщення в ній на тривалий час всієї води, що поступає. При цьому необхідно, щоб рівень вільної гравітаційної води в піску не піднімався вище певної позначки, при якій забезпечується міцність дорожнього одягу.

На підставі експериментальних та натурних досліджень [1], на території СРСР, на перезволожених ділянках доріг було визначено, що дренажні шари, які запроектовані за принципом осушення, фактично працюють за принципом поглинання. Як правило, це ділянки в низьких насипах, в нульових відмітках, у виїмках. Вплив великовагових транспортних засобів, особливо з понад нормованою вагою, також призводить в дорожній конструкції до додаткової міграції вологи, яка обумовлена віджиманням вологи з нижніх шарів ґрунту ЗП у верхній дренажний шар.

Використання чисельного моделювання НДС дорожньої конструкції на основі сучасного програмно-розрахункового комплексу SCAD Office (ПК SCAD Office) дозволило б точно визначити товщину шару ґрунту, розміщеного під дренажним шаром, з якого буде відбуватися віджимання води під дією транспортного навантаження. Такий підхід є актуальним і дозволить приймати обґрунтоване проектне рішення щодо дренажних шарів дорожнього одягу для об'єктів нового будівництва та після проведення ремонтних робіт.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Вплив води на дорожню конструкцію протягом річного циклу є завжди суттєвим і має багатофакторний характер. У роботі [2] запропоноване аналітичне рішення з визначення кількості води, що відводиться дренажним шаром дорожнього одягу. Наведені рекомендації щодо використання матеріалів в дренажних шарах в залежності від їх фільтраційних властивостей. Результати натурних досліджень модуля деформації дорожньої конструкції з урахуванням сезонної зміни вологості ґрунту земляного полотна представлено в роботі [3]. Це дозволило авторам запропонувати метод оцінки НДС дорожньої конструкції протягом річного циклу для різних кліматичних умов. Але запропоновані дослідження [2, 3] не враховують зміну вологості шарів основи дорожнього одягу під впливом навантаження, що суттєво може впливати на транспортно-експлуатаційний стан дороги в цілому.

Суттєву вагомість міцності та цілісності дорожнього одягу, що характеризують НДС дорожньої конструкції, як показників якісного стану ділянки автомобільної дороги, наведено в роботах [4, 5].

Вплив стану дорожнього одягу доріг з удосконаленим покриттям на безпеку автомобільного руху з урахуванням водно-теплового балансу ґрунтового ма-

сиву ЗП розглянуто в роботі [6]. Наведені математичні моделі, що відображають процеси розподілу температури і фільтраційного руху рідини в ґрунті. В роботі акцентується увага на тому, що інтенсивність зміни кількості вологи в ґрунті ЗП залежить від виду ґрунту, кількості атмосферних опадів, тривалості зволоження поверхневими або ґрунтовими водами, температурного режиму. Також зазначено про небезпечний вплив навантажень від транспортних засобів на дорожній одяг в період сильного зволоження і перезволоження, але не запропоновано відповідних методів, що враховують це проблемне питання.

Дослідження розподілу вологи в залежності від температурного режиму в дорожній конструкції представлено в роботі [7]. На основі експериментальних вимірювань побудовано графіки зміни вологості в осінній, весняний та літній періоди року. Розподіл та коливання вологи по глибині за часом має складний характер. Також відзначено, що на глибині понад 2 м максимальне значення вологості досягає в весняний період після повного розморожування.

В роботі [8], як метод дослідження процесів тріщиноутворення в бетонному покритті, застосовано математичне моделювання, що ґрунтується на залежностях впливу рухомого складу та погодних умов. Числовий експеримент проводився за трьома етапами з моделювання: метеорологічних параметрів; річної зміни водно-теплогового режиму (ВТР), НДС дорожньої конструкції. Підхід щодо моделювання НДС ґрунтувався на результатах випробувань бетонних балок на вигин. Але така схема розрахунку суттєво відрізняється від запропонованої в цій роботі і не дозволяє враховувати вплив опору ґрунтової основи.

Пошук сучасних наукових досліджень направлених на чисельний розрахунок системи «споруда–ґрунт» дає безліч результатів для промислово-цивільного будівництва і будь-якого розрахункового комплексу. Досліджень в сфері чисельного розрахунку автомобільних доріг із застосуванням об'ємних елементів в програмних комплексах, що базуються на методі скінченних елементів, майже не має.

Метою роботи [9] є детальний аналіз методів побудови аналітичних і чисельних моделей пальових фундаментів. Автори розглядають сім моделей, із яких п'ять є чисельно-аналітичними і дві реалізовані винятково чисельним методом в ППК SCAD Office. В цій роботі зроблено висновок, що модель розбудована на основі об'ємних скінченних елементів і узагальненому розрахунку «споруда–ґрунт» більш точно описує НДС ґрунту. Однак автори рекомендують такий розрахунок виконувати спільно з чисельно-аналітичним розрахунком, регламентованим діючими будівельними нормами. Розрахунок за чисельною моделлю дозволяє достатньо точно визначати зони високих концентрацій напружень у пальових фундаментах.

В роботі [10] надають перевагу чисельно-аналітичним методикам розрахунку конструкцій автомобільної дороги, які себе добре зарекомендували на практиці в цих країнах. Сьогодні для них більш актуальна тема – це визначення вартості будівництва доріг в залежності від обраної методики розрахунку шарів основи та покриття дороги.

Проблема розрахунку ґрунтових масивів для основи будівельних конструкцій цивільного будівництва більш вивчена, враховуючи, що модель для ґрунтових

основ споруд може бути прийнята така сама, як і для транспортних споруд. Автори роботи [11], аналізуючи найпоширеніші моделі розрахунку фундаментів багатоповерхівок та можливість їх реалізації в ППК SCAD Office, зробили висновок щодо подальшого їх розвитку. Методики будуть розвиватися в напрямі поетапного завантаження основ в режимі «МОНТАЖ» ППК SCAD Office.

Головним недоліком такого розвитку є трудомісткість процесу завдання змінних коефіцієнтів постелі С1 на кожному окремому етапі монтажу.

Дослідження дорожньої конструкції на ділянках з трубчастими дренами з матеріалів різного походження представлено в роботі [12]. Було визначено доцільність застосування труб, які за міцносними характеристиками витримують навантаження на дорогах. Але наведені результати визначені за спрощеною плоскою схемою в площині XOZ, з обмеженням переміщень по осі OX (з кожного боку) та по осі OZ (по низу моделі).

У роботі [13] наведено дослідження НДС дорожньої конструкції з тріщиною у покритті. Вивчається вплив збільшення глибини тріщини на модуль пружності шарів дорожнього одягу. В роботі [14] запропоновано комплексний підхід щодо дослідження характеристик НДС дорожньої конструкції під впливом динамічного навантаження, що відповідає натурним умовам. Наведено аналіз параметрів чаш прогину шару покриття, представлені результати числового експерименту з моделювання впливу втрати зчеплення між шарами нежорсткого дорожнього одягу. Але у представлених авторами результатах [13, 14] відсутні дослідження зміни НДС перезволоженої дорожньої конструкції.

Розробка і вдосконалення методів розрахунку будівельних та дорожніх конструкцій є актуальною задачею будівельної механіки. Використання чисельних методів дозволяє забезпечувати необхідну точність у порівнянні з аналітичними методами, що переважно використовуються при проектуванні автомобільних доріг. Тому постає питання вибору методу розрахунку між аналітичним та чисельним. До аналітичних методів розрахунку елементів автомобільної дороги можна віднести моделі загальних та місцевих деформацій, які є основою для нормативної методики розрахунку. Найбільш застосовані – це модель деформування пружного півпростору, що відноситься до загальних деформацій та модель Вінклера, що відноситься до місцевих деформацій.

Визначення НДС та його наближення до реальної роботи конструкції є науковою проблемою сучасних розрахунків, на відміну від перевірки за граничними станами, які детально розписані в чинних нормативних документах.

### **3. Мета та задачі дослідження**

Мета полягає в розробці методу прогнозування вологісного режиму піщаного дренажного шару за рахунок впливу дії статичного понад нормованого навантаження на основі числового моделювання напружено-деформованого стану дорожньої конструкції. Це дасть можливість під час призначення матеріалів дренажних шарів приймати обґрунтовані рішення щодо їх товщини, здатності дорожнього одягу витримувати розрахункове навантаження та ефективно працювати на осушення дорожньої конструкції.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

– змоделювати елемент тривимірної лінійно-протяжної дорожньої конструкції з дренажним шаром за методом скінчених елементів та визначити основні фактори, які впливають на умови роботи під впливом нормативного та понаднормативного навантаження;

– дослідити напружено-деформований стан дорожньої конструкції при перезволоженому стані дренажного шару і ґрунту земляного полотна під впливом нормативного та понаднормативного статичного навантаження, на прикладі автомобільної дороги;

– з урахуванням зміни модуля пружності дренажного шару визначити величину віджимання води під дією понаднормативного навантаження з шару ґрунту земляного полотна.

## **4. Матеріали та методи дослідження**

### **4.1. Побудова моделі дорожньої конструкції в ПРК SCAD Office**

Для створення розрахункової моделі елементів автомобільної дороги було обрано ПРК SCAD Office, призначений для числового дослідження міцності і стійкості широкого класу конструкцій об'єктів будівництва, визначення НДС конструкцій від статичних і динамічних дій. ПРК SCAD Office є універсальним, спрямованим на галузь цивільного будівництва і не призначений для лінійно-протяжних об'єктів дорожньої інфраструктури. Такі обмеження вимагають від науковця додаткових експериментальних досліджень та перевірки адекватності моделі у порівнянні з аналітичними методами в галузі транспортного будівництва.

За основу для моделі були прийняті об'ємні скінченні елементи (СЕ) № 36 (рис. 1).

Однією з найважливіших характеристик скінчено-елементної моделі є максимальний діаметр елементів:  $h = \max_e \left( \sup_{x,y \in \Omega_e} |x - y| \right)$  – мінімальний діаметр шара, в який можливо вписати будь-який скінченний елемент розрахункової моделі. Важливу роль відіграє також вибір ступенів свободи елемента і відповідні апроксимуючі функції які повністю визначають швидкість збіжності і оцінку похибки МСЕ.

Типи СЕ №31–40 «Об'ємні скінченні елементи» мають однакові допустимі ознаки схеми та розрахункові напруження та зусилля ( $N_x, N_y, N_z, T_{xy}, T_{xz}, T_{yz}$ ). Також вони мають однакові призначення і можливості: «Для вирішення просторової задачі теорії пружності, для ізотропного, трансверсально-ізотропного, ортотропного і анізотропного матеріалу». Тому під час дискретизації моделі були враховані геометричні параметри конструкції, таким чином було обрано СЕ № 36 та № 34.

На наведених нижче рис. 1–6 представлено всі необхідні вихідні дані для реалізації обчислювального комплексу.

Було обрано наступну схему моделі, що складається із вище згаданих СЕ: ділянка довжиною 4 м і загальною шириною 10,1 м (ширина покриття – 3,75 м; ширина узбіччя – 3,75 м; ширина укусу – 2,9 м; висота конструкції – 3,1 м). Обрана схема моделі є типовим проектним рішенням автомобільної дороги II-ої ка-

тегорії в розрізі по межі крайньої смуги руху з узбіччям та укосом з похилом 1:1,5. Побудова скінчено-елементних сіток була визначена із умов штампу колеса автомобільного транспорту за статистичним навантаженням, що регламентується галузевими та державними стандартами ГБН В.2.3–37641918–559:2019 «Дорожній одяг нежорсткий. Проектування», ДБН В.2.3–4:2015 «Автомобільні дороги», та рекомендаціями керівництва користувача ПРК SCAD Office для забезпечення найменшої похибки розрахунку.

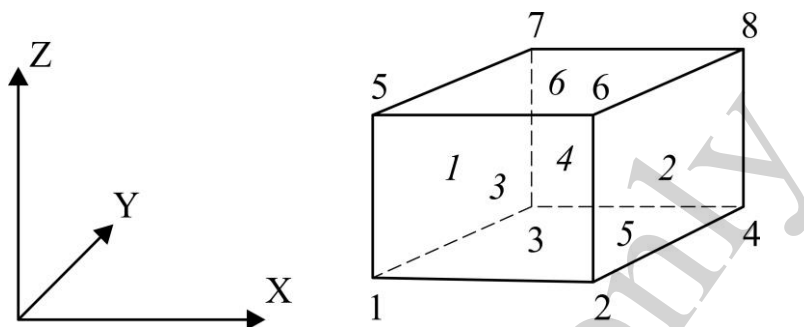


Рис. 1. Схематичне відображення восьми вузлового ізопараметричного СЕ № 36 в бібліотеці ПРК SCAD Office

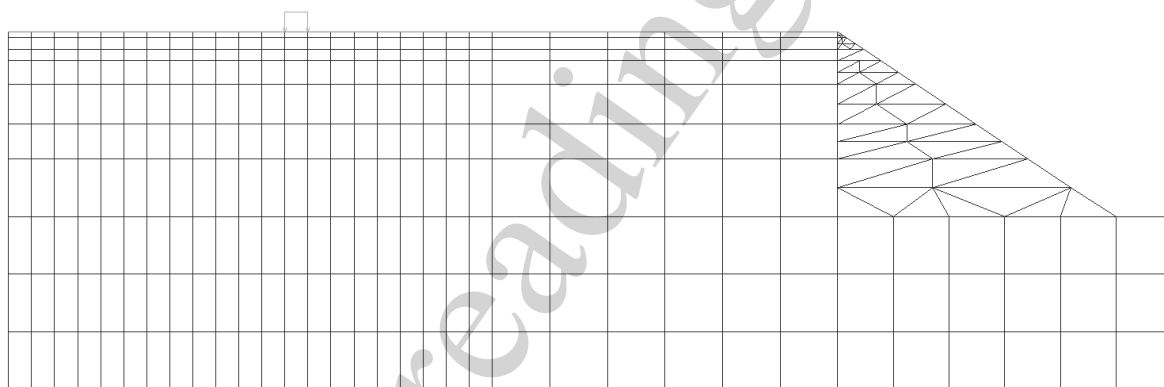


Рис. 2. Вид збоку (фасад) розрахункової моделі із зазначенням будівельних вісей

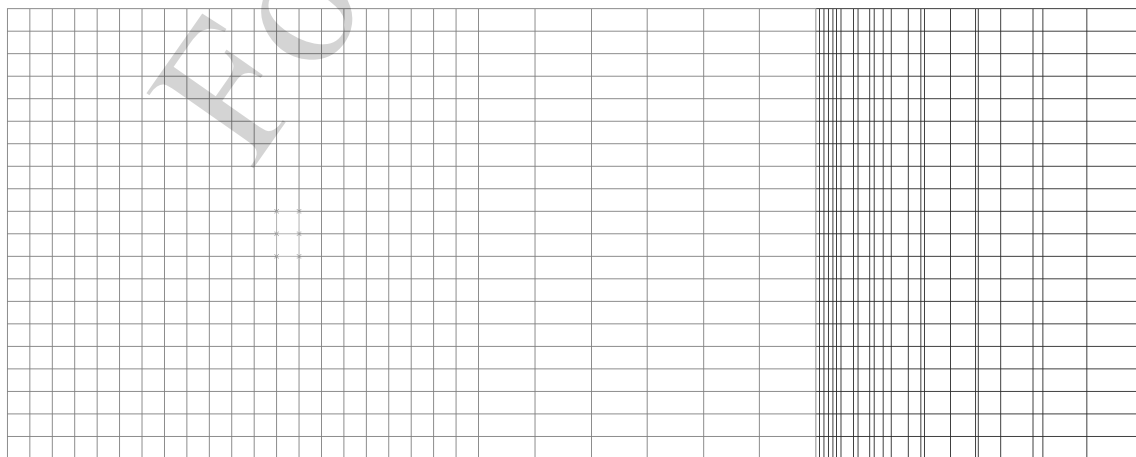


Рис. 3. Вид зверху (план) розрахункової моделі із зазначенням будівельних вісей

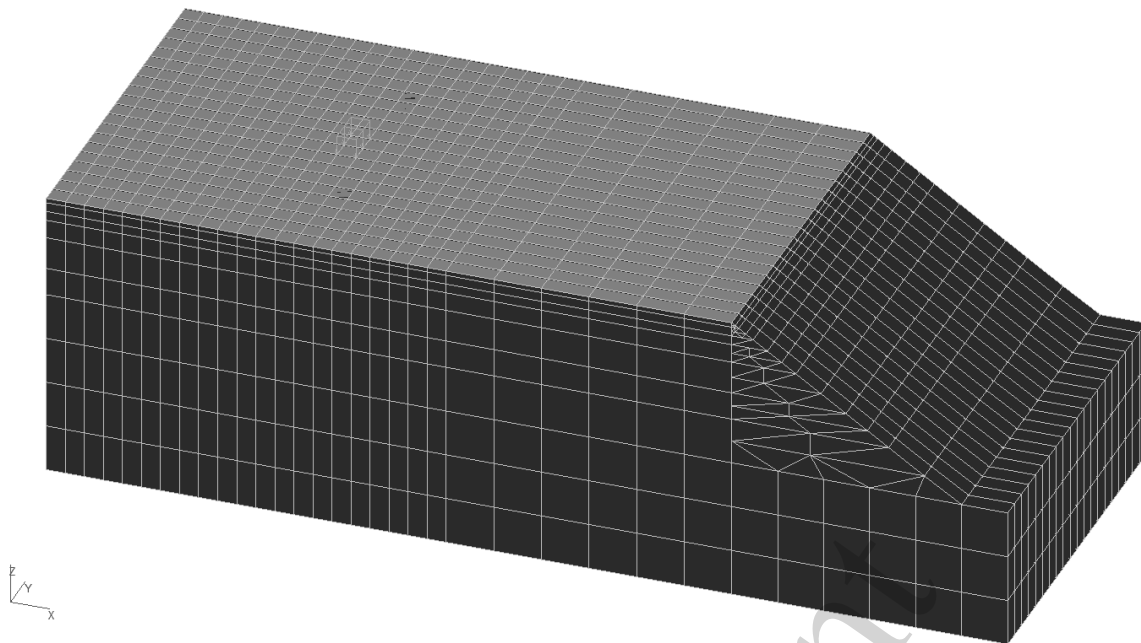


Рис. 4. Ізометрія розрахункової моделі із зазначенням будівельних вісей

Фізико-механічні характеристики шарів конструкцій автомобільної дороги задані відповідно до типового проекту сучасної конструкції автомобільної дороги II-ої категорії (рис. 5). У мережі автомобільних доріг загального користування України за протяжністю дороги II категорії міжнародного значення складають понад 58 %, а національного – понад 56 %.

Модулі пружності шарів дорожнього одягу з органічним в'язучим відповідають статичній дії навантаження (рис. 5).

Для забезпечення геометричної незмінності системи постає необхідність в накладанні в'язей опорних вузлів. Для моделі яка розглядається, експериментально з'ясовано, що в'язі накладаються лише в опорних вузлах нижнього шару ґрунту для заборони лінійних та кутових переміщень і забезпечення геометричної незмінності системи. Згідно результатів, представлених в роботі [10], та для отримання найбільш можливих деформацій прийнято рішення – не обмежувати переміщення вузлів по контуру моделі.

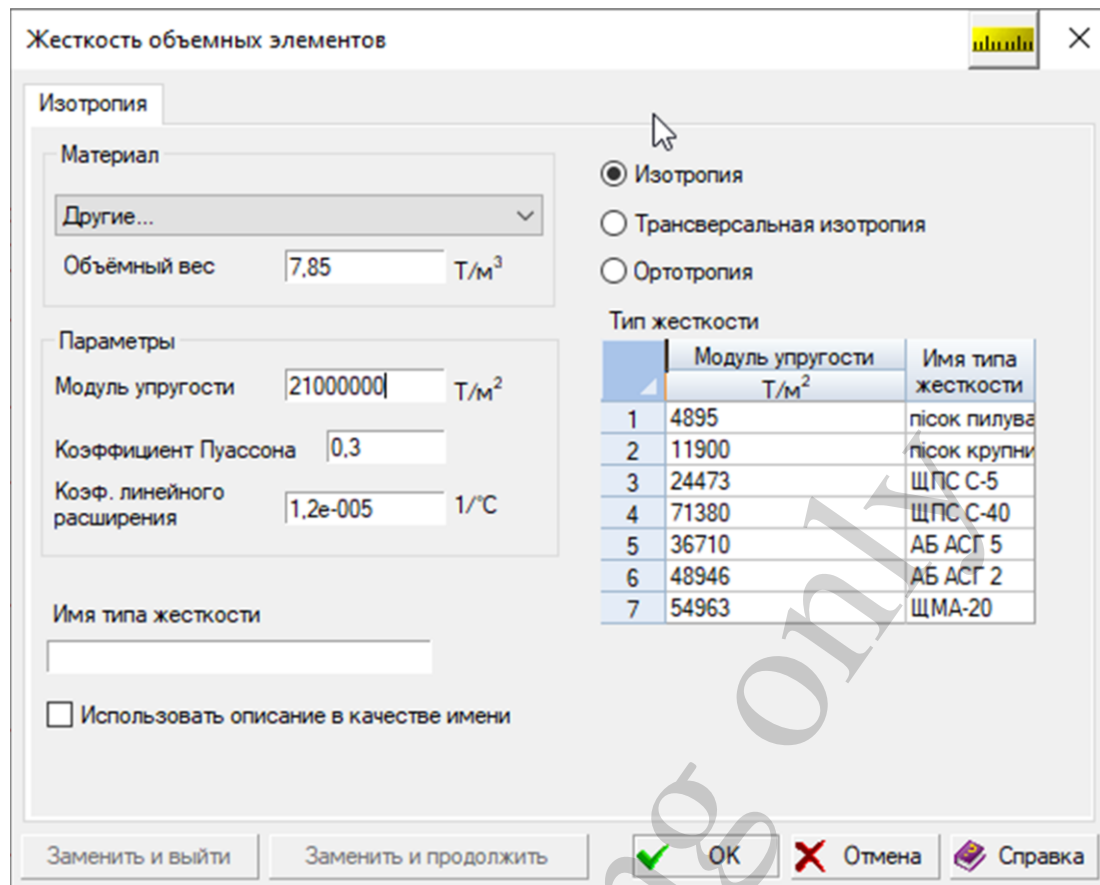


Рис. 5. Призначення фізико-механічних характеристик шарам дорожньої конструкції

#### 4. 2. Номенклатура та аббревіатури матеріалів елементів досліджуваної дорожньої конструкції

При числовому моделюванні розглядуваної конструкції використовувалось навантаження для II-ої категорії автомобільної дороги згідно з ДБН В.2.3–4 групи  $A_2$  – нормативне статичне навантаження на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН, з рівновеликим діаметром площі відбитку колеса – 303 мм. Час дії навантаження 600 с. Навантаження приймалося статичне, як найбільш несприятливе за тривалістю при процесі формуванні вологісного режиму перезволоженого дренажного шару та ґрунту ЗП. Навантаження на вісь приймалося з урахуванням рівномірного розподілу по 6-м вузлам розрахункової сітки по прямокутнику розміром 300 мм на 240 мм, (площа прямокутника відповідає площі штампку). Розрахункова модель відповідає умовам ділянки автомобільної дороги у виїмці з кюветом, з врахуванням власної ваги конструкції. Характеристики матеріалів дорожньої конструкції наведено в табл. 1.



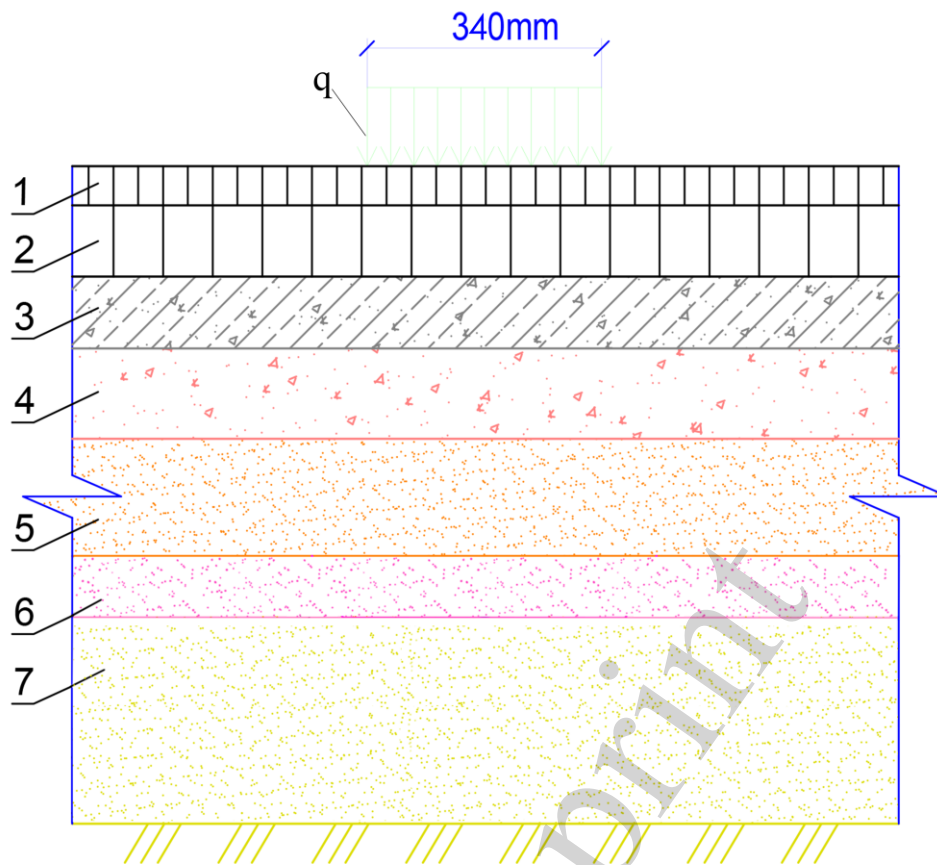


Рис. 6. Модель дорожньої конструкції:  $q$  – рівномірно розподілене навантаження, 1 – 6 – шари дорожнього одягу; 1 – щебенево-мастиковий асфальтобетон ЩМА-20 на бітумі БМПА 60/90-53; 2 – асфальтобетон щільний на бітумі БНД 60/90, Тип А, Марка I ; 3 – асфальтобетон пористий на бітумі БНД 60/90, крупнозернистий; 4 – щебенево-піщані суміші С-7, укріплені цементом М40; 5 – щебенево-піщана суміш С-5; 6 – пісок крупнозернистий; 7 – пісок пилюватий (грунт ЗП)

На типовій конструкції дорожнього одягу було проведено серію числових експериментів, які включали збільшення нормативного навантаження на 10–50 % при перезволоженні дренажного шару і ґрунту ЗП (табл. 1, ряди 6 та 7), що відповідає реальним умовам роботи автомобільних доріг на певних ділянках. Понад нормоване збільшення навантаження обумовлене статистичним даними, які визначаються на майданчиках системи зважування в русі Weigh-in-Motion на ділянках доріг з високою інтенсивністю руху великовагового транспорту. Статистичні дані обробляються та аналізуються відділом інтелектуальних транспортних систем Державного агентства автомобільних доріг України.

Запропонований метод розрахунку справедливий для будь яких дорожніх конструкцій.

Таблиця 1

Характеристики матеріалів шарів дорожньої конструкції

| № п/п | Матеріал  | Модуль пружності $E$ , МПа |                                 | Висота шару $h$ , м | Коефіцієнт Пуассона | Питома вага, т/м <sup>3</sup> |
|-------|---|----------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|
|       |   | за стандартними вимогами   | при перезволоженні, згідно [15] |                     |                     |                               |
| 1     | Щебенево-мастиковий асфальтобетон ЦМА-20 на бітумі БМПА 60/90-53) | 539                        |                                 | 0,05                | 0,27                | 2,4                           |
| 2     | Асфальтобетон щільний на бітумі БНД 60/90, Тип А, Марка І         | 480                        |                                 | 0,1                 | 0,25                | 2,3                           |
| 3     | Асфальтобетон пористий на бітумі БНД 60/90, крупнозернистий       | 360                        |                                 | 0,1                 | 0,25                | 2,3                           |
| 4     | ЩПС С-7, укріплена цементом М40 (щебенево-піщана суміш)           | 700                        |                                 | 0,20                | 0,31                | 1,8                           |
| 5     | ЩПС С-5 (щебенево-піщана суміш)                                   | 240                        |                                 | 0,35                | 0,30                | 2                             |
| 6     | Пісок крупнозернистий Wt (0,87)                                   | 130                        | 116                             | 0,3                 | 0,35                | 2                             |
| 7     | Пісок пилуватий   | 52                         | 48                              | 4                   | 0,3                 | 1,8                           |

## 5. Результати досліджень процесів формування вологісного стану дренажного шару під дією навантаження

### 5.1. Результати досліджень напружено-деформованого стану дорожньої конструкції з дренажним шаром

Для проведення числових досліджень розглядалося три випадки прикладання навантаження по відношенню до осі дороги. Перший випадок: навантаження прикладалося на відстані 2,4 м від осі; другий – на відстані 2,8 м; третій – на відстані 3 м (найбільш несприятливе місце прикладання за 1 м до кромки узбіччя).

За результатами числового моделювання було отримано розподіл ізополів та ізоліній нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, проекція на площину  $XOY$  (вид зверху) (рис. 7, 8), розподіл ізополів та ізоліній нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, проекція на площину  $XOZ$  (в поперечному перерізі) (рис. 9, 10) та розподіл деформацій  $Z$  (мм) конструктивних шарів дорожнього одягу загальною товщиною 110 см, для ЗП (виїмки) глибиною 4 м, проекція на площину  $XOZ$  (рис. 11, 12) при нормативному та понаднормативному навантаженнях.

Розподіл ізополів та ізоліній нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, проекція на площину  $XOY$ , в дорожній конструкції при нормативному та

понаднормативному навантаженні на вісь дозволяють визначити параметри чаши прогину дорожнього покриття та зміну її конфігурації в залежності від місця прикладання навантаження (рис. 7, 8). Зі збільшенням навантаження чаша прогину відповідно за своїми розмірами в плані збільшилася на 5 см.

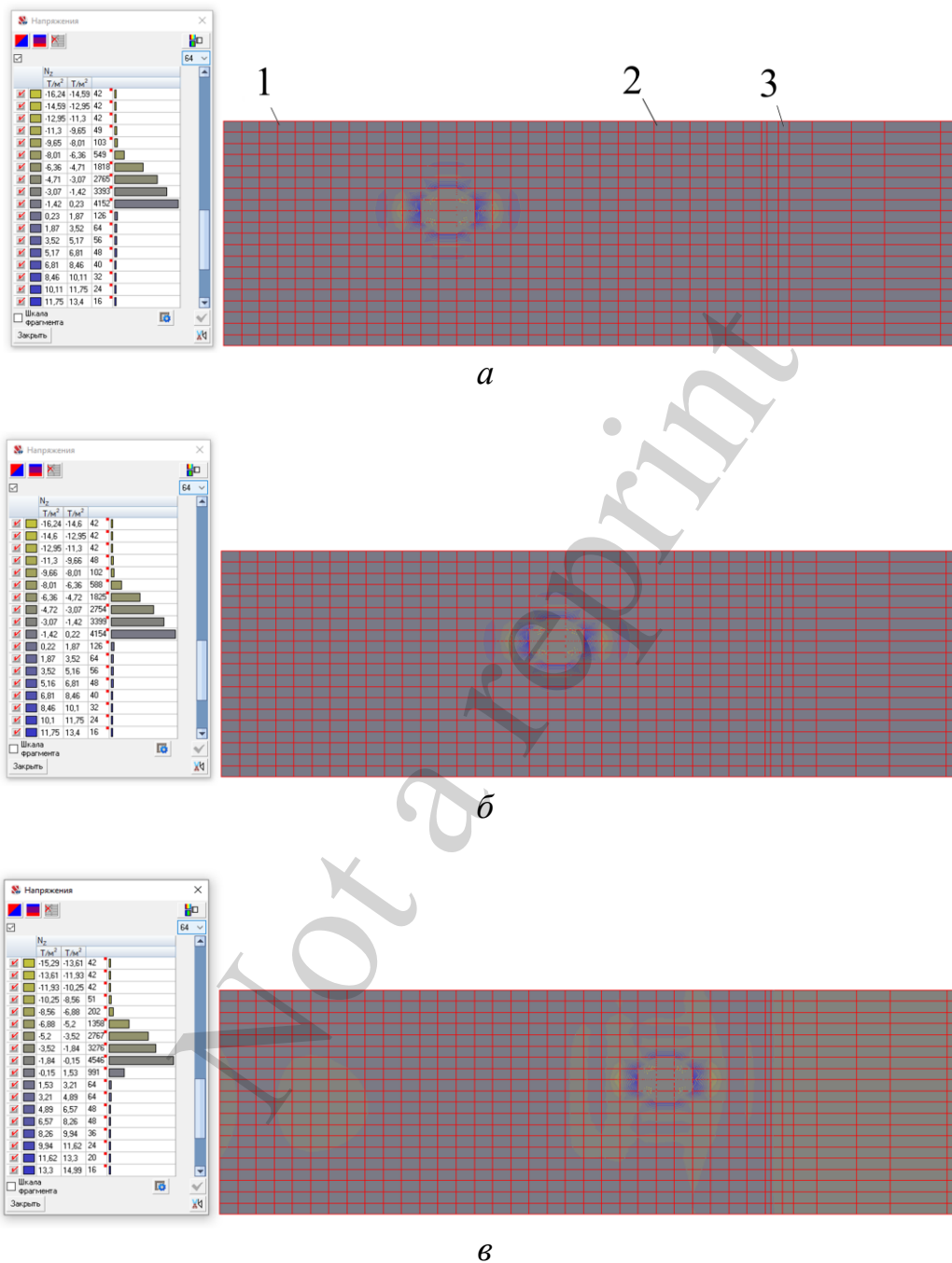


Рис. 7. Розподіл ізополів та ізоліній нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, проекція на площину  $XOY$ , в дорожній конструкції при нормативному навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: *а* – на відстані 2,4 м від осі, *б* – на відстані 2,8 м, *в* – на відстані 3 м; 1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП

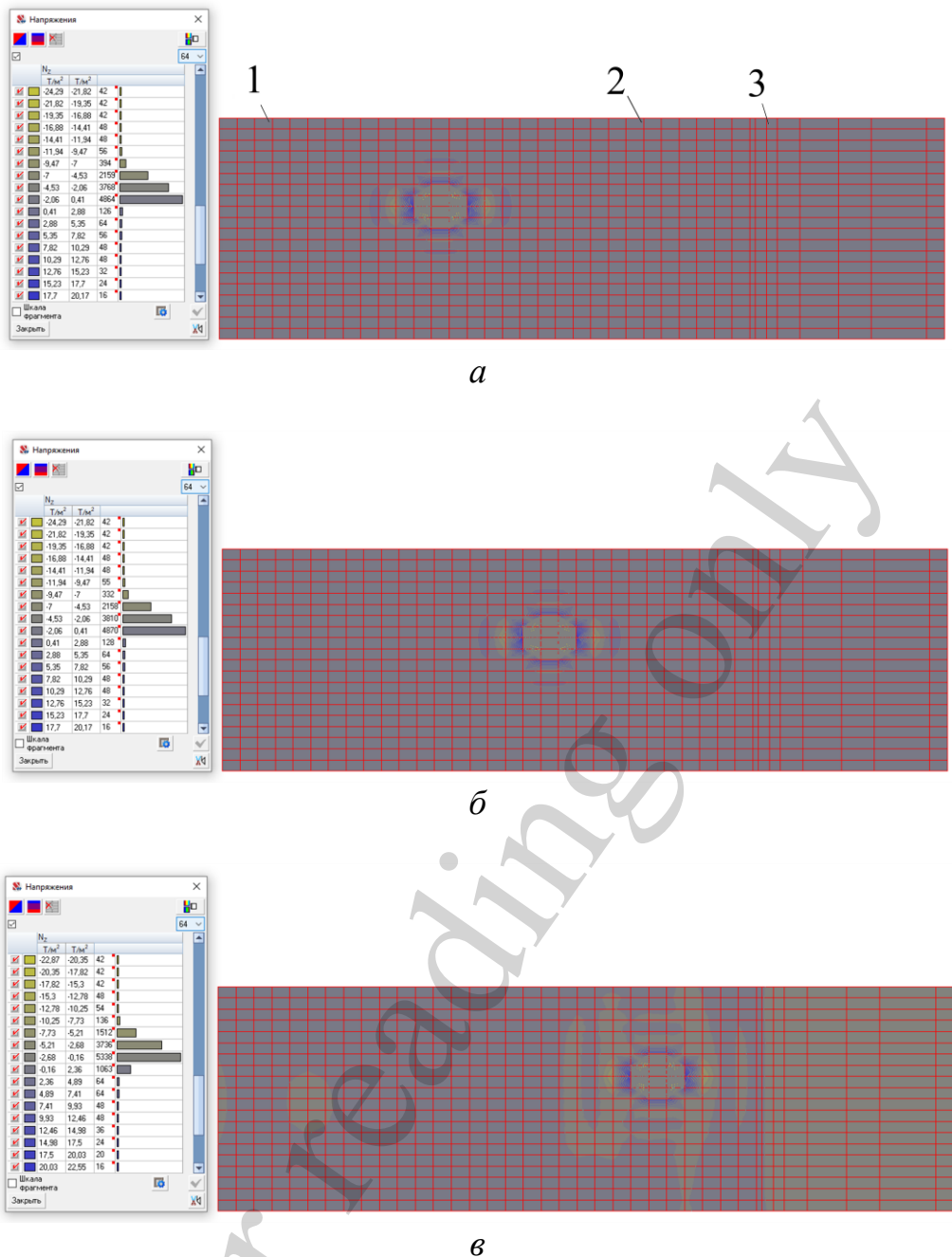
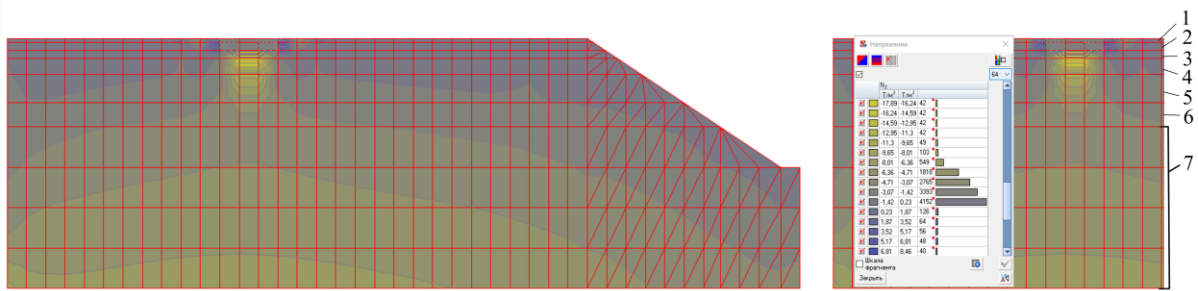
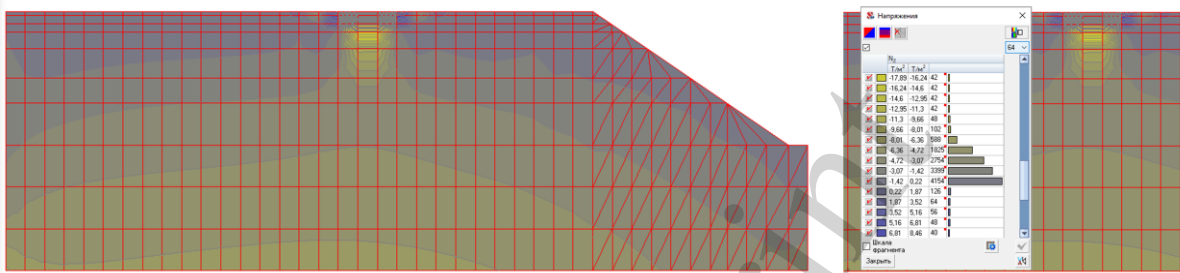


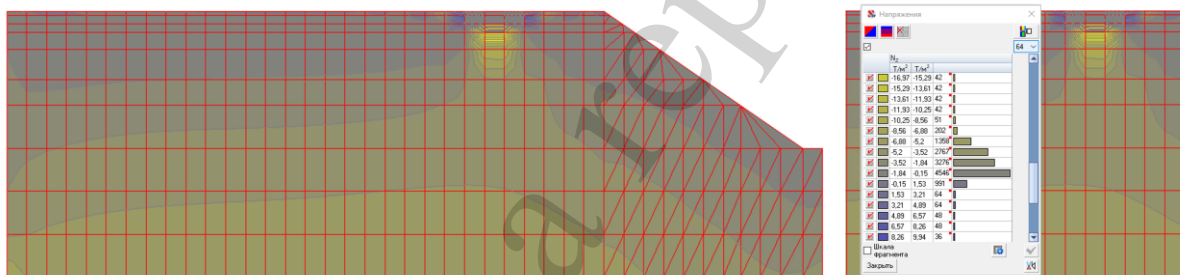
Рис. 8. Розподіл ізополів та ізолій нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах, проекція на площину  $XOY$ , в дорожній конструкції при понаднормативному навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН: *а* – на відстані 2,4 м від осі, *б* – на відстані 2,8 м, *в* – на відстані 3 м (зображення зверху до низу); 1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП



*a*

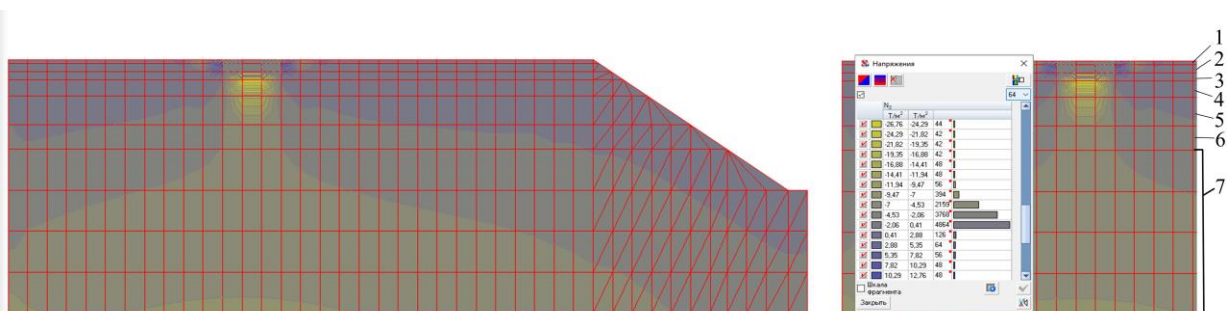


*б*

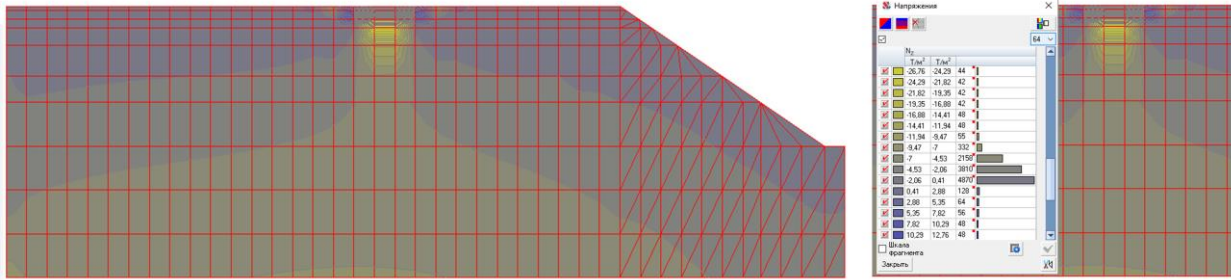


*в*

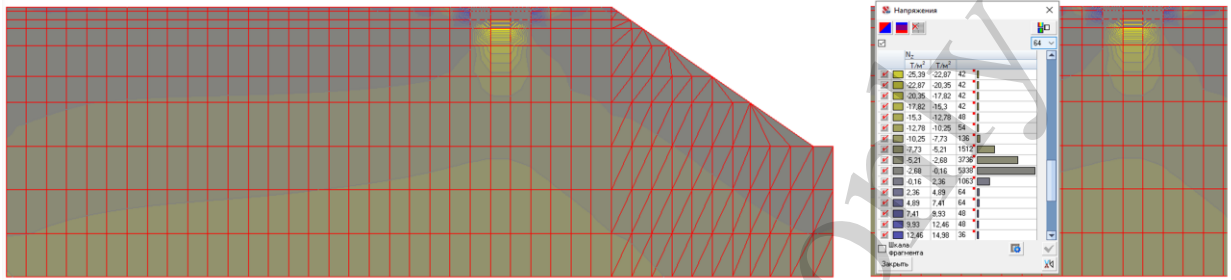
Рис. 9. Розподіл ізополів та ізоліній нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах в дорожній конструкції при нормативному навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН, проекція на площину  $XOZ$ , в поперечному перерізі: *a* – на відстані 2,4 м від осі, *б* – на відстані 2,8 м, *в* – на відстані 3 м; 1 – 7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 1



*a*

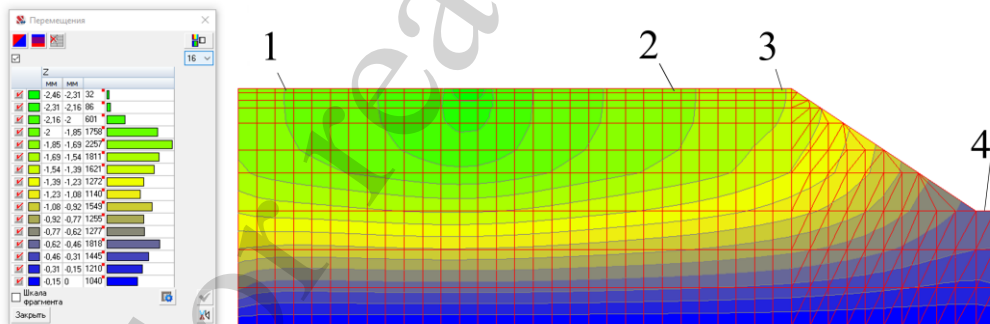


б

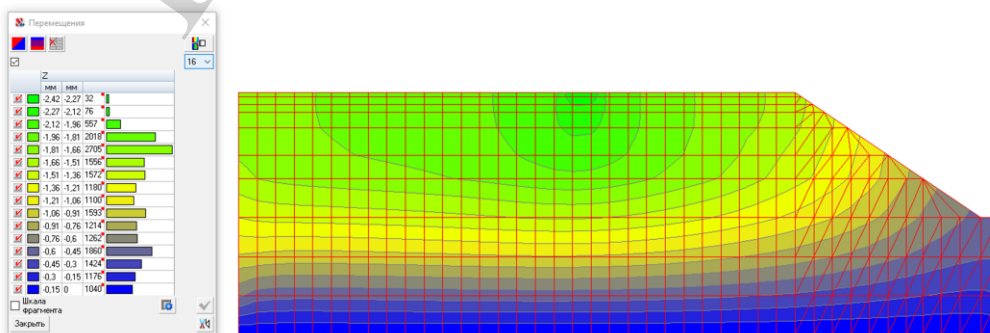


в

Рис. 10. Розподіл ізополів та ізоліній нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах в дорожній конструкції при понаднормативному навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН, проекція на площину  $XOZ$ : а – на відстані 2,4 м від осі, б – на відстані 2,8 м, в – на відстані 3 м; 1–7 шари дорожнього одягу та ЗП згідно переліку в табл. 1

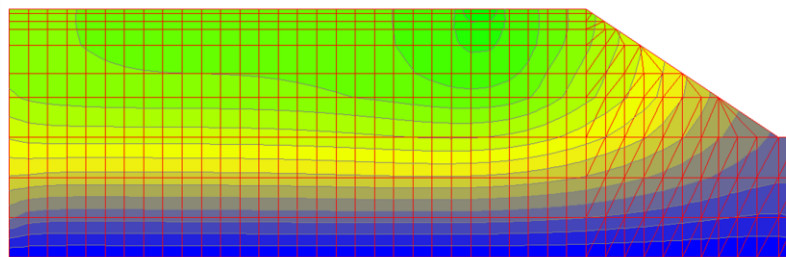
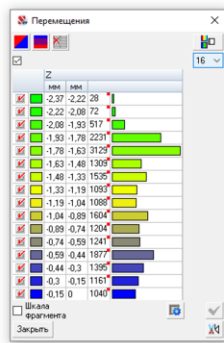


а



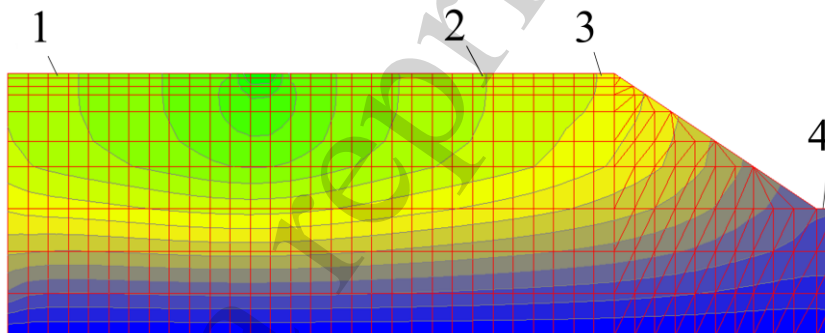
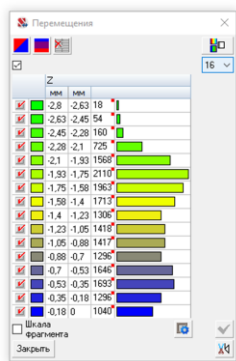
б



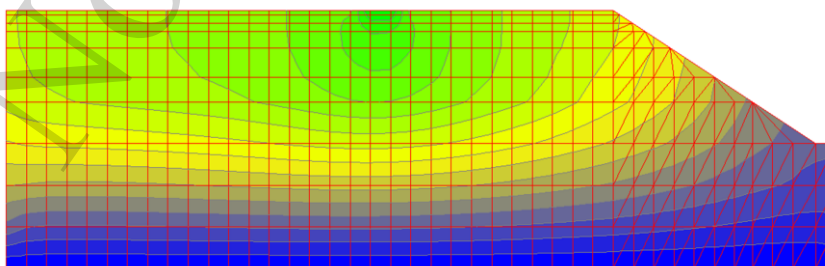
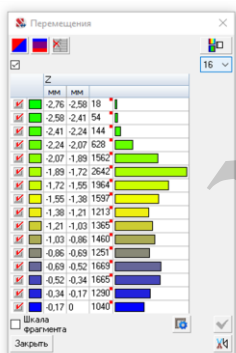


б

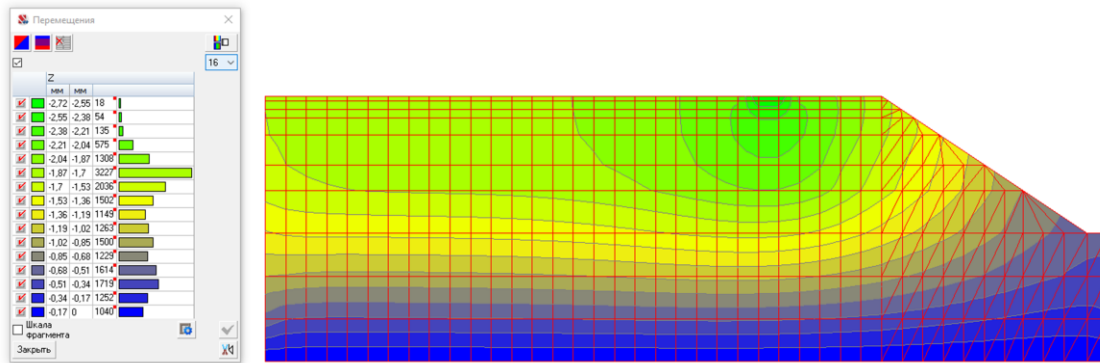
Рис. 11. Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції, проекція на площину  $XOZ$ : при нормативному навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 57,5 кН: *a* – на відстані 2,4 м від осі, *б* – на відстані 2,8 м, *в* – на відстані 3 м, 1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП; 4 – кювет



*a*



*б*



6

Рис. 12. Розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції, проекція на площину  $XOZ$ : при понаднормативному навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН :  $a$  – на відстані 2,4 м від осі,  $b$  – на відстані 2,8 м,  $c$  – на відстані 3 м, 1 – смуга руху на проїзній частині; 2 – зупиночна смуга на узбіччі; 3 – укіс ЗП; 4 – кювет

Результати серії числових експериментів, а саме розподіл ізополів та ізоліній нормальних напружень  $N_z$  та розподіл деформацій  $Z$  (мм) в дорожній конструкції в об'ємних елементах конструктивних шарів дорожнього одягу, проекція на площину  $XOZ$ , порівнювалися при нормативному та понаднормативному навантаженні (рис. 9–12). Розподіл ізополів та ізоліній нормальних напружень  $N_z$  в об'ємних елементах дозволяє визначити товщину шару ґрунту, розміщеного під дренажним шаром, з якого буде відбуватися віджимання води під дією прикладеного навантаження (рис. 13). Це можливо за рахунок розподілу мінімальних значень напружень, при яких не буде віджиматися вода, згідно [1] для піщаних та супіщаних ґрунтів  $N_z=0,01$  МПа.

За результатами числового експерименту чітко видно збільшення глибини поширення напруження  $h_{\sigma_{min}}$  від поверхні дорожнього одягу до розподілу мінімальних значень напружень, при яких не буде віджиматися вода з ґрунту ЗП. При нормативному навантаженні віджимання води в ґрунті не відбувається.



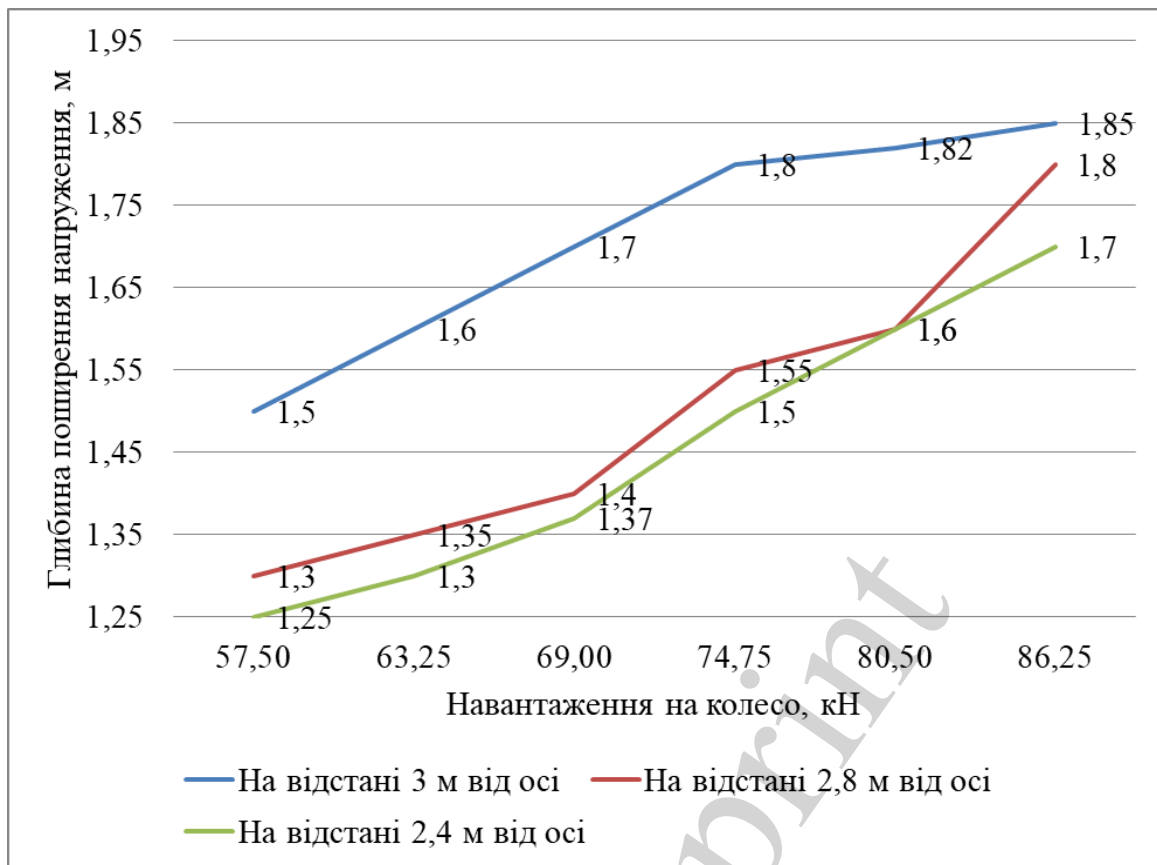


Рис. 13. Глибина поширення напруження від поверхні дорожнього одягу до розподілу мінімальних значень напружень, при яких не буде віджиматися вода з суцільних ґрунтів  $N_z=0,01$  МПа

## 5. 2. Визначення віджимання води в дренажний шар під впливом понаднормативного навантаження

По аналогії із запропонованим в роботі [1] методом щодо визначення параметрів осідання ґрунту при висиханні або при розмерзанні отримаємо залежності для відповідних показників під дією понаднормативного навантаження на дорожню конструкцію.

Відносне осідання ґрунту під дією понаднормативного навантаження визначимо з наступної залежності:

$$Z_{\text{ДО}} = e_{\text{осід,р}} (h_{\sigma_{\text{min}}} - h_{\text{ДО}}) \cdot 10^3, \quad (1)$$

де  $e_{\text{осід,р}}$  – відносне осідання ґрунту під дією понаднормативного навантаження, в долях одиниці;

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

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

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

Таким чином, з формули (1) отримаємо

$$e_{\text{осід},p} = \frac{Z_{\text{ДО}}}{(h_{\sigma_{\text{мін}}} - h_{\text{ДО}}) \cdot 10^3}. \quad (2)$$

Розрахунок відносного осідання ґрунту  $e_{\text{осід}}$  після розмерзання в роботі [1] проводився на основі визначеного експериментально коефіцієнту лінійного осідання ґрунту  $a_{\text{осід}}$ . За аналогічним підходом визначимо відносне осідання ґрунту  $e_{\text{осід},p}$  під дією навантаження за формулою:

$$e_{\text{осід},p} = 1 - \frac{1 + a_{\text{осід},p} W_{\text{opt}}}{1 + a_{\text{осід},p} W_{\text{ПВ}}}, \quad (3)$$

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

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

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

За результатами числового експерименту ПРК SCAD Office визначимо величини  $Z_{\text{ДО}}$ ,  $h_{\sigma_{\text{мін}}}$  та, за залежністю (2),  $e_{\text{осід},p}$ .

Далі, після перетворення (3), представимо у вигляді співвідношення

$$a_{\text{осід},p} = \frac{e_{\text{осід},p}}{W_{\text{ПВ}}(1 - e_{\text{осід},p}) - W_{\text{opt}}}, \quad (4)$$

де повна вологоємність визначається за співвідношенням

$$W_{\text{ПВ}} = (\rho_{\text{ґр}} - \rho_{\text{ск.мах}}) \rho_{\text{в}} / (\rho_{\text{ґр}} \cdot \rho_{\text{ск.мах}}), \quad (5)$$

$\rho_{\text{ґр}}$  – осереднене значення щільності частинок ґрунту, кг/м<sup>3</sup>;

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

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

Коефіцієнт ущільнення ґрунту після впливу понаднормативного навантаження також можна визначити за аналогією при висиханні ґрунту:

$$K_{\text{ущ},p} = \frac{K_{\text{ущ},\text{мін}}}{1 - e_{\text{осід},p}}, \quad (6)$$

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

Віджимання води з шару ґрунту під впливом понаднормативного навантаження відбувається від рівня глибини  $h_{\text{ДО}}$  до рівня  $h_{\sigma_{\text{min}}}$ . Як у випадку відтавання [1], але з додатковим врахуванням коефіцієнта  $a_{\text{осід},p}$ , віджимання води під проїзною частиною можна визначити за залежністю:

$$q_{\text{відж.п.ч.р}} = \left\{ \begin{aligned} &\rho_{\text{ск.маx1}} \cdot a_{\text{осід},p1} \left( K_{\text{ущ},p1} \cdot W_{\text{ПВ1}} - K_{\text{ущ},1} \cdot W_{\text{opt1}} \right) h_{\text{др.ш.}} + \\ &+ \rho_{\text{ск.маx2}} \cdot a_{\text{осід},p2} \left( K_{\text{ущ},p2} \cdot W_{\text{ПВ2}} - K_{\text{ущ},2} \cdot W_{\text{opt2}} \right) \left( h_{\sigma_{\text{min}}} - h_{\text{ДО}} \right) \end{aligned} \right\} \omega_{\text{гр}} / \rho_{\text{в}}, \quad (7)$$

Де  $\rho_{\text{ск.маx1}}$ ,  $\rho_{\text{ск.маx2}}$  – максимальна щільність скелету ґрунту за методом стандартного ущільнення відповідно дренажного піщаного шару та шару ґрунту ЗП, з якого відбувається віджим води під дією навантаження,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$a_{\text{осід},p1}$ ,  $a_{\text{осід},p2}$  – коефіцієнт лінійного осідання відповідно дренажного піщаного шару та шару ґрунту ЗП, з якого відбувається віджим води під дією навантаження, безрозмірна величина;

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

$K_{\text{ущ},p1}$ ,  $K_{\text{ущ},p2}$  – коефіцієнт ущільнення після прикладання навантаження відповідно дренажного піщаного шару та шару ґрунту ЗП, з якого відбувається віджим води під дією навантаження;

$W_{\text{opt1}}$ ,  $W_{\text{opt2}}$  – оптимальна вологість відповідно дренажного піщаного шару та шару ґрунту ЗП, з якого відбувається віджим води під дією навантаження, в долях одиниці;

$W_{\text{ПВ1}}$ ,  $W_{\text{ПВ2}}$  – повна вологоємність відповідно дренажного піщаного шару та шару ґрунту ЗП, з якого відбувається віджим води під дією навантаження, в долях одиниці;

$h_{\text{др.ш.}}$  – товщина дренажного шару, м;

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

Розрахуємо віджимання води з шару ґрунту під впливом понаднормативного навантаження на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН на відстані 2,8 м від осі. Для розглянутої ділянки дороги II-ої категорії маємо наступні вихідні дані:

$\rho_{\text{ск.маx1}}=2000 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $\rho_{\text{ск.маx2}}=1800 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $K_{\text{ущ},1}=1$ ,  $K_{\text{ущ},2}=0,98$  (згідно стандартних вимог [ДБН]),  $W_{\text{opt1}}=0,06$ ,  $W_{\text{opt2}}=0,1$ ,  $h_{\text{др.ш.}}=0,3 \text{ м}$  (згідно табл. 1),  $h_{\text{ДО}}=1,1 \text{ м}$ ,  $\rho_{\text{гр}}=2650 \text{ кг}/\text{м}^3$  для піску,  $h_{\sigma_{\text{min}}}=1,8 \text{ м}$  (згідно рис. 13) та  $Z_{\text{ДО}}=2,01 \text{ мм}$  (за рис. 12, а).

Величина, за (2), відносного осідання дорожнього одягу під дією понаднормативного навантаження:

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

Повна вологоємність, згідно (5), відповідно дренажного піщаного шару та шару ґрунту ЗП, з якого відбувається віджим води під дією навантаження:

$$W_{\text{ПВ1}} = (2650 - 2000)1000 / (2650 \cdot 2000) = 0,123;$$

$$W_{\text{ПВ2}} = (2650 - 1800)1000 / (2650 \cdot 1800) = 0,178.$$

Коефіцієнти лінійного осідання ґрунту, згідно (4):

$$a_{\text{осід},p1} = \frac{0,0029}{0,123(1 - 0,0029) - 0,06} = 0,046,$$

$$a_{\text{осід},p2} = \frac{0,0029}{0,178(1 - 0,0029) - 0,1} = 0,037.$$

Коефіцієнти ущільнення після впливу понаднормативного навантаження, за (6):

$$K_{\text{ущ},p1} = \frac{1}{1 - 0,0029} = 1,0028,$$

$$K_{\text{ущ},p2} = \frac{0,98}{1 - 0,0029} = 0,982.$$

Після попередніх розрахунків, за (7), віджимання води з шару ґрунту під впливом понаднормативного навантаження на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН:

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

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

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

## **6. Обговорення результатів щодо формування вологісного стану дренажного шару дорожньої конструкції під дією навантаження**

На основі моделі елементу тривимірної лінійно-протяжної дорожньої конструкції досліджено її напружено-деформований стан та прогнозовано вологісний режим дренажного шару під впливом нормативного та понаднормативного навантаження. Розрахункова модель такого лінійного елементу автомобільної дороги суттєво відрізняється від площинних будівель цивільного будівництва розглянутих в роботах [9, 11]. В місці прикладання нормативного та понаднормативного навантаження спостерігається зміна конфігурації чаши прогину (рис. 7, 8). При збільшенні навантаження на 50% розміри чаши в плані, відповідно, збільшуються на 2 %. Що стосується розподілу вертикальних напружень в межах проїзної частини дороги, то вода почне віджиматися вже при нормативному навантаженні під узбіччям та у зоні укїсної частини ЗП (рис. 9, а, б, 10, а, б). При понаднормативному навантаженні на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля 86,25 кН міграція вологи знизу вгору під проїзну частину буде відбуватися з шару ґрунту ЗП товщиною 60–70 см (рис. 13). Деформація в цьому шарі сягатиме 2,01 мм, а на самій проїзній частині, при такому збільшенні навантаження, зростає до 2,76 мм, що на 12 % більше від дії нормативного (рис. 11, а, б, 12, а, б).

При прикладанні навантаження в найбільш несприятливому місці, на укріпленій смузї узбіччя, суттєво змінюється розподіл вертикальних напружень, особливо на укосах конструкції (рис. 9, в, 10, в). Це підтверджується багатьма натурними спостереженнями щодо виникнення та розподілу деформацій дорожнього покриття та укосів ЗП. Відбувається руйнування країв дорожнього одягу, починаючи від окремих тріщин до відколювання та відламування кромки проїзної частини. Під впливом нормативного навантаження (рис. 9, в) в цій зоні вже починається процес віджимання вологи з шару товщиною 40 см. Це можна визначити за рахунок того, що загальна товщина дорожнього одягу складає 110 см, а ізоляція розподілу мінімальних значень напружень, при яких не буде віджиматися вода, знаходиться в межах глибини 150 см. При збільшенні навантаження на 50 % від нормативного міграція вологи відбуватиметься вже в шарі ґрунту ЗП товщиною понад 75 см (рис. 10, в). Деформації поширюватимуться до кромки укосів ЗП, де при нормативному навантаженні складають 1,68 мм (рис. 11, в), при понаднормативному – 1,81 мм (рис. 12, в). Деформація на узбіччях – 1,98 мм та 2,15 мм, відповідно. Вода також буде віджиматися під укріпленою смугою узбіччя та в зоні укосу ЗП, що ще більше послаблюватиме уразливі зони дорожньої конструкції.

Проведення числових експериментів дозволило визначити зміну глибини віджимання вологи з ґрунту ЗП в дренажний шар на основі глибини поширення напруження від поверхні дорожнього одягу до розподілу мінімальних значень напружень, при яких не буде віджиматися вода з супіщаних ґрунтів (рис. 13). Вихідні дані для дороги II-ої категорії відповідають умовам I-ої дорожньо-кліматичної зони України. Для цієї зони, згідно [16], рівень загального питомого надлишку води (інфільтраційної та від розмерзання), що надходить в дренажний шар, від найвищого до найнижчого коливається в достатньо широких ме-

жах:  $0,03\text{--}0,017\text{ м}^3$  на  $1\text{ м}^2$ . Відповідно до цього загальний питомий обсяг води з урахуванням віджимання з шару ґрунту під впливом понаднормативного навантаження  $86,25\text{ кН}$  складатиме від  $35,4$  до  $22,4$  л на  $1\text{ м}^2$ . Це дуже суттєво змінить вологісний стан основи дорожнього одягу та погіршить загальний модуль пружності. Прогноз щодо кількості віджимання води під проїзною частиною, згідно (7), можливо отримати за величинами відносного осідання ґрунту (2), коефіцієнтів лінійного осідання (4) та ущільнення ґрунту після впливу понад нормативного навантаження (6). Недотримання вимог з експлуатації автомобільних доріг за рахунок збільшення навантаження понад нормативного призводить до зміни вологісного режиму всієї дорожньої конструкції саме в один з найнебезпечніших весняних періодів. Це є підґрунтям розвитку не тільки колійності, а і утворенню вибоїн на новопобудованій ділянці дороги.

Існуючий метод розрахунку щодо зміни вологісного стану дорожньої конструкції під дією навантаження [1] є застарілим і не відповідає сучасним нормативним вимогам. Сучасні розрахункові навантаження перевищують навантаження, за якими проектувався дорожній одяг у два рази. Ці обставини обумовили суттєві зміни у підходах до розрахунку дорожніх конструкцій з точки зору міграції вологи та необхідність залучення сучасних розрахункових комплексів щодо визначення напружено-деформованого стану (НДС) перезволоженої дорожньої конструкції.

Запропоноване прогнозування вологісного режиму дренажного шару дорожньої конструкції під дією статичного навантаження визначено з умов впливу штампю одного колеса транспортного засобу. Більш детальним буде прогнозування під дією навантаження на вісь, від двох або чотирьох коліс, що є наступним кроком дослідження.

## 7. Висновки

1. За основу для моделі дорожньої конструкції з дренажним шаром у ПРК SCAD Office були прийняті об'ємні скінченні елементи, які використовуються для вирішення просторової задачі теорії пружності, для ізотропного, трансверсально-ізотропного, ортотропного і анізотропного матеріалу. Побудова скінченно-елементних сіток була визначена із умов штампю колеса транспортного засобу за статистичним навантаженням. При накладанні в'язей опорних вузлів для запропонованої моделі прийнято рішення не обмежувати переміщення вузлів по її контуру, щоб задання таких в'язей не зменшувало деформації моделі та відповідало реальним умовам роботи дорожньої конструкції.

2. Проведено числове моделювання НДС дорожньої конструкції під впливом нормативного та понаднормативного статичного навантаження, на прикладі автомобільної дороги II-ої категорії. Отриманий розподіл ізополів та ізолій нормальних напружень  $N_z$  і деформацій  $Z$  в об'ємних елементах дозволив визначити конфігурацію чаши прогину в залежності від місця прикладання навантаження. Також визначено величину деформації в дорожній конструкції під дренажним шаром, що складає від  $2,01$  до  $2,04$  мм при нормативному та понаднормативному навантаженнях. Віджимання води, відповідно, відбувається з шару ґрунту ЗП середньою товщиною від  $0,27$  до  $0,67$  м.

3. Для прогнозування вологісного режиму дренажного шару отримано розрахункові залежності величини відносного осідання ґрунту, коефіцієнтів лінійного осідання та ущільнення ґрунту під дією понаднормативного навантаження на дорожню конструкцію. Визначено величину питомого віджимання води з шару ґрунту під впливом понаднормативного навантаження. При навантаженні від колеса 86,25 кН в умовах І-ої дорожньо-кліматичної зони України рівень загального питомого надлишку води, що надходить в дренажний шар, може збільшуватись на 18–32 %.

### Література

1. Рувинский, В. И. (1982). Оптимальные конструкции земляного полотна на основе регулирования водно-теплового режима. М.: Транспорт, 166.
2. Dan, H.-C., Zhang, Z., Liu, X., Chen, J.-Q. (2017). Transient unsaturated flow in the drainage layer of a highway: solution and drainage performance. *Road Materials and Pavement Design*, 20 (3), 528–553. doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1397049>
3. Elshaer, M., Ghayoomi, M., Daniel, J. S. (2017). Methodology to evaluate performance of pavement structure using soil moisture profile. *Road Materials and Pavement Design*, 19 (4), 952–971. doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1283356>
4. Slavinska, O., Savenko, V., Kharchenko, A., Bubela, A. (2017). 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*, 6 (4 (90)), 45–57. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118798>
5. 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*, 1 (3 (97)), 46–59. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156519>
6. Aptalaev, M., Zhalko, M. (2016). Effect of the water-and-thermal regime of the auto-road base on the pavement state. *Russian Journal of Transport Engineering*, 3 (4). doi: <https://doi.org/10.15862/02ts416>
7. Teltayev, B. B., Suppes, E. A. (2019). Temperature in pavement and subgrade and its effect on moisture. *Case Studies in Thermal Engineering*, 13, 100363. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.11.014>
8. Nosov, V. P., Dobrov, E. M., Chistyakov, I. V., Borisiuk, N. V., Fotiadi, A. A. (2017). Mathematical Modelling of Cracking Process in Concrete Pavement Highways. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12 (23), 13158–13164. URL: [http://www.ripublication.com/ijaer17/ijaerv12n23\\_20.pdf](http://www.ripublication.com/ijaer17/ijaerv12n23_20.pdf)
9. Nuzhdin, L., Mikhaylov, V. (2018). Numerical modeling of pile foundations using SCAD office structural analysis software. *PNRPU Construction and Architecture Bulletin*, 9 (1), 5–18. doi: <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2018.1.01>

10. Das, A. (2015). Structural Design of Asphalt Pavements: Principles and Practices in Various Design Guidelines. *Transportation in Developing Economies*, 1 (1), 25–32. doi: <https://doi.org/10.1007/s40890-015-0004-3>
11. Гаврилкіна, А. О., Дремова, О. В., Михайлов, В. С. (2017). Расчетные модели грунтовых оснований, реализуемые в программном комплексе Scad Office. *Ползуновский альманах*, 2 (4), 45–48. URL: [http://elib.altstu.ru/journals/Files/pa2017\\_04\\_2/pdf/045gavrilkina.pdf](http://elib.altstu.ru/journals/Files/pa2017_04_2/pdf/045gavrilkina.pdf)
12. Slavinska, O., Savenko, V., Bubela, A., Yaremov, A. (2018). Investigation of the work of the road construction at the sites by pipe drenes from materials of different origin. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (7 (92)), 18–26. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126512>
13. Pirmohammad, S., Majd-Shokorlou, Y. (2020). Finite element analysis of road structure containing top-down crack within asphalt concrete layer. *Journal of Central South University*, 27 (1), 242–255. doi: <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4292-3>
14. Uglova, E., Tiraturyan, A., Lyapin, A. (2016). Integrated approach to studying characteristics of dynamic deformation on flexible pavement surface using nondestructive testing. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 1, 111–130. doi: <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.2.08>
15. Заворицкий, В. И. (1983). Справочник по проектированию дорожных одежд. Киев: Будівельник, 104.
16. Довідник № 4. Кліматичні характеристики та кліматичне районування території України для регулювання водно-теплового режиму в дорожньому будівництві (2018). Київ. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=80182](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80182)