

**Чечуга О.С.**, канд. техн. наук, **Каськів В.І.**, канд. техн. наук, **Каськів С.В.**

## **РЕЗУЛЬТАТИ МАТЕМАТИЧНОГО ТА ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕНЬ НА КРУГЛІ ВОДОПРОПУСКНІ ТРУБИ В ЗЕМЛЯНОМУ ПОЛОТНІ**

**Анотація.** Виконано моделювання роботи залізобетонної водопропускної труби в тілі насипу за допомогою математичного і числового моделювання. Встановлено раціональні конструкції труб (на жорсткій чи нежорсткій основі) залежно від висоти насипу і виду ґрунту, запропоновано способи покращення напружено-деформованого стану конструкції «насип – труба – основа» для високих насипів автомобільних дорог.

**Ключові слова:** автомобільна дорога; насип; кругла залізобетонна водопропускна труба.

**Аннотация.** Выполнено моделирование работы железобетонной водопропускной трубы в теле насыпи при помощи математического и численного моделирования. Определены рациональные конструкции труб (на жестком и нежестком основании) в зависимости от высоты насыпи и вида грунта, предложены способы улучшения напряженно-деформированного состояния конструкции «насыпь – труба – основание» для высоких насыпей автомобильных дорог.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога; насыпь; круглая железобетонная водопропускная труба.

**Annotation.** Modeling of concrete culverts into the embankment using mathematical and numerical modeling. Established rational design of culvert (on a rigid or nonrigid basis) depending on the height of the embankment and the type of soil, suggested ways to improve the stress-strain state structures «embankment – culvert – base» for high embankment road.

**Key words:** road, embankment, culvert.

## ВСТУП

Досвід усіх країн з неспростовною переконливістю свідчить, що автомобільні дороги є важливим фактором економічного і соціального розвитку суспільства. Мережа автомобільних шляхів є невід'ємною складовою частиною автомобільно-дорожнього комплексу. Від транспортно-експлуатаційного стану доріг в значній мірі залежать витрати на перевезення вантажів та пасажирів, економічні втрати від дорожньо-транспортних пригод. Транспортні витрати збільшують собівартість вітчизняної продукції; зменшують її конкурентоспроможність на внутрішньому та зовнішніх ринках. Цілком зрозуміло, що стан доріг прямо пов'язаний зі станом економіки держави.

Немаловажну роль у забезпеченні надійної роботи автомобільних доріг відіграють штучні споруди на них. Однією з обов'язкових вимог, яка забезпечує безперебійний рух транспорту по дорогах, є їх безаварійна робота, зокрема – водопропускних труб.

Історія дорожнього будівництва і сучасна статистика свідчать, що водопропускні труби під насипами є найбільш масовим видом споруд на автомобільних дорогах і залізницях, що пов'язано не тільки із зростанням транспортної мережі в цілому, але і зі збільшенням їх частки у загальному обсязі малих штучних споруд.

На нашу думку однією із причин деформації водопропускних труб на автомобільних дорогах слід вважати те, що в практиці проектування і будівництва прийнято розглядати насип і трубу в ньому, як різні об'єкти. І хоча ці конструктивні елементи є різнорідними, без сумніву, їх необхідно розглядати тільки у взаємозв'язку, тобто в конструкції “насип – труба – основа”.

Основна трудність, що тут виникає, це створити адекватний механізм відображення і розрахунку цієї системи.

## ОСНОВНА ЧАСТИНА

У роботі [1] розроблена математична модель (1), яка пов'язує компоненти напружень, згинаючі моменти, нормальні сили і переміщення, що виникають при взаємодії автодорожнього насипу, водопропускної труби і основи.

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_r &= p_{0v} + p_1 \cos \theta + p_{2v} \cos 2\theta + p_3 \cos 3\theta; \\
 \tau_{r\theta} &= -p_1 \sin \theta + t_2 \sin 2\theta + p_3 \sin 3\theta; \\
 M &= \frac{R^2}{6} [(2p_{2v} + t_2) \cos 2\theta + p_3 \cos 3\theta]; \\
 N &= \frac{R}{6} [2(p_{2v} + 2t_2) \cos 2\theta + 3p_3 \cos 3\theta - 6p_{0v}]; \\
 u^R &= \frac{p_{0v} R^2}{E_0 s} + \frac{R^4 (1 - \nu_0^2)}{E_0 s} \left[ \frac{4}{3} \left( p_{2v} + \frac{t_2}{2} \right) \cos 2\theta + \frac{1}{4} p_3 \cos 3\theta \right]; \\
 v^R &= \frac{2R^4 (1 - \nu_0^2)}{E_0 s^3} \left[ \frac{1}{3} (p_{2v} - 2t_2) \sin 2\theta + 8p_3 \sin 3\theta \right].
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де  $\sigma_r$ ,  $\tau_{r\theta}$  – нормальні радіальні напруження і тангенціальні зусилля по контуру труби;

$M$ ,  $N$  – згинаючі моменти і нормальні сили;

$u^R$ ,  $v^R$  – радіальні і тангенціальні переміщення;

$\theta$  – кут між вертикальною віссю труби і вектором;

$s$  – товщина стінки труби.

На основі розроблених залежностей (1) було виконано серію розрахунків з різними вихідними даними, а також виконано числове моделювання роботи конструкції «насип – труба – основа».

Вихідні дані для математичного моделювання:

а) розрахунки велись з врахуванням зовнішнього навантаження – НК-80 і НК-100 та без нього;

б) ґрунт основи: супісок, суглинок;

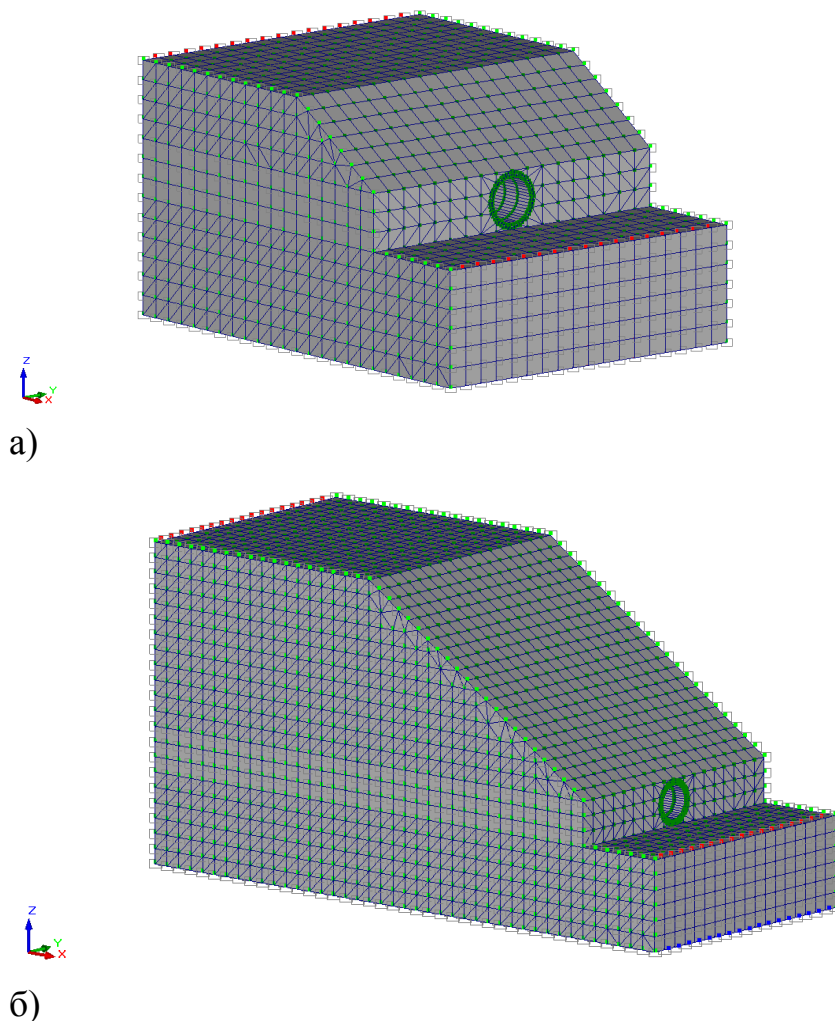
в) ґрунт засипки: пісок, супісок, суглинок та їх варіація;

- г) труба із залізобетонним фундаментом та без нього;
- д) діаметр труби, м: 0,75; 1,00; 1,25; 1,50;
- е) висота засипки (насипу), м: 0,50; 1,00; 1,50; 1,75; 2,00; 2,50; 5,00; 6,00; 10,00; 12,00.

Розрахунки виконували у програмі Mathcad.

Числове моделювання виконували методом скінчених елементів за допомогою програми SCAD.

Дискретизація в об'ємній постановці задачі наведена на рисунку 1.



**Рисунок 1** – Схема дискретизації розрахункової моделі для об'ємної моделі: а) низький насип; б) високий насип

Для числового моделювання приймали ті ж вихідні дані, що і для математичного моделювання (див. вище). Проте, зважаючи на більшу можливість числового моделювання та широкі зростання, останніх два

десятиліття, застосування геосинтетичних матеріалів у дорожньому будівництві, нами було виконано:

- а) врахування дорожнього одягу;
- б) розрахунки обсіпки і засипки труби різними видами ґрунтів;
- в) розрахунки обсіпки труби піском на висоту від 0,50 м до 1,00 м з кроком 0,10 м при інших ґрунтах насипу і основи;
- г) розрахунок армування насипу над трубою геосинтетичними полотнами із середніми показниками:  $\gamma_{\text{ГМ}} = 14 \text{ кН/м}^3$ ;  $E_{\text{ГМ}} = 8800 \text{ МПа}$ ;  $\nu_{\text{ГМ}} = 0,4$ ; товщина 0,002 м;
- д) розрахунок армування насипу над трубою геосинтетичними обоймами. Розрахункові показники геообойми визначали за залежностями [2, 3].

$$E_{\text{Э1}} = (E_f F_f + E_m F_m) / F_{\text{э}}, \quad (2)$$

де  $E_f$ ,  $E_m$  – модулі деформації армування і матриці відповідно;

$F_f$ ,  $F_m$  – площі, заняті армуванням і матрицею в обраному елементі площею  $F_{\text{э}}$ .

$$E_z = E_f E_m / (E_m V_f + E_f V_m), \quad (3)$$

де  $E_m$  – модуль на стиск ґрунту,

$E_f$  – модуль на розтяг армуючого прошарку,

$V_m$  – вміст в долях одиниці об'єму ґрунту в армованому шарі,

$V_f$  – те ж, армуючого прошарку.

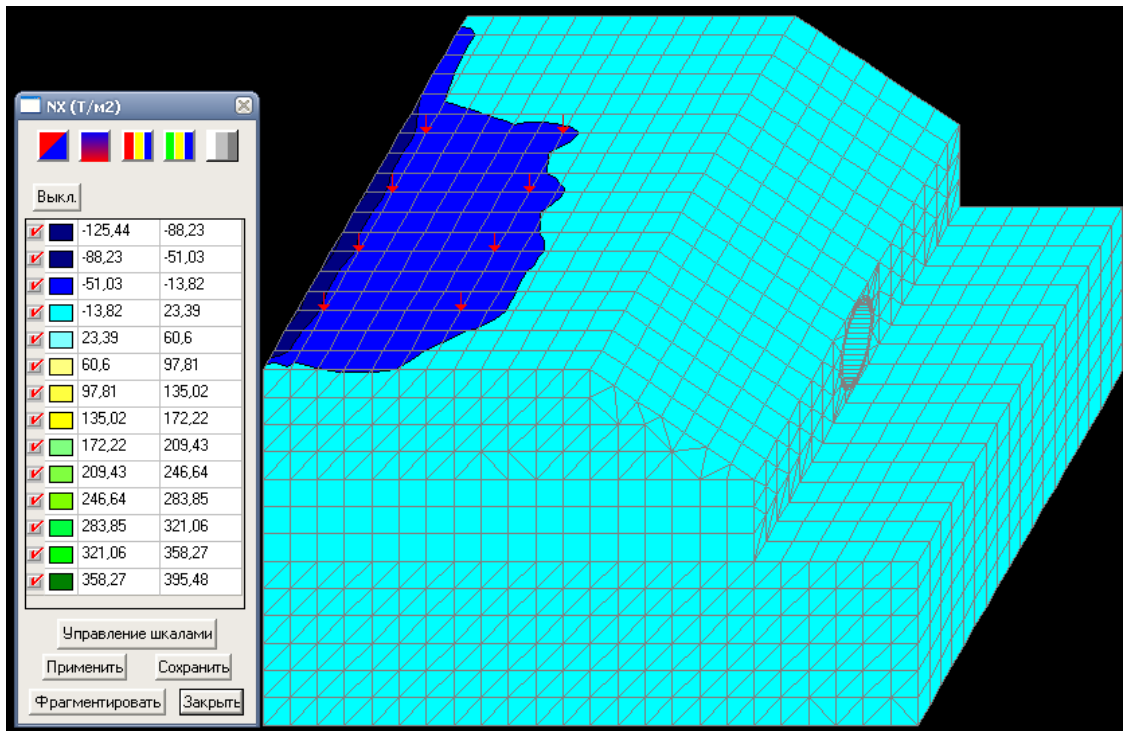
е) врахування зміни товщини обойми в межах від 0,3 м до 0,5 м та її ширини в межах від  $3d$  до  $5d$  (де  $d$  – діаметр водопропускної труби);

є) розрахунок системи із закладання геосинтетичної обойми на різній висоті над трубою для насипів висотою від 2 м до 12 м;

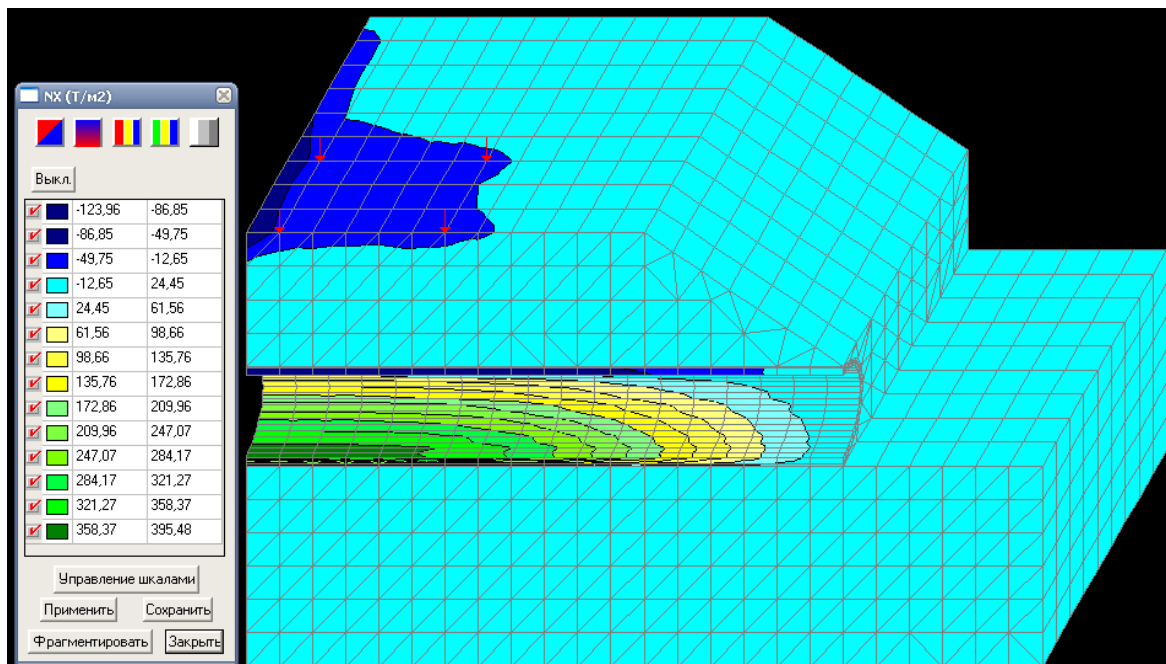
ж) розрахунок із застосуванням декількох обойм;

з) розрахунок системи із заміною геосинтетичної обойми залізобетонною плитою товщиною.

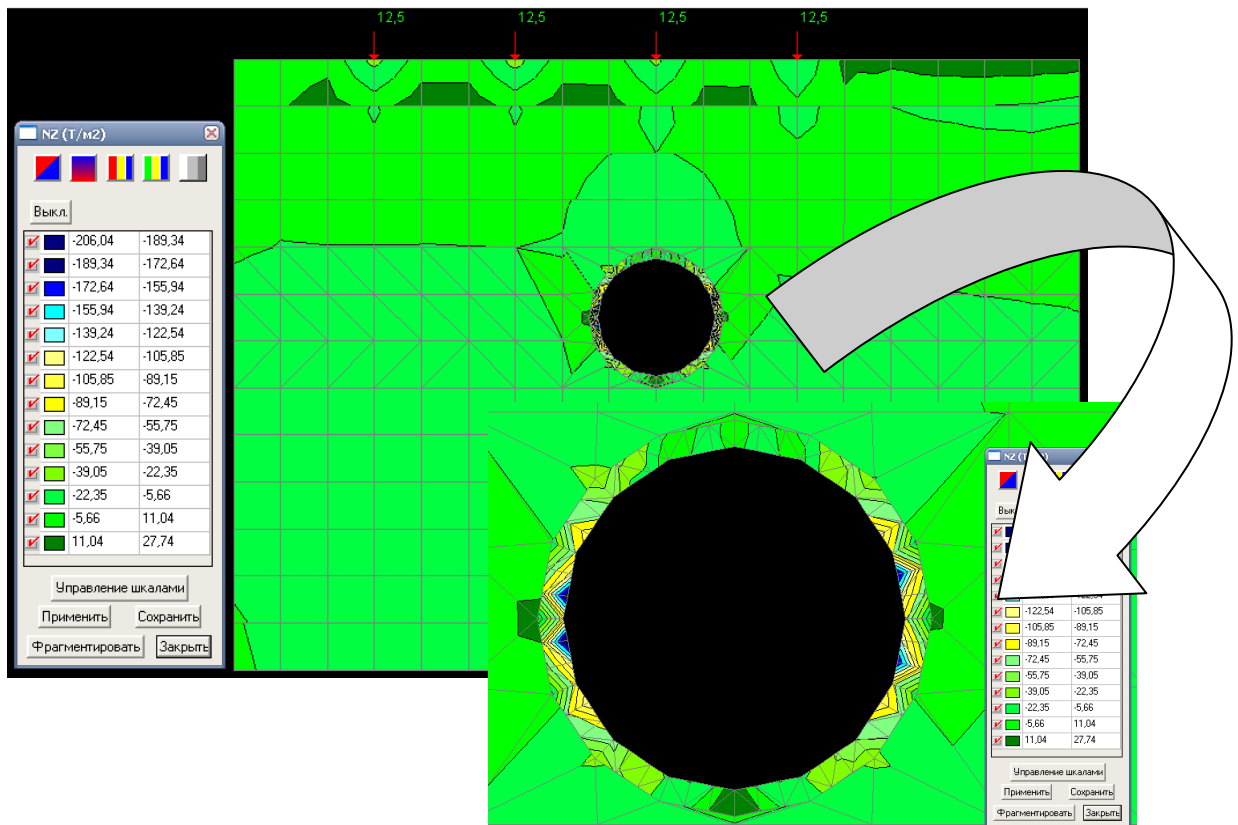
Деякі результати розрахунку для об'ємної і плоскої задач наведені на рисунках 2 – 7.



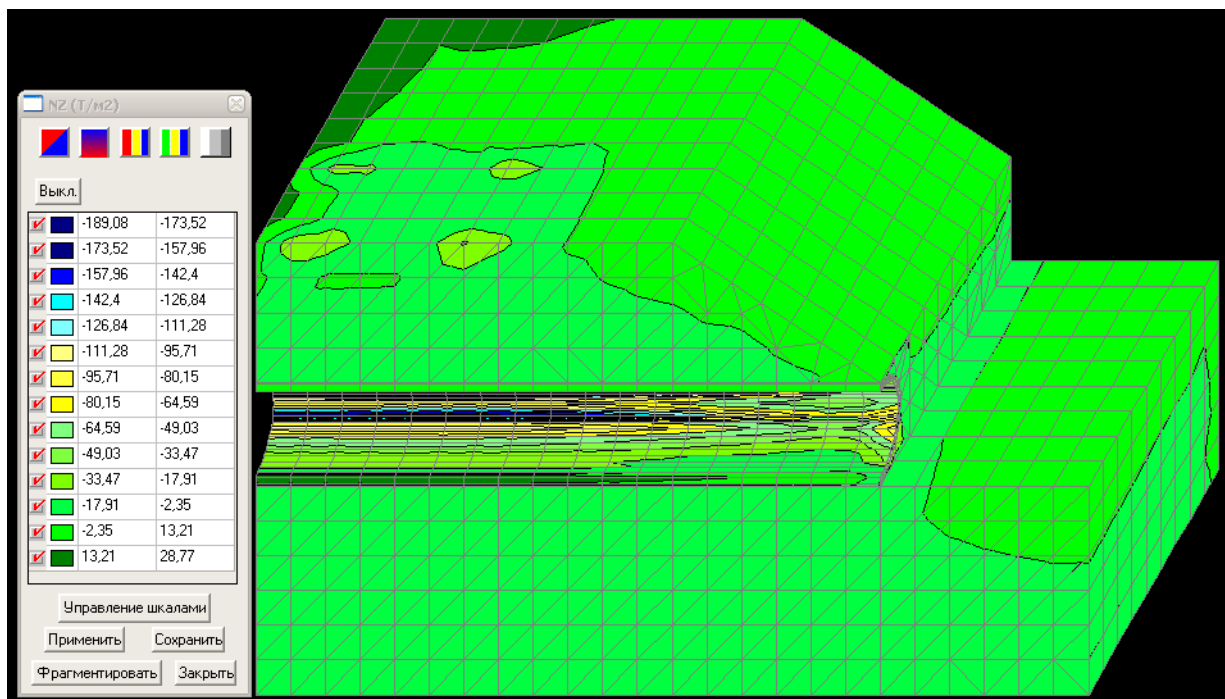
**Рисунок 2** – Напруження по осі Z від навантаження НК-100, діаметр труби 1,0 м, висота насипу 2,0 м, ґрунт насипу суглинок



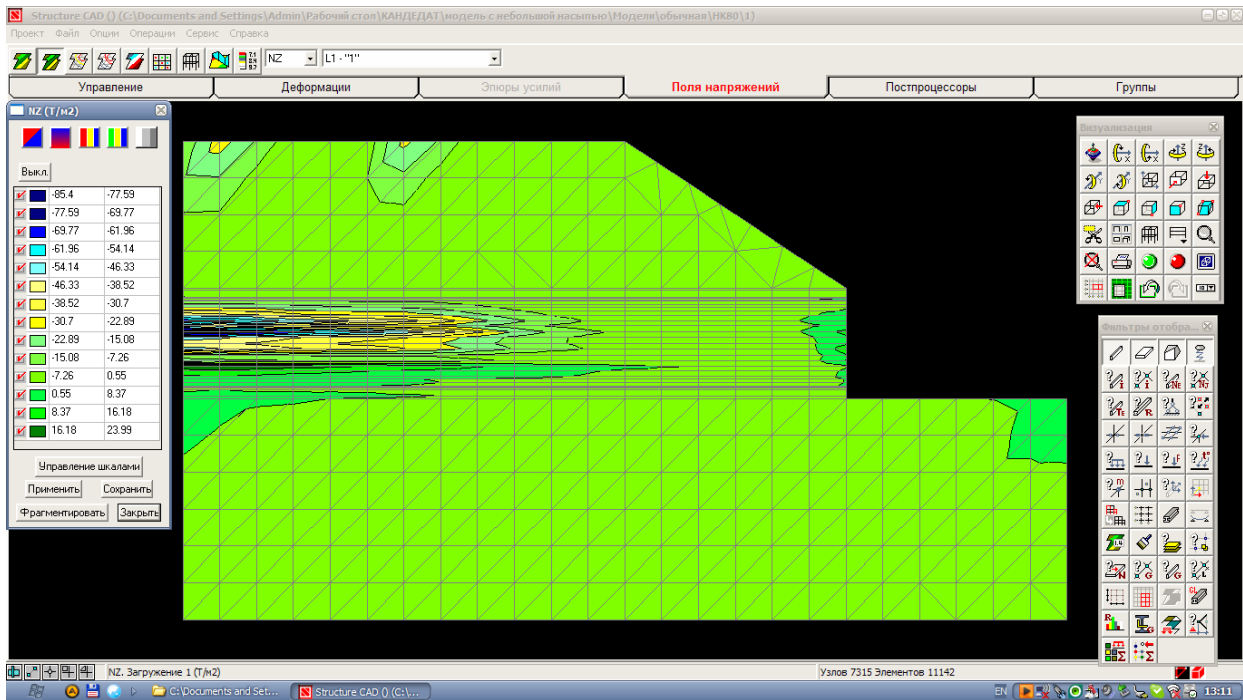
**Рисунок 3** – Напруження по осі Z від навантаження НК-100 по перерізу труби



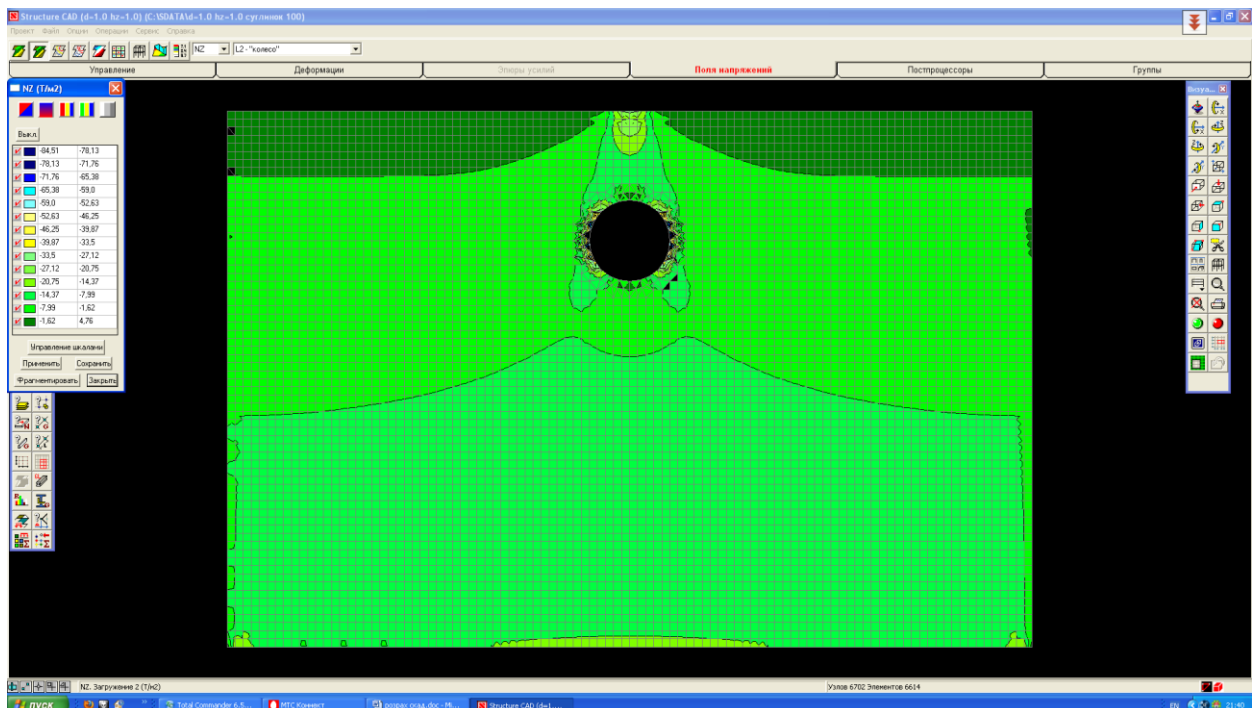
**Рисунок 4** – Напруження по осі Z від навантаження НК-100 в перерізі під рядом коліс (до рис. 3)



**Рисунок 5** – Напруження по осі Z від навантаження НК-100, діаметр труби 1,0 м, висота насипу 2,0 м, армований геотекстилем, ґрунт насипу суглинок



**Рисунок 6** – Напряжения по оси Z від навантаження НК-80, діаметр труби 1,0 м, висота насипу 2,0 м, ґрунт насипу суглинок (плоска задача)



**Рисунок 7** – Напряжения по оси Z від навантаження НК-100, діаметр труби 1,0 м, висота насипу 2,0 м, ґрунт насипу суглинок (плоска задача)



## ВИСНОВКИ

За результатами математичного моделювання та з аналізу отриманих даних можна зробити такі висновки:

1. При зміні висоти засипки (висоти насипу) спостерігається, що природно, збільшення тиску на споруду, причому при збільшенні висоти з 0,5 м до 1,0 м всі показники (напруження, моменти в перерізі кільця, поперечні сили тощо) зростають майже у 1,5 рази, а при збільшенні від 1,0 м до 12 м величини цих показників зростають майже на порядок і сягають для супіску напруження близько  $38 \text{ тс/м}^2$ ; згинаючий момент без врахування зовнішнього навантаження 3,3 тсм, при навантаженні НК-80 і НК-100 – 4,5 тсм при нормованому згідно з [4] – з умови міцності – 6,58 тсм, з умови розкриття тріщин – 8,33 тсм.

2. При одній і тій же висоті засипки труби з меншим діаметром знаходяться у кращому НДС (всі компоненти менші) порівняно із трубами більших діаметрів. Наприклад, для супіску напруження на трубу діаметром 0,75 м без врахування навантаження складає  $2,33 \text{ тс/м}^2$ , а для діаметра – 1,5 м –  $3,29 \text{ тс/м}^2$ .

3. При збільшенні діаметра труби і висоти засипки напруження навколо труби зростає більш плавно і в меншу кількість разів ніж моменти і нормальні сили.

4. Моменти, що виникають у трубі при  $0^\circ$  і  $90^\circ$ , майже однакові, але протилежні за знаком. Точка переходу зусиль через нуль лежить в перерізі біля  $45^\circ$ .

5. Напруження і моменти при збільшенні висоти засипки до 1,0 м зменшуються, а потім зростають. Нормальні сили, при збільшенні навантаження постійно зростають.

6. Глибина активної зони для навантаження НК (при умові  $z_{akt}=0,1\sigma_z$ ) складає близько 4 м, проте уже з глибини 3 м різниця між напруженнями, що створює НК-80 і НК-100 зменшується до 2,5 % і зменшується до нуля при збільшенні висоти засипки.

7. При нежорсткій основі зусилля в трубі залежать від її діаметра і зростають з його збільшенням (зростання не пропорційне). При жорсткій основі зусилля змінюються різкіше, але значення їх менші ніж при нежорсткій основі.

8. Нормальні зусилля при низьких насипах майже співрозмірні як при жорсткій, так і нежорсткій основах, а при високих насипах майже у 2 рази менші ніж при жорсткій основі. При невисоких насипах при жорсткій основі моменти, які виникають в трубі більші ніж при нежорсткій основі. При високих насипах вони майже однакові, але зростання при жорсткій основі більш плавніше ніж при нежорсткій. При жорсткій основі моменти при збільшенні насипу у 5 разів збільшуються у 2 рази, при нежорсткій основі – у 6 разів, тому при жорсткій основі труба працює у більш сприятливому напружено-деформованому стані.

9. Раціональним кутом обхвату труби при нежорсткій основі є кут  $180^{\circ}$  в незалежності від висоти насипу і діаметра труби. При жорсткій основі раціональним є кут обхвату близький до  $90^{\circ}$  і при цьому ґрунт засипки немає значення.

10. Для засипки труби краще використовувати ґрунт, що має більші модуль пружності (деформації) і кут внутрішнього тертя (наприклад пісок), про що свідчать менші величини компонентів НДС.

За результатами числового моделювання та з аналізу отриманих даних можна зробити такі висновки:

1. При зміні висоти засипки (висоти насипу) спостерігається таж зміна зусиль, що і при математичному моделюванні.

2. Напруження при однаковій висоті засипки майже однакові для різних діаметрів.

3. При збільшенні висоти насипу, спостерігається таж тенденція, що і при математичному моделюванні, спочатку напруження зменшуються при зміні висоти засипки від 0,5 м до 4,0 м, а потім зростають. Таж тенденція спостерігається і для деформацій.

4. Аналіз трьох видів ґрунтів засипки свідчить (менші компоненти напруження), що раціональним ґрунтом для обсибки є пісок.

5. Армування обсибки одиничним полотнами не покращує напружено-деформований стан системи.

6. Застосування геосинтетичної обойми покращує напружений стан системи, що видно із більш рівномірного розподілу ізоліній напружень і деформацій.

7. Зміна товщини обсіпки з 0,3 м до 0,5 м не призводить до суттєвого покращення НДС системи. Так само, як збільшення ширини обійми з трьох діаметрів труби до п'яти діаметрів труби.

8. Наявність геосинтетичної обійми дозволяє покращити розподіл деформацій при зростанні зовнішнього навантаження, у даному випадку від НК-80 до НК-100.

9. Застосування залізобетонної плити (товщиною 0,2 м) над трубою на висоті 0,5 м дозволяє суттєво покращити НДС системи – рівномірні деформації і плавна зміна напружень. Проте, абсолютні значення цих компонентів зросли майже на 30 %. Ця закономірність стосується тільки насипів до 5 м.

10. Застосування двох геосинтетичних обійм товщиною 0,3 м і кроком 0,5 м призводить до однакового розподілу напружень, як і при застосуванні залізобетонної плити, але розподіл напружень гірший, тому їх застосування не є доцільним.

11. Для насипів висотою 5 м і вище не є доцільним застосування геосинтетичних обійм або залізобетонних плит над водопропускними трубами, оскільки вони не призводять до суттєвого покращення НДС системи.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Чечуга О.С. Удосконалення методу проектування круглих водопропускних труб на автомобільних дорогах: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.11 / Чечуга Олександр Сергійович. – К., 2010. – 225 с.
2. Тимофеева Л.М. Армирование грунтов (теория и практика применения). Ч.1. Армирование основания и армогрунтовые подпорные стены / Тимофеева Л.М. – П.: ППИ. 1991. – 478 с.
3. Рубан О.А. Устойчивость слоистых грунтовых сооружений на деформируемом основании: Монография / Рубан О.А. – Днепропетровск: ПГАСиА, 2005. – 182 с.
4. Звенья железобетонные круглых и прямоугольных водопропускных труб под железные и автомобильные дороги. Технические условия: ОСТ 35-27.0-85. – Введ. 01.07.86 до 01.07.91 Группа Ж33. – М.: Минтранс СССР, 1986. – 32 с.