

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

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ
КРУГЛОЇ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ ТРУБИ З ҐРУНТОМ СЕРЕДОВИЩА ПІД
ДІЄЮ ЗОВНІШНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

Анотація. У статті розглянуто результати розрахунків за математичною моделлю конструкції «насип – труба – основа». Проведено дослідження впливу жорсткості основи системи та наявності фундаменту, впливу обхвату труби спланованим ложем або фундаментом.

Ключові слова: напружено-деформований стан, навантаження, жорсткість, напруження, переміщення, основа, труба, насип.

Аннотация. В статье рассмотрены результаты расчетов по математической модели конструкции “насыпь - труба – основание”. Проведено исследование влияния жесткости основания системы и наличия фундамента, влияния обхвата трубы спланированным ложем или фундаментом.

Ключевые слова: напряженно - деформированное состояние, нагрузки, жесткость, напряжение, перемещение, основаие, труба, насыпь.

Annotation. The article deals with the results of calculations for construction of mathematical models "mound - trumpet - the foundation." Influence of foundation rigidity of the system and the presence of base, the impact of planned coverage pipe bed or foundation.

Key words: mode of deformation, stress, stiffness, stress, displacement, base pipe embankment.

Досвід експлуатації малих штучних споруд і великомасштабні польові обстеження останніх років показали, що побудовані за застарілими нормативами земляне полотно і труба згодом втрачають свої споживчі якості, що призводить до утворення дефектів та руйнувань.

Аналіз наявних розрізнених даних по об'єктам із деформаціями і проектним розробкам показав, що сьогодні проектувальники не володіють надійним апаратом теоретичної оцінки міцності і розрахунку тиску на водопропускні труби, обмежуючись у своїй роботі, як правило, альбомами типових рішень минулого сторіччя. Технологічні прийоми створення конструкції земляного полотна недостатньо пов'язані з будівництвом водопропускної труби, що завжди було проблемним фактором при подальшій роботі цього об'єкта.

На теперішній час постає проблема у зв'язку з якісним і кількісним ускладненням умов будівництва та експлуатації сучасних автомобільних доріг (зростання осьових навантажень, швидкостей руху і вантажопідйомності), зміною структури і властивостей ґрунтів внаслідок дії природних факторів і зовнішніх навантажень, а також процесом старіння конструкції труби і земляного полотна.

На основі математичної моделі розрахунку напружено-деформованого стану(1) було виконано серію розрахунків дослідження роботи конструкції «насип – труба – основа».

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

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

p_{0v}, p_{2v} – коефіцієнти, що враховують вплив зовнішнього навантаження;

p_1, p_3, t_3 – коефіцієнти, що враховують жорсткість системи, геометричні параметри труби, властивості матеріалів труби і ґрунту тощо;

M, N – згинаючі моменти і нормальні сили;

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

R – радіус труби;

s – товщина стінки труби;

ν_0, E_0 – коефіцієнт Пуассона і модуль деформації матеріалу труби.

Також виконано дослідження впливу жорсткості основи системи та наявності фундаменту, впливу обхвату труби спланованим ложем або фундаментом. Розрахунки велись для таких вихідних даних:

- а) 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.

Дослідження впливу жорсткості основи системи та наявності фундаменту, а також вплив обхвату труби спланованим ложем або фундаментом виконували за залежностями запропонованими Малишевим у [1] з врахуванням отриманих у роботі залежностей (2 - 4):

- згинальні моменти

$$M(\theta) = \sum_{k=2}^{\infty} p_k \frac{R^2 \cos k\theta}{k^2 - 1} + \sum_{k=2}^{\infty} \frac{t_k R^2 \cos k\theta}{k(k^2 - 1)} = R^2 \sum_{k=2}^{\infty} \left(p_k + \frac{t_k}{k} \right) \frac{\cos k\theta}{k^2 - 1}; \quad (2)$$

- нормальні сили

$$N(\theta) = R \sum_{k=2}^{\infty} \frac{p_k + kt_k}{k^2 - 1} \cos k\theta - p_0 R; \quad (3)$$

- переміщення

$$u_k = p_0 \frac{R^2}{E_0 F} + \sum_{k=2}^{\infty} A_k \left(p_k + \frac{t_k}{k} \right) \cos k\theta; \quad v_k = \sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{A_k}{k} p_k + B_k t_k \right) \sin k\theta. \quad (4)$$

де
$$A_k = \frac{R^4(1 - \mu_0^2)}{(k^2 - 1)^2 E_0 I} \left[1 + \frac{i^2}{R^2} (1,2ak^2 - 1) \right];$$

$$B_{\kappa} = \frac{R^4(1-\mu_0^2)}{(k^2-1)^2 E_0 I} \left[1 + \frac{i^2 k^2}{R^2} (k^2 - 2 + 1,2a) \right],$$

де R – радіус труби;

E_0 – модуль деформації матеріалу труби;

I – модуль інерції труби (кільця);

F – площа поперечного перетину погонної довжини труби;

μ_0 – коефіцієнт Пуассона матеріалу труби;

$$i^2 = \frac{s^2}{12}$$

де s – товщина стінки труби;

$$a = 2(1 + \mu_0).$$

Якщо труба, яка має кільцевий переріз, влаштована на бетонний фундамент, то визначення згинаючих моментів в нижньому напівкільці у перерізі $\frac{\pi}{2} \geq \theta \geq \beta$ виконували за формулою:

$$M_{\theta \geq \beta} = K_1 N_1 R. \quad (5)$$

$$N_1 = R \left(\frac{p_2 + 2t_2}{3} + p_0 \right), \quad (6)$$

де K_1 – коефіцієнт отриманий у [1]

При обпиранні труби на сплановане ложе:

$$M_{\theta \geq \beta} = K_2 N_1 R, \quad (7)$$

де K_2 – коефіцієнт отриманий у [1]

Деякі характерні результати розрахунків наведені на рис. 4–7.

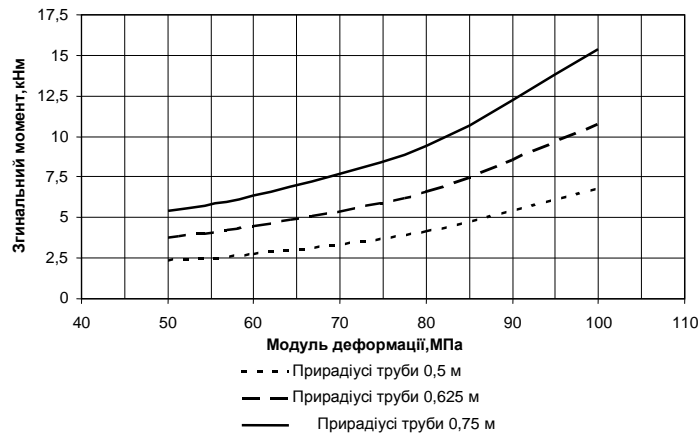


Рисунок 4 – Залежність згинального моменту від модуля деформації основи та радіуса труби при жорсткій основі

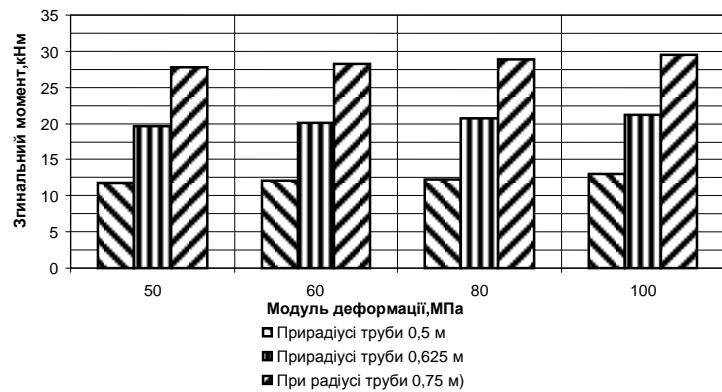


Рисунок 5 – Залежність згинального моменту від модуля деформації основи та радіуса труби при нежорсткій основі

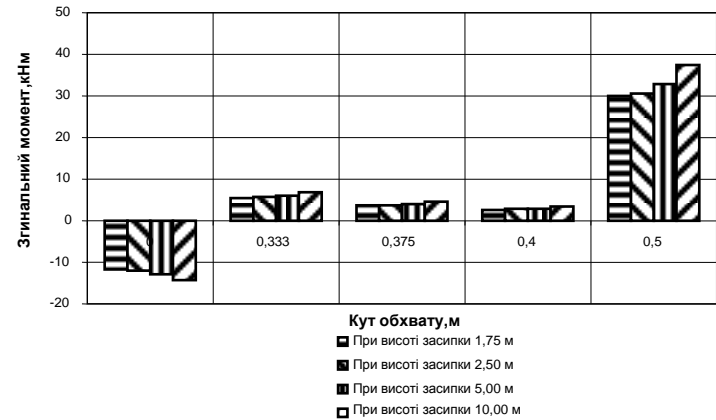


Рисунок 6 – Залежність згинальних моментів від висоти насипу та кута обхвату при жорсткій основі

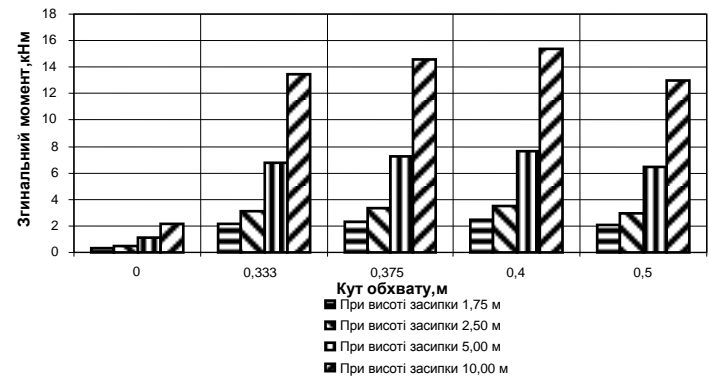


Рисунок 7 – Залежність згинальних моментів від висоти насипу та кута обхвату при нежорсткій основі

З отриманих результатів математичного моделювання видно, що при зміні висоти засипки (висоти насипу) спостерігається 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 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 [2] – з умови міцності – 6,58 тсм, з умови розкриття тріщин – 8,33 тсм. 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 – $3,29 \text{ тс/м}^2$. А при збільшенні діаметра труби і висоти засипки напруження навколо труби зростає більш плавно і в меншу кількість разів, ніж моменти і нормальні сили. Моменти, що виникають у трубі при 0° і 90° , майже однакові, але протилежні за знаком. Точка переходу зусиль через нуль лежить в перерізі біля 45° . Напруження і моменти при збільшенні висоти засипки до 1,0 м зменшуються, а потім зростають. Нормальні сили, при збільшенні навантаження постійно зростають. 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. На нежорсткій основі зусилля в трубі залежать від її діаметра і зростають з його збільшенням (зростання не пропорційне). А от при жорсткій основі зусилля змінюються різкіше, але значення їх менші ніж при нежорсткій основі. 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 на жорсткій основі моменти, які виникають в трубі більші ніж на нежорсткій основі. У високих насипах вони майже однакові, але зростання при жорсткій основі більш плавно ніж при нежорсткій. При

жорсткій основі моменти при збільшенні насипу у 5 разів збільшуються у 2 рази, а при нежорсткій основі – у 6 разів. Тому при жорсткій основі труба працює у більш сприятливому напружено-деформованому стані. Раціональним кутом обхвату труби при нежорсткій основі є кут 180° , в незалежності від висоти насипу і діаметра труби. На жорсткій основі раціональним є кут обхвату близький до 90° і при цьому ґрунт засипки немає значення. 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.

Математична модель процесу взаємодії круглої залізобетонної труби з ґрунтом середовища під дією зовнішнього навантаження дає можливість встановити реальні силові фактори та оцінити напружено-деформований стан насипу, який є визначальним при розрахунку труб на міцність. Проектування круглих залізобетонних водопропускних труб на автомобільних дорогах за допомогою математичної моделі дозволяє врахувати дію різних видів зовнішнього навантаження та різні умови роботи труби у тілі насипу.

Література

1. Малышев М.В. Методика статического расчета коллекторов хвостохранилищ и трубопроводов, укладываемых под высокими насыпями / М.В. Малышев // Труды ВОДГЕО. – 1963. – Вып. 4. – С. 3–40.
2. 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.
3. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи: ДБН В.1.2-15:2009. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 22 с.
4. Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування ДБН В.2.3-22:2009. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 52 с.