

Чечуга О.С., канд. техн. наук, Осяєв Ю.М., канд. техн. наук.

## ВИКОРИСТАННЯ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ КОНСТРУКЦІЇ “НАСИП – ТРУБА – ОСНОВА”

**Анотація.** У статті проведено порівняння експериментальних результатів з результатами розрахунків напружень, що виникають у водопропускній трубі від тиску ґрунту і зовнішнього навантаження.

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

**Аннотация.** В статье проведено сравнение экспериментальных результатов с результатами расчетов напряжений, возникающих в водопропускной трубе от давления грунта и внешней нагрузки.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, нагрузки, жесткость, напряжение, перемещение, коэффициента корреляции, основание, труба, насыпь.

**Annotation.** The article compared the experimental results with the results of calculation of stresses arising in culverts from soil pressure and external load.

**Keywords:** mode of deformation, stress, stiffness, stress, displacement, correlation coefficient, base, pipe embankment.

У науково-технічній літературі наведено невелику кількість результатів досліджень тиску ґрунту і зовнішніх навантажень на труби закладенні у ґрунтові масиви. Як правило, це експерименти виконані на початку і в середині двадцятого століття. У більшості із них мало вказано про вихідні дані, хоча аналіз отриманих результатів свідчить про однаковий характер розподілу тиску. Одним із масштабних результатів експериментального дослідження тиску

грунту і зовнішнього навантаження на трубу і який достатньо висвітлений у науковій літературі є експеримент виконаний Р.І. Бергеном, М.І. Фроловим і Ю.А. Тевелєвим [1] (рис. 1).

На основі розробленої математичної моделі (1) з використанням вихідних даних, що були у [1] нами отримані розрахунки, які у формі епюр мають наступний вигляд (рис. 2).

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

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

$p_{0v}, p_{2v}$  – запропоновані автором 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;

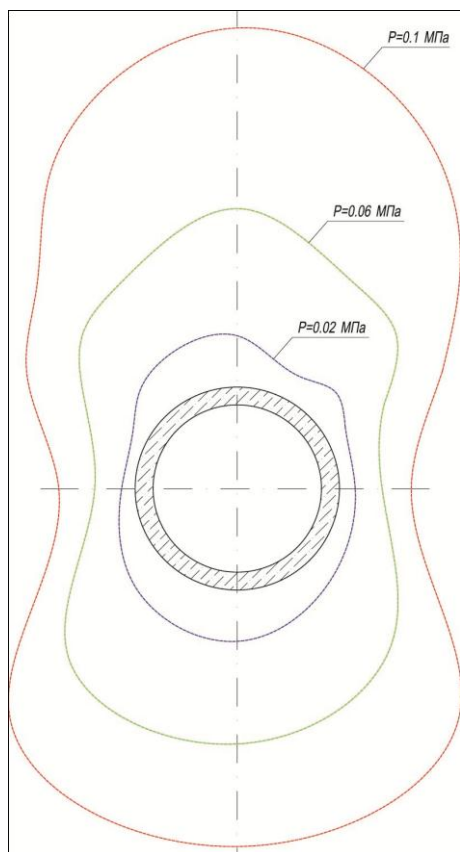
$M, N$  – згинаючі моменти і нормальні сили;

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

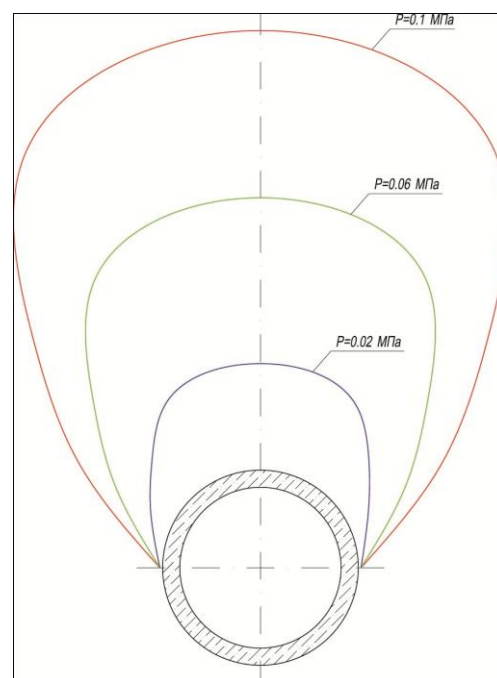
$R$  – радіус труби;

$s$  – товщина стінки труби;

$\nu_0, E_0$  – коефіцієнт Пуассона і модуль деформації матеріалу труби.



**Рисунок 1** - Епюри експериментального дослідження тиску ґрунту і зовнішнього навантаження на трубу



**Рисунок 2** - Епюри тиску ґрунту і зовнішнього навантаження на трубу отримана в результаті розрахунку математичної моделі

Проведемо порівняння результатів експерименту [1] і розрахунків за (1) за допомогою коефіцієнта кореляції. Коефіцієнт лінійної кореляції характеризує міру лінійної залежності між двома змінними. Якщо уявити дві змінні на координатному полі, то кожна пара значень буде відображати координати точки в цьому полі. У загальному вигляді, рівняння цієї прямої матиме вигляд:

$$y = Ax + B, \quad (2)$$

де  $A$  і  $B$  – коефіцієнти.

Вказані коефіцієнти можна отримати використавши метод найменших квадратів, знаючи кількість пар неекспериментальних і теоретичних значень  $x$  і  $y$ .

$$A = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2}; B = \bar{y} - A \cdot \bar{x}, \quad (3)$$

де  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\overline{xy}$ ,  $\overline{x^2}$  – середні арифметичні значення  $x$ ,  $y$ ,  $xy$  і  $x^2$ .

Коефіцієнт кореляції:

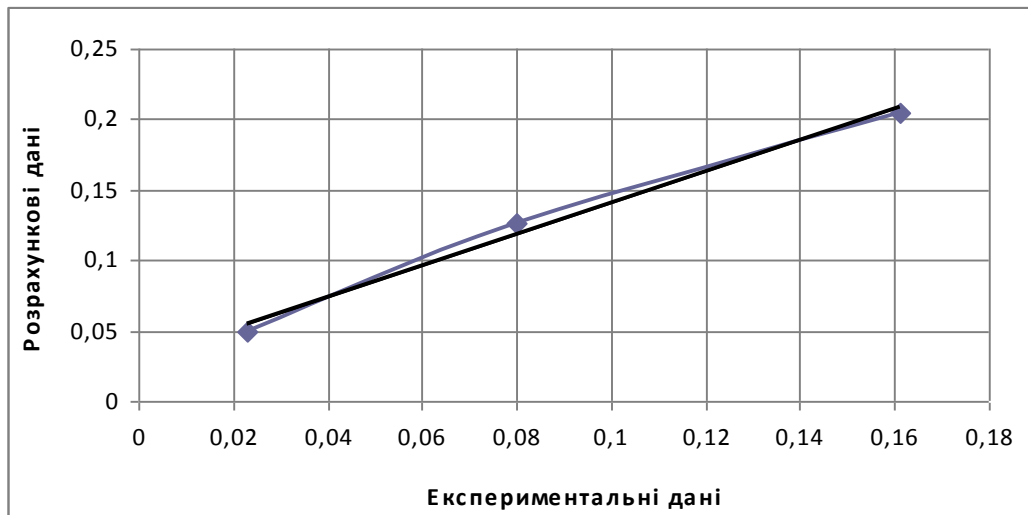
$$r_{xy} = \frac{k(x, y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y}, \quad (4)$$

де  $k(x, y)$ ,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  – кореляційний момент і середні квадратичні відхилення величин  $x$  і  $y$ .

$$k(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}). \quad (5)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (6)$$

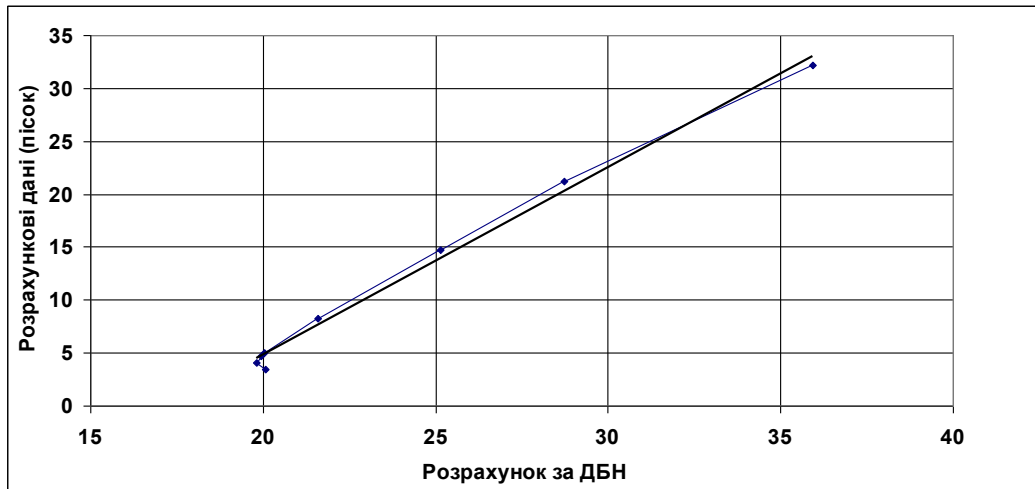
$$\sigma_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \quad (7)$$



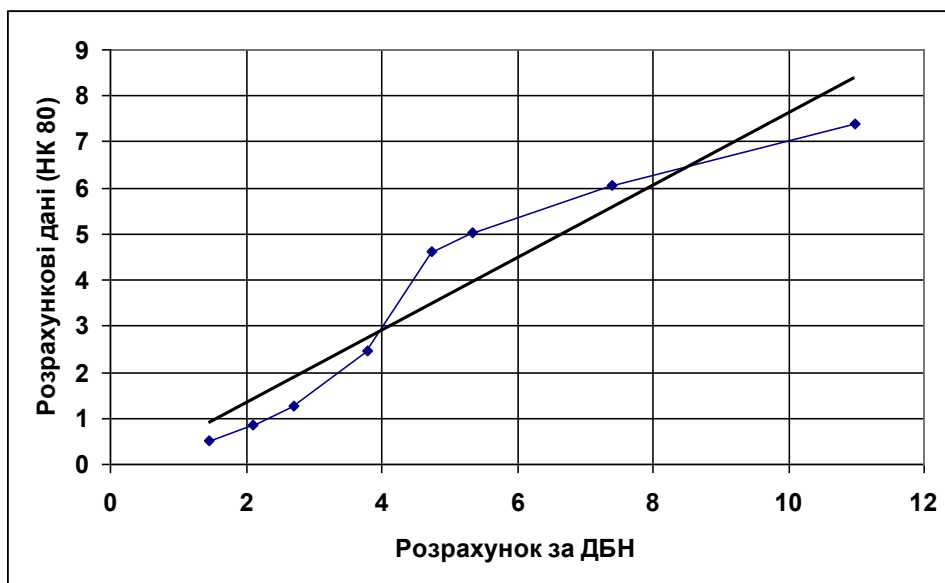
**Рисунок 3** - Усереднена лінія коефіцієнта лінійної кореляції експерименту [48] і розрахунків за (1)

Коефіцієнт кореляції порівняння експерименту [1] і розрахунків за (1) склав 0,95 – 0,99. Найбільшу розбіжність у верхній точці труби можна пояснити, на нашу думку, тим, що в експерименті використовували ребристі труби та з [1] не зрозуміло із якого перерізу наведенні результати досліджень.

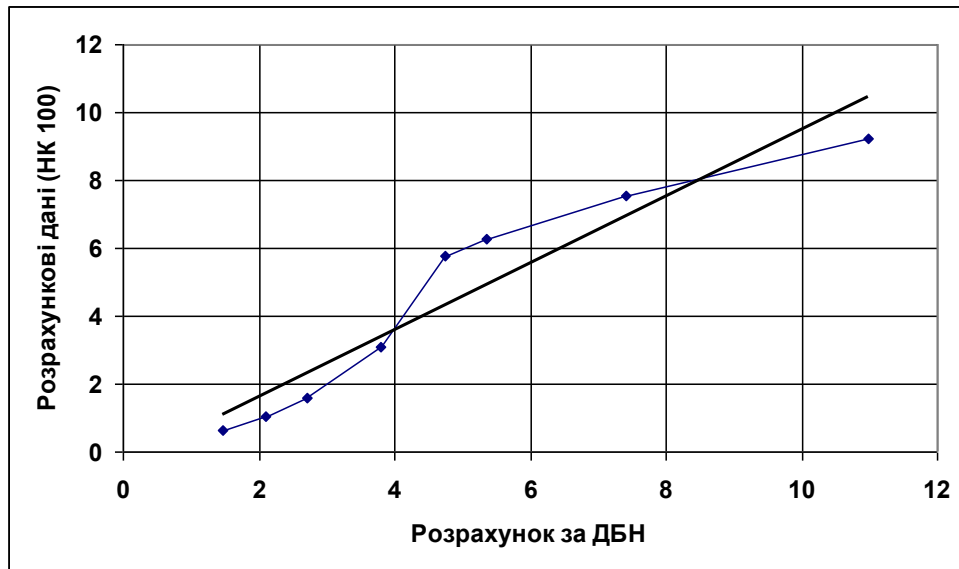
Проведемо аналогічнопорівняння результатіврозрахунків за [2] і розрахунків на основі розробленої математичної моделі (1).



**Рисунок 4** - Усереднена лінія коефіцієнта лінійної кореляції розрахунків за [2] і розрахунків на основі розробленої математичної моделі від постійного навантаження



**Рисунок 5** – Усереднена лінія коефіцієнта лінійної кореляції розрахунків за [1] і розрахунків на основі розробленої математичної моделі від рухомого навантаження НК 80



**Рисунок 6** - Усереднена лінія коефіцієнта лінійної кореляції розрахунків за [1] і розрахунків на основі розробленої математичної моделі від рухомого навантаження НК 100

Коефіцієнт кореляції порівняння розрахунків за [1] і розрахунків на основі розробленої математичної моделі від рухомого навантаження НК склав 0,95 – 0,99.

Значення коефіцієнта кореляції більше 0,7 свідчить про досить високе співпадіння результатів, що є підтвердженням адекватності розробленої в роботі математичної моделі.

Адекватність теоретичних та експериментальних досліджень і числового моделювання дають змогу при проектуванні конструкції “насип – труба – основа” застосовувати числове моделювання, що найбільш доступне, з моделюванням критичних станів системи та розробкою заходів із покращення її напружено-деформованого стану.

### Література

1. Тевелев Ю.А. Железобетонные трубы. Проектирование и изготовление / Ю.А. Тевелев – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2004. – 328 с.
2. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи: ДБН В.1.2-15:2009. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 22 с.
3. Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування ДБН В.2.3-22:2009. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 52 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.