

УДК 624.21:625.745.2

СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНИЙ РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛЕВИХ ГОФРОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ВЗАЄМОДІЇ ІЗ ҐРУНТОМ ЗАСІПКИ У ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ NX NASTRAN

В. Ковальчук, к. т. н.

Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна

Постановка проблеми. Металеві гофровані конструкції (МГК) вітчизняної та імпортової поставки застосовують на залізницях та автомобільних дорогах України за спорудження водопропускних труб, транспортних шляхопроводів, мостів, галерей, підпірних стін тощо.

Під час проектування металевих гофрованих конструкцій проектувальники зіштовхнулися з проблемою проектування металевих гофрованих конструкцій діаметром понад 3 м. Оскільки вплив нормативних документів ВБН [1] та ВСН [2] поширюється тільки для труб діаметром до 3-х метрів, у проектуванні металевих гофрованих конструкцій діаметром понад 3 м необхідно застосовувати метод скінченних елементів. Проте за використання такого методу немає чітких рекомендацій з вибору типів скінченних елементів, моделювання контакту на межі «металева гофрована труба-ґрунт засипки», а також рекомендовані розміри скінченних елементів на межі контакту «труба-ґрунт».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Точніші розрахунки напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій можна отримати за допомогою чисельних розрахунків із використанням методу скінченних елементів [3–5]. Згідно з [4], розрахункова схема МГК повинна адекватно відображати роботу труби, ґрунтової обойми та основи, а за розрахункову схему потрібно приймати тривимірну модель.

Метод скінченних елементів передбачає дискретизацію суцільного середовища об'єкта певною кількістю скінченних елементів різних форми і розмірів. Цей метод дає змогу розв'язувати задачі, реалізація яких за допомогою аналітичних методів неможлива: це розрахунки просторових конструкцій; врахування чинників будівництва та експлуатації; дослідження об'єктів зі складною структурою та дослідження їх напружено-деформованого стану [6; 7].

Дискретизація суцільного середовища у вигляді елементів, пов'язаних скінченною кількістю вузлових зв'язків, дає змогу зберегти характеристики середовища під час визначення напружено-деформованого стану кожного елемента. Наявність скінченної кількості вузлових зв'язків дає змогу ввести співвідношення між силами, прикладеними до вузлових місць, та викликаними переміщеннями. Це співвідношення зображується матрицею жорсткості елемента [4; 7; 8].

Як показує досвід закордонних практичних розрахунків, основою реалізації скінченного елементного підходу є використання програмних комплексів «Зеніт-

97», ANSYS та NX NASTRAN. Крім того, застосування методу скінченних елементів (МСЕ) дало змогу отримати цілком задовільну відповідність розрахункових оцінок напружено-деформованого стану гофрованих конструкцій і ґрунтового середовища засипки. Отже, підтверджується прийнята в недавно розроблених документах-рекомендаціях думка про необхідність виконання розрахунків МГК складного обрису і прогону понад 3 м з використанням МСЕ [2].

Постановка завдання. Наше завдання – розробити алгоритм розрахунку і здійснити розрахунок напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій за взаємодії із ґрунтом засипки у програмному середовищі NX NASTRAN.

Виклад основного матеріалу. Для оцінки несучої здатності МГК розроблено схему розрахунку напружено-деформованого стану взаємодії металеві гофрованої труби із ґрунтом засипки, яка показана на рис. 1.

Перед дослідженням напружено-деформованого стану металеві гофрованої конструкції подамо рекомендації з проведення скінченно-елементного моделювання за використання програмного комплексу NX NASTRAN.

У вузлах елементів нижньої частини ґрунтової обойми задаємо нерухомі шарніри, які забороняють лінійні переміщення, а у вузлах елементів бічних граней уводимо заборону горизонтальних переміщень.

Простір ґрунту в пазухах гофрів заповнюємо тривимірними скінченними елементами типу Solid (призмами і тетраедрами), а потім із віддаленням від гофрованої оболонки ґрунт моделюємо гексаедрами. Згущення скінченно-елементної сітки виконуємо у місцях можливої концентрації напружень та в областях контакту спряжених тіл. Зокрема, поблизу гофрів розміри скінченних елементів вибираємо дрібнішими, а решту області розбиваємо елементами більших розмірів. При цьому ґрунтову обойму розбиваємо сіткою тривимірних скінченних елементів типу Solid, а трубу – двовимірними скінченними елементами типу Plate.



Рис. 1. Схема послідовності розрахунку напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій за допомогою МСЕ.

Ґрунт розглядаємо, як в'язке однорідне середовище із використанням моделей ідеально-пластичних середовищ у поєднанні з неасоційованими законами пластичності [3], оскільки у програмному комплексі NX NASTRAN реалізована процедура Драккера-Прагера (Drucker-Prager). Як момент настання пластичного стану використовуємо модифікований критерій Мізеса, а для формування неасоційованих законів пластичності – граничну поверхню Кулона-Мора. Для виключення впливу граничних умов, що накладаються по бічних сторонах ґрунту засипки на стан гофрованої конструкції, межу розрахункової області ґрунту вибираємо на відстані $3R$ (де R – горизонтальний розмір конструкції) від бічної сторони конструкції.

Болтові з'єднання, за допомогою яких з'єднують між собою гофролисти, моделюємо жорсткими зв'язками (Coupled DOF).

Вихідні дані до розрахунку МГК. Приймається металева гофрована труба конструкції Multiplate MP 150 довжиною 12,69 м у формі горизонтального еліпса з такими параметрами: внутрішній вертикальний діаметр – 6,20 м, внутрішній горизонтальний діаметр – 6,57 м, довжина хвилі – 150 мм, висота хвилі – 50 мм, товщина металевого листа – 6 мм, щільність цинкового покриття товщиною 85 мікрон (567 г/м^2), питома вага ґрунту засипки становить $\gamma = 20 \text{ кН/м}^3$; модуль деформації ґрунту засипки – $E_0 = 33 \text{ МПа}$; відстань від підшови рейок до верху склепіння труби – $h = 2,04 \text{ м}$; еквівалентне навантаження, відповідно до ДБН В.2.3-14 залежно від довжини і форми лінії впливу – $q = 235,3 \text{ кН/м}$; модуль пружності сталі – $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; товщина листа гофрованої конструкції – $\delta = 6 \text{ мм}$; коефіцієнт Пуассона матеріалу споруди – $\nu = 0,25$; питома вага матеріалу МГК – $\gamma_{sh} = 145,4 \text{ кН/м}^2$; площа перерізу однієї хвилі гофри – $\dot{A} = 0,757 \cdot 15 = 11,355 \text{ см}^2$; розрахунковий опір сталі за межею текучості – $R_y = 235 \text{ МПа}$; коефіцієнт умов роботи – $m = 0,9$. Розподіл навантажень за шпалами вздовж колії отримали з розрахунків колії на міцність [10].

У поздовжньому напрямі тіло труби складається з 14-ти кілець, кожне з яких складається з десяти листів, з'єднаних болтами. Оголовки труби виконані за допомогою габйонів системи Террамеш. Модулі розташовуються горизонтальними ярусами. Основою для оголовок слугують габйонні матраци Рено 3:2:0,23 м, встановлені на геотекстиль та сітку секурід.

Результати розрахунку елементів конструкції залізничного переходу за різної щільності засипки металевої гофрованої оболонки отримані у програмному середовищі NX NASTRAN.

Напружено-деформований стан фрагмента залізничного переходу загалом має вигляд, який показаний на рис. 2 (масштаб деформацій штучно збільшено для зручності перегляду).

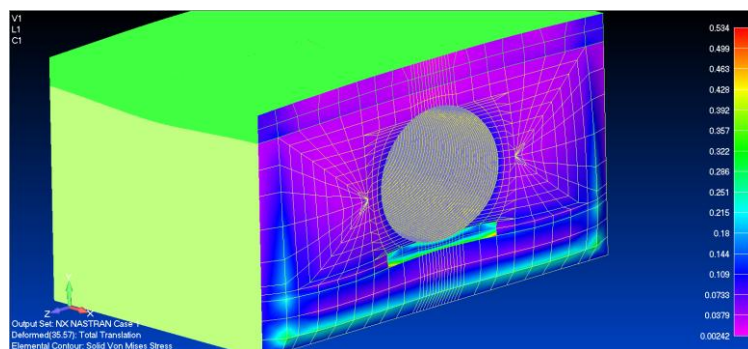


Рис. 2. Розподіл деформацій у металевій гофрованій конструкції.

Напружено-деформований стан гофрованої сталеві оболонки переглядаємо налаштуванням вибіркового перегляду елементів переходу та обираємо

еквівалентні напруження в оболонці за теорією міцності Губера-Мізеса. Значення напружено-деформованого стану в найбільш характерних точках оболонки наведені на рис. 3 (гофрована оболонка зображена в перерізі).

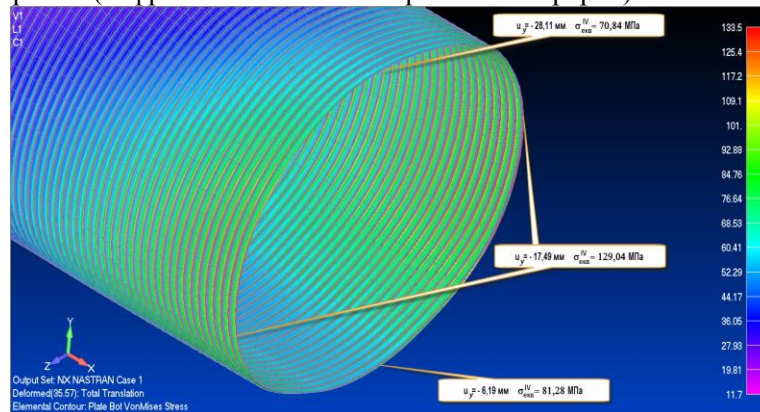


Рис. 3. Розподіл напружень у металевій гофрованій трубі.

Результати розрахунку переміщень показані на рис. 4.

Із проведених розрахунків напружено-деформованого стану металевій гофрованої конструкції випливає, що максимальні напруження виникають на межі горизонтального діаметра труби. І при заданих вихідних даних їх рівень становить 129,04 МПа (див. рис. 3). При цьому максимальні переміщення металевій гофрованої труби виникають у її склепінні (їх величина становить 35,57 мм (див. рис. 4).

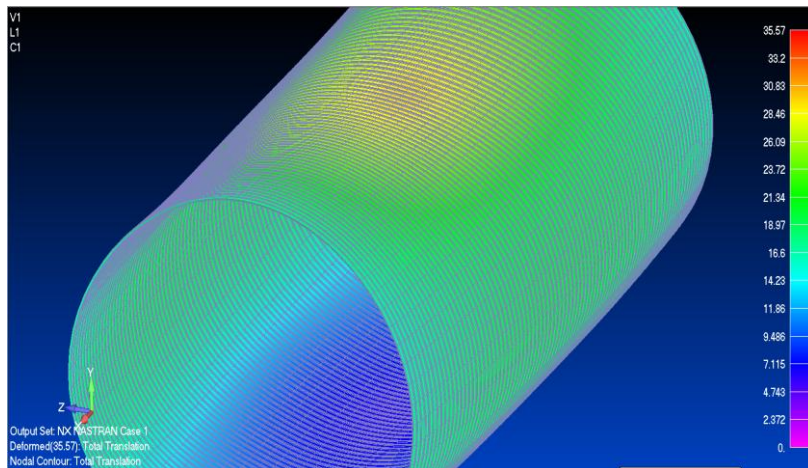


Рис. 4. Розподіл переміщень у металевій гофрованій трубі.

Загалом результати чисельного експерименту свідчать про можливість коректного опису за допомогою МСЕ складних ефектів деформації МГК і ґрунтового середовища за дії високоінтенсивних навантажень.

Висновки. Використання МСЕ у розрахунках системи «навантаження–насип–труба–основа» дає змогу реальніше враховувати регіональні особливості під час проектування, будівництва та експлуатації металевих гофрованих конструкцій.

Бібліографічний список

1. Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування : посібник до ВБН В.2.3-218-198:2007. – К., 2007. – 122 с.
2. ОДМ 218.2.001-2009 Рекомендации по проектированию водопропускных металлических гофрированных труб : Распоряжение Федерального дорожного агентства от 21 июля 2009 г. – 2009. – № 252-р. – 126 с.
3. Wysokowski A. Obliczenia przepustow Metodą Elementow Skończonych – MES / Wysokowski A., Howis J. – 2011. – № 3 (36). – S. 54–57.
4. Zagrajek T. Metoda elementow skończonych w mechanice konstrukcji. Ćwiczenia z wykorzystaniem ANSYS. Ofi cyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej / Zagrajek T., Krzesiński G., Marek P. – Warszawa, 2005.
5. Методические указания по расчету оснований водопропускных труб по деформациям. – М. : ЦНИИС Минтрансстроя СССР, 1974. – 15 с.
6. Клепиков С. Н. Расчет сооружений на деформируемом основании / Клепиков С. Н. – К. : НИИСК, 1996. – 202 с.
7. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений / А. С. Городецкий, В. И. Зоворицкий, А. И. Лантух-Лященко, А. О. Рассказов. – М. : Транспорт, 1981. – 143 с.
8. Система забезпечення надійності і безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування : ДБН В.1.2-2:2006. – К. : Держбуд України, 2006. – 78 с.
9. Беляев В. С. Методические основы практических расчетов металлических гофрированных конструкций / В. С. Беляев, М. Л. Сандгартен // Стройматериалы. – 2009. – № 1(9). – 17–19 с.
10. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість. ЦП-0117 / Е. І. Даніленко, В. В. Рибкін. – К. : Транспорт України, 2006. – 168 с.

Ковальчук В. Скінченно-елементний розрахунок напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій за взаємодії із ґрунтом засипки у програмному середовищі NX NASTRAN

У статті розроблений підхід до визначення напружено-деформованого стану металевих гофрованих труб за взаємодії із ґрунтом засипки. Наведено алгоритм розрахунку НДС, рекомендації із задання типів та розмірів скінченних елементів ґрунтової засипки та металевої гофрованої труби. Проведено розрахунок реального об'єкта металевої гофрованої конструкції, в результаті чого встановлено можливість методу скінченних елементів застосовувати до оцінки несучої здатності металеві гофровані конструкції.

Ключові слова: металева гофрована труба, метод скінченних елементів, напруження, деформації, переміщення.

Kovalchuk V. Finite-element calculation of stress-strain state of corrugated metal structures in the interaction with soil backfill programmed in NX NASTRAN

In the paper developed an approach to determine the deflected mode of the corrugated metal pipes in the interaction with soil backfill is developed. An algorithm for calculating VAT, setting guidelines on the types and measures of the finite element soil backfill and corrugated metal pipe is shown. The calculation of the real object of corrugated metal structures, resulting in the opportunity set of finite element method applied to the evaluation of the bearing capacity of corrugated metal constructions.

Key words: corrugated metal pipe, finite element method, deflected mode, displacement.

Ковальчук В. Конечно-элементный расчет напряженно-деформированного состояния металлических гофрированных конструкций при взаимодействии с грунтом засыпки в программной среде NX NASTRAN

В статье разработан подход к определению напряженно-деформированного состояния металлических гофрированных труб при взаимодействии с грунтом засыпки. Приведен алгоритм расчета НДС, рекомендации по заданию типов и размеров конечных элементов грунтовой засыпки и металлической гофрированной трубы. Проведен расчет реального объекта металлической гофрированной конструкции, в результате чего установлена возможность метода конечных элементов применять к оценке несущей способности металлические гофрированные конструкции.

Ключевые слова: металлическая гофрированная труба, метод конечных элементов, напряжения, деформации, перемещения.