

Шилін І.В., канд. техн. наук, **Грицук Ю.В.**, канд. техн. наук, **Корольков Р.О.**, канд. техн. наук

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ВОДОПРОПУСКНИХ ТРУБ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ В УМОВАХ ДОНБАСУ

Актуальність. До теперішнього часу методика розрахунку водопропускної труби на міцність в нормативних документах зазнавала деяких змін, які в загальному випадку обумовлені збільшенням значення навантаження та прийнятої моделі навколишнього середовища навколо водопропускної труби. Слід зауважити на те, що із розвитком комп'ютерної техніки та появою спеціального програмного забезпечення при проектуванні штучних гідротехнічних споруд крім плоских методів розрахунку почали застосовуватися просторові моделі для системи «навантаження – насип – труба – основа». Але всі методи розрахунку та розрахункові схеми базуються на одному припущенні – основа може бути представлена різними матеріалами і має значну жорсткість, яка не дозволяє ні в якому разі деформуватися (вертикальні або горизонтальні переміщення не припустимі).

На території Донбасу, в наслідок розробки корисних копалин на значних площах, спостерігаються процеси техногенних деформацій поверхні землі та будівель і споруд, які на ній розташовані. Дослідження [1] показують, що значна частка відказів інженерних споруд обумовлена зміною стану основи. Таким чином можна припустити, що на цих територіях при проектуванні інженерних споруд (і водопропускних труб в тому числі) слід враховувати і зміну стану основи в процесі експлуатації.

Аналіз публікацій. Аналіз публікацій [1, 2] показав, що водопропускні труби є досить розповсюдженими штучними спорудами на автомобільних дорогах. Їх кількість залежить від рельєфу місцевості, але згідно статистичних даних кількість труб на кілометр дороги по областям лежить в межах від 0.8 до 1.3.

Аналіз результатів спостережень за деформаціями водопропускних труб [1, 2] показав, що від 28 до 44 відсотків (в залежності від регіону проведення спостережень) безпосередньо пов'язано із проблемами основи. Ще від 13 до 21 відсотка випадків пов'язані із побічними проявами деформації основи.

Основний матеріал. При розгляді деформацій водопропускних труб в процесі експлуатації на практиці прийнято розглядати три групи деформацій [3, 4, 5]:

- перша група – деформації пов'язані із руйнуванням конструкцій труби та її цілісністю (зміна форми ланок труби, поздовжні та поперечні тріщини в ланках труби, руйнування захисного шару та оголення арматури в тілі труби, деформація або руйнування оголовків, випадки повного руйнування ланок труби, розтягнення ланок труби вздовж вісі, просідання тіла труби відносно оголовків, просідання окремих кілець в тілі труби, просідання насипу над трубою);

- друга група – деформації пов'язані із змінами у роботі труби (підмив оголовків, розмив насипу біля споруди, розмив русел нижнього та верхнього б'єфів, замулювання отворів труби в результаті зміни поздовжніх похилів в процесі експлуатації);

- третя група – деформації пов'язані із «старінням» споруди та «агресією» навколишнього середовища (вітрова та дощова ерозія насипу в місцях розташування труби, вилуджування бетону, корозію бетону або арматури тощо).

В роботі розглянута перша група деформацій, хоча практичними дослідженнями встановлено, що зміна стану основи оказує вплив на всі елементи конструкції труби, тобто викликає всі три групи деформацій.

Завдяки впровадженню нових технологій та матеріалів при будівництві водопропускних труб знайшли застосування гофровані металеві або полімерні конструкції, але вони відносяться до так званих «гнучких» (за жорсткістю) – тобто при розрахунку є обов'язковим врахування деформації самої споруди, а не тільки підсистеми «насип-основа» [4, 6]. Тому на першому етапі для спрощення будемо розглядати тільки «жорсткі» труби (залізобетонні) – тобто для яких, з достатньою для інженерних розрахунків точністю, можливо виконувати розрахунки без урахування деформацій самої споруди.

Слід зазначити, що при розрахунках знайшли застосування дві моделі оточуючого трубу середовища [4, 5, 6]: пружного тіла (основною ідеєю є те, що по контуру труби діють напруження, що відповідають відомим напруженням для косих площадок в умовах плоскої задачі) і сипкого тіла (із достатньою достовірністю можливе використання розрахункових залежностей теорії пружності, відмінністю є тільки заміна коефіцієнта бокового тиску в стані рівноваги на коефіцієнт активного тиску).

Моделі ґрунтової основи для водопропускних труб досить різноманітні але їх можливо згрупувати за наступними ознаками:

- моделі, в яких ґрунтовий масив складається з окремих "осередків" – моделі ґрунтової маси Терцагі, а також реологічні моделі тощо;

- моделі які дозволяють оцінити поведінку всього ґрунтового масиву в цілому - модель основи у вигляді пружного шару кінцевої товщини; модель ґрунтової основи у вигляді пружного ізотропного однорідного напівпростору, модель Вінклера; модель П.Л. Пастернака з двома коефіцієнтами постелі; комбіновані моделі Л.Н. Репнікова і А.П. Синіцина; модель основи у вигляді нелінійного напівпростору; інші моделі (нелінійно деформована основа Вінклера, пружньо-в'язкопластична основа, неоднорідна пружна основа тощо);

- моделі реальної ґрунтової споруди або основи – це моделі, які базуються на чисельних методах, які дозволяють одержувати достатньо близькі до аналітичних рішення розподілу напружень під дією розподілених і зосереджених сил без розробки аналітичної залежності - метод скінченних різниць (МСР), метод граничних елементів (МГЕ) і метод скінченних елементів (МСЕ).

Найбільш цікавим для вирішення просторової задачі при розрахунку труби в тілі насипу є метод скінченних елементів, який передбачає дискретизацію суцільного середовища об'єкта деякою кількістю скінченних елементів різної форми і розмірів та дослідження їх напружено-деформованого стану. Цей метод дозволяє розв'язувати задачі, реалізація яких за допомогою аналітичних методів неможлива: це розрахунки просторових конструкцій; врахування чинників будівництва та експлуатації; дослідження об'єктів із складною структурою [5, 7].

Особливою рисою МСЕ є можливість вираховування всіх компонентів досліджуваної системи "навантаження – насип – труба – основа". Тому є можливість розраховувати не тільки складні шаруваті масиви із різними за властивостями матеріалами, а і різноманітні за конструкцією та формою споруди з урахуванням зміни в процесі експлуатації стану основи. В основі визначення напружено-деформованого стану вказаної системи з досліджувального напівпростору розглядають деяку розрахункову область, тобто задача з нескінченним масивом зводиться до задачі з масивом обмежених розмірів. Це дозволяє розглядати систему в плоскій постановці.

Відзначимо декілька важливих переваг МСЕ для розв'язання вказаної задачі.

1. МСЕ дозволяє побудувати зручну схему формування системи алгебраїчних рівнянь щодо вузлових значень шуканої функції. Наближена апроксимація рішення за допомогою простих поліноміальних функцій і всі необхідні операції виконуються на окремому типовому елементі. Потім проводиться об'єднання елементів, що приводить до необхідної системи алгебраїчних рівнянь. Такий алгоритм переходу від окремого елемента до їх повного набору особливо зручний для геометрично і фізично складних систем.

2. Кожне окреме алгебраїчне рівняння, отримане на основі методу скінченних елементів, містить незначну частину вузлових невідомих від загального їх числа. Іншими словами, багато коефіцієнтів в рівняннях алгебраїчної системи дорівнює нулю, що значно полегшує її рішення.

3. Задачі, вирішення яких описується функціями, які задовольняють функціональним рівнянням, носять назву континуальних. На відміну від них вирішення так званих дискретних задач точно визначається кінцевим числом параметрів, що задовольняють відповідній системі алгебраїчних рівнянь. МСЕ, так само як і інші чисельні методи, по суті наближено замінює континуальну задачу на дискретну. Вся процедура такої заміни має простий фізичний сенс. Це дозволяє більш повно уявити собі весь процес рішення задачі, уникнути багатьох можливих помилок і правильно оцінювати отримувані результати.

4. Окрім континуальних задач схема МСЕ застосовується для з'єднання елементів і формування алгебраїчних рівнянь при вирішенні безпосередньо дискретних задач. Це розширює сферу застосування методу.

5. Властивості матеріалів суміжних елементів можуть бути неоднаковими. Це дозволяє застосовувати метод до тіл, складених з декількох матеріалів.

6. Криволінійна область може бути апроксимована за допомогою прямолінійних елементів або описана точно за допомогою криволінійних елементів. Таким чином, методом можна користуватися не лише для областей з «правильною» формою границі.

7. Розміри елементів можуть бути змінними. Це дозволяє укрупнити або подрібнити сітку розбиття області на елементи, якщо в цьому є необхідність.

8. МСЕ дозволяє розглядати граничні умови з розривним поверхневим навантаженням, а також змішані граничні умови.

Таким чином, особливі переваги методу полягають в зручності формування алгебраїчних рівнянь і можливості представлення абсолютно нерегулярних і складних конструкцій і умов навантаження. Популярність методу і інтерес до нього якраз і пояснюються можливістю відображати реальні аспекти, які виникають при розрахунку системи «навантаження – насип – труба – основа».

При розрахунках основи в загальному випадку прийнято, що загальними критеріями визначення розмірів розрахункової області полягає в підборі таких величин, в межах яких виконуються дві умови:

- 1) на межах області вплив напружень від дії навантаженого фундаменту споруди зменшується;
- 2) деформації від дії навантаження на межах області прямують до нуля.

Класична розрахункова схема системи "споруда – основа", яка враховує виконання вказаних умов наведена на рис. 1.

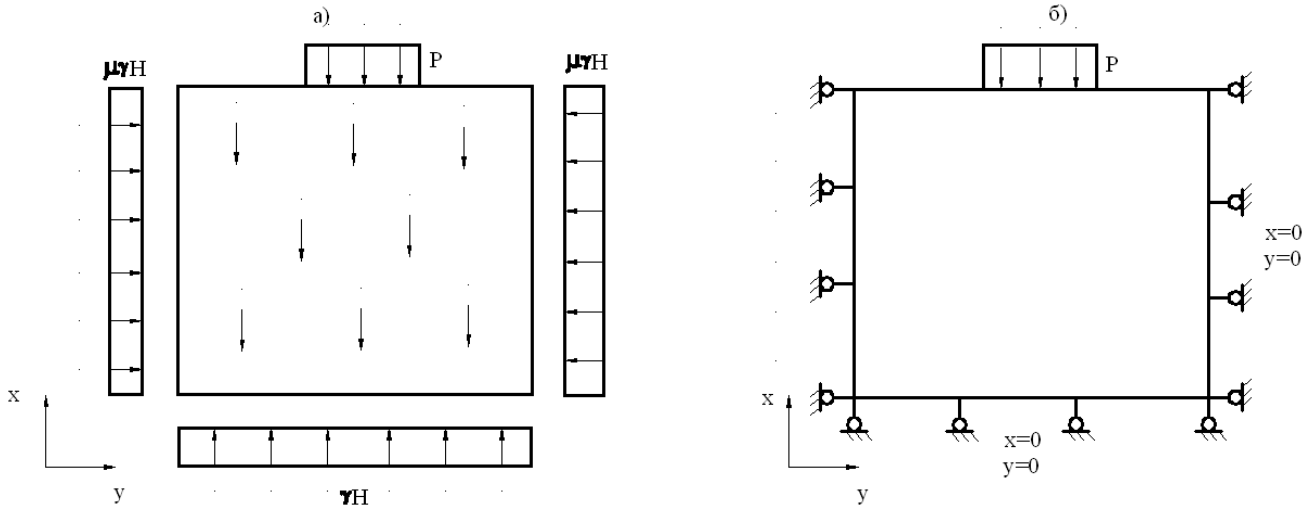


Рисунок 1 - Розрахункові схеми системи "споруда – основа": а) із граничними умовами за навантаженнями; б) із граничними умовами за горизонтальними та вертикальними переміщеннями

Класична розрахункова схема граничних умов системи «насип – споруда» (з обмеженням переміщень по осі x (із боків) та по осі y (з низу обраної області) при розрахунку ґрунтового напівпростору при використанні МСЕ наведено на рис. 2.

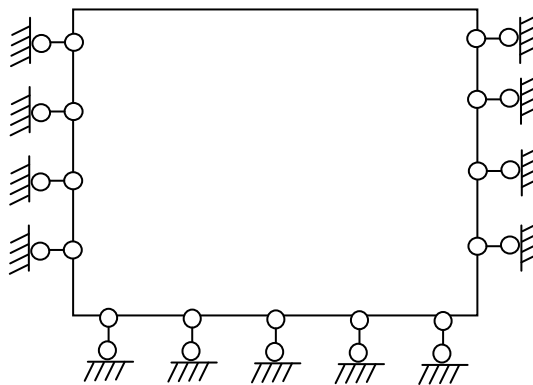


Рисунок 2 - Розрахункова схема граничних умов обраної області системи «насип – споруда»

Розрахункова модель конструкції МСЕ складається з двох частин: розрахункової схеми і набору апроксимуючих функцій. За розрахункову схему можна вважати графічне або зорове представлення конструкції, складене з набору скінченних елементів (СЕ), зв'язків між ними, і граничних умов закріплення.

Тип СЕ визначається:

- його геометричною формою;
- набором вузлів, якими можуть бути точки, як ті що розташовані у вершинах геометричних фігур, так і на їх сторонах, ребрах, поверхнях;
- правилами, що визначають залежність між переміщеннями вузлів СЕ і вузлами системи, – вузли елемента можуть бути прикріплені до вузлів системи жорстко (повний збіг всіх переміщень) або з використанням шарнірів і т.п.;

- фізичним законом, що визначає залежність між внутрішніми зусиллями і внутрішніми переміщеннями, і набором параметрів (жорсткостей), що входять в опис цього закону;
- вибором системи внутрішніх переміщень (деформацій) і відповідних їм внутрішніх зусиль (напружень), що характеризують напружено-деформований стан елемента;
- вибором апроксимуючих (базисних, координатних) функцій, за допомогою яких переміщення довільної точки СЕ однозначно визначаються через переміщення його вузлів;
- набором допустимих навантажень і дій, які можуть бути прикладені безпосередньо до СЕ, і способами їх задавання;
- наявністю або відсутністю правил подрібнення елемента на дрібніші частки при деталізації опису його напружено-деформованого стану або при уточненні місць додатка навантажень і дій;
- іншими, більш специфічними умовами (можливістю використання тільки в системах певного типу, обмеженнями на орієнтацію по відношенню до системи координат та ін.).

У методі переміщень елементи системи вважаються приєднаними до вузлів розрахункової схеми. Вузол представляється у вигляді об'єкту, що володіє шістьма ступенями свободи – трьома лінійними зміщеннями і трьома кутами повороту. З вузлами можуть бути зв'язані й інші параметри, що визначають деформоване положення системи (додаткові ступені свободи).

Виходячи з принципу віртуальної роботи, для кожного СЕ має бути призначене можливе поле переміщень, що описується апроксимуючими поліномами-функціями форми. Напружений стан кожного СЕ є похідним від функції форми.

Напружений і деформований стан розрахункової моделі розглядається як лінійна комбінація станів окремих елементів системи, що задовільняє умовам спільності деформації і рівноваги.

Наведений алгоритм розрахунку системи «навантаження – насип – труба – основа» має один вагомий недолік – він дуже складний, що змушує використовувати спеціальне програмне забезпечення. Найбільш перспективними на наш погляд є програмні продукти SCAD та Plaxis, в яких приступаючи до розрахунку конкретної конструкції, слід представити конструктивне рішення у вигляді розрахункової схеми, закодувати відповідно всю інформацію про розрахункову модель і отримати ряд числових масивів, кожен з яких має певний смисловий зміст:

1. загальний опис системи і задачі в цілому;
2. структура системи;
3. геометрія системи;
4. граничні умови;
5. характеристики матеріалів;
6. дані про навантаження;
7. дані для обробки результатів.

За вимогами діючих нормативних документів, розрахунок основи і фундаменту інженерних споруд (в тому числі і водопропускних труб) може виконуватися за двома групами граничного стану:

- перша група – за несучою здатністю основ, міцністю і стійкістю конструкцій фундаментів;
- друга група – за деформаціями основ і фундаментів (осідання, крен, просідання, підробка, горизонтальне переміщення).

На практиці найбільше застосування знайшов розрахунок за першою групою граничного стану споруди, але на нашу думку в регіонах схильних до рухливості земної поверхні (основи споруди) слід обов'язково розраховувати споруди за другою групою граничного стану.

У зв'язку з тим, що земляне полотно випробує деякі деформації згідно із рухливістю основи, то при конструюванні водопропускної труби слід врахувати нав'язуванні зміщення опорних вузлів. Необхідно обов'язково відзначити, що задаватися можуть лише ті переміщення вузла, які у відсутність деформації дорівнюють нулю (нерухомі), тобто цей тип навантаження визначається переміщеннями зв'язків.

Для розрахунку на задані зміщення зв'язків в МСЕ (реалізовано в програмному комплексі SCAD) передбачено використання нуль-елементів. Він є комбінацією послідовно сполучених один з одним пружин додатної жорсткості C і від'ємної жорсткості $-C$. Оскільки для послідовно сполучених елементів податливості $1/C$ і $1/(-C)$ підсумовуються, то отриманий елемент сумарної нульової податливості по відношенню до взаємного зсуву його крайніх вузлів є абсолютно жорстким зв'язком. Якщо в якості зовнішньої дії на систему необхідно прикласти примусове переміщення пари зовнішніх вузлів на величину Δ , то достатньо прикласти до внутрішнього вузла нуль-елемента силу $P = C\Delta$ і зрівноважити її в іншому вузлі. Отже, розрахунок на задане переміщення еквівалентний розрахунку на силу P , прикладену у вузлі, за напрямком, співпадаючим з напрямком переміщення.

Очікуване значення вертикального або горизонтального переміщення (зрушення) ґрунтової основи в регіонах розробки вугілля підземним способом визначається згідно із діючими нормативними документами [8]. Запропонована методика дозволяє розрахувати значення переміщень як в центрі поверхні деформації

земної поверхні (максимальне значення) так і в будь якій точці, яка розташована не обов'язково на головних вісях поверхні деформації (зрушення). Також є можливість отримання напрямку можливого переміщення (зрушення), що також має велике значення при розробці розрахункової схеми.

Більш того, необхідно в розрахунках враховувати коефіцієнт розпушення ґрунтових порід в наслідок зрушення ґрунтової товщі.

Аналіз публікацій результатів досліджень [1, 2, 7], виконаних фахівцями, дозволяє припустити, що аналогічні процеси відбуваються і в інших регіонах, різниці тільки в значенні переміщень та в функції, яка описує характер протікання деформації. Тобто це актуально не тільки для Донбасу.

Врахування форми і значень переміщення основи внаслідок зрушення покрівлі ґрунтових порід над гірничими виробками дозволить не тільки більш реально врахувати умови роботи споруди, а і частково компенсувати негативний вплив за рахунок конструктивних особливостей водопропускної труби (підібрати оптимальну довжину ланки труби, визначитися із способом об'єднання ланок труби, підібрати оптимальну довжину блоків фундаменту, розробити раціональну схему розміщення ланок труби відносно блоків фундаменту тощо). Принципова розрахункова схема наведена на рис. 3

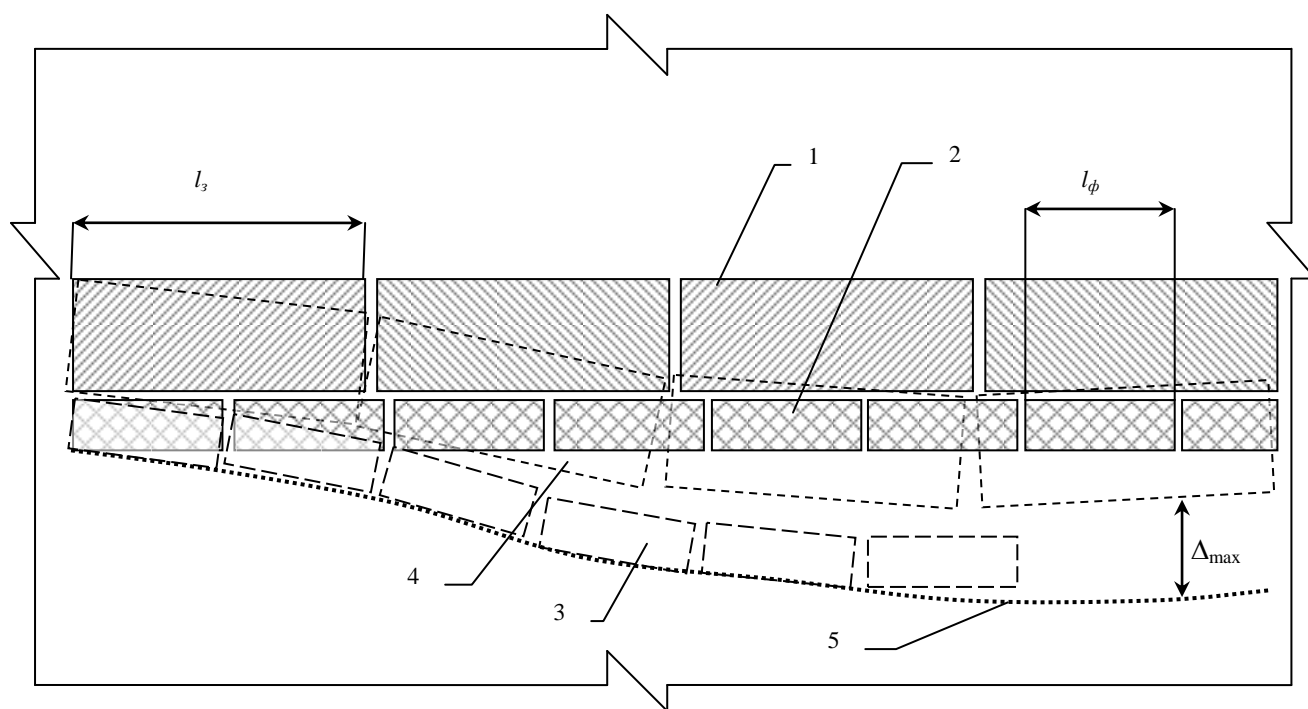


Рисунок 3 – Розрахункова схема деформації водопропускної труби внаслідок переміщення (зрушення) основи: 1 – проектне положення ланки труби; 2 – проектне положення блоку фундаменту; 3 – положення блоку фундаменту після переміщення; 4 – положення ланки труби після переміщення; 5 – очікувана лінія опису переміщення основи; l_z – довжина ланки труби; l_ϕ – довжина блоку фундаменту; Δ_{max} – максимальне значення вертикального переміщення на ділянці.

Більш того, досвід експлуатації штучних споруд в тілі насипу (в тому числі і водопропускних труб) показує, що між конструкцією споруди і основою можливе утворення місцевих зазорів, величина і область поширення яких неоднорідна в різних зонах під плитою. Порушення контакту плити з основою відбувається в результаті багатократної дії на конструкцію зовнішнього навантаження (зміни зовнішніх температурних умов, порушення водного режиму основи, техногенна деформація земної поверхні, багатократне прикладання навантаження від транспортних засобів, слабка основа тощо).

При багатократній дії зовнішніх навантажень відбувається накопичення залишкових просадок ґрунту основи конструкції споруди. При цьому фундамент (або ланки труби при безфундаментній конструкції) в окремих місцях перестає опиратися на ґрунтову основу і починає працювати як консольна або однопрогінна балка. Навантаження консолі викликає збільшення згинаючих моментів у порівнянні з моментами при щільному контакті (щільної обійми). В результаті несуча здатність конструкції знижується, а її прогини збільшуються.

При експлуатації водопропускної труби є значна ймовірність потрапляння води в її основу (крім того, що вертикальне зрушення основи обумовлює зміну просторового положення ланок труби по відношенню до проектного, в наслідок чого пошкоджується гідроізоляція). В результаті руху води

відбуваються розмивання і винесення матеріалу основи і, як наслідок, утворення порожнеч під фундаментом. Таке погіршення схеми роботи плит призводить до їх перенапруження. Таким чином, оскільки між фундаментом і основою може бути відсутній контакт, то на розрахунковій схемі в заданій області зазору слід приймати нульові коефіцієнти постелі основи. Тобто врахування неповноти опору поверхні конструкції труби на зрушену основу підвищить адекватність розрахунку.

Висновок. Використання МСЕ при розрахунках системи «навантаження – насип – труба – основа» дозволяє більш реально враховувати регіональні особливості при проектуванні, будівництві та експлуатації малих штучних споруд з метою підвищення їх надійності та довговічності. На стадії проектування водопропускної труби є можливість варіантного вибору найбільш вірогідного результату розрахунку за необхідними критеріями.

Література

1. Протяжність і характеристика автомобільних доріг загального користування. – К.: Укравтодор, 2009. – 11 с.
2. Правила осмотра и оценка технического состояния водопропускных труб на автомобильных дорогах: сто 01-2011. – Красноярск: КГБУ «Управление автомобильных дорог по Красноярскому краю», 2011. -18с.
3. Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування ДБН В.2.3-22:2009. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 52 с.
4. Методические указания по расчету оснований водопропускных труб по деформациям. – М.: ЦНИИС Минтрансстроя СССР, 1974. – 15 с.
5. Клепиков С.Н. Расчет сооружений на деформируемом основании / Клепиков С.Н. – К.: НИИСК, 1996. – 202 с.
6. 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.
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. Правила підробки будівель, споруд та природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом: ГСТУ 101.00159226.001-2003. – Чинний від 2003–11–22. К. : Мінпаливенерго України, 2003. – 126 с.– табл. – (Національні стандарти України). – Текст: ріс., укр.