

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

УДК 625.12.033.37-047.58

В. Д. ПЕТРЕНКО¹, Д. О. ЯМПОЛЬСЬКИЙ¹, І. О. СВЯТКО^{1*}

^{1*}Каф. «Тунелі, основи та фундаменти», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 373 15 79, ел. пошта i-svjatko@yandex.ua

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РОЗРАХУНКОВИХ МОДЕЛЕЙ ЗАЛІЗНИЧНОГО ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Мета. Під час розрахунків взаємодії ґрунту земляного полотна з верхньою будовою колії постає актуальне завдання визначення параметрів опору зрушенню й параметрів, що визначають розвиток глибоких деформацій у ґрунтах основи. Необхідно виконати пошук узагальнених методів числового моделювання роботи ґрунту основи земляного насипу, що містять аналіз не тільки напруженого стану ґрунту основи, а й деформованого. **Методика.** Виконано аналіз існуючих сучасних та класичних способів числового моделювання роботи зразків ґрунту під дією статичного навантаження. **Результати.** Згідно з традиційними методиками аналізу роботи ґрунтових масивів, обмеження та якісне визначення деформацій земляного полотна можливо лише побічно, через визначення напружень та порівняння отриманих значень із граничними. **Наукова новизна.** Запропоновано створення нової розрахункової моделі, у якій крім класичного підходу до аналізу напруженого стану ґрунту земляного полотна також буде враховуватись і деформований стан. **Практична значимість.** Дослідження показали, що для точного аналізу роботи ґрунтових масивів виникає гостра необхідність у розробці узагальненої методики аналізу сумісної роботи рухомого складу із земляним полотном залізниць, яка може використовуватись при модернізації земляного полотна під швидкісний рух.

Ключові слова: земляне полотно; методи числового моделювання; механічні властивості ґрунтів; моделі ґрунтових основ; деформації

Вступ

Знання механічних властивостей ґрунтів є однаково важливим як для проектування земляного полотна, так і для розрахунків взаємодії рухомого складу з насипом. Зрозуміло, що механічні властивості будь-якого ґрунту в різних умовах роботи повинні істотно відрізнятися.

Під час розрахунків взаємодії ґрунту, наприклад, земляного полотна з верхньою будовою колії актуальним є завдання визначення параметрів опору зрушенню й параметрів, що визначають розвиток глибоких деформацій у ґрунтах основи.

Слід зауважити, що розробка розрахункових моделей ґрунтових основ з урахуванням реаль-

них механічних властивостей ґрунтів та фізичної природи деформацій відбувається повільніше, ніж розробка методів розрахунку конструкцій на ґрунтовій основі. Основна увага в останні 20 років була приділена розвитку теорії плит і балок на суцільній основі. Але незважаючи на розвиток електронних методів обчислення, фізичні основи залишилися незмінними.

Мета

Пошук узагальнених методів числового моделювання роботи ґрунту основи земляного насипу, що містять аналіз не тільки напруженого стану ґрунту основи, а й деформованого.

Методика

Відомо, що складність структури дисперсних ґрунтів і зміни цієї структури в процесі навантаження не дають можливості відобразити в розрахунках усі числові фізичні властивості ґрунтів. Розрахунки взаємодії ґрунтів основи земляного полотна з рухомим складом ведуться на основі механічних розрахункових моделей ґрунту та емпіричних припущень.

Процеси деформації ґрунту проф. Н. Я. Денисов розподіляє на чотири категорії [3]:

- пружні деформації мінеральних зерен;
- структурні деформації, пов'язані зі зміною взаємного розташування зерен і об'єму деформованого ґрунту;
- структурно-адсорбційні деформації, що виникають у результаті зміни товщини водних плівок у контактах між мінеральними зернами;
- псевдопластичні деформації в текучих глинистих ґрунтах, які відбуваються без зміни об'єму й пов'язані з переміщенням частинок і агрегатів, але не з пластичними деформаціями самих зерен.

Н. А. Цитович [12] ділить деформації ґрунтів на пружні та залишкові. Замість терміна «пружні» було б правильніше користуватися терміном «відновлювальні» і відносити до них пружні деформації зерен і структурно-адсорбційні, а також деформації, пов'язані з пружним стиском та розширенням повітря, затисненого в порах. До залишкових деформацій Н. А. Цитович відносить структурні та псевдопластичні деформації.

Численні досліди й спостереження показали, що ґрунтовим основам властиві деформації загального характеру (за термінологією Н. А. Цитовича), що поширюються за межі навантаженої площі, і деформації місцеві, що розвиваються тільки під навантаженням. Зв'язок деформацій з напруженнями може бути лінійним та нелінійним. Звісно, між механічними параметрами ґрунтів у області малих деформацій і параметрами, що визначають його міцність при великих деформаціях, існують деякі кореляційні залежності.

Відомі розрахункові моделі основ тією чи іншою мірою відображають усі ці властивості, проте більшість з них розглядають лише пружні деформації, що відновлюються з часом, або не відділяють їх від залишкових, а також вважають залежність між напруженнями й дефор-

маціями лінійною, незважаючи на те, що вона майже не властива природним ґрунтам.

При проектуванні штучних споруд у нормальних умовах псевдопластичні деформації випирання ґрунту виключаються й доводиться мати справу з пружними і структурно-адсорбційними, а також із залишковими структурними деформаціями ущільнення.

Результати

Для наочного відображення основних розрахункових характеристик кожної з наведених моделей ґрунтових основ розглянемо їх поведінку при вдавлюванні круглого жорсткого штампа, встановленого на горизонтальній поверхні моделі. Процес вдавлювання штампа широко використовується під час польових досліджень ґрунтів, і результати вдавлювання служать основою для вибору розрахункової моделі та обчислення її параметрів.

Основні розрахункові деформативні характеристики ґрунту під штампом та навколо штампа під час застосування різних моделей ґрунту зведено до табл. 1 та 2 відповідно.

Найбільш проста модель – модель Вінклера, яка набула широкого застосування в розрахунках балок на ґрунтовій основі й полягає в тому, що осадка штампа пропорційна навантаженню. Деформації моделі досить пружні й після зняття навантаження зникають. Вони мають місцевий характер, тобто розвиваються безпосередньо під штампом, не поширюючись в сторони. Єдиним механічним параметром служить коефіцієнт постелі.

Згідно з «Правилами розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість» [10], під час виконання практичних інженерних розрахунків верхньої будови колії на міцність рейка розглядається як балка нескінченної довжини незмінного перерізу, що вільно лежить на суцільній рівнопружній основі або на окремих точених рівнопружних опорах (застосовується саме модель Вінклера). Можливість наявності залишкових деформацій у баласті та земляному полотні, що розвиваються під рухомим навантаженням, враховують лише побічно, через визначення напружень. Розрахунок напружень у баласті ведеться на основі розв'язання плоскої задачі теорії пружності для навантаження однорідного ізотропного півпростору статичним прямокутним або трикутним смуговим розподіленим навантаженням.

Таблиця 1

Основні розрахункові деформативні характеристики ґрунту під штампом під час застосування розглянутих моделей ґрунтових основ

Розрахункова модель ґрунтової основи	Осадка поверхні під штампом D при дії тиску p	
	Пружна S , см	Залишкова S_0 , см
Модель Вінклера	$S = \frac{p}{C}$	0
Модель Фусса	0	$S_0 = \frac{p}{C}$
Модель пружного півпростору	$S = \frac{\pi D (1-\mu^2)}{4 E} p$	0
Модель лінійно-деформівного півпростору		$S_0 = \frac{\pi D}{4} \left(\frac{(1-\mu_0^2)}{E_0} - \frac{(1-\mu^2)}{E} \right) p$
Модель Пастернака	$S = \frac{Dp}{DC_1 + 4\sqrt{C_1 C_2} + 8\frac{C_2}{D}}$	0
Модель Синіцина	$S = \frac{\pi D (1-\mu^2)}{4 E} p$	$S_0 = \frac{p}{C}$
Модель Черкасова–Клейна		$S_0 = D \sqrt[3]{\frac{p}{A}}$

Таблиця 2

Основні розрахункові деформативні характеристики ґрунту навколо штампа під час застосування розглянутих моделей ґрунтових основ

Розрахункова модель ґрунтової основи	Осадка поверхні навколо штампа D при дії тиску p	
	Пружна S' , см	Залишкова S'_0 , см
Модель Вінклера	0	0
Модель Фусса	0	0
Модель пружного півпростору	$S' = \frac{D (1-\mu^2)}{2 E} p \arcsin \frac{D}{2r}$	0
Модель лінійно-деформівного півпростору		$S'_0 = \frac{D}{2} \left(\frac{(1-\mu_0^2)}{E_0} - \frac{(1-\mu^2)}{E} \right) p \arcsin \frac{D}{2r}$
Модель Пастернака	$S' = \frac{Dp}{DC_1 + 4\sqrt{C_1 C_2} + 8\frac{C_2}{D}} e^{-\frac{\sqrt{C_1} r}{C_2}}$	0
Модель Синіцина	$S' = \frac{D (1-\mu^2)}{2 E} p \arcsin \frac{D}{2r}$	0
Модель Черкасова–Клейна		0

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Згідно з цією методикою обмеження та якісне визначення деформацій земляного полотна можливо лише побічно, через визначення напружень та порівняння отриманих значень із граничними. Але не слід забувати, що можуть також виникати залишкові деформації ґрунту земляного полотна при напруженнях, нижчих за нормативні максимально допустимі значення. Це може бути зумовлене низьким модулем деформацій ґрунту земляного полотна.

У наведених таблицях прийнято такі позначення: C – коефіцієнт постелі, кгс/см³; E – модуль пружності, кгс/см²; μ – коефіцієнт Пуассона; r – відстань від центру штамп до точки визначення осадок поза штампом, см; E_0 – модуль загальної деформації, кгс/см²; μ_0 – коефіцієнт поперечної деформації; H – товщина шару, см; C_1 – коефіцієнт стиснення, кгс/см³; C_2 – коефіцієнт зсуву, кгс/см; A – число твердості, кгс/см²; n – ступінь зміцнення.

На відміну від моделі Вінклера, деформації в моделі Фусса місцеві та цілком залишкові і після розвантаження зберігаються. Через відсутність урахування пружних деформацій ця модель ґрунтової основи мало придатна для застосування в розрахунках взаємодії насипу з рухомих складом.

Особливість моделі, що була запропонована П. Л. Пастернаком [8], – швидке затухання деформацій поверхні в міру віддалення від штамп. Модель передбачається цілком пружною.

Більш складна модель – модель пружного однорідного півпростору. Тут також деформації прямо пропорційні навантаженням на штамп, але, на відміну від моделей Фусса і Вінклера, вони мають загальний характер, тобто розвиваються не тільки під штампом, але й поширюються далеко за його межі. Природа цих деформацій пружна і після зняття навантаження зі штамп вони зникають.

Методи моделювання за П. Л. Пастернаком та за теорією пружного однорідного півпростору можуть бути застосовані для дослідження деформації земляного полотна на його бровці, тобто поза межами дії навантаження, що передається від рухомого складу.

Модель, запропонована А. П. Синіциним [4], є комбінацією моделі Фусса і пружного однорідного півпростору. Вона складається зі сти-

снутого шару кінцевої потужності на поверхні, який здатний тільки на залишкові деформації місцевого характеру; нижче цього шару лежить пружний однорідний півпростір. Модель Синіцина дозволяє змоделювати цілу низку випадків складної будови ґрунтових основ, що трапляються на практиці.

Універсальна модель ґрунтової основи була вперше запропонована П. І. Черкасовим та Г. К. Клейном [13]. Під час розробки своєї універсальної моделі ґрунтової основи вчені прагнули врахувати такі особливості деформацій реальних ґрунтових основ:

– залишкові деформації ґрунту мають в основному місцевий характер і нелінійно пов'язані з напруженнями;

– відновлювальні деформації мають загальний характер, і зв'язок їх з напруженнями наближається до лінійного.

Модель ґрунтової основи як лінійно-деформівного однорідного півпростору відрізняється від пружного здатністю до одночасного розвитку пружних та залишкових деформацій. Зв'язок між деформаціями і навантаженням на штамп лінійний, але після розвантаження штамп деформації зникають не повністю – частково вони зберігаються як під самим штампом, так і за його межами.

Цей метод моделювання ґрунту земляного полотна доцільно застосовувати в розрахунках як загальний, що може враховувати найбільшу кількість якісних нюансів деформованого стану ґрунту насипу земляного полотна.

Наукова новизна та практична значимість

Загальна умова застосування всіх розглянутих розрахункових моделей – робота ґрунту в області малих деформацій, тобто далеко від початку руйнування ґрунтової основи. Але накопичування залишкових деформацій під регулярною дією динамічного навантаження від рухомого складу призводить до виникнення певної групи дефектів земляного полотна або зниження його несучої здатності.

У той же час, метод розрахунку елементів земляного полотна, що застосовується під час проектування залізничних колій, відповідно до ЦП 0117, не дозволяє повністю оцінити вплив рухомого складу на ґрунт земляного по-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

лотна, оскільки мірою впливу в цьому випадку мають бути саме значення деформацій, а не напружень у товщі баласту чи земляного полотна.

Висновки

Виходячи з вищезазначеного, за умови зростання швидкості рухомого складу та інтенсивності руху на залізницях України, виконані дослідження дозволяють розробити узагальнену методику аналізу сумісної роботи рухомого складу із земляним полотном залізниць, у якій крім класичного підходу до аналізу напруженого стану ґрунту земляного полотна буде враховуватись і деформований стан. Така методика дозволила б запобігати виникненню дефектів земляного полотна під час проектування та будівництва нових залізничних колій, а також прогнозувати виникнення дефектів земляного полотна на коліях, що підлягають реконструкції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Банах, В. А. Моделирование работы строительных конструкций эксплуатируемых зданий при передаче динамических воздействий через грунтовый массив / В. А. Банах // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 39. – С. 18–22.
2. Голли, А. В. Мониторинг напряженно-деформированного состояния грунтов в основании сооружений / А. В. Голли // Реконструкция городов и геотехническое стр-во. – 2003. – № 5. – С. 128–132.
3. Денисов, Н. Я. О природе деформации глинистых грунтов / Н. Я. Денисов. – М. : Речиздат, 1951. – 200 с.
4. Жемочкин, Б. Н. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании / Б. Н. Жемочкин, А. П. Сеницын. – М. : Госстройиздат, 1962. – 240 с.
5. Зоценко, М. Л. Расчет деформаций зданий и сооружений / М. Л. Зоценко. – Запорожье : ООО «ИПО Запорожье», 2008. – 496 с.
6. Зоценко, М. Л. Инженерная геология. Механика грунтов, основы та фундаменти : підручник / М. Л. Зоценко, В. І. Коваленко, А. В. Яковлев. – Полтава : ПНТУ, 2004. – 568 с.
7. Малышев, М. В. Механика грунтов. Основания и фундаменты / М. В. Малышев, Г. Г. Болдырев. – М. : Изд-во ассоциации строит. вузов, 2004. – 328 с.
8. Пастернак, П. Л. Основы нового метода расчета фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели / П. Л. Пастернак. – М. : Стройиздат, 1954. – 56 с.
9. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – К. : Сталь, 2002. – 600 с.
10. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість : ЦП-0117 : затв. : Наказом Укрзалізниці від 13.12.2004 р. № 960-ЦЗ. – К. : ЦП УЗ, 2004. – 69 с.
11. Тютькин, А. Л. Сравнительный анализ конечно-элементных моделей свайного фундамента при взаимодействии с основанием / А. Л. Тютькин, А. В. Гулак // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 32. – С. 122–126.
12. Цитович, Н. А. Механика грунтов / Н. А. Цитович. – М. : Стройиздат, 1951. – 528 с.
13. Черкасов, И. И. Механические свойства грунтовых оснований / И. И. Черкасов. – М. : Авто-транссиздат, 1958. – 156 с.
14. Elliott, Robert P. Permanent Deformation of Subgrade Soils / Robert P. Elliott, Norman D. Dennis, Yanjun Qiu. – Fayetteville : Mack-Blackwell Transportation Center, 1998. – 216 p.
15. Monismith, C. L. Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils due to Repeated Loading / C. L. Monismith, N. Ogawa, C. R. Freeme // Transportation Research Record. – 2006. – Vol. 1975. – P. 1–17.
16. Simi, H. Building Simulation Tools for Retrofitting Residential Structures / H. Simi, Amherst // Energy Engineering. – 2012. – Vol. 109. – Issue 3. – P. 53–74.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

В. Д. ПЕТРЕНКО¹, Д. А. ЯМПОЛЬСКИЙ¹, И. А. СВЯТКО^{1*}

^{1*} Каф. «Тоннели, основания и фундаменты», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 373 15 79, эл. почта i-svjatko@yandex.ua

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Цель. При расчетах взаимодействия грунта земляного полотна с верхним строением пути встает актуальная задача определения параметров сопротивления сдвигу и параметров, определяющих развитие глубоких деформаций в грунтах основания. Необходимо выполнить поиск обобщенных методов численного моделирования работы грунта основания земляной насыпи, которые включают в себя анализ не только напряженного состояния грунта основания, а и деформированного. **Методика.** Проведен анализ существующих современных и классических способов численного моделирования работы образцов грунта под действием статической нагрузки. **Результаты.** Согласно традиционных методик анализа работы грунтовых массивов, ограничение и качественное определение деформаций земляного полотна возможны только косвенно, через определение напряжений и сравнение полученных значений с предельными. **Научная новизна.** Предложено создание новой расчетной модели, в которой кроме классического подхода к анализу напряженного состояния грунта земляного полотна будет учитываться и деформированное состояние. **Практическая значимость.** Исследования показали, что для точного анализа работы грунтовых массивов возникает острая необходимость в разработке обобщенной методики анализа совместной работы подвижного состава с земляным полотном железной дороги, которая может использоваться при модернизации земляного полотна под скоростное движение.

Ключевые слова: земляное полотно; методы численного моделирования; механические свойства грунтов; модели грунтовых оснований; деформации

V. D. PETRENKO¹, D. O. YAMPOLSKIY¹, I. O. SVIATKO^{1*}

^{1*}Dep. «Tunnels, bases and foundations», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. + 38 (056) 373 15 79, e-mail i-svjatko@yandex.ua

COMPARATIVE ANALYSIS OF CALCULATION MODELS OF RAILWAY SUBGRADE

Purpose. In transport engineering structures design, the primary task is to determine the parameters of foundation soil and nuances of its work under loads. It is very important to determine the parameters of shear resistance and the parameters, determining the development of deep deformations in foundation soils, while calculating the soil subgrade - upper track structure interaction. Search for generalized numerical modeling methods of embankment foundation soil work that include not only the analysis of the foundation stress state but also of its deformed one. **Methodology.** The analysis of existing modern and classical methods of numerical simulation of soil samples under static load was made. **Findings.** According to traditional methods of analysis of ground masses work, limitation and the qualitative estimation of subgrade deformations is possible only indirectly, through the estimation of stress and comparison of received values with the boundary ones. **Originality.** A new computational model was proposed in which it will be applied not only classical approach analysis of the soil subgrade stress state, but deformed state will be also taken into account. **Practical value.** The analysis showed that for accurate analysis of ground masses work it is necessary to develop a generalized methodology for analyzing of the rolling stock - railway subgrade interaction, which will use not only the classical approach of analyzing the soil subgrade stress state, but also take into account its deformed one.

Keywords: subgrade; numerical modeling methods; mechanical properties of soil; foundation models; deformation

REFERENCES

1. Banakh V.A. Modelirovaniye raboty stroitelnykh konstruktsiy ekspluatiruyemykh zdaniy pri peredache dinamicheskikh vozdeystviy cherez gruntovyy masiv [Structural behavior modeling of the operated constructions during dynamic impacts transfer through the soil]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 39, pp. 18-22.
2. Golli A.V. Monitoring napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gruntov v osnovanii sooruzheniy [Monitoring of the stress-strain state of soils in the structure bases]. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoye stroitelstvo – Urban renewal and geotechnical construction*, 2003, no. 5, pp. 128-132.
3. Denisov N.Ya. *O prirode deformatsii glinistykh gruntov* [On the nature of the clay soils distortions]. Moscow, Izd. Min. Rech. Flota Publ., 1951. 200 p.
4. Zhemochkin B.N., Sinityn A.P. *Prakticheskiye metody rascheta fundamentnykh balok i plit na uprugom osnovanii* [Practical methods for calculating of the foundation beams and plates on the elastic foundation]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1962. 240 p.
5. Zotsenko M.L. *Raschet deformatsiy zdaniy i sooruzheniy* [Calculation of deformations of buildings and structures]. Zaporozhye, OOO “IPO Zaporozhye” Publ., 2008. 496 p.
6. Zotsenko M.L., Kovalenko V.I., Yakovlev A.V. *Inzhenerna heolohiia. Mekhanika gruntiv, osnovy ta fundamenty* [Engineering geology. Soil mechanics, bases and foundations]. Poltava, PNTU Publ., 2004. 568 p.
7. Malyshev M.V., Boldyrev G.G. *Mekhanika gruntov. Osnovaniya i fundamenty* [Soil mechanics. Bases and foundations]. Moscow, Izd-vo assotsiatsii stroitelnykh vuzov Publ., 2004. 328 p.
8. Pasternak P.L. *Osnovy novogo metoda rascheta fundamentov na uprugom osnovanii pri pomoshchi dvukh koeffitsientov posteli* [Foundations of the new calculation method of basis on an elastic foundation by means of two coefficients of subgrade resistance]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1954. 56 p.
9. Perelmuter A.V., Slivker V.I. *Raschetnyye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza* [Simulation model of constructions and possibility of their analysis]. Kyiv, Stal Publ., 2002. 600 p.
10. *Pravyly rozrakhunkiv zaliznychnoi kolii na mitsnist i stiikist* [Rules of railway track calculating for strength and durability]. Kyiv, TsP UZ Publ., 2004. 69 p.
11. Tyutkin A.L., Gulak A.V. Sravnitelnyy analiz konechno-elementnykh modeley svaynogo fundamenta pri vzaimodeystvii s osnovaniyem [Comparative analysis of finite element models of the pile foundation during interaction with the foundation]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 32, pp. 122-126.
12. Tsitovich N.A. *Mekhanika gruntov* [Soil mechanics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1951. 528 p.
13. Cherkasov I.I. *Mekhanicheskiye svoystva gruntovykh osnovaniy* [Mechanical properties of subgrades]. Moscow, Avtotransizdat Publ., 1958. 156 p.
14. Robert P. Elliott, Norman D. Dennis, Yanjun Qiu. Permanent Deformation of Subgrade Soils. Fayetteville, Mack-Blackwell Transportation Center Publ., 1998. 216 p.
15. Monismith C.L., Ogawa N., Freeme C.R. Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils due to Repeated Loading. *Transportation Research Record*, 2006, vol. 1975, pp. 1-17.
16. Simi H., Amherst. Building Simulation Tools for Retrofitting Residential Structures. *Energy Engineering*, 2012, vol. 109, issue 3, pp. 53-74.

Стаття рекомендована до публікації к.т.н. А. О. Скоковою (Україна); к.т.н., доц. І. К. Бадалахою (Україна)

Надійшла до редколегії 04.06.2013

Прийнята до друку 08.08.2013