

БУДІВНИЦТВО<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2018-140-5-7-12>

УДК 642:624.044:624.15

А. С. Моргун¹
Р. І. Малачковська¹**ОЦІНЮВАННЯ ЗА МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ
ПРОЦЕСУ НАКОПИЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ
КІЛЬЦЕВОГО ТА КРУГЛОГО ФУНДАМЕНТІВ**¹Вінницький національний технічний університет

Будівництво споруд — трудомісткий процес, який потребує виважених, чітко прорахованих кроків та розв'язання складних математичних задач. Особливо це стосується влаштування частини споруди, яка сприймає навантаження і передає їх на систему основа–фундамент. Надзвичайно важливо забезпечити стійкість і малопроектність споруди, тим самим уникнути її можливого нерівномірного просідання чи руйнування. Для цього необхідно забезпечити прогнозування і числову реалізацію розрахунків конструкцій. Тому в статті запропоновано модель рівноваги фундаменту, зануреного в ґрунт, яке задовольняє диференціальне рівняння Лапласа. Основним розрахунковим рівнянням моделі роботи ґрунту є інтегральне рівняння, отримане К. Бреббія.

Можливість достовірного прогнозування поведінки фундаменту та деформування ґрунту в широкому діапазоні навантажень дає запропонована математична модель. Процес прогнозування виконується шляхом дискретизації граничної поверхні фундаменту та активної зони ґрунту за методом граничних елементів. Нелінійну задачу процесу деформування основ розв'язано за допомогою покрового методу О. А. Люшина. Робота ґрунту моделювалась теорією В. М. Ніколаєвського та І. П. Бойка. Визначено повні деформації, які складаються з приростів пружних та пластичних деформацій. Компонівка розрахункової матриці впливу МГЕ виконувалась на основі рішень Р. Міндліна.

Результати прогнозування за методом граничних елементів показано на графіках навантаження-осідання кільцевого та круглого фундаментів. Правильність вибору розрахункової дилатансійної моделі підтверджується відповідністю числових досліджень за методом скінченних елементів. Таким чином, в статті розглянуто результати дослідження за методом граничних елементів напружено-деформованого стану кільцевих та круглих фундаментів та порівняння результатів досліджень з розрахунком за методом скінченних елементів.

Ключові слова: числовий метод граничних елементів, метод скінченних елементів, нелінійний розрахунок основ, кільцевий фундамент, круглий фундамент.

Вступ

Відомо, що значно дешевше забезпечити малопроектність споруди, ніж витратити кошти на її відновлення від значних нерівномірних просідань. Для цього необхідне достовірне із залученням сучасних обчислювальних засобів прогнозування поведінки фундаментів під навантаженням. Задача оцінювання несучої спроможності основ фундаментів є визначальною в практичному проектуванні, оскільки показником експлуатаційної придатності об'єктів є фактична несуча спроможність підземної частини споруди.

Улаштування фундаментів — одна із самих складних задач проектування та будівництва, оскільки пов'язана з необхідністю урахування всієї гами властивостей ґрунту, що залягає на будівельному майданчику, для прийняття найраціональнішого варіанта будови фундаменту та виконання умови $S \leq S_u$ (осідання не мають перебільшувати гранично допустимі значення).

В прикладних технічних науках прогрес неможливий без переходу до математичного описання процесу. Можливість числової реалізації складних розрахунків за допомогою ЕОМ дозволяє досліднику та інженеру відповідати на низку питань міцності, деформативності, стійкості споруд, вибору оптимального конструктивного рішення. До сьогодні стоїть питання створення розрахункової моделі ґрунту, яка б враховувала всю сукупність його природних властивостей.

Метою статті є обґрунтування можливості застосування запропонованої методики визначення напружено-деформованого стану (НДС) фундаментних конструкцій за методом граничних елементів (МГЕ) для оптимізації та прийняття рішень для кільцевих та круглих фундаментів

Математична модель досліджень нелінійної поведінки ґрунту під навантаженням

Більшість деформацій ґрунтових основ (біля 95 %) залишкова. Тому пружно-пластичне деформування ґрунту описується неголономними (не інтегрованими) диференціальними залежностями. Для розв'язання поставленої задачі залучено числовий граничних елементів. МГЕ — це один із сучасних та перспективних методів моніторингу НДС основ, який дає оперативність та достовірність результатів.

В моделі, що пропонується, рівняння рівноваги фундаменту, зануреного в ґрунтове середовище, задовольняє диференціальному рівнянню Лапласа. В якості геометричних рівнянь використано тензор малих деформацій Коші. На стадії пластичного деформування вектори тензора напруг і тензора швидкостей деформацій неспіввісні.

Перехід від крайової задачі рівнянь рівноваги фундаментної конструкції в ґрунті до інтегральних рівнянь здійснюється за допомогою числового методу граничних елементів.

Основним розрахунковим рівнянням моделі роботи ґрунту, яке є аналогом системи 15 диференціальних рівнянь (статичних рівнянь, геометричних, фізичних) є інтегральне рівняння, отримане К. Бреббія [1]:

$$C_{ij}(\xi)U_i(\xi) + \int_{\Gamma} p_{ij}^*(\xi, x)U_j(x)d\Gamma(x) = \int_{\Gamma} U_{ij}^*(\xi, x)p_j(x)d\Gamma(x) + \int_{\Gamma} U_{ij}^*(\xi, x)b_i(x)d\Omega(x), \quad (1)$$

де $U_{ij}^*(\xi, x)$, $p_{ij}^*(\xi, x)$, — переміщення та напруження, що виникають в точці x в j -му напрямку від дії одиничної сили $P = 1$ в i -му напрямку і прикладеної в точці ξ ; $U_i(x)$, $p_i(x)$ — переміщення і напруження на границі тіла.

Абстрактну характеристику нелінійного процесу деформування ґрунту в роботі подано за допомогою математичної моделі. Саме вона дає можливість числового аналізу та отримання даних прогнозного характеру, та управління ними.

Математичну модель ґрунту розроблено в рамках теорії пластичної течії, яка адекватно відображає характер деформування ґрунтів в широкому діапазоні навантажень.

В роботі взята модель ґрунту з фізичним рівнянням Гука на дограничній стадії деформування та умовою текучості Мізеса–Шлейхера–Боткіна і співвідношеннями неасоційованого закону пластичної течії на післяграничній стадії деформування.

Прийнято, що площадка граничної рівноваги збігається з октаедричною.

Для розв'язання нелінійної задачі процесу деформування основ кільцевого та круглого фундаментів прийнято еволюційний алгоритм розв'язання, який базується на кроковому методі О. А. Іллюшина. На наступному кроці використовуються дані попереднього кроку. На кожному кроці навантаження в кінці ітерації визначались напруження та проводилось порівняння за критерієм пластичності, в якості якого взято критерій Мізеса–Шлейхера–Боткіна [2].

Робота ґрунту в нелінійній стадії моделювалась дилатансійною теорією В. М. Ніколаєвського, І. П. Бойка [3]. Вважали, що коефіцієнт дилатансії $\Lambda(\rho)$ залежить від щільності ґрунту ρ [3]

$$\Lambda(\rho) = \begin{cases} -\sqrt{1 - (\rho/\rho^*)^2}, & \text{якщо } \rho < \rho^*; \\ \sqrt{1 - (\rho/\rho^*)^2}, & \text{якщо } \rho > \rho^*, \end{cases} \quad (2)$$

де ρ^* — критична щільність; $\rho^* = f(\sigma_n, \sigma_{m1}, \rho_i^*, \rho^{\max}, \rho^{\min})$; σ_{m1} — структурна міцність ґрунту; ρ_i^* , ρ^{\max} , ρ^{\min} — константи ґрунту.

Приріст пластичних деформацій ґрунтової основи визначається за формулою

$$d\varepsilon_{ij}^p = \Lambda(\chi) \cdot d\gamma^p, \quad (3)$$

де $d\gamma^p$ — скалярний еквівалент приросту зсувної пластичної деформації на октаедричній площині

ні; $d\varepsilon_{ij}^p$ — приріст непружних змін об'єму, що супутні зсуву; Λ — швидкість дилатансії; χ — параметр зміцнення ґрунтового середовища; прийнято щільність ґрунту ρ , яка є своєрідною пам'яттю ґрунту. Відповідно до нелінійної дилатансійної моделі, що пропонується, повні деформації визначались за формулою

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p, \tag{4}$$

де $d\varepsilon_{ij}^e$ — приріст пружних деформацій; $d\varepsilon_{ij}^p$ — приріст пластичних деформацій.

Результати досліджень

Математична реалізація процесу прогнозування несучої спроможності фундаменту за числовим МГЕ [2] передбачає дискретизацію граничної поверхні фундаментної конструкції та активної зони ґрунту граничними елементами.

Активну зону основи кільцевого та круглого фундаментів [4], розрізи яких показано на рис. 1а, б дискретизували, відповідно, 172 та 148 трикутні дискретні елементи (рис. 2а, б).

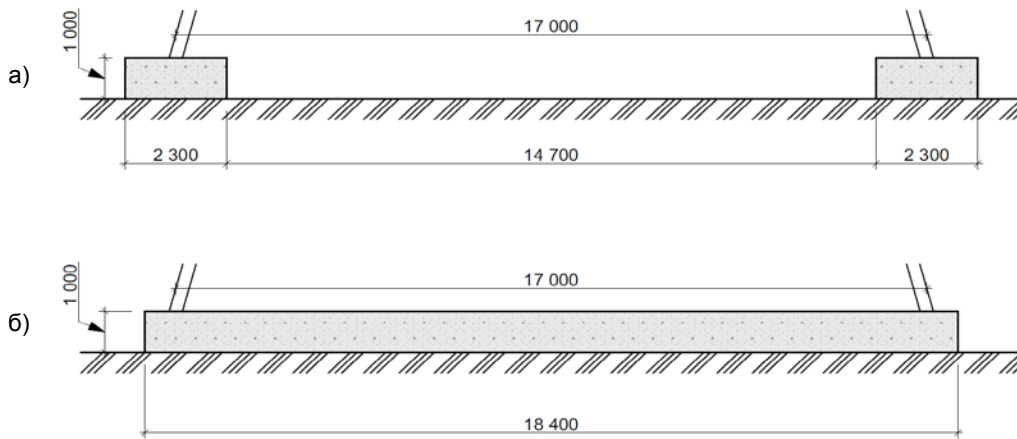


Рис. 1. Розрізи: а — кільцевого; б — круглого фундаментів

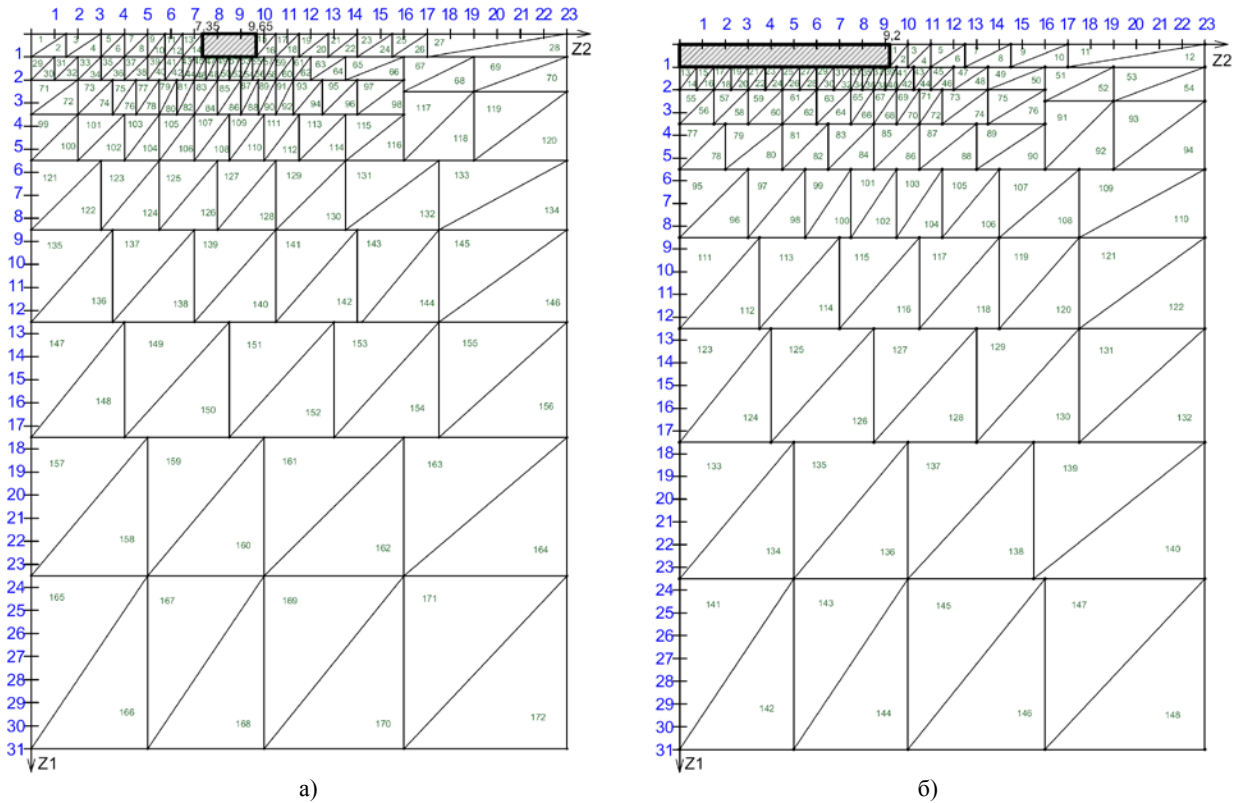


Рис. 2. Дискретизація активної зони: а — кільцевого; б — круглого фундаментів

Визначення несучої спроможності та осідань кільцевого та круглого фундаментів проводилась в такій послідовності:

- дискретизація граничної поверхні фундаменту та активної (буферної) зони граничними елементами;
- компоновка розрахункової матриці впливу МГЕ на основі рішень Р. Міндліна;
- запис розрахункової системи рівнянь;
- розв’язок отриманої системи лінійних алгебраїчних рівнянь, отримання НДС на кожному кроці навантаження;
- побудова пластичних областей;
- прийняття та обґрунтування проектного рішення про можливість прикладання додаткових навантажень.

Товща ґрунтів будівельного майданчика характеризується наявністю пісків, супісків, суглинків, глин. Значення фізико-механічних характеристик активної зони ґрунту зведено в табл.

Значення фізико-механічних характеристик ґрунтів

Вид ґрунту	Глибина, м	W, %	I_p , %	I_1 , д.од.	γ , кН/м ³	γ_s , кН/м ³	e, д.од.	S_r , д.од.	ϕ , град.	c, кПа	E, МПа
Суглинок	0...10	27	12	0,75	18,8	26,9	0,82	0,89	16	16	8,3
Суглинок	10...20	30	12	0,92	19,0	27,0	0,85	0,96	9	9	5
Супісок	20...30	22	5	1	20,5	26,7	0,59	1,0	18	10	7,5
Пісок	30...40	17	—	—	21,1	26,5	0,47	0,96	36	5	46
Суглинок	40...50	20	9	0,07	18,2	26,8	0,76	0,7	23	24	18

Результати прогнозування за МГЕ показані на рис. 3.

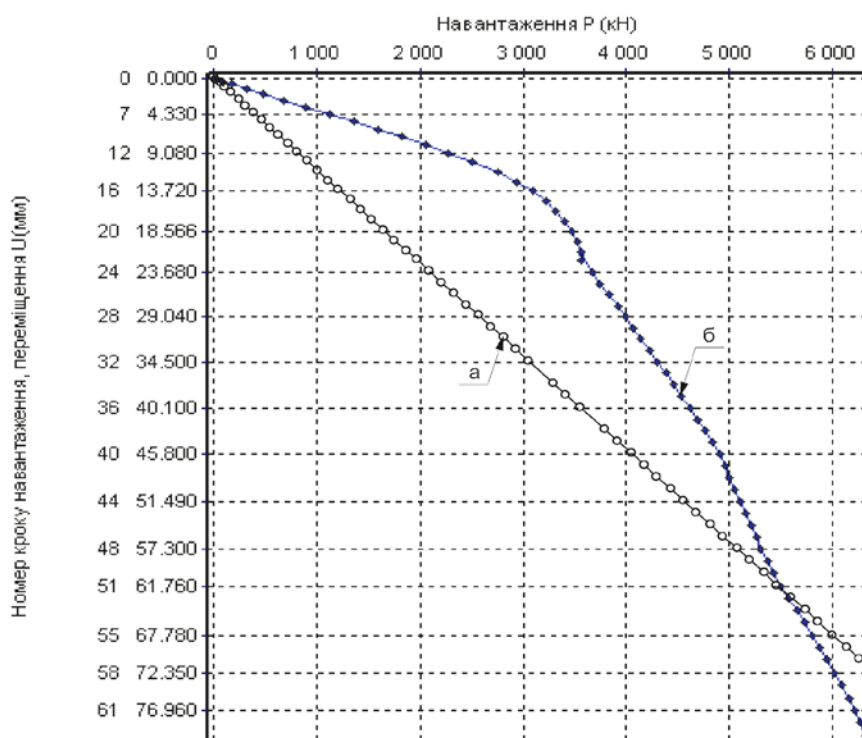


Рис. 3. Отримані за МГЕ графіки навантаження-осідання:
а — кільцевого; б — круглого фундаментів

Розрахунки кільцевого та круглого фундаментів, на які передається навантаження від споруди — 6 МН, за методом скінченних елементів (МСЕ) проведено з використанням програми Plaxis 3D 2011) [4]. Відповідність числових досліджень за МСЕ, особливо за мінімальних значень осідань (54 мм для кільцевого фундаменту та 56 мм — для круглого) — підтверджує правильність вибору розрахункової дилатансійної моделі.

Висновки

З метою прийняття економічного рішення в фундаментобудуванні необхідно залучати сучасні числові методи — метод граничних елементів та метод скінченних елементів. В роботі проведено обґрунтування можливості застосування запропонованої методики визначення НДС фундаментних конструкцій за МГЕ для оптимізації та прийняття рішень для кільцевих та круглих фундаментів.

Дані розрахунків за МГЕ та МСЕ добре корелюються. Запропонована методика дозволяє врахувати нелінійну роботу ґрунтової основи, її дискретність, достовірно виявляти потенційні можливості системи основа–фундамент ще на стадії проектування, корегуючи їх в потрібному напрямку, задовольняючи вимогам першої і другої груп граничних станів, відкриває більше можливостей для відповідності теорії та експерименту.

Метод граничних елементів дозволяє виконувати розрахунки напружено-деформованого стану ґрунтових основ за рамками розрахункового опору з використанням традиційних характеристик, які визначаються під час інженерно-геодезичних вишукувань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] К. Бреббиа, Ж. Теллес и Л. Вроубел. *Методы граничных элементов*. Москва, СССР: Мир, 1987.
 [2] А. С. Моргун. *Теорія пластичної течії в механіці ґрунтів*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2013.
 [3] І. П. Бойко та О. В. Сахаров «Напружено-деформований стан ґрунтового масиву при побудові нових фундаментів поблизу існуючих будинків» *Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник*, вип. 28, с. 3-10, 2004.
 [4] Л. А. Бартоломей, А. А. Тарасенко, Я. А. Пронозин и Р. В. Мельников, «Взаимодействие осесимметричных фундаментов-оболочек с ґрунтовым основанием при внецентренном нагружении», *Интернет-вестник ВолгГАСУ. Серия: Полиматематическая*, вып. 2(22), с. 12-15, 2012.

Рекомендована кафедрою будівництва, міського господарства та архітектури ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 16.10.2018

Моргун Алла Серафимівна — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, e-mail: alla@morgun.com.ua ;

Малачковська Роксолана Ігорівна — аспірант кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, e-mail: roksimalachkovska@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

A. S. Morgun¹
R. I. Malachkovska¹

Evaluation of Process of Accumulation Residual Deformations of Ring and Round Foundations by Method of Boundary Elements

¹Vinnitsia National Technical University

Construction of buildings is a labor-intensive process that requires well-balanced, well-calculated steps and solving complex mathematical problems. This is especially true for the setting of foundations — parts of the building that perceives the load and passes them to the ground. It is extremely important to provide stability and small shrinkage of the structure, thereby avoiding its possible uneven subsidence or destruction. This requires the implementation of forecasting and numerical calculations of structures. Therefore, the model of equilibrium of a foundation immersed in a soil environment satisfying the Laplace differential equation is developed in the article. And the integral equation obtained by K. Brebbia is the main calculation equation of the soil model.

The developed mathematical model provides the possibility of reliable prediction of the behavior of the foundation and deformation of the soil in a wide range of loads. The prognostication process is performed by sampling the boundary surface of the foundation and the soil active zone by the method of boundary elements. Nonlinear problem of the process of deformation of bases is solved using the step method of A. Iliushyn. The work of the soil was modeled by the theory of V. Nikolayevskiy and I. Boyko. Complete deformations, which consisted of increments of elastic and plastic deformations, were determined. Layout of the estimated influence matrix of MBE was performed on the basis of Mindlin's solutions.

The results of the forecasting by the method of boundary elements are presented on the loading and settling graphs of the ring and circular foundations. The fidelity to the choice of the settlement dilatation model is confirmed by the correspondence of numerical studies using the finite element method. Thus, the article is devoted to the study of the strained-

deformed state of the boundary elements of ring and circular foundations and compares the results of the studies with their calculation by finite element method.

Keywords: numerical method of boundary elements, method of finite elements, nonlinear calculation of bases, ring foundation, circular foundation.

Morgun Alla S. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Construction, Urban Economy and Architecture, e-mail: alla@morgun.com.ua;

Malachkovska Roksolana I. — Post-Graduate Student of the Chair of Construction, Urban Economy and Architecture, e-mail: roksimalachkovska@gmail.com

А. С. Моргун¹
Р. И. Малачковская¹

Оценка по методу граничных элементов процесса накопления остаточных деформаций кольцевого и круглого фундаментов

¹Винницкий национальный технический университет

Строительство сооружений — трудоемкий процесс, требующий взвешенных, четко просчитанных шагов и решения сложных математических задач. Особенно это касается устройства части сооружения, воспринимающих нагрузки и передающих их на систему основа–фундамент. Чрезвычайно важно обеспечить устойчивость и малопросадочность сооружения, тем самым избегая его возможного неравномерного проседания или разрушения. Для этого необходимо обеспечить прогнозирование и числовую реализацию расчетов конструкций. Поэтому предложена модель равновесия фундамента, погруженного в грунт, которое удовлетворяет дифференциальному уравнению Лапласа. А основным расчетным уравнением модели работы почвы является интегральное уравнение, полученное К. Бреббия.

Возможность достоверного прогнозирования поведения фундамента и деформации грунта в широком диапазоне нагрузок предоставляет предлагаемая математическая модель. Процесс прогнозирования выполняется путем дискретизации граничной поверхности фундамента и активной зоны грунта методом граничных элементов. Нелинейную задачу процесса деформирования основ решаем с помощью пошагового метода А.А. Илюшина. Работа почвы моделировалась теорией В. М. Николаевского и И. П. Бойко. Определялись полные деформации, состоящие из приростов упругих и пластических деформаций. Компоновка расчетной матрицы влияния МГЭ выполнялась на основе решений Р. Миндлина.

Результаты прогнозирования по методу граничных элементов представлены на графиках нагрузки–оседания кольцевого и круглого фундаментов. Правильность выбора расчетной дилатансионной модели подтверждается соответствием числовых исследований по методу конечных элементов. Таким образом, в статье рассмотрены результаты исследований по методу граничных элементов напряженно-деформированного состояния кольцевых и круглых фундаментов и сравнении результатов исследований с расчетом по методу конечных элементов.

Ключевые слова: численный метод граничных элементов, метод конечных элементов, нелинейный расчет оснований, кольцевой фундамент, круглый фундамент.

Моргун Алла Серафимовна — д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой строительства, городского хозяйства и архитектуры, e-mail: alla@morgun.com.ua ;

Малачковская Роксолана Игоревна — аспирант кафедры строительства, городского хозяйства и архитектуры, e-mail: roksimalachkovska@gmail.com