

УДК 539.3

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛЕЙ ЗМІЦНЮВАНОГО ҐРУНТУ В РАМКАХ МЕТОДА СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

І.І. Солодей,

д-р техн. наук, професор

Г.А. Затилюк,

д-р філософії в прикладній механіці, доцент

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

DOI: 10.32347/2410-2547.2022.109.30-37

У рамках методу скінченних елементів досліджено вплив граничних умов на значення осідань при використанні різних моделей ґрунта.

Показано, що використання запропонованої авторами моделі зміцнюваного ґрунту, яка з одного боку відповідає державним будівельним нормам, а з іншого не потребує залучення додаткових фізико-механічних характеристик ґрунтів, дозволяє отримувати точні значення параметрів напружено-деформованого стану основи.

Ключові слова: метод скінченних елементів (МСЕ), модель Кулона-Мора, модель твердіння ґрунту, глибина стиснутої зони, модуль деформації.

Існує велика кількість аналітичних методів розрахунку деформації основи: метод лінійно деформованого шару, різні моделі з застосуванням коефіцієнтів жорсткості ґрунта, метод пошарового підсумування тощо. Широке коло задач можна реалізувати лише за допомогою чисельних методів, найбільше розповсюдження з яких отримав метод скінченних елементів. Чисельні розрахунки ґрунтового середовища на основі МСЕ відрізняються від аналітичних тим, що необхідною умовою їхнього застосування є вибір ґрунтової моделі, що характеризуються різною теоретичною базою і за допомогою рівнянь різної складності та вхідних параметрів різної кількості описують поведінку змодельованого ґрунтового масиву [7].

Історично, в силу необхідності швидкого зведення об'єктів капітального будівництва, процесів індустріалізації, а також для відновлення зруйнованих міст, найбільшого поширення набули розрахункові методи, які були простими у використанні, з мінімальною кількістю розрахункових параметрів, лабораторне визначення яких було максимально швидким і вимагало використання простих, надійних і доступних приладів. Виклики сьогодення лише посилюють такі вимоги. Саме тому модель Кулона-Мора залишається найбільш часто використовуваною при виконанні геотехнічних розрахунків. Для її використання достатньо мати лише чотири параметри, які традиційно присутні в інженерно-геологічних звітах.

Не дивлячись на те, що чисельні методи дозволяють вирішити задачу будь якої складності, слід зауважити, що значні проблеми виникають з

постановками задач та алгоритмами їх розв'язання. Так побудова розрахункової скінченноелементної моделі ґрунтового середовища супроводжується питаннями вибору граничних умов, меж розрахункової області, урахуванням схеми та історії навантаження тощо. Крім того, важливим моментом є узгодженість програмних розрахунків з державними будівельними нормами. Враховуючи, що чисельне вирішення задач на основі МСЕ передбачає моделювання об'єктів як скінченної обмеженої області, особливо гострим є питання вибору нижньої межі розрахункової моделі при дослідженні осідань.

Відомо, що жорсткість ґрунтів у природньому стані в значній мірі залежить від рівня напружень, що означає, що вона зростає з глибиною їхнього залягання. До недоліків моделі Кулона-Мора слід віднести те, що в загальному випадку в ній не передбачено зміну жорсткості ґрунту і вона є постійною величиною. Така обставина призводить до того, що деформації осідання при розрахунках систем «підземна споруда – основа» в програмних комплексах, що використовують МСЕ в якості своєї теоретичної бази, лінійно зростають при збільшенні розмірів розрахункової моделі по вертикалі.

Такий самий ефект спостерігається і при розрахунках за допомогою метода пошарового підсумування, адже і при вказаному аналітичному розрахунку, і при чисельному з використанням моделі Кулона-Мора, для визначення величини осідань використовується теорія лінійно деформованого середовища.

Саме тому рекомендується обмежувати нижню межу розрахункової області глибиною стиснутої зони, яка знаходиться на рівні, коли виконується нерівність:

$$\sigma_{zp} \leq 0,2\sigma_{zg}, \quad (1)$$

де σ_{zp} – значення вертикального нормального напруження від зовнішнього навантаження; σ_{zg} – значення вертикального нормального напруження від власної ваги ґрунтового масиву.

Обмеження розмірів моделі в рамках МСЕ значно звужує можливості розрахунку ряду об'єктів, а інколи скористатися такою рекомендацією взагалі неможливо.

У статті [4] авторами запропонована модель зміцнюваного ґрунтуз використанням залежностей теорії лінійно-деформованого середовища та коефіцієнтів, наведених у ДБН В.2.1-10-2009 «Основи та фундаменти споруд» для розрахунку приросту модуля деформації основи з глибиною:

$$E_{z,i} = E_i + E_{\text{increment}} \cdot (z - z_{\text{ref}}), \quad (2)$$

де $E_{z,i}$ – модуль деформації на глибині z ; E_i – приріст модуля деформації з глибиною; z – відмітка нижньої межі розрахункової моделі; z_{ref} – відмітка, з якого зростає модуль деформації, вище якої модуль Юнга має нормативне значення; $E_{\text{increment}}$ – приріст модуля деформації з глибиною [кПа/м] який визначається за формулою:

$$E_{\text{increment}} = E_i \cdot \frac{k_{\text{avg}}}{z}, \quad (3)$$

де E_i – модуль деформації ґрунту, який є вхідним параметром моделі Кулона-Мора; k_{avg} – коефіцієнт, що залежить від відносної глибини нижньої межі моделі, або обраний з таблиці, або розрахований за формулою, яка наведена в [4].

Надбаннями сучасної механіки ґрунтів є достатньо велика кількість інших моделей ґрунту: Hardening Soil Model та її похідні (Hardening Soil Small-strain), Soft Soil та її похідні, Cam-Clay тощо. Сьогодні велику увагу привертає модель Hardening Soil [3, 5].

Дана модель використовує гіперболічну залежність деформацій від напружень [1], декілька модулів деформації в залежності від виду виникаючих напружень, може враховувати явище дилатансії і, що головне, з огляду на поставлені в статті питання, враховує зміцнення ґрунту при збільшенні рівня напружень, тобто описується залежністю жорсткості основи від напружень σ_3 в масиві:

$$E = E^{\text{ref}} \left(\frac{c \cos \varphi + \sigma_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{\text{ref}} \sin \varphi} \right)^m, \quad (4)$$

де c – питоме щеплення ґрунта; φ – кут внутрішнього тертя; m – показник ступеня жорсткості ґрунта [2]; p^{ref} – опорний тиск, при якому виконують лабораторні випробування ґрунта; E^{ref} – модуль деформації (в моделі HSM три різних модуля деформації), що визначається при p^{ref} .

Дослідження впливу граничних умов моделі на значення осідань проводилося шляхом збільшення вертикальних розмірів розрахункової області при використанні різних моделей ґрунта. Тиск на основу передавався через жорстку плиту. Значення тиску та ширина плити варіювалися. Розрахунок проводився з урахуванням вертикальної площини симетрії за допомогою введення у модель відповідних в'язей [8]. Основи моделювалися однорідними з різними фізико-механічними характеристиками. Далі наводяться результати дослідів з характеристиками основи: $E=18$ МПа, $\gamma=15$ кН/м³, $\nu=0,3$, $\varphi=27^\circ$, $c=1$ кН/м² для моделі Кулона-Мора, для моделі Hardening Soil фізико-механічні характеристики приймалися, як і для моделі Кулона-Мора, з врахуванням рекомендацій [5], також виконано розрахунок з використанням приросту модуля деформації для моделі Кулона-Мора [4].

Як видно з наведеного графіка (рис. 1) залежності осідань від глибини нижньої межі моделі, осідання порашовані аналітично методом пошарового підсумування, а також за допомогою МСЕ при обраному розмірі моделі по вертикалі, що дорівнює глибини стисливої зони, як це рекомендовано, майже співпадають. При збільшенні вертикальних розмірів значення осідань зростають пропорційно та суттєво різняться від отриманих аналітично.

Аналізуючи отримані результати розв'язку ряду тестових задач (рис. 1), можна стверджувати, що значення осідань на різних глибинах

при залученні співвідношень приросту модуля деформації [4] досить добре узгоджуються, тоді як в звичайній постановці з використання моделі Кулона-Мора, як і передбачалося, осідання стрімко зростають пропорційно до збільшення вертикальних розмірів моделі.

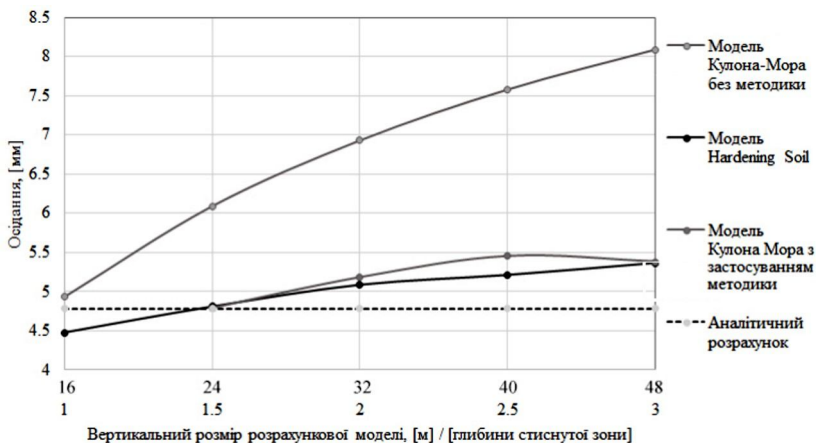


Рис. 1. Залежність осідань від вертикально розміру моделі

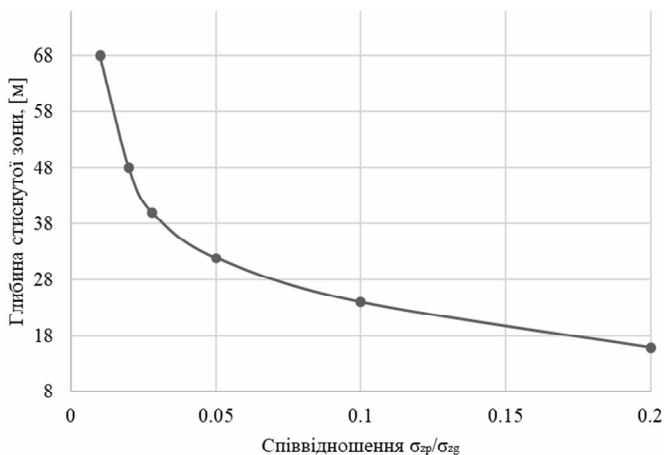


Рис. 2. Залежність значення глибини стиснутої зони від σ_{zp}/σ_{zg}

Застосовуючи запропоновану модель зміцненого ґрунту [4] значення осідань різняться від аналітичних несуттєво, стрімкого збільшення значень осідань не спостерігається, а при значенні глибини 30 м, що еквівалентно 2,5 глибинам стисливої зони, спостерігається стабілізація значень деформації. Це можна пояснити тим, що в методі поширеного підсумування глибина стиснутої зони обмежується на рівні, коли виконується нерівність (1). Побудувавши графік залежності глибини стиснутої від співвідношення цих величин, можна побачити, що саме в

околі глибини, що еквівалентно 2,5 глибинам стисливої зони, графік змінює свій характер (рис. 2)

Аналізуючи результати, отримані з використанням *Hardening Soil Model*, бачимо, що вплив вертикальних розмірів моделі на осідання присутній, але несуттєвий. Рекомендація використання параметру глибини стисливої зони (1) не може бути застосована. У наведеному прикладі отримані дещо занижені значення осідань при такому розмірі моделі, а при інших характеристиках основ вони можуть бути завищеними. Отримані результати з використанням фізико-механічних характеристик, які приймалися наближено з врахуванням рекомендацій [5], виходячи з параметрів стандартного інженерно-геологічного звіту. *Hardening Soil Model* потребує більш широкого набору характеристик ґрунту, які визначаються експериментальними методами, з використанням спеціального обладнання, а також вимагає високої кваліфікації та досвідченості фахівців. До того ж, знаходження ряду параметрів не регламентовано нормативними документами. Все це суттєво ускладнює її використання та впливає на результати як реальних розрахунків, так і на якість експериментальних досліджень, а також нівелює можливі переваги даної моделі.

Таким чином, задачі, вирішені з використанням моделі зміцнюваного ґрунту [4], позбавлені недоліку стрімкого пропорційного зростання осідань до збільшення глибини нижньої межі моделі, а її використання не потребує додаткових інженерно-геологічних вишукувань. Достовірність результатів у моделі *Hardening Soil* напряму залежать від якості отриманих вхідних параметрів, визначення яких ускладнене та не регламентоване нормами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Duncan, J. M., & Chang, C. Y. (1970, September). Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96(5), 1629–1653. <https://doi.org/10.1061/jsfeaq.0001458>.
2. Janbu, N. (1963). Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. *Proc. ECSMFE Wiesbaden*. 1, 19–25.
3. Schanz, T., Vermeer, P., & Bonnier, P. (2019, January 22). The hardening soil model: Formulation and verification. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, 281–296. <https://doi.org/10.1201/9781315138206-27>.
4. Solodei, I., & Zatyliuk, Gh. (2019). Implementation of the linear elastic structure half-space in the Plaxis in the study of settlements. *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet Pratsi*. 1. 22–28. <https://doi.org/10.15276/opu.1.57.2019.03>.
5. Солодей, И.И. & Затялюк, Г.А. (2019). Использование грунтовых моделей при численном моделировании подземных сооружений. *Wschodnio europejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*. 8 (48), część 2, 48–55. https://eesa-journal.com/wp-content/uploads/EESA_august_part2.pdf#page=48.
6. Solodei, I., & Zatyliuk, G. (2020). Mohr-Coulomb model with corrected parameters in the study of base settlements. *The Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 9–10, 36–38. <https://doi.org/10.29013/ajt-20-9.10-36-38>.
7. Solodei, I., Petrenko, E., & Zatyliuk, Gh. (2020). Nonlinear problem of structural deformation in interaction with elastoplastic medium. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 105, 48–63. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2020.105.48-63>.

8. Солодей, І.І., Петренко, Е.Ю. & Затилюк, Г.А. (2019). Особливості створення розрахункових моделей при дослідженні напружено-деформованого стану підземних споруд. Опір матеріалів та теорія споруд, 102, 139–149. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2019.102.139-149>.

REFERENCES

1. Duncan, J. M., & Chang, C. Y. (1970, September). Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96(5), 1629–1653. <https://doi.org/10.1061/jfsfaq.0001458>.
2. Janbu, N. (1963). Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. *Proc. ECSMFE Wiesbaden*, 1, 19–25.
3. Schanz, T., Vermeer, P., & Bonnier, P. (2019, January 22). The hardening soil model: Formulation and verification. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, 281–296. <https://doi.org/10.1201/9781315138206-27>.
4. Solodei, I. & Zatyliuk, Gh. (2019). Implementation of the linear elastic structure half-space in the Plaxis in the study of settlements. *Odes'kyi Politechnichniy Universytet Pratsi*. 1. 22-28. <https://doi.org/10.15276/opu.1.57.2019.03>.
5. Solodei, I. & Zatyliuk, Gh. (2019). Using soil models in numerical simulation of underground structures. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*, 8 (48), część 2, 48-55. https://eesa-journal.com/wp-content/uploads/EESA_august_part2.pdf#page=48.
6. Solodei, I., & Zatyliuk, G. (2020). Mohr-Coulomb model with corrected parameters in the study of base settlements. *The Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 9–10, 36–38. <https://doi.org/10.29013/ajt-20-9.10-36-38>.
7. Solodei, I., Petrenko, E., & Zatyliuk, Gh. (2020). Nonlinear problem of structural deformation in interaction with elastoplastic medium. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 105, 48–63. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2020.105.48-63>.
8. Solodei, I., Petrenko, E., & Zatyliuk, H. (2019). Features of the numerical simulation in research on the stress strain behavior of underground structures. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 102, 139–149. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2019.102.139-149>.

Стаття надійшла 18.10.2022

Солодей І.І., Затилюк Г.А.

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛЕЙ ЗМІЦНЮВАНОГО ҐРУНТУ В РАМКАХ МЕТОДА СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Чисельні розрахунки ґрунтового середовища на основі МСЕ відрізняються від аналітичних, що необхідно у мовою їхнього застосування є вибір ґрунтових моделей, які характеризуються різною теоретичною базою, що за допомогою рівнянь різної складності та входних параметрів різної кількості описують поведінку модельованого ґрунтового масиву.

Враховуючи, що чисельне вирішення задач на основі МСЕ передбачає моделювання об'єктів як скінченної обмеженої області, гостро постає питання вибору нижньої межі розрахункової моделі при дослідженні осідань.

Жорсткість ґрунтів у природньому стані зростає з глибиною їх залягання. Упростих ґрунтових моделях, як модель Кулона-Мора, жорсткості ґрунту є постійною величиною. Така обставина призводить до того, що при чисельних розрахунках деформації осідання лінійно зростають при збільшенні розмірів розрахункової моделі за вертikalлю.

Удосконалені моделі, як Hardening Soil, можуть враховувати зміцнення ґрунту при збільшенні рівня напружень, однак потребують широкого набору характеристик ґрунту, які визначаються експериментальними методами з використанням спеціального обладнання, а знаходження ряду параметрів не регламентовано нормативними документами.

Показано, що використання запропонованої авторами моделі зміцнюваного ґрунту, яка, з одного боку відповідає державним будівельним нормам, а з іншого, не

потребує залучення додаткових фізико-механічних характеристик ґрунтів, дозволяє отримувати точні значення параметрів напружено-деформованого стану основи.

Ключові слова: метод скінчених елементів (МСЕ), модель Кулона-Мора, модель твердіння ґрунту, глибина стиснутої зони, модуль деформації.

Solodei I.L., Zatyliuk Gh.A.

STUDY OF THE RELIABILITY AND EFFICIENCY OF USING REINFORCED SOIL MODELS WITHIN THE FRAMEWORK OF THE FINITE ELEMENT METHOD

Within the framework of the finite element method, the influence of the dimensions of the calculation model on the values of subsidence when using different soil models was studied.

Numerical calculations of the soil environment based on FEM differ from analytical ones in that a necessary condition for their application is the choice of a soil model, which is characterized by a different theoretical basis, which, with the help of equations of different complexity and input parameters of a different number, describe the behaviour of the simulated soil mass.

Given that the numerical solution of problems based on FEM involves the modeling of objects as a finite limited area, the question of choosing the lower limit of the calculation model in the study of subsidence is acute.

The stiffness of soils in their natural state increases with the depth of their occurrence. In simple soil models, such as the Mohr-Coulomb model, soil stiffness is a constant value. This circumstance leads to the fact that during numerical calculations, the deformations of subsidence increase linearly when the dimensions of the calculation model increase vertically.

Advanced models, such as Hardening Soil, can take into account the soil strengthening when the stress level increases, however they require a wide range of soil characteristics, which are determined by experimental methods, using special equipment, and the determination of a number of parameters is not regulated by regulatory documents.

It is shown that the use of the reinforced soil model proposed by the authors, which, on the one hand, complies with state building regulations, and on the other hand, does not require the involvement of additional physical and mechanical characteristics of soils, allows obtaining more accurate values of the parameters of the stress-strain state of the foundation.

Keywords: finite element method (FEM), Coulomb-Mohr model, Hardening Soil model, young's modulus of soil, compressed depth.

Солодей И.И., Затылюк Г.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ УПРОЧНЯЮЩЕГОСЯ ГРУНТА В РАМКАХ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Численные расчеты ґрунтовой среды на основе МКЭ отличаются от аналитических тем, что необходимым условием их применения является выбор ґрунтовой модели, которые характеризуются разной теоретической базой, с помощью уравнений разной сложности и разного количества параметров описывают поведение смоделированного ґрунтового массива.

Учитывая, что численное решение задач на основе МКЭ предполагает моделирование объектов как конечной ограниченной области, остро стоит вопрос выбора нижней границы расчетной модели при исследовании осадок.

Жесткость ґрунтов в природном состоянии растет с глубиной их залегания. В простых ґрунтовых моделях, как модель Кулона-Мора, жесткость ґрунта является постоянной величиной. Такое обстоятельство приводит к тому, что при многочисленных расчетах деформации оседания линейно возрастают при увеличении размеров расчетной модели по вертикали.

Усовершенствованные модели, как Hardening Soil, могут учитывать упрочнение ґрунта при увеличении уровня напряжений, однако требуют широкого набора характеристик ґрунта, определяемых экспериментальными методами, с использованием специального оборудования, а нахождение ряда параметров не регламентировано нормативными документами.

Показано, что использование предложенной авторами модели упрочняющегося ґрунта, с одной стороны отвечающей строительным нормам, а с другой, не требующей использования дополнительных физико-механических характеристик ґрунтов, позволяет получать точные значения параметров напряженно-деформированного состояния основания.

Ключевые слова: метод конечных элементов (МКЭ), модель Кулона-Мора, Hardening Soil model, глубина сжатой зоны, модуль деформации.

УДК 539.3

Солодей І.І., Затилюк Г.А. Дослідження достовірності та ефективності використання моделей зміцнюваного ґрунту в рамках метода скінченних елементів // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2022. – Вип. 109. – С. 30-37.

В статті показано, що використання запропонованої авторами моделі зміцнюваного ґрунту, яка з одного боку відповідає державним будівельним нормам, а з іншого не потребує залучення додаткових фізико-механічних характеристик ґрунтів, дозволяє отримувати точні значення параметрів напружено-деформованого стану основи.

Іл. 2. Бібліогр. 8 назв.

UDC 539.3

Solodei I.I., Zatyliuk Gh.A. Study of the reliability and efficiency of using reinforced soil models within the framework of the finite element method // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles – Kyiv:KNUCA, 2022. – Issue 109.–P. 30-37.

It is shown that the use of the reinforced soil model proposed by the authors, which, on the one hand, complies with state building regulations, and on the other hand, does not require the involvement of additional physical and mechanical characteristics of soils, allows obtaining more accurate values of the parameters of the stress-strain state of the foundation.

Fig. 2. Ref. 8.

УДК 539.3

Солодей І.І., Затилюк Г.А. Исследование достоверности и эффективности использования моделей упрочняющегося грунта в рамках метода конечных элементов // Сопrotивление материалов и теория сооружений: науч.-тех. сборн. – К.: КНУСА, 2022. - Вип. 109. – С. 30-37.

В статье показано, что использование предложенной авторами модели упрочняющегося грунта, с одной стороны отвечающей строительным нормам, а с другой, не требующей использования дополнительных физико-механических характеристик грунтов, позволяет получать точные значения параметров напряженно-деформированного состояния основания.

Ил. 2. Библиогр. 8 назв.

Автор: доктор технічних наук, професор, професор кафедри будівельної механіки
СОЛОДЕЙ Іван Іванович.

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури.

Роб.тел.: +38 (044) 241-55-55

Моб. тел.: +38 (050)357-44-90

E-mail: solodei.ii@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7638-3085>

Автор: доктор філософії в прикладній механіці, доцент кафедри будівельної механіки
ЗАТИЛЮК Герман Анатолійович.

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури.

Моб.тел.: +38 (099) 11-00-564

E-mail: zatyliuk.ha@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0392-2214>