

## АНОТАЦІЯ

*Писаревський Б. Ю.* Чисельне моделювання конструкцій багатоповерхових будівель при динамічних впливах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія – Одеська державна академія будівництва та архітектури. – Одеса, 2021.

Дисертаційне дослідження присвячене вивченню впливу динамічної взаємодії системи «наземна частина-фундамент-грунт» на напружено-деформований стан конструкцій багатоповерхових будівель.

У *вступі* відмічено, що при проектуванні будівель та споруд розрахунки на динамічні впливи можна виконати, використавши спектральний метод, прямий динамічний метод або нелінійний статистичний розрахунок. Цими методами регламентується розрахунок системи «наземна частина-фундамент-грунт». Необхідно враховувати особливості нелінійного деформування конструкцій будівлі та ґрунтів, інерційні властивості ґрунтової основи, демпфувальні властивості та ін.

На систему «наземна частина-фундамент-грунт» можуть діяти як статичні, так і динамічні навантаження. За статичних навантажень безграничний масив можна обмежити. Для цього достатньо відкинути частину масиву, яка віддалена від будівлі, оскільки переміщення та зусилля зменшуються зі збільшенням відстані від споруди. Однак у динаміці ця процедура не може бути використана. Обмежена ділянка відбиває хвилі, що надходять від джерела вібрації, а вони повинні розповсюджуватись у нескінченність. Це відбиття впливає на деформації конструкції. Для аналізу взаємодії елементів у системі «наземна частина-фундамент-грунт» нескінченний ґрунт поділяють на обмежену ділянку, яка може бути нелінійною, і ділянку, яка тягнеться до нескінченності і поводить лійно. Обмежена ділянка, яка включає споруду та обмежений ґрунт, може бути

змодельована за допомогою методу скінченних елементів. Найбільш складною частиною аналізу взаємодії споруди та ґрунту є моделювання необмеженої ділянки. У динамічній задачі хвилі, які рухаються до нескінченності, не повинні відбиватися від границь. Тому на границях слід застосовувати такі граничні умови, за яких поглинаються хвилі, які сюди надходять.

Проблему взаємодії складових системи «наземна частина-фундамент-ґрунт» можна розв'язати одним з двох основних методів – прямим методом, або методом підсистем.

Прямий метод - це найпростіший спосіб проаналізувати цю взаємодію. Щоб врахувати нескінченність з достатньою точністю, необмежена область обрізується досить далеко від структури і на ній забезпечуються приблизні граничні умови.

Метод підсистем - це більш точний метод у порівнянні з прямим методом, хоча обчислювальна область може бути суттєво меншою, ніж для прямого методу. У рамках дисертаційної роботи досліджується саме метод підсистем.

Відмічено, що у роботі наведено розроблені методики створення чисельних моделей систем «наземна частина-фундамент-ґрунт» при динамічних впливах, які враховують дисипативні властивості ґрунту.

У *першому розділі* наведено передумови динамічного розрахунку системи «наземна частина-фундамент-ґрунт». Відмічено, що розрахунки при розв'язанні динамічних задач завжди пов'язані зі складними та довготривалими обчисленнями і що ця проблема ще більше загострюється, коли необхідно дослідити напружено-деформований стан системи «наземна частина-фундамент-ґрунт», бо необхідно врахувати багато параметрів ґрунту. Підкреслено важливість задачі вибору розміру дискретизованої частини основи.

Виконано аналіз методів чисельного моделювання роботи споруд при дії динамічних навантажень. Відмічено основні види динамічних навантажень та методи дискретизації, а також методи складання рівнянь руху.

Розглянуті роботи відомих фахівців в області методів дослідження та математичного аналізу задач динаміки споруд.

Виконано порівняння методів чисельного аналізу споруд при дії динамічних навантажень за принципами дискретизації. Відмічено, що найбільш поширений метод дискретизації - метод скінченних елементів.

Показано основні етапи розрахунку методом скінченних елементів, та формування матричного рівняння руху у методі скінченних елементів. Зроблено висновок, що задача динамічного розрахунку системи «наземна частина-фундамент-грунт», для отримання точного НДС варто розраховувати з врахуванням фактору часу.

Розглянуто геометрію моделей, фізичні та механічні властивості пружних основ споруд Фукса-Вінклера та Пастернака. Відмічено недоліки цих моделей. Розглянуто фізично нелінійні моделі ґрунтових основ споруд. Наведено визначальні співвідношення теорії пластичної текучості (теорії текучості) та деформаційної теорії пластичності, а також критерії текучості. Відмічено, що у моделях ґрунтових основ найчастіше використовують поверхні текучості Боткіна, Кулона-Мора, Друккера-Прагера, Кулона-Фадєєва.

У *другому розділі* розглянуто методи моделювання основи споруди, пропонується методика моделювання опорних в'язей і основ з "жорсткою" поновлюючою силою у середовищі програмного комплексу ЛПРА-САПР, а також методика моделювання взаємодії елементів системи «наземна частина-фундамент-грунт».

Існує два загальних підходи для чисельного моделювання динамічної взаємодії елементів системи «наземна частина-фундамент-грунт» - це метод підсистем та прямий метод.

У методі підсистем необмежена область основи поділяється на обмежену частину основи разом з будівлею і на необмежену частину. Обмежену частину моделюють методом скінченних елементів, що дає можливість врахувати особливості ґрунтової основи, у тому числі нелінійність. Для необмеженої частини ґрунту необхідно змоделювати її нескінченність. Для методу підсистем необхідні аналітично виражені граничні умови. Пропонується методика поєднання методів МСЕ та SBFEM, яка дає можливість уникнути проблем, що

виникають при розв'язанні задач з необмеженими областями при використанні інших методів.

Викладено запропоновану у роботі чисельну процедуру формування рівнянь руху та, як частинний випадок, рівнянь рівноваги, у задачах, де є безграничні області. Цю процедуру упроваджено у програмному комплексі ЛІРА - САПР, що дало можливість формувати гібридні моделі МСЕ/SBFEM і розв'язувати практично будь-які фізично лінійні та нелінійні динамічні задачі у часі прямим методом, а також методом підсистем.

Запропоновано методику формування розрахункових схем, де є безграничні області.

Виконано тестування розробленої чисельної процедури на відомих класичних задачах механіки твердого деформівного тіла. Показано, що при використанні розроблених скінченних елементів у числових моделях конструкцій будівель за запропонованою методикою, результати розрахунків практично не відрізняються від теоретичних.

У *третьому розділі* виконано ряд чисельних експериментів з використанням декількох методів розрахунку на динамічні впливи. Розглянуто існуючі методики розрахунку на динамічні впливи та проведено порівняння з запропонованою методикою.

Створена розрахункова схема, та проведено динамічний розрахунок будівлі готельного комплексу на Новому молі Одеського морського порту методом нелінійного статичного розрахунку (pushover). Відмічені основні переваги та недоліки методу, та запропоновано подальші розрахунки виконувати прямим динамічним методом, та розробленою автором методикою.

Виконано динамічний розрахунок 27-поверхового монолітного будинку на вплив метрополітену неглибокого закладання. Чисельний експеримент виконувався у програмному комплексі ЛІРА-САПР. Для моделювання впливу метрополітену використовувалось синусоїдальне навантаження від рухомого складу метрополітену. Виконано розрахунок будівлі двома методами: методом скінченних елементів зі стандартними граничними умовами на границі

досліджуваної зони, а також з використанням скінченних елементів, що моделюють нескінченність, розроблених автором.

Розглянуто питання сейсмічного мікрорайонування на прикладі 13-ти поверхової будівлі, що побудована у м. Одеса. Проведено аналіз поведінки і реакції конструкцій будівлі на сейсмічні впливи з урахуванням відстані від епіцентру, просторової роботи конструкції, взаємодії з ґрунтовою основою і багато інших. Виконано порівняльний аналіз методики розрахунку, що пропонується, з існуючими методиками та доведено необхідність створення моделі ґрунтової основи з безперервним проходження сейсмічних хвиль.

Відмічено, що запропонована автором методика чисельних розрахунків є універсальною, що за її допомогою можна коректніше розраховувати споруди на динамічні впливи.

У *четвертому розділі* розглянуто чисельний експеримент 20-ти поверхового монолітного комплексу, у якому після 6-ти бального землетрусу з'явилися тріщини в овальній плиті перекриття. Розрахункову модель просторової схеми будівлі створено у програмному комплексі ЛІРА-САПР. Розрахункові навантаження на елементи конструкцій задано у відповідності до завдання на розрахунок. У розрахунковій схемі враховано фізичні нелінійні властивості матеріалів конструкції. Бетон та арматура змодельовані у відповідності до креслень. Розрахунок на динамічні впливи виконано за запропонованою методикою. На границі області моделі були задані трьох та чотирьох вузлові елементи методу підсистем.

Характер руйнувань, який отримано за розрахунком, добре узгоджується з дійсними руйнуваннями елементів споруди після землетрусу.

Розрахунки на динамічні впливи фізично нелінійних споруд на безграничній ґрунтовій основі за цією методикою враховують наскрізне проходження хвиль у безграничному ґрунті.

Розроблена методика розрахунку системи «наземна частина-фундамент-ґрунт» на динамічні впливи дає можливість аналізу напружено-деформованого

стану споруд будь-якої складності з урахуванням нелінійних властивостей матеріалів елементів системи.

**Ключові слова:** чисельне моделювання, фізична нелінійність, динамічні впливи, система «наземна частина-фундамент-ґрунт», метод скінченних елементів, метод підсистем.

## SUMMARY

*Pysarevskiy B. U.* Numerical modeling of structures of multi-storey buildings under dynamic impact. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

The thesis for candidate degree of engineering science (PhD) in the specialty 192 – Construction and civil engineering – Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa, 2021.

The thesis investigation is devoted to the study of the influence of the dynamic interaction of the system "aboveground part-foundation-soil" on the stress-strain state of the structures of multi-storey buildings.

In the *introduction* it is noted that in the design of buildings and structures, to analyse the dynamic effects, one can use following methods: spectral method, direct dynamic method or nonlinear statistical calculation. These methods regulate the analysis process of the system "structure-substructure-soil foundation". It is necessary to take into account the features of nonlinear deformation of building structures and soils, inertial properties of the soil foundation, damping properties, etc.

Both static and dynamic loads can act on the system called "structure-substructure-soil foundation". To analyse some static loads, the infinite soil body can be constrained. To do this, it is sufficient to discard the part of the soil body which is far enough from the building, so as displacements and effort decrease with increasing distance from the structure. However, in dynamics this procedure cannot be used. Constrained area reflects the waves, which come from the source of vibration, though these waves must propagate to infinity. This reflection affects on the deformation of the structure. To analyze the interaction between elements in the system "structure-substructure-soil foundation" the infinite soil body can be divided into two areas: a constrained area, which can be nonlinear, and an area that extends to infinity and behaves linearly. The constrained area, which includes the structure and the bounded soil foundation, can be modeled using the finite element method. The most difficult part of the analysis of the interaction between the structure and soil foundation is the

modeling of an unlimited area. In dynamic problem, the waves moving to infinity should not be reflected from the boundaries. Therefore, such boundary conditions should be applied at the borders, under which the waves coming here can be absorbed.

The problem of interaction between elements in the system "structure-substructure-soil foundation" can be solved by one of the two main methods: the direct method, or the method of subsystems.

The direct method is the easiest way to analyze this interaction. To take into account the infinity with sufficient accuracy, the unlimited area is truncated far enough from the structure and it provides approximate boundary conditions.

The method of subsystems is more accurate method than the direct method, although the computational area may be significantly smaller than for the direct method. As a part of the dissertation the method of subsystems is investigated.

It is noted that the paper presents the developed methods of creating of numerical models of the system "structure-substructure-soil foundation" under dynamic influences, which take into account the dissipative properties of the soil foundation.

*The first section* presents the prerequisites for the dynamic analysis of the system "structure-substructure-soil foundation". The main elements of the analytical model are highlighted. It is noted that the dynamic analytical process is always associated with complex and long-term calculations and that this problem is exacerbated when it is necessary to investigate the stress-strain situation of the system "structure-substructure-soil foundation", because it is necessary to take into account many parameters of the soil foundation. The importance of the selection problem of the dimension of the discretized part of the soil foundation is emphasized.

The analysis of methods of numerical modeling of work of structures under dynamic loadings is executed. It also noted the main types of dynamic loads and sampling methods, as well as motion equation formation methods.

The dissertation also considered with the works of the well-known specialists in the field of research methods and mathematical analysis of the problems of structures which are under dynamic impact.



The discretisation principle comparison of the methods of numerical modeling of structures under dynamic loads is introduced. It is noted that the most common method of discretisation is the finite element method.

The main stages of the analysis by the finite element method and formation of the matrix motion equation in the finite element method are shown. It is concluded that the problem of dynamic analysis of the system "structure-substructure-soil foundation", as a rule, is solved in time.

In the current thesis, it also considered the geometry of the models, physical and mechanical properties of the elastic soil foundation according to Winkler and Pasternak models. The disadvantages of these models are noted. Physically nonlinear models of soil foundation of structures are considered. The defining relations of the theory of yield plasticity (yield theory) and the deformation theory of plasticity, as well as plastic yield criterions are given. It is noted that in the models of soil foundations the yield surfaces of Botkin, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Coulomb-Fadeev are the most often used.

*The second section* discusses the modeling methods of the soil foundation of the structure, offers a method of modeling the support connections and soil foundations with a "rigid" regenerative force in the software package "LIRA - SAPR", as well as a method of modeling the interaction between the elements of the system "structure-soil foundations".

There are two general approaches for numerical modeling of the dynamic interaction between the elements of the system "structure-soil foundations": a method of subsystems and a direct method.

In the method of subsystems, the unlimited area of the soil foundation supposed to be divided into two parts: a limited part of the soil foundation together with the building and an unlimited part. The limited part can be modeled by the finite element method, which makes it possible to take into account the features of the soil foundation, including nonlinearity. For an unlimited part of the soil foundation it is necessary to model its infinity. The method of subsystems requires analytically expressed boundary conditions. We offer a method of combining FEM (Finite element method) and SBFEM

(Scaled boundary finite element method), which avoids the problems that arise when solving problems with unlimited areas when using other methods.

The work offered the numerical procedure of formation of motion equations and, as a partial case, equilibrium equations, in problems where there are infinite areas. This procedure is implemented in the software package "LIRA - SAPR", which made it possible to create hybrid models of FEM/SBFEM and to solve almost any physically linear and nonlinear dynamic problems in time by the direct method, as well as the method of subsystems.

The technique of creation of analytical models where there are boundless areas is offered.

In the dissertation, it describes the results of the testing of the developed numerical procedure based on the known classical problems of solid body mechanics. It is shown that when using the developed finite elements in analytical models of building structures according to the proposed method, the results of calculations do not differ from the theoretical ones.

In *the third section*, several numerical experiments were performed using various methods of the dynamic effects analysis. The existing methods of analysis of dynamic influences are considered and a comparison with the proposed method is carried out.

The model is made, and the dynamic calculation of the building of the hotel complex on the New pier of the Odessa seaport by a method of nonlinear static calculation (pushover) is carried out. The main advantages and disadvantages of the method are noted, and it is proposed to perform further calculations by the direct dynamic method, and the method developed by the author.

As a part of the study it performed a dynamic calculation of a 27-storey monolithic building, which is under influence of the shallow subway. The numerical experiment was performed in the "LIRA-SAPR" software package. To simulate the impact of the subway, a sinusoidal load from the rolling part of the subway was used. The analysis procedure of the building is performed by two methods: the finite element method with standard boundary conditions at the boundary of the study area, as well as using finite elements modeling infinity, developed by the author.

The issue of seismic micro-zoning is considered on the example of a 13-storey building, which is built in Odessa. The analysis of behavior and reaction of constructions of the building to seismic influences taking into account distance from the epicenter, spatial work of a structure, interaction with soil foundation and many others is carried out. As a part of the current research, it proposed a comparative analysis of the proposed analytical method with existing methods, it also showed the need to create a model of the soil foundation with a continuous transmission of seismic waves.

It is noted that the method of numerical calculations proposed by the author is universal, and with it's help it is possible to provide the analysis of constructions under dynamic influences more correctly.

*The fourth section* considers a numerical experiment of a 20-storey monolithic complex, in which some cracks appeared in the elliptic slab after 6-magnitude earthquake acting. The analytical model of the three-dimensional configuration of the building was created in the software package "LIRA-SAPR". The calculated loads on the structural elements are set in accordance with the calculation task. The analytical model takes into account the physical nonlinear properties of structural materials. Concrete and reinforcement are modeled in accordance with the drawings. The calculation of dynamic effects was performed according to the proposed method. At the boundary of the model area, three and four node elements of the subsystem method were specified.

The nature of the damage, which is analyzed, is well consistent with the actual destruction of structural elements after the earthquake.

The calculations on the dynamic effects of physically nonlinear structures on a boundless soil foundation based on the proposed method take into account the throughput of waves in boundless soil foundation.

The developed analysis method of the system "structure - boundless soil foundation" under dynamic influences allows to analyse the stress-strain state of structures of any complexity taking into account the nonlinear properties of materials of system elements.

**Key words:** numerical modeling, physical nonlinearity, dynamic influences, soil - structure system, finite element method, substructure method.

## Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

*Статті у наукових фахових виданнях України:*

1. Городецкий А. С., Пикуль А. В., Писаревский Б. Ю. Моделирование работы грунтовых массивов на динамическое воздействие в ПК Лира Сапр. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения.* Днепр, 2017. Вып. 100. С. 42-47.
2. Барабаш М. С., Пикуль А. В., Писаревський Б. Ю. Чисельно-аналітичний методологічний підхід до моделювання матеріального демпфування. *Наука та будівництво.* Київ, 2019. Вип. 21(3). С. 42-48.
3. Барабаш М. С., Костира Н. О., Башинський Я. В., Писаревський Б. Ю. Напружено-деформований стан конструкцій з урахуванням категорії технічного стану будівлі та зміни інтенсивності сейсмічного навантаження. *Проблеми розвитку міського середовища.* Київ, 2020. Вип. 1(24). С. 11-22.

*Статті у наукових періодичних виданнях інших держав:*

4. Barabash, M., Pisarevskiy B., Bashynskiy Y. Taking into Account Material Damping in Seismic Analysis of Structures. *Technical Journal.* 2020. Vol 14 (1). Pp. 55-59.  
DOI: 10.31803/tg-20180523192812.
5. Барабаш М. С., Костыра Н. А., Писаревский Б. Ю., Башинский А. В. Напряженно-деформированное состояние конструкций с учетом категории технического состояния здания и изменения интенсивности сейсмической

нагрузки. *Строительство: новые технологии – новое оборудование*. Москва, 2020. Вып. 8. С. 28–33.

*Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:*

6. Городецкий А. С., Пикуль А. В., Писаревский Б. Ю. Моделирование работы грунтовых массивов на динамическое воздействие. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. Москва, 2017. Вып. 13. С. 34-41.

7. Barabash, M. S., Kostyra N. O., Pysarevskiy B. Y. Strength-strain state of the structures with consideration of the technical condition and changes in intensity of seismic loads. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* . 2019. Vol. 708. Pp. 1-12.

DOI: 10.1088/1757-899X/708/1/012044

8. Barabash M., Iegupov V., Pysarevskiy B. Simulation of the Seismic Resistance of Buildings with Account of Unlimited Soil Space. *EcoComfort Lecture Notes in Civil Engineering*. Lviv, 2020. Vol.100. Pp. 26-33.

DOI: 10.1007/978-3-030-57340-9\_4.

9. Городецкий А. С., Ромашкина М. А., Писаревский Б. Ю. Шестая степень свободы. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. Москва, 2020. Вып. 2. С. 39-49.

10. Barabash, M. S., Pysarevskiy, B.Y. Моделирование динамического воздействия метрополитена на наземное сооружение. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. Москва, 2021. Вып. 17. С. 14-24.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

11. Білик А.С., Пікуль А.В., Писаревський Б.Ю. Моделювання напружено-деформованого стану зварних з'єднань під дією динамічних

навантажень. *Сучасні методи і проблемно орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій. Їх застосування у проектуванні і навчальному процесі*: тези доп. 1-ї міжн. наук.-практ. конференції. Київ, 2017. С. 27 – 30.

12. Барабаш М.С., Писаревский Б.Ю. Моделирование системы «сооружение-грунт» на динамическое воздействие при помощи специальных элементов в ПК ЛИРА-САПР. *Актуальні проблеми інженерної механіки*: тези доповідей V Міжнар. конф. Одеса, 2018. С. 180-181.

13. Барабаш М.С., Писаревский Б.Ю. Моделирование системы «сооружение-грунт» при сейсмических воздействиях в ПК ЛИРА-САПР. *Актуальні проблеми інженерної механіки*: тези доп. VI Міжнар. наук.-практ. конф. Одеса, 2019. С. 393 с.

14. Барабаш М.С., Гензерський Ю.В., Писаревський Б.Ю. Численное моделирование динамических воздействий в ПК ЛИРА-САПР *Сучасні методи і проблемно орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій. Їх застосування у проектуванні і навчальному процесі*: тези доп. 3-ї міжн. наук.-практ. конференції. Київ, 2019. С. 6 – 9.

15. М.С. Барабаш, Н.О. Костира, Б.Ю. Писаревський. Напружено-деформований стан конструкцій з урахуванням категорії технічного стану будівлі та зміни інтенсивності сейсмічного навантаження. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті*: тези доп. 8-ої міжнародно науково-технічної конференції. Харків, 2019. С. 241.