

**СКІНЧЕНО-ЕЛЕМЕНТНИЙ ТРИВИМІРНИЙ МАСИВ
ҐРУНТУ – ЯК СЕРЕДОВИЩЕ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ
ВПЛИВІВ ПРИ ПРОГНОЗУВАННІ ЗМІН НАПРУЖЕНО-
ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ**

**THE FINITE-ELEMENT THREE-DIMENSIONAL ARRAY OF
SOIL – AS A TOOL FOR MODELING INFLUENCES IN
FORECASTING CHANGES IN THE STRESS-STRAIN STATE
OF BUILDING STRUCTURES**

Федченко О.І., к.т.н., доцент, Банах М.С., Гребенюк І.В.
(Інженерний інститут Запорізького національного університету, м.
Запоріжжя)

**Fedchenok O.I., Ph.D., associate professor, Banakh M.S.,
Grebnyuk I.V. (Engineering Institute of Zaporizhzhya National
University, Zaporizhzhya city)**

У даній статті розглядається доцільність застосування тривимірного скінчено-елементного ґрунтового масиву в лінійній постановці пружного півпростору – як середовища для моделювання впливів при прогнозуванні зміни напружено-деформованого стану конструкцій будівель в складних інженерно-геологічних умовах.

There is about 85% of the territory of Ukraine is composed of certain engineering and geological conditions, which are generally classified as a difficult for building and operation of buildings and structures. These conditions include loess subsidence and structurally unstable soils, floodplain sections of rivers with the presence of weak muddy soils. A lot of building objects during the operation are subjected to deformation effects on the part of the base, which leads to an uneven draft, and as a result, to a change in the stress-strain state of the structures, and in some cases to a change in the nature and working conditions of individual structures and redistribution of stresses in them.

It is recommended to perform verification and predictive calculations to ensure reliable and trouble-free operation of buildings and structures at all stages of the life cycle under difficult engineering and

geological conditions, especially in the case of preconditions for the development of uneven sediments of the base. These calculations, which produced by certain algorithms and methods, allows to track, analyze and predict changes in the stress-strain state of building structures.

The article discusses of possible options for accounting the soil foundation, implemented in LIRA-Windows, as well as justifying the choice of modeling the foundation in the form of a three-dimensional soil massif using FE No.34 and FE No.36 in a linear formulation.

There are considered main existing methods of computer modeling of the soil foundation. And there is substantiated the expediency of using a three-dimensional array of soil in a linear formulation in the calculations of the «base-foundation-building» system.

The model of an elastic half-space of a ground base in the form of a three-dimensional array is allows to perform verification calculations of buildings and structures at all stages of their life cycle, as well as in forecasting; also it meets all requirements of current normative documents and tested in practice, has a sufficient level of adequacy and compliance with the actual survey data; for a certain class of problems, it allows not to take into account the physical nonlinearity of the soil base.

Ключові слова: напружено-деформований стан, скінченні елементи, тривимірний масив ґрунту, пружний півпростір, система «основа-фундамент-споруда».

Keywords: stress-strain state, finite elements, three-dimensional array of soil, elastic half-space, the «base-foundation-construction» system.

Вступ. Близько 85% території України складено певними інженерно-геологічними умовами, які в цілому класифікуються і відносяться до категорії складних для будівництва та експлуатації будівель і споруд. До таких умов слід віднести лесові просідаючі та структурно-нестійкі ґрунти, заплавні ділянки річок з присутністю слабких мулистих ґрунтів. Велика кількість будівельних об'єктів в процесі експлуатації піддається деформаційним впливам з боку основи, що призводить до нерівномірного осідання, і як наслідок, до зміни напружено-деформованого стану конструкцій, а в деяких випадках – до зміни характеру і умов роботи окремих конструкцій і перерозподілу напружень в них.

Під впливами слід розуміти, наприклад, для просідаючих ґрунтів – виникнення і розвиток просадної воронки внаслідок замочування ґрунтової товщі, для структурно-нестійких ґрунтів – зсуви і осідання, для заплавних ділянок річок, де проводиться намив піщаних основ – нерівномірні деформації при навантаженні.

Аналіз останніх досліджень. Чисельні методи розрахунку конструкцій та методи математичного і комп'ютерного моделювання, а також методи обліку та взаємодії будівель з основами відображені в роботах сучасних вчених: В.А. Банаха [1], М.С. Барабаш [2], А.С. Городецького [3], С.М. Клепікова [4-5], С.Ф. Клованича, А.В. Перельмутера [6], Н.В. Савицького, В.І. Слівкера та ін. В різний час дослідниками було запропоновано безліч різних розрахункових моделей суцільної ґрунтової основи. Слід виділити основні з них: модель Вінклера та її модифікації; моделі пружного півпростору та шару кінцевої товщини, що лінійно деформується (рекомендовані чинними нормативними документами); нелінійні пружно-пластичні моделі.

Постановка мети і задач досліджень: розглянути та проаналізувати основні існуючі методи комп'ютерного моделювання ґрунтової основи; обґрунтувати доцільність і можливість використання тривимірного масиву ґрунту в лінійній постановці у розрахунках системи «основа-фундамент-споруда».

Виклад основних результатів досліджень. Для забезпечення надійної та безаварійної експлуатації будівель і споруд на всіх етапах життєвого циклу в складних інженерно-геологічних умовах рекомендується проведення перевірочних та прогностичних розрахунків, особливо в разі виникнення передумов до розвитку нерівномірних осідань основи. Такі розрахунки, що виконані за певними алгоритмами і методиками, дозволяють відстежувати, аналізувати та прогнозувати зміни напружено-деформованого стану конструкцій будівель.

Сучасні вітчизняні програмні комплекси дають можливість створювати високоточні комп'ютерні моделі систем «будівля-фундамент-основа» з необхідним ступенем детальності.

Згідно з нормативними документами [7-8], нормальна експлуатація та підвищення довговічності споруди забезпечується усуненням нерівномірних осідань та обмеженням абсолютних і відносних переміщень фундаментів та надфундаментних конструкцій, а також запобігання наступу граничних станів I і II

групи для конструкцій будівель відповідно до нормативних документів [9-10].

Сьогодні, у вітчизняних програмних комплексах, наприклад в ПК «ЛПРА-САПР», є можливість проводити розрахунок ґрунтової основи за різними моделями, в основі яких лежить тривимірна модель ґрунту, побудована на основі інженерно-геологічних досліджень. На підставі цієї моделі можна визначити значення коефіцієнтів постелі, що змінюються по площі будівлі, яка розраховується. У цьому випадку розрахунок проводиться за моделлю Вінклера. Тривимірну модель ґрунту можна триангулювати, а кожному скінченному елементу (СЕ) привласнити жорсткісні характеристики відповідно механічним властивостям ґрунту, до якого відноситься цей СЕ. Розрахунок будівель може також проводитися спільно з тривимірним масивом, що моделює ґрунтову основу, тобто розрахунок проводиться за моделлю пружного півпростору.

Комп'ютерна модель основи може бути складена наступними методами:

- за допомогою коефіцієнтів жорсткості пружної основи C_1 , C_2 ;
- з використанням універсальних просторових ізопараметричних шестивузлових СЕ №34 або восьмивузлових СЕ №36 у пружній постановці;
- з використанням фізично нелінійних об'ємних СЕ №273 ґрунту з можливістю завдання різних варіантів умов міцності (по теорії Кулона-Мора, Друккера-Прагера або Боткіна).

Численні дослідження показали, що розрахункову модель основи у вигляді змінних коефіцієнтів жорсткості (коефіцієнтів постелі C_1 і C_2) можна використовувати виключно для оцінки деформаційних впливів будівель і споруд на ґрунтову основу за методикою, наведеною у ДБН В.В.1.1-5-2000 «Будинки і споруди на підроблюваних територіях і просідаючих ґрунтах».

Необхідно відзначити, що фізично нелінійні моделі дають результат відмінний від пружних моделей у лінійній постановці, що відображається на напружено-деформований стан конструкцій будівель. А саме, згідно досліджень, що представлені у статті [11] прогини консольних частин будівлі, при моделюванні ґрунтової основи об'ємними фізично нелійними СЕ на 10% перевищують аналогічний результат, отриманий при моделюванні ґрунтової основи з використанням СЕ №34, поздовжні зусилля в найбільш

завантажених колонах – на 8-11%, максимальні значення осідання фундаментних плит – на 7-20%.

В деякій мірі, фізично нелінійні моделі ґрунтових основ більш точно описують роботу ґрунту з урахуванням його неоднорідності. Однак створення таких моделей вимагає великих затрат часу, при цьому істотно збільшується час самого розрахунку через нелінійність процесора. Для більшості завдань з вибору розрахункових ситуацій та прогнозування зміни напружено-деформованого стану конструкцій будівель досить використовувати моделі пружного півпростору в лінійній постановці.

Правомірність застосування лінійної теорії пружності до ґрунтів обґрунтовується тим, що відповідно до вимог нормативної документації ДБН В.2.1-10-2009 «Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування» фундаменти повинні бути запроектовані так, щоб значення тиску на ґрунт від споруди не перевищувало 0,2-0,3 МПа, що дозволяє не зважати на нелінійність залежності осідань від тисків. Модуль деформації при цьому встановлюється за середнім значенням тангенса кута нахилу кривої «навантаження-осідання».

Моделювання ґрунтового середовища, що лінійно деформується, в ПК «ЛІРА-САПР» реалізується обчисленням осідань ґрунтової основи від заданих навантажень з використанням розрахункової схеми у вигляді півпростору, що лінійно деформується (задача Бусінеска). У такої моделі приймаються два припущення: перше – осідання $W(x, y)$ точки поверхні основи прямо пропорційне величині навантаження $p(x, y)$ в цій точці; друге – осідання поширюється також за межі площі завантаження, що можна спостерігати на рис. 1.

На відміну від методу моделювання ґрунтової основи за допомогою коефіцієнтів постелі C_1 і C_2 модель півпростору, що лінійно деформується, при спільному розрахунку споруди з основою дозволяє визначити, крім контактних напружень, напружено-деформований стан ґрунту всієї основи. При такому моделюванні основи за допомогою об'ємних скінчених елементів, в якості вихідних даних вводяться тільки модуль загальних деформацій E , коефіцієнт Пуассона ν та питома вага кожного шару R_0 (рис. 2). Товщина шару регулюється завданням геометрії скін-

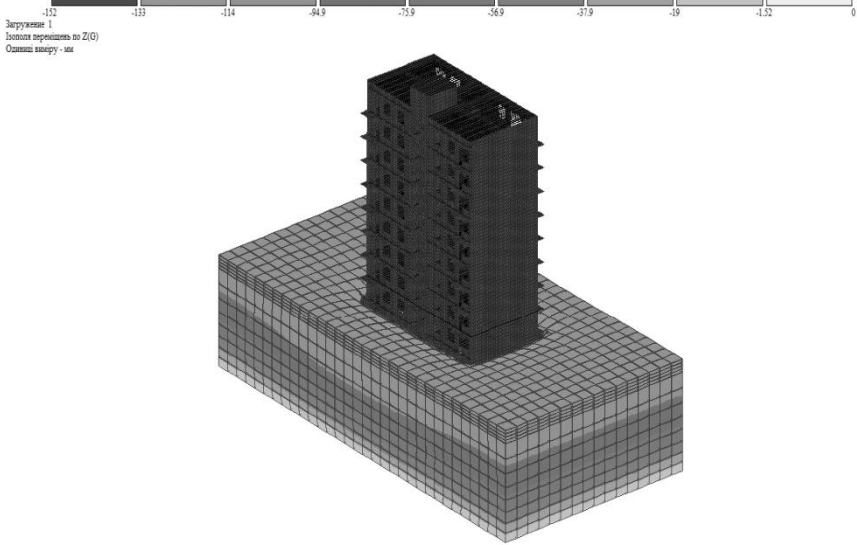


Рис. 1. Моделювання масиву ґрунту у вигляді основи, що лінійно деформується (модель пружного півпростору)

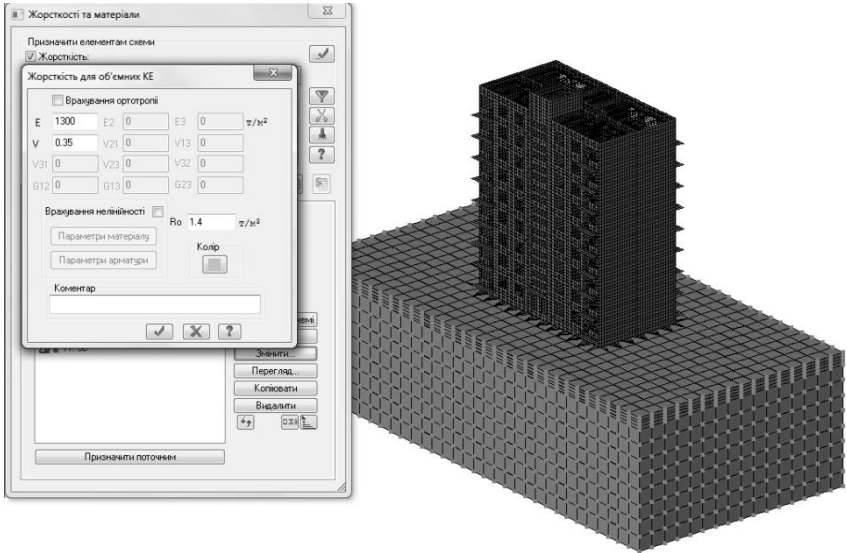


Рис. 2. Моделювання масиву ґрунту за допомогою об'ємних СЕ №34 та СЕ №36

чених елементів. При цьому розрахункова модель ґрунтової основи фактично зводиться до шару, що стискається, та має кінцеву міцність. Деформацію ґрунту за допомогою лінійної моделі можна описати лише до певного рівня зусиль, за межами яких лінійний зв'язок напружень та деформацій порушується. Нелінійність властивостей пояснюється утворенням незворотних структурних змін. Мікроруйнування є основною причиною дійсної нелінійності ґрунтової основи в області стискаючих напружень.

Однак для вирішення певного класу задач, пов'язаних з моделюванням впливів на будівлі з боку основ, а також при прогнозуванні змін напружено-деформованого стану конструкцій будівель, відображення ґрунтового середовища, у вигляді пружного півпростору достатньо [1]. При цьому дозволяється не враховувати фізичну нелінійність ґрунту, тому що кінцевим об'єктом дослідження є НДС конструкцій будівель. Процеси, які відбуваються в масиві ґрунту, та які призводять до зміни його НДС не розглядаються, тому що в даному випадку не стоїть завдання дослідження впливу цих процесів на НДС конструкцій будівель. Детальніше з результатами дослідження впливу фізичної нелінійності основи на зміну напружено-деформованого стану конструкцій будівлі можна ознайомитися у статті [11].

Модель ґрунтового масиву з об'ємних скінчених елементів, що пропонується та розглядається у цій статті, насамперед є лише середовищем для моделювання впливів з боку основи. Наприклад, моделювання впливу просадної воронки – зниженням міцності та характеристик жорсткості певних СЕ ґрунту.

Така модель врахування спільної роботи системи «основа-фундамент-споруда» дозволяє стадійно розраховувати та проводити дослідження напружено-деформованого стану, а також дає можливість коригування параметрів моделі на кожному етапі розрахунку.

Наприклад, при проведенні обстеження будівлі на предмет її подальшої реконструкції на першому етапі розрахунку оцінюється можливість та обсяги запланованої реконструкції без урахування

просідання. За результатами розрахунку на даному етапі цілком можна судити про можливість та масштаб реконструкції, а також про доцільності подальшого дослідження НДС будівлі. На другому етапі проводиться розрахунок будівлі спільно з основою. Отримані внутрішні зусилля і деформації (вертикальні і горизонтальні переміщення вузлів) порівнюються з гранично допустимими значеннями, які підраховуються згідно з чинними нормативними документами [8]. У разі, якщо отримані значення не перевищують гранично допустимих, виконується розрахунок системи «основа-фундамент-споруда» на просідання від можливого замочування (третій етап), при цьому методом підбору треба визначити найбільш несприятливий варіант розташування просадної воронки щодо заданої системи.

У повсякденній практиці досить часто зустрічається ситуація, коли інженери обмежуються результатами розрахунку тільки першого або першого-другого етапу, не враховуючи інженерно-геологічні умови майданчика, а також можливість замочування основи під подошвою фундаменту. Оскільки переважна частина житлових і громадських будівель була побудована і введена експлуатацію в 70-80-х роках минулого століття, експлуатаційний термін підземних водоносних інженерних комунікацій вичерпаний, що підвищує ризик аварії та небезпеку просідання.

Висновки. Запропонована модель пружного півпростору ґрунтової основи у вигляді тривимірного масиву з об'ємних універсальних СЕ №34 (СЕ №36):

- дозволяє проводити перевірочні розрахунки будівель і споруд на всіх етапах їх життєвого циклу, а також при прогнозуванні;
- відповідає всім вимогам діючих нормативних документів;
- апробована на практиці, має достатній рівень адекватності і відповідності натурним даним обстежень;
- для певного класу задач дозволяє не враховувати фізичну нелінійність ґрунтової основи.

Список використаних джерел

- 1.** Банах В.А. Статико-динамические расчетные модели зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях. – Запорожье: Издательство ЗГИА, 2012. – 334 с.
- 2.** Барабаш М.С. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства. – К.: Изд-во «Сталь», 2014. – 301 с.
- 3.** Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. – К.: Издательство «Факт», 2005. – 344 с.
- 4.** Клепиков С.Н., Трегуб А.С., Матвеев И.В. Расчет зданий и сооружений на просадочных грунтах. – К: Будивельник, 1987. – 200 с.
- 5.** Клепиков С.Н. Расчет сооружений на деформируемом основании. – К: НИИСК, 1996. – 203 с.
- 6.** Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – М.: Изд-во АСВ, 2011. – 736 с.
- 7.** Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування : ДБН В.2.1-10-2009. – [Чинний від 2009-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 104 с.
- 8.** Будинки і споруди на підроблюваних територіях і просідаючих грунтах : ДБН В.1.1-5-2000. – [Чинний від 2000-07-01]. – К.: Держбуд України, 2000. – 84 с.
- 9.** Кам'яні та армокам'яні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6-162:2010. – [Чинний від 2011-09-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 97 с.
- 10.** Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6-98:2009. – [Чинний від 2011-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.
- 11.** Барабаш М.С. Методы численного моделирования и расчета осадки здания / М.С. Барабаш // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – М.: Изд-во «АСВ», 2015. – Vol. 11, Issue 2 – С. 69-78.