

УДК 624. 042

## МОДЕЛЮВАННЯ СТІЙКОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ ГРУНТ-ФУНДАМЕНТ-БУДІВЛЯ ПРИ ДІЇ СИЛОВИХ ТА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ВПЛИВІВ

Пурденко Р. Р.<sup>1</sup>, Отрош Ю. А.<sup>1</sup>, Рашкевич Н. В.<sup>1</sup>, Сур'янінов В. М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний університет цивільного захисту України

<sup>2</sup>Одеська державна академія будівництва та архітектури

**Анотація.** З огляду на великий потенціал використання підземного простору під забудову постає питання забезпечення стійкості та надійності системи ґрунт-фундамент-будівля для вчасного виявлення ознак руйнувань, осідань ґрунтів або втоми матеріалу конструкцій. Виконаний аналіз літературних джерел та поставлені завдання досліджень. Актуальною науково-технічною задачею є розробка чисельної моделі та методики комплексного розрахунку лавиноподібного обвалення будівель та споруд при пожежі та вибухах з врахуванням особливостей роботи ґрунтів та їх властивостей. У ході досліджень за допомогою програмного забезпечення «ЛІРА-САПР» розроблена чисельна модель та проведено чисельне моделювання чотирьох поверхової стоянки для автомобілів (паркінг) з врахуванням особливостей роботи ґрунтів та їх властивостей, яка в подальшому буде використана для моделювання лавиноподібного обвалення при пожежі (вибуху).

Для цього першим етапом були проведені роботи з побудови моделі чотирьох поверхової стоянки для автомобілів (паркінг): створення початкового проекту (визначення розмірів та характеристик будівлі, вибір потрібних параметрів для моделювання – висота, ширина, довжина, розташування входів та виходів, розміщення автомобілів); створення 3D моделі в програмі САПФІР 3D (використання інструментів для побудови будівлі: стіни, стеля, підлоги, сходи, ліфти тощо, додавання елементів паркінгу); встановлення параметрів моделі (вказання матеріалів для будівельних елементів, встановлення параметрів для обчислення навантажень); аналіз моделі та вирішення проблем (перевірка моделі на наявність помилок, корекція параметрів для досягнення оптимальних результатів); виконання обчислень та аналіз результатів; оформлення звіту та висновків.

Другим етапом проведена перевірка моделі в ПК «ЛІРА-САПР», побудований ґрунтовий масив в модулі ґрунт. Роботи включають в себе: імпорт моделі у «ЛІРА-САПР»; аналіз моделі на відповідність (перевірка геометрії та розмірів будівлі у ЛІРА-САПР, перевірка наявності необхідних елементів конструкції та їх параметрів); створення ґрунтового масиву (запуск модуля ґрунт у складі ЛІРА-САПР, вибір параметрів для побудови ґрунтового масиву – тип ґрунту, глибина, параметри навантаження тощо); побудова ґрунтового масиву (використання інструментів модуля ґрунт для побудови масиву ґрунту під будівлею, вказання параметрів глибини, рівнів, властивостей ґрунтів тощо); аналіз впливу ґрунтового масиву на конструкцію (проведення розрахунків для визначення впливу ґрунтового тиску на конструкцію будівлі, аналіз результатів інженерно-геологічних характеристик ґрунтового масиву на необхідність корекції конструкції будівлі); корекція моделі та повторний аналіз (внесення змін у модель будівлі або параметри ґрунтового масиву, повторний аналіз впливу ґрунтового масиву на конструкцію для визначення відповідних змін та корекцій).

**Ключові слова:** система ґрунт-фундамент-будівля, моделювання, стійкості та надійності будівлі, ПК ЛІРА-САПР, САПФІР 3D.

## **SIMULATION OF STABILITY AND RELIABILITY OF THE SOIL-FOUNDATION-BUILDING SYSTEM UNDER FORCE AND HIGH-TEMPERATURE INFLUENCES**

**R. Purdenko<sup>1</sup>, Yu. Otrosh<sup>1</sup>, N. Rashkevich<sup>1</sup>, S. Suryaninov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*National University of Civil Defence of Ukraine*

<sup>2</sup>*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*

**Abstract.** Given the great potential of using the underground space under construction, the question arises of ensuring the stability and reliability of the soil-foundation-building system for the timely detection of signs of destruction, soil subsidence or material fatigue of structures. The analysis of literary sources and the set research tasks were carried out. An urgent scientific and technical task is the development of a numerical model and methodology for the complex calculation of avalanche-like collapse of buildings and structures in the event of fire and explosions, taking into account the peculiarities of the operation of soils and their properties. In the course of research, a numerical model was developed with the help of LIRA-SAPR software and a numerical simulation of a four-story car park (parking lot) was carried out, taking into account the peculiarities of the operation of soils and their properties, which will later be used to simulate an avalanche-like collapse in the event of a fire (explosion).

For this, the first stage was the construction of a model of a four-story car park (parking lot): creating an initial project (determining the dimensions and characteristics of the building, choosing the necessary parameters for modeling - height, width, length, location of entrances and exits, placement of cars); creating a 3D model in the SAPPHERE 3D program (using tools to build a building: walls, ceiling, floors, stairs, elevators, etc., adding parking elements); setting model parameters (specifying materials for building elements, setting parameters for calculating loads); model analysis and problem solving (checking the model for errors, correcting parameters to achieve optimal results); performing calculations and analyzing the results; preparation of the report and conclusions.

In the second stage, the model was checked in the PC "LIRA-SAPR", the soil array was built in the soil module. Works include: import of the model to "LIRA-SAPR"; analysis of the model for compliance (checking the geometry and dimensions of the building in LIRA-CAD, checking the presence of the necessary structural elements and their parameters); creation of a soil massif (starting the soil module as part of LIRA-SAPR, selecting parameters for building a soil massif - soil type, depth, load parameters, etc.); construction of the soil massif (using the tools of the soil module to construct the soil massif under the building, specifying parameters of depth, levels, soil properties, etc.); analysis of the impact of the soil mass on the structure (calculations to determine the impact of soil pressure on the building structure, analysis of the results of the engineering and geological characteristics of the soil mass on the need for correction of the building structure); model correction and re-analysis (making changes to the building model or soil mass parameters, re-analysis of the influence of the soil mass on the structure to determine the appropriate changes and corrections).

**Keywords:** soil-foundation-building system, modeling, stability and reliability of the building, PC LIRA-CAD, SAPPHERE 3D.

## 1 ВСТУП

Ріст міського населення, постійний тиск на доступну основу, а також потреби в забезпеченні безпеки в умовах повномасштабного вторгнення рф створюють виклик у пошуках нових методів забудови. Використання підземного простору є стратегічною відповіддю на цей виклик, оскільки дозволяє ефективно використовувати простір у межах міста, не погіршуючи екологічну ситуацію та не впливаючи на вже існуючі земельні ресурси.

Використання підземного простору дозволяє зберегти природні ландшафти та зелені зони, історичні пам'ятки та архітектурні об'єкти.

Крім того, підземна забудова може бути більш стійкою до природних катастроф, що забезпечує безпеку для мешканців та майна. Може сприяти економії енергоресурсів, завдяки природній ізоляції, що зменшує споживання енергії на опалення та охолодження.

Також, слід звернути увагу на актуальність використання підземного простору під час війни. Підземні приміщення можуть служити як укриття для цивільного населення під час атак та бомбардувань. Бути використані як місця евакуації та надання медичної допомоги пораненим. Виконувати функції захисту важливих об'єктів і інфраструктури, таких як командні пункти, електростанції, водні джерела тощо від нападів агресора. Забезпечити стратегічну перевагу військам за рахунок розміщення військ і обладнання в безпечних умовах, що важливо під час проведення військових операцій. Підземні споруди можуть використовуватися для розміщення секретних об'єктів, військових баз, депо зброї та інших стратегічно важливих об'єктів, забезпечуючи їх таємницю та захист від розвідки противника.

З огляду на великий потенціал використання підземного простору під забудову при вирішенні сучасних міських викликів в умовах сьогодення, постає питання забезпечення стійкості та надійності системи ґрунт-фундамент-будівля для вчасного виявлення ознак руйнувань, осідань ґрунтів або втоми матеріалу конструкцій.

## 2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Система ґрунт-фундамент-будівля в будівництві відіграє ключову роль у забезпеченні стійкості та надійності будівлі.

Фундамент виступає як опорна структура, яка передає вагу будівлі на ґрунт, розподіляючи навантаження рівномірно. Його розмір, форма та матеріал обираються залежно від ряду факторів, що залежать від характеристик ґрунту та величини навантаження будівлі. В умовах сьогодення ґрунти зазнають хімічного, фізичного та механічного впливу [1]. Фізичні та механічні параметри ґрунтів необхідно враховувати в комп'ютерних моделях.

Дослідником [2] детально розглянуті фактори, які впливають на вибір фундаменту, а саме: розташування та тип конструкції, величина та розподіл навантажень, умови ґрунту, доступ до будівельної техніки, вимоги до довговічності, вплив установки на прилеглі фундаменти, конструкції, людей, відносні витрати, місцеві будівельні практики. Дані фактори можуть бути враховані в наших наукових дослідженнях.

В роботі [3] за допомогою програмного забезпечення ABAQUS досліджені питання впливу розміру фундаменту на сейсмічність будівлі з урахуванням взаємодії ґрунт-фундамент-конструкція. Тривимірною чисельною моделлю враховувалася нелінійна поведінка ґрунтового середовища та структурних елементів. Для чисельної моделі були задані нескінченні граничні умови для моделювання меж вільного поля, а також розглянуті відповідні контактні елементи, здатні моделювати ковзання та поділ між елементами

фундаменту та ґрунту. Зроблено висновок, що розмір дрібнозаглибленого фундаменту впливає на динамічні характеристики та сейсмічну реакцію будівлі через взаємодію ґрунту, фундаменту та конструкції. В запропонованих дослідженнях пропонується використовувати ПК «ЛІРА САПР».

Глибина залягання фундаменту впливає на стійкість, надійність і довговічність будівлі в цілому, а також забезпечує захист від різних небезпечних факторів, таких як просідання, ерозія ґрунту та землетруси. В роботі [4] розроблена структурна модель, яка дозволяє комплексно оцінити фактори, що впливають на глибину закладення. Особливу увагу при проектуванні системи ґрунт-фундамент-конструкція варто приділити властивостям ґрунтів. Глибина залягання родючого та мінерального шарів, їх текучість, стійкість до опадів, стійкість до морозів – усі ці параметри можуть впливати на вибір типу фундаменту та способу його захисту.

Методи забезпечення стійкості можуть включати в себе застосування стійкіших будівельних матеріалів. В роботі [5] розглянуті питання стабілізації та модифікації ґрунтових умов за рахунок використання цементу.

Застосування геотекстилю розглянуто в роботах [6, 7], ґрунтових екранів в роботах [8, 9].

Для покращення міцності та стійкості фундаменту може використовуватися арматура, яка забезпечує додаткову підтримку конструкції [10, 11]. Утеплення фундаменту дозволяє запобігти замерзанню ґрунту та знижує ризик пошкодження під впливом морозів [11, 12].

Отже, система ґрунт-фундамент-будівля включає в себе комплексний підхід до вибору типу, конструкції та розташування фундаменту з урахуванням характеристик ґрунту, будівельних матеріалів та особливостей будівлі для забезпечення її стійкості та надійності. Всі ці аспекти потрібно враховувати під час моделювання, вибору ефективного методу забезпечення стійкості системи.

Поширеним методом моделювання взаємодії ефектів ґрунт-фундамент-конструкція проводиться за допомогою ряду пружних елементів - по одному на кожний ступінь свободи системи – коефіцієнти жорсткості та демпфування яких визначаються через еквівалентні пружини та демпфуючі елементи [13]. Однак, цей підхід може бути досить неточним, оскільки він не враховує можливий зв'язок між різними ступенями свободи та непружною реакцією, спричиненою пластичними деформаціями, які можуть розвиватися у ґрунті фундаменту навіть за відносно низьких рівнів навантаження.

Макроелементний підхід розглянутий у роботах [14, 15]. Підхід полягає в об'єднанні реакції системи фундамент-ґрунт в один обчислювальний вузол з використанням для її опису одного непружного рівняння, записаного в рамках узагальнених навантажень та переміщень. Це дозволяє досягти різкого зменшення ступенів свободи, зберігаючи при цьому здатність ефективно відтворювати нелінійний, незворотний і гістерезисний відгук фундаментів дрібного закладення, схильних до непропорційних, циклічних/динамічних умов навантаження.

Універсальним є підхід заснований на використанні методу кінцевих елементів для створення детальної моделі системи ґрунт-фундамент у «ближньому полі» – відповідній обмеженій ділянці ґрунту, обмеженій штучними межами – з використанням лінійної еластичності для моделювання реакції «далекого поля». У ближній зоні ґрунт може бути описаний або нелінійно-пружними, або повністю непружними моделями, здатними враховувати основні особливості реакції ґрунту в умовах циклічного/динамічного навантаження [16]. Основний недолік полягає у високих обчислювальних витратах, пов'язаних з дуже великою кількістю ступенів свободи, необхідні дискретизації об'єму ґрунту в ближньому полі, особливо в непружному режимі.

Незважаючи на те, що всі розрахункові програмні комплекси засновані на методі кінцевих елементів, у нормативній базі практично не існує рекомендацій щодо складання самої чисельної моделі ґрунтів та будівель, а також відсутні єдині рекомендації щодо вибору типів кінцевих елементів, які здатні забезпечити необхідну точність розрахунку чисельної моделі з урахуванням усіх основних чинників, що впливають на міцність та стійкість будівлі [17], а відповідно і ґрунтів.

Програмне забезпечення «ЛПРА-САПР» є перспективним інструментом проведення розрахунків та моделювання [18]. Для застосування даного інструменту актуальною науково-технічною задачею є розробка чисельних моделей та методик комплексного розрахунку лавиноподібного обвалення будівель та споруд при пожежі та вибухах з врахуванням особливостей роботи ґрунтів та їх властивостей.

### **3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ**

**Метою роботи** є розробка чисельної моделі та проведення чисельного моделювання лавиноподібного обвалення будівель та споруд при пожежі та вибухах з врахуванням особливостей роботи ґрунтів та їх властивостей.

Для досягнення поставленої мети потребували вирішення наступні завдання:

- провести аналіз наукових праць щодо забезпеченні стійкості та надійності будівлі в системі ґрунт-фундамент-будівля;
- з метою дослідження стійкості будівлі до прогресуючого обвалення розробити чисельну модель за допомогою ПК «САПФІР 3Д» на прикладі чотирьох поверхової стоянки для автомобілів (паркінг) для подальшого аналізу в програмному забезпеченні «ЛПРА-САПР».

### **4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ**

#### **4.1 Побудова чисельної моделі за допомогою «САПФІР 3Д» на прикладі чотирьох поверхової стоянки для автомобілів (паркінг).**

Для побудови моделі потрібно:

1. Підготовка аналітичних моделей будівельних конструкцій для подальшого розрахунку на міцність та аналізу конструкції в програмному забезпеченні «ЛПРА-САПР».
2. Документування та отримання креслень.
3. Виготовлення проектної документації відповідно до вимог системи проектної документації для будівництва на стадіях від проектної пропозиції до робочої документації.

За допомогою «САПФІР 3Д» – модуля САПФІР генератор або за допомогою звичних елементів таких як стіна, балка, плита, віконний і дверний проріз, паля то що – створюємо модель для подальшого розрахунку на міцність, аналізу будівельних конструкцій та розрахунку на прогресуюче обвалення в ПК «ЛПРА-САПР» (рис. 1).

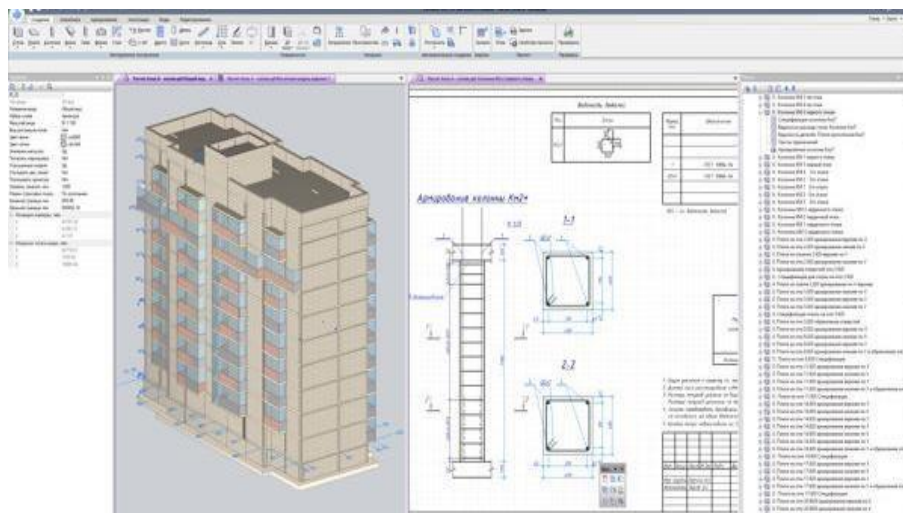


Рис. 1. Зображення моделі для розрахунку на міцність, аналізу будівельних конструкцій та розрахунку на прогресуюче руйнування

Методика створення чисельної моделі в «САПФІР 3Д».

1. Задаються жорсткості матеріалам у вигляді цегли, бетону, металу тощо. Стіни можуть задаватися як у вигляді навантаження так і в якості несучого елемента.

2. Задаються навантаження постійні, тимчасові, вітрові, навантаження від ґрунту, динамічні та ін.

3. Автоматично створюється розрахункове сполучення зусиль.

4. В підсистемі аналітика відбувається коригування вже розрахункової моделі, накладання обмежень (шарніри, жорсткі вставки, відсутність спирання тощо)

5. В підсистемі розрахункова модель відбувається створення ідеалізованої моделі за рахунок дотягування елементів до серединних ліній, пересікання елементів (колонна представлена в розрахунковій моделі вже як стержень, а стіна чи плита як оболонка), також тут відбувається налаштування сітки для розбивки скінченних елементів.

На рисунку 2 зображено приклад плану підвального поверху в ПК «САПФІР 3Д». Стіни виконані у вигляді несучого елемента (оболонка), колони у вигляді стержня, які спираються на куццовий пальовий фундамент, стіни спираються на ростверк пальового фундаменту).

На рисунку 3. наведено приклад плану типового поверху, який виконаний в ПК «САПФІР 3Д».

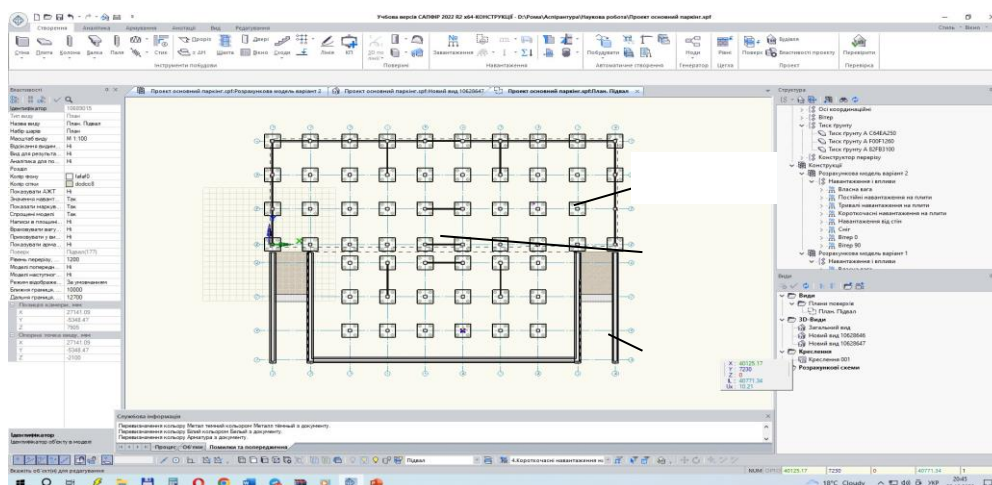


Рис. 2. Загальний вигляд підвального поверху в «САПФІР 3Д»

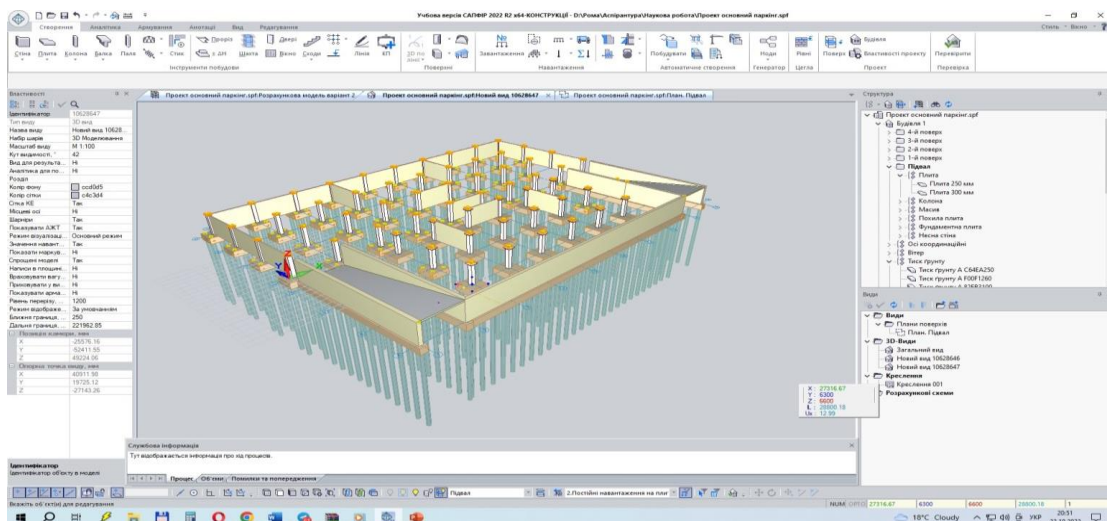


Рис. 3. План типового поверху виконаний в «САПФІР 3Д»

На рисунку 4 наведений загальний вигляд моделі чотирьох поверхової стоянки для автомобілів (паркінг), на рисунку 5 – в підсистемі аналітика, на рисунку 6 – в підсистемі розрахункова модель.

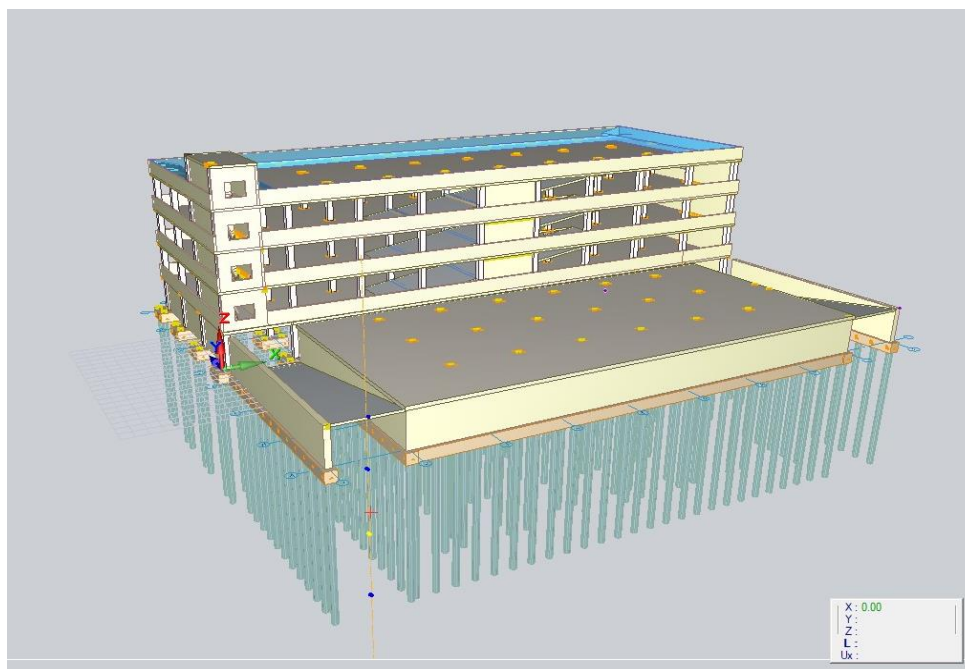
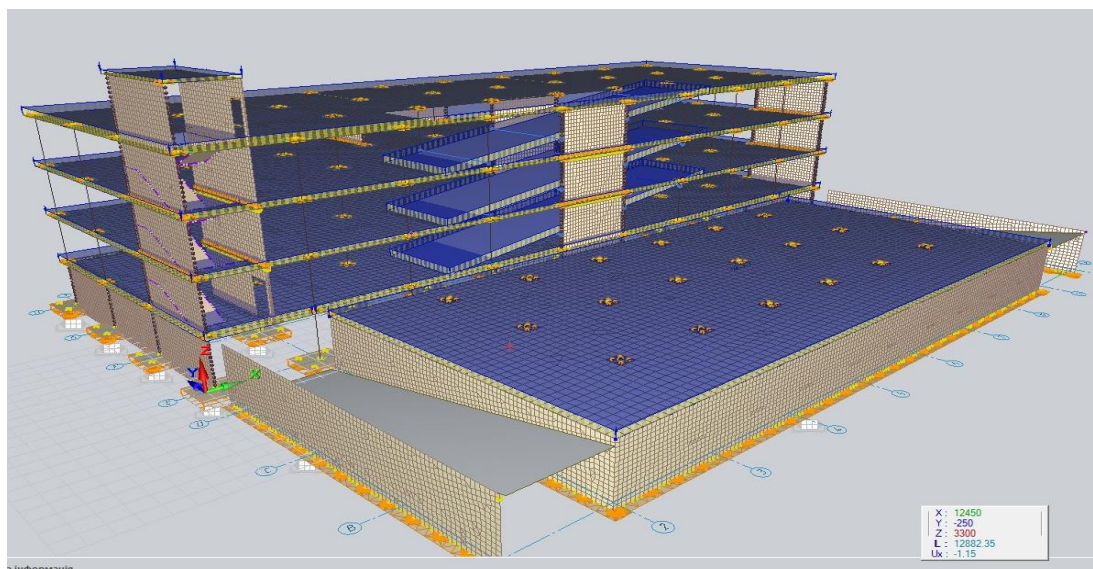
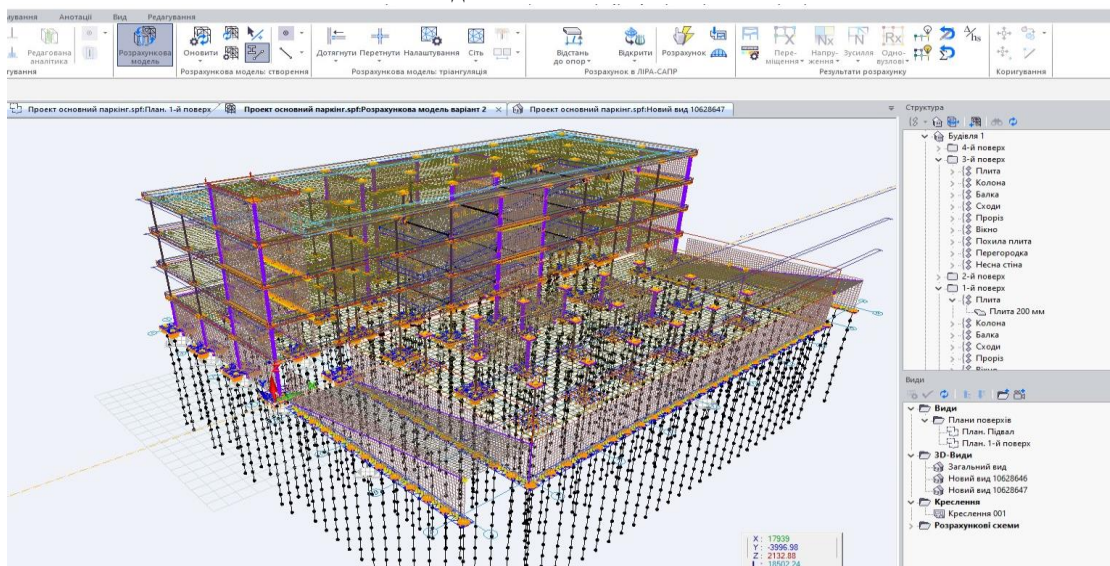


Рис. 4. Загальний вигляд моделі чотирьох поверхової стоянки для автомобілів (паркінг)

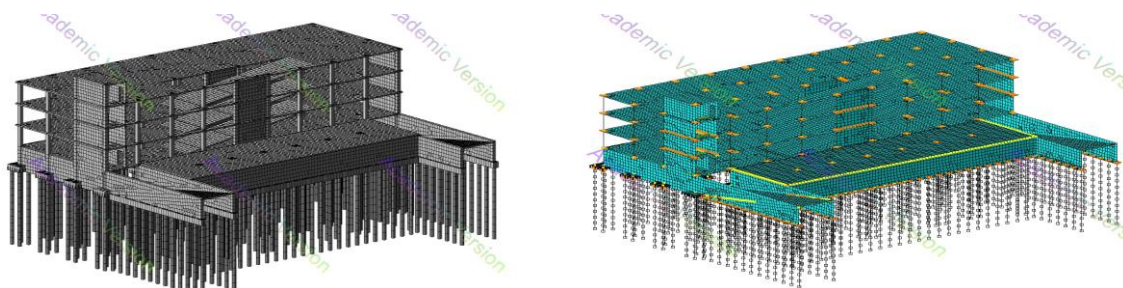


**Рис. 5.** Загальний вигляд моделі чотирьох поверхової стоянки для автомобілів (паркінг) в підсистемі аналітика.



**Рис. 6.** Загальний вигляд моделі чотирьох поверхової стоянки для автомобілів (паркінг) в підсистемі розрахункова модель

Після перевірки всіх даних, автоматично відбувається передача моделі в ПК ЛІРА «САПР» ( рис. 7).



**Рис. 7.** Загальний вигляд після експорту з ПК «САПФІР 3Д» моделі чотирьох поверхової стоянки для автомобілів (паркінг)



## 4.2 Перевірка моделі в ПК «ЛІРА-САПР», побудова ґрунтового масиву в модулі ґрунт.

Після експорту моделі із програми «САПФІР 3Д» в ПК «ЛІРА-САПР» необхідно перевірити правильність задання параметрів, необхідних для розрахунку моделі, та при необхідності відкоригувати.

Як приклад, для підбору арматури, розрахунок буде проведений при пружній роботі матеріалу (залізобетон). Для визначення попередніх прогинів розрахунок проводимо із зменшенням модуля деформації на відповідний коефіцієнт: для вертикальних 0,6; для горизонтальних 0,2.

Для визначення більш реальних переміщень (прогини) розрахунок необхідно проводити у фізичній та геометричній нелінійній постановці.

Для врахування спільної роботи будівлі і ґрунту та визначення коефіцієнтів постелі потрібно використовувати модуль ґрунт.

В даному модулі створюється 3Д масив ґрунту за допомогою свердловин згідно інженерно-геологічним вишукуванням.

Виконується приєднання моделі ґрунту до розрахункової моделі й в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» відбувається вже розрахунок жорсткості паль чи коефіцієнт постелі фундаментної плити (рис. 8).

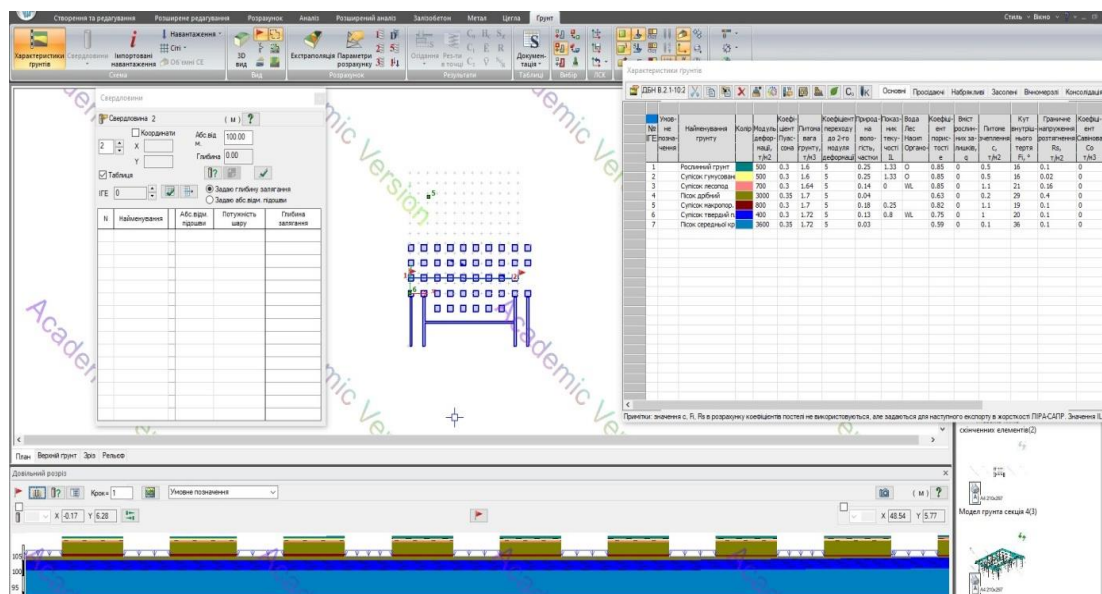


Рис. 8. Інтерфейс побудови ґрунтового масиву в модулі ґрунт

Реакції від пружної основи ґрунту замінені на в'язі з жорстким закріпленням.

Вид схеми, яка прийнята як приклад для розрахунку на прогресуюче руйнування (рис. 9), складається з 42691 вузлів, 48560 елементів.

Типи скінчених елементів прийнятих в даній розрахунковій схемі:

- стержні (колони) тип 10 універсальний просторовий стержневий KE;
- пластини (стіни, плити) тип 42 універсальний трикутний KE та тип 42 універсальний чотирикутний KE.

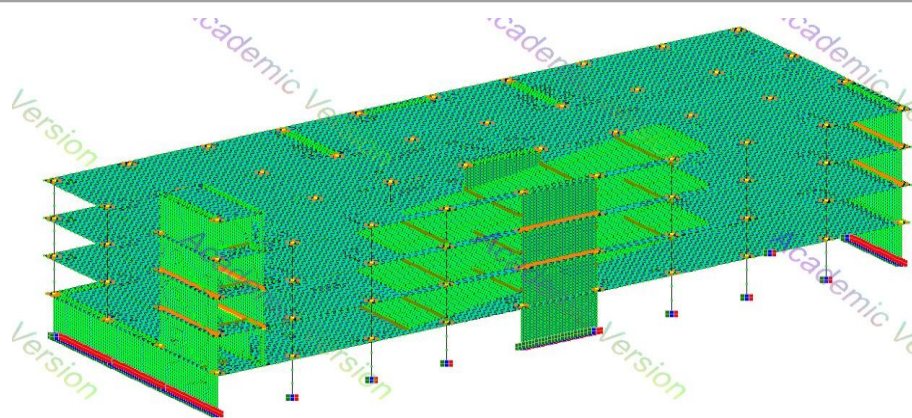


Рис. 9. Схема спрощена модель чотирьох поверхової стоянки для автомобілів (паркінг)

## 5 ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз наукових праць щодо забезпеченні стійкості та надійності будівлі в системі ґрунт-фундамент-будівля. З огляду на великий потенціал використання підземного простору під забудову постає питання забезпечення стійкості та надійності системи ґрунт-фундамент-будівля для вчасного виявлення ознак руйнувань, осідань ґрунтів або втоми матеріалу конструкцій. Виконаний аналіз літературних джерел та поставлені завдання досліджень. Актуальною науково-технічною задачею є розробка чисельної моделі та методики комплексного розрахунку лавиноподібного обвалення будівель та споруд при пожежі та вибухах з врахуванням особливостей роботи ґрунтів та їх властивостей.

Встановлено, що різноманітність ґрунтових умов та особливостей будівель вимагає індивідуального підходу до розробки моделі. Саме підбір параметрів моделі, які відповідають конкретним умовам, в модулі САПФІР 3Д є важливим етапом у забезпеченні адекватності результатів та розробки ефективних заходів безпеки системи ґрунт-фундамент-будівля при дії силових та високотемпературних впливів.

2. У ході досліджень за допомогою програмного забезпечення «ЛІРА-САПР» розроблена чисельна модель та проведено чисельне моделювання чотирьох поверхової стоянки для автомобілів (паркінг) з врахуванням особливостей роботи ґрунтів та їх властивостей, яка в подальшому буде використана для моделювання лавиноподібного обвалення при пожежі (вибуху).

Для цього першим етапом були проведені роботи з побудови моделі чотирьох поверхової стоянки для автомобілів (паркінг): створення початкового проекту (визначення розмірів та характеристик будівлі, вибір потрібних параметрів для моделювання – висота, ширина, довжина, розташування входів та виходів, розміщення автомобілів); створення 3D моделі в програмі САПФІР 3Д (використання інструментів для побудови будівлі: стіни, стеля, підлоги, сходи, ліфти тощо, додавання елементів паркінгу); встановлення параметрів моделі (вказання матеріалів для будівельних елементів, встановлення параметрів для обчислення навантажень); аналіз моделі та вирішення проблем (перевірка моделі на наявність помилок, корекція параметрів для досягнення оптимальних результатів); виконання обчислень та аналіз результатів; оформлення звіту та висновків.

Другим етапом проведена перевірка моделі в ПК «ЛІРА-САПР», побудований ґрунтовий масив в модулі ґрунт. Роботи включають в себе: імпорт моделі у «ЛІРА-САПР»; аналіз моделі на відповідність (перевірка геометрії та розмірів будівлі у ЛІРА-САПР, перевірка наявності необхідних елементів конструкції та їх параметрів); створення ґрунтового масиву (запуск модуля ґрунт у складі ЛІРА-САПР, вибір параметрів для побудови ґрунтового масиву – тип ґрунту, глибина, параметри

навантаження тощо); побудова ґрунтового масиву (використання інструментів модуля ґрунт для побудови масиву ґрунту під будівлею, вказання параметрів глибини, рівнів, властивостей ґрунтів тощо); аналіз впливу ґрунтового масиву на конструкцію (проведення розрахунків для визначення впливу ґрунтового тиску на конструкцію будівлі, аналіз результатів інженерно-геологічних характеристик ґрунтового масиву на необхідність корекції конструкції будівлі); корекція моделі та повторний аналіз (внесення змін у модель будівлі або параметри ґрунтового масиву, повторний аналіз впливу ґрунтового масиву на конструкцію для визначення відповідних змін та корекцій).

## 6 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори статті «**Моделювання стійкості та надійності системи ґрунт-фундамент-будівля при дії силових та високотемпературних впливів**» не мають відповідних фінансових чи нефінансових інтересів, які слід розкривати.

### Література

1. Рашкевич Н.В. Аналіз сучасного стану попередження надзвичайних ситуацій на територіях України, які зазнали ракетно-артилерійських уражень. Комунальне господарство міст, 2023. Том 4, випуск 178. С. 232–251. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-232-251>.
2. Poulos, H.G. (2016). Tall building foundations: design methods and applications. *Innovative Infrastructure Solutions*, 1. 1–51.
3. Van Nguyen, Q., Fatahi, B., & Hokmabadi, A. S. (2016). The effects of foundation size on the seismic performance of buildings considering the soil-foundation-structure interaction. *Structural Engineering and Mechanics*
4. Кундрат, Т. М., Літницький, С. І., Пугачов, Є. В., & Зданевич, В. А. (2022). Structural model of determining of laying foundation depth. *Сучасні проблеми моделювання*, (23). 115–121.
5. Rasouli, H., Takhtfirouzeh, H., Taghavi Ghalesari, A., & Hemati, R. (2017). Bearing capacity improvement of shallow foundations using cement-stabilized sand. *Key engineering materials*, 723. 795–800.
6. Shirazi, M.G., Rashid, A.S.B.A., Nazir, R.B., Rashid, A.H.B.A., Moayedi, H., Horpibulsuk, S., & Samingthong, W. (2020). Sustainable soil bearing capacity improvement using natural limited life geotextile reinforcement—A review. *Minerals*, 10(5). 479
7. Adajar, M. A., Gudes, M., & Tan, L. (2019). The use of woven geotextile for settlement reduction of spread footing on granular soil. *GEOMATE Journal*, 16(58). 211–217.
8. Razuvaev, D.A., Chakhlov, M.G., Soloviova, V.Y., & Karpachevsky, G.V. (2022). Injection compositions for creating impervious screen for roadbed foundation. *Transportation Research Procedia*, 61. 621–626.
9. François, S., Schevenels, M., Thyssen, B., Borgions, J., & Degrande, G. (2012). Design and efficiency of a composite vibration isolating screen in soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 39. 113–127.
10. Bouassida, M., Fattah, M.Y., & Mezni, N. (2022). Bearing capacity of foundation on soil reinforced by deep mixing columns. *Geomechanics and Geoengineering*, 17(1). 309–320.
11. Bonić, Z., Ćurčić, G. T., Trivunić, M., Davidović, N., & Vatin, N. (2015). Some methods of protection of concrete and reinforcement of reinforced-concrete foundations exposed to environmental impacts. *Procedia Engineering*, 117. 419–430.

12. Stepanova, I.V., Abu-Khasan, M., & Soloviova, V.Y. (2015). Innovative Structural-Heat-Insulating Concrete for Insulation and Stability Rise of Frozen Foundation Soils. Scientific Publication, (6/6). 387
13. Harte, M., Basu, B., Nielsen, S. (2012). Dynamic analysis of wind turbines including soil-structure interaction. *Eng Struct*, 45. 509–18.
14. Grange, S., Botrugno, L., Kotronis, P., Tamagnini, C. (2011). The effects of Soil–Structure Interaction on a reinforced concrete viaduct. *Earthq Eng Struct Dyn*, 40(1). 93–105.
15. Salciarini, D., Tamagnini, C. (2009). A hypoplastic macroelement model for shallow foundations under monotonic and cyclic loads. *Acta Geotechnica*, 4(3). 163–76.
16. Jeremic, B., Jie, G., Preisig, M., Tafazzoli, N. (2009). Time domain simulation of soil–foundation–structure interaction in non-uniform soils. *Earthq Eng Struct Dyn*, 38(5). 699–718.
17. Отрош Ю.А., Ковальов А.І., Пурденко Р.Р., Рашкевич Н.В., Майборода Р.І. Дослідження вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій для підвищення рівня пожежної безпеки // Проблеми надзвичайних ситуацій. Х.: НУЦЗУ. 2022. № 36. С.102-122.
18. Ковальов А.І., Отрош Ю.А., Томенко В.І., Качкар Є.В., Майборода Р.І. Оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій // Вісті Донецького гірничого інституту. Донецьк: ДВНЗ «ДНТУ». 2022. № 2. С.43-53.

## References

1. Rashkevych, N.V. (2023). Analiz suchasnoho stanu poperedzhennya nadzvychnykh sytuatsiy na terytoriyakh Ukrainy, yaki zaznaly raketno-artyleryys'kykh urazhen'. *Komunal'ne hospodarstvo mist*. 4 (178). 232–251. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-232-251>
2. Poulos, H.G. (2016). Tall building foundations: design methods and applications. *Innovative Infrastructure Solutions*, 1. 1–51.
3. Van Nguyen, Q., Fatahi, B., & Hokmabadi, A.S. (2016). The effects of foundation size on the seismic performance of buildings considering the soil-foundation-structure interaction. *Structural Engineering and Mechanics*
4. Kundrat, T.M., Litnitsky, S.I., Pugachev, E.V., & Zdanevich, V.A. (2022). Structural model of determining of laying foundation depth. *Suchasni problemy modelyuvannya*, (23). 115–121.
5. Rasouli, H., Takhtfirouzeh, H., Taghavi Ghalesari, A., & Hemati, R. (2017). Bearing capacity improvement of shallow foundations using cement-stabilized sand. *Key engineering materials*, 723. 795–800.
6. Shirazi, M.G., Rashid, A.S.B.A., Nazir, R.B., Rashid, A.H.B.A., Moayedi, H., Horpibulsuk, S., & Samingthong, W. (2020). Sustainable soil bearing capacity improvement using natural limited life geotextile reinforcement—A review. *Minerals*, 10(5). 479.
7. Adajar, M. A., Gudes, M., & Tan, L. (2019). The use of woven geotextile for settlement reduction of spread footing on granular soil. *GEOMATE Journal*, 16(58). 211–217.
8. Razuvaev, D.A., Chakhlov, M.G., Soloviova, V.Y., & Karpachevsky, G.V. (2022). Injection compositions for creating impervious screen for roadbed foundation. *Transportation Research Procedia*, 61. 621–626.
9. François, S., Schevenels, M., Thyssen, B., Borgions, J., & Degrande, G. (2012). Design and efficiency of a composite vibration isolating screen in soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 39. 113–127.
10. Bouassida, M., Fattah, M.Y., & Mezni, N. (2022). Bearing capacity of foundation on soil reinforced by deep mixing columns. *Geomechanics and Geoengineering*, 17(1). 309–320.

11. Bonić, Z., Ćurčić, G. T., Trivunić, M., Davidović, N., & Vatin, N. (2015). Some methods of protection of concrete and reinforcement of reinforced-concrete foundations exposed to environmental impacts. *Procedia Engineering*, 117. 419–430.
12. Stepanova, I.V., Abu-Khasan, M., & Soloviova, V.Y. (2015). Innovative Structural-Heat-Insulating Concrete for Insulation and Stability Rise of Frozen Foundation Soils. *Scientific Publication*, (6/6). 387.
13. Harte, M., Basu, B., Nielsen, S. (2012). Dynamic analysis of wind turbines including soil-structure interaction. *Eng Struct*, 45. 509–18.
14. Grange, S., Botrugno, L., Kotronis, P., Tamagnini, C. (2011). The effects of Soil–Structure Interaction on a reinforced concrete viaduct. *Earthq Eng Struct Dyn*, 40(1). 93–105.
15. Salciarini, D., Tamagnini, C. (2009). A hypoplastic macroelement model for shallow foundations under monotonic and cyclic loads. *Acta Geotechnica*, 4(3). 163–76.
16. Jeremic, B., Jie, G., Preisig, M., Tafazzoli, N. (2009). Time domain simulation of soil–foundation–structure interaction in non-uniform soils. *Earthq Eng Struct Dyn*, 38(5). 699–718.
17. Otrosh Yu.A., Kovalov A.I., Purdenko R.R., Rashkevych N.V., Maiboroda R.I. *Doslidzhennia vohnestiikosti vohnezakhyshchenykh zalizobetonnykh konstruktsii dlia pidvyshchennia rivnia pozhezhnoi bezpeky // Problemy nadzvychainykh sytuatsii. Kh.: NUTsZU. 2022. № 36. S.102-122.*
18. Kovalov A.I., Otrosh Yu.A., Tomenko V.I., Kachkar Ye.V., Maiboroda R.I. *Otsiniuvannia vohnestiikosti vohnezakhyshchenykh stalevykh konstruktsii // Visti Donetskoho hirnychoho instytutu. Donetsk: DVNZ «DNTU». 2022. № 2. S.43-53.*

**Пурденко Роман Русланович**

Національний університет цивільного захисту України,  
аспірант

вул. Чернишевська, 94, Харків, Україна, 61023

ORCID: 0000-0001-6467-4133

**Отрош Юрій Анатолійович**

Національний університет цивільного захисту України,  
д.т.н., професор

вул. Чернишевська, 94, Харків, Україна, 61023

yuriiyotrosh@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0698-2888

**Рашкевич Ніна Владиславівна**

Національний університет цивільного захисту України,  
доктор філософії, старший викладач

вул. Чернишевська, 94, Харків, Україна, 61023

nine291085@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5124-6068

**Сурянінов В'ячеслав Миколайович**

Одеська державна академія будівництва та архітектури,  
асистент

вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029

citykboss@odaba.edu.ua

ORCID: 0009 0006 9620 4287

*Для посилань:*

Пурденко Р. Р., Отрош Ю. А., Рашкевич Н. В., Сурянінов В. М. Моделювання стійкості та надійності системи ґрунт-фундамент-будівля при дії силових та високотемпературних впливів. *Механіка та математичні методи*, 2024. Т. VI. № 1. С. 36–48.

*For references:*

R. Purdenko, Yu. Otrosh, N. Rashkevich, S. Suryaninov (2024). Simulation of stability and reliability of the soil-foundation-building system under force and high-temperature influences. *Mechanics and Mathematical Methods*. V(2). 36–48.